

Bölgesel Otomatik TEİ Haritalaması ve Sürekli Gözlenmesi

Proje No: 109E055

Prof.Dr. Feza ARIKAN

Prof. Dr. Orhan ARIKAN

Doç. Dr. Cenk TOKER

Yrd. Doç. Dr. Umut SEZEN

Dr. Müh. Kd. Alb. Onur LENK

Müh. Alb. Mustafa KURT

Doç. Dr. Müh. Alb. Ali KILIÇOĞLU

Dr. Müh. Yzb. Bahadır AKTUĞ

Müh. Yzb. Ayhan CİNGÖZ

Müh. Ütğm. Melih Şükrü AYSEZEN

Müh. Tğm. Yasin ERKAN

Müh. Ütğm. Soner ÖZDEMİR

Müh. Ütğm. Selçuk PEKER

EKİM 2012

ANKARA

ÖNSÖZ

Türkiye iyonküresinin YKS alıcı ağından kestirilen TEİ değerleri ile görüntülenmesi amacıyla sunulan 109E055 projesinde, Ocak 2001-Eylül 2012 ayları arasında TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağlarından toplanan RINEX dosyalarından özgün IONOLAB-TEC kestirimleri yapılmıştır. TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağları için IONOLAB-TEC değerlerinden yıllık saatiçi parametrik olasılık yoğunluk fonksiyonları ve geniş anlamda durağanlık süreleri kestirilmiştir. Türkiye üzerinde iyonküre yönsemesinin doğrusal çokterimli modeline uyduğu gözlenmiş ve katsayılar PSO eniyilemesi ile bulunmuştur. Rassal alan modelinin yarıdeğişinti serimi teorik modeli için Matern fonksiyonu önerilmiş ve parametreler PSO ile eniyilenerek belirlenmiştir. Uzaklığın Tersisi ile Ağırlıklandırma ve Doğrusal Yönsemeli Evrensel Krigleme ile yakın gerçek zamanlı TEİ haritaları yapılmıştır. IRI-Plas modeli gerek IONOLAB-TEC gerek GIM-TEİ değerleri kullanılarak özgün algoritmalarla eniyilenmiş ve Türkiye üzerinde model temelli sanal iyonosonda olarak çalıştırılmıştır. IRI-Plas ETEİ hesaplamalarını otomatik yapabilecek şekilde genelleştirilmiş ve Türkiye üzerinde iyonküre F2 katmanı kritik frekansı ve ençok iyonlaşma yüksekliği model ve haritaları oluşturulmuştur. Dört boyutlu elektron yoğunluğu değerleri ve Türkiye üzerinde dağılımları IONOLAB-STEC kullanarak bulunmuştur. Sismik hareketliliğin $M=4,5$ üzerinde depremlerde KAF üzerinde depremden 2 ile 5 gün öncesinden bozulmalar yaptığı gözlenmiştir. Türkiye üzerinde deprem uyarı sinyali oluşturulması için TUSAGA-Aktif ağı ile istatistiksel sezim kuramına dayalı özgün bir uyarlamalı algoritmanın geliştirilmesine başlanmıştır. 109E055 nolu projede 13 yüksek lisans ve doktora öğrencisine burs desteği sağlanmıştır. Eylül 2009 - Ekim 2012 arasında üç yüksek lisans ve bir doktora öğrencisi tezlerini tamamlamıştır. Üç yüksek lisans ve bir doktora öğrencisi tez çalışmalarına devam etmektedir. Dört davetli konuşma verilmiş, uluslararası konferans ve çalıştaylarda 21 bildiri, ulusal konferans ve çalıştaylarda 9 bildiri sunulmuştur. 105E171 projesinin devamında ve 109E055 projesinde toplam altı makale yayınlanmıştır. İki makale hakem incelemesindedir. Proje çıktıları ve başarı ölçütleri alanında özgün teknikler ve yazılımlar geliştirilmesi, öğrenci yetiştirilmesi ve desteklenmesi, ve Türkiye üzerindeki iyonkürenin yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde görüntülenmesi ve veri tabanı oluşturulması başarıyla tamamlanmıştır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
SÖZLÜK	xv
1 GİRİŞ	1
2 GENEL BİLGİLER	16
2.1 İyonküre	16
2.2 International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas)	20
2.3 ICEPAC ve HF-PRE	21
2.4 YKS-TEİ ve IONOLAB-TEC	23
2.5 TUSAGA ve TUSAGA-Aktif	27
2.6 TEİ İstatistik Çalışmaları	33
2.7 TEİ Haritalaması	39
2.8 Veri Tabanı	43
2.9 Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT)	44
2.10 Deprem Uyarı Sinyali	45
3 YÖNTEM	47
3.1 Çevrimiçi, Yakın Gerçek Zamanlı IONOLAB-TEC Kestirimi	47
3.2 YKS Ağları için Özgün Uzay-Zaman TEİ Aradeğerlemesi	53
3.3 W-indis Haritalaması	55
3.4 IRI-Plas-G	55
3.5 IRI-Plas-Opt	55
3.6 IRI-Plas-Opt ile İyonküre Tomografisi	57
3.7 IRI-Plas-STEÇ Yazılımı	57
3.8 Bölgesel İyonküre Tomografisi: OPT-IRI-Plas	57
3.9 TEİ İstatistikleri ve Bölgesel Modeller	58

3.10 Bölgesel TEİ Yönlülüğü İncelemesi	61
3.10.1 Sentetik Yüzeyler Üzerinden Yönbağımlılık İncelemesi	63
3.10.2 Yönlü Krigleme Tekniği	63
3.11 Rassal Alan Modellemesi	69
3.11.1 Türkiye Coğrafyasında Yönseme Modellemesi	70
3.11.2 Türkiye Coğrafyasında YDS Modellemesi	73
3.11.3 Güneş Doğrultulu Koordinatlarda TDA ile Değişkenliğin Modellemesi	74
3.12 Veri Tabanı	75
3.13 Bölgesel Otomatik Haritalama	76
3.14 Deprem Alarm Sinyalinin Oluşturulması	77
4 BULGULAR	83
4.1 İş Paketi 1	83
4.1.1 İş Paketi 1 Tanımı	83
4.1.2 İş Paketi 1 Bulguları	83
4.2 İş Paketi 2	102
4.2.1 İş Paketi 2 Tanımı	102
4.2.2 İş Paketi 2 Bulguları	102
4.3 İş Paketi 3	107
4.3.1 İş Paketi 3 Tanımı	107
4.3.2 İş Paketi 3 Bulguları	108
4.4 İş Paketi 4	114
4.4.1 İş Paketi 4 Tanımı	117
4.4.2 İş Paketi 4 Bulguları	117
4.5 İş Paketi 5	118
4.5.1 İş Paketi 5 Tanımı	118
4.5.2 İş Paketi 5 Bulguları	118
4.6 İş Paketi 6	121
4.6.1 İş Paketi 6 Tanımı	124
4.6.2 İş Paketi 6 Bulguları	124
5 SONUÇ ve ÖNERİLER	135
KAYNAKLAR	138
EK-1	149

EK-2162

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Elektron yoğunluğunun yükseklikle tipik değişimi.....	17
2.2 TUSAGA ağı coğrafi konumları	27
2.3 TUSAGA-Aktif ağı coğrafi konumları	35
2.4 Türkiye diri fay haritası (MTA) ve TUSAGA-Aktif istasyonları (kırmızı noktalar)	46
3.1 Döngü kopması tamiri algoritması.....	50
3.2 tubi istasyonu, 10 Eylül 2012 günü yerel koordinatlarda YKS uydu izleri; Yanca 0^0 açısı yerel güneyi göstermektedir.....	51
3.3 tubi istasyonu, 10 Eylül 2012 günü yerel koordinatlarda 28 nolu YKS uydu izleri.....	52
3.4 tubi istasyonu, 10 Eylül 2012 günü yerel koordinatlarda 32 nolu YKS uydu izleri.....	52
3.5 IRI-Plas-Opt yöntemi şematik gösterimi	56
3.6 <i>STEC4</i> hesaplama doğrultusunun şematik gösterimi	59
3.7 OPT-IRI-Plas yöntemi şematik gösterimi	59
3.8 Türkiye istatistiksel tanımlama bölgeleri.....	60
3.9 22 Temmuz 2009, 1200 GS, a) deneysel Y-YDS, b) deneysel Z-YDS, c) teorik Y-YDS, d) teorik Z-YDS.....	65
3.10 Noktalar arasındaki uzaklık ve yön.	66
3.11 a) Yön bağımsız YDS, b) Geometrik yön bağımlı YDS, c) Geometrik yön bağımlı YDS.....	66
3.12 15 Temmuz 2009 günü 1200 GS'deki MIT Madrigal veritabanından elde edilen TEİ ölçüm noktaları ve çemberler.	67
3.13 <i>STEC</i> ile yönbağımlılık incelemesi, a) Türkiye üzerinde <i>STEC</i> hesaplama hatlarının şematik gösterimi, b) yerel kuzeyle yapılan β açısı ve yerel başucu açısına göre tanımlanan yükseklik açısı α	68
3.14 27 Mart 2010 a) 1600 ve b) 1800 GS'de GIM haritaları, ve sırasıyla, c) ve d) PSO eniyilemesi ile bulunan parametrelerle elde edilen TEİ yüzeyi, e) ve f) DOEK eniyilemesi ile bulunan parametrelerle elde edilen TEİ yüzeyi .	71

3.15 Bölgesel yönseme yüzeyleri: a) Sabit, b) Doğrusal, c) Kuadratik	72
3.16 Türkiye'nin jeolojik yapısı (MTA)	78
3.17 İstatistiksel deprem alarm sinyali belirlenmesi ve uyarlamalı eşik değerinin oluşturulması	81
4.1 a) 2001-2011 yılları arası GLS sayısı b) 2001-2008 yılları arası tubi istasyonu IONOLAB-TEC değerleri c) 2009-2011 yılları arası istn istasyonu IONOLAB-TEC değerleri.	86
4.2 mate istasyonu, 6 Nisan 2009, 3 numaralı uydu için döngü kopması tamiri a) döngü kopması olan L4, b) P4, c) döngü kopması tamir edilmiş L4, d) döngü kopması tamir edilmiş ve P4 verilerine ölçeklenmiş L4, e) döngü kopması ve kısa süreli kesintileri tamir edilmemiş <i>VTEC</i> , f) döngü kopması ve kısa süreli kesintileri tamir edilmiş <i>VTEC</i>	86
4.3 mate istasyonu, 6 Nisan 2009 günü a) döngü kopması tamir edilmeden IONOLAB-TEC, b) döngü kopması tamir edildikten sonra kestirilen ve kısa süreli aradeğerlemesi yapılmış IONOLAB-TEC.	88
4.4 semd istasyonu, 27 Mart 2011 sakin günü farklı uydu yörünge bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	88
4.5 semd istasyonu, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü farklı uydu yörünge bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	89
4.6 semd istasyonu, 23 Ekim 2011, Van Depremi günü farklı uydu yörünge bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	89
4.7 semd istasyonu, 23 Mart 2011 sakin günü farklı uydu yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	89
4.8 semd istasyonu, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü farklı uydu yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	90
4.9 semd istasyonu, 23 Ekim 2011, Van Depremi günü farklı uydu yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	90
4.10 semd istasyonu, 27 Mart 2011 sakin günü farklı IONEX dosyalarından hesaplanan alıcı yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	91
4.11 semd istasyonu, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü farklı IONEX dosyalarından hesaplanan alıcı yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	91

4.12	semd istasyonu, 23 Ekim 2011, Van Depremi günü farklı IONEX dosyalarından hesaplanan alıcı yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.	92
4.13	tubi istasyonu, 8 Ekim 2012 günü IONOLAB-TEC kestirimleri ve hesaplanmanın yapıldığı zaman IGS sitesinde bulunan tubi koordinatları için IONEX-GIM değerleri.	92
4.14	tubi istasyonu, 9 Ekim 2012 günü IONOLAB-TEC kestirimleri ve hesaplanmanın yapıldığı zaman IGS sitesinde bulunan tubi koordinatları için IONEX-GIM değerleri.	92
4.15	tubi istasyonu, 10 Ekim 2012 günü IONOLAB-TEC kestirimleri ve hesaplanmanın yapıldığı zaman IGS sitesinde bulunan tubi koordinatları için IONEX-GIM değerleri.	94
4.16	game istasyonu, 31 Mart 2011 STI-TEC1 IONOLAB-TEC aradeğerlemeleri a) 15 dk, b) 2 sa, c) 10 sa, ve d) 20 sa.	94
4.17	game istasyonu, 31 Mart 2011 STI-TEC2 IONOLAB-TEC aradeğerlemeleri a) 15 dk, b) 2 sa, c) 10 sa, ve d) 20 sa.....	95
4.18	24 Ekim 2003 günü, 0600 GS için W-indis haritası; ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu bölgelerin manyetik eşlenikleri çerçevelenmiştir.	95
4.19	24 Ekim 2003 günü, a) 2200 GS için IRI-Plas-G foF2 haritası, b) 1400 GS için IRI-Plas-G hmF2 haritası.	95
4.20	29 Ekim 2001, 1000 GS için IRI-Plas-G TEİ haritası.	97
4.21	wroc istasyonu, 15 Ekim 2008 günü için iyonosonda ve IRI-Plas-Opt foF2 ve hmF2 değerleri karşılaştırması.	97
4.22	unpg istasyonu, 15 Ekim 2008 günü için iyonosonda ve IRI-Plas-Opt foF2 ve hmF2 değerleri karşılaştırması.	97
4.23	karr istasyonu, 15 Ekim 2008 günü için IRI-Plas-Opt iyonküre parametreleri çıktı değerleri.	97
4.24	unpg istasyonu, 15 Ekim 2008 günü için IONOLAB-TEC ve IRI-Plas-Opt TEİ değerleri karşılaştırması.	98

4.25	17 Eylül 2011 günü, 1300 GS için foF2 haritası; ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu bölgelerin manyetik eşlenikleri çerçevelenmiştir.	98
4.26	25 Nisan 2011, 1100 GS için hmF2 haritası; ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu bölgelerin manyetik eşlenikleri çerçevelenmiştir.	99
4.27	25 Nisan 2011, 1000 GS için IRI-Plas-Opt TEİ haritası.....	99
4.28	25 Nisan 2011, 1200 GS için TEİ haritaları, a) uhrG GIM-TEİ, b) IRI-Plas-G TEİ (%7,5), c) IRI-Plas TEİ (%39), d) IRI-Plas-Opt TEİ (%0,006).	100
4.29	17 Eylül 2011, 1200 GS, a) IRI-Plas foF2, b) IRI-Plas-Opt foF2, c) IRI-Plas hmF2, d) IRI-Plas-Opt hmF2.	100
4.30	İstanbul, 10 Mayıs 2009, 1000 GS, IRI-Plas ve OPT-IRI-Plas ile elde edilen elektron yoğunluğu dağılımı.	101
4.31	Van, 10 Mayıs 2009, 1000 GS, IRI-Plas ve OPT-IRI-Plas ile elde edilen elektron yoğunluğu dağılımı.	101
4.32	10 Mayıs 2009, 1000 GS, OPT-IRI-Plas ile elde edilen 39 ⁰ enlem için boylama ve yüksekliğe göre elektron yoğunluğu dağılımı.	103
4.33	10 Mayıs 2009, 1000 GS, OPT-IRI-Plas ile elde edilen 35 ⁰ boylam için enleme ve yüksekliğe göre elektron yoğunluğu dağılımı.	103
4.34	tubi istasyonu 2006 yılı OYF (düz çizgi) ve DDD (kesikli çizgi) a) 0000-0100 GS, b) 0100-0200 GS, c) 0200-0300 GS, d) 0300-0400 GS, e) 0400-0500 GS, f) 0500-0600 GS, g) 0600-0700 GS, h) 0700-0800 GS, i) 0800-0900 GS, j) 0900-1000 GS, k) 1000-1100 GS, l) 1100-1200 GS.....	103
4.35	istn istasyonu 2011 yılı OYF (düz çizgi) ve DDD (kesikli çizgi) a) 1200-1300 GS, b) 1300-1400 GS, c) 1400-1500 GS, d) 1500-1600 GS, e) 1600-1700 GS, f) 1700-1800 GS, g) 1800-1900 GS, h) 1900-2000 GS, i) 2000-2100 GS, j) 2100-2200 GS, k) 2200-2300 GS, l) 2300-2400 GS.	105
4.36	2001-2008 yılları arası tubi istasyonu için a) ortalama b) standart sapma değerleri; 2001 (*), 2002 (kare), 2003 (X), 2004 (0), 2005 (-.), 2006 (.), 2007 (-), 2008 (düz çizgi).	105

- 4.37 B2 bölgesinde 2001 yılında yer alan TUSAGA istasyonlarının a) ortalama b) standart sapma değerleri, badt (0), dumt (kare), kant (X), kart (.), tubi (+), ucg2 (*), ulut (yıldız).106
- 4.38 B19 bölgesinde 2011 yılında yer alan TUSAGA-Aktif istasyonlarının a) ortalama b) standart sapma değerleri, klis (0), sive (kare), surf (X), ante (yıldız).106
- 4.39 tubi istasyonu 31 Mart 2001 GAD süresi.107
- 4.40 4 Temmuz 2009 TEİ haritaları, 1200 GS; a) OK1, b) OK2, c) OK3, d) EKDY.108
- 4.41 15 Temmuz 2009'da, bölgenin batı, orta ve doğusundaki dairelerin etrafında elde edilen YDS haritaları.110
- 4.42 15 Temmuz 2009'da, bölgenin kuzey, orta ve güneyindeki dairelerin etrafında elde edilen YDS haritaları.112
- 4.43 15 Temmuz 2009 günü OK1 ile hazırlanan Kuzey Amerika TEİ haritaları. ..113
- 4.44 Türkiye üzerinde 0400 GS'de a) 20 Ocak 2009 için IRI-Plas-STEÇ, b) 21 Haziran 2009 için IRI-Plas-STEÇ, c) 20 Ocak 2009 için α ve β açılarına göre değişim, d) 21 Haziran 2009 için α ve β açılarına göre değişim.115
- 4.45 Türkiye üzerinde 1600 GS'de a) 20 Ocak 2009 için IRI-Plas-STEÇ, b) 21 Haziran 2009 için IRI-Plas-STEÇ, c) 20 Ocak 2009 için α ve β açılarına göre değişim, d) 21 Haziran 2009 için α ve β açılarına göre değişim.115
- 4.46 Bölgesel PSO uygulaması a) çift çekirdekli Gauss (ÇÇG), b) ÇÇG'nin Türkiye bölgesindeki dağılımı, c) μ_6 model kestirimi, d) μ_3 model kestirimi, e) μ_2 model kestirimi, f) düzgelenmiş geriatma hataları116
- 4.47 28 Mart 2011 günü için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEÇ değerlerinden PSO ile belirlenen doğrusal yönseme parametreleri, a) a_{21} , b) a_{22} , c) a_{23}116
- 4.48 28 Mart 2011 günü için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEÇ değerlerinden PSO ile belirlenen Matern fonksiyon parametreleri, a) ξ , b) ς , c) $\chi(\vartheta, \varpi)$ ve $h = 100$ km.117
- 4.49 28 Mart 2011 günü için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEÇ değerlerinden PSO ile belirlenen Matern fonksiyon parametreleri, a) $\chi(\vartheta, \varpi)$ ve $h = 100$ km, b) ϑ , c) ϖ120

- 4.50 a) 28 Mart 2011 günü 1000 GS için UTA haritası, b) 29 Mart 2011 günü 1000 GS için UTA haritası, c) 28 Mart 2011 günü 1000 GS için EKDY haritası, d) 29 Mart 2011 günü 1000 GS için EKDY haritası, e) 28 Mart 2011 günü 1000 GS için deneysel YDS ve Matern YDS, f) 29 Mart 2011 günü 1000 GS için deneysel YDS ve Matern YDS.120
- 4.51 Mart 2011 ayı için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC değerlerinden PSO ile belirlenen doğrusal yönseme parametreleri; sol sütunda 0400 GS (noktalı), 0700 GS (kesikli), 1000 GS (düz) ve 1300 GS (nokta çizgi); sağ sütunda 1500 GS (noktalı), 1800 GS (kesikli), 2000 GS (düz) ve 2300 GS (nokta çizgi); a) ve b) a_{21} , c) ve d) a_{22} , e) ve f) a_{23}122
- 4.52 Mart 2011 ayı için UTA haritasından PSO ile belirlenen Matern parametreleri; sol sütunda 0400 GS (noktalı), 0700 GS (kesikli), 1000 GS (düz) ve 1300 GS (nokta çizgi); sağ sütunda 1500 GS (noktalı), 1800 GS (kesikli), 2000 GS (düz) ve 2300 GS (nokta çizgi); a) ve b) ξ , c) ve d) ς , e) ve f) ϑ , g) ve h) ϖ122
- 4.53 30 Mart 2011 günü GD koordinatlarında TEİ haritaları, a) 1000 GS, b) 1005 GS, c) 1010 GS, d) 1015 GS, e) 1020 GS, f) 1025 GS.123
- 4.54 1015 GS için ortak GD koordinat haritaları, a) 25 Mart 2011, b) 26 Mart 2011, c) 27 Mart 2011, d) 28 Mart 2011, e) 29 Mart 2011, f) 30 Mart 2011. 123
- 4.55 25 ve 30 Mart 2011 tarihleri arasında 1000-1025 GS saatleri için üstüste bindirilen ortak GD koordinat haritalarından elde edilen birinci tekil değer S_1126
- 4.56 E7 ve E8 depremleri ve komşu TUSAGA-Aktif istasyonları.126
- 4.57 Komşu TUSAGA-Aktif istasyonları arasında a) E7 depremi SKLD, b) E7 depremi L2N, c) E7 depremi ÇİK, d) E8 depremi SKLD, e) E8 depremi L2N, f) E8 depremi ÇİK.127
- 4.58 E7 depreminde erzi (Erzincan, merkez) ve kays (Kayseri) TUSAGA-Aktif istasyonlarının ODSG analizleri a) erzi SKLD, b) erzi L2N, c) erzi ÇİK, d) kays SKLD, e) kays L2N, f) kays ÇİK.127
- 4.59 E7 depreminde erzi (Erzincan, merkez) ve kays (Kayseri) TUSAGA-Aktif istasyonlarının ardışık gün analizleri a) erzi SKLD, b) erzi L2N, c) erzi ÇİK, d) kays SKLD, e) kays L2N, f) kays ÇİK.129

4.60	Daday, Pazaryolu ve Marmara Denizi depremleri merkez üsleri ve TUSAGA-Aktif komşulukları.	129
4.61	mura istasyonu jeodezik zaman serisi analizi ve depremin ilk dalgası ile eşzamanlı kayma.	130
4.62	mura istasyonu için IONOLAB-TEC değerleri; 23 Ekim 2011 (deprem günü, noktalı), 15 Ekim 2011 (depremden sekiz gün önce, düz), 26 Nisan 2011 (sakin gün, kesikli), ve ODSG (noktalı kesikli).	130
4.63	Sq değerlerinin ortalaması ve Se değerleri a) mura, b) surf, c) klis, d) yenc.	131
4.64	Kq değerlerinin ortalaması ve Ke değerleri a) mura, b) surf, c) klis, d) yenc.	133
4.65	Hınıs, Van, Akhisar, Demirci ve Aydın depremleri merkez üsleri ve TUSAGA-Aktif komşulukları.	133
4.66	Farklı eşik değerlerine göre sezim sonuçlarının değişmesi.	134
4.67	16 Ekim 2011 günü için Krigleme öngörü haritası.	134

ÖZET

Türkiye üzerinde iyonküre değişkenliğinin uzaktan algılanması ve değişikliklerin öngörüsü yer-uydu ve KD haberleşme, uzaydan seyir, güdüm ve konumlama sistemlerinin başarımının iyileştirilmesi için çok büyük önem taşımaktadır. İyonkürenin yapısını uzay ve zamanda tanımlayan en önemli parametreler elektron yoğunluğu dağılımı ve Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. Bu projede, iyonküre değişkenliğinin YKS alıcılarından kestirilen TEİ ile incelenmesi için TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağları kullanılmıştır. 109E055 nolu proje kapsamında güvenilir, gürbüz, ve yüksek çözünürlüklü otomatik TEİ kestirim algoritması IONOLAB-TEC geliştirilmiş ve yakın gerçek zamanlı hesaplama için internet üzerinden kullanıcılara açılmıştır. Bölgesel ve yerküresel IRI-Plas modeli temelli otomatik haritalama algoritması IRI-Plas-G, www.ionolab.org sitesinden hizmet vermeye başlamıştır. Hesaplama hassasiyeti, kullanım kolaylığı ve geliştirilmeye açık yapısı ile IONOLAB-TEC ve IRI-Plas-G hizmetleri dünyada bir ilki oluşturmaktadır. IRI-Plas-Opt algoritması ile TEİ kullanarak sanal iyonosonda üretilmiştir. TEİ istatistikleri için otomatik bir algoritma geliştirilmiş ve TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağları IONOLAB-TEC verilerine uygulanmıştır. Türkiye üzerinde yıllık, saatiçi ve bölgesel TEİ istatistikleri elde edilmiştir. Uzay ve zamanda özgün aradeğerleme algoritmaları geliştirilmiştir. IONOLAB-TEC değerlerinin, TEİ istatistiklerinin ve yapılan haritaların saklanacağı veri tabanı oluşturulmuştur. Literatürde ilk kez bölgesel olarak enlem-boylam-yükseklik-zaman boyutlarında gürbüz ve yüksek çözünürlüklü model tabanlı tomografi algoritması, OPT-IRI-Plas geliştirilmiştir. Türkiye iyonküresinde bozulmalar, IONOLAB-TEC üzerinden deprem öncesi, deprem sonrası, sakin ve bozulmalı günler için çapraz ilinti katsayıları, simetrik Kullback-Leibler ölçütü ve $\mathcal{L}2$ normu kullanılarak incelenmiştir. Kuzey Anadolu Fay hattı ve Van depremi için ayrıntılı analizler yapılmış radar sezim/kestirim kuramına dayanan özgün istatistiksel bir deprem uyarı sinyali algoritması geliştirilmeye başlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sinyal ve Görüntü İşleme, Toplam Elektron İçeriği, Krigleme, Aradeğerleme, İyonküre

ABSTRACT

Remote Sensing and prediction of ionospheric variabilities play a very important role in performance improvement of satellite and HF communications, space based navigation, guidance and positioning systems for Turkey. Electron density distribution and Total Electron Content (TEC) are the major parameters of space-time structure of the ionosphere. In this project, TNPGN and TNPGN-Active GPS receiver networks are used to provide an effective means in investigation of ionospheric variability of Turkey's ionosphere. In 109E055 project, reliable, robust and high resolution TEC estimation algorithm, IONOLAB-TEC, is further developed and made available through internet for near real-time use. Global and regional IRI-Plas model based automatic mapping algorithm, IRI-Plas-G started to serve over www.ionolab.org website. Both IONOLAB-TEC and IRI-Plas-G are unique, accurate and user-friendly in their service. A virtual ionosonde is developed using TEC in IRI-Plas-Opt algorithm. An algorithm for automatic extraction of TEC statistics is developed and implemented over TNPGN and TNPGN-Active IONOLAB-TEC estimates. Annual, with-in-the-hour and regional TEC statistics are obtained. Novel space-time interpolation algorithms are developed. A flexible data base is developed for keeping downloaded raw data, IONOLAB-TEC, TEC statistics and generated TEC maps. A novel and robust model based tomography algorithm, OPT-IRI-Plas is developed for high resolution imaging of regional electron density in latitude-longitude-height and time. Ionospheric disturbances over Turkey are investigated using IONOLAB-TEC for various ionospheric states, and for days before, during and after major earthquakes with cross-correlation coefficients, symmetric Kullback-Leibler measure, and $\mathcal{L}2$ norm. Detailed analysis is performed for North Anatolia Fault line and Van earthquake. A novel, statistical earthquake precursor signal algorithm, based on radar detection/estimation theory, is being developed.

Keywords: Signal and Image Processing, Total Electron Content, Kriging, Interpolation, Ionosphere

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BLUE	: Best Linear Unbiased Estimator
BÜ	: Bilkent Üniversitesi
CODE	: Center of Orbit Determination Europe
ÇİK	: Çapraz İlinti Katsayısı
D-TEİ	: Düzgünleştirilmiş TEİ Kestirim Yöntemi
EK	: Evrensel Krigleme
EKDY	: Evrensel Krigleme Doğrusal Yönseme
EKF	: Enbüyük Kullanılabilir Frekans (Maximum Useable Frequency, MUF)
ESA	: European Space Agency
foF2	: F2 Katmanının kritik frekansı
GIM	: Global Ionosphere Maps
GLS	: Güneş Lekesi Sayısı (Sun Spot Number, SSN)
GS	: Greenwich Saati (Universal Time, UT)
HÜ	: Hacettepe Üniversitesi
HGK	: Harita Genel Komutanlığı
hmF2	: F2 Katmanının ençok iyonlaşma yüksekliği
IDCE	: Ionospheric Dispatch Center
IGS	: International GPS Service
IONEX	: Ionosphere Map EXchange Format
IRI	: International Reference Ionosphere
IRI-Plas	: International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
KAF	: Kuzey Anadolu Fay Hattı
KD	: Kısa Dalga
M	: Richter Ölçeği
MTA	: Maden Tetkik Arama Enstitüsü
NASA	: National Aeronautics and Space Agency
ODSG	: Ortalama Değer Sakin Gün
OK	: Ortalamasız Krigleme
RAÖ	: Rassal Alan Öncülü
RINEX	: Receiver Independent EXchange Format

RTA	: Radyal Tabanlı Ağlar (Radial Basis Function, RBF)
SKLD	: Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi
<i>STEC</i>	: Slant Ray Total Electron Content
TDA	: Tekil Değer Ayrıştırması (Singular Value Decomposition, SVD)
TEİ	: Toplam Elektron İçeriği
UHF	: Ultra High Frequency
UPC	: Polytechnical University of Catalonia
<i>VTEC</i>	: Vertical Total Electron Content
YKS	: Yerküresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS)
YS	: Yerel Saat (Local Time, LT)
YSA	: Yapay Sinir Ağları (Neural Networks, NN)

SÖZLÜK DİZİNİ

Aradeğerleme	: Interpolation
Bağlı	: Relative
Başucu Açısı	: Elevation Angle
Beklenti	: Expectation
Bozantken	: Disturbance
Çokterimli	: Polinom
Çapraz Doğrulama	: Cross-validation
Çevrimiçi	: Online
Dağıtılmalı	: Dispersive
Deneyisel Dağılım	: Histogram
Delme Noktası	: Pierce Point
Değişinti	: Variance
Dikgen	: Orthogonal
Döngü Kopması	: Cycle Slip
Dönme	: Rotation
Durağanlık	: Stationarity
Diferansiyel Yanlılıklar	: Differential Code Biases
Düzensiz	: Sporadic
Eğiklik Faktörü	: Slant Factor
Enküçültme	: Minimization
Eşdeğişinti	: Covariance
Evrensel Krigleme	: Universal Krigleme
Güneş Lekesi Sayısı	: Sun Spot Number
Gürbüz	: Robust
Özünlü	: Intrinsic
Kalıntı	: Residual
Kobra Eğrisi	: C-Spline
Kutuplanma	: Polarization
Külçe Etkisi	: Nugget Effect
İlinti serimi	: Correlogram
Mutlak	: Absolute

Ortalamalı Krigleme	: Simple Krigleme
Ortalamasız Krigleme	: Ordinary Krigleme
Önişlem	: Preprocessing
Ortanca	: Median
Rassal	: Random
Saçılma	: Dispersion
Seyir	: Navigation
Sonda	: Sounder
Sözde Evrik	: Pseudoinverse
Sözde Menzil	: Pseudorange
Sözde Rassal	: Pseudorandom
Toplam Elektron İçeriği (TEİ)	: Total Electron Content (TEC)
Yanca	: Azimuth
Yanlılık	: Bias
Yapısal Uzaklık	: Range
Yarıdeğişinti serimi	: Semivariogram
Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS)	: Global Positioning System (GPS)
Yörünge verileri	: Ephemeris
Yönbağımlı	: Anisotropic
Yönbağımsız	: Isotropic
Yönseme	: Trend
Yükseklik Açısı	: Elevation Angle

1. GİRİŞ

Havakürenin güneş ışınlarıyla iyonize olan 60 km ile 1100 km arasındaki bölümüne iyonküre adı verilmektedir. Havakürenin troposfer, stratosfer ve ozonküre alt katmanları ile plazmaküre ve manyetoküre üst katmanları arasında yer alan iyonküre, Uzak Havasının (UH) dünyaya bağlaşımında en önemli etkenlerden biridir. Yapısal olarak uzay-zamana göre değişen, uzay-zamanda dağıtmalı, düzgün dağılmayan, yön bağımlı ve yüksek iletkenliğe sahip bu katman, yer ve uzay tabanlı, sivil ve askeri, iletişim, yayın, konumlama, seyir, güdüm, gözetim, denetim, uzaktan algılama sistemlerinin sinyallerinde frekansa bağlı kırılma, zamanda gecikme, frekans, faz ve kutuplanma kaymaları, soğurulma, emilim, zayıflama ve sönümlenmeden kaynaklanan kayıplara neden olur. İyonkürenin radyo dalgalarına nasıl ve hangi miktarda etki edeceğini ortaya koyabilmek için iyonkürenin yapısını anlamak ve değişimleri sürekli gözlemek ve izlemek gerekmektedir.

İyonkürenin radyo dalgalarına etkisi elektron yoğunluğuna bağlıdır. İyonküredeki iyonlaşma miktarı güneş ışınımı ile doğrudan ilgilidir. Güneş ışınımı ile elektronlar moleküllerinden ayrılarak serbest hale geçerler. Serbest elektron miktarı en yüksek seviyeye yerel saate göre 1200 ile 1400 arasında ulaşır. Geceleri ise elektronlar iyonlar ile birleştikten serbest elektron yoğunluğu azalır. Bu günlük değişimlerin yanı sıra iyonkürede mevsimsel değişimler de meydana gelmektedir. Mevsimsel değişimler dünyanın güneş etrafında dönmesi ile güneşin ışınım açısındaki değişimden kaynaklanmaktadır. 11 yıllık güneş çevrimi de iyonküreyi etkilemektedir. Bu etki Güneş Lekesi Sayısı (GLS) ile yakından ilgilidir.

İyonküre, konumda, güneş ışınlarının etkisine ve enleme göre yüksek enlem, orta enlem ve ekvatorial enlem olarak üç ana bölgeye ayrılır. Ülkemizin de içinde bulunduğu orta enlem bölgesi, dünyanın manyetik alan çizgileri oransal olarak düzgün aralıklarla sıralandığı için kutupsal ve ekvatorial bölgelere göre iyonküre bozulmalarından daha az etkilenmektedir.

İyonkürenin karakteristiğini ifade eden önemli parametrelerden biri Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, 1 m² kesitli bir silindir boyunca toplam serbest elektron miktarı olup TECU birimi ile ifade edilir. 1 TECU, 10¹⁶ elektron/m²'dir. TEİ değerleri incelenerek iyonküredeki kısa ve uzun dönem değişimler takip edilebilir. TEİ, elektron yoğunluğu gibi, güneşteki hareketlilik, jeofiziksel ve jeomanyetik değişiklikler, yerçekimsel

kuvvetler ve sismik önhazırlık sürecinin son derece karmaşık bir fonksiyonudur.

İyonkürenin yapısını anlamak amacıyla teorik ve ampirik pek çok model geliştirilmiştir. Bu modellerin en yaygın olarak kullanılanı ve standart olarak kabul edileni International Reference Ionosphere (IRI)'dır. Bu teorik ve ampirik iyonküre iklim modellerinin geliştirilmesinde Türkiye'den veri toplanmadığı için, IRI içinde kullanılan ve ortalama değerlere dayanan yönsemeler, ülkemizin iyonküresinin yapısının incelenmesinde sağlıklı olarak kullanılamamaktadır. Deneysel olarak iyonküre incelemeleri ve TEİ kestirimi için yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. İyonosonda, evreuyumsuz geri saçılım radarı, TOPEX/Poseidon uydusu, çift frekanslı Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) alıcıları TEİ kestiriminde kullanılabilirler. Dünya üzerinde geniş alanlara yayılmış bulunan ve sürekli çalışan çift frekanslı YKS alıcıları iyonküre değişkenliğinin gözlenmesi ve incelenmesinde diğer ölçüm aletlerine göre daha ekonomik bir seçenek sunarlar. Türkiye üzerinde günümüze kadar iyonosonda, evreuyumsuz geri saçılım radarı, yada Faraday kaymasına dayalı sistemlerden veri toplanmamıştır. Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından 1999-2008 yılları arasında kurulan ve işletilen Türkiye Ulusal SABit GPS Ağı (TUSAGA) ve 2009 yılından bu yana işletilen TUSAGA-Aktif Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti üzerindeki iyonkürenin gözlenmesi ve incelenmesi için çok önemli bir kaynak olmuştur.

IONOLAB grubu tarafından 2006-2008 yılları arasında başarı ile tamamlanan TÜBİTAK EEEAG 105E171 nolu projede, YKS alıcılarının kaydettiği verilerden özgün, gürbüz, güvenilir ve otomatik olarak TEİ hesaplama algoritması D-TEİ oluşturulmuş ve internet üzerinden tüm IGS alıcılarının TEİ kestirimlerine açılmıştır. Ayrıca YKS verilerinden TEİ hesaplanmasında çok önemli bir aşama olan alıcı yanlılığı için yine özgün bir algoritma geliştirilmiş ve D-TEİ hesaplamalarına İONOLAB-BIAS olarak otomatik eklenmiştir. İONOLAB-BIAS eklenen D-TEİ algoritması çıktılarına İONOLAB-TEC adı verilmiştir. Kestirilen TEİ değerlerinin kolay paylaşımı için bir veri tabanı yapısı geliştirilmiştir. 105E171 nolu projenin en önemli başarımlarından biri literatürde ilk kez saatçi TEİ istatistiklerinin hesaplanmasında kullanılan parametrik Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) kestirimi ve Kayan Pencere İstatistiksel Analiz (KAPA) yöntemi ile Geniş Anlamda Durağanlık (GAD) sürelerinin belirlenmesi olmuştur. 105E171 nolu projede seyrek ölçüm noktalarında hesaplanan TEİ değerlerinin uzayda ve zamanda birleştirilmesiyle bölgesel aradeğerlemeler (TEİ haritaları) yapılması,

gürültülü ve gürültüsüz sentetik TEİ yüzeyleri üzerinden denenmiştir. Uzaklığın Tersine ile Ağırlıklandırma (UTA), Multi-Quadric (MQ), Thin-Plate Spline (TPS), Yapay Sinir Ağları (YSA), Krigleme (KG), ve Rassal Alan Öncülü (RAÖ) yöntemlerinin başarımları yönsemeler, gürültü düzeyi, örnekleme tipi ve örnek sayısı üzerinden karşılaştırılmıştır. Yaklaşık 300.000 bilgisayar koşumu ve farklı hata ölçümleri ile başarımlar karşılaştırılmış ve Türkiye konumu için en az hata veren yöntemler seçilmiştir. Seyrek TEİ ölçümleriyle uzayda ve zamanda elektron yoğunluğu dağılımlarının tomografik görüntülenmesi için farklı başarımlara sahip Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT) algoritmaları geliştirilmiştir. Literatürde ilk kez Tekil Değer Ayrıştırması (TDA) taban fonksiyonlu enlem, boylam, yükseklik ve zamanda çok başarılı çalışan dört boyutlu elektron yoğunluğu tomografisi yapılmıştır. TEİ değerlerinde oluşan bozulmalardan bir deprem öncül sinyali oluşturulması için çalışmalar yapılmıştır. Son derece kapsamlı ve geniş bu araştırma konularında iki yıl süren bu projenin sonunda literatürde var olan teknikler incelenmiş, yeni teknikler geliştirilmiş, ve projenin tüm hedeflerine ulaşılmıştır.

TÜBİTAK 105E171 nolu projenin devamı olarak önerilen 109E055 nolu projenin genel amacı İONOLAB-TEC ve İONOLAB-BIAS yöntemlerinin Türkiye üzerinde internete bağlı olmayan ve HGK tarafından TÜBİTAK 1007 TUSAGA-Aktif/CORS-TR projesi ile 2008 yılı içinde konumlandırılan Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) verilerine uygulanması, çoklu alıcı/çoklu uydu kullanılarak Türkiye üzerinde şimdiye kadar elde edilmemiş hassasiyet ve çözünürlükte TEİ değerleri elde edilmesidir. Projenin birinci amacı bu yüksek çözünürlüklü ve gürbüz TEİ değerleri kullanılarak yön bağımlı Krigleme tekniği ile iki boyutlu iyonosfer görüntülerinin elde edilmesi ve uzay-zaman modellemesi için istatistiklerin oluşturulmasıdır. İkinci olarak bu görüntülerin düzenli bir şekilde elde edilebilmesi için Krigleme tekniğinin en önemli parametrelerinden olan yarıdeğişinti seriminin otomatik olarak uzay-zaman boyutlarında uyarlamalı biçimde belirlenmesidir. Projenin üçüncü amacı ise otomatik olarak eniyi güncelleme aralığında elde edilecek ardışık TEİ haritalarının görüntü işleme teknikleri kullanılarak incelenmesi ve uzay-zaman değişinti haritalarının üretilmesidir. Projenin dördüncü amacı elde edilen uzay-zaman değişinti haritaları ile Türkiye'nin sismik haritaları arasındaki ilintinin incelenmesi ve olası bir deprem uyarı sinyalinin varlığının araştırılmasıdır. Projede erişilmek istenen sonuç Türkiye ve çevresinde (Kuzey Kıbrıs'ı da içine alacak şekilde) uzay havasının belirlenmesi için otomatik ve yüksek çözünürlüklü TEİ haritaları oluşturacak yazılım ve

donanımın geliştirilmesi, elde edilecek TEİ haritalarından otomatik olarak uzay-zaman değişimi haritalarını oluşturacak yazılımın geliştirilmesi ve bu harita kullanılarak sismik hareketlilik konusunda öngörü yapıp yapılamayacağını belirlemesidir.

• Proje Süresi ve Bütçesi

Proje 1 Eylül 2009'da başlamıştır. Proje süresi 36 aydır. Beş kez ara dönem raporu verilmiş ve idari ve teknik gelişmeler bu raporlarda ayrıntıları ile anlatılmıştır. Proje bütçesi 254.956 TL'dir. Proje Teşvik İkramiyesi (PTİ) kısmı 54.000 TL, kurum hissesi 18.266 TL olarak belirtilmiştir. Proje Yürütücüsü Prof. Dr. Feza Arıkan'ın HÜ Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından açılan hesabına, TÜBİTAK tarafından sırasıyla 66.660, 36.066, 35.300, 32.150, 32.300 ve 25.450 TL olmak üzere toplam 227.926 TL aktarılmıştır. Bu toplamdan 56.922,56 TL, Mali Rapor'da gösterilen sarf malzemesi, makine-teçhizat, yurtiçi-yurtdışı seyahat, ve kurum hissesi kalemlerine harcanmıştır. HGK'dan katılan araştırmacılar 4. ve 5. ara rapor sonrasında Proje Teşvik İkramiyesi (PTİ) almaktan kendi istekleriyle vazgeçmişlerdir. Proje bitiminde de PTİ almayacaklarını bildirmişlerdir.

• İdari Bilgiler

109E055 projesinde yürütücü ve araştırmacılar, çalıştıkları kurumlar ve projeye katılma ve ayrılma tarihleri Çizelge 1.1'de sunulmuştur.

Araştırmacı	Kurum	Katılma Tarihi	Ayrılma Tarihi	Ayrılma Nedeni
Prof. Dr. Feza Arıkan (Yürütücü)	HÜ	01.09.2009	01.09.2012	Proje Bitişi
Prof. Dr. Orhan Arıkan	BÜ	01.09.2009	01.09.2012	Proje Bitişi
Doç. Dr. Cenk Toker	HÜ	01.09.2009	01.09.2012	Proje Bitişi
Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen	HÜ	01.09.2009	01.09.2012	Proje Bitişi
Dr. Müh. Alb. Onur Lenk	HGK	01.09.2009	01.09.2012	Proje Bitişi
Doç. Müh. Bnb. Bahadır Aktuğ	HGK	01.09.2009	01.09.2012	Proje Bitişi
Yük. Müh. Yzb. Ayhan Cingöz	HGK	01.09.2009	01.09.2012	Proje Bitişi
Yük. Müh. Ütgm. Yasin Erkan	HGK	01.09.2009	01.09.2012	Proje Bitişi
Doç. Müh. Alb. Ali Kılıçoğlu	HGK	01.09.2009	01.03.2010	Emeklilik
Yük. Müh. Ütgm. M. Ş. Aysezen	HGK	01.09.2009	01.03.2011	HGK'dan Ayrılış
Dr. Müh. Alb. Mustafa Kurt	HGK	01.09.2011	01.09.2012	Proje Bitişi
Müh. Ütgm. Soner Özdemir	HGK	01.09.2011	01.09.2012	Proje Bitişi
Müh. Ütgm. Selçuk Peker	HGK	01.09.2011	01.09.2012	Proje Bitişi

Çizelge 1.1: 109E055 projesinde çalışan araştırmacılar

HÜ, BÜ ve HGK arasında üç yıl boyunca düzenli aralıklarla 12 kez bilgilendirme ziyaretleri, toplantılar ve iş paketi sunumları yapılmıştır. İONOLAB grubunun

araştırmacı ve öğrencilerinin çalışmalarını paylaşmaları, eşgüdümün sağlanması, bilimsel, teknik ve mali gelişmelerin aktarılması amacını güden toplantılar çok etkili ve verimli olmuştur.

• Bursiyerler ve Öğrenciler

Proje süresince 17 lisans, yüksek lisans ve doktora öğrencisi projeye çeşitli düzeylerde katkı vermiştir. Bu öğrenciler Çizelge 1.2’de üniversiteleri (Ü), dereceleri, mezuniyet durumları ve burs aldıkları süreler, burs kategorileri (BK), burs miktarları ve mezuniyet durumları (MD) ile listelenmişlerdir. T, Tam Bursu (yüksek lisans öğrencisi için ayda 1250 TL, doktora öğrencisi için ayda 1500 TL), Y, Yarım Bursu (yüksek lisans öğrencisi için ayda 300 TL, doktora öğrencisi için ayda 400 TL) göstermektedir. Mezuniyet Durumunda M, mezun, DE tez çalışması devam ediyor anlamında kullanılmıştır. Projede Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora düzeyinde çalışan ve mezun olan öğrencilerin, ve tez çalışmalarına devam edenlerin listesi aşağıda verilmiştir. Bu öğrenciler, Prof. Dr. Feza Arıkan, Prof. Dr. Orhan Arıkan, Doç. Dr. Cenk Toker ve Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen danışmanlığında ve eş-danışmanlığında Hacettepe (HÜ), Bilkent (BÜ) ve Fırat (FÜ) Üniversitelerinde Lisans (L), Yüksek Lisans (YL) ve Doktora (D) çalışmaları yapmışlardır.

Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora Tez Öğrencileri

Mezunlar :

1. Seçil Karatay, Deprem ile İyonküredeki Toplam Elektron İçeriği Arasındaki İlişkinin Araştırılması, Doktora Tezi, Eş Danışman: Prof. Dr. Feza Arıkan, Fırat Üniversitesi, 2010.
2. Baran Ersin Özilhan, Kuzey Anadolu Fay Hattı Depremlerinin ve İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimlerinin Olası İlişkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2010.
3. Oktay Şahin, İyonküre HMF2 ve FOF2 İletişim Parametrelerinin YKS Verileri ve IRI Modeli Kullanılarak Kestirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2011.
4. Memduh Serkan Sapaz, Temporal Interpolation of Total Electron Content, ELE 401-402 Proje Raporu, Hacettepe Üniversitesi, 01 Haziran 2011.

Öğrenci	Ü	Derece	Burs Süresi	BK	MD	Burs (TL)
Seçil Karatay	FÜ	D	09.2009-10.2010	T	M	21.000
Hakan Tuna	BÜ	D	09.2011-08.2012	Y	DE	4.800
Işiltan Sayın	HÜ	D	09.2009-01.2011	Y	-	6.800
Kenan Bozdaş	HÜ	D	09.2010-01.2011	Y	-	2.000
Aykut Yıldız	BÜ	D	-	-	-	-
Ozan Köroğlu	HÜ	YL	09.2009-08.2012	Y	M	10.800
Oktay Şahin	HÜ	YL	09.2009-09.2011	Y	M	7.500
Baran Ersin Özilhan	HÜ	YL	03.2010-07.2010	Y	M	1.500
Onur Çilibaş	HÜ	YL	09.2011-08.2012	Y	DE	3.600
Muhammet Necat Deviren	HÜ	YL	08.2011-08.2012	T	DE	16.250
Onur Çilibaş	HÜ	YL	09.2011-08.2012	Y	DE	3.600
Ali Osman Yıldız	HÜ	YL	03.2010-05.2010	Y	-	900
Yunus Engin Gökdağ	HÜ	YL	09.2010-04.2012	T (2 ay) Y (18 ay)	-	7.900
Hasan Hüseyin Özbenli	HÜ	YL	03.2010-05.2010	T (2 ay) Y (3 ay)	- -	3.400
Amirmahdi Sadeghimorad	HÜ	YL	03.2011-08.2012	T	-	22.500
Memduh Serkan Sapaz	HÜ	L	-	-	M	-
Mehmet Küpeli	HÜ	L	-	-	M	-
Hakan Murat Çevik	HÜ	L	-	-	M	-
Toplam Burs						112.550

Çizelge 1.2: 109E055 projesinde çalışan öğrenciler ve burs durumları

5. Mehmet Küpeli, Electron Density Profile Prediction with International Reference Ionosphere (IRI), ELE 401-402 Proje Raporu, Hacettepe Üniversitesi, 01 Haziran 2011.
6. Hakan Murat Çevik, Total Electron Content (TEC) with International Reference Ionosphere (IRI), ELE 401-402 Proje Raporu, Hacettepe Üniversitesi, 01 Haziran 2011.
7. Ozan Köroğlu, TUSAGA VE TUSAGA-Aktif Verileri ile Toplam Elektron İçeriğinin İstatistiksel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2012.

Tez Çalışması Devam Edenler:

1. Ali Osman Yıldız, Türkiye için Kısa Dalga Tek Frekans Tepkisinin İstatistiksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2010-.
2. Hakan Tuna, 3D Electron Density Estimation In the Ionosphere Using IRI-Plas Model and GPS Measurements, Doktora Tezi, Bilkent Üniversitesi, 2011-.

3. Onur Çilibaş, İyonküre F2 Katmanı Kritik Karakteristiklerinin Bölgesel Haritalaması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2011-.
4. Muhammet Necat Deviren, Türkiye Üzerinde Toplam Elektron İçeriği (TEİ) için Uzay-Zaman Rassal Alan Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2011-.

Projeye katkı veren ancak tez konusu proje konusunda olmayan Yüksek Lisans ve Doktora öğrencileri ve çalışmaları aşağıda listelenmiştir.

Projeye Katkı Verenler:

1. Işıltan Sayın, Yönlü Krigleme Tekniğinin Geliştirilmesi ve Bölgesel TEİ Aradeğerlemesine Uygulanması, TÜBİTAK 109E055 II. Dönem Ara Raporu, EK 3 IP3, Hacettepe Üniversitesi, 01 Eylül 2010.
2. Işıltan Sayın, Yarıdeğişinti Serimi Teorik Modelinin ve Parametrelerinin Belirlenmesi ve Optimizasyonu, TÜBİTAK 109E055 II. Dönem Ara Raporu, EK 4 IP4, Hacettepe Üniversitesi, 01 Eylül 2010.
3. Ali Osman Yıldız, Türkiye için Kısa Dalga Tek Frekans Tepkisinin İstatistiksel Karakterizasyonu, TÜBİTAK 109E055 II. Dönem Ara Raporu, EK 2 IP2, Hacettepe Üniversitesi, 01 Eylül 2010.
4. Işıltan Sayın, Yön Bağımlı Bölgesel Yarıdeğişinti Serimi Kestirimi ve TEİ Verilerine Uygulanması, TÜBİTAK 109E055 III. Dönem Ara Raporu, EK 3 IP3, Hacettepe Üniversitesi, 01 Mart 2011.
5. Hasan Hüseyin Özbenli, Yönlü Krigleme için Sentetik Yönlü Yüzeyle ve Yarıdeğişinti Serimleri, TÜBİTAK 109E055 III. Dönem Ara Raporu, IP3, Hacettepe Üniversitesi, 01 Mart 2011.
6. Kenan Bozdaş, Saldırıya uğrayan sunucu bilgisayarların kurulması, yeni ve güvenli bir otomatik akış algoritması ve eşzamanlama programı yazılması, TÜBİTAK 109E055 III. Dönem Ara Raporu, IP1.1, Hacettepe Üniversitesi, 01 Mart 2011.
7. Aykut Yıldız, SİU 2011 bildirisini (YILDIZ vd, 2011), Nisan 2011.

8. Yunus Engin Gökdağ, PSO ve NLSQ Yöntemleri ile Yönseme ve Yarıdeğişinti Kestirimi, TÜBİTAK 109E055 IV. Dönem Ara Raporu, EK 3 IP3-4, Hacettepe Üniversitesi, 01 Eylül 2011.
9. Yunus Engin Gökdağ, Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Sentetik TEİ Yüzeyleri için Parametre Kestirimi, TÜBİTAK 109E055 V. Dönem Ara Raporu, EK 3 IP5, Hacettepe Üniversitesi, 01 Mart 2012.
10. Amirmahdi Sadeghimorad, TÜBİTAK EEEAG 109E055 Projesi Kapsamında HGK Sunucusundan IONOLAB Sunucusuna Veri Aktarımı, Veri Tabanının Oluşturulması ve IONOLAB-TEC Elde Edilme Süreci, TÜBİTAK 109E055 V. Dönem Ara Raporu, EK 1 IP1A, Hacettepe Üniversitesi, 01 Mart 2012.

Proje çalışmalarının en önemli ayağı olan bursiyerler, bu çalışmaları ile jeofiziksel sinyal işleme, jeofiziksel elektromanyetik, modelleme, programlama, paket program kullanma, yeni teknik ve yöntemler geliştirme ve uygulama alanlarında çok başarılı olmuşlardır. Yurtiçi ve yurtdışı konferanslarda, proje toplantılarında ve aldıkları dersler kapsamında sunumlar yapmışlardır. Öğrencilerin katkı verdiği yayın ve konferans bildirimleri yayınlarda listelenmiştir.

• Proje Çıktıları ve Başarı Ölçütleri

Proje Öneri Formunda projenin başarı ölçütleri olarak üç konu belirtilmiştir. Proje süresi sonunda

a) Özgün yazılım ve teknik geliştirme alanında:

- Dünyada erişime açık IGS ve EUREF YKS alıcılarından 30 s yada 2,5 dk zaman çözünürlüklü otomatik yakın gerçek zamanlı IONOLAB-TEC kestirim programı geliştirilmiştir.
- Bu program 105E171 projesi sonucundaki sürümünden farklı olarak döngü kayması tamiri, kısa dönemli zamansal aradeğerleme, hata fonksiyon dosyası iyileştirmeleri içermektedir. Ayrıca yakın gerçek zamanlı çalışabilmesi için uydu yanlışlığı, uydu yörünge bilgileri ve öngörü IONEX dosyalarını kullanması bakımında güvenilir ve gürbüz olduğu gösterilmiştir.

- Otomatik yakın gerçek zamanlı IONOLAB-TEC kestirim programı www.ionolab.org adresinden internet üzerinden dünyadaki tüm kullanıcılara hiçbir yazılım lisansı yada depolama zorluğu getirmeden açılmıştır. Bu yazılımların ve tekniklerin tümü özgündür ve dünyada hiçbir araştırma merkezinde bu hassasiyet ve kolaylıkta TEİ hesaplayan bir servis yoktur.
- Her YKS istasyonu için yerel kutupsal koordinatlarda uydu konumlarını çizen bir algoritma geliştirilmiştir.
- Orta enlem YKS ağlarında eksik verilerin uzay-zaman aradeğerlemesi için iki yeni ve özgün teknik geliştirilmiş ve uygulanmıştır.
- TEİ için saatçi parametrik olasılık yoğunluk fonksiyonlarının ve geniş anlamda durağanlık sürelerinin otomatik belirlenmesi için özgün bir program geliştirilmiştir ve Türkiye YKS istasyonlarına uygulanmıştır.
- En tanınan ve güvenilen iyonküre modeli IRI-2007, Ortak TÜBİTAK EEEAG 110E296 ve Rusya RFBR 11-02-91370-CT_a projesinde Rus tarafının yürütücüsü Dr. Tamara Gulyaeva tarafından YKS uydu yüksekliğine kadar uzatılmış ve katsayı parametreleri GIM TEİ haritaları ile güncellenerek IRI Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) programı geliştirilmiştir. 109E055 projesinde bu programdan yararlanılarak GIM TEİ haritalarının girdisi ile yine Dr. Tamara Gulyaeva tarafından geliştirilen Wp indisi, ve yer küresel IRI-Plas iyonküre kritik parametreleri, kritik parametre haritaları ve videoları oluşturulmuştur.
- IRI-Plas programına konumsal TEİ girdisi ile eniyileme yapan özgün bir algoritma (IRI-Plas-Opt) geliştirilmiş ve sanal iyonosonda olarak çalışabileceği gösterilmiştir.
- IRI-Plas-Opt, 2, 5° enlem ve 5° boylam çözünürlüğünde GIM noktaları için çalıştırılmış ve yer küresel iyonküre kritik parametre haritaları ve videoları elde edilmiştir.
- IRI-Plas-Opt, Türkiye üzerinde TUSAGA-Aktif ağı verileri üzerinden çalıştırılmış ve IONOLAB-TEC eniyilemesi ile Türkiye iyonküresinin dört boyutlu tomografisi yapılmış ve elektron yoğunluğu dağılımları elde

edilmiştir.

- Türkiye coğrafyasında iyonküre tomografisi için IRI-Plas programı Eğik TEİ (ETEİ/STEC) hesaplayabilir halde yeniden programlanmıştır.
- IONOLAB-STEC ve IRI-Plas-STEC özgün bir eniyileme algoritmasında kullanılarak Türkiye iyonküresinin dört boyutlu tomografisi yapılmış ve elektron yoğunluğu dağılımları elde edilmiştir.
- PSO eniyileme algoritması iyonküre parametrelerinin kestirimi için uyarlanmış ve sentetik yüzeyler üzerinden kestirim kısıtları hesaplanmıştır. Türkiye üzerindeki yönsemenin dağılımı belirlenmiştir.
- Türkiye üzerinde TUSAGA-Aktif ağı verileri kullanılarak doğrusal yönseme parametreleri kestirilmiş ve yarıdeğişinti fonksiyonu Matern olarak seçilmiştir.
- Matern yarıdeğişinti teorik modeli ilk kez TEİ aradeğerlemesinde kullanılmış ve fonksiyon parametreleri PSO ile kestirilmiştir.
- Doğrusal yönseme ve Matern yarıdeğişinti modeli ile Evrensel Krigleme yapılarak Türkiye üzerinde yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde otomatik haritalama yapılması incelenmiştir.
- Ortalama Sakin Gün ile Simetrik Kullback-Leibler Mesafesinin (SKLD) iyonküre deprem öncülü olarak geliştirilebileceği ortaya konmuştur. Deprem büyüklüğüne göre iyonkürede etkilediği bölgeler 150 km, 350 km ve 550 km olarak belirlenmiştir.
- Literatürde ilk kez radar sezim ve kestirim teorisinde kullanılan eşikleme yöntemi TUSAGA-Aktif ağı üzerinde TÜBİTAK 110E296 projesi ile eşgüdümlü olarak geliştirilmeye başlanmıştır.

b) Geliştirilen yeni tekniklerin makale ve bildiriler ile ulusal ve uluslararası toplantı ve dergilere sunulması alanında: 2009-2012 arası TÜBİTAK 105E171 ve 109E055 projelerinden altı uluslararası makale yayınlanmış, altı ulusal konferansta dokuz ve 10 uluslararası konferansta 21 adet olmak üzere toplam 30 sunum yapılmıştır. Bu sunumların 14 adedini bursiyer ve öğrenciler yapmışlardır. Dört davetli sunum yapılmıştır. Bir makale hakem incelemesi aşamasındadır. Yazılması planlanan dört makale bulunmaktadır. Basılan ve

sunulan bu çalışmalara proje raporu içinde kaynak gösterilerek değinelecektir.

- Proje çalışanlarının oluşturduğu IONOLAB grubunun ve yapılan çalışmaların tanıtılması amacıyla dört adet davetli konuşma verilmiştir.
- 105E171 ve 109E055 kapsamlarında toplam altı makale yayınlanmıştır.
- İki makale hakem incelemesindedir.
- Uluslararası konferans ve çalıştaylarda 21 bildiri sunulmuştur.
- Ulusal konferans ve çalıştaylarda 9 bildiri sunulmuştur.
- Dört makalenin sunulmak üzere hazırlıkları sürmektedir. Aralık 2012’de sunulmaları planlanmaktadır.

c) İyonkürenin yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde görüntülenmesi ve veri tabanı oluşturulması alanında :

- Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği’ne alınan sunucu bilgisayarlar üzerinde internet üzerinden erişime açık IONOLAB-TEC yazılımı çalıştırılmaktadır. Bu yazılımın altında sorgudan daha önce araştırılan gün ve istasyonların verileri bir veri tabanında tutulmaktadır.
- Proje çalışanlarının kullanımına açık ve TEİ hesaplamalarının pek çok parametresini ve ara çıktılarını bulunduran dosyalar otomatik TEİ hesaplama programı içinde ayrı klasör ve dosyalarda tutulmaktadır. Bu dosyaları ve işlenmiş verileri bulunduran bir veri tabanı hazırlanmıştır.
- Türkiye üzerinde çalışan ama internet üzerinden kullanıma açılmamış HGK TUSAGA ağı içerisinde bulunan YKS alıcılarından toplanan veriler IONOLAB-TEC ve IONOLAB-BIAS ile işlenerek TEİ ve alıcı yanlılığı değerleri hesaplanmış ve olası konum ve günlerde özgün veri aradeğerlemesi yapılarak istasyonların doluluk oranları artırılmıştır.
- TUSAGA-Aktif istasyonlarının Ocak 2009 - Ağustos 2012 arasında IONOLAB-TEC kestirimleri elde edilmiş ve doluluk oranları komşu istasyonları kullanarak özgün aradeğerlemesi algoritması ile artırılmıştır.

105E171 ve 109E055 proje çalışmaları sonunda geliştirilen IONOLAB-TEC, IONOLAB-BIAS, özgün haritalama ve tomografi teknikleri diğer araştırmacılar tarafından da kullanılmaya başlanmıştır. Aşağıdaki listede IONOLAB çalışmalarına

kaynak göstererek atıfta bulunan tez, makale ve bildirilerden bazıları verilmiştir. Özellikle www.ionolab.org üzerinden uzay havası hizmetlerinin kullanımı arttıkça bu atıfların sayısının artacağı beklenmektedir.

IONOLAB grubu çalışmalarına atıf veren ve kullanan yayınlardan seçilenler aşağıda verilmiştir.

1. HUANG, Z., and Roussel-Dupre, R., Total electron content (TEC) variability at Los Alamos, New Mexico: A comparative study: 2. Comparisons with other TEC sources, *Radio Science*, 41, RS6004, doi:10.1029/2004RS003203, (2006).
2. NOGUERA D., C.O., Development of Two New Ionospheric Indices, Doktora Tezi, Utah State University, Logan, Utah, ABD, (2007).
3. SOLER, T., GPS/GNSS current bibliography, *GPS Solutions*, 12, 71-76, doi: 10.1007/s10291-007-0078-4, (2008).
4. FOSTER, M., Evans, A.N., An evaluation of interpolation techniques for reconstructing ionospheric TEC maps, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 46(7), 2153-2164, (2008).
5. YA'ACOB, N., Abdullah, M., and Ismail, M., GPS Vertical Total Electron Content (TEC) Dual Frequency Technique and TEC Map at Ionosphere Layer Using Malaysian Data, 2009 International Conference on Future Computer and Communication, IEEE Computer Society, doi: 10.1109/ICFCC.2009.74, 589-593, (2009).
6. JUN, L., Hongzhou, C., Xiandong, L., Ke, C., A predicting model of ionospheric based on ARIMA, *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(3), (2010).
7. LI L., Zhang, S., Hu, Q., Zhang, J., Using IGS Data to Analyze the Long-term Variations of Total Electron Content, IEEE 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science (ICIECS), 25-26 Aralık 2010, 1-4, (2010).
8. SIBANDA, P., Challenges in Topside Ionospheric Modelling over South Africa, Doktora Tezi, Rhodes University, Güney Afrika, (2010).
9. RAO, N.V., Madhu, T., Kishore, K.L., Geomagnetic Storm Effects on GPS

- Aided Navigation over Low Latitude South Indian Region, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 10(3), 37-42, (2010).
10. DASHORA, N., Ionospheric retrieval using GPS during equatorial spread F events, *The International Beacon Satellite Symposium (BSS2010)*, Barcelona, İspanya, 1-3, (2010).
 11. ACKERMANN, E. R., de Villiers, J.P., and Cilliers, P. J., Nonlinear dynamic systems modeling using Gaussian processes: Predicting ionospheric total electron content over South Africa, *Journal of Geophysical Research*, 116, A10303, doi:10.1029/2010JA016375, (2011).
 12. MALTSEVA, O.A., Mozhaeva N.S., Features of short wave propagation in winter conditions, *IEEE Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 11-15 Nisan 2011, 1702-1705, (2011).
 13. JIN, S. and Jin, R., GPS Ionospheric Mapping and Tomography: A case of study in a geomagnetic storm, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011*, 24-29 Temmuz 2011, Vancouver, Kanada, 1127-1130, (2011).
 14. HERNANDEZ-PAJARES, M., Juan, J.M., Sanz, J., Aragon-Angel, A., Garcia-Rigo, A., Salazar, D., Escudero, M., The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques, *Journal of Geodesy*, 85, 887-907, doi: 10.1007/s00190-011-0508-5, (2011).
 15. ERCHA, A., Zhang, D., Ridley, A.J., Xiao, Z., Hao, Y., A global model: Empirical orthogonal function analysis of total electron content 1999-2009 data, *Journal of Geophysical Research*, 117, A03328, doi:10.1029/2011JA017238, (2012).
 16. CONTADAKIS, M.E., Arabelos, D.N., Pikridas, C., Spatalas, S.D., Total electron content variations over southern Europe before and during the M 6.3 Abruzzo earthquake of April 6, 2009, *Annals of Geophysics, Special Issue: Earthquake Precursors*, 55(1), doi: 10.4401/ag-5322, (2012).
 17. OLWENDO, O.J., Baki, P., Cilliers, P.J., Mito, C., Doherty, P., Comparison of GPS TEC measurements with IRI-2007 TEC prediction over the Kenyan region during the descending phase of solar cycle 23, *Advances in Space Research*, 49, 914-921, (2012).

18. HIROOKA, S., Hattori, K., Nishihashi, M., Kon, S., Takeda, T., Development of ionospheric tomography using Neural Network and its application to the 2007 Southern Sumatra earthquake, *Electrical Engineering in Japan*, 181(4), pp. 9-18, (2012).
19. MALTSEVA, O.A., Mozhaeva N.S., Nikitenko, T.V., Comparison of model and experimental ionospheric parameters at high latitudes, *Advances in Space Research*, 49, doi: 10.1016/j.asr.2012.04.009, (2012).
20. ZHANG, H., Xu, P., Han, W., Ge, M., Shi, C., Eliminating negative VTEC in global ionosphere maps using inequality-constrained least squares, *Advances in Space Research*, 49, doi: 10.1016/j.asr.2012.06.026, (2012).
21. CHOI, K.H., Lee, J. Y., Kim, H.S., Kim, J. and Lee, H.K., Simultaneous estimation of ionospheric delays and receiver differential code bias by a single GPS station, *Meas. Sci. Technol.*, 23, 065002-065013, (2012).
22. JIN, R., Jin, S., Feng, G., M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases, *GPS Solutions*, 16, doi: 10.1007/s10291-012-0279-3, (2012).
23. KESHIN, M., A new algorithm for single receiver DCB estimation using IGS TEC maps, *GPS Solutions*, 16, 283-292, doi: 10.1007/s10291-011-0230-z, (2012).

Yukarıda verilen listeden de görüleceği gibi IONOLAB grubunun yöntemleri dünyanın çok çeşitli ülkelerindeki iyonküre, jeodezi, jeofizik, bilgisayar bilimleri, uzaktan algılama, görüntüleme, elektromanyetik yayılım, ve uzay bilimleri alanlarında çalışan araştırmacılar tarafından giderek artarak kullanılmaktadır. Bu durum özgün yazılım ve yöntem geliştirme ve yaygın etki olarak 105E171 ve 109E055 projelerinin çok başarılı olduğunu göstermektedir. Proje Öneri Formunda listelenen proje çıktıları ve başarı ölçütleri tamamlanmış ve proje sonuç raporunda ayrıntıları ile anlatılmıştır.

Proje ile ilgili teknik genel bilgiler Bölüm 2’de, projede kullanılan yöntemler Bölüm 3’te, iş paketleri içeriklerine göre düzenlenen özet bulgular Bölüm 4’te verilmiştir. Bölüm 5 sonuçları içermektedir. EK-1, projeden mezun olan YL ve doktora öğrencilerinin

tezlerinin kapak sayfaları ve özetlerinden oluşmaktadır. 109E055 kapsamında 2009'dan bu yana yayımlanan makaleler ve sunulan bildiriler, ve hakem incelemesindeki makalelerin özleri EK-2'de sunulmuştur. Bu yayınlar Kaynaklar bölümünde taranmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde proje sonuç raporunda yer alan temel kavram ve tekniklerle ilgili genel bilgiler verilecektir. Bu bilgiler öncelikle konu hakkında bir literatür özetini içerecek ve proje sırasında yapılan çalışmaların niteliğini açıklayacak şekilde olacaktır. Alt bölüm başlıkları sırası ile İyonküre, International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas), ICEPAC ve HF-PRE, YKS-TEİ ve IONOLAB-TEC, TUSAGA ve TUSAGA-Aktif, TEİ İstatistik Çalışmaları, TEİ Haritalaması, Veri Tabanı, Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT), ve Deprem Uyarı Sinyali olarak belirlenmiştir.

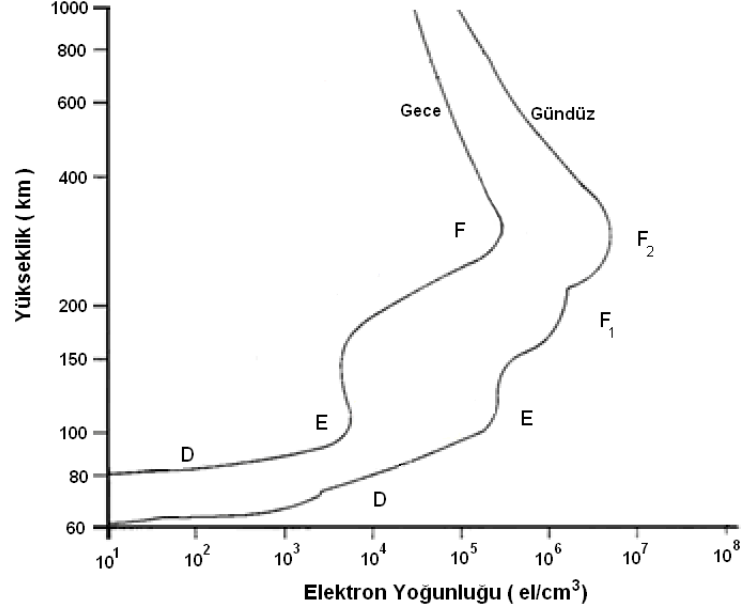
2.1 İyonküre

İyonküre yeryüzünden yaklaşık 60 km ile 1100 km arasında yer alan, morötesi ve X-ışınları gibi yüksek enerjili güneş ışınları ile iyonize olmuş gazlardan oluşan havaküre tabakasıdır. Havakürenin genellikle nötr gazlardan oluşan bileşimi ısılküre de denilen iyonküreyi de içine alan üst katmanında iyonlaşarak bir plazma ortamı oluşturur. Dünyanın manyetik alanının etkisiyle bu plazma yön bağımlı olur. Plazmanın tanımlayıcı parametresi elektron yoğunluğudur ve dağılımı enlem, boylam, yükseklik ve zamanın son derece karmaşık bir fonksiyonudur.

Plazmayı oluşturan en temel etken güneşten gelen ısı olduğu için iyonküredeki elektron dağılımının yapısının belirlenmesinde dünyanın güneşe bağlı hareketleri önemli rol oynar. Gece-gündüz döngüsü, mevsimsel değişimler, yıllık ve 11 yıllık Güneş Lekesi Sayısı (GLS) periyotları iyonkürenin zaman içerisindeki belirleyici değişikliklerine temel oluşturur. Yerküre üzerinde ise dünyanın manyetik alanının dağılımı ve sıklığı, dünyanın dönüş hızı ve yönü, ve yerçekimsel alanların etkisi ile elektron dağılımı değişmektedir. Yerküre ve zamana bağlı bu ana yönseme değişimlerinin dışında güneş rüzgarları ve patlamaları, jeomanyetik değişiklikler ve sismik hareketlilik iyonkürede yerel (konuma bağlı) ve zamana göre elektron yoğunluğunda değişikliklere neden olur (TASCIONE, 1988).

İyonkürenin temel tanımlayıcı parametresi enlem, boylam, yükseklik, zaman, güneşin hareketliliği, dünyanın manyetik alanı ve jeomanyetik hareketliliğe bağlı olan elektron yoğunluğudur (N_e). İyonküre iyonlaşma miktarına göre D, E, F1 ve F2 katmanlarından oluşmaktadır. D katmanı, iyonkürenin alt katmanı olup 60 km ile 90 km yükseklikte bulunur. İyonlaşmanın etkisiyle radyo dalgaları D katmanı tarafından kısmen soğurulur ve zayıflatılır. E katmanı, yeryüzünden 90 km ile 150 km yükseklikte bu-

lunur. İyonkürenin en dış katmanı ise F katmanıdır. F katmanı F1 ve F2 olmak üzere iki katman halinde incelenmektedir. F2 katmanı iyonlaşmanın en fazla olduğu, KD ve uydu haberleşmesi açısından en önemli katmandır. Şekil 2.1’de iyonkürenin elektron yoğunluğuna göre sınıflandırılmış katmanları verilmiştir. Plazma frekansı, f_p , elektron



Şekil 2.1: Elektron yoğunluğunun yükseklikle tipik değişimi

yoğunluğuna bağlı olarak, yansıtılabileceği sinyallerin en büyük frekans değeridir. Yön bağımsız ortamlar için plazma frekansı aşağıdaki eşitlikteki gibi verilebilir:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e q^2}{\epsilon_0 m}} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte, N_e elektron yoğunluğunu, q bir elektronun yükünü, ϵ_0 serbest uzayın dielektrik sabitini, m bir elektronun kütlesini göstermektedir. N_e dışındaki diğer değerler sabit olduğu için plazma frekansının temel belirleyicisi yükseklik, konum ve zamanın fonksiyonu olan elektron yoğunluğudur. Her katman bölgesi için en yoğun iyonlaşmanın olduğu yükseklik kritik yükseklik, en yüksek plazma frekansı değeri ise kritik frekans olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1’de verildiği gibi F2 katmanı en yüksek iyonlaşmanın olduğu katman olduğu için uydu ve KD kanalları için en önemli katmandır. F2 katmanının kritik parametreleri yükseklik için hmF2 ve plazma frekansı için foF2 olarak adlandırılmaktadır.

Elektromanyetik dalganın kırılma indisi ortamın kritik frekansı ve elektromanyetik dalganın frekansının bir fonksiyonudur. Manyetoplazma gibi yön bağımlı ortam-

lar için kırılma indisi Appleton-Hartree formülü ile ifade edilmiştir (TASCIONE, 1988). Manyetoplazma içerisinde dielektrik sabiti, homojen olmayan, zamana göre değişen, zamana ve uzaya göre dağıtılmalı bir matristir. Yön bağımsız ortamlar için kırılma indisi aşağıdaki gibi yaklaştırılabilir:

$$n(f) = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte, f elektromanyetik dalganın frekansıdır. Kırılma indisi frekansa bağlı olduğu için iyonküre ‘dağıtılmalı ortam’ olarak adlandırılır.

Yeryüzünden gönderilen elektromanyetik dalgalar, dalganın frekansı ortamın plazma frekansına eşit olduğu yüksekliğe kadar yayılırlar. $f = f_p$ olduğu yükseklikte kırılma indisi sıfır olur ve dalga daha fazla ilerleyemez ve geri yansır. İyonkürenin gaz ve iyonlaşma yoğunluğuna bağlı olarak en az ve en yüksek plazma frekansları 3 MHz ve 30 MHz arasında olduğu için elektromanyetik görüngenin bu bölgesi Kısa Dalga (KD) bölgesi olarak adlandırılır. Bu frekans bölgesi yeryüzünde iki nokta arasında sinyallerin iyonküreden yansıma/kırılmasına göre KD iletişim kanalını oluşturur. Eş. 2.2’de verildiği üzere 30-45 MHz’in üstündeki işaretler iyonküreden geçebilirler. Uydu kanallarında kullanılan frekanslar UHF frekans bölgesinin üst sınırından başlar. Dünyanın manyetik alanına göre yön bağımlılığın azaldığı bu frekans bölgelerinde, frekansa ve konuma bağlı kırılma indisi, özellikle geniş bant sinyallerinde zayıflama, gecikme, faz kayması, kırışma gibi bozanetkenlere neden olur.

İyonküre, coğrafi olarak üç enlem bölgesinde incelenmektedir. Dünyanın manyetik alanının akı ve alan çizgilerinin dağılımına ve güneş ışınlarının etkisine göre sınıflandırılan bu bölgeler ekvatorial enlem, orta enlem ve yüksek enlem bölgeleridir. Ülkemizde bulunduğu Orta enlem bölgesi, dünyanın manyetik alan çizgilerinin oransal olarak düzgün dağıldığı ve yıllık döngüde ekvator, dönence ve kutup bölgelerinden uzakta kuzey yarımkürenin ortasında yer aldığı için oransal olarak iyonkürenin en az değişken bölgesidir. Şekil 2.1’de gösterilen yüksekliğe göre elektron yoğunluğu ülkemiz için zamanda saatlik, 24 saatlik gün-tün, mevsimsel, yıllık, ve 11 yıllık döngülerle değişir. Türkiye 36^0 K ve 42^0 K enlem bölgesinde ve 26^0 D ve 45^0 D boylam bölgesinde yer aldığı için güneşe göre ve gün-tün döngüsüne göre konumda da değişiklik gösterir.

Ülkemiz coğrafyasında güvenilir, gürbüz ve hassas KD ve uydu kanal modellerinin yapılması, iyonküre elektron yoğunluğunun zamana ve uzaya (konum ve yüksek-

$D_d(l)$	W	İyonküre Durumu
$D_d(l) > 0.401$	4	Şiddetli pozitif W^+ fırtına
$0.155 < D_d(l) \leq 0.401$	3	Orta Şiddetli W^+ fırtına veya W^+ alt fırtına
$0.046 < D_d(l) \leq 0.155$	2	Zayıf W^+ bozulma
$0.0 < D_d(l) \leq 0.046$	1	Sakin W^+ durum
$-0.046 \leq D_d(l) < 0.0$	-1	Sakin W^- durum
$-0.155 \leq D_d(l) < -0.046$	-2	Zayıf W^- bozulma
$-0.401 \leq D_d(l) < -0.155$	-3	Orta Şiddetli W^- fırtına veya W^- alt fırtına
$D_d(l) < -0.401$	-4	Şiddetli negatif W^- fırtına

Çizelge 2.1: Sakin durumdan sapmanın göstergesi logaritmik bozulma ölçütünün W-indise çevrimi

lik) göre istatistiksel olarak tanımlanmasını gerektirir. Elektron yoğunluğunun doğrudan ölçümü mümkün olmadığı için iyonküre genellikle altkatmanlarının kritik frekansları, kritik yükseklikleri ve Toplam Elektron İçeriği (TEİ) ile tanımlanır. TEİ, elektron yoğunluğunun bir verilen bir C yolu üzerindeki çizgi integrali olarak tanımlanır:

$$TEI = \int_C N_e dl \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemdeki tanım, TEİ'nin iyonküredeki 1 m² kesitli silindir boyunca toplam serbest elektron miktarına karşılık gelir. Birimi TECU ile ifade edilir. 1 TECU = 10¹⁶ el/m²'dir. TEİ hesaplamak, iyonkürenin yapısını incelemek için doğrudan kullanılan bir yöntemdir.

İyonküre ve plazmaküre fırtınalarının etkisinin gözlenmesi için Dr. Tamara Gulyaeva tarafından geliştirilen W-indisi bir konum ve saatteki TEİ yada foF2 değerinin yedi günlük ortanca değerine oranının logaritmasıyla verilmektedir (GULYAEVA, 2012), (GULYAEVA vd, 2011a, 2012a). Herhangi bir konum indisi l ve zaman d için iyonküre bozulmasının bir ölçütü

$$D_d(l) = \log \left(\frac{TEI_d(l)}{TEI_{m;d_s-d_i}(l)} \right) \quad (2.4)$$

eşitliği ile verilebilir. Yukarıdaki eşitlikte $TEI_d(l)$, l konumu ve d zamanı için TEİ değerini, $TEI_{m;d_s-d_i}(l)$ aynı konum ve zaman için $d_s - d_i$ zamanları arasındaki TEİ değerlerinin ortancasını vermektedir. Bozulma ölçütü $D_d(l)$ 'den yola çıkarak W-indisi, Çizelge 2.1 ile belirlenir.

109E055 projesinde W-indisi ile gerek yer küresel gerek yerel ölçekte 2001'den bu yana oluşan şiddetli fırtınalar incelenmiş ve zaman değişimleri video haline getirilmiştir.

İyonküre kritik frekansları ve yükseklikleri genellikle yer ve uydu tabanlı iyonosonda adı verilen cihazlarla belirlenmektedir. Günümüze kadar Türkiye coğrafyasında iyonosonda çalışmadığı için bu parametrelerle ilgili geçmişe yönelik istatistik oluşturulması imkansızdır. TEİ, uydu ve yer tabanlı çeşitli yollardan dolayı olarak elde edilebilmektedir. Bu yöntemlerin en sık kullanılanı çift frekanslı Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS/Global Positioning System-GPS) alıcılarının kaydettiği bilgilerden kestirimdir. Bu projede gerek TEİ gerek hmF2 ve foF2 değerlerinin ülkemiz coğrafyası için gürbüz, güvenilir ve hassas olarak elde edilmesi ve sürekli gözlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmış ve KD ve uydu kanal modellenmesi, yönbulma, uzay havası gözlenmesi gibi çeşitli kullanım alanlarına alt yapı sağlanmıştır. Sadece Türkiye’de değil, dünyada da bu çalışmalar özgün teknikleriyle IONOLAB grubunu öncü duruma getirmişlerdir. Bir sonraki altbölümde, bu projede dünyada ve Türkiye coğrafyasında arkaplan modeli olarak kullanılan IRI-Plas tanıtılacaktır.

2.2 International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas)

International Reference Ionosphere (IRI) iyonkürenin elektron yoğunluğu ve ısı değişkenliklerinin belirlenmesi için geliştirilen bir uluslararası standart modeldir (GULYAEVA ve BILITZA, 2012), (BILITZA, 2001), (BILITZA ve REINISCH, 2008), (IRI-2007). IRI modeli International Union of Radio Science (URSI) and COmmittee on SPace Research (COSPAR) eş çalışma grupları tarafından geliştirilmektedir. COSPAR grubunun temel amacı iyonkürenin uzay araçları ve uzayda yapılan deney üzerine olan etkilerinin belirlenmesidir. URSI çalışma grubu ise radyo dalgalarının (elektromanyetik dalgaların) iyonkürede yayılımı ve uygulamaları için IRI elektron yoğunluğu ile arkaplan iyonkürenin belirlenmesidir. Verilen bir tarih ve konum için IRI, elektron yoğunluğu, iyon bileşkesi, iyon ve elektron sıcaklıkları ve TEİ değerlerini (IRI-TEC) aylık ortalama değerlerden yola çıkarak hesaplar. Uzun yıllara ve çalışma sürelerinde yapılan kampanya bazlı gözlem ve deneylere dayanan IRI, şu anda Literatürde iyonküre için en yaygın kullanılan ve güvenilir bir ampirik-deterministik kestirim programıdır. IRI, iyonküre çalışmalarının başladığı 1960’lardan bu yana yıllık çalıştaylarda bir araya gelerek modellerini sürekli güncellemiş ve geliştirmiştir. Bu güncelleme ve geliştirmelerde kullanılan veriler temel olarak iyonosonda kullanılarak kestirilen kritik frekans ve kritik yükseklik ver-

ilerine dayanmaktadır. Dünyada iyonosonda cihazları çok seyrek olarak yerleştiği ve genellikle kuzey yarımkürede buldukları için tüm iyonkürenin dinamiklerini yansıtmakta yetersiz kalmaktadır. Ülkemiz coğrafyasından hiç veri toplanmadığı ve IRI çalışma gruplarına sunulmadığı için Türkiye bölgesinde arka plan çok geniş bir bölgede ve zamanda doğrusal aradeğerlemelere dayanmaktadır. Ayrıca IRI-2007, iyonkürenin 100 km ile 2000 km arasını modellemektedir.

TÜBİTAK 110E296 ve RFBR 11-02-91370-CT_a projesinde Rus tarafının yürütücüsü Dr. Tamara Gulyaeva, IRI grubunun en etkin üyelerinden biridir. İyonküre üzerine dünyada belli başlı uzmanlardan olan Dr. Gulyaeva'nın konu üzerine 170'ten fazla yayını vardır. 2010 yılında Dr. Gulyaeva, IRI programını YKS kayıtlarından elde edilen TEİ değerlerini (YKS-TEİ) kullanarak güncellemiş ve YKS uydu yüksekliği olan 20,200 km'ye kadar iyonküre ve plazmakürenin modellenmesini sağlamıştır (GULYAEVA vd, 2009). Yeni geliştirilen bu bilgisayar programı IRI Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) olarak adlandırılmıştır. IRI-Plas programının en önemli katkısı, YKS-TEİ girdisi ile ölçek yüksekliğinin (τ) güncellenebilmesidir. τ , F2 katmanının kritik frekansı foF2 değerinin TEİ değerine oranını verdiği için YKS-TEİ ile iyonküre model parametreleri ve elektron yoğunluğu yakın gerçek zamana göre hesaplanabilmektedir. Bu projede IRI-Plas programı yerel, bölgesel ve yerküresel olarak YKS-TEİ girdileri ile güncellenmiş ve eniyileme algoritmaları ile 'sanal iyonosonda' olarak çalıştırılacak kadar hassas parametrik değerlere ulaşılmıştır.

2.3 ICEPAC ve HF-PRE

Institute for Telecommunication Sciences (ITS) tarafından geliştirilen Ionospheric Communication Analysis and Prediction Program (IONCAP), KD kanal öngörüsünde kabul görmüş ve sıklıkla kullanılan bir model olmuştur. IONCAP programının özellikle kutup bölgelerinde başarımı sınırlı olduğu için Tascione tarafından 1987 yılında tanımlanan Ionospheric Conductivity and Electron Density Profile (ICED) modeli eklenerek Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit Prediction (ICEPAC) paket programına dönüştürülmüştür (ICEPAC User Manual). ICED profil modeli kuzey yarımkürenin geniş ölçekli özelliklerinin istatistiksel bir modelidir. Model iyonosferin varolan değişik bölgeleri için farklı fiziksel işlemleri tanımaktadır. Model alt-ororal oluk, ororal bölge ve kutup kapağı için farklı algoritmaları içermektedir.

ICEPAC modelinin temelinde iyonosferin bir yada daha fazla Chapman katmanı ile gösterilebileceği varsayılmaktadır. Chapman katmanları en fazla iyonlaşmanın olduğu yükseklik, yarı-kalınlık ve elektron yoğunluğu hakkında bilgi vermektedir. Olası herhangi bir iletim yolunda ortalama elektron yoğunluğu dağılımının yükseklikle değişiminin öngörüsü için yeterince verinin elde olması gerekmektedir. Bu model ölçeklendirmek ve iyonosferik özellikleri öngörmek içindir. Modelde eşdeğer yol teoremi ve iletim eğri çözümü korunmuştur (ICEPAC Technical Manual). ICEPAC, KD yayın sistemlerinin beklenen başarımlarını ve KD iletiminin çalışması ve planlanmasında çok kullanışlı olan dört mevsim, farklı GLS, günün farklı saatleri ve farklı coğrafik bölgeleri için öngörmektedir. ICEPAC programı, iyonosferik parametreler, kullanılabilir en üst frekans, sistem performansı, anten örüntüleri olarak gruplandırılabilen dört temel analizi gerçekleştirmektedir. Program belirli bir devre için kullanılabilir en üst frekans (MUF), en uygun trafik frekansı (FOT), kullanılabilir en alt frekans (LUF) gibi uzun dönem çalışma parametrelerini başarılı iletim olasılığı açısından öngörür. İletimin başarı olasılığı, iletim frekansının F2 katmanının kritik frekansının altında olması olasılığına ve sinyal gürültü oranının belirlenen sinyal gürültü oranının seviyesinden küçük olma olasılığına bağlıdır. IRI programından farklı olarak ICEPAC ile anten örüntü paketini içeren HF-PRE programı, noktadan noktaya bir KD iletişim hattının ortalama parametre değerlerini vermektedir.

Programda kullanıcı tarafında belirlenen 30 çıktı seçeneği mevcuttur. Bunlar dört gruba ayrılmaktadır; iyonosferik tanımlama, anten örüntüleri, kullanılabilir en üst frekans öngörülere, kullanılabilir en alt frekans öngörülere ve sistem performansı öngörülere. Bunların yanı sıra pek çok grafik çıktı seçeneği vardır. ICEPAC programı FORTRAN 77 kullanılarak IBM PS2 Model 80 bilgisayarında geliştirilmiştir. 1995 yılında DOS ortamındaki yazı ekranından Windows ortamındaki grafiksel kullanıcı arabirimine geçilmesine karar verilmiştir (ICEPAC User Manual).

İyonküre kritik parametrelerinin belirlenmesinde IRI programına çok benzer modeller kullanmakla beraber HF-PRE içinde çalışan IONCAP, iletişim hattı vurgusu taşımaktadır. Bu proje kapsamında gerek IRI ve gerekse IONCAP program çıktıları Türkiye coğrafyasında sanal linkler üzerinden incelenmiştir. IRI-Plas programının iyonküre fiziğini daha iyi modellediği, TEİ, kritik frekans ve kritik yükseklik girdileriyle yakın gerçek zamana daha uygun sonuçlar üretebildiği gözlenmiştir. Bu nedenle proje çalışmalarında IRI-Plas programı seçilmiştir. Bu çalışmaların ayrıntıları II. Dönem

Ara Raporu, EK 2 IP2'de sunulmuştur. Bir sonraki altbölümde bu proje kapsamında geliştirilen ve IRI-Plas eniyilemesinde kullanılan IONOLAB-TEC tanıtılacaktır.

2.4 YKS-TEİ ve IONOLAB-TEC

IONOLAB-TEC, IONOLAB grubu tarafından 2001 yılından bu yana geliştirilmekte olan çift frekanslı YKS alıcılarının kaydettiği sözde menzil ve faz kayması değerlerini özgün bir algoritma ile işleyerek alıcının yerel başucu açısı yönünde TEİ kestirimleri yapan yöntemin ve bu yöntem kullanılarak kestirilen TEİ değerinin adıdır. Bu altbölümde YKS sözde menzil ve faz değerlerinden özgün IONOLAB-TEC kestirimlerinin elde edilme yöntemi özetlenecektir.

Yerküresel/Global Konumlama Sistemi (YKS) uydu tabanlı radyo-frekans yön bulma sistemi olup A.B.D. Savunma Bakanlığı tarafından sivil ve askeri amaçlarla işletilmektedir (TSUI, 2000; LEICK, 2004). YKS alıcıları uydu işaretlerini kullanarak konum, hız ve zaman kestirimi yaparlar. Konum ve zaman bilgileri için en az dört uydudan alınan işaretlere gereksinim vardır. YKS'in temel amacı konum belirlemektir. Uçaklarda, gemilerde, kara taşıtlarında YKS alıcıları seyir amaçlı olarak kullanılmaktadır. Yer kabuğu incelemeleri gibi jeofizik uygulamaları da bu yön-yer tespitine yönelik uygulamalar arasında sayılabilir. YKS alıcılarının sağladığı hassas zaman bilgisi de astronomik gözlemler, haberleşme uygulamaları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

YKS sinyali L-bandında, L1 ($f_1 = 1575,42$ MHz) ve L2 ($f_2 = 1227,6$ MHz) kanallarından gönderilir. İki farklı frekansta işaretin gönderilmesinin nedeni iyonküreden kaynaklanan gecikmenin kalibrasyonudur. YKS alıcıları, uydulardan gelen işaretlere ait gözlem parametrelerini belirli zaman aralıklarıyla kaydeder. Bu gözlem parametreleri sözde menzil ve fazdır. Sözde menzil, işaretin uydudan gönderilme zamanı ile alıcıya ulaşma zamanı arasında geçen süreye bağlı olarak hesaplanan menzil değeridir. Hesaplanan bu menzil değeri iyonküre, troposfer, alıcı ve uydu yansılıkları nedeniyle birtakım gecikmeleri de içerdiği için uydu ile alıcı arasındaki gerçek menzil değerinden farklıdır.

YKS incelemelerinde faz değeri işaretin kaç dalgaboyu yol aldığı ifade etmektedir. Bir başka deyişle faz değeri işaretin tur sayısıdır. YKS alıcıları uydulardan alınan işaretlerin o andaki faz kesrini kaydeder. Uydudan gönderilen işaret alıcıya ulaşana kadar faz değerinin kaç tur değiştiği ise bilinmemektedir. Sözde menzil ve faz gözlem parametreleri alıcılar tarafından Receiver Independent Exchange Format (RINEX) dosyasına

kaydedilmektedir. RINEX biçimindeki ölçüm dosyalarına internetten erişilebilmektedir (RINEX). RINEX dosyaları içinde 30 saniyede bir alıcı tarafından gözlenebilen tüm uydulardan hesaplanan sözde menzil ve faz gecikmesi değerleri için oluşturulan modeller her iki frekans için ayrı ayrı yazılmalıdır (NAYİR, 2007; RIZOS, 1999). Her iki frekans için yazılan sözde menzil ve faz modelleri farkından iyonkürenin toplam elektron içeriğine bağlı geometriden bağımsız birleşim (GBB) oluşturulabilir.

TEİ, *STEC* ve *VTEC* olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir. *STEC*, alıcı ile uydu arasındaki hat üzerinde hesaplanan toplam serbest elektron miktarı; *VTEC* ise alıcıya göre yerel zenit doğrultusunda hesaplanan toplam serbest elektron miktarıdır. Seçilen bir u alıcı istasyonu için m . uydudan, n . ölçüm zamanında GBB sözde menzilden hesaplanacak *STEC*

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4,u}^m(n) + c(DCB_m + DCB_u)] \quad (2.5)$$

GBB faz gecikmesinden elde edilecek *STEC*

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [L_{4,u}^m(n) + c(DCB_m + DCB_u) - \Delta N^m] \quad (2.6)$$

olarak verilebilir. Yukarıdaki denklemlerde P_4 ve L_4 sırasıyla sözde menzil ve faz gecikmesi için GBB değerlerini, $A = 40,28 \text{ m}^3/\text{s}^2$ bir sabit değeri, c ışığın boşluktaki yayılma hızını, DCB_m ve DCB_u sırasıyla uydu ve alıcı yanlılık değerlerini, ΔN^m m . uydu için faz belirsizliği farkını ifade eder. Toplam uydu sayısı M , toplam ölçüm sayısı N ile gösterilirse m ve n için $1 \leq m \leq M$ ve $1 \leq n \leq N$ yazılabilir.

STEC değerinden yola çıkarak *VTEC* değeri bir izdüşüm fonksiyonu ile aşağıdaki gibi hesaplanır (ARIKAN F. vd, 2003). Bu dönüşüm için iyonkürenin sonsuz incelikte ince bir tabakadan oluştuğu varsayımı yapılmaktadır (ARIKAN F. vd, 2003; LANYI ve ROTH, 1988; SCHAER, 1999).

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n)/M(\epsilon_m(n)) \quad (2.7)$$

ve

$$M(\epsilon_m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \epsilon_m(n)}{R + h} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2.8)$$

Eş. 2.7 ve Eş. 2.8'de ϵ yerel yükseklik açısını, n ölçüm anını, R dünyanın yarıçapını ifade etmektedir. R dünyanın ekvatorial yarıçapı olup 6.378,137 m'dir. İyonküre yüksekliği, en yüksek iyonlaşmanın olduğu yükseklik olup h ile gösterilmektedir.

Yukarıda anlatılan ve görece basitçe ifade edilebilen TEİ değerlerinin bir istasyon için kayıt aralığı olan 30 saniyede bir hesaplanması çeşitli zorluklar içermektedir. Eş. (2.7)'de verilen *VTEC* değerleri aynı anda 12 uyduya kadar görebilen alıcı tarafından kaydedilen n . ölçüm anının *STEC* hesaplamaları kullanılarak bulunmaktadır. *STEC* değerleri ise yine Bölüm (2.4)'de anlatıldığı üzere sözde menzil kullanılarak (Mutlak TEİ), faz kullanılarak (Görelî TEİ), veya ikisinin birleşiminden oluşan karma yöntemler kullanılarak olmak üzere üç farklı şekilde hesaplanabilir (ARIKAN F. vd, 2003). Sözde menzil ile TEİ hesaplanması sadece P_4 gerektirdiğinden görece kolay bir yöntemdir. Bu yöntemin dezavantajı ise sözde menzil ölçümlerinin gürültülü olması ve çok-yol etkisinin oluşabilmesidir. Faz ölçümleri ise daha az gürültülüdür ve çok-yol etkisi daha azdır fakat ilk faz belirsizliği ve faz kopmaları nedeniyle sadece L_4 kullanılarak Görelî TEİ hesaplanması pratik nedenlerden dolayı mümkün değildir. Üçüncü bir yöntem ise hem sözde menzil hem de faz ölçümlerinin kullanıldığı yöntemdir. Bu yöntemde ise faz belirsizlikleri giderilebilir ve daha hassas TEİ değerleri hesaplanabilir, fakat faz kopmaları sorunu devam etmektedir (ARIKAN F. vd, 2003). Faz ve sözde menzil değerlerinin TEİ hesaplanmasında bir araya getirilmesinde literatürde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Sonuç olarak kullanılan tekniklere ve hesaplama dahil edilen verilerin sayısı ve çeşidine göre bulunan TEİ değerleri birbirlerine göre farklılık gösterirler. İyonkürenin her türlü değişimi içine alabilecek tam bir modeli olmadığı için tüm hesaplanan TEİ değerleri bir belirsizlik içermektedir. Sadece uzaklık veya sadece faz kullanarak TEİ hesaplanması teorik olarak basit ve güvenilir formüllere dayansa da faz belirsizlikleri ve gürültü yüzünden pek çok uluslararası iyonküre araştırma merkezi, başucu açısı etrafında gözleyebildiği tek bir uyduyu izleyerek ve farklı doğrusal teknikler kullanarak yerel TEİ'yi ancak iki saatlik ortalama çözünürlükle elde edebilmektedirler (IGS, IONEX). İyonküre tabakasının zamana, konuma, ve frekansa bağlı değişimleri ve bozulmaları, alıcı ve uydu hata paylarındaki belirsizlikler, ve farklı uydu yörünge ve konumları uluslararası merkezler tarafından hesaplanan TEİ değerlerinin geçerliliğini önemli ölçüde sınırlamaktadır. Özellikle iyonkürenin hızla değişim gösterdiği ve ortalama saptığı durumlarda yukarıda bahsedilen yaklaşımlar ne konum ne de zaman çözünürlüğü açısından yeterli olmaktadır. TEİ elde etme yöntemlerinin farklılığı çeşitli merkezler tarafından aynı bölge ve zaman dilimi için hesaplanan TEİ değerlerinin de birbirini tutmamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla ile YKS ölçümlerinden güvenilir ve gürbüz TEİ hesaplanması aktif bir araştırma konusudur.

F. Arıkan, C.B. Erol ve O. Arıkan tarafından geliştirilen TEİ hesaplama yöntemi Düzgünleştirilmiş TEİ (D-TEİ) bu konuda çok önemli bir aşama kaydedilmesini sağlamıştır (ARIKAN F. vd, 2003, 2004). Bu yöntemle dünya üzerinde herhangi bir YKS alıcı istasyonu ve herhangi bir zaman dilimi için TEİ değerleri alıcının en alt başucu açısı olan 10^0 üzerindeki tüm uydularının verilerini kullanarak, ve alıcıların sınırı olan 30 s zaman çözünürlüğünde Düzgünleştirilmiş En Küçük Kareler yöntemi ile hesaplanmaktadır. Görüş açısı içindeki tüm uyduları kullanan, 30 s zaman çözünürlüğünde ve gürbüz kestirim yapabilen Düzgünleştirilmiş En Küçük Kareler yöntemi ile hesaplanan TEİ değerleri (D-TEİ) uluslararası merkezlerin ve IRI'nın (IRI-TEC) incelenen istasyonlar ve zamanlar için hesapladığı TEİ değerleri ile karşılaştırılmış ve diğer hesaplamalara göre gürbüz, yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde son derece başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür (ARIKAN F. vd, 2007a), (EROL vd, 2002a; 2002b).

TÜBİTAK 105E171 nolu projede D-TEİ yöntemi geliştirilmiştir. (NAYİR, 2007) ve (NAYİR vd, 2007a-2007d) tez, makale ve bildirimlerinde ayrıntılandırıldığı gibi faz doğrultmalı, gürbüz ve güvenilir D-TEİ yöntemi, otomatik TEİ kestirimi yapabilir düzeye getirilmiştir. IONOLAB-TEC olarak adlandırılan bu kestirim yöntemine 109E055 projesinde faz kopmaları tamiri, ve kısa zaman aralıklı aradeğerlemeler eklenmiş ve yakın gerçek zamana uyarlanmıştır.

D-TEİ yönteminde, IGS tarafından yayınlanan uydu yörünge bilgileri (efemeris), uydu yanlılığı bilgileri kullanılmaktadır. Alıcı yanlılığı ise her istasyon için bildirilmemektedir. TÜBİTAK 105E171 nolu projede herhangi bir tek TKS alıcı istasyonu için alıcı yanlılığını IGS merkezlerinin TEİ kestirim değerine göre ölçekleyen IONOLAB-BIAS yöntemi geliştirilmiş ve IONOLAB-TEC içinde kullanılmaya başlanmıştır (ARIKAN F. vd, 2008a), (AYSEZEN vd, 2007). IGS'ye bağlı uluslararası araştırma merkezleri çeşitli istasyonlar kullanarak TEİ kestirimlerini $2, 5^0$ enlem, 5^0 boylam, iki saat zaman çözünürlüğünde internet üzerinden IONosphere Map EXchange Format (IONEX) dosyası formatında kullanıcıya sunmaktadırlar (IGS, IONEX). Global Ionospheric Maps (GIM) olarak adlandırılan bu dosyalar yerküresel iyonküre TEİ kestirimleri için önemli bir dayanak noktası oluşturmaktadırlar. IONOLAB-BIAS ile herhangi bir istasyon için yapılan IONOLAB-TEC kestirimleri GIM-TEİ değerlerini genlik olarak kullandığı için tüm dünyadan kullanıcılar için başvuru kaynağı olmaktadır.

TÜBİTAK 105E171 nolu projede IONOLAB-TEC internet üzerinden otomatik

İstasyon Adı	İstasyon Kodu	Enlem ($^{\circ}K$)	Boylam ($^{\circ}D$)
Akhisar	akhi	39,0	28,0
Ankara	ankr	39,9	32,8
Antalya	anta	36,8	30,6
Avcılar	avct	41,0	28,7
BüyükAda	badt	40,9	29,1
Bucak	bcak	37,3	30,7
Bozburun	bozt	40,5	28,8
Bozüyük	bozu	39,9	30,0
Çine	cinc	28,0	37,6
Dumanlıkaya	dumt	40,6	29,4
Elmalı	elmi	36,8	29,8
Edremit	erdt	40,4	27,8
Eşme	esme	38,5	29,0
Harran	hrn	37,2	39,0
İstanbul	İsta	41,1	29,0
Kars	kars	40,6	43,1
Kandilli	kant	41,1	29,1
Karacabey	kart	40,3	28,3
Konya	knya	38,0	32,5
Marmara Adası	madt	40,6	27,6
Marmara Ereğli	mer1	41,0	28,0
Mersin	mers	36,6	34,3
Mihalıççık	miha	39,9	31,5
Malatya	mlty	38,3	38,4
Niğde	ngde	38,0	34,6
Lefkoşe	nico*	35,1	33,4
Erivan	nssp*	40,2	44,5
Şuhut	shut	38,5	30,5
Sivas	svas	39,8	36,9
Trabzon	trab	41,0	39,7
Tübitak	tubi	40,8	29,5
Tavas	tvas	37,4	29,1
Üçgaziler	ucg2	40,8	30,0
Uludağ	ulut	40,1	29,1
Yunak	yuna	38,8	31,7
Yozgat	yzgt	39,8	34,8

Çizelge 2.2: TUSAGA YKS alıcı coğrafi koordinatları

syonu bulunmaktadır. Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ne düzgün aralıklarla konuşlandırılan istasyonlar birbirlerine en fazla 80 km ile 100 km mesafede bulunmaktadır. TUSAGA-Aktif ağında yer alan istasyonların konumları alfabetik sırada Adana-Cihanbeyli arası Çizelge 2.3'de verilmiştir.

İstasyon Adı	İstasyon Kodu	Enlem ($^{\circ}K$)	Boylam ($^{\circ}D$)
Adana	adan	37,00	35,34
Adıyaman	adiy	37,75	38,23
Afyon	afyn	38,74	30,56
Ağrı	agrd	39,72	43,03
Akdağmadeni	akdg	39,66	35,87
Akşehir	akhr	38,37	31,43
Akseki	aksi	37,05	31,79
Aksaray	aksr	38,37	34,00
Amasya	amas	40,67	35,85
Anamur	anmu	36,07	32,87
Ankara	anrk	39,86	32,85
Gaziantep	ante	37,06	37,37
Antalya	antl	36,89	30,67
Ardahan	ardh	41,11	42,70
Arapgir	arpk	39,04	38,49
Artvin	artv	41,18	41,82
Aydın	aydl	37,84	27,84
Ayvalık	ayvl	39,31	26,69
Balıkesir	balk	39,64	27,89
Bandırma	band	40,33	28,00
Başkale	bask	38,04	44,02
Bayburt	bayb	40,25	40,19
Beyşehir	beys	37,68	31,75
Bilecik	bile	40,14	29,98
Bingöl	bing	38,89	40,50
Boğazlıyan	bogz	39,19	35,26
Bolu	bolu	40,73	31,60
Boyabat	boyt	41,46	34,80
Batman	btmn	37,86	41,15
Bursa	burs	40,21	29,02
Çanakkale	cana	40,11	26,41
Çankırı	cank	40,61	33,61
Çatak	catk	38,01	43,06
Çavdır	cavd	37,16	29,69
Çeşme	cesm	38,30	26,37
Cihanbeyli	ciha	38,65	32,92

Çizelge 2.3: TUSAGA-Aktif YKS alıcı coğrafi koordinatları (adan-ciha)

Çamlıdere-İnebolu arası Çizelge 2.4'de sunulmuştur.

İpsala-Osmaniye arası Çizelge 2.5'de bulunmaktadır.

Özalp-Zonguldak arası Çizelge 2.6'te verilmiştir.

TUSAGA-Aktif ağı coğrafi konumları Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

İstasyon Adı	İstasyon Kodu	Enlem ($^{\circ}K$)	Boylam ($^{\circ}D$)
Çamlıdere	cmlđ	40,49	32,47
Çorum	coru	40,57	34,98
Datça	datc	36,71	27,69
Demirci	deir	39,03	28,65
Denizli	deni	37,76	29,09
Didim	didi	37,37	27,27
Dinar	dina	38,07	30,17
Divriği	divr	39,39	38,10
Diyarbakır	diyb	37,95	40,19
Edirne	edir	41,68	26,55
Ekinözü	ekiz	38,06	37,19
Elazığ	elaz	38,64	39,26
Emirdağ	emir	39,02	31,14
Ergani	ergn	38,27	39,76
Erzincan	erzi	39,75	39,51
Erzurum	erzr	39,91	41,26
Eskişehir	esks	39,75	30,46
Fatsa	fasa	41,05	37,48
Feke	feek	37,82	35,91
Fethiye	feth	36,63	29,12
Finike	fini	36,30	30,15
Gemerek	geme	39,19	36,08
Giresun	girs	40,92	38,39
Gümüşhane	gumu	40,44	39,52
Gürün	guru	38,72	37,31
Güzelyurt	gyur	35,20	32,99
Hakkari	hakk	37,57	43,74
Halkapınar	halp	37,45	34,18
Harmancık	harc	39,68	29,15
Hatay	hata	36,21	36,15
Hendek	hend	40,79	30,74
Hınıs	hini	39,37	41,70
Horasan	hors	40,04	42,17
Haymana	hymn	39,43	32,50
İğdır	igir	39,93	44,02
İnebolu	ineb	41,98	33,76

Çizelge 2.4: TUSAGA-Aktif YKS alıcı coğrafi koordinatları (cmlđ-ineb)

İstasyon Adı	İstasyon Kodu	Enlem ($^{\circ}K$)	Boylam ($^{\circ}D$)
İpsala	ipsa	40,92	26,38
Isparta	ispt	37,79	30,57
İstanbul	istn	40,99	28,83
İzmir	izmi	38,39	27,08
İzmit	izmt	40,80	29,95
Karaman	kamn	37,19	33,22
Karapınar	kapn	37,71	33,53
Karacaköy	karb	41,35	28,68
Kayseri	kays	38,71	35,52
Kırkağaç	kika	39,11	27,67
Kırklareli	kirl	41,74	27,22
Kirşehir	kirs	39,16	34,16
Kırıkkale	kikal	39,84	33,52
Kilis	klis	36,71	37,11
Kulu	kluu	39,08	33,07
Konya	knya	38,02	32,51
Karabük	krbk	41,23	32,68
Kars	krs1	40,59	43,09
Kastamonu	kstm	41,37	33,78
Kurucaşile	kuru	41,85	32,72
Kütahya	kuta	39,48	29,90
Lefkoşa	lefk	35,20	33,35
Malatya	maly	38,34	38,22
Malazgirt	malz	39,14	42,53
Kahramanmaraş	mara	37,58	36,93
Mardin	mard	37,31	40,73
Magosa	mgos	35,15	33,91
Midyat	midy	37,42	41,36
Mersin	mrsi	36,78	34,60
Muğla	mugl	37,22	28,36
Muradiye	mura	38,99	43,76
Muş	muus	38,79	41,50
Nallıhan	naha	40,17	31,33
Nevşehir	nevs	38,62	34,70
Niğde	nigd	37,96	34,68
Osmaniye	oniy	37,10	36,25

Çizelge 2.5: TUSAGA-Aktif YKS alıcı coğrafi koordinatları (ipsa-oniy)

İstasyon Adı	İstasyon Kodu	Enlem ($^{\circ}K$)	Boylam ($^{\circ}D$)
Özalp	ozal	38,66	43,99
Pozantı	poza	37,42	34,87
Reşadiye	rdiy	40,39	37,34
Refahiye	rhiy	39,91	38,77
Rize	rzel	41,04	40,49
Salihli	salh	38,48	28,12
Samsun	samn	41,34	36,26
Sarayönü	sarv	36,70	32,62
Saray	sary	41,44	27,92
Şemdinli	semd	37,31	44,57
Sivrihisar	sihi	39,45	31,54
Silifke	silf	36,38	33,94
Sinop	sinp	42,03	35,15
Şırnak	sirn	37,53	42,46
Siirt	sirt	37,93	41,94
Siverek	sive	37,75	39,33
Sivas	sivs	39,74	37,00
Şile	slee	41,17	29,60
Suşehri	sseh	40,16	38,07
Sungurlu	sunl	40,15	34,37
Şanlıurfa	surf	37,19	38,82
Tekirdağ	tekr	40,96	27,50
Tunceli	tnce	39,11	39,55
Tokat	toka	40,33	36,56
Trabzon	trbn	41,01	39,71
Tufanbeyli	tufa	38,26	36,22
Tatvan	tvan	38,53	42,29
Uzundere	uder	40,53	41,55
Uşak	usak	38,68	29,41
Van	vaan	38,57	43,28
Veziroğlu	vezi	41,14	35,47
Viranşehir	vira	37,23	39,75
Yenice	yenc	39,94	27,24
Yozgat	yozt	39,82	34,82
Yunak	yunk	38,82	31,73
Zonguldak	zong	41,45	31,78

Çizelge 2.6: TUSAGA-Aktif YKS alıcı coğrafi koordinatları (ozal-zong)

Türkiye coğrafyasında iyonküre parametrelerinin kestirimi ve iyonküre modellenmesi için büyük bir kazanım olan TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağları 2001-2011 yılları arasında bir güneş döngüsüne yakın zamanda çalışmış ve RINEX dosyaları HGK tarafından kaydedilmiştir. Kampanya amaçlı kısa süre çalıştırılan istasyonlar hariç, diğer istasyonlarda kalibrasyon hataları, çoklu yol problemleri, operatör ihmali, elektrik kesintisi, veri aktarım hattı kesintisi gibi nedenlerden dolayı her istasyondan her gün için veri toplanamamıştır. u . istasyonun y . yılı içinde veri sayısı tam olan günlerin sayısı $N_{d,u;y}$ olarak gösterilirse, $D_{u;y}$ doluluk oranları aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$D_{u;y} = \frac{N_{d,u;y}}{365} \times 100 \quad (2.9)$$

Yukarıdaki eşitlikte $N_{d,u;y}$, u . istasyonun y . yılı içinde veri sayısı tam dolu olan gün sayısını ifade etmektedir. TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağlarının her istasyon için hesaplanan Eş. 2.9'de tanımlanan doluluk oranları TUSAGA için Çizelge 2.7'de sunulmuştur.

TUSAGA-Aktif ağı istasyonları için doluluk oranları Adana-Emirdağ arası Çizelge 2.8'te sunulmuştur.

Ergani-Magosa arası doluluk oranları Çizelge 2.9'te bulunmaktadır.

Midyat-Zonguldak arası doluluk oranları Çizelge 2.10'de verilmiştir.

105E171 projesi kapsamında kısıtlı sayıda TUSAGA istasyonu kullanılarak Türkiye için yerel iyonküre modeli çalışmaları yapılmış ve (AYSEZEN, 2008) ve (AYSEZEN vd, 2008) tez ve yayınlarında sunulmuştur. Çizelge 2.7'dan Çizelge 2.10'ya kadar olan veriler incelendiğinde istasyonların pek çoğunun çeşitli nedenlerden dolayı aksadığı ve verimsiz çalıştığı ortaya çıkmıştır. Bu durum, proje öneri formunda sunulan yöntemlerde değişiklik yapılmasını gerektirmiştir. Bu ayrıntılar Yöntem ve Bulgular bölümlerinde verilecektir.

2.6 TEİ İstatistik Çalışmaları

İyonkürenin istatistiksel yapısının incelenerek, iyonkürede oluşan uzun dönemli ve kısa dönemli değişimleri gözlemlemek ve tanımlamak, iyonküre özelliklerinin anlaşılması açısından önemlidir. İletişim kanal modelleri değişikliklerin istatistiksel ifadelerine dayanır. IRI-Plas benzeri iklimsel modeller ampirik yapılarından dolayı iyonküre parametrelerinin saatlik ve aylık ortanca ve ortalamalarına dayanır. İyonkürenin kestirimi ve haritalanması için iyonkürenin uzamsal değişiminin ve zaman içinde

İstasyon	2001 (%)	2002 (%)	2003 (%)	2004 (%)	2005 (%)	2006 (%)	2007 (%)	2008 (%)
ankr	84,38	92,60	75,07	58,90	52,05	34,79	18,63	76,16
akhi	-	-	-	52,88	79,45	97,26	65,21	-
anta	-	-	-	89,04	82,19	86,58	62,19	-
avct	-	-	8,22	65,48	88,49	61,64	45,59	71,78
badt	77,26	64,66	-	-	-	-	51,23	72,25
bcak	-	-	-	-	53,15	91,78	84,93	-
bozt	34,52	-	10,13	-	-	18,63	53,97	50,96
bozu	-	-	-	87,67	85,75	64,11	84,48	65,21
cinc	-	-	-	-	61,92	96,71	-	-
dumt	93,15	73,70	60,00	39,18	51,78	-	-	-
elmi	-	-	-	-	62,47	97,53	61,37	89,32
erdt	-	-	99,73	99,18	78,90	73,97	-	66,30
esme	-	-	-	96,71	81,92	96,71	100,00	98,08
hrn	-	-	-	-	-	-	51,78	39,72
ista	31,51	76,99	93,15	30,68	74,79	69,04	-	93,70
kant	86,03	94,52	96,44	88,22	75,62	67,12	96,71	85,21
kart	84,11	72,33	58,63	74,25	60,55	-	51,78	95,34
knya	-	-	-	86,58	87,12	84,11	-	-
madt	62,47	35,62	46,03	15,07	-	-	80,55	-
mer1	89,59	90,41	88,22	-	-	9,59	15,07	93,15
mers	-	53,42	35,89	56,16	77,53	79,45	68,22	77,53
miha	-	-	13,42	51,78	64,11	44,66	49,04	43,01
mlty	-	-	-	-	-	-	55,62	86,85
nico	75,07	85,21	84,38	86,30	-	-	-	81,64
nssp	-	-	52,33	58,36	78,90	-	95,62	93,97
svas	-	-	-	-	-	-	-	79,73
shut	-	-	-	-	-	97,81	64,11	30,14
trab	31,78	60,00	80,82	78,08	50,68	46,85	53,70	-
tubi	92,60	96,44	96,16	98,08	99,45	99,73	99,18	99,18
tvas	-	-	-	-	62,74	67,12	58,36	-
ucg2	90,68	52,05	54,25	-	70,41	25,75	56,71	37,81
ulut	85,21	39,45	52,60	46,30	65,75	-	-	79,73
yuna	-	-	-	66,30	80,27	67,67	62,74	-
yzgt	-	-	-	-	-	-	47,95	-

Çizelge 2.7: TUSAGA YKS ağı veri doluluk oranları



Şekil 2.3: TUSAGA-Aktif ağı coğrafi konumları

İstasyon Kodu	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	istasyon	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)
adan	50,14	74,52	47,40	bogz	30,68	7,40	24,93
adiy	26,85	63,84	44,93	bolu	61,10	69,86	57,81
afyn	65,75	65,75	67,67	boyt	32,60	73,15	52,33
agrd	30,68	56,99	49,04	btmn	42,47	62,19	70,14
akdg	41,64	35,34	47,95	burs	13,42	21,37	56,16
akhr	53,97	80,00	50,96	burs	13,42	21,37	56,16
aksi	34,25	75,07	46,58	cana	47,95	60,55	59,73
aksr	38,63	76,71	49,86	cank	32,88	52,60	35,34
amas	26,30	61,92	60,27	catk	31,23	56,99	55,07
anmu	43,56	78,08	46,30	cavd	48,77	77,81	52,33
anrk	57,53	65,75	68,22	cesm	49,32	75,89	48,49
ante	32,05	72,05	71,23	ciha	64,93	65,48	61,10
antl	52,60	78,08	35,62	cmlld	35,34	70,41	69,86
ardh	30,68	53,42	55,89	coru	56,16	73,70	44,38
arpk	25,21	60,82	50,68	datc	38,90	78,63	51,78
artv	2,47	56,99	58,36	deir	23,56	44,93	14,52
ayd1	44,11	75,07	51,51	deni	26,03	70,96	31,51
ayvl	65,75	67,12	55,89	didi	49,32	64,38	49,86
balk	30,41	57,81	52,60	dina	48,49	72,88	44,38
band	38,90	67,12	66,85	dipk	-	-	6,58
bask	6,85	41,37	16,16	divr	19,45	73,70	53,42
bayb	28,77	47,67	56,44	diyb	29,32	53,15	30,96
beys	19,73	72,33	47,95	edir	64,38	65,21	56,71
bile	43,29	44,93	37,53	ekiz	45,75	74,52	55,62
bing	56,16	73,15	67,12	elaz	49,59	62,19	19,73
				emir	64,66	69,59	62,74

Çizelge 2.8: TUSAGA-Aktif YKS ağı veri doluluk oranları (adan-emir)

İstasyon Kodu	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	istasyon	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)
ergn	45,75	58,08	41,92	istn	67,12	65,75	69,32
erzi	30,96	56,44	43,29	izmi	45,75	54,79	17,81
erzr	28,49	58,36	28,49	izmt	42,47	70,96	44,11
esks	50,14	69,32	54,25	kamn	41,37	60,55	45,48
fasa	38,08	27,67	49,32	kapn	26,58	25,75	
feek	53,15	76,71	41,10	karb	58,08	-	48,77
feth	21,10	63,56	34,52	kays	48,22	68,77	55,89
fini	46,03	76,16	54,25	kika	24,66	57,81	49,32
geme	50,96	54,79	68,77	kirl	53,70	50,96	58,63
girs	37,26	31,78	44,11	kirs	47,95	35,89	44,38
gumu	38,90	26,30	58,90	kkal	35,89	49,32	41,10
guru	8,49	53,15	45,48	klis	26,30	53,97	71,23
gyur	15,62	42,19	18,08	kluu	55,34	58,36	37,53
hakk	34,52	52,60	47,40	knya	32,60	59,73	44,11
halp	32,05	76,71	39,45	krbk	39,45	55,07	60,55
harc	60,27	67,95	57,26	krs1	10,68	15,89	24,93
hata	46,85	74,79	35,34	kstm	54,52	54,52	33,42
hend	43,84	56,44	23,56	kuru	54,79	60,27	76,16
hini	52,33	33,42	29,59	kuta	61,92	55,89	61,64
hors	55,07	72,60	52,05	lefk	11,23	29,04	25,21
hymn	56,16	64,66	26,58	maly	34,52	41,92	42,47
igir	45,75	45,21	48,77	malz	47,95	51,51	53,15
ineb	57,81	72,05	52,05	mara	-	33,15	67,95
ipsa	51,23	67,40	47,95	mard	17,26	44,66	55,34
ispt	41,10	37,81	49,04	mgos	7,67	16,44	19,18

Çizelge 2.9: TUSAGA-Aktif YKS ağı veri doluluk oranları (ergn-mgos)

İstasyon Kodu	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	istasyon	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)
midy	42,47	37,81		sivs	46,30	56,99	50,68
mrsi	50,41	59,73	47,40	slee	62,19	64,11	59,18
mugl	40,27	43,84	29,59	sseh	55,89	73,42	45,48
mura	27,67	44,38	70,96	sunl	25,21	34,52	40,00
muus	29,59	50,96	29,86	surf	41,10	45,21	70,96
naha	28,22	64,66	61,92	tekr	63,56	68,22	48,22
nevs	42,47	77,53	50,96	tnce	31,23	38,36	45,75
nigd	49,32	63,56	47,40	toka	47,67	72,60	50,14
oniy	7,12	40,82	43,29	trbn		22,47	29,59
ozal	37,26	69,04	50,96	tufa	49,86	69,32	34,52
poza	50,14	65,75	51,23	tvan	36,44	40,82	18,63
rdiy	32,88	-	57,53	uder	34,79	35,34	25,21
rhiy	55,89	57,81	30,14	usak	53,70	62,19	51,51
rzel	24,66	61,92	63,56	vaan	41,37	40,27	4,38
salh	36,44	77,81	23,56	vezi	23,84	45,48	45,21
samn	50,96	58,90	49,04	vira	29,59	53,15	38,90
sarv	45,48	48,49	38,90	yenc	44,66	58,63	46,30
sary	57,53	47,40	63,01	yozt	52,33	57,81	45,21
semd	20,00	62,19	53,70	yunk	40,82	65,75	57,81
sihi	67,40	70,68	75,89	zong	56,71	68,49	56,99
silf	44,93	56,44	24,38				
sinp	58,63	68,22	58,08				
sirn	13,70	56,16	55,34				
sirt	16,99	29,86	23,56				
sive	45,21	70,14	60,55				

Çizelge 2.10: TUSAGA-Aktif YKS ağı veri doluluk oranları (midy-zong)

değişimin incelenmesi gerekmektedir. Uzamsal değişimin incelenmesi, haritalama için gerekli çözünürlüğün belirlenmesini sağlarken, zamansal değişim haritanın güncelleme sıklığının belirlenmesinde yardımcı olmaktadır. İyonküre değişkenlik incelemelerinde literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan başlıca parametreler iyonkürenin D, E, F1, F2 katmanlarının kritik frekansları, yayılım faktörü M(3000)F2, F2 katmanının yüksekliği (hmF2), kalınlık parametresi (B0) ve şekil parametresi (B1), en büyük kullanılabilir frekans (EKF) ve TEİ'dir. Literatürde TEİ istatistikleri üzerine çalışmalar çok sınırlı sayıda (TÜREL, 2008). Bu kaynaklarda, değişim istatistiklerinde kullanılan parametreler genellikle Bağlı Sapma, Bağlı Değişkenlik, Türev, Üst Dörtte Birlik, Alt Dörtte Birlik, Dörtte Birlikler Arası Fark ve Onda Birlikler yöntemleri ile incelenmiştir. Bu parametreler içinde yalnız TEİ, YKS gibi uydu tabanlı ölçümlerden elde edilebilir. Diğer parametreler için sınırlı sayıda ve pahalı olan iyonosonda, evre-uyumsuz geri saçılım radarı gibi ölçüm sistemlerine gereksinim vardır. TEİ kestirimi yapan birçok çalışmada iyonkürenin geniş bir bölge için özdeş olduğu varsayılırken, geçici durağanlık süresinin 5-15 dakika arasında değiştiği varsayılmıştır. Küresel ve yerel TEİ haritalaması yapan merkezler (IGS, IONEX), TEİ değerlerini iki saatlik süreler için elde edilen ortalamalardan hesaplamaktadır.

109E055 projesi kapsamında KD iletişim kanalı parametrelerini belirlemede kullanılan HF-PRE paket programı Türkiye coğrafyasında çeşitli enlem ve boylam hatları üzerinden çalıştırılmış ve iletişim hatlarının benzetimi yapılmıştır. İyonküre KD kanalı iletişim parametrelerinin alt ve üst sınırlarının yarım güneş döngüsü içinde değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmaların ayrıntıları II. Dönem Ara Raporu, EK 2 IP2'de sunulmuştur.

Güncelleme sıklığının seçimi, iyonküredeki değişikliklerin yakalanıp gözlemlenebilmesi açısından önemlidir. Güncelleme yeterince sık olmadığı durumda, iyonküredeki değişiklikler gözden kaçırılabilir. Eğer güncelleme sıklığı fazla olursa, bu durumda gereksiz bilgi gözlemlenecek ve işlem yükü artacaktır. İyonkürenin kısa süreli değişikliklerinin karakterizasyonu için kullanılan KAYAN Pencere Analiz (KAPA) yöntemi ilk kez iyonküre kanalından alınan KD verilerine uygulanmış ve sinyal üzerinde Geniş Anlamda Durağanlık (GAD) süreleri belirlenmiştir (ARIKAN ve EROL, 1998). (EROL ve ARIKAN, 2005) yayınında TEİ GAD sürelerinin belirlenmesi için kullanılmaya başlanan KAPA, kayan pencere içinde TEİ'nin birinci ve ikinci momentlerinin istatistiksel özelliklerini kapsamına dayanmaktadır. TÜBİTAK 105E171 projesinde (AKDOĞAN vd, 2007) ve (SAYIN

vd, 2009) çalışmalarında otomatik hale getirilmiştir. 109E055 projesinde bir bölgede bulunan YKS istasyonlarının GAD süresi kestirimlerinin TEİ haritalarının güncellenme sürelerinde kullanılabileceği gösterilmiştir (SAYIN vd, 2010). Ayrıca bu proje kapsamında KAPA, TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağlarına uygulanmış ve 2001-2011 yılları arasında GAD süreleri belirlenmiştir. Sonuçların ayrıntıları Bulgular Bölümünde verilmiştir.

105E171 projesi kapsamında iyonkürenin tüm bölgelerindeki istasyonlar için literatürde ilk defa İlinti serimi yöntemi uygulanmış ve TEİ'nin bölgesel ve zamansal tekrar sıklıkları ortaya çıkarılmıştır. Bu yöntem parametrik olmayan izgel kestirim yöntemidir ve izgel güç yoğunluğunun ayırık zamanda Fourier Dönüşümü ile elde edilir. Bu çalışmadan çıkan sonuçlar IRI-2007 modelinden elde edilen verilerin üzerinde de uygulanmış ve model ile ölçüm verisi arasındaki benzerlik ve aykırılıklar tespit edilmiştir (TÜREL vd, 2007a,b,c), (TÜREL, 2008).

Literatürde TEİ'nin Olasılık Yoğunluk Fonksiyonlarının (OYF) belirlenmesi ilk kez 105E171 nolu proje kapsamında yapılmıştır (TÜREL vd, 2008), (TÜREL, 2008), (TÜREL ve ARIKAN, 2009). OYF hem iyonkürenin rassal modelinin çıkarılmasında hem de KD iletişim için kanal modellemesinde son derece önemlidir. 105E171 projesinde İyonkürenin tüm bölgelerinden seçilen istasyonlarda 1999-2007 arasında var olan veriler toplanmış ve saatlik deneysel dağılımlar elde edilmiştir. Bu deneysel dağımı değerleri Rayleigh, Lognormal, Weibull and K-dağılımı aileleri ile karşılaştırılmıştır (TÜREL, 2008), (TÜREL ve ARIKAN, 2010). 109E055 projesinde OYF kestirimleri TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağlarına uygulanmış ve 2001-2011 yılları arasında saatlik parametrik OYF kestirimleri yapılmıştır (KÖROĞLU, 2012). Bu konu ile ilgili çalışmalar Bölüm 3'de, sonuçlar ise Bulgular bölümünde verilmiştir.

2.7 TEİ Haritalaması

TEİ haritalaması, iyonosfer kesişim noktalarında ölçülen değerler kullanılarak, aradeğerleme ve dışdeğerleme yöntemleriyle, konumda ve zamanda ölçüm yapılamayan yerlerdeki TEİ değerlerinin düzenli ve sık noktalarda kestirimidir. TEİ aradeğerleme yöntemleri, genel olarak, ızgara tabanlı ve fonksiyon tabanlı yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Izgara tabanlı yöntemlerde ızgara noktaları üzerindeki TEİ değerleri ölçüm noktalarındaki TEİ değerlerinden kestirilmektedir (GÜRÜN, 2007; SAYIN, 2008). Fonksiyon tabanlı yöntemlerde ise TEİ dağılımını ifade edebilecek bir fonksiyonun parametreleri

TEİ ölçümlerinden kestirilmeye çalışılmaktadır.

105E171 nolu proje kapsamında yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde her bir YKS istasyonu için gürbüz kestirilen TEİ verileri ileri sinyal işleme teknikleriyle birleştirilmiş, hassas ve güvenilir TEİ haritaları elde edilmesi için son derece ayrıntılı çalışmalar yapılmıştır. Kapsamlı bir literatür taraması ile başlayan çabalar, jeostatistikte sıklıkla kullanılan Krigleme Aradeğerleme Yöntemi, doğrusal olmayan sistemlerde kestirim ve öngörü için tercih edilen Yapay Sinir Ağları (YSA) ve iyonosfer haritalamasında hiç kullanılmamış Rassal Alan Öncülü (RAÖ) ve Radyal Tabanlı Ağlara (RTA) odaklanmıştır. Krigleme, YSA, RAÖ ve RTA'nın uzayda aradeğerleme için seçilmelerinin temel nedeni iyonosferin fiziksel yapısını ve yönsemelerini dikkate alabilmeleridir. Spline, Uzaklığın Tersine ile Ağırlıklandırma (UTA), Küresel Harmonik tabanlı açılım fonksiyonları kullanımlarının kolaylığına rağmen iyonosferin yapısından bağımsız bazı matematiksel fonksiyonların çeşitli katsayılarla biraraya getirilmesi yöntemini izlemektedirler.

Krigleme, maden, jeoloji, meteoroloji, çevre ve ekonomik risk değerlendirme gibi birçok alanda kullanılan bir doğrusal aradeğerleme yöntemidir. Krigleme kestirimi, ölçüm noktalarından doğrusal olarak ve kestirim hatasının değişimini yansızlığı sağlayacak şekilde en aza indirerek bulunduğu için en iyi doğrusal yansız kestirici (BLUE) olarak bilinir. Krigleme yönteminin Ortalamalı Krigleme (Simple Kriging), Ortalamasız Krigleme (Ordinary Krigleme), Evrensel Krigleme (Universal Krigleme), ve Eş-Krigleme (Co-Krigleme) gibi birçok türü bulunmaktadır. Rassal fonksiyonun konumsal bağımlılığının belirlenmesi Krigleme yönteminin temelini oluşturur. En uygun kestirimin yapılmasında, ölçüm noktaları arasındaki konumsal bağımlılığın bilinmesi gerekir. Bir eşdeğişinti veya yarıdeğişinti serimi fonksiyonu kullanılarak konumsal bağımlılık tanımlanabilir. Yarıdeğişinti serimi fonksiyonu sabit mesafe bölümlerine ayrılmış bütün olası noktalar arasındaki farkların değişimlerinin yarısıdır. Tüm aradeğerlemelerde hatada en büyük paylardan biri bu yarıdeğişinti seriminin deneysel verilerden doğru modellenemesinden kaynaklanmaktadır. Krigleme tekniklerinin tümünde aradeğerleme bölgesindeki ölçümlerden yararlanarak deneysel yarıdeğişinti serimi bulunur. Uzay zamansal rassal fonksiyonun yarıdeğişinti serimi fonksiyonunun kestiriminde zamanda bir değişimin olmadığı veya konumda anlık aradeğerlemenin yapıldığı durumlara göre farklı ifade edilmelidir. Zamanda değişmeyen rassal fonksiyonunun yarıdeğişinti serimi fonksiyonu yünden bağımsız olarak hesaplanabiliyorsa, rassal fonksiyon yön bağımsız olarak adlandırılır

(OLEA, 1999). Deneysel yarıdeğişinti serimi fonksiyonunda, değerler belirli uzunluklar için hesaplanır. Bunların dışındaki uzunluklar için yarıdeğişinti serimi değerleri bilinmemektedir. Örneklenmemiş noktalarındaki değerlerin kestiriminde ve rassal fonksiyonun özelliklerinin belirlenmesinde yarıdeğişinti serimi fonksiyonunun değerleri bütün uzunluklar için bilinmelidir. Deneysel yarıdeğişinti serimi değerlerine bir fonksiyon uyarlayarak teorik yarıdeğişinti serimi fonksiyonu bulunur. Buradan ölçüm yapılamayan uzunluklar için gereken değerler elde edilir. Yaygın olarak kullanılan teorik yarıdeğişinti serimi fonksiyonu modelleri üssel, Gauss ve küresel fonksiyonlardır. Deneysel yarıdeğişinti serimi fonksiyonu farklı yönlerde farklı özellikler gösterebilir. Bu durumda rassal fonksiyon yön bağımlı olarak adlandırılır. Yarıdeğişinti serimi modelleri yön bağımsız durumda kullanıldıkları için, koordinatların transformasyonu ile rassal fonksiyon yönden bağımsız hale getirilmelidir. Yöne bağımlılık farklı yönlerdeki deneysel yarıdeğişinti serimi incelenmesi ile tespit edilebilir. Yön bağımlılık, deneysel yarıdeğişinti serimi eş değişinti eğrilerinin nokta çiftleri arasındaki konum vektörüne göre çizilmesiyle incelenebilir. Eğer rassal fonksiyon yön bağımsız ise eşit yarıdeğişinti serimi eğrileri orijin merkezli çemberler olacak, ve böylece yarıdeğişinti serimi sadece konum vektörünün uzunluğuna bağlı olacaktır. Yön bağımlı rassal fonksiyonlarda ise eşit yarıdeğişinti serimi eğrileri yöne bağımlılığın olduğu doğrultu boyunca uzanan elips şeklini alırlar. Bu tipteki yöne bağımlılık, koordinatların doğrusal transformasyonu ile yönden bağımsız hale getirilebilir (WACKERNAGEL, 1998).

105E171 nolu proje sonuçlarına göre Krigleme ile aradeğerleme benzetimlerinde genel olarak değişinti arttıkça ve konumsal ilintiyi ifade eden erim azaldıkça sentetik yüzeyin değişkenliğinin artmasından dolayı hata değerleri artmaktadır. Düzenli örneklemelemlerde değişkenliğin en iyi ve en kötü durumları arasında 10 kata yakın bir fark varken, rassal örneklemelemlerde bu fark daha azdır. Yönseme fonksiyonunu en iyi modelleyen yöntemler daha az hata vermektedir. Yönseme fonksiyonunu en iyi tahmin eden Krigleme yönteminin hatası örnek sayısı ve dağılımına göre en az hataya neden olmaktadır. Sentetik yüzeyler, haritalamala yöntemleri ve örnekleme setleri için yapılan aradeğerlemeler ve ortalama normalize geriçatma hataları değerlendirildiğinde bir aradeğerlemede en önemli unsurun iyonosferin fiziksel dağılımı yani yönsemesi en önemli parametreyi oluşturmaktadır. İyonosferin o andaki koşuluna en uygun Krigleme yöntemi kullanıldığında hata enaza inmektedir. İyonosferin sakin durumlarında küçük ölçekli değişikliğin artması hatanın artmasına neden olmaktadır. İyonosferin hareketli durumlarında ise küçük ölçekli değişikliğin

artması hatayı hemen hiç değiştirmemektedir. Hata için en önemli ikinci parametre örneklerin nasıl dağıldığıdır. Düzgün dağılımlarda normalize ortalama hata rassal dağılımlara göre oldukça azdır. Örneklerin sıklığı arttıkça hatada azalmaktadır. En çok bağlı hata kümeli ve seyrek örneklenmiş çok değişkenlik gösteren iyonosfer yüzeyleri için gözlenmiştir. Yönsene fonksiyonu hesaplariken meydana gelebilecek hatalardan en az etkilendiği için Ortalamasız Krigleme (OK), haritalamanın yapıldığı andaki yönsemenin bilinmediği, kümeli dağılmış, ve az sayıda örnek ile yapılan aradeğerlemeler için daha gürbüz bir yöntemdir. Aradeğerlemelerde kısıt arttıkça, yanlış uygulamalar için hata da artmaktadır.

YSA belirli bir hata oranında doğrusal olmayan fonksiyona yakınsama yapabildiğinden bölgesel iyonosfer haritalama için güçlü bir alternatiftir. Doğrusal olmayan durağan süreçlerin modellenmesinde sıklıkla kullanılan Çok Katmanlı Perseptron (ÇKP) geri yayılım algoritması ve RTA yöntemi YSA içerisinde ayrı ayrı iyonosfere uygulanmışlardır. RTA için yapılan benzetimlerde en az bağlı hatanın düzgün ve rassal dağılım ve örnek sayılarının iyonosferin yönsemelerine göre çeşitlilik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Yüzey tipi yerel olarak çok değişiklik gösterse bile RTA, sık ve düzgün örnekleme ile bunları daha iyi geriçatabilmektedir. ÇKP ise tüm yüzey için olabilecek enaz bağlı hatayı vermekte ve bazı yerel değişiklikleri iyi gösterememektedir. ÇKPnin giriş değerlerini enlem ve boylam bilgileri, çıkış değerlerini ise TEİ kestirimleri oluşturmaktadır. Daha önceden yapılan ölçümler ve IRI modelinden elde edilen veriler ile YSA eğitimi tamamlanmaktadır. YSA yerel bozulmaların nedenlerinin sınıflandırılması ve öngörü için çok iyi bir seçenek oluşturmaktadır. En büyük dezavantajı ise ayrıntılı bir istatistiksel model yada veri tabanı ile yapılacak eğitimlerin hassas ve gürbüz kestirim ve öngörülerde çok önemli bir rol oynamasıdır. Dolayısı ile YSAnın genel olarak başarımı zahmetli ve detaylı eğitim algoritma ve verilerine dayanmaktadır. 105E171 nolu proje kapsamında yapılan tez, sunulan bildiri ve yayınlanan makaleler (GÜRÜN, 2007), (SAYIN, 2008), (GÜRÜN vd, 2007a; 2007b; 2007c), (SAYIN vd, 2007a-d; 2008a-b), (ARIKAN vd, 2009a), (YILMAZ vd, 2009)'de verilmiştir.

Uluslararası YKS Servisi (IGS) Analiz Merkezleri, iki saat zaman, $2,5^0$ enlem ve 5^0 boylam konum çözünürlüğünde TEİ haritaları sunmaktadırlar. Bu haritalara <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/iono> veya <ftp://cdis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/> internet sitelerinden IONosphere Map EXchange Format (IONEX) dosya formatında erişilebilmektedir. Global Ionosphere Maps (GIM) adı altında sunulan bu haritaların en

büyük desavantajı konum ve zamanda çözünürlüğün iyonosferin değişikliklerini takip edemeyecek kadar az olması ve IGS merkezlerinin (bu merkezler The Center for Orbit Determination in Europe (CODE) University of Berne, İsviçre; Jet Propulsion Laboratory (JPL) Pasadena, CA, A.B.D.; European Space Operations Center (ESOC) of European Space Agency (ESA), Darmstadt, Almanya; ve gAGE/UPC of Polytechnical University of Catalonia, Barcelona, İspanya'dır) TEİ kestirim ve haritalarının hesaplama yöntemlerini açık literatürde yayınlamamalarıdır.

109E055 projesinde TUSAGA-Aktif ağına odaklanılmış, ve bölgesel, yüksek çözünürlüklü TEİ haritalama yöntemleri ülkemiz coğrafyasına uyarlanmıştır. TEİ rassal alanı yönseme ve küçük ölçekli değişiklikler olarak iki gruba ayrılmış ve yönbağımlılık incelenmiştir. TUSAGA-Aktif verilerinin uzay-zaman sıklığı proje önerisinde öngörülenden daha az olduğu için birden çok yöntem bir araya getirilerek yeni bir algoritma oluşturulmuştur. Otomatik haritalama yapılması değerlendirilmiştir. IRI-Plas programı GIM haritaları ve TUSAGA-Aktif TEİ kestirimleri ile çalıştırılmıştır. Gerek yerküresel gerek bölgesel foF2, hmF2 ve TEİ haritaları oluşturulmuştur.

TEİ haritalamaya yöntem katkıları Bölüm 3'de, sonuçlar ise Bulgular bölümünde verilmiştir.

2.8 Veri Tabanı

Aynı veriye birden çok kez kere ulaşmak gerektiği durumlarda, bu verinin belirli bir sistematik içerisinde kaydedilmesi, yönetilmesi, güncellenmesi, taşınması için oluşturulan yapıya veri tabanı denir. Birden fazla verinin kaydedilebilmesi için bu veriler arasında ayırteci özellikler belirlenir ve kayıt yığını ya da bilgi parçaları tanımlanır. 105E171 projesi kapsamında iki farklı amaç için veri tabanı uygulamaları yapılmıştır. İlk amaç doğrultusunda, internetten indirilen TEİ bilgileri bilgisayarda kaydedilmiştir. İkinci amaç doğrultusunda ise TEİ kestirimleri ile elde edilen bilgiler tekrar sorgulamaya gerek kalmaması için bir veri tabanında saklanmıştır. Ayrıca HGK'dan verilen Türkiye coğrafyasında çalışan internete açık olmayan YKS istasyon verileri ve deprem kataloğu da bir veri tabanı içinde tutulmuştur. Türkiye üzerindeki mevcut sabit YKS istasyonlarından alınan veriler IONOLAB-TEC ile işlenmiş ve Türkiye'nin geçmişe yönelik bir TEİ alıcı yanlılığı veri tabanı oluşturulmuştur (AYSEZEN, 2008).

109E055 projesinde HGK'dan alınan veri tabanı güncellenmiştir. TUSAGA

ve TUSAGA-Aktif ağılarından toplanan RINEX, IONOLAB-TEC ve istasyon hata logları yeni bir veri tabanında düzenlenerek IONOLAB grubu çalışanlarına sunulmuştur. IRI-Plas-G ve IRI-Plas-Opt çıktısı haritalar gerek www.ionolab.org sitesinde gerek youtube sitesinde IONOLAB altında kullanıcılara açılmıştır. TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağlarının TEİ istatistiği yapılabilen istasyon ve yılları için saatlik istatistiksel bilgileri verebilen bir veri tabanı hazırlanmıştır. Veri tabanları ve uygulama yöntemi Bölüm 3'de, sonuçlar ise Bulgular bölümünde verilmiştir.

2.9 Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT)

İyonküre elektron yoğunluğunun zaman ve uzay içinde kestirimi N_e 'nin zaman ve uzaydaki sürekli değişimi yüzünden çok zor bir problem oluşturmaktadır. Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT), dünya üzerindeki YKS alıcılarının ölçümlerinden elde edilen *STEC* (Eş. 2.5 ve 2.6) verileri ile iyonkürenin enlem, boylam, yükseklik ve zaman içinde gerçatılması işlemine verilen isimdir. İyonkürenin farklı düzeylerdeki değişkenliği ve ölçüm değerlerinde önüne geçilemeyen hata ve yanlışlıklar yüzünden BİT yetersiz belirlenmiş ve kötü-koşullu bir ters-problem oluşturmaktadır. Yeryüzünün çeşitli noktalarına kurulmuş YKS alıcıları bir alıcı dizisi olarak uydulardan gelen sinyallerin iyonküreden geçtiği noktaların doğrusal izdüşümünün elde edilmesini sağlar. Bu doğrusal izdüşümü olan *STEC* değerleri tomografik problemin veri vektörünü oluşturur. Son derece sınırlı sayıda ışın seyrek yerleşmiş YKS alıcıları tarafından kaydedildiği için BİT verilerin konumlarının ve ışın sayılarının araştırmacı tarafından tayin edildiği diğer tomografik problemlerden ayrılmaktadır. İyonkürenin zamanla değişimi ise geliştirilecek tomografi tekniğini zorlaştıracak kısa ve uzun dönemli değişimler içermektedir (KUNITSYN ve TERESHCHENKO, 2003).

Elektron yoğunluğunun yükseklik üzerinden elde edilebilmesi potansiyeli ile BİT son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmiştir. BİT'in çözümü için iki boyutlu seri açılım fonksiyonları, yinelemeli Cebirsel Gerçatma Teknikleri (CGT), YSA ve istatistiksel analiz yöntemleri denenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda temel problem son derece seyrek olan ölçümlerden ileri modeli olmayan ve konum ve zamanda değişen bir ortamın gerçatılmaya uğraşılmasıdır. Yukarıda sayılan yöntemlerin hiçbiri zaman ve uzayda gerekli çözünürlükte ve gürbüzlükte bir tomografik görüntüleme yapmayı başaramamıştır. Tekil Değer Ayırıştırması (TDA) ile açılım fonksiyonu belirlenmesinin Lit-

eratürde kullanılan Küresel Harmonik ve Dalgacık taban fonksiyonlarına göre hesaplama karmaşıklığını azalttığı ve geriçatma başarımını arttırdığı (YAVUZ vd, 2005a; 2005b)'te 2-boyutlu iyonküre tomografisi için gösterilmiştir. İyonkürenin fiziginden bağımsız taban fonksiyonlarının geri çatma probleminde bir seçenek olmadığı ve TDA ile elde edilen taban fonksiyonlarının çok az sayıda olmasına rağmen geliştirilen yeni geriçatma algoritmaları ile son derece gürbüz ve yüksek çözünürlüklü tomografik görüntülemenin mümkün olduğu 105E171 projesinde araştırılarak doğrulanmıştır. (ARIKAN, O. vd, 2007a-b) yayınlarında YKS istasyonlarından alınan TEİ verileri ile IRI modeli arkaplamı kullanarak yeni bir BİT algoritması geliştirilmiştir. (ARIKAN, O. vd, 2007c), (ERTURK, vd, 2007) ve (ERTURK, vd, 2009) yayınlarında yerkürede 56 noktadan alınan YKS-TEİ ile 4 boyutlu elektron yoğunluğu %8 hata ile geriçatılabilmektedir. TDA taban fonksiyonlarına dayanan bu çalışma literatürde bir ilktir ve henüz bu başarımı yakalayabilen bir BİT algoritması daha yoktur.

109E055 projesinde, IRI-Plas programının ölçekleme esnekliğini gözönüne alarak, iki yeni eniyileme temelli yöntem geliştirilmiştir. IONOLAB-TEC ve IONOLAB-STEÇ değerlerini hatayı enaza indirmek için kullanan bu yöntemler elektron yoğunluğu geri çatmasında bir ilki oluşturmuşlardır. Yeni geliştirilen geriçatma yöntemi katkıları Bölüm 3'de, sonuçlar ise Bulgular bölümünde verilmiştir.

2.10 Deprem Uyarı Sinyali

Literatürde son on yıldır gittikçe artan sayıda yayında iyonkürede deprem öncesi depremin büyüklüğü ile ilgili değişiklikler olduğu ortaya konmuştur (ONDOH, 2000), (PULINETS vd, 2003), (PULINETS, 2004), (CERVONE vd, 2005), (RISHBETH, 2006), (ARIKAN vd, 2007c), (HARRISON vd, 2010), (KLIMENKO vd, 2011), (PULINETS ve OUZOUNOV, 2011). Literatürde yer alan bu çalışmalar ışığında yerkürenin sismik hareketliliği ile jeomanyetik alanda oluşan değişimlerin iyonkürenin elektron yoğunluğu, ısısı, kritik frekansları ve TEİ değerlerinde bozulma ve anomalilere neden olduğu gözlenmiştir. Hangi şiddet ve derinlikte, ne tür bir fay hattı yapısında, nasıl bir iletim mekanizmasında iyonkürede tam olarak hangi parametrenin uzay-zaman düzleminde bir alarm sinyalinde kullanılabileceği ise giderek yoğunlaşan güncel bir çalışma alanıdır. 105E171 projesinde iyonkürenin sakin günlerine denk gelen beş adet şiddetli deprem için daha önce literatürede bu konuda kullanılmamış simetrik Kullback-Leibler ölçütü ve \mathcal{L}_2

normu uzay-zaman boyutunda incelenmiş ve literatürde yeralan ilinti katsayısı yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler bir eşik değeri oluşturmaları amacıyla iyonkürenin deprem olmayan sakin günleri ve deprem olmayan bozulmalı günlerini de kapsayan tarihlerde elde edilen TEİ verilerine de uygulanmıştır (ARIKAN vd, 2009b), (KARATAY, 2010), (KARATAY vd, 2009a-b, 2010d).

109E055 projesinde geliştirilen yöntemler TUSAGA-Aktif ağı verilerine uygulanmış (KARATAY, 2010), (ÖZİLHAN, 2010), (KARATAY vd, 2010a-c), (ARIKAN vd, 2012a), ve radar sezim tekniklerine dayalı yeni bir istatistiksel analiz yöntemi üzerine çalışılmaya başlanmıştır. Türkiye son derece hareketli bir deprem bölgesi olduğu için TUSAGA-Aktif istasyonlarının büyük bir kısmı, Şekil 2.4'de diri fay hatlarının yakınında yada üzerinde bulunmaktadır. Yukarıdaki şekilden görüleceği üzere, kaya



Şekil 2.4: Türkiye diri fay haritası (MTA) ve TUSAGA-Aktif istasyonları (kırmızı noktalar)

tabakası yada fay hattı üzerinden analiz yapmak yapıların karmaşıklığı nedeniyle çok zorlaşmaktadır. Yeni incelemelerin ayrıntıları Bölüm 3'de, sonuçlar ise Bulgular bölümünde verilmiştir.

3. YÖNTEM

109E055 nolu proje kapsamında tamamlanan çalışmalar için kullanılan yöntem ve geliştirilen teknikler konularına göre çeşitlilik göstermektedir. Aşağıda verilen alt başlıklarda bu çalışmalar ayrıntılandırılarak anlatılmıştır.

3.1 Çevrimiçi, Yakın Gerçek Zamanlı IONOLAB-TEC Kestirimi

109E055 projesi kapsamında internete bağlı olan ve olmayan YKS alıcı istasyon verilerinden Bölüm 2.4’de anlatılan D-TEİ yöntemi temel alarak otomatikleştirilen ve alıcı yanlılığı için IONOLAB-BIAS kestiren ve kullanan IONOLAB-TEC algoritması geliştirilmiştir. Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen tarafından büyük bir başarı ile güncellenerek www.ionolab.org sitesinden Uzay Havası servisi olarak kullanıma açılan IONOLAB-TEC kestirimleri aşağıda verilen yöntemle hesaplanmaktadır:

Güncellenmiş IONOLAB-TEC Kestirim Algoritması:

1. **Önişlem Aşaması:** IONOLAB-TEC kestiriminin ilk aşaması Bölüm 2.4’de anlatılan a) RINEX dosyalarına ulaşım, b) efemeris dosyalarına ulaşım ve c) IONEX dosyalarına ulaşımıdır. RINEX dosyaları TEİ kestirimi için gerekli olan istasyon verisini sağlar. Efemeris dosyaları YKS uydu koordinatlarını barındırır. Bu koordinatlar sözde menzil ve faz kayması olarak verilen RINEX kayıtlarının hangi uydu konumundan alındığını belirler ve Eş. 2.8’de gösterilen yerel yükseklik yada başucu açılarının hesaplanmasında kullanılırlar. IGS merkezleri, efemeris dosyalarını ‘öngörü’, ‘hızlandırılmış’ ve ‘kesin hesaplama’ olarak gruplayarak sunarlar. ‘Öngörü’ efemeris bilgileri uyduların yörünge denklemlerinin yerden izleme bilgilerine göre hızlı güncellenmesinden oluşur. ‘Hızlandırılmış’ efemeris bilgileri yerden izleme bilgilerine daha ağırlık vererek yörünge denklemleri üzerinde düzeltmeler yaparak sunulurlar. ‘Kesin hesaplama’ efemeris bilgileri ise tüm yerden izleme istasyonlarının ve uydu konumlarının verilerini tekrar gözden geçirilerek geriye dönük hesaplamalarla milimetreye kadar düzeltilmiş uydu yörünge bilgilerini verir. En hassas konumlama bilgisi sunan ‘kesin hesaplama’ efemeris dosyaları tipik olarak 10-15 gün arası bir gecikmeyle kullanılabilir. Yakın gerçek zamanlı iyonküre gözlenmesini olanaksız kılan bu durum TEİ hesaplama hassasiyeti ve yörünge hassasiyeti üzerinden bir ödünleşim sunar. Dolayısıyla pek çok uzay havası merkezi anlık TEİ ke-

stirimlerini hatalı olarak hesaplayabilirler. 105E171 projesinde ‘kesin hesaplama’ efemeris dosyalarını kullanan IONOLAB-TEC algoritması 109E055 projesinde efemeris dosya hassasiyeti açısından incelenmiştir. Bölüm 4’de örnekler üzerinden gösterildiği gibi IONOLAB-TEC kestirimleri efemeris dosya hassasiyetine karşı gürbüz kestirimler sunmaktadır. Bu nedenle güncellenmiş IONOLAB-TEC algoritmasında kullanıcı tarafından istasyon ve tarih bilgileri girildikten sonra program, IGS sitesine o tarihe kadar yüklenen en hassas hazırlanmış efemeris dosyasını indirerek hesaplamaya geçer.

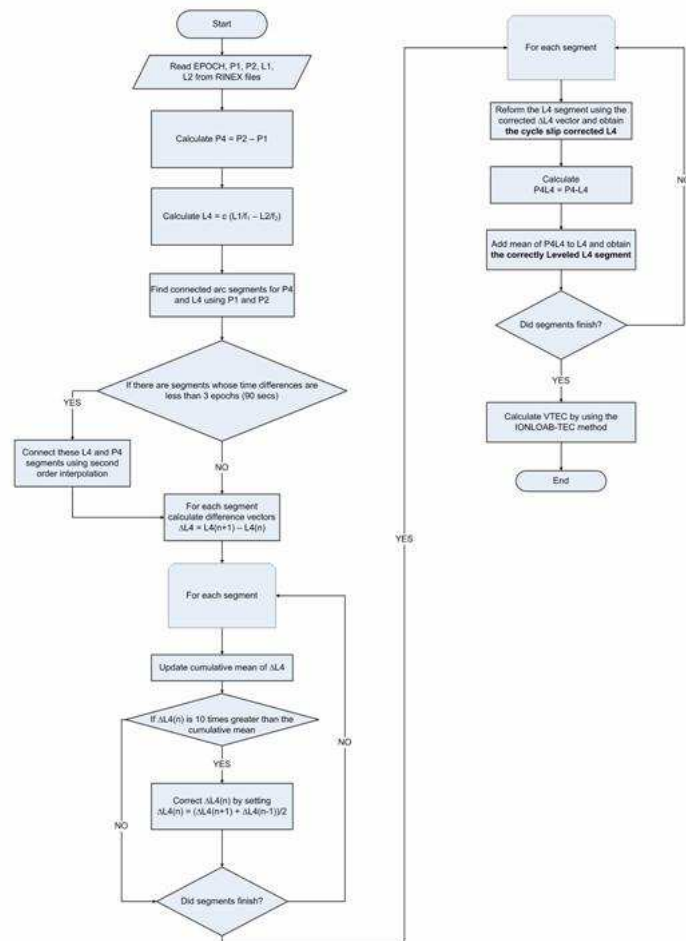
IONEX dosyaları TEİ kestiriminde iki amaçla kullanılmaktadır. Birincisi Eş. 2.8’de gösterilen uydu yanlılığı, DCB_m , bilgileridir. 105E171 nolu projede uydu yanlılığının istatistiksel değişim oranlarının çok az olduğu ve uydu yanlılığı bilgilerinin GIM-TEC haritalarından aradeğerleme ile elde edilen düzeylere uymada çok önem taşıdığıdır. IGS merkezleri ve YKS alıcıları modellerinde uydu yanlılığı bilgilerini kullandığı için IONOLAB-TEC kestirimlerinde de kullanılması gerekmektedir. Bu noktada en büyük sorun, IGS merkezlerinin uydu yanlılığı bilgilerini düzenli olarak güncellememeleri ve bazı aylarda 30 günden çok gecikmeyle siteye yüklemeleridir. 109E055 projesinde, uydu yanlılığı olmadan, bir önceki ayın uydu yanlılığı değerleriyle ve güncel uydu yanlılığı değerleriyle IONOLAB-TEC kestirimleri incelenmiş ve başarımlar karşılaştırılmıştır. Bölüm 4’de örnekler üzerinden gösterildiği gibi IONOLAB-TEC kestirimleri bir önceki yüklenen uydu yanlılığı hassasiyetine karşı gürbüz kestirimler sunmaktadır. Bu nedenle güncellenmiş IONOLAB-TEC algoritmasında kullanıcı tarafından istasyon ve tarih bilgileri girildikten sonra program, IGS sitesine o tarihe kadar yüklenen en son uydu yanlılığı dosyasını indirerek hesaplamaya geçer.

IONEX dosyaları TEİ kestiriminde kullanılan ikinci amacı özgün alıcı yanlılığı, IONOLAB-BIAS, hesaplanmasıdır. IONOLAB-BIAS, IONEX dosyalarında sunulan GIM-TEC değerlerini doğrusal uzay-zaman aradeğerlemesi ile kullanıcı tarafından verilen istasyon konumu ve kestirim zamanı için hesaplar. Daha sonra bu bilgiler Bölüm 2.4’de anlatılan ve (NAYİR, 2007) ve (ARIKAN vd, 2008a)’da ayrıntılandırılan yöntemle alıcı yanlılığı kestiriminde kullanılır. Bu hesaplama için en büyük sorun, GIM-TEC içeren IONEX dosyalarının ‘kesin hesaplama’ efemeris dosyaları gibi 10-15 gün arası gecikmeyle IGS sitelerine yüklenmesidir. IONOLAB-

TEC kestirimlerinin yakın gerçek zamanlı hesaplanmasını olanaksız kılan bu durum, güncellenmiş IONOLAB-TEC algoritmasının kullanıcı tarafından istasyon ve tarih bilgileri girildikten sonra IGS sitesine o tarihe kadar yüklenen en son IONEX dosyasını indirerek kullanması ile ortadan kalkmıştır. IGS sitesine yüklenen bir gün, iki gün ve günlük öngörü, ve kesin hesaplama dosyaları tarih sırasına konarak en son güncellenen IONEX dosyası IONOLAB-BIAS kestiriminde kullanılmaktadır. Yukarıdaki üç aşama ile eğer IGS sitesine yada EUREF sitesine RINEX dosyası yüklenmişse, çevrimiçi, yakın gerçek zamanlı IONOLAB-TEC kestirimleri kullanıcıya sunulabilmektedir. Bu servis hızı, gürbüzlüğü ve yüksek hassasiyeti ile dünyada bir ilki oluşturmaktadır. Bu çalışmaların makalesi hazırlanmaktadır.

2. **Döngü Kopması Tamiri:** Döngü kopmaları, YKS kayıtlarının iyonküre bozulmaları, çevresel yansıma, çoklu yol yada güç kesilmesi gibi alıcı donanım sorunları yüzünden kesilmesidir. Genel olarak faz gecikmesi kayıtlarında gözlenen bu durum gerek konum ve saat, gerekse TEİ kestirimlerini ciddi şekilde aksatabilir. 109E055 projesinde geliştirilen özgün bir döngü tamiri algoritması ile faz gecikme kayıtları (L1 ve L2) taranmakta ve sözde menzil (P1 ve P2) kayıtları kullanılarak düzeltilmektedir (SEZEN ve ARIKAN, 2012). V. Ara Dönem Gelişme Raporunda sunulduğu üzere IONOLAB-TEC kestirimlerinin başarımı otomatik çalışan ve özgün döngü tamiri algoritması ile artmıştır.
3. **IONOLAB-TEC Kestirimi:** IONOLAB-TEC ve IONOLAB-BIAS kestirim algoritmaları (ARIKAN F. vd, 2003; 2004), (EROL vd, 2002a; 2002b), (NAYİR, 2007), (NAYİR vd, 2007a-d), (ARIKAN F. vd, 2007a-b; 2008a-b) tez, bildiri ve makalelerinde ayrıntıları ile toplanmıştır. Bölüm 2'de özeti sunulan algoritma a) Her alıcı ve uydu konumu için 30 s zaman çözünürlüğünde (P1/C1 ve P2) ve (L1 ve L2) kayıtlarından sırasıyla IONOLAB-BIAS, *STEC* ve *VTEC* hesaplar; b) Görüş açısı içindeki tüm uydu verilerini özgün algoritma ile birleştirerek IONOLAB-TEC kestirimi yapar; c) (UĞURLU, 2007), ve (UĞURLU vd, 2007a-c) yayınlarında anlatılan yöntemle www.ionolab.org sitesinden isteğe göre grafiksel yada dosya içinde IONOLAB-TEC kestirimleri sunar.
4. **Kısa Süreli TEİ Aradeğerlemesi:** Alıcı istasyonda güç kesilmesi, veri aktarımı sorunları yada çoklu yol problemleri gibi fiziksel yada yazılımsal nedenlerle TEİ

verileri 30 s zaman çözünürlüğünde hesaplanamayabilir. İkinci maddede anlatılan döngü kopması tamiri yöntemiyle tamir edilemeyebilir. 109E055 projesi kapsamında Prof. Dr. Orhan Arıkan ile çalışan Aykut Yıldız, kopmaların %60'tan fazlasının 15 dakikadan kısa sürelerde olduğunu ortaya koymuştur (YILDIZ vd, 2011). Prof.Dr. Feza Arıkan ile çalışan Lisans öğrencisi M.S. Sapaz bitirme tezinde sakin ve bozulmalı günlerde oluşabilecek kopmaların yapısını incelemiştir. Kopma süresi 15 dakikadan kısa ve kopma genliği 3 TECU'dan az IONOLAB-TEC kesintilerinin Kob- ra Eğrisi ile aradeğerlenebileceğini göstermiştir. Bu algoritma Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen tarafından IONOLAB-TEC kestirimlerine otomatik çalışır halde konmuştur. Yukarıda verilen maddelerin şematik akış gösterimi Şekil 3.1'ta sunulmuştur. Bu



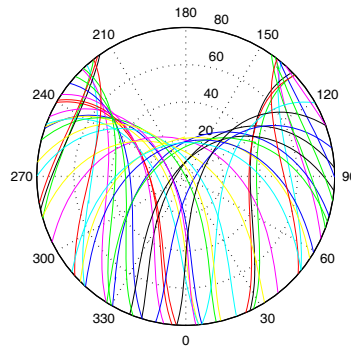
Şekil 3.1: Döngü kopması tamiri algoritması

yöntemin uygulanmasına örnekler Bulgular bölümünde verilmiştir.

5. Çevrimiçi IONOLAB-TEC Kestirimi: www.ionolab.org sitesine kayıt yaptıran

her kullanıcı IGS haritasından seçerek yada EUREF istasyonunun ismini yazarak a) bir gün, bir istasyon; b) bir istasyon, bir tarih aralığı; c) Birden çok istasyon, bir gün; ve d) Birden çok istasyon, bir tarih aralığı için IGS analiz merkezlerinin kestirimleri ile karşılaştırarak IONOLAB-TEC kestirimlerini çevrimiçi, hiçbir dosya indirmesine gerek kalmadan grafik yada excel dosyası formatında alabilmektedir. Bu kapsamda bir servis dünyada yalnız IONOLAB grubunda bulunmaktadır. Giriş bölümünde gösterilen makalelerin özellikle 2010'dan sonra yazılanları IONOLAB-TEC değerlerini kullanmaktadır. Bu atıfların yakın gerçek zamanlı TEİ kullanımının artmasıyla hızla çoğalacağı öngörülmektedir.

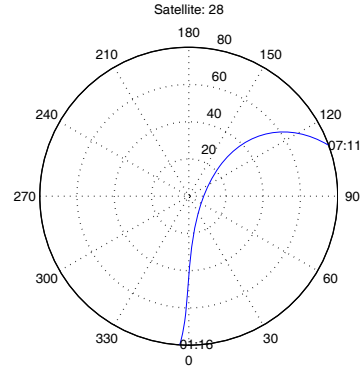
6. **Otomatik Uydu Yörünge İzi Hesaplanması:** YKS uydu yörüngelerinin yerel koordinatlarda hesaplanması ve çizimi için özgün, ve otomatik çalışan bir yazılım geliştirilmiştir. Bu programla bir YKS alıcı istasyonunun yerel koordinatlarda yanca ve başucu açılara göre 30 s çözünürlükle izi hesaplanmakta ve çizdirilmektedir. Şekil 3.2'ta IGS tubi istasyonu (TÜBİTAK, Gebze) yerel koordinatlarında tüm uyduların yörünge izleri verilmiştir. Geliştirilen yazılım tüm uyduların yörüngelerini



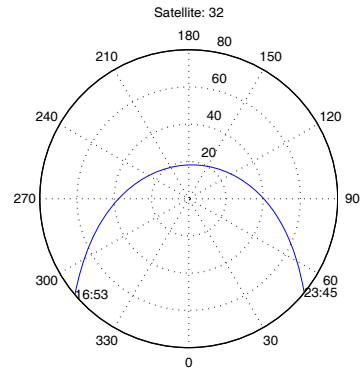
Şekil 3.2: tubi istasyonu, 10 Eylül 2012 günü yerel koordinatlarda YKS uydu izleri; Yanca 0° açısı yerel güneyi göstermektedir.

aynı anda gösterdiği gibi ayrı ayrı da yerel ufuk açısı olan 10° başlayarak zaman bilgisini de vermektedir. Şekil 3.3'ta ve Şekil 3.4'de tubi istasyonu 10 Eylül 2012 günü yerel koordinatlarda, sırasıyla 28 ve 32 nolu uyduların izleri örnek olarak gösterilmektedir.

Yukarıda özetlenen güncellenmiş TEİ kestirim algoritması IONOLAB-TEC, yakın gerçek



Şekil 3.3: tubi istasyonu, 10 Eylül 2012 günü yerel koordinatlarda 28 nolu YKS uydu izleri.



Şekil 3.4: tubi istasyonu, 10 Eylül 2012 günü yerel koordinatlarda 32 nolu YKS uydu izleri.

zamanlı olarak çevrimiçi uzay havası servisi olarak www.ionolab.org sitesinden sunulmaktadır.

3.2 YKS Ağları için Özgün Uzay-Zaman TEİ Aradeğerlemesi

109E055 projesi kapsamında Bölüm 3.1’de anlatılan kısa süreli TEİ aradeğerleme kapsamına girmeyen 15 dakikadan daha uzun yada 3 TECU genliğinden daha fazla olan TEİ kesilmelerinin YKS ağındaki komşu istasyonları kullanarak uzay-zaman aradeğerlemesi yapan STI-TEC1 ve STI-TEC2 olarak adlandırılan iki ayrı yöntem geliştirilmiştir. STI-TEC1 yönteminde bir YKS ağında yer alan u istasyonunun, d . gününde olan eksik verileri, R_r yarıçapındaki komşu istasyonların d . gününden farklı günlerindeki verilerinden yararlanılarak enaz kareler yöntemine dayanarak kestirilir. u istasyonunun, d . gününde olan eksik verilerin R_r yarıçapındaki komşu istasyonların verilerinden yararlanılarak uzaysal aradeğerlemesi $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r}$, kesintinin olduğu sürede kobra eğrisi yada çokterimli ile zamansal aradeğerlemesi $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;N_n}$ olarak adlandırılırsa, veri kesintisinin uzay-zaman birleşimi ile aradeğerlemesi

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;c} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r} + (\mathbf{I} - \mathbf{G})\hat{\mathbf{x}}_{u;d;N_n} \quad (3.1)$$

olarak yazılabilir. Yukarıdaki eşitlikte \mathbf{G} , köşegen bir matristir ve elemanları

$$g_k = \frac{\sum_{d_n=d_i}^{d_s} (\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k)) (x_{u;d_n}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))}{\sum_{d_n=d_i}^{d_s} (\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))^2} \quad (3.2)$$

yada

$$g_k = 1 - \frac{e^{-\beta(k-1)} + e^{-\beta(N_n-k)}}{1 + e^{-\beta(N_n-1)}} \quad (3.3)$$

eşitlikleri ile bulunabilir. \mathbf{I} , birim matristir. Komşulukların geçmiş $d_i - d_s$ arasındaki günlerinde de veri kesintisi bulunuyorsa Eş. 3.3 seçilmelidir. Bu eşitlikte β değeri 0’den 1’e değişmektedir ve $\beta = 0$ değeri yalnız zaman aradeğerlemesi yapılması anlamına gelmektedir.

STI-TEC2 yönteminde uzay-zaman aradeğerlemesi komşulukların verilerini doğrudan değil belli oranda karıştırarak kullanır ve istasyonun bir önceki ve bir sonraki günlerindeki kestirimlerine daha fazla ağırlık verir. Bu yöntemde Eş. 3.1’de olduğu gibi ifade edilir:

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;t} = \mathbf{G}_t\hat{\mathbf{x}}_{u;d} + (\mathbf{I} - \mathbf{G}_t)\hat{\mathbf{x}}_{u;d;N_n} \quad (3.4)$$

ve köşegen matrisin elemanları, Eş. 3.3'te kullanılan şekilde

$$g_{t;k} = 1 - \frac{e^{-\beta(k-1)} + e^{-\beta(N_n-k)}}{1 + e^{-\beta(N_n-1)}}. \quad (3.5)$$

olarak verilir. STI-TEC2 yönteminin STI-TEC1 yönteminden temel farkı $\hat{\mathbf{x}}_{u;d}$ ifadesinin hesaplanmasıdır. STI-TEC1'de kestirim

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r} = \sum_{v=1}^{N_{u,R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) \mathbf{x}_{v;d;R_r} \quad (3.6)$$

olarak verilir ve $\alpha_{u;d;R_r}(v)$ her v komşuluğunu çarpan uzaysal aradeğerleme katsayılarını göstermektedir. Bu yöntemde $\alpha_{u;d;R_r}(v)$, aşağıda verilen eşitlikle hesaplanır

$$\underline{\alpha}_{u;d;R_r} = \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{X}_{u;d_n;R_r} \right)^{-1} \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{b}_{u;d_n;R_r} \right) \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemde

$$\mathbf{X}_{u;d_n;R_r} = [\mathbf{x}_{1;d_n;R_r} \ \dots \ \mathbf{x}_{v;d_n;R_r} \ \dots \ \mathbf{x}_{N_{u,R_r};d_n;R_r}] \quad (3.8)$$

ve

$$\mathbf{b}_{u;d_n;R_r} = \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{x}_{u;d_n} \quad (3.9)$$

olarak verilmektedir. STI-TEC2 yönteminde ise

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d} = \sum_{\substack{d_n=d-1 \\ d_n \neq d}}^{d+1} r_{d;d_n} \alpha_{u;d_n} \mathbf{x}_{u;d_n} \quad (3.10)$$

olarak hesaplanmaktadır ve

$$r_{d;d_n} = \frac{1}{N_{u,R_r}} \sum_{v=1}^{N_{u,R_r}} \frac{\bar{\mathbf{x}}_{v;d}}{\bar{\mathbf{x}}_{v;d_n}} \quad (3.11)$$

komşuluk oranlarını göstermektedir. Bu yöntemde

$$\underline{\alpha}_{u;d} = [1/2 \ 1/2]^T \quad (3.12)$$

olarak verilmektedir. Bu yöntem komşuluğu olan TUSAGA istasyon verilerine ve TUSAGA-Aktif verilerine uygulanmış ve Çizelge 2.8'den Çizelge 2.10'e kadar sunulan doluluk oranları ortalama %60'lardan %80'lere çıkmıştır. Yöntemin ve uygulamanın sonuçları Bölüm 4'te sunulmuştur. Prof. Dr. Orhan Arıkan tarafından geliştirilen bu algoritma (YILDIZ vd, 2011), (DEVIREN vd, 2012b) ve (ARIKAN vd, 2012b) bildirilerinde sunulmuştur. Radio Science dergisinde hakem incelemesindedir (DEVIREN vd, 2012c).

3.3 W-indis Haritalaması

Bölüm 2.1’de tanıtılan ve iyonküre fırtınalarının etkisi en iyi şekilde ortaya koyabilen W-indisi, GIM haritalarından yararlanılarak gerek bölgesel gerek yerküresel olarak otomatik olarak istenilen zaman aralıklarında hesaplanabilmektedir. Bu özgün yazılım IONOLAB internet sitesinden GIM uzay çözünürlüğü olan $2,5^0$ enlem ve 5^0 boylam aralıklarında IONEX dosya formatında sunulmaktadır. Bu servis dünyada tektir ve çok önemli bir uzay havası hizmeti vermektedir. www.ionolab.org adresinden ulaşılabilecek W-indis haritalarına örnekler Bulgular bölümünde sunulmuştur.

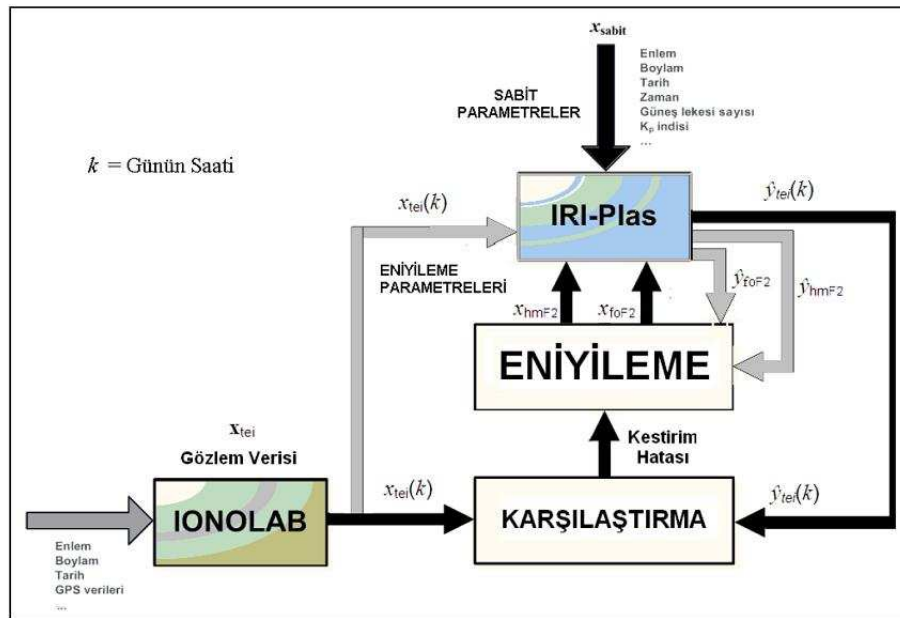
3.4 IRI-Plas-G

Bölüm 2.2’ta özetlenen IRI-Plas yazılımının girdisi olarak bir döngü içerisinde GIM değerleri verilmiş ve bölgesel yada yerküresel foF2, hmF2, ve TEİ haritaları elde edilmiştir. Ayrıca yedi günlük ortanca değerleri kullanılarak Bölüm 2.1’de tanıtılan W-indis değerlerinin haritaları oluşturulmuştur. GIM haritasının konum çözünürlüğü olan $2,5^0$ enlem ve 5^0 boylam aralıklarında IRI-Plas-G çıktıları oluşturulmuştur. IRI-Plas-G, GIM haritasının zaman çözünürlüğüne göre bir yada iki saat zaman aralıklarla elde edilebilmektedir. Bu çalışmanın ayrıntıları V. Ara Dönem gelişme raporu ekinde verilmiştir. TÜBİTAK 110E296 ve RFBR 11-02-91370-CT_a projesi ortaklığında manyetik eşlenik noktalar içinde kullanılan bu yöntem Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen ve YL tez öğrencisi ve bursiyer Onur Çilibaş tarafından genellenmiş ve www.ionolab.org sitesinden Uzay Havası servisi olarak kullanıma açılmıştır (GULYAEVA vd, 2012a-b), (ARIKAN vd, 2012c). 2001-2011 arasında en güçlü iyonküresel ve plazmaküresel fırtınalara uygulanan IRI-Plas-G çıktılarının videoları ayrıca youtube sitesinden IONOLAB ile ve IONOLAB sitesinde videolar başlıkları ile izlenebilir. Bu çalışmanın makalesi hazırlanmaktadır.

3.5 IRI-Plas-Opt

109E055 projesinde, Bölüm 2.2’te tanıtılan ve Bölüm 3.4’te GIM-TEC ile güncelenebileceği gösterilen IRI-Plas programı özgün bir eniyileme algoritması ile birleştirilerek sanal iyonosonda kadar iyi çalışabilen IRI-Plas-Opt yazılımı geliştirilmiştir. GIM-TEC yada IONOLAB-TEC değerlerini IRI-Plas TEİ çıktıları ile karşılaştırarak farkın foF2 ve hmF2 arasındaki fiziksel ilişkiyle ölçeklenerek IRI-Plas programına girdi olarak verilme-

siyle oluşturulan bu yeni yazılım Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen'in YL öğrencisi ve bursiyer Oktay Şahin'in tez çalışmalarının temelini oluşturmuştur (ŞAHİN, 2011). Ayrıca (SAHİN vd, 2011a-c) bildirilerinde ve EK-1'de sunulan çalışmalar makale olarak hazırlanmaktadır (SEZEN vd, 2012). IRI-Plas-Opt, bir konum ve bir tarih için çalışmaktadır. IRI-Plas programının eniyileme ile elde edilen tüm çıktılarının alınabilmesi ile her konumda elektron yoğunluğu, elektron ve iyon sıcaklıkları, her katman için kritik frekans ve yükseklik değerleri de arkaplan modeli hassasiyeti ve doğruluğunda incelenebilmektedir. Şekil 3.5'te IRI-Plas tabanlı eniyileme algoritmasının şematik gösterimi verilmiştir. IRI-Plas-



Şekil 3.5: IRI-Plas-Opt yöntemi şematik gösterimi

Opt, TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC verileri ile Türkiye üzerinde çeşitli enlem ve boylam aralıklarında çalıştırılmıştır. Eniyileme sonucunda IRI-Plas-Opt TEİ verilerinin TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC verilerine %0.006'ya kadar hassasiyetle yaklaştığı ve saatlik foF2 ve hmF2 dağılımlarının doğrusal değiştiği gözlenmiştir (ŞAHİN, 2011). Bu çalışmanın sanal iyonosonda olarak kullanılmasının örnekleri Bulgular bölümünde verilmektedir.

3.6 IRI-Plas-Opt ile İyonküre Tomografisi

Bölüm 3.5'te anlatılan özgün IRI-Plas-Opt yöntemi Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen ve YL tez öğrencisi ve bursiyer Onur Çilibaş tarafından bir döngü içerisinde Türkiye coğrafyasına IONOLAB-TEC verileri ile uygulanmıştır. Bölgesel, yüksek konum ve zaman çözünürlüğünde IRI-Plas-Opt çıktıları sanal iyonosonda gibi tüm iyonküre parametrelerini ve elektron yoğunluğunu verebilmektedir. Daha önce düzenli hiç bir iyonküre ölçümü toplanmayan ülkemiz coğrafyası için bu çok önemli bir kazanımdır. GIM haritalarıyla karşılaştırılabilmesi için bir saat zaman çözünürlüğünde hazırlanan videolarla ülkemiz üzerinde sakin, fırtınalı ve deprem günleri iyonküre değişimleri hassasiyetle incelenebilecektir. (ARIKAN vd, 2012c) bildirisinin sunumunda yer küresel olarak 29-31 Ekim 2003 Halloween Fırtınası için hazırlanan TEİ, foF2, hmF2 ve W-indisi videoları gösterilmiştir. Bu videolar raporun eklentisi olarak yüklenmiştir. Dünyada bu hassasiyet ve çözünürlükte bu çalışmayı yapabilen başka hiç bir grup yoktur. Bu çalışmanın makalesi hazırlık aşamasındadır.

3.7 IRI-Plas-STEÇ Yazılımı

IRI-Plas yapısı gereği tek bir konumda, tarihte ve zamanda çalışabilmektedir. Girdi olarak verilen konumun yerel başucu doğrultusunda elde edilen program çıktıları YKS uydu-alıcı hattı üzerindeki değişiklikleri yansıtmamaktadır. YKS-TEİ kestirimlerinin temelinde Şekil 3.6'te şematik olarak gösterilen *STEÇ* hesaplamaları olduğu için, 109E055 projesinde uydu-alıcı doğrultusunda *STEÇ* değerlerini verebilen IRI-Plas-STEÇ özgün yazılımı hazırlanmıştır. Prof. Dr. Orhan Arıkan ve Doktora öğrencisi ve bursiyer Hakan Tuna'nın tez kapsamında yaptıkları çalışmalar, IV. Ara Dönem Raporunda ve (ARIKAN O. vd, 2012a) bildirisinde sunulmuştur. Bulgular bölümünde bu çalışmanın iyonküre yönlülük incelemelerinde kullanımı anlatılacaktır.

3.8 Bölgesel İyonküre Tomografisi: OPT-IRI-Plas

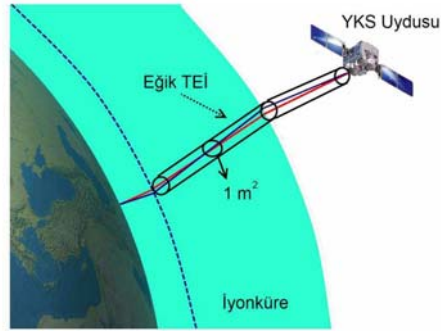
109E055 projesinde, uydu-alıcı doğrultusunda hesaplanan YKS-*STEÇ* değerleri, modelden gelen IRI-Plas-STEÇ değerleri karşılaştırılarak özgün bir eniyileme algoritması çerçevesinde bölgesel foF2 ve hmF2 yüzeyleri oluşturulmuştur. Bu yüzey girdileri oluşturulan IRI-Plas, konum ve zamanda arkaplan modelini ve iyonküre fiziğini

içeren parametrik çıktılar sunmaktadır. Bu özgün algoritma ile bir bölgede iyonküre parametreleri ve elektron yoğunluğu dağılımı dört boyutlu olarak elde edilmektedir. Prof. Dr. Orhan Arıkan ve Doktora öğrencisi ve bursiyer Hakan Tuna'nın tez kapsamında yaptıkları çalışmalar, V. Ara Dönem Raporunda ve (ARIKAN O. vd, 2012a) bildirisinde sunulmuştur. OPT-IRI-Plas yöntemi şematik olarak Şekil 3.7 verilmektedir. Şekil 3.7'da özgün bir tomografi yöntemi denenmektedir. Bu yöntemde, elektron yoğunluğunun doğrudan uzay-zaman dağılımı olarak bulunması yerine, Türkiye coğrafyası bölgesel olarak foF2 ve hmF2 parametrelerinin enlem ve boylam olarak iki boyutta doğrusal çokterimli ile modellenmesini içermektedir. Dolayısıyla bu yöntemde IRI-Plas arkaplanı ve IONOLAB-STEÇ değerleri ile eniyilenecek olan parametreler, foF2 ve hmF2 modellerinin katsayılarıdır. Eniyileme için kritik frekans ve yükseklik arasındaki fiziksel ilişki ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. Bulgular bölümünde bu çalışmanın örnek çıktıları olarak dikey elektron dağılımı ve Türkiye üzerinde tomografi sonuçları verilmektedir.

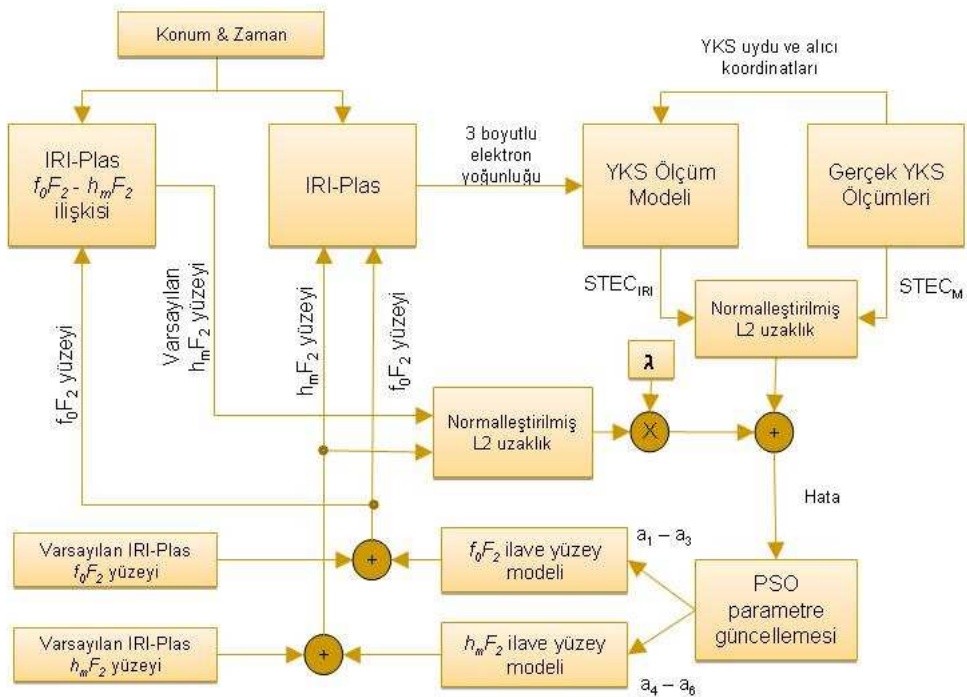
3.9 TEİ İstatistikleri ve Bölgesel Modeller

109E055 projesinde saatiçi TEİ istatistiklerinin belirlenmesi için Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) ve Geniş Anlamda Durağanlık (GAD) sürelerinin otomatik belirlenmesi bir yazılım geliştirilmiş ve TUSAGA ve TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC verilerine 2001-2011 yılları arasında uygulanmıştır. OYF, bir rassal fonsiyonun/alanın en önemli belirleyici istatistiklerinden birini oluşturur. TEİ verilerinin saatlik dağılımlarının ve en iyi OYF'nin bulunması Literatürde ilk kez 105E171 projesi kapsamında uygulanmıştır (TÜREL vd, 2007a-c; 2008), (TÜREL, 2008), (TUREL ve ARIKAN, 2010). 109E055 projesinde YL öğrencisi ve bursiyer Ozan Köroğlu, Prof. Dr. Feza Arıkan ile çalışmıştır. (KÖROĞLU vd, 2010), (ARIKAN vd, 2010) ve (KÖROĞLU, 2012) bildiri ve tezlerinde saatiçi OYF aşağıdaki algoritmaya göre bulunmuştur:

- TUSAGA ve TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC verileri 2001-2011 yılları arasında her istasyon için yıllık ve saatlik olarak bir veri tabanında toplanmıştır.
- Bir saatlik pencereler içinde kalan TEİ değerlerinin düzgelenmiş deneysel dağılımları oluşturulmuştur.
- Parametrik Kestirim için Rayleigh (genlik ve güç), Lognormal, Weibull, ve K-



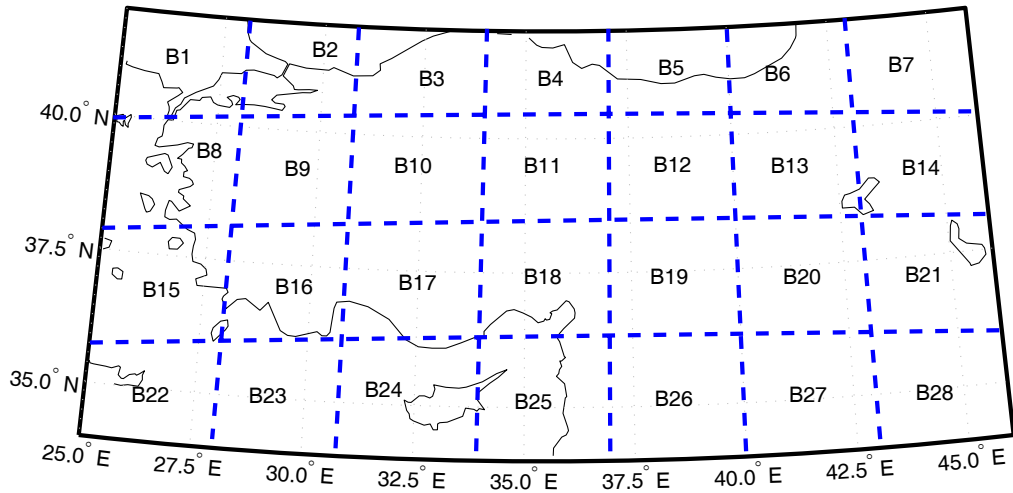
Şekil 3.6: *STEC4* hesaplama doğrultusunun şematik gösterimi



Şekil 3.7: OPT-IRI-Plas yöntemi şematik gösterimi

dağılımları için Moment ve Enbüyük Olabilirlik yöntemlerine göre OYF parametre değerleri belirlenmiş ve bu parametrelerin kullanıldığı dağılımlar Enbüyük Olabilirlik (Maximum Likelihood) kistasına göre değerlendirilmiştir. Düzgelenmiş deneysel dağılımlara en iyi uyan OYF ve parametreleri seçilmiştir.

- Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (SKLD) ile seçilen OYFnin düzgelenmiş deneysel dağılıma uygunluğu hesaplanmıştır.
- Seçilen parametrik OYFnin ortalama ve standart sapması hesaplanmıştır.
- Her istasyon, her yıl ve her saat için seçilen parametrik OYFler, parametreleri, ortalama ve standart sapmaları ve SKLD değerleri bir veri tabanına yazılarak otomatik çağrılabilir hale getirilmiştir.
- Türkiye ve KKTC coğrafyasının 2^0 enlem, 3^0 boylam bölgeleri ile temsil edilebildiği gösterilmiş ve her bölge için temsilci OYF seçilmiştir. Bu bölgeler Şekil 3.8'te sunulmuştur.



Şekil 3.8: Türkiye istatistiksel tanımlama bölgeleri

Değişken iyonkürenin durumu ile haritaların ve tomografik görüntülerin ne zaman yenilenmesi gerektiği istatistiksel olarak ilişkilendirilmelidir. 105E171 projesi kap-

samında F. Arıkan ve C.B. Erol tarafından geliştirilen ve iyonküre literatüründe ilk defa olarak bir saat içinde iyonkürenin geniş anlamda durağanlık (GAD) sürelerini metodik olarak analiz edebilen yöntem uygulanmıştır (EROL ve ARIKAN, 2005). Bu alanda iyonkürenin değişiminin TEİ üzerindeki istatistikleri literatürde genellikle günlük, mevsimlik ve yıllık ortanca değerler olarak verilmektedir. (EROL ve ARIKAN, 2005) tarafından geliştirilen teknik ile etkin ve uyarlamalı haritalandırma ve tomografik görüntü yenileme zamanları tespit edilebilir. 105E171 projesinde bu teknik günler ve istasyonlar üzerinden otomatik olarak çalıştırılabilir hale getirilmiş (AKDOĞAN vd, 2007) ve TEİ harita güncellemesinde kullanılabileceği gösterilmiştir (SAYIN vd, 2010). Bu makale EK-1’de sunulmuştur. 109E055 projesinde GAD süreleri, TUSAGA ve TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC verileri 2001-2011 yılları arasında her istasyon için yıllık ve saatlik olarak hesaplanmış ve bir veri tabanında toplanmıştır (KÖROĞLU, 2012).

3.10 Bölgesel TEİ Yönlülüğü İncelemesi

TEİ, orta enlem bölgelerinde, doğu-batı ve kuzey-güney yönlerinde yerel saate göre farklı yönseme ve değişintiye sahiptir. Güneşin doğuşu ile artan iyonlaşma doğu boylamlarında batı boylamlarına göre farklılaşır. Güneş, yerel saate göre başucu açısı doğrultusuna geldiğinde ise kuzey-güney yönünde bir yönseme oluşur. Türkiye coğrafyası için sabah saatleri güneydoğu-kuzeybatı, öğle saatlerinde kuzey-güney ve akşam saatlerinde kuzeydoğu-güneybatı doğrultularında belirgin yönsemeler gösterir. Bölüm 2.7’te anlatıldığı üzere, 105E171 projesinde literatürde kullanılan tüm aradeğerleme yöntemleri incelenmiş ve sentetik yüzeylerin üzerinden başarımları değerlendirilmiştir. 105E171 nolu proje kapsamında IONOLAB-TEC verileri kullanılarak uzay ve zamanda hem statik hem dinamik olarak aradeğerlemeler yapılmış IGS merkezlerinin GIM haritalarından daha yüksek çözünürlüklerde bölgesel TEİ aradeğerlemeleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda zahmetli eğitim algoritma ve verilerine gereksinimi olmayan doğrusal Krigleme yöntemlerinin iyonkürenin karakteristiğinin belirlenmesinde ve istatistiksel tabanın oluşturulmasında; YSA’nın ise daha detaylı istatistiksel taban üzerinde çalışarak iyonkürenin düzensizliklerinin tanımlanması ve sınıflandırılmasında kullanılmalarının doğru olacağı gözlenmiştir. Literatürde Krigleme teknikleri iyonosfer için hep yön bağımsız olarak kullanılmışlardır. Ülkemiz coğrafyasında iyonkürenin kuzey-güney ve doğu-batı eksenlerinde yönsemelerinin belirginliği ve iyonkürenin yapısına uygun

Krigleme yönteminin en az bağıl hatayı verdiği göz önüne alınarak 109E055 projesinde Türkiye üzerinde yönseme özelliklerinin dikkate alındığı Yönlü Krigleme (YK) tekniği incelenmiştir. Bu alanda Prof. Dr. Orhan Arıkan, Prof. Dr. Feza Arıkan, Doç. Dr. Cenk Toker, doktora öğrencisi ve bursiyer Işıltan Sayın ve YL öğrencisi ve bursiyer Hasan Hüseyin Özbenli çalışmışlardır. Yönbağımlılık gerek sentetik yüzeyler üzerinden, gerekse TEİ verileri üzerinden incelenmiştir.

Rassal fonksiyonun konumsal bağımlılığının belirlenmesi Krigleme yönteminin temelini oluşturur. En uygun kestirimin yapılmasında, ölçüm noktaları arasındaki konumsal bağımlılığın bilinmesi gerekir. Bir eşdeğişinti veya yarıdeğişinti serimi fonksiyonu kullanılarak konumsal bağımlılık tanımlanabilir. Yarıdeğişinti Serimi (YDS) fonksiyonu sabit mesafe bölümlerine ayrılmış bütün olası noktalar arasındaki farkların değişintisinin yarısıdır. Aradeğerleme bölgesindeki ölçümlerden yararlanarak deneysel yarıdeğişinti serimi bulunur. Uzay zamansal rassal fonksiyonun yarıdeğişinti serimi fonksiyonunun kestiriminde zamanda bir değişimin olmadığı veya konumda anlık aradeğerlemenin yapıldığı durumlara göre farklı ifade edilmelidir. Zamanda değişmeyen rassal fonksiyonunun yarıdeğişinti serimi fonksiyonu yönden bağımsız olarak hesaplanabiliyorsa, rassal fonksiyon yön bağımsız olarak adlandırılır.

Deneysel yarıdeğişinti serimi fonksiyonunda, değerler belirli uzunluklar için hesaplanır. Bunların dışındaki uzunluklar için yarıdeğişinti serimi değerleri bilinmemektedir. Örneklenmemiş noktalardaki değerlerin kestiriminde ve rassal fonksiyonun özelliklerinin belirlenmesinde yarıdeğişinti serimi fonksiyonunun değerleri bütün uzunluklar için bilinmelidir. Deneysel yarıdeğişinti serimi değerlerine bir fonksiyon uyarlayarak teorik yarıdeğişinti serimi fonksiyonu bulunur. Buradan ölçüm yapılamayan uzunluklar için gereken değerler elde edilir. Yaygın olarak kullanılan teorik yarıdeğişinti serimi fonksiyonu modelleri üssel, Gauss ve küresel fonksiyonlardır. Deneysel yarıdeğişinti serimi fonksiyonu farklı yönlerde farklı özellikler gösterebilir. Bu durumda rassal fonksiyon yön bağımlı olarak adlandırılır. Yarıdeğişinti serimi modelleri yön bağımsız durumda kullanıldıkları için, koordinatların transformasyonu ile rassal fonksiyon yönden bağımsız hale getirilmelidir. Yöne bağımlılık farklı yönlerdeki deneysel yarıdeğişinti serimi incelenmesi ile tespit edilebilir.

3.10.1 Sentetik Yüzeyler Üzerinden Yönbağımlılık İncelemesi

Sentetik yönbağımlı yüzeyler üzerinden yarıdeğişinti fonksiyonu incelemesi için

1. Bir enlem, bir boylam veya bir doğrultu üzerinde sabit, doğrusal değişen, parabolik değişen, ve Gauss fonksiyonu ile değişen matematiksel işlevlerden ani yönseme değişikliği olan sentetik TEİ yüzeyleri oluşturulmuştur;
2. Sentetik yüzeyler düzgün dağılmış kare, üçgen, altıgen ve düzgün dağılmamış rassal fonksiyonlar ile örneklenmiştir;
3. Örnek sayıları %30 - %60 aralığında değiştirilmiştir;
4. Her durum için deneysel yarıdeğişinti fonksiyonları gruplanmıştır.

Bu çalışmaların sonunda yönseme değişikliği gösteren yüzeylerde örnekleme sayısından bağımsız olarak yön bağımsız yarıdeğişinti seriminin bu değişikliği belirleyemediği ve mutlak uygun yönlü Krigleme yöntemlerinin TEİ aradeğerlemesi için uyarlanması gerektiği bulunmuştur.

3.10.2 Yönlü Krigleme Tekniği

Yön bağımlılık, deneysel yarıdeğişinti serimi eş değişinti eğrilerinin nokta çiftleri arasındaki konum vektörüne göre çizilmesiyle incelenebilir. Eğer rassal fonksiyon yön bağımsız ise eşit yarıdeğişinti serimi eğrileri orijin merkezli çemberler olacak, ve böylece yarıdeğişinti serimi sadece konum vektörünün uzunluğuna bağlı olacaktır. Yön bağımlı rassal fonksiyonlarda ise eşit yarıdeğişinti serimi eğrileri yöne bağımlılığın olduğu doğrultu boyunca uzanan elips şeklini alırlar. Bu tipteki yöne bağımlılık, koordinatların doğrusal transformasyonu ile yönden bağımsız hale getirilebilir (WACKERNAGEL, 1998).

Zamanın belli bir $t = t_0$ anında TEİnin kestirileceği bölge ızgara noktalarıyla tanımlanabilir. Herbir ızgara noktasındaki Krigleme kestirimi, ölçüm noktalarının doğrusal birleşimi olarak yazılır. Ortalamalı, Ortalamasız ve Evrensel Krigleme yöntemlerinde genel olarak, hatanın değişintisi yansız kestirim elde edilecek şekilde enküçültülerek Krigleme ağırlıkları elde edilir.

Ortalomalı Krigleme yönteminde, rassal fonksiyonunun, ikinci dereceden durağanlık özelliği gösterdiği, beklentisinin ve eşdeğişinti fonksiyonunun bilindiği kabul

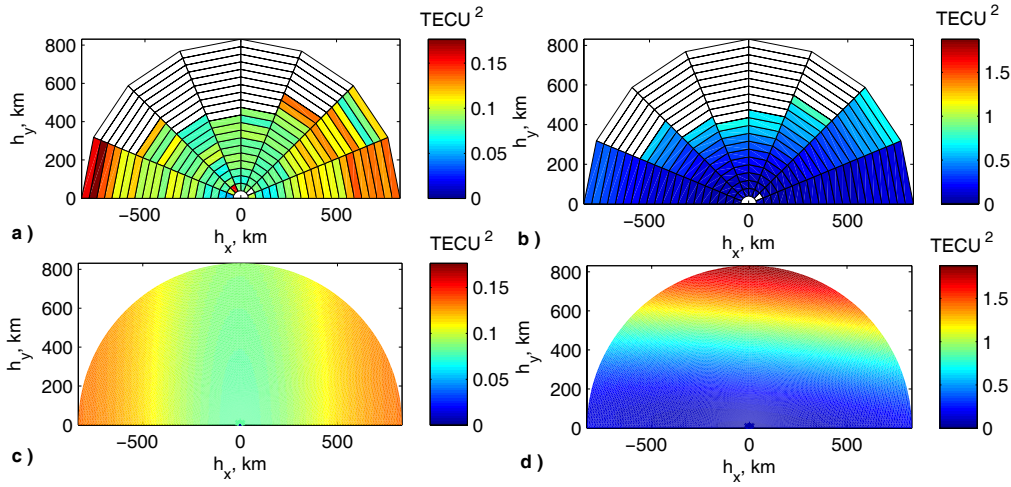
edilir. Bu nedenle uygulanabileceği durumlar kısıtlıdır. Ortalamasız Krigleme (OK) yönteminde, rassal fonksiyonun her noktadaki beklentisinin sabit olduğu fakat bilinmediği ve rassal fonksiyonun özünlülük özelliği gösterdiği kabul edilir. Uygulamada bu özelliklerin gözlenmediği durumlarda kullanımı uygun değildir.

Evrensel Krigleme yönteminde, Ortalamalı ve Ortalamasız Krigleme yöntemlerinin aksine, rassal fonksiyonun beklentisinin koordinatlara göre değiştiği ve bilinmediği kabul edilir. Rassal fonksiyonun beklentisi, bilinen fonksiyonların doğrusal birleşimi olarak düşünülür. Evrensel Krigleme yönteminde rassal fonksiyondan beklentinin çıkarılması ile elde edilen kalıntı rassal fonksiyonunun yarıdeğişinti serimi fonksiyonunun bulunmasında beklentinin bilinmesi gerekir. Yarıdeğişinti serimi fonksiyonunun beklentinin sabit olduğu yönlerde hesaplanması ile bu sorun çözülebilir. Bu projede doğrusal yönseme varsayan Evrensel Krigleme (EKDY) yöntemi kullanılmıştır.

OK ve EKDY yöntemlerinin yönbağımlı TEİ değerleri ile başarıyı aşağıdaki adımlarla incelenmiştir:

1. Türkiye üzerinde TUSAGA-Aktif ağından elde edilen IONOLAB-TEC değerleri yönbağımsız YDS modeli ile OK ve EKDY yöntemleri kullanılarak Türkiye üzerinde enlemde ve boylamda $0,5^\circ$ çözünürlükte TEİ kestirim haritaları elde edilmiştir.
2. İki boyutlu, koordinatların doğrusal fonksiyonu olan bir yönseme fonksiyonu IONOLAB-TEC değerlerine uyarlanarak yönseme fonksiyonunun katsayıları belirlenmiştir.
3. Yönseme IONOLAB-TEC değerlerinden çıkarılarak kalıntı TEİler elde edilmiştir. Yönsemenin aradeğerleme yöntemlerine etkisinin incelenmesi için OK yöntemi üç farklı şekilde uygulanmıştır. OK1 ve OK2 yöntemleri sabit yönseme varsayımı altında, doğrudan TEİ değerlerini kullanırken, sırasıyla, TEİden kestirilen YDS'yi (Z-YDS) ve kalıntı TEİden kestirilen YDSyi (Y-YDS) kullanmaktadır. OK3 yöntemi ise doğrusal yönseme varsayımı yaparak önce yönsemeyi kestirir. TEİlerden yönseme giderilerek, kalıntıların aradeğerlemesini Y-YDS'yi kullanarak yapar ve yönsemenin değerini kalıntıların kestirim değerlerine ekleyerek TEİ kestirimini verir. EKDY yöntemi ise yönsemeyi Krigleme denklemlerinin içerisinde otomatik olarak hesaba katar ve Y-YDS'yi kullanır. YDS uygulamalarına örnek olarak Şekil 3.9'de 22 Temmuz 2009 günü 1200 GS'de deneysel Y-YDS, deneysel Z-YDS, teorik Y-YDS, teorik

Z-YDS hesaplamaları gösterilmiştir.



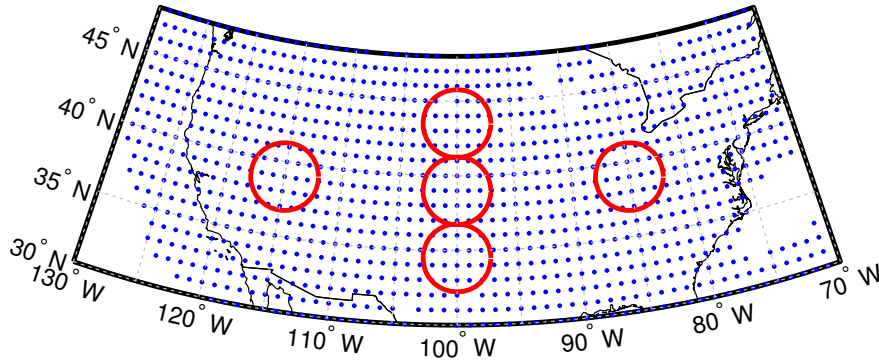
Şekil 3.9: 22 Temmuz 2009, 1200 GS, a) deneysel Y-YDS, b) deneysel Z-YDS, c) teorik Y-YDS, d) teorik Z-YDS.

4. Genel olarak OK1, OK3 ve EKDY yöntemleri birbirine benzer hatalar verirken, OK2 yöntemi bazı durumlarda yaklaşık iki kat daha fazla hata verebilmektedir. Hesaplama karmaşıklığı en az olan OK1, hesaplama karmaşıklığı en fazla olan OK3 ve EKDY yöntemlerine yakın sonuçlar verdiği için yön bağımlı aradeğerlemelerde OK1 yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.
5. Yön bağımlı Krigleme yönteminde incelenen rassal fonksiyonun istatistiksel özellikleri yöne bağlı olarak değiştiğinde YDS'nin Şekil 5'de gösterildiği gibi farklı yönlerde kestirilmesi gerekmektedir. Farklı doğrultularda kestirilen YDS'ler karşılaştırılarak yön bağımlılık incelenebilmektedir. Yön bağımlılığın farklı çeşitleri bulunmakta ve en basiti olan ve Şekil 5b ve c'de gösterilen geometrik yön bağımlılık koordinat dönüşümü ile yön bağımsız hale getirilebilmektedir. Bunun dışında her yönde farklı değişinti değerleri gözlenmesi de bölgesel yön bağımlılık olarak adlandırılmakta ve yön bağımsız bir YDS'ye yön bağımlı bir YDS'nin eklenmesi ile modellenenmektedir.
6. TEİ dağılımının geometrik yön bağımlılık gösterdiği varsayılarak, deneysel YDS, TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC kullanılarak farklı doğrultularda kestirilmiştir.

7. Türkiye coğrafyasında YDS haritaları incelendiğinde YDS'nin kuzeydoğu-güneybatı doğrultusundaki değişim hızının kuzeybatı-güneydoğu doğrultusundaki hızına göre daha fazla olduğu ve TEİ'nin yön bağımlılık özelliği gösterdiği gözlenmiştir.

Yön bağımlı teorik YDS modeli bu deneysel YDS'ye uyarlanarak OK1 yönteminde kullanılmış ve TEİ haritaları elde edilmiştir.

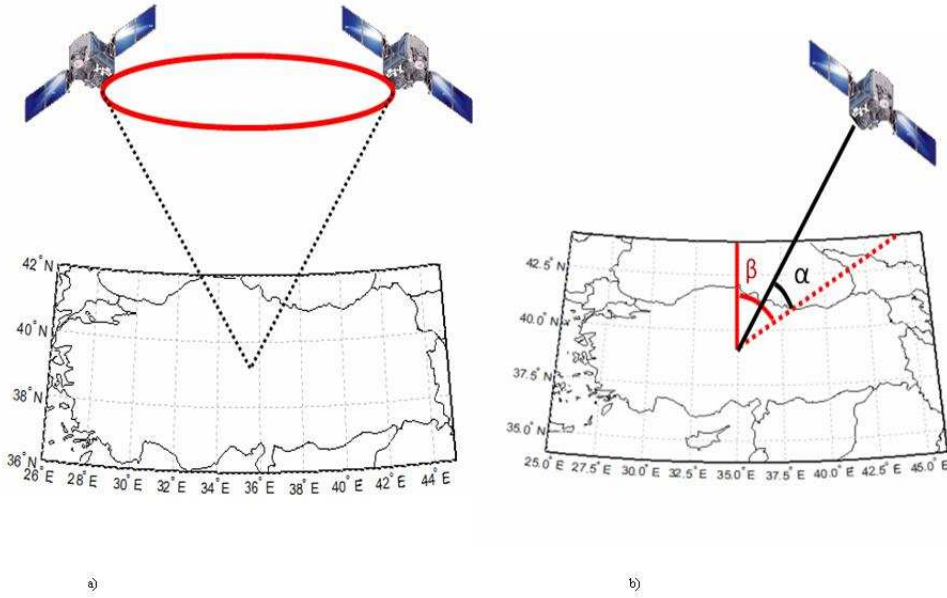
8. Yön bağımlı bölgesel YDS kestirimi, Kuzey Amerika üzerinde MIT Madrigal veritabanından sağlanan TEİ ölçümlerine uygulanmıştır. Çalışma bölgesinin kapladığı alanın orta, kuzey, güney, doğu ve batı bölgelerine daireler yerleştirilerek, bunların etrafında YDS'nin hangi yönde ve nasıl değiştiği incelenmiştir. Yön bağımlı bölgesel YDS kestirimi, Şekil 3.12 ile gösterilen dairelerin etrafında hesaplandığında dairelerin etrafındaki YDS haritaları dairelerin konumlarına ve zamana göre değişmektedir. Yöntem her bir daire için, yerel saate göre sabah, öğlen, akşam ve



Şekil 3.12: 15 Temmuz 2009 günü 1200 GS'deki MIT Madrigal veritabanından elde edilen TEİ ölçüm noktaları ve çemberler.

gece zamanlarında uygulanmıştır. Belirli bir saat için, batı, orta ve doğu merkezli daireler etrafında hesaplanan YDS haritaları incelendiğinde, YDS'nin aynı yönlerde farklı şekillerde değiştiği gözlenmektedir. Bu değişiklik kuzey, orta ve güney merkezli dairelerden elde edilen YDS haritaları incelendiğinde de gözlenmiştir. Aynı daire üzerinde farklı saatlerde elde edilen YDS haritalarında da aynı yön için farklı YDS yapıları elde edilebildiği gözlenmiştir. YDS yapısı, hem yöne hem bölgesel YDS'nin hesaplanmasında merkez olarak alınan dairenin konumuna hem de zamana göre değişiklik göstermektedir.

Bulgular bölümünde yapılan incelemelere örnekler verilmiştir. Bu incelemelerden *VTEC* yada *IONOLAB-TEC* olarak yerel başucu doğrultusunda kestirilen *TEI* değerleri yerine doğrudan *STEC* değerlerinin kullanılması önerilmiştir. Bu amaçla Prof.Dr. Orhan Arıkan ile çalışan doktora öğrencisi ve bursiyer Hakan Tuna, Türkiye coğrafyası için Bölüm 3.7’te anlatılan *IRI-Plas-STECH* programı ve *IONOLAB-STECH* değerleri ile yerel yükseklik açısı ve yanca açısına bağlı değişimi ve yönbağımlılığı ortaya koymuştur. Şekil 3.13a’da model *IRI-Plas* ve *YKS* uyduları için belli bir yükseklikte yönbağımlılığın incelendiği şematik gösterim yer almaktadır. Şekil 3.13b’da yerel kuzeyle yapılan β açısı ve yerel başucu açısına göre tanımlanan yükseklik açısı α gösterilmektedir. Türkiye üzerinde



Şekil 3.13: *STEC* ile yönbağımlılık incelemesi, a) Türkiye üzerinde *STEC* hesaplama hatlarının şematik gösterimi, b) yerel kuzeyle yapılan β açısı ve yerel başucu açısına göre tanımlanan yükseklik açısı α

farklı yükseklik açıları için değişen *TEI* değerleri ve karşılaştırmaları Bulgular bölümünde sunulmuştur. Gerek model gerekse *YKS* verilerini birleştirdiği için, bu çalışma literatürde bir ilki oluşturmaktadır ve makalesi hazırlanmaktadır.

3.11 Rassal Alan Modellemesi

İyonküre, konumda ve zamanda değişiklik gösteren bir uzay-zamansal rassal fonksiyon olarak modellenmektedir. $D, D \subseteq R^d$, d boyutlu uzayın sınırlı bir bölgesini, $T, T \subseteq R^1$ ise sınırlı bir zaman aralığını gösterdiği durumda, uzay-zamansal rassal değişken, $Z(\mathbf{x}, t)$, uzayın herhangi bir \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in D$, noktasında ve herhangi bir t , $t \in T$, anında belli bir olasılık dağılımına göre değerler alabilir. Uzay-zamansal rassal fonksiyon $\{Z(\mathbf{x}, t), (\mathbf{x}, t) \in D \times T\}$, her bir $\mathbf{x} \in D$ noktası ve $t \in T$ anındaki, konumda ve/veya zamanda birbirleri ile ilintili olabilen rassal değişkenlerin oluşturduğu bir küme olarak tanımlanır. Rassal fonksiyonun kaynaklandığı fiziksel olaya göre farklı uzay-zaman modelleri kullanılmaktadır. İyonküre için rassal fonksiyon, deterministik bir fonksiyon olan yönseme, $\mu(\mathbf{x}, t)$, ve durağan bir rassal fonksiyon olan kalıntının, $Y(\mathbf{x}, t)$, toplamı olarak düşünülür:

$$Z(\mathbf{x}, t) = \mu(\mathbf{x}, t) + Y(\mathbf{x}, t) \quad (3.13)$$

Yönseme fonksiyonundan veya durağan rassal fonksiyondan ayrı ayrı ölçümler alınmadığı için rassal fonksiyonun modellenmesinde fiziksel olaydan çıkarılabilecek yardımcı bilgiler kullanılmalıdır.

$Z(\mathbf{x}, t)$ ikinci dereceden durağanlık özelliği gösterdiğinde deneysel uzay-zaman eşdeğişinti fonksiyonu,

$$\widehat{cov}(\mathbf{h}, \tau) = \frac{1}{N(\mathbf{h}, \tau)} \sum_{n_a=1}^{N(\mathbf{h}, \tau)} (z(\mathbf{x}_{n_a}, t_{n_a}) - \mu)(z(\mathbf{x}_{n_a} + \mathbf{h}, t_{n_a} + \tau) - \mu) \quad (3.14)$$

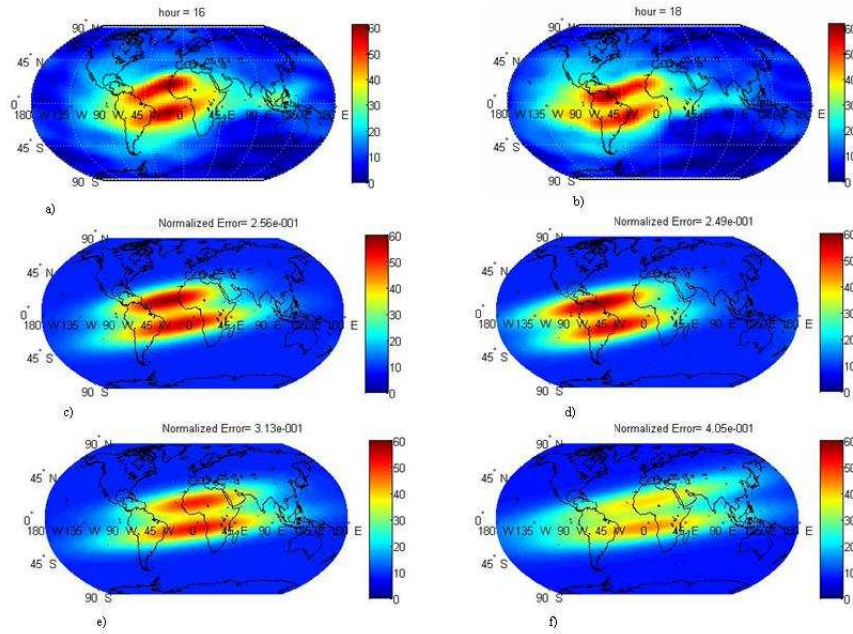
şeklinde, özünlülük durağanlık özelliği gösterdiğinde ise deneysel uzay-zaman YDS fonksiyonu,

$$2\hat{\gamma}(\mathbf{h}, \tau) = \frac{1}{N(\mathbf{h}, \tau)} \sum_{n_a=1}^{N(\mathbf{h}, \tau)} (z(\mathbf{x}_{n_a}, t_{n_a}) - z(\mathbf{x}_{n_a} + \mathbf{h}, t_{n_a} + \tau))^2 \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki denklemlerde $z(\mathbf{x}_{n_a}, t_{n_a})$, \mathbf{x}_{n_a} konumundaki, t_{n_a} anındaki rassal alan ölçümünü, $N(\mathbf{h}, \tau)$, uzayda aralarındaki konum farkı \mathbf{h} vektörü, zamandaki farkları τ olan nokta çiftleri sayısını, μ , rassal alanın ortalamasını göstermektedir. $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal alanı ikinci dereceden durağanlık özelliği göstermediğinde veya Eş. 3.13'deki gibi bir $\mu(\mathbf{x}, t)$ yönseme fonksiyonu içerdiğinde Eş. 3.14 ve Eş. 3.15'teki eşdeğişinti ve YDS fonksiyonları yanlılık gösterecek ve bundan dolayı eşdeğişinti veya YDS yapısı doğru bir şekilde

yatay ve dikey eksenlerinin birbirine olan oranlarını göstermektedir. Dünya batıdan doğuya doğru döndüğü için gözlenen Gauss yüzeylerinin merkezleri a_{63} , a_{64} , a_{69} ve a_{610} da batıdan doğuya doğru hareket ederler.

2. ÇÇG fonksiyonun parametrelerin kestirimi için Doğrusal Olmayan Enaz Kareler (DOEK, Nonlinear Least Squares-NLSQ) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. Örnekleme olarak IGS istasyon noktaları ve GIM harita ızgara noktaları denenmiştir. Şekil 3.14'da 27 Mart 2010 günü için 1600 ve 1800 GS'de GIM haritaları verilmiştir. PSO eniyilemesi, DOEK eniyilemesine göre her iki örnekleme için, tüm saatlerde daha az kestirim hatasıyla ve daha kısa sürede parametre değerlerini bulabilmiştir. Bu çalışmalarda proje öneri formunda öngörüldüğü üzere PSO eniy-



Şekil 3.14: 27 Mart 2010 a) 1600 ve b) 1800 GS'de GIM haritaları, ve sırasıyla, c) ve d) PSO eniyilemesi ile bulunan parametrelerle elde edilen TEİ yüzeyi, e) ve f) DOEK eniyilemesi ile bulunan parametrelerle elde edilen TEİ yüzeyi

ilemesi tercih edilmiştir.

3. Dünya üzerinde çift çekirdekli Gauss modeli ile Türkiye üzerindeki yönseme için sabit, doğrusal ve kuadratik fonksiyonları incelenmiştir. Eş. 3.19'deki μ_1 , sabit

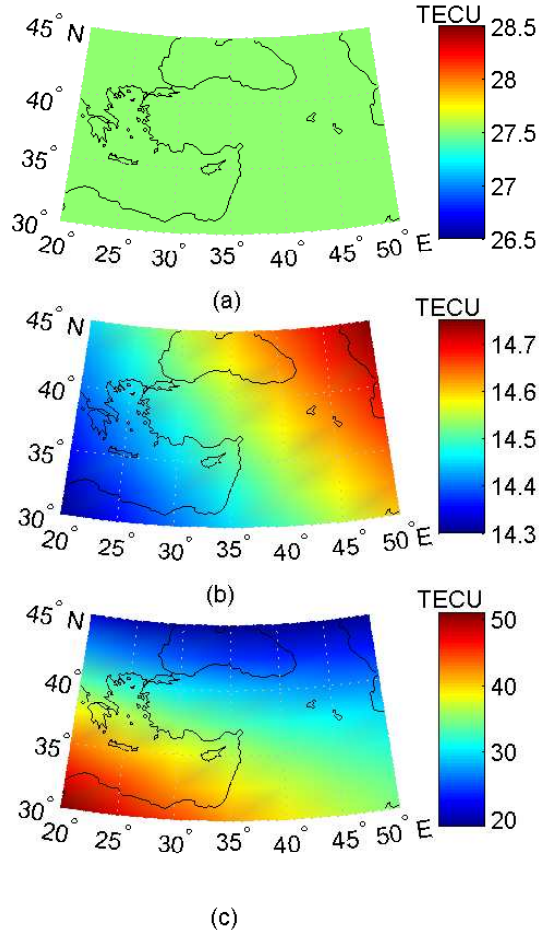
yönseme yüzeyini, Eş. 3.20'deki μ_2 , doğrusal yönseme yüzeyini, Eş. 3.21'deki μ_3 , ikinci dereceden çokterimli (kuadratik) yönseme fonksiyonlarını göstermektedir.

$$\mu_1(\mathbf{x}) = a_{11} \quad (3.19)$$

$$\mu_2(\mathbf{x}) = a_{21} + a_{22}\theta + a_{23}\phi \quad (3.20)$$

$$\mu_3(\mathbf{x}) = a_{31} + a_{32}\theta + a_{33}\phi + a_{34}\theta^2 + a_{35}\theta\phi + a_{36}\phi^2 \quad (3.21)$$

Şekil 3.15'de bölgesel yönseme fonksiyonları verilmektedir. Yerküresel ÇÇG dağılımı



Şekil 3.15: Bölgesel yönseme yüzeyleri: a) Sabit, b) Doğrusal, c) Kuadratik

varsayımı altında Türkiye üzerindeki TEİ değerleri Eş. 3.19, Eş. 3.20, ve Eş. 3.21'te verilen sabit, doğrusal ve kuadratik model parametreleri PSO ile bulunmuş ve düzeltilmiş hataları karşılaştırılmıştır. En az hata ÇÇG için bulunmuştur. Doğrusal

İkinci dereceden durağan bir rassal fonksiyon, özünlülük özelliği de gösterir, fakat bu ifadenin tersi her zaman sağlanmayabilir. İkinci dereceden durağan bir rassal fonksiyon için Eş. 3.26 sağlanmalıdır.

$$\gamma(\mathbf{h}, t) = cov(\mathbf{0}, 0) - cov(\mathbf{h}, \tau) \quad (3.26)$$

Rassal fonksiyon ikinci dereceden durağan ise eşdeğişinti fonksiyonu bilindiğinde YDS fonksiyonu da bulunabilir.

105E171 projesinde YDS, üssel, Gauss yada küresel fonksiyonlarından $\mathcal{L}2$ normuna göre en az değeri veren olarak seçilmekteydi (SAYIN, 2008). 109E055 projesinde, üssel, Gauss yada küresel fonksiyonların bir üst ailesi olan Eş. 3.27’de verilen Matern fonksiyonu, $M(\xi, \varsigma, \chi(\vartheta, \varpi))$, kullanılmıştır.

$$M(\xi, \varsigma, \chi(\vartheta, \varpi)) = \xi + \varsigma(1 - \chi(\vartheta, \varpi)) \quad (3.27)$$

Yukarıdaki eşitlikte

$$\chi(\vartheta, \varpi) = 2^{\vartheta-1} \Gamma^{-1}(\vartheta) \left(\frac{h}{\varpi} \right)^{\vartheta} \mathbf{K}_{\vartheta}(\mathbf{h}/\varpi) \quad (3.28)$$

Γ , Gamma fonksiyonunu, \mathbf{K} ise Değiştirilmiş Bessel fonksiyonu göstermektedir. Matern fonksiyonun parametreleri, $\xi, \varsigma, \chi(\vartheta, \varpi)$, PSO eniyilemesi ile seçilmiştir. Türkiye iyonküresi için TUSAGA-Aktif ağından elde edilmiş İONOLAB-TEC kestirimleri ile uygulanmasına örnekler Bulgular bölümünde verilmiştir.

3.11.3 Güneş Doğrultulu Koordinatlarda TDA ile Değişkenliğin Modellemesi

Türkiye coğrafyası benzeri bölgesel alanlar için değişkenliğin ve rassal alanın modellemesi için geriatma enerjisi ve değişkenliğin ölçüsünü gösteren Tekil Değer Ayırıştırması (TDA) uygulanmıştır. TDA taban fonksiyonu olarak İyonküre Tomografisi için ilk kez (ERTURK vd, 2009)’da kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulanması için ilk aşamada güneş merkezli yeni bir koordinat sistemine dönüşüm yapılması gereklidir. Dünya Merkezli koordinat sisteminde gösterilen bir nokta, Kartezyan koordinatlarda (X_e, Y_e, Z_e) ile gösterilebilir. Güneş Doğrultulu (GD) koordinatlarda aynı nokta (X_g, Y_g, Z_g) ile gösterilirse, iki koordinat sistemi arasındaki dönüşüm aşağıdaki birim vektörler cinsinden yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_{x_g} \\ \hat{a}_{y_g} \\ \hat{a}_{z_g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(T(t)) \cos(\psi(d)) & \sin(T(t)) \cos(\psi(d)) & \sin(\psi(d)) \\ -\sin(T(t)) & \cos(T(t)) & 0 \\ -\cos(T(t)) \sin(\psi(d)) & -\sin(T(t)) \sin(\psi(d)) & \cos(\psi(d)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{a}_{x_e} \\ \hat{a}_{y_e} \\ \hat{a}_{z_e} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Yukarıdaki eşitlikte \hat{a} birim vektörü, d yıl içerisinde 1 Ocak'tan başlayarak gün sayısını göstermektedir. t gün içinde dakika cinsinden zamandır. Güneş Doğrultulu koordinatlara dönüşümde kullanılan derece cinsinden açılar $T(t)$ ve $\psi(d)$ aşağıdaki eşitliklerde tanımlanmıştır:

$$T(t) = 180 \cos \left(\frac{t - 12 \times 60}{12 \times 60} \right) \quad (3.30)$$

ve

$$\psi(d) = 23,5 \left(\frac{d - 172}{365} \right) \quad (3.31)$$

TDA ile değişkenliğin modellenmesinde her zaman diliminde beşer dakikalık ara ile 30 dakikalık EKDY haritaları çıkarılmıştır. Birbirini izleyen altı gün için de aynı zaman diliminde elde edilen haritalar GD koordinat sistemine çevrilmiştir. GD koordinatlarında elde edilen ardışık TEİ haritalarının kesişim bölgesindeki TEİ değerleri bir matris içinde değerlendirilmiş ve TDA uygulanmıştır. İçsel çarpım ile birinci yada ilk iki TDA değerinin enerjinin yüzde yüzüne yakın bir değer olduğu görüldüğü için birinci yada ilk iki TDA, geri çatma ve modelleme kullanılmak üzere kayıt edilmiştir. Bu yöntemin uygulaması Bulgular bölümünde verilecektir.

3.12 Veri Tabanı

109E055 nolu proje kapsamında TUSAGA ve TUSAGA-Aktif RINEX dosyaları HGK'dan sağlanmış ve Ocak 2001 - Ağustos 2012 arası verisi olan tüm istasyonlara Bölüm 3.1'de özetlenen algoritma uygulanmıştır. HGK veri aktarımında yada HÜ sunucu bilgisayarında elektrik kesintilerinden dolayı aksamalar olduğunda eksik veriler taşınabilir bellekler ile temin edilmiştir. Tüm istasyonlar ve günler üzerinden veriler ve hesaplamalar taranarak V. Ara Dönem Gelişme Raporu EK-1 IP1-A'da bursiyer Amirmahdi Sadegimorad tarafından sunulmuştur. Bu raporda HGK ile HÜ arasında protokol kapsamında veri alışverişi yöntemi tanıtılmakta ve hata kodları dosyası sunulmaktadır. Bu ayrıntılı hata kodları dosyası istasyonların veri sağlığını incelemek için çok önemli ve kıymetlidir. Bu hata kodları dosyası görsel olarak her istasyon için hazırlanmış ve HGK ile paylaşılmıştır. Eksik veri ile çalışan veya uzun süreli çalışmayan istasyonların yeniden çalışır hale gelmesi için HGK girişimde bulunmuştur. Veri eksiklikleri ve aktarım problemleri nedeniyle Ağustos 2012 itibariyle TUSAGA-Aktif kullanılarak yakın gerçek zamanlı

TEİ haritaları üretilmemektedir. Aynı durum Türkiye coğrafyasına özel TEİ modellemesi için de geçerlidir. Bu proje kapsamında geliştirilen yöntemlerin gelecekte yakın gerçek zamanlı olarak kullanılabilmesi için TUSAGA-Aktif ağının istasyon sayısının artırılması ve sağlıklı veri toplanması için gerekli önlemlerin alınması lazımdır.

109E055 nolu proje kapsamında Bölüm 3.2’te anlatılan eksik verilerin tamamlanması ve modellemelerin sağlıklı yapılabilmesi için geliştirilen aradeğerleme katsayıları, ve STI-TEC1 ve STI-TEC2 ile kestirilen IONOLAB-TEC değerleri bir veri tabanına konmuştur. Bu katsayılar Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonunun ortalama ve standart sapma değerlerini komşu istasyonların yakınlıklarına göre sıralamaktadır. Orta enlem bölgesi içinde yer alan tüm YKS alıcı ağı için kullanılabilir.

Bölüm 3.9’te anlatılan TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağı saatçi istatistikleri bir veri tabanına konmuş ve IONOLAB kullanıcılarına sunulmuştur. İstasyon, yıl, saat yada bölge bazında taranabilen bilgiler OYF ve GAD değerlerini içermektedir.

3.13 Bölgesel Otomatik Haritalama

109E055 nolu projenin en temel amaçlarından biri ülkemiz coğrafyasında otomatik TEİ haritalamasıdır. 105E171 nolu projeden gelen arkaplan bilgileri ve yöntem deneyimleri ile aşağıda sunulan algoritma önerilmektedir.

Bölgesel Otomatik Haritalama Algoritması (IONOLAB-MAP):

1. TUSAGA-Aktif ağında her istasyonda toplanan RINEX dosyalarının HÜ sunucusuna ulaşması;
2. Haritalama yapılacak gün için uydu efemeris, uydu yanlılık ve IONEX dosyalarının IGS sitesinden indirilmesi;
3. Bölüm 3.1’de özetlenen yöntem ile dosyaların işlenmesi ve IONOLAB-TEC kestirimlerinin yapılması;
4. Bölüm 3.1’de özetlenen yöntem ile hata kodları dosyasından TUSAGA-Aktif ağında hangi istasyonların verilerinin sağlıklı olduğunun tespiti;
5. Bölüm 3.2’de özetlenen yöntem ile eksik verilerin komşulardan ve önceki günlerden yararlanılarak aradeğerlemesi;

6. Bölüm 3.9'te özetlenen yöntem ile GAD sürelerinin ve saatçi harita güncelleme aralıklarının belirlenmesi;
7. Uzaklığın Tersine ile Ağırlıklandırma (UTA) yöntemi ile sık bir ızgara üzerinde ve her istasyon için 500 km sınırları içinde ön haritalama yapılması;
8. Bölüm 3.11.1'de özetlenen yöntem ile doğrusal yönseme katsayılarının belirlenmesi;
9. Bölüm 3.11 ve Bölüm 3.11.2'de özetlenen yöntemler ile Matern fonksiyonun parametrelerinin belirlenmesi;
10. Bölüm 3.10.2'de özetlenen yöntem ile EKDY Krig haritalarının yapılması.

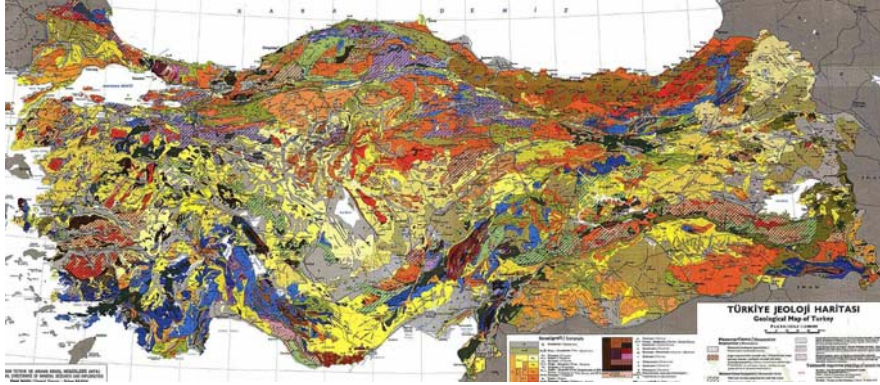
Bu algoritmanın çalışmasına örnekler Bulgular bölümünde sunulmuştur. IONOLAB-MAP algoritması ve yazılımları özgündür. IONOLAB-MAP algoritmasının diğer orta enlem YKS ağları içinde başarıyla çalışacağı öngörülmektedir.

3.14 Deprem Alarm Sinyalinin Oluşturulması

109E055 nolu projenin amaçlarından biri ülkemiz coğrafyasında ve bir YKS alıcı ağı çerçevesinde olası bir deprem alarm sinyalinin varlığını araştırmaktır. Bu çerçeve içinde İş Paketi 6 tanımlanmıştır. 105E171 ve 109E055 nolu projelerde bu alanda yapılan çalışmalar iki makale (KARATAY vd, 2010d),(ARIKAN vd, 2012a), dokuz bildiri (KARATAY vd, 2009a-b;2010a-c), (ARIKAN vd, 2007c;2009b), (ARIKAN O. vd, 2012b), (DEVİREN vd, 2012a), bir doktora (KARATAY, 2010) ve bir YL tezi (ÖZİLHAN, 2010) olarak yayınlanmıştır. Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği öğretim üyesi Prof. Dr. Erçin Kasapoğlu ile toplantılar yapılmış ve sonuçlar üzerinde görüşü alınmıştır. 110E296 projesi kapsamında Prof. Dr. Orhan Arıkan'ın YL öğrencisi ve bursiyer Ali Alp Akyol'un tez çalışmaları kapsamında sürmektedir.

İyonküre, güneş rüzgarları, GLS, dünyanın kendi etrafında ve güneşin etrafında dönüşü, dünyanın manyetosferi, jeomanyetik hareketlilik, yerçekimsel dalgalar ve elektromanyetik kirlilik gibi pek çok nedenden dolayı değişir. Bu değişiklikler, yönsemeyi belirleyen yerel veya yerküresel döngüler nedeniyle olabileceği gibi çok daha kısa süreli ve ilintisiz olarak da görülebilmektedir. Bölüm 2.10'de anlatıldığı üzere son yıllarda yoğunlaşan iyonkürenin yer ve uydu tabanlı uzaktan algılanması ve f0F2, TEİ gibi parametrelerin uzay ve zamanda daha yoğun izlenmesi sonucunda sismik hareketliliğin iyonkürede deprem

büyüklüğüne bağlı olarak yerel değişimlere neden olabileceği gösterilmiştir. Türkiye'nin jeolojik haritası Şekil 3.16'de sunulmaktadır. Yukarıdaki şekil Türkiye coğrafyasında fay



Şekil 3.16: Türkiye'nin jeolojik yapısı (MTA)

hatları kadar jeolojik yapının da karmaşıklığını göstermektedir.

Bu alanda 105E171 ve 109E055 nolu projeler kapsamında yapılan çalışmalarda izlenen yöntem aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Jeomanyetik hareketliliğin az olduğu dönemlerde Richter ölçeğine göre $M=6$ 'dan büyük altı deprem (E1-E6) seçilmiştir. Bu depremlerin beşi Japonya'da biri Çin Halk Cumhuriyeti'nde meydana gelmiştir.
2. Depremin merkez üssüne en yakın IGS istasyonu merkez istasyon olarak adlandırılmıştır.
3. Merkez istasyonun çeşitli komşuluklarında başka IGS istasyonları belirlenmiştir.
4. Seçilen bölgelerde deprem olmadığı sıralarda oluşan iki büyük jeomanyetik fırtına zamanı (BD1 ve BD2) belirlenmiştir.
5. Seçilen bölgelerde deprem ve jeomanyetik fırtına olmadığı zamanlarda iyonkürenin sakin zamanı (SD) seçilmiştir.
6. SD'de yer alan günlerden Ortalama Değer Sakin Gün (ODSG) oluşturulmuştur.
7. Çapraz İlinti Katsayısı (ÇİK), Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (SKLD), \mathcal{L}_2 normu ve Kayan Pencere Analiz yöntemi ile a) Depremin olduğu günün 15 gün öncesinden, 15 gün sonrasına kadar olan zamanda; b) Bozulmanın olduğu BD1 ve

- BD2 sürelerinde; ve c) İyonküresel sakin dönem, SD, sırasında; her komşuluk için merkez istasyonu ve kendi aralarında çapraz olarak; ODSG ile; ve ardışık günlerde hesaplanmış ve 10.000'den fazla veri mesafeye, süreye, depremin büyüklüğüne göre sıraya dizilmiştir.
8. Bu incelemelerin sonucunda iyonkürede deprem öncesi farklılığın görüldüğü günler, depremin büyüklüğüne göre, deprem gününden beş ila on gün öncesine kadar görülebilmektedir.
 9. Uzaklığa bağlı olarak iyonküre 150 km; 150-350 km; 350-550 km ve 550 kilometreden uzak olarak sınıflandırılarak yarıçap bölgelerine bölünmüştür.
 10. Büyük depremlerden önce tepe TEİ değerinin de depremden yaklaşık iki gün önce normal düzeyinin çok üstünde arttığı gözlenmiştir.
 11. SKLD, iyonküre bozulmalarını en iyi belirleyecek yöntem olarak seçilmiştir.
 12. Saatlik bozulmaları gözlemek için SKLD, KLD değerlerine bölünmüş ve 2,5 dakika zaman çözünürlüğünde yukarıda sayılan günler üzerinden hesaplanmıştır. Gün içerisinde deprem öncülünün zamansal farklılığı bu yöntem ile belirlenememiştir.
 13. Türkiye Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattı üzerinde 2009 yılında meydana gelmiş Çağlayan, Erzincan (M=5) ve Yenice, Çanakkale (M=4,2) depremleri yukarıda adı geçen analiz yöntemleri ile incelendiği zaman SKLD yönteminin ve ODSG ile karşılaştırmanın öne çıktığı görülmektedir. Depremin merkez üssüne 150 kilometreden daha yakın tüm TUSAGA-Aktif istasyonlarında deprem gününden beş gün öncesine kadar hareketlilik olduğu gözlenmiştir.
 14. Deprem alarm sinyalinin otomatik olarak oluşturabilmek için tüm TUSAGA-Aktif istasyonlarının ODSG ile SKLD değerlerinin hesaplanması gündeme gelmiş ve 2009 yılında oluşmuş Daday, Kastamonu (M=4,5), Pazaryolu, Erzurum (M=4,3) ve Bandırma açıkları, Marmara Denizi (M=4,1) depremleri için tüm yöntemler bozulmalı ve sakin günler üzerinden uygulanmıştır. Komşu istasyonların yakınlıklarına göre belirlenen eşik değerleri, Kayadibi, Sivas (M=3,9) depreminde denemiştir. %75 başarı ile depremin bölgenin belirlenebildiği gözlenmiştir. 150 km'den yakın komşu istasyonların ve ODSG ile karşılaştırmaların önemi ortaya konmuştur. Yöntemin

başarısının iyileştirilmesi için istatistiksel ve uyarlamalı bir eşik değerine gereksinim olduğu belirlenmiştir.

15. SKLD ile ardışık gün ve ODSG karşılaştırmaları 23 Ekim 2011 Van depremi için yapılmış ve sonuçlar (ARIKAN vd, 2012a)'da yayınlanmıştır. Van depreminden 10 gün önce ve 10 gün sonra oluşturulan zaman aralığında iki büyük iyonküre fırtınası olmuştur. İkinci büyük fırtına, en güçlü artçı deprem ile örtüşmektedir. Geriye dönük olarak yapılan çalışmalarda çalışan TUSAGA-Aktif istasyonlarının verileri toplanmış ve ODSG ile SKLD yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. ODSG Eş. 3.32'te verildiği gibi d_i 'dan d_s 'e kadar sakin günler üzerinden ortalama alınarak belirlenmektedir:

$$\mathbf{x}_{u;d_i-d_s} = \frac{1}{N_d} \sum_{n_d=d_i}^{d_s} \mathbf{x}_{u;n_d} \quad (3.32)$$

Yukarıdaki eşitlikte n_d gün indisidir. ODSG için DDD aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s} = \mathbf{x}_{u;d_i-d_s} \left[\sum_{n=N_i}^{N_s} \mathbf{x}_{u;d_i-d_s}(\mathbf{n}) \right]^{-1} \quad (3.33)$$

d günü, u ve v istasyonları arasında Kullback-Leibler Iraksaması için

$$KL(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{u;d}(\mathbf{n}) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(\mathbf{n})}{\hat{\mathbf{P}}_{v;d}(\mathbf{n})} \right) \quad (3.34)$$

ve

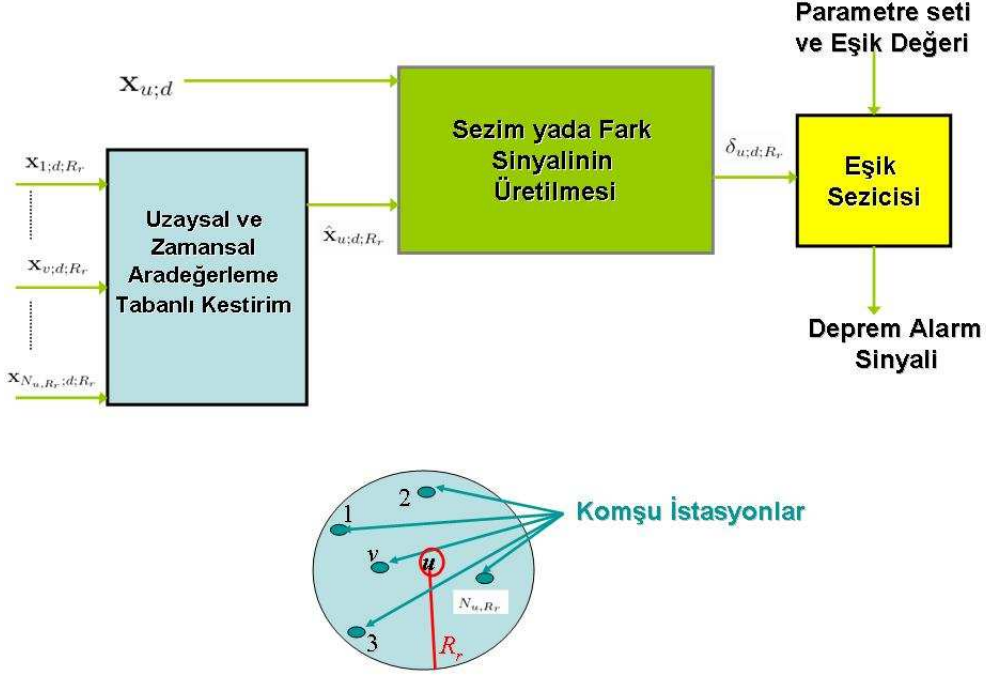
$$KL(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{v;d}(\mathbf{n}) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{v;d}(\mathbf{n})}{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(\mathbf{n})} \right) \quad (3.35)$$

hesaplanmaktadır ve $N_i < n < N_s$. SKLD ise Eş. 3.34 ve Eş. 3.35 kullanılarak tanımlanabilir:

$$SKLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \mathbf{KL}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) + \mathbf{KL}(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) \quad (3.36)$$

u istasyonunun d . günü ve ODSG arasındaki SKLD $SKLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d-d_s})$ olarak; u istasyonunun ardışık günleri arasındaki SKLD $SKLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$ olarak tanımlanmıştır. Deprem günlerinin SKLD değeri Se 'nin, SD SKLD değeri Sq 'ya göre önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Depreme yakın istasyonların sürekli çalışıyor olmasının önemi bir kez daha ortaya konmuştur.

16. Radar Sinyal İşleme alanında kullanılan ve sezim/kestirim kuramına dayalı, istatistiksel deprem alarm sinyali belirlenmesi ve uyarlamalı eşik değerinin oluşturulması için Şekil 3.17’de sunulan yöntem literatürde ilk kez önerilmiştir. Uzaysal ve za-



Şekil 3.17: İstatistiksel deprem alarm sinyali belirlenmesi ve uyarlamalı eşik değerinin oluşturulması

mansal aradeğerleme tabanlı kestirim için aşağıda özetlenen yöntem uygulanmıştır.

$$\mathbf{x}_{u;d} = [x_{u;d}(1) \dots x_{u;d}(n) \dots x_{u;d}(N)]^T \quad (3.37)$$

u . istasyon ve d . gün için N sayıda TEİ değerlerinden oluşan vektörü göstermektedir. T , devrik operatörüdür. Önerilen yöntemin temeli, u . istasyon ve d . gün için N sayıda TEİ değerlerini, istasyonu çevreleyen komşu istasyonlardan Krigleme benzeri bir aradeğerleme ile kestirmek ve istasyonun kendi kestirimi ile karşılaştırmaya dayanmaktadır. Kestirim için R_r komşuluğunda, $N_{u;R_r}$ adet komşu ile kestirim değeri $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r}$ aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r} = \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) \mathbf{x}_{v;d;R_r} \quad (3.38)$$

Burada $\alpha_{u;d;R_r}(v)$, v . komşu istasyonun TEİ vektörünün uzaysal aradeğerleme katsayısıdır. $\alpha_{u;d;R_r}(v)$ değerleri aşağıdaki enküçültme ifadesiyle bulunabilir:

$$\min_{\alpha_{u;d;R_r}(v)} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} \left\| \mathbf{x}_{u;d_n} - \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) \mathbf{x}_{v;d_n;R_r} \right\|_2^2 \quad (3.39)$$

Yukarıdaki eşitlikte, $N_{d_s-d_i}$, d . günün öncesindeki d_i . günden d_s . güne kadar geçen gün sayısını göstermektedir. $\|\cdot\|_2$ operatörü, $\mathcal{L}2$ normunu vermektedir. Eş. 3.39'ta verilen enküçültme kapalı olarak

$$\underline{\alpha}_{u;d;R_r} = \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{X}_{u;d_n;R_r} \right)^{-1} \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{b}_{u;d_n;R_r} \right) \quad (3.40)$$

elde edilebilir. Burada $\underline{\alpha}_{u;d;R_r}$ aşağıda verilen katsayı vektörünü göstermektedir:

$$\underline{\alpha}_{u;d;R_r} = [\alpha_{u;d;R_r}(1) \ \dots \ \alpha_{u;d;R_r}(v) \ \dots \ \alpha_{u;d;R_r}(N_{u;R_r})]^T \quad (3.41)$$

Ayrıca

$$\mathbf{X}_{u;d_n;R_r} = [\mathbf{x}_{1;d_n;R_r} \ \dots \ \mathbf{x}_{v;d_n;R_r} \ \dots \ \mathbf{x}_{N_{u;R_r};d_n;R_r}] \quad (3.42)$$

ve

$$\mathbf{b}_{u;d_n;R_r} = \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{x}_{u;d_n}. \quad (3.43)$$

olarak ifade edilmektedir. Eğer Eş. 3.40'da verilen $\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}$ değerinin koşul değeri yüksek ise Eş. 3.40 aşağıdaki eşitlikte olduğu şekilde düzleştirilmelidir:

$$\underline{\alpha}_{u;d;R_r} = \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{X}_{u;d_n;R_r} + \mu \mathbf{I} \right)^{-1} \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{b}_{u;d_n;R_r} \right) \quad (3.44)$$

Bu aşamalar, Şekil 3.17'de komşuluklardan oluşturulan uzay-zaman aradeğerleme kestirim değeridir. Sezim eşik değerinin belirlenmesi için istasyonun uzun süre tutulan geçmiş TEİ değerlerinin GLS aktivitesi ile örtüştürülmesi ve jeomanyetik bozulmaların depremden dolayı olan bozulmalardan ayırte edilmesi önerilmektedir. Bu çalışmalar geliştirilme aşamasındadır.

Bu bölümde anlatılan 109E055 projesi kapsamında tüm iş paketlerinde uygulanan yöntemlerin uygulama sonuçları Bölüm 4'te verilmiştir.

4. BULGULAR

109E055 nolu proje kapsamında tamamlanan çalışmalar ve elde edilen bulgular İş Paketleri sırasına göre özet olarak aşağıda verilmiştir.

4.1 İş Paketi 1

İş Paketi 1 için Proje Önerisindeki Tanımları ve süreleri :

4.1.1 İş Paketi 1 Tanımı

- **İş Paketi 1 :** HGK Tarafından 2008 yılı içinde yerleştirilen YKS alıcılarının verilerinden TEİ hesaplanması.

Süre : 1 - 36 ay

4.1.2 İş Paketi 1 Bulguları

İş Paketi 1, Türkiye ve Kuzey Kıbrıs'a TUSAGA-Aktif projesi çerçevesinde yerleştirilen YKS alıcılarının kaydettiği verilerin anında yada dosya halinde HGK tarafından derlenmesini; Hacettepe Üniversitesine aktarılmasını; Bu verileri kullanarak IONOLAB-TEC ve IONOLAB-BIAS hesaplanmasını; Veri tabanına kaydedilmesini; Her istasyon için 30 s zaman çözünürlüğünde 24 saatlik gürbüz TEİ kestirimleri elde edilmesini; Bu veri toplamının proje süresince devam etmesini; Yapılan hesaplamaların yer sabit bir sistemde de sunulmasını öngörmüştür. Bu iş paketi çalışmaları (ARIKAN vd, 2010;2011;2012b-c), (ARIKAN O. vd, 2012a), (DEVIREN vd, 2012b-c), (GULYAEVA vd, 2012a-b), (SAHİN vd, 2011a-c), (ŞAHİN, 2011), (SAPAZ vd, 2012a-b), (SEZEN ve ARIKAN, 2012), (SEZEN vd, 2012) tez, makale ve bildirilerinde sunulmuştur. Tezin kapak ve öz sayfaları EK-1'de, makale ve bildiriler EK-2'de verilmiştir. Bu iş paketinde çalışan öğrenciler Oktay Şahin, M.N. Deviren, Onur Çilibaş, Hakan Tuna, Amirmahdi Sadeghimorad, Ali Osman Yıldız, Aykut Yıldız, ve M.S. Sapaz olmuştur. Son derece başarı ile tamamlanan bu iş paketi bulguları aşağıda özetlenmiştir.

1. Bu iş paketi kapsamında HGK ile HÜ arasında yapılan RINEX dosyası transferi protokolü yenilenmiştir. HGK tarafından TUSAGA-Aktif ağı RINEX verileri dosya halinde ve hergün bitiminden sonra, güvenli bir 'ftp' programı ile HÜ sunucu bilgisayarlarına aktarılmıştır. HÜ sunucu bilgisayarında, elektrik kesilmesi sonucunda üreticinin zamanında devreye girmemesi ve dışarıdan yapılan

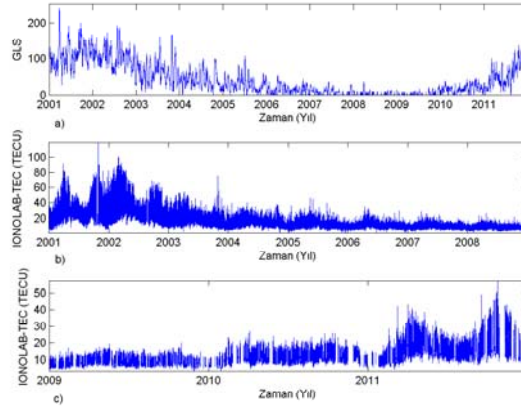
siber saldırı nedeniyle iki kez uzun süreli veri kaybı olmuştur. HGK eksik verileri protokol gereği taşınabilir bellek ile HÜ'ye teslim etmiştir. TUSAGA-Aktif ağı RINEX dosyaları HGK tarafından hazırlanan bir işlev dosyasına kayıt edilmiştir. Bu dosyalar incelendiğinde pek çok istasyonun fiziksel nedenler yada veri aktarımı sırasındaki kayıplardan dolayı çalışmadığı görülmüştür. Kaydedilen verilerde sık sık kesintiler olmaktadır. Çizelge 2.8, Çizelge 2.9, ve Çizelge 2.10'te verilen doluluk oranlarında bu durumun ciddiyeti ortaya çıkmaktadır. HGK, bu istasyonların güvenilir ve sağlıklı veri toplayabilmesi için TUSAGA-Aktif projesi çerçevesinde TÜBİTAK ile bir protokol dahilinde girişimde bulunmuştur. Bu veri kaybı ve günlük veride kesintiler IONOLAB grubunun 109E055 projesinde önerdiği iş paketlerinde değişiklik ve güncellemeye gitmesine neden olmuştur. Uzay-zaman aradeğerlemesi bu gereksinimden doğmuştur ve doluluk oranlarını ortalama %65'ten %85'e çıkarmıştır. Dolayısıyla projede geliştirilen pek çok yöntem, düzeltilmiş veri kümesi ile yeniden uygulanmak zorunda kalmıştır.

2. İş paketi 1 kapsamında projenin başladığı 2009 yılından bittiği 2012 yılı Eylül ayı başına kadar geçen süre içinde RINEX dosyası HÜ'ye aktarılan her istasyon ve her gün için IONOLAB-TEC ve IONOLAB-BIAS kestirilmiş ve bir veri tabanına yazılmıştır. Ayrıca güncellenmiş IONOLAB-TEC algoritması TUSAGA ağı istasyonlarına da uygulanmış ve 2001-2008 yılları arası her istasyon ve her gün için IONOLAB-TEC ve IONOLAB-BIAS kestirimleri yapılmıştır. Şekil 2'de TUSAGA istasyonu tubi (TÜBİTAK, Gebze) için 2001-2008 yılları arasında ve TUSAGA-Aktif istasyonu istn (İstanbul) için 2009-2011 yılları arasında IONOLAB-TEC kestirimleri verilmiştir. Şekil 2a'de gösterilen GLS değerlerinin ve güneş döngüsünün etkinliği Şekil 2b'de azalan ve Şekil 2c'de artmaya başlayan TEİ genliğinde açıkça görülmektedir. Ayrıca mevsimlerin periyodik etkisi daha yüksek frekanslı değişimlerle verilmiştir.
3. Her istasyon ve her gün için ayrıntılı bir hata kod dosyası hazırlanmış ve veri tabanına yazılmıştır.
4. Bölüm 2.3'de anlatılan IONCAP ve ICEPAC ampirik modellerini çalıştıran HF-PRE algoritması Türkiye üzerinde yarım güneş döngüsünde ve sanal linkler üzerinden çalıştırılmış ve saatlik foF2 ve hmF2 kestirimlerinin dağılımı incelenmiştir. Bu

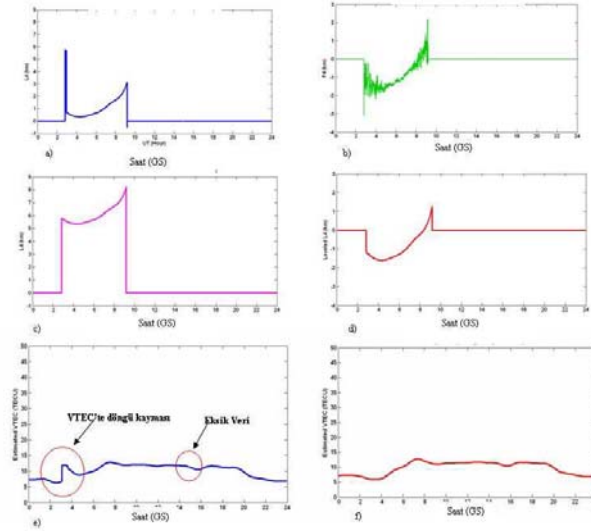
çalışma YL öğrencisi ve bursiyer Ali Osman Yıldız'ın YL tezini oluşturmaktadır. Kişisel nedenlerle çalışmasını proje süresinde tamamlayamayan Ali Osman Yıldız'ın Ocak 2013'te mezun olması beklenmektedir.

5. Bölüm 3.1'de ayrıntılandırılan yöntemle, IONOLAB-TEC algoritması önışleme kısımları geliştirilmiş ve bu özgün TEİ kestirim algoritması çevrimiçi, yakın gerçek zamanlı çalışabilir hale getirilerek www.ionolab.org sitesinden tüm kullanıcılara sunulmuştur.

- Özgün döngü kopması tamiri algoritması ile IONOLAB-TEC kestirimlerinin güvenilirliği ve hassasiyeti arttırılmıştır. Bu çalışmaya bir örnek olarak Şekil 5'de mate IGS/EUREF istasyonu (Matera, İtalya), 6 Nisan 2009 günü için döngü kopması tamiri gösterilmiştir. 6 Nisan 2009 günü, mate istasyonunda birden çok uydu kaydında döngü kopması oluşmuştur. Şekil 5a'da 3 numaralı uydu için L4 verilerinde oluşan döngü kopması, ve Şekil 5b'de 3 numaralı uydu için P4 değerleri verilmektedir. Bu uydu için döngü kopması Şekil 3.1'da verilen algoritma ile Şekil 5c'de tamir edilmiştir. Faz ölçeklemeye dayanan IONOLAB-TEC algoritması için Şekil 5d'de P4 üzerine ölçeklenen L4 değerleri gösterilmektedir. Bu veriler düzeltilmeden hesaplanan *VTEC*, Şekil 5e'de ve döngü kopması tamir edilmiş *VTEC* Şekil 5f'de sunulmuştur. Şekil 5f'de gösterildiği üzere veri kopmaları, kısa süreli aradeğerleme algoritması ile düzeltilmiştir. mate istasyonu, 6 Nisan 2009 günü tüm uydular için döngü kopması ve faz ölçeklemesi yapılmadan hesaplanan IONOLAB-TEC Şekil 5a'da, tamir sonrası ve kısa süreli aradeğerleme sonrası IONOLAB-TEC kestirimleri Şekil 5b'de verilmektedir.
- Yakın gerçek zamanlı, çevrimiçi IONOLAB-TEC Kestirimi için uydu eferis değerlerinin etkisi incelenmiştir. Uydu yörünge bilgileri öngörülen (IGS Predicted), hızlı (IGS Rapid) ve son hesaplanan haliyle (IGS Final) olarak IGS sitelerinden sunulmaktadır. Ayrıca IGS analiz merkezleride son hesaplanan haliyle kendi yörünge bilgilerini 10-15 gün gecikmeyle güncellemektedir. TUSAGA-Aktif ağında ve IGS ağında bulunan istasyonlar için IONOLAB-TEC değeri bu farklı yörünge bilgileriyle hesaplanmıştır. semd, Şemdinli istasyonu için , 27 Mart 2011 sakin günü, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü ve



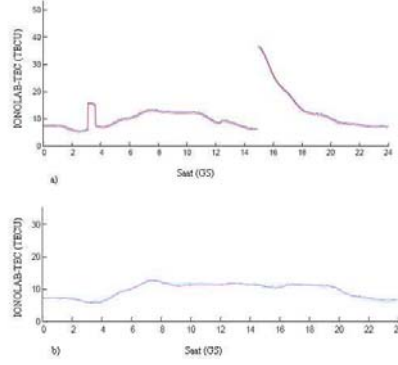
Şekil 4.1: a) 2001-2011 yılları arası GLS sayısı b) 2001-2008 yılları arası tubi istasyonu IONOLAB-TEC değerleri c) 2009-2011 yılları arası istn istasyonu IONOLAB-TEC değerleri.



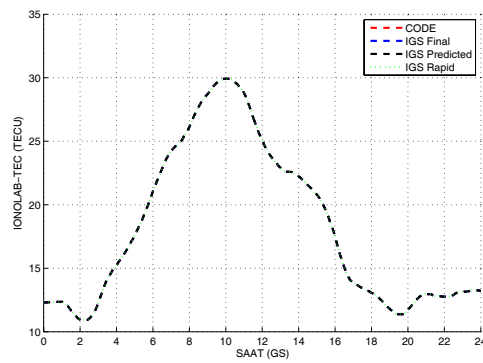
Şekil 4.2: mate istasyonu, 6 Nisan 2009, 3 numaralı uydu için döngü kopması tamiri a) döngü kopması olan L4, b) P4, c) döngü kopması tamir edilmiş L4, d) döngü kopması tamir edilmiş ve P4 verilerine ölçeklenmiş L4, e) döngü kopması ve kısa süreli kesintileri tamir edilmemiş *VTEC*, f) döngü kopması ve kısa süreli kesintileri tamir edilmiş *VTEC*.

23 Ekim 2011 Van Depremi günü için kestirilen IONOLAB-TEC değerleri, sırasıyla Şekil 5, Şekil 5, ve Şekil 5'da verilmiştir. Tüm günler ve tüm eferis değerleri üzerinden yapılan karşılaştırmada, IONOLAB-TEC kestirimlerinin uydu yörünge bilgilerindeki değişikliklere göre son derece gürbüz olarak hesaplandığı görülmüştür.

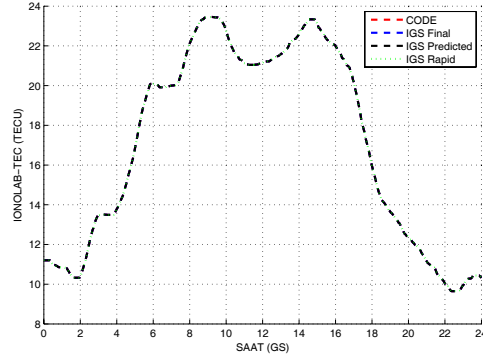
- Yakın gerçek zamanlı, çevrimiçi IONOLAB-TEC Kestirimi için uydu yanlılığı değerlerinin etkisi incelenmiştir. Uydu yanlılığı, IONEX dosyalarında ancak IGS analiz merkezleri hesaplamaları tamamlandıktan sonra sunulmaktadır. 105E171 projesi bitiminde, kestirim yapılacak olan gün için eğer bu bilgi sunulmamış ise IONOLAB-TEC kestirimi yapılamamaktaydı. 109E055 projesinde bu sorunu çözebilmek için uydu yanlılığı olmadan, uydu yanlılığının son hesaplanan değeriyle, uydu yanlılığının bir önceki ay için hesaplanan değeriyle ve uydu yanlılığının iki ay önceki değeriyle kestirimler yapılmıştır. semd, Şemdinli istasyonu için , 23 Mart 2011 sakin günü, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü ve 23 Ekim 2011 Van Depremi günü için kestirilen IONOLAB-TEC değerleri, sırasıyla Şekil 5, Şekil 5, ve Şekil 5'da verilmiştir. Tüm günler ve farklı uydu yanlılığı değerleri üzerinden yapılan karşılaştırmada, IONOLAB-TEC kestirimlerinin uydu yanlılığındaki değişikliklere göre son derece gürbüz olarak hesaplandığı görülmüştür. IONEX-GIM TEİ değerlerine uymak için uydu yanlılığının mutlaka modele katılması gerektiği ortaya konmuştur.
- Yakın gerçek zamanlı, çevrimiçi IONOLAB-TEC Kestirimi için farklı IONEX dosyalarından hesaplanan alıcı yanlılığı değerlerinin etkisi incelenmiştir. IONEX dosyaları, CODE tarafından bir gün önceden öngörülen (C1PG), iki gün önceden öngörülen (C2PG), günlük (CORG), ve son hesaplamalardan sonra yayınlanan (CODG) olarak IGS sitesinde sunulmaktadır. Ancak, CODE bu dosyaları düzenli olarak hesaplamamakta ve siteye düzgün aralıklarla yüklememektedir. IONOLAB-BIAS alıcı yanlılığı, (ARIKAN vd, 2008a) ve (NAYİR, 2007)'de ayrıntılandırıldığı üzere IONEX dosyalarındaki GIM değerlerine ölçeklendiği için bu farklı IONEX dosyalarının IONOLAB-BIAS ve IONOLAB-TEC kestirimlerine etkisini incelemek önemli bir konu olmuştur. semd, Şemdinli istasyonu için , 27 Mart 2011 sakin günü, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü ve 23 Ekim 2011 Van Depremi günü için kestir-



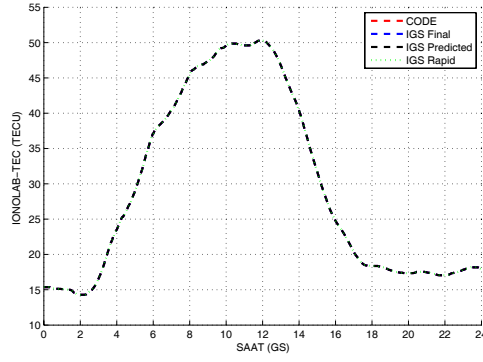
Şekil 4.3: mate istasyonu, 6 Nisan 2009 günü a) döngü kopması tamir edilmeden IONOLAB-TEC, b) döngü kopması tamir edildikten sonra kestirilen ve kısa süreli aradeğerlemesi yapılmış IONOLAB-TEC.



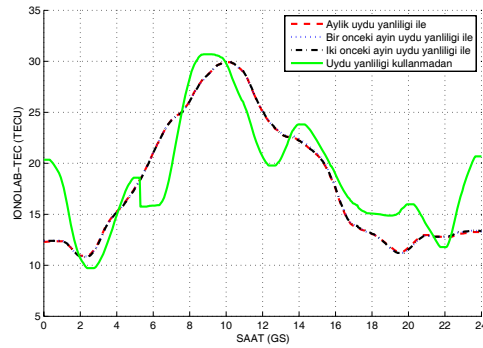
Şekil 4.4: semd istasyonu, 27 Mart 2011 saikin günü farklı uydu yörünge bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.



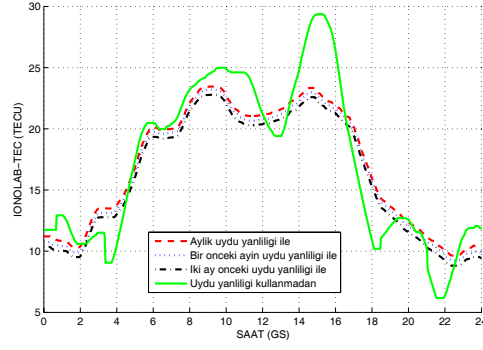
Şekil 4.5: semd istasyonu, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü farklı uydu yörünge bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.



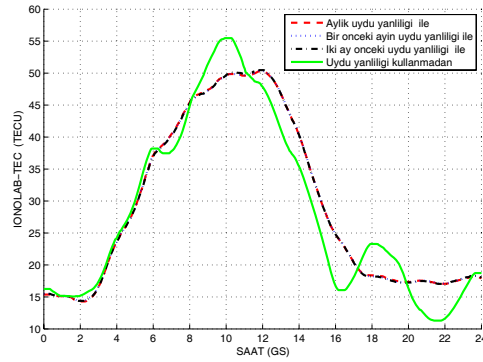
Şekil 4.6: semd istasyonu, 23 Ekim 2011, Van Depremi günü farklı uydu yörünge bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.



Şekil 4.7: semd istasyonu, 23 Mart 2011 sakin günü farklı uydu yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.

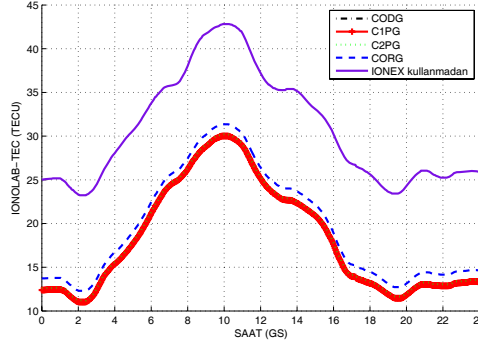


Şekil 4.8: semd istasyonu, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü farklı uydu yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.

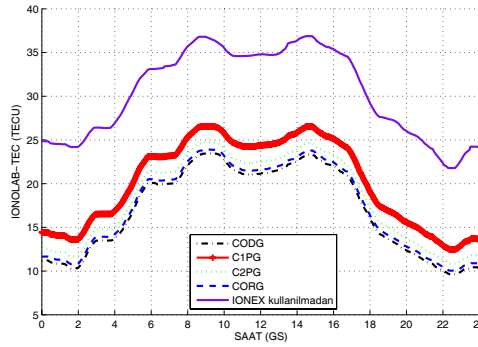


Şekil 4.9: semd istasyonu, 23 Ekim 2011, Van Depremi günü farklı uydu yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.

ilen IONOLAB-TEC değerleri, sırasıyla Şekil 5, Şekil 5, ve Şekil 5'da verilmiştir. Tüm günler ve farklı IONEX dosyalarından hesaplanan alıcı yanlılığı değerleri üzerinden yapılan karşılaştırmada, IONOLAB-TEC kestirimlerinin alıcı yanlılığındaki değişikliklere göre son derece gürbüz olarak hesaplandığı görülmüştür. IONEX-GIM TEİ değerlerine uymak için alıcı yanlılığının mut-



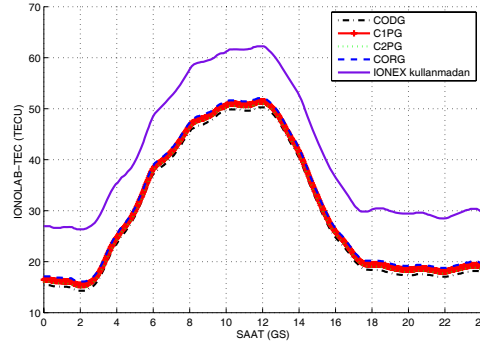
Şekil 4.10: semd istasyonu, 27 Mart 2011 sakin günü farklı IONEX dosyalarından hesaplanan alıcı yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.



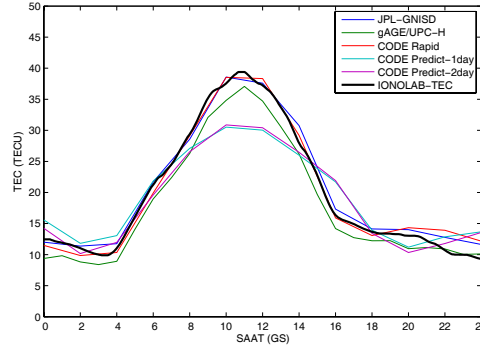
Şekil 4.11: semd istasyonu, 6 Ağustos 2011 fırtınalı günü farklı IONEX dosyalarından hesaplanan alıcı yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.

laka modele katılması gerektiği ortaya konmuştur.

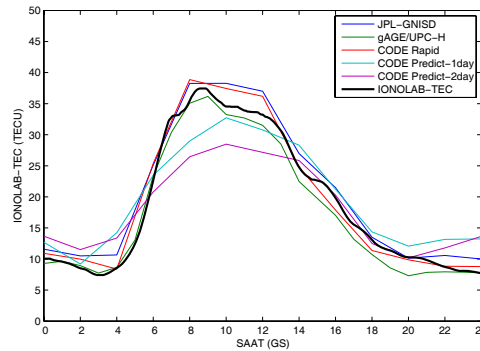
- Yakın gerçek zamanlı IONOLAB-TEC kestirimlerine örnekler tubi istasyonu 8 Ekim 2012 (Şekil 5), 8 Ekim 2012 (Şekil 5), ve 10 Ekim 2012 (Şekil 5) için verilmiştir. Şekil 5, Şekil 5, ve Şekil 5'ta görüldüğü üzere IONOLAB-TEC, IGS sitesinde var olan IONEX dosyalarını kullanarak yakın gerçek zamanda kestirim yapabilmektedir.



Şekil 4.12: semd istasyonu, 23 Ekim 2011, Van Depremi günü farklı IONEX dosyalarından hesaplanan alıcı yanlılığı bilgileriyle IONOLAB-TEC kestirimleri.



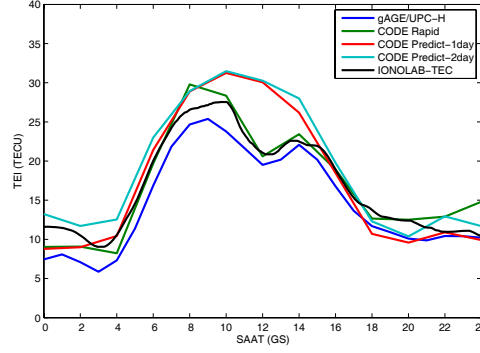
Şekil 4.13: tubi istasyonu, 8 Ekim 2012 günü IONOLAB-TEC kestirimleri ve hesaplamının yapıldığı zaman IGS sitesinde bulunan tubi koordinatları için IONEX-GIM değerleri.



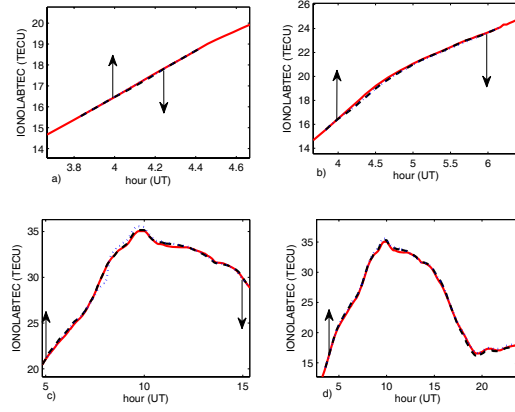
Şekil 4.14: tubi istasyonu, 9 Ekim 2012 günü IONOLAB-TEC kestirimleri ve hesaplamının yapıldığı zaman IGS sitesinde bulunan tubi koordinatları için IONEX-GIM değerleri.

6. TUSAGA-Aktif ağında, 2009-2011 yılları arasında, 150 km içinde alıcı komşuluğu olan tüm istasyonlar için Bölüm 3.2’te anlatılan STI-TEC1 ve STI-TEC2 yöntemleriyle aradeğerlemeler yapılmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak geme (Gemerek, Sivas) istasyonunun TEİ değerlerinin 56 km komşululuğunda olan akdg (Akdağmadeni, Sivas) istasyonu TEİ değerleri ile aradeğerlemesine STI-TEC1 için Şekil 6 ve STI-TEC2 için Şekil 6 verilmiştir. Bu şekillerde a) 15 dk, b) 2 sa, c) 10 sa, ve d) 20 sa kesintiler için aradeğerlemeleri göstermektedir. Özgün uzay-zaman aradeğerleme algoritmaları STI-TEC1 ve STI-TEC2’nin gerek kısa süreli gerek uzun süreli kesintilerde son derece başarılı kestirimler yaptığı ortaya konmuştur. Tüm istasyonlar için 150 km yarı çapındaki komşuluklardan bir gün önceki kestirim değerlerini kullanarak aradeğerleme katsayıları hesaplanmış ve bu değerlerin bir Gauss dağılımı ile ifade edilebileceği gösterilmiştir.
7. Bölüm 3.3’te anlatılan yöntemle yer küresel yada bölgesel W-indis haritaları çıkarılmış ve 2001 yılından bu yana önemli ionküre fırtınaları için video haline getirilmiştir. Bu videolar gerek www.ionolab.org’da videolar alt başlığında gerekse youtube sitesinde IONOLAB altında sunulmuştur. Bu haritalara bir örnek 24 Ekim 2003 günü, 0600 GS için Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’de, ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu bölgelerin 110E296 projesinde hesaplanan manyetik eşlenikleri çerçevesinde gösterilmiştir.
8. Bölüm 3.4’te anlatılan yöntemle yer küresel yada bölgesel IRI-Plas-G foF2, hmF2, TEİ haritaları çıkarılmış ve 2001 yılından bu yana önemli ionküre fırtınaları için video haline getirilmiştir. Bu videolar gerek www.ionolab.org’da videolar alt başlığında gerekse youtube sitesinde IONOLAB altında sunulmuştur. IRI-Plas-G foF2 ve hmF2 haritalarına bir örnek fırtınalı 24 Ekim 2003 günü için Şekil 8’de verilmiştir. IRI-Plas-G foF2 haritaları, IRI-Plas foF2 haritaları ile düzgelmiş fark olarak karşılaştırıldığında %8-%15 arasında değerler bulunmuştur. IRI-Plas-G hmF2 haritaları, IRI-Plas hmF2 haritaları ile karşılaştırıldığında, düzgelmiş fark %1-%2 arasındadır. Bu durum IRI-Plas programının kritik frekans değerlerine daha hassas olması nedeniyledir.

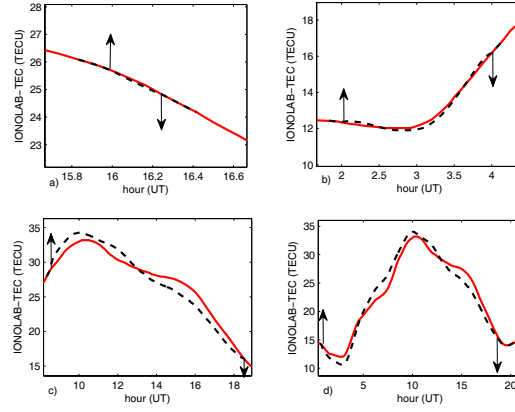
IRI-Plas-G TEİ haritalarına bir örnek fırtınalı 29 Ekim 2003, 1000 GS için Şekil 8’de verilmiştir. IRI-Plas TEİ haritaları, GIM-TEİ haritaları ile karşılaştırıldığında



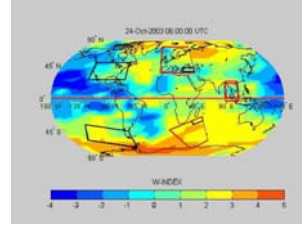
Şekil 4.15: tubi istasyonu, 10 Ekim 2012 günü IONOLAB-TEC kestirimleri ve hesaplanmanın yapıldığı zaman IGS sitesinde bulunan tubi koordinatları için IONEX-GIM değerleri.



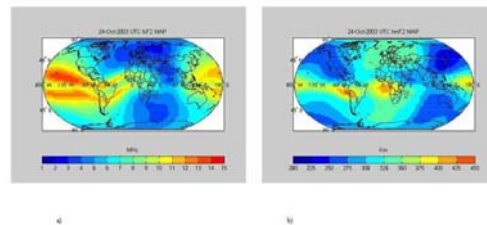
Şekil 4.16: game istasyonu, 31 Mart 2011 STI-TEC1 IONOLAB-TEC aradeğerlemeleri a) 15 dk, b) 2 sa, c) 10 sa, ve d) 20 sa.



Şekil 4.17: game istasyonu, 31 Mart 2011 STI-TEC2 IONOLAB-TEC aradeğerlemeleri a) 15 dk, b) 2 sa, c) 10 sa, ve d) 20 sa.



Şekil 4.18: 24 Ekim 2003 günü, 0600 GS için W-indis haritası; ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu bölgelerin manyetik eşlenikleri çerçevesiyle çevrilmiştir.



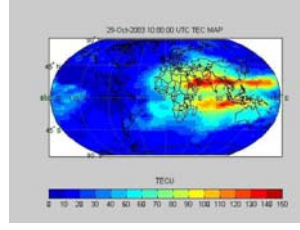
Şekil 4.19: 24 Ekim 2003 günü, a) 2200 GS için IRI-Plas-G foF2 haritası, b) 1400 GS için IRI-Plas-G hmF2 haritası.

düzgelenmiş fark %30-%45 arasındadır. Buna karşılık, IRI-Plas-G TEİ haritaları, GIM-TEİ haritaları ile karşılaştırıldığında düzgelenmiş fark %5-%8 arasındadır. Bu durum, GIM-TEİ girdisiyle, IRI-Plas-G çıktılarının GIM-TEİ değerlerine yaklaştığını göstermektedir.

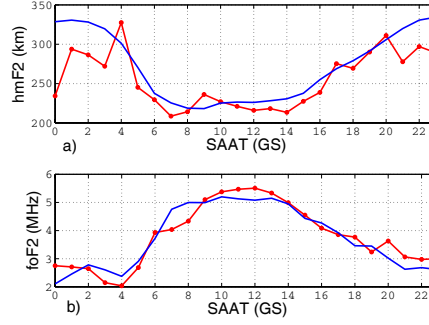
9. Bölüm 3.5 anlatılan yöntemle IRI-Plas özgün algoritma ile eniyilenerek sanal iyonosonda olarak çalıştırılmıştır. (ŞAHİN, 2011)'de ayrıntılı olarak verilen bu çalışmaya örnek olarak 15 Ekim 2008 günü, wroc (Polonya) YKS istasyonu IONOLAB-TEC kestirimleri ile eniyilenmiş IRI-Plas-Opt çıktısı foF2 ve hmF2 değerleri, 480 km uzaklıkta bulunan Juliusruh iyonosonda çıktısı foF2 ve hmF2 değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 9'de gösterildiği üzere düzgelenmiş hata, foF2 için %9, hmF2 için %12 civarındadır. Bu çalışmaya bir başka örnek, 15 Ekim 2008 günü, unpg (İtalya) YKS istasyonu IONOLAB-TEC kestirimleri ile eniyilenmiş IRI-Plas-Opt çıktısı foF2 ve hmF2 değerlerinin, 122 km uzaklıkta bulunan Roma iyonosonda çıktısı foF2 ve hmF2 değerleri ile karşılaştırılması olarak Şekil 9'de verilmiştir. Bu durumda düzgelenmiş hata, foF2 için %14, hmF2 için %12 civarındadır. Şekil 9'de 15 Ekim 2008 günü için karr (Avustralya) YKS istasyonu IONOLAB-TEC kestirimleri ile eniyilenmiş IRI-Plas-Opt çıktısı tüm parametreler gösterilmiştir. IRI-Plas-Opt, model tabanlı olduğu için ölçüm yada hesaplama nedeniyle oluşan hataları yumuşatmakta ve daha gerçekçi iyonosonda değerleri oluşturabilmektedir. Şekil 9'de 15 Ekim 2008 günü için unpg (İtalya) YKS istasyonu IONOLAB-TEC kestirimleri ile eniyilenmiş IRI-Plas-Opt çıktısı TEİ değerleri ile IONOLAB-TEC kestirimlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Bu durumda iki TEİ değeri arasındaki düzgelenmiş hata %0,005 civarındadır ve IONOLAB-TEC ile IRI-Plas-Opt çıktısı TEİ değerleri tamamen örtüşmektedir.

10. Bölüm 3.6'te anlatılan yöntemle IRI-Plas özgün algoritma ile eniyilenerek sanal iyonosonda olarak çalıştırılmış ve gerek bölgesel, gerek yerküresel IRI-Plas-Opt çıktıları elde edilmiştir. IRI-Plas-Opt foF2 haritalarına bir örnek 17 Eylül 2011 günü, 1300 GS için Şekil 10'de verilmiştir. Şekil 10'de, ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu bölgelerin 110E296 projesinde hesaplanan manyetik eşlenikleri çerçevesinde sunulmuştur.

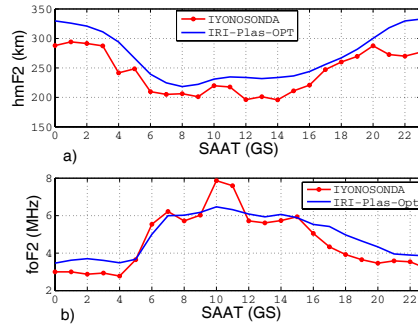
IRI-Plas-Opt hmF2 haritalarına bir örnek 25 Nisan 2011, 1100 GS için Şekil 10'de



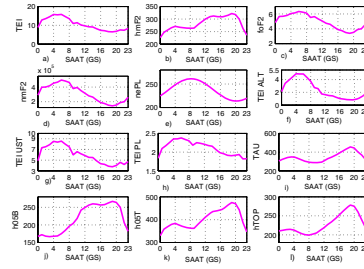
Şekil 4.20: 29 Ekim 2001, 1000 GS için IRI-Plas-G TEİ haritası.



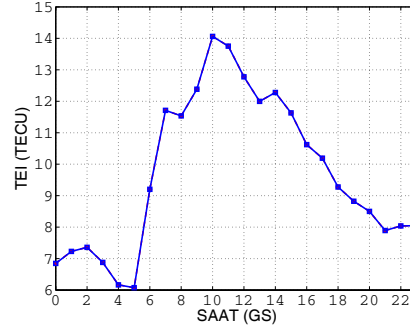
Şekil 4.21: wroc istasyonu, 15 Ekim 2008 günü için ionosonda ve IRI-Plas-Opt foF2 ve hmF2 değerleri karşılaştırması.



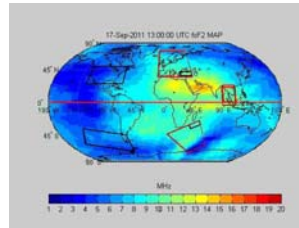
Şekil 4.22: unpg istasyonu, 15 Ekim 2008 günü için ionosonda ve IRI-Plas-Opt foF2 ve hmF2 değerleri karşılaştırması.



Şekil 4.23: karr istasyonu, 15 Ekim 2008 günü için IRI-Plas-Opt iyonküre parametreleri çıktı değerleri.

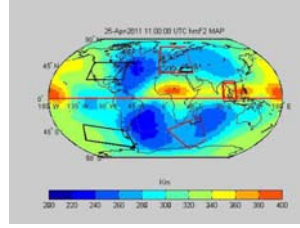


Şekil 4.24: unpg istasyonu, 15 Ekim 2008 günü için IONOLAB-TEC ve IRI-Plas-Opt TEİ değerleri karşılaştırması.



Şekil 4.25: 17 Eylül 2011 günü, 1300 GS için foF2 haritası; ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu bölgelerin manyetik eşlenikleri çerçevesi gösterilmiştir.

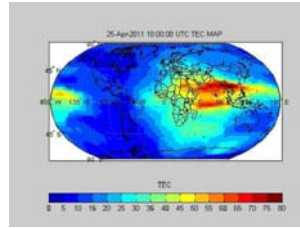
verilmiştir. Şekil 10'de, ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu



Şekil 4.26: 25 Nisan 2011, 1100 GS için hmF2 haritası; ABD, Avrupa, Türkiye ve Güneydoğu Asya bölgeleri ve bu bölgelerin manyetik eşlenikleri çerçevelenmiştir.

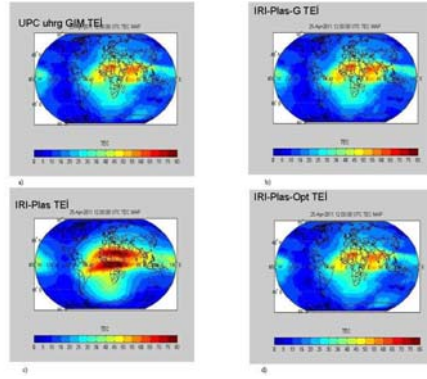
bölgelerin 110E296 projesinde hesaplanan manyetik eşlenikleri çerçevelenmiştir.

IRI-Plas-Opt TEİ haritalarına bir örnek 25 Nisan 2001, 1000 GS için Şekil 10'de verilmiştir.

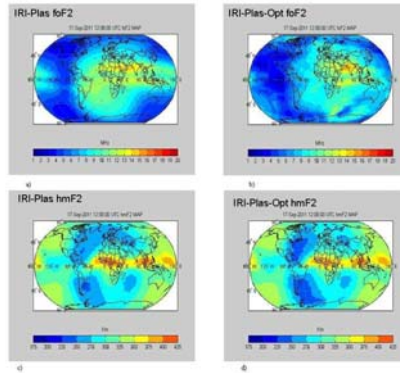


Şekil 4.27: 25 Nisan 2011, 1000 GS için IRI-Plas-Opt TEİ haritası.

Şekil 10'de, 25 Nisan 2011 günü, 1200 GS için GIM-TEİ haritalarının IRI-Plas, IRI-Plas-G, ve IRI-Plas-Opt TEİ hesaplamaları ile karşılaştırılması verilmiştir. Tüm yerküre ızgara noktaları üzerinden uhrG GIM-TEİ ile düzgelenmiş fark IRI-Plas-G TEİ için %7,5, IRI-Plas TEİ için %39, ve IRI-Plas-Opt TEİ için %0,006 olmuştur. Bu IRI-Plas-Opt algoritmasının GIM-TEİ ile verilen değerlere IRI-Plas modelini yakın gerçek zamana uyumlandırmada çok önemli bir adımdır. Şekil 10'de, fırtınalı 17 Eylül 2011 günü, 1200 GS için IRI-Plas ve IRI-Plas-Opt foF2 ve hmF2 değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Tüm yerküre ızgara noktaları üzerinden uhrG GIM-TEİ ile eniyelenmiş IRI-Plas-Opt ve IRI-Plas foF2 arasındaki düzgelenmiş fark %23; hmF2 değerleri arasındaki düzgelenmiş fark %2 olmuştur. IONOLAB grubu, bu çalışmalarlarıyla son derece önemli bir uzay havası hizmeti sunmaktadır. IRI-Plas-G foF2, hmF2, TEİ ve W-indis haritaları IONEX formatında istenilen saatler ve bölgeler için www.ionolab.org sitesinden hesaplanabilmektedir. Türkiye üzerinde



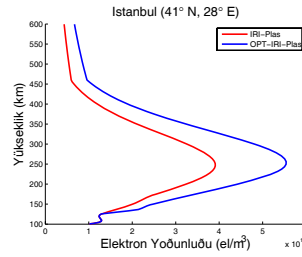
Şekil 4.28: 25 Nisan 2011, 1200 GS için TEİ haritaları, a) uhrG GIM-TEİ, b) IRI-Plas-G TEİ (%7,5), c) IRI-Plas TEİ (%39), d) IRI-Plas-Opt TEİ (%0,006).



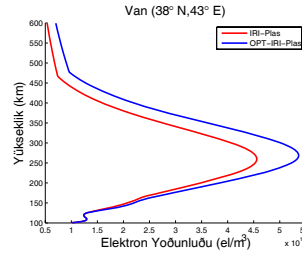
Şekil 4.29: 17 Eylül 2011, 1200 GS, a) IRI-Plas foF2, b) IRI-Plas-Opt foF2, c) IRI-Plas hmF2, d) IRI-Plas-Opt hmF2.

TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC değerleri ile bölgesel IRI-Plas-Opt cktıları elde edilmiş ve bölgesel sanal iyonosonda modelleri oluşturulmuştur.

11. Bölüm 3.7 ve Bölüm 3.8'de anlatılan yöntemlerle Türkiye zerinde IONOLAB-STEK kullanılarak tomografi calışmaları yapılmıştır. Bu zgn algoritma ile Türkiye coğrafyasında tüm konumlarda ayrıntılı modelleme calışmaları yapılabilmekte ve iyonküre bozulmaları incelenebilmektedir. Bu calışmalara örnek olarak IRI-Plas ve OPT-IRI-Plas ile elde edilen dikey elektron yoğunluğu dağılımını İştanbul ve Van için, 10 Mayıs 2009 günü ve 1000 GS'de, sırasıyla, Şekil 11 ve Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 4.30: İştanbul, 10 Mayıs 2009, 1000 GS, IRI-Plas ve OPT-IRI-Plas ile elde edilen elektron yoğunluğu dağılımını.



Şekil 4.31: Van, 10 Mayıs 2009, 1000 GS, IRI-Plas ve OPT-IRI-Plas ile elde edilen elektron yoğunluğu dağılımını.

Türkiye zerinde, 10 Mayıs 2009, 1000 GS'de OPT-IRI-Plas ile elde edilen 39⁰ enlem ve 35⁰ boylam üzerinde ykseklige göre elektron yoğunluğu dağılımları, sırasıyla, Şekil 11 ve Şekil 11'de sunulmuştur. Bu elektron yoğunluğu görüntüleri (ERTURK vd, 2009)'da anlatılan ve yerküresel görüntüleme için daha uygun olan yönteme göre son derece daha hassas ve yüksek cznrlkldr. foF2, hmF2 ve diğer iyonküre parametreleri model tabanlı OPT-IRI-Plas ile elde edilebilmektedir. Eniyileme foF2

ve hmF2 yüzeylerinin katsayıları üzerinden yapıldığı için KD kanal modelinde kullanılabilir kritik frekans ve yükseklik değerleri bu çalışma ile bulunabilmektedir.

4.2 İş Paketi 2

İş Paketi 2 için Proje Önerisindeki Tanımı ve süresi :

4.2.1 İş Paketi 2 Tanımı

- **İş Paketi 2:** HGK tarafından 2008 yılına kadar kurulan ve çalıştırılan YKS alıcısına ait Alıcı Yanlılığı, GAD, İlinti Serimi ve OYF analizlerinin tamamlanması.

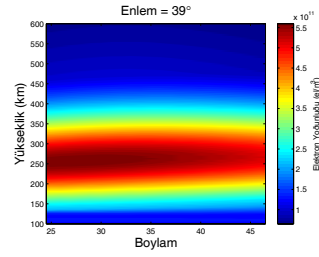
Süre: 1 - 15 ay

4.2.2 İş Paketi 2 Bulguları

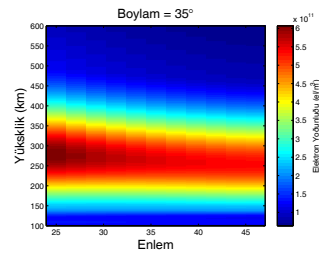
Bu işpaketi kapsamında, 105E171 nolu projede HGK tarafından Türkiye’de genelde Batı Anadolu’da konuşlanmış TUSAGA ağına ait 23 adet YKS istasyonunun GAD ve OYF kestiriminin yapılması öngörülmüştür. Proje süresi içinde TUSAGA-Aktif ağı 2009-2011 yılları arası analizler yapılmış ve bir veri tabanı hazırlanmıştır. Veri tabanına istasyon, yıl, saat, OYF dağılımı, OYF parametreleri, OYF ortalama ve standart sapmaları, Düzgelenmiş Deneysel Dağılıma göre SKLD değerleri ve GAD süreleri yazılmıştır. Ayrıca OYF ve GAD analiz programı veri üzerinden otomatik çalışır hale getirilmiş ve İONOLAB grubuna sunulmuştur. Proje süresince yapılan çalışmalar (ARIKAN vd, 2010), (SAYIN vd, 2009;2010), (TÜREL ve ARIKAN, 2010), (KÖROĞLU vd, 2010) ve (KÖROĞLU, 2012) bildiri ve tezlerinde verilmiştir. Bu iş paketinde Işıltan Sayın ve Ozan Köroğlu, Prof. Dr. Feza Arıkan ile çalışmıştır. Ozan Köroğlu YL tezini tamamlamıştır (KÖROĞLU, 2012). İş Paketi 2’nin uygulaması ve genel sonuçları aşağıda listelenmiştir.

1. 2001-2011 yılları arasında doluluk oranı %60’tan büyük istasyonlara (TÜREL, 2008) ve (TÜREL ve ARIKAN, 2010)’da ayrıntılandırılan OYF kestirim yöntemi uygulanmıştır. Düzgelenmiş Deneysel Dağılımlara (DDD) ve OYF kestirimlerine örnek olarak tubi istasyonu, 2006 yılı 0000-1200 Greenwich Saati (GS) arası Şekil 4.34’de; istn istasyonu, 2011 yılı 1200-2400 GS arası Şekil 4.35’de gösterilmiştir.

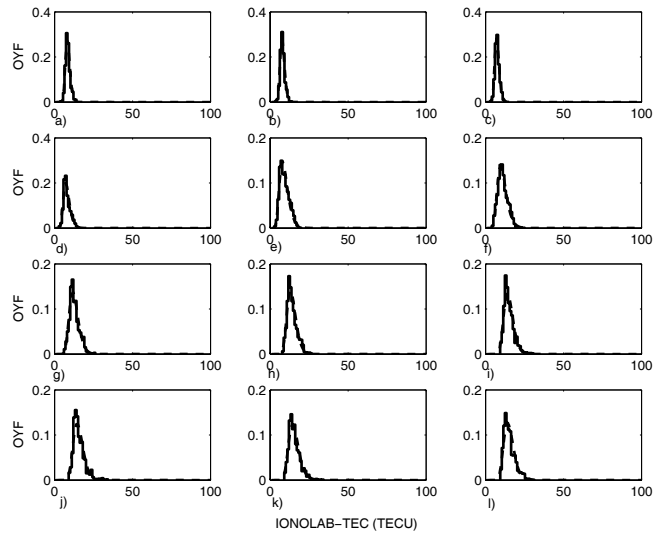
Türkiye ve KKTC istasyonlarının tüm yıllar ve tüm saatler için OYF kestirimleri Lognormal ve Weibull olarak bulunmuştur. GLSnin arttığı yıllarda dağılımlarda TEİ



Şekil 4.32: 10 Mayıs 2009, 1000 GS, OPT-IRI-Plas ile elde edilen 39° enlem için boylama ve yüksekliğe göre elektron yoğunluğu dağılımı.



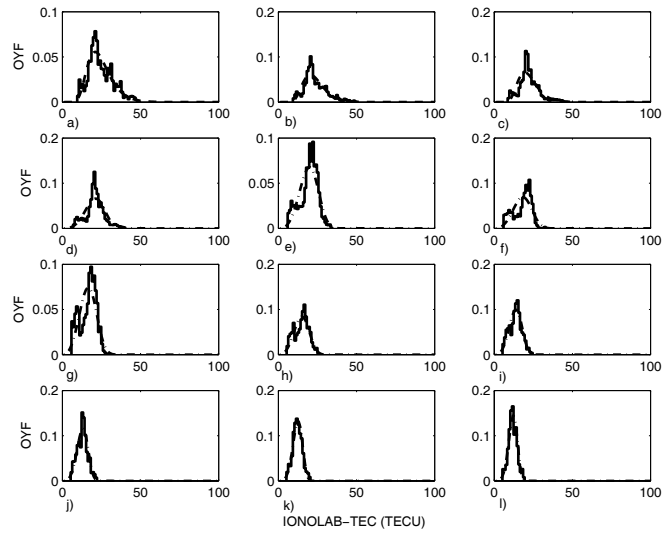
Şekil 4.33: 10 Mayıs 2009, 1000 GS, OPT-IRI-Plas ile elde edilen 35° boylam için enleme ve yüksekliğe göre elektron yoğunluğu dağılımı.



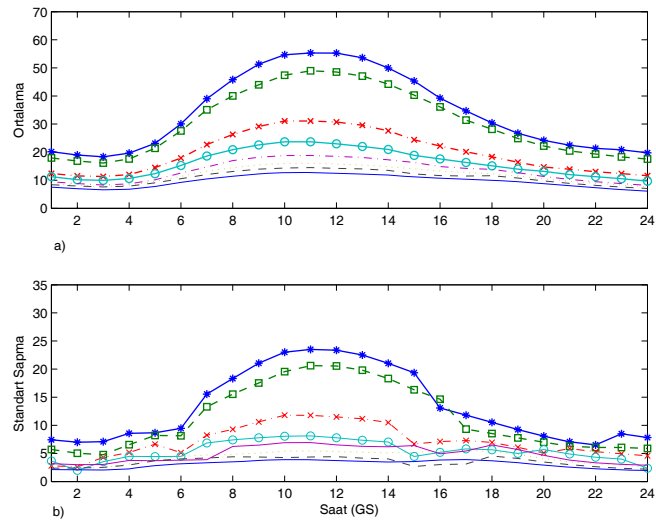
Şekil 4.34: tubi istasyonu 2006 yılı OYF (düz çizgi) ve DDD (kesikli çizgi) a) 0000-0100 GS, b) 0100-0200 GS, c) 0200-0300 GS, d) 0300-0400 GS, e) 0400-0500 GS, f) 0500-0600 GS, g) 0600-0700 GS, h) 0700-0800 GS, i) 0800-0900 GS, j) 0900-1000 GS, k) 1000-1100 GS, l) 1100-1200 GS.

değerleri farkı çok olduğu için Weibull dağılımı özellikle güneş doğuşu ve batışı saatlerinde görülmektedir. GLS sayısının azaldığı yıllarda Weibull dağılımı azalmakta ve sadece değişkenliğin genliğinin arttığı saatlerde görülmektedir. GLS sayısının en aza indiği 2006 yılında ise neredeyse tümüyle Lognormal dağılım eniyi OYF olarak belirlenmiştir. GLSnin seçilmiş OYFnin ortalama ve standart sapma değerlerine etkisi Şekil 4.36'da gösterilmektedir. Şekil 4.36'da en yüksek ortalama ve standart sapma değerleri 2001 yılındadır. Ortalama ve standart sapma değerleri azalan GLS ile azalmakta ve 2006-2007 yıllarında en alt düzeye inmektedir.

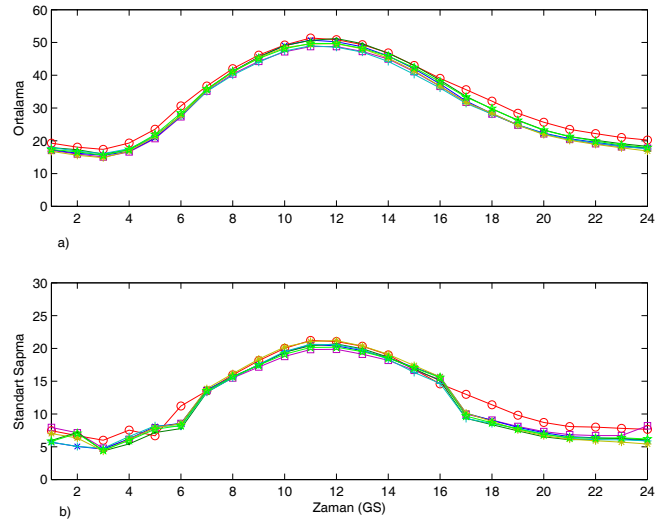
2. Türkiye ve KKTC için boylamda 25°-45°D ve enlemde 34°-43°K ile tanımlanan coğrafya, 28 adet boylamda 3°, enlemde 2°'lik ızgara ile bölünmüştür. Bölgeler Şekil 3.8'te verildiği üzere enlemde yaklaşık 220 km, boylamda ise 270 km'lik alanlar kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Temsilci OYF bölge içinde bulunan istasyonların yerine kullanılacak, istasyonlar için ortak OYF olarak tanımlanmıştır. Temsilci OYF seçimi için bölge içindeki istasyonlardan elde edilen tüm saatlik ortalamaların hepsine en yakın ortalama değere sahip istasyon seçilmiştir. Bölge içindeki tüm istasyonların ortalama değerlerin ortalama süzgeçten geçirilmiştir. Bulunan ortalama ile bölge içindeki her istasyon arasındaki SKLD mesafesi hesaplanarak, SKLD mesafesi en az olan istasyon temsilci olarak seçilmiştir. Bölgesel dağılımlara örnek olarak B2 bölgesinde 2001 yılında TUSAGA istasyonları badt, dumt, kant, kart, tubi, ucg2, ulut için ortalama ve standart sapma değerleri Şekil 4.37'de verilmiştir. Bu bölgeden 2001 yılında temsilci OYF olarak seçilen istasyon ulut olarak belirlenmiştir. Bir başka örnek olarak, B19 bölgesinde 2011 yılında TUSAGA-Aktif istasyonları klis, sive, surf, ante için ortalama ve standart sapma değerleri Şekil 4.38'de verilmiştir. Bu bölgeden 2011 yılında temsilci OYF olarak seçilen istasyon ante olarak belirlenmiştir.
3. (KÖROĞLU, 2012)'da ayrıntılandırılan ve Bölüm 3.9'te tanıtılan Kayan Pencere İstatistiksel Analiz (KAPA) yöntemi TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağlarında bulunan istasyonlara uygulanmıştır. GAD süresi eniyi kayan pencere boyu N_w ile belirlendiği için her istasyonda, her günde ve her saat aralığında $N_w = 1, 3, 5, 7, 9, 11$ olarak değiştirilmiş ve artık hata oranları hesaplanmıştır. İONOLAB-TEC kestirimleri 2,5 dk aralıklarla elde edildiği için kayan pencere süreleri dakika olarak N_w (dk)=



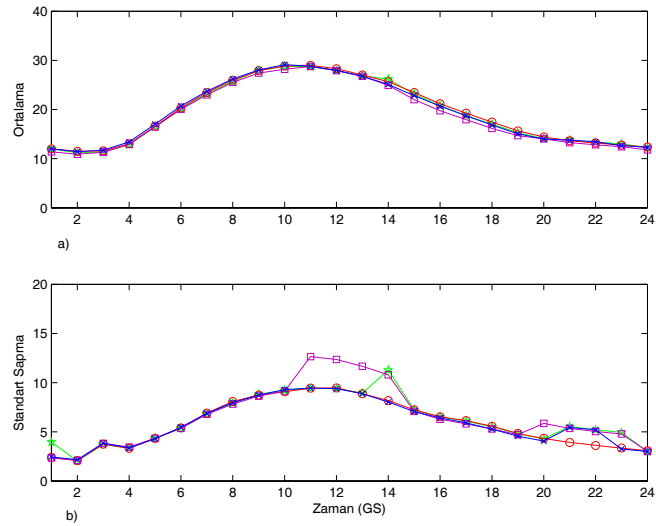
Şekil 4.35: istn istasyonu 2011 yılı OYF (düz çizgi) ve DDD (kesikli çizgi) a) 1200-1300 GS, b) 1300-1400 GS, c) 1400-1500 GS, d) 1500-1600 GS, e) 1600-1700 GS, f) 1700-1800 GS, g) 1800-1900 GS, h) 1900-2000 GS, i) 2000-2100 GS, j) 2100-2200 GS, k) 2200-2300 GS, l) 2300-2400 GS.



Şekil 4.36: 2001-2008 yılları arası tubi istasyonu için a) ortalama b) standart sapma değerleri; 2001 (*), 2002 (kare), 2003 (X), 2004 (0), 2005 (-.), 2006 (.), 2007 (-), 2008 (düz çizgi).

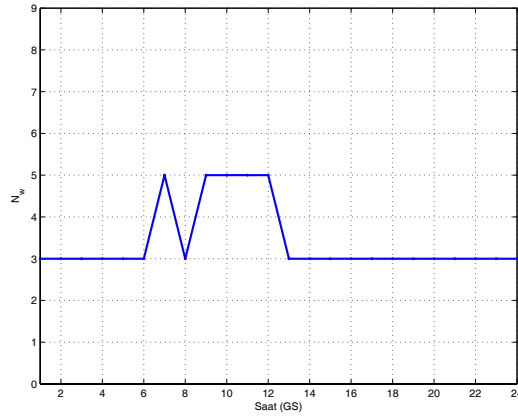


Şekil 4.37: B2 bölgesinde 2001 yılında yer alan TUSAGA istasyonlarının a) ortalama b) standart sapma değerleri, badt (0), dumt (kare), kant (X), kart (.), tubi (+), ucg2 (*), ulut (yıldız).



Şekil 4.38: B19 bölgesinde 2011 yılında yer alan TUSAGA-Aktif istasyonlarının a) ortalama b) standart sapma değerleri, klis (0), sive (kare), surf (X), ante (yıldız).

[2,5 7,5 12,5, 17,5 22,5 27,5] dk olmaktadır. Bu incelemelerin sonucunda 2001-2011 yılları arasında tüm istasyonlar için eniyi GAD süresi olan N_w 2,5 dk ile 12,5 dk arasında bulunmuştur. Bu GAD sürelerinden 2,5 dk çok seyrek görülmüştür. Örnek olarak tubi istasyonu 2001 yılında 348 gün \times 24 saat = 8352 saat için GAD süresi kestirimi yapılmıştır. Bunlardan 27 adet saat için 2,5 dk, 5451 adet saatte 7,5 dk ve 2674 saatte 12,5 dk olarak kestirilmiştir. Dolayısıyla ortanca N_w olarak 7,5 dk seçilmiştir. tubi istasyonu fırtınalı 31 Mart 2001 günü saatçi kestirilen GAD süreleri Şekil 4.39'de N_w cinsinden verilmiştir. 31 Mart 2001, bozulmalı ve GLSnin yüksek



Şekil 4.39: tubi istasyonu 31 Mart 2001 GAD süresi.

değerlere sahip olduğu bir gündür. Bu gün için kayan pencere boyutlarının 2,5 dk ile 12,5 dk arasında değiştiği gözlenmiştir. Tüm istasyonlar, tüm yıllar ve tüm saatler üzerinden kayan pencere boyutunun ortanca değeri 7,5 dk olarak seçilmiştir.

4. Türkiye'de TEİ harita güncelleme aralığı, fırtınalı günlerde 5 dk, sakin günlerde ve saatlerde 10 dk olarak belirlenmiştir.

4.3 İş Paketi 3

İş Paketi 3 için Proje Önerisindeki Tanımı ve süresi :

4.3.1 İş Paketi 3 Tanımı

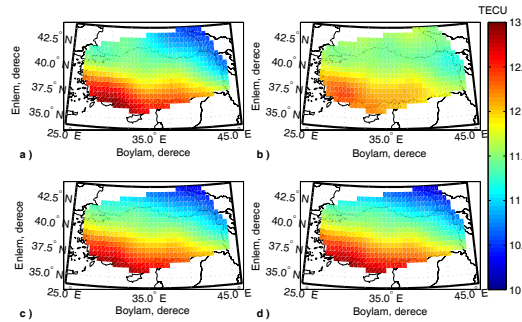
- **İş Paketi 3:** Yönlü Krigleme tekniğinin geliştirilmesi ve bölgesel TEİ aradeğerlemesine uygulanması.

Süre: 1 - 15 ay

4.3.2 İş Paketi 3 Bulguları

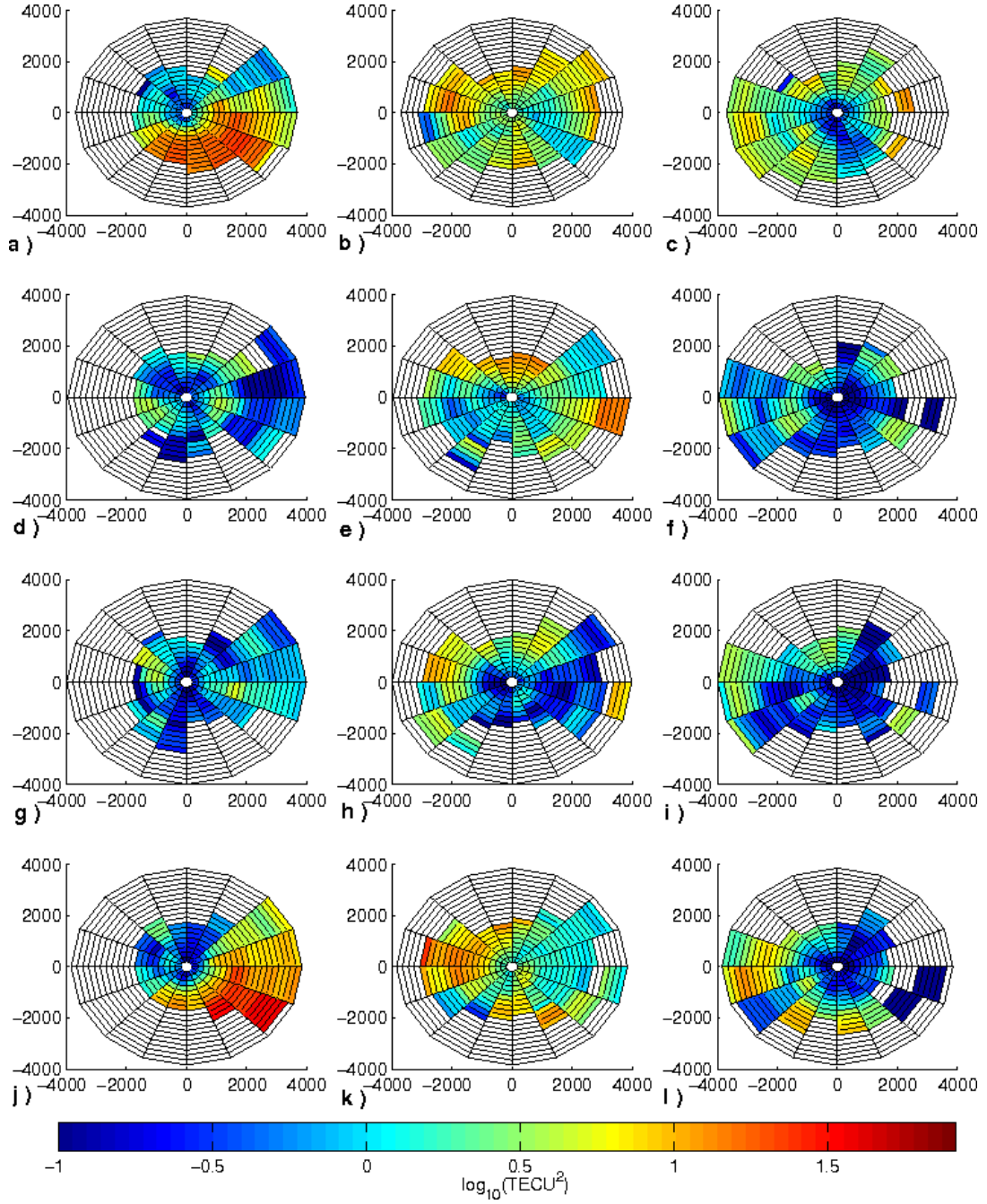
Bu iş paketinde 105E171 projesinde yapılan analizler temel alınarak her konum için kestirilen TEİ değerlerinin, konumda enlem ve boylama göre yüksek çözünürlükte yön bağımsız Ortalamasız Krigleme ve Evrensel Krigleme ile haritalanması ve literatürde ilk kez yön bağımlı Krigleme tekniğinin TEİ haritalamasına uygulaması öngörülmüştür. Bu iş paketinde bursiyerler Hasan Hüseyin Özbenli, Işıltan Sayın ve doktora öğrencisi Hakan Tuna çalışmışlardır. İş paketi 3 sonuçları ile ilgili bir makale hazırlanmaktadır. Aralık 2012’de sunulması planlanmaktadır. Bu iş paketinde Bölüm 3.10’da anahatları verilen çalışmaların sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

1. Bölüm 3.10.1’da listelenen adımlarla sentetik yönbağımlı yüzeyler üzerinden yarıdeğişinti fonksiyonu incelenmiş ve III. Ara Dönem Gelişme raporunda anlatıldığı üzere yönseme değişikliği gösteren yüzeylerde örnekleme sayısından bağımsız olarak yön bağımsız yarıdeğişinti seriminin bu değişikliği belirleyemediği gözlenmiştir.
2. Yönbağımlı yüzeylerin haritalanması için uygun yönlü Krigleme yöntemlerinin TEİ aradeğerlemesi için uyarlanması ve yarıdeğişinti serimin yönbağımlı olarak hesaplanması gerektiği bulunmuştur.
3. Yönlü Krigleme tekniklerinin uygulaması incelemiş ve Türkiye üzerinde Bölüm 3.10.2’de anlatılan OK ve EKDY yöntemleri için enlemde ve boylamda 0,5° çözünürlükte TEİ kestirim haritaları elde edilmiş ve YDS analizleri yapılmıştır. Kriglemelerin uygulamasına örnek olarak Şekil 3’de 4 Temmuz 2009 günü için 1200 GS’de OK1, OK2, OK3, ve EKDY ile elde edilen Krigleme TEİ haritaları sunulmuştur. Bu yöntemlerden OK1 ve EKDY’nin en az hata değişikliği verdiği



Şekil 4.40: 4 Temmuz 2009 TEİ haritaları, 1200 GS; a) OK1, b) OK2, c) OK3, d) EKDY.

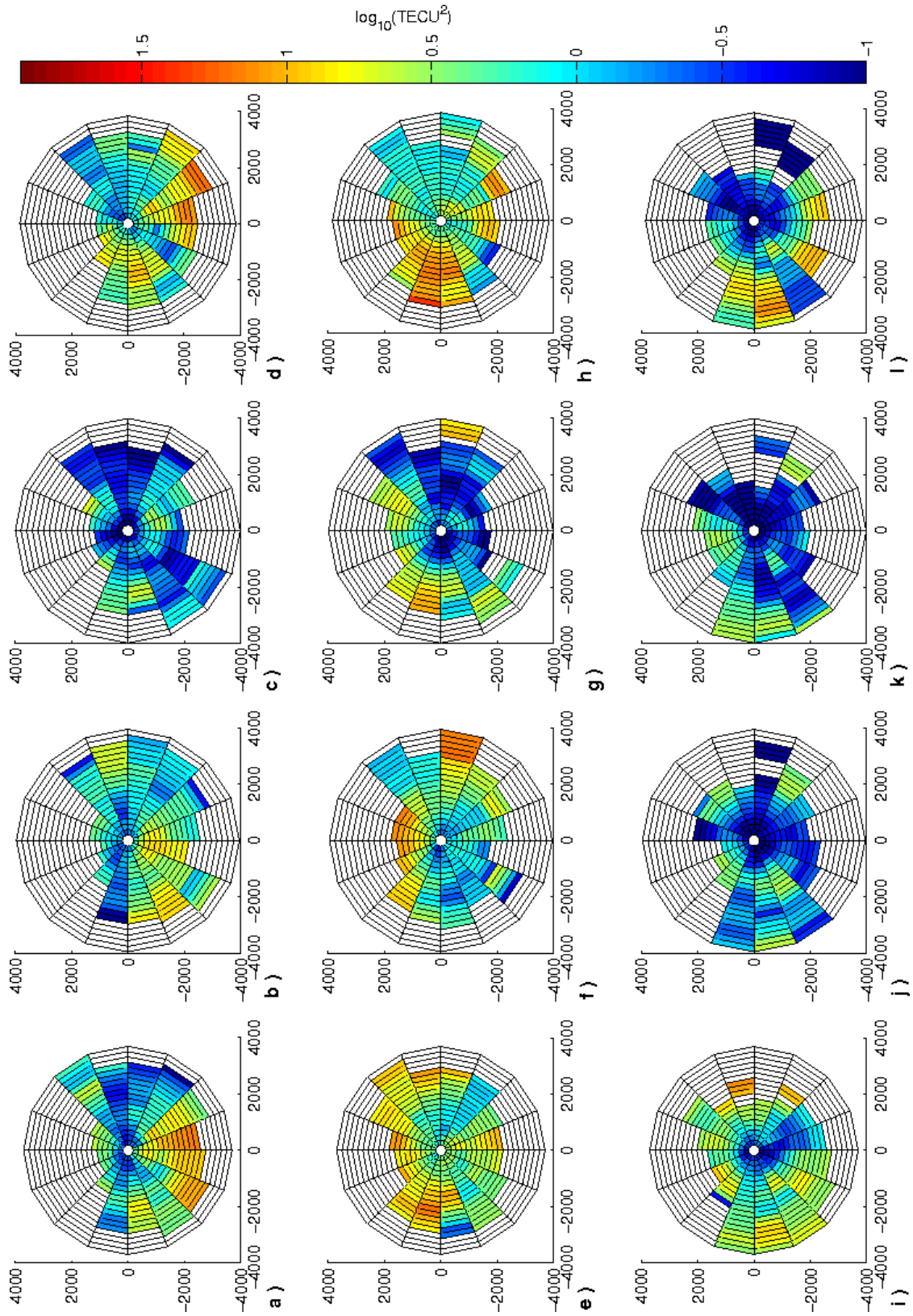
gözlenmiştir. Türkiye üzerinde nokta çiftleri sayısı YDS yönlülüğünü her durumda yansıtamadığı için MIT Madrigal veritabanından sağlanan TEİ ölçümlerine uygulanmıştır. Çalışma bölgesi olarak fazla sayıda ve sık ölçüm noktasına sahip olan Kuzey Amerika bölgesi seçilmiştir. Yön bağımlı bölgesel YDS kestirimi, Şekil 3.12 ile gösterilen dairelerin etrafında hesaplandığında dairelerin etrafındaki YDS haritaları dairelerin konumlarına ve zamana göre değişmektedir. Şekil 4.41, çalışma bölgesinin batısında (Şekil 4.41a, Şekil 4.41d, Şekil 4.41g, Şekil 4.41j), ortasında (Şekil 4.41b, Şekil 4.41e, Şekil 4.41h, Şekil 4.41k) ve doğusunda (Şekil 4.41c, Şekil 4.41f, Şekil 4.41i, Şekil 4.41l) bulunan daireler etrafında; 2000 YS (Şekil 4.41a, Şekil 4.41b, Şekil 4.41c), 0300 YS (Şekil 4.41d, Şekil 4.41e, Şekil 4.41f), 0700 YS (Şekil 4.41g, Şekil 4.41h, Şekil 4.41i) ve 1400 YS'de (Şekil 4.41d, Şekil 4.41e, Şekil 4.41f) elde edilen yön bağımlı bölgesel YDS kestirimlerini göstermektedir. Şekil 4.41a, b ve c incelendiğinde batı, orta ve doğuda hesaplanan YDS haritalarının belirli bir yön için farklı YDS kestirimleri verdiği gözlenmektedir. Örneğin $\theta = 292.5^\circ$ yönü için, 0200 GS'de (2000 YS), batıda hesaplanan YDS kestirimleri yaklaşık olarak $1.5 \log_{10}(\text{TECU}^2)$ değerindeyken, ortadaki YDS kestirimleri 0.5 ile $1 \log_{10}(\text{TECU}^2)$ arasında, doğudaki kestirimler ise -0.5 ile $0 \log_{10}(\text{TECU}^2)$ değerlerinde değişmektedir. Buna benzer özellikte farklılıklar diğer saatler içinde gözlenmektedir. Şekil 4.42, çalışma bölgesinin kuzeyinde (Şekil 4.42a, Şekil 4.42b, Şekil 4.42c, Şekil 4.42d), ortasında (Şekil 4.42e, Şekil 4.42f, Şekil 4.42g, Şekil 4.42h) ve güneyinde (Şekil 4.42i, Şekil 4.42j, Şekil 4.42k, Şekil 4.42l) bulunan daireler etrafında; 2000 YS (Şekil 4.42a, Şekil 4.42e, Şekil 4.42i), 0300 YS (Şekil 4.42b, Şekil 4.42f, Şekil 4.42j), 0700 YS (Şekil 4.42c, Şekil 4.42g, Şekil 4.42k) ve 1400 YS'de (Şekil 4.42d, Şekil 4.42h, Şekil 4.42l) elde edilen yön bağımlı bölgesel YDS kestirimlerini göstermektedir. Şekil 4.42a, e ve i incelendiğinde, kuzey, orta ve güneyde hesaplanan YDS haritaları belirli bir yön için farklı değerlerde YDS kestirimleri vermektedir. Örneğin $\theta = 292.5^\circ$ yönü için, 0200 GS'de (2000 YS), kuzey daire merkez alınarak hesaplanan YDS kestirimi $1 \log_{10}(\text{TECU}^2)$ civarında, orta daire merkez alınarak hesaplanan YDS kestirimi $0.75 \log_{10}(\text{TECU}^2)$ civarında, güney dairesi merkez alınarak hesaplanan YDS kestirimi -0.5 ile $0 \log_{10}(\text{TECU}^2)$ değerleri arasındadır. Diğer saatlerde hesaplanan YDS haritalarında da kuzey, orta ve güneyde bulunan daireler etrafında hesaplanan YDS kestirimleri belirli bir yön



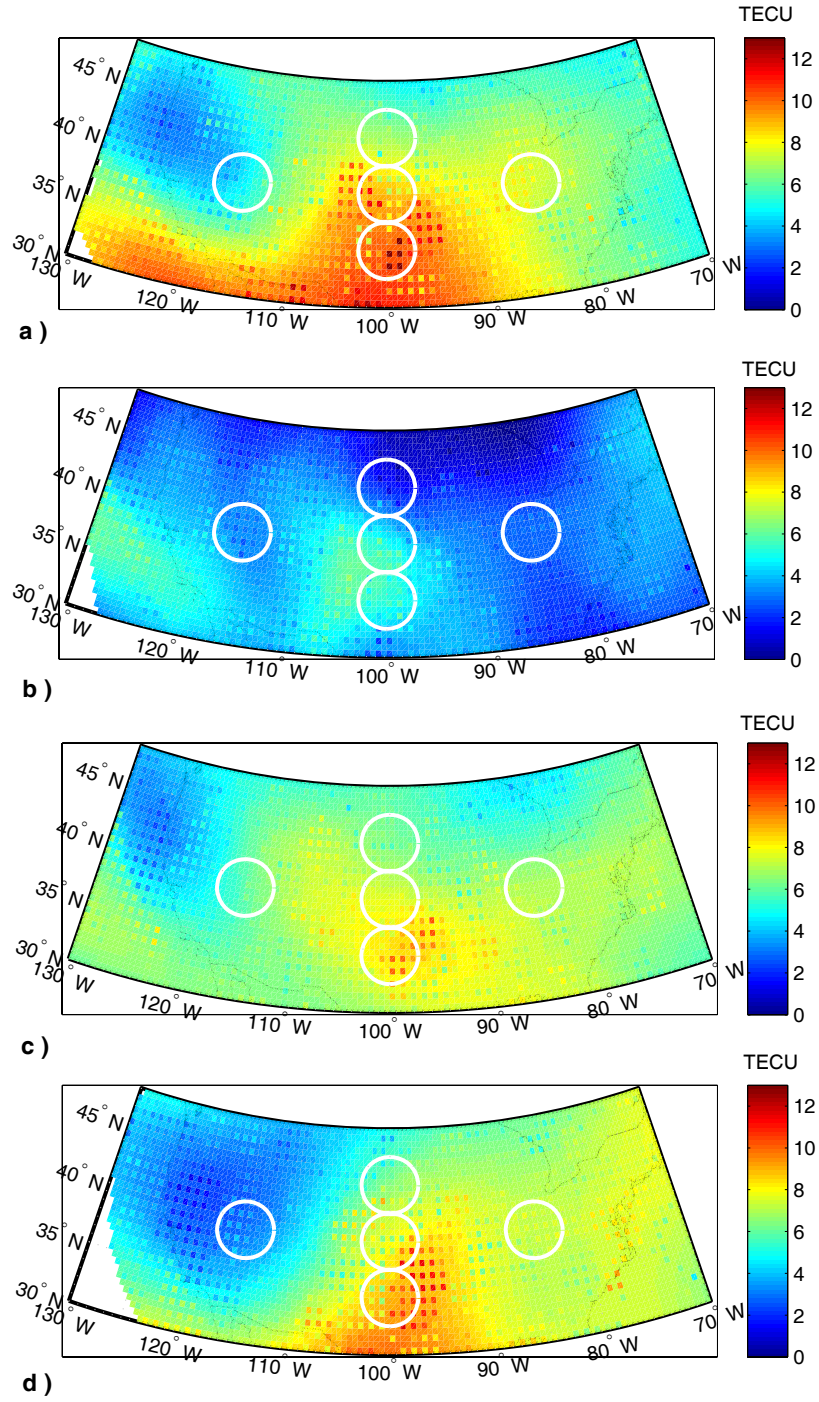
Şekil 4.41: 15 Temmuz 2009’da, bölgenin batı, orta ve doğusundaki dairelerin etrafında elde edilen YDS haritaları.

için farklı şekilde değişebilmektedir. 15 Temmuz 2009 günü için çeşitli saatlerde, kaba hataların süzüldüğü MIT Madrigal TEİ verileri kullanılarak yön bağımlı bölgesel YDS kestirilmiştir. YDS kestirimleri gün boyunca 5 dakikada bir elde edilebilmektedir. Şekil 4.43 Kuzey Amerika bölgesi üzerinde çeşitli saatlerdeki TEİ dağılımını göstermektedir. Beyaz çemberler bölgesel YDS kestirimlerinde kullanılan dairelerin sınırlarıdır. Daireler bölgenin orta, kuzey, güney, doğu ve batısına yerleştirilmiştir. Şekil 4.43a 15 Temmuz 2009 0200 GS'de, Şekil 4.43b 15 Temmuz 2009 1000 GS'de, Şekil 4.43c 15 Temmuz 2009 1400 GS'de ve Şekil 4.43d, 15 Temmuz 2009 2100 GS'de elde edilmiştir. Yaklaşık olarak yedi saatlik bir zaman farkı olduğu düşünüldüğünde, yerel saatte (YS), Şekil 4.43a akşam saatlerine (2000 YS), Şekil 4.43b gece saatlerine (0300 YS), Şekil 4.43c sabah saatlerine (0700 YS), Şekil 4.43d öğlen saatlerine (1400 YS) karşılık gelmektedir.

4. Yukarıda özetlenen çalışmalar, STEC değerlerinin yönbağımlılığın incelenmesinde önemini ortaya koymuştur. YKS alıcılarından her alıcı, her uydu ve her ölçüm anında hesaplanan IONOLAB-STEÇ ve IRI-Plas programından geliştirilerek oluşturulan, Bölüm 3.7'te anlatılan IRI-Plas-STEÇ değerleri karşılaştırılmıştır. III. ve IV. Ara Dönem Gelişme Raporlarında ve eklerinde tartışılan bu yazılım ile Türkiye üzerinde yönbağımlılığın Şekil 3.13b'de gösterilen α ve β açılarına göre değişimi irdelenmiştir. Bu çalışmalara bir örnek olarak, Şekil 4.44a'da 20 Ocak 2009 ve Şekil 4.44b'de 21 Haziran 2009 günleri için 0400 GS'de Türkiye üzerinde, enlem ve boylamda $1^0 \times 1^0$ çözünürlüğünde IRI-Plas TEİ haritaları verilmiştir. Şekil 4.44c'de 20 Ocak 2009 ve Şekil 4.44d'de 21 Haziran 2009 günleri için 0400 GS'de α ve β açılarına göre IRI-Plas-STEÇ değişimi gösterilmektedir. 0400 GS, yerel saate göre 0600 YS'ye karşı geldiği için şafak saatlerinde güneşin doğuşunun yönsel etkisi açıkça görülmektedir. Bu durum kış ve yaz aylarına göre farklılaşmakta ve α ve β açılarına göre değişmektedir. YKS uydusunun 60^0 üzerinde olduğu durumda yönbağımlılığın etkisi ihmal edilebilir düzeydedir ve değişimler 2 TECU değerinin altındadır. Şekil 4.45a'da 20 Ocak 2009 ve Şekil 4.45b'de 21 Haziran 2009 günleri için 1600 GS'de Türkiye üzerinde, enlem ve boylamda $1^0 \times 1^0$ çözünürlüğünde IRI-Plas TEİ haritaları verilmiştir. Şekil 4.45c'de 20 Ocak 2009 ve Şekil 4.45d'de 21 Haziran 2009 günleri için 1600 GS'de α ve β açılarına göre IRI-Plas-STEÇ değişimi gösterilmektedir. 1600 GS, yerel saate göre 1800 YS'ye karşı geldiği için akşam saatlerinde güneşin batışının yönsel etk-



Şekil 4.42: 15 Temmuz 2009’da, bölgenin kuzey, orta ve güneyindeki dairelerin etrafında elde edilen YDS haritaları.



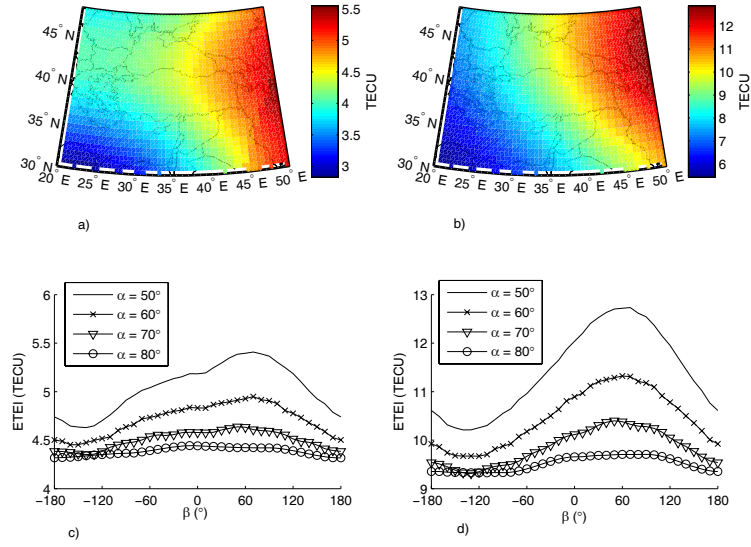
Şekil 4.43: 15 Temmuz 2009 günü OK1 ile hazırlanan Kuzey Amerika TEİ haritaları.

isi açıkça görülmektedir. Bu durum kış ve yaz aylarına göre farklılaşmakta ve α ve β açılara göre değişmektedir. YKS uydusunun 60° üzerinde olduğu durumda yönbağımlılığın etkisi ihmal edilebilir düzeydedir ve değişimler 2 TECU değerinin altındadır. Türkiye üzerinde Bölüm 4.1.1 ve Bölüm 2.3'ta tanımlanan HF-PRE ile elde edilen hmF2 değerleri yarım güneş döngüsünde 250-350 km arasında değişmektedir. α açısının 60° üzerinde olduğu durumda, bu yerel olarak 150 km içinde iyonkürenin yönbağımsız olduğu söylenebilir. Benzer bir sınır, gerek uzay-zaman aradeğerlemesi STI-TEC1 (ARIKAN, 2012b), (DEVIREN, 2012b-c) ve deprem sinyali analizlerinde (KARATAY, 2010) ortaya konmuştur.

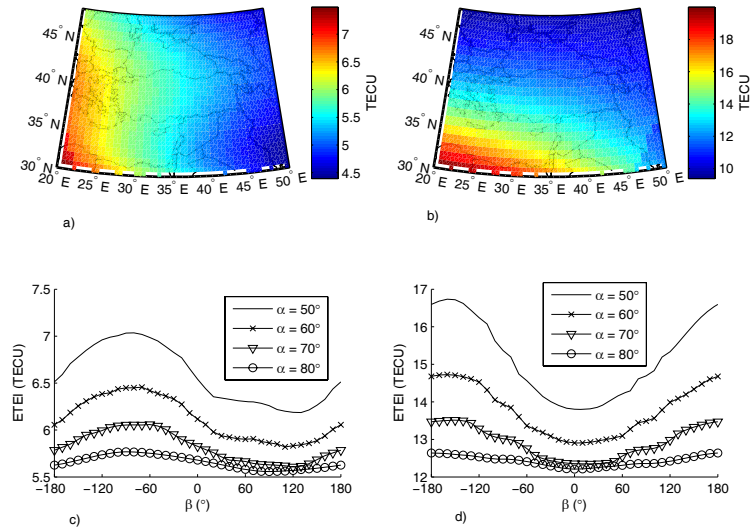
5. Bu incelemelerin ve Bölüm 3.11.1'de tartışılan yöntemin izlenmesi sonucunda Türkiye üzerinde doğrusal bir yönseme olduğu ve parametrelerin PSO ile belirlenebileceği irdelenmiştir. Şekil 4.46'de gürültüsüz yerküresel çift çekirdekli Gauss yüzeyi üretilmiştir, ve yönseme fonksiyonun Türkiye üstündeki değerleri b)'de gösterilmiştir. Üç farklı yönseme fonksiyonu için PSO koşturulmuştur. Her yönseme tipi için koşturulan PSO sonucunda elde edilen parametre değerleri kullanılarak yüzey yeniden üretilmiş ve Türkiye bölgesindeki değerler c),e) ve d)'de gösterilmiştir. Her yönseme için geriçatma hataları çıkarılmış ve çift çekirdekli Gauss yönsemesinden doğrusal yönsemeye doğru artan bir hata gözlenmiştir. Doğrusal yüzeyin düzgelenmiş geriçatma hatası diğer yüzeylerden daha fazla olmasına karşılık orta enlem bölgeleri için geriçatma ve haritalamada hesaplama karmaşıklığını azaltması bakımından öne çıktığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, Türkiye üzerinde yönseme doğrusal yüzey olarak seçilmiştir.
6. Doğrusal yönseme için parametreler PSO ile belirlenmiştir. Şekil 4.47'de 28 Mart 2011 günü için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC değerlerinden PSO ile belirlenen Eş. 3.20'te tanımlanan doğrusal yönseme parametreleri verilmiştir. Bu parametreler incelendiğinde a_{21} parametresinin TEİ değişiminin günlük düzeyini yansıttığı, a_{22} ve a_{23} parametrelerinin TEİ'nin gün içerisinde yönbağımlılığını gösterdiği belirlenmiştir.

4.4 İş Paketi 4

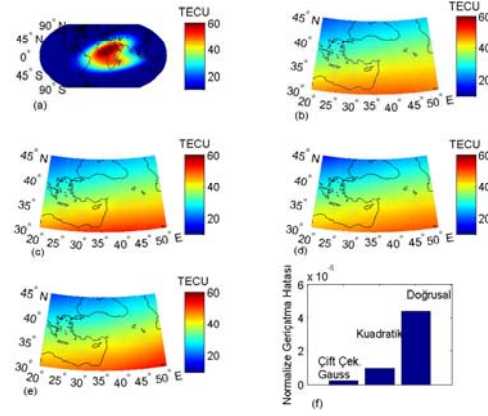
İş Paketi 4 için Proje Önerisindeki Tanımı ve süresi :



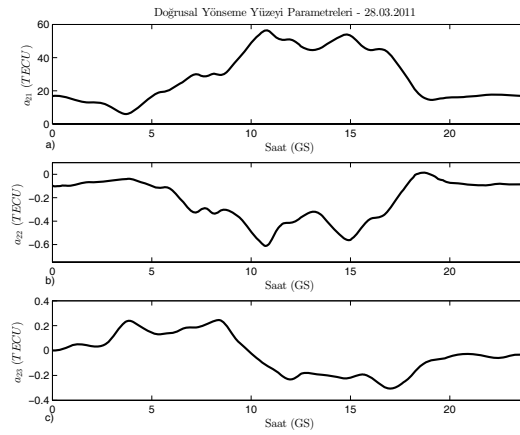
Şekil 4.44: Türkiye üzerinde 0400 GS'de a) 20 Ocak 2009 için IRI-Plas-STECH, b) 21 Haziran 2009 için IRI-Plas-STECH, c) 20 Ocak 2009 için α ve β açlarına göre değişim, d) 21 Haziran 2009 için α ve β açlarına göre değişim.



Şekil 4.45: Türkiye üzerinde 1600 GS'de a) 20 Ocak 2009 için IRI-Plas-STECH, b) 21 Haziran 2009 için IRI-Plas-STECH, c) 20 Ocak 2009 için α ve β açlarına göre değişim, d) 21 Haziran 2009 için α ve β açlarına göre değişim.



Şekil 4.46: Bölgesel PSO uygulaması a) çift çekirdekli Gauss (ÇÇG), b) ÇÇG'nin Türkiye bölgesindeki dağılımı, c) μ_6 model kestirimi, d) μ_3 model kestirimi, e) μ_2 model kestirimi, f) düzelenmiş geriçatma hataları



Şekil 4.47: 28 Mart 2011 günü için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC değerlerinden PSO ile belirlenen doğrusal yönsene parametreleri, a) a_{21} , b) a_{22} , c) a_{23} .

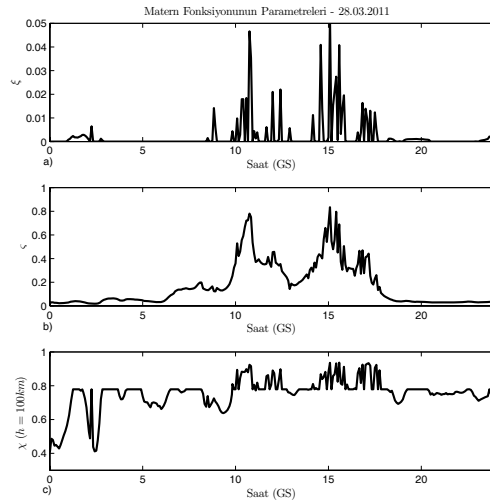
4.4.1 İş Paketi 4 Tanımı

- **İş Paketi 4:** Yarıdeğişinti serimi teorik modelinin ve parametrelerinin belirlenmesi ve optimizasyonu.

Süre: 7 - 19 ay

4.4.2 İş Paketi 4 Bulguları

İş Paketi 4 kapsamında yarıdeğişinti seriminin yönsel ve mesafeye bağlı değişimini parametrik şekilde tanımlayabilen bir model geliştirilmesi; Geliştirilen bu modelin parametrelerinin Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ile TEİ istasyon ölçümlerine göre belirlenmesinin sağlanması öngörülmüştür. Bu iş paketinde bursiyer öğrencilerden Işıltan Sayın, Yunus Engin Gökdağ ve Muhammet Necat Deviren çalışmışlardır. (TOKER vd, 2012) ve (GOKDAG vd, 2012) bildirimlerinde yapılan çalışmalar tartışılmıştır. Bölüm 3.11.2’de anlatılan yöntem ile Türkiye üzerinde YDS değişiminin Matern fonksiyon ailesi ile gösterilmesine karar verilmiş ve Matern fonksiyonunun parametreleri PSO ile belirlenmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’de 28 Mart 2011 günü için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC değerlerinden PSO ile belirlenen Eş. 3.27 ve Eş. 3.28’te tanımlanan Matern fonksiyon parametreleri verilmiştir. Bu parametreler incelendiğinde



Şekil 4.48: 28 Mart 2011 günü için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC değerlerinden PSO ile belirlenen Matern fonksiyon parametreleri, a) ξ , b) ζ , c) $\chi(\vartheta, \varpi)$ ve $h = 100$ km.

ζ parametresinin TEİ değişiminin gün doğuşu ve gün batışı sırasında artan değişiklik

düzenini yansıttığı, ϑ parametresinin üssel yada Gauss seçimlerini otomatik olarak yaptığı belirlenmiştir.

4.5 İş Paketi 5

İş Paketi 5 için Proje Önerisindeki tanımları ve süreleri :

4.5.1 İş Paketi 5 Tanımı

- **İş Paketi 5 :** TEİ Haritalarının ve değişiminin otomatik elde edilmeye başlanması ve haritaların istatistiksel analizi; değişkenliğin otomatik belirlenmesi için yöntemlerin incelenmesi.

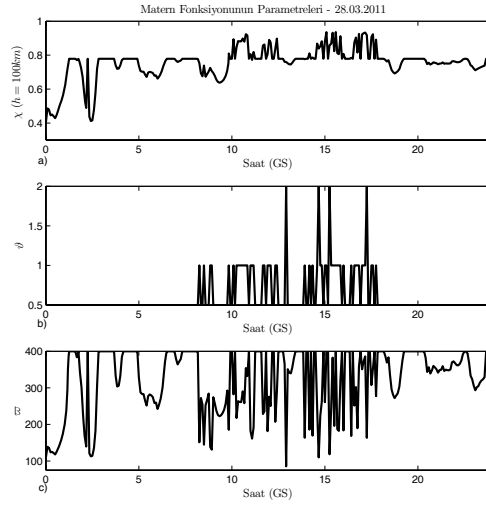
Süre : 5 - 36 ay

4.5.2 İş Paketi 5 Bulguları

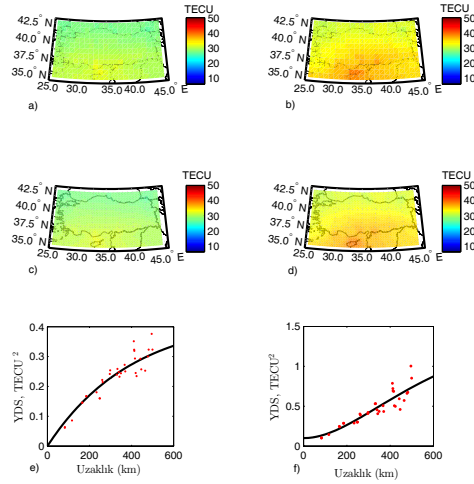
İş Paketi 5 kapsamında otomatik olarak oluşturulacak ardışık TEİ haritalarından TEİ değişimi haritalarının çıkarılması için TEİ haritası üzerinde yer alan her nokta için zamana ve yöne göre eşdeğişimi değerleri elde edilmesi; Ardışık TEİ haritaları arasındaki değişimi modelleyebilen parametrik uzay-zaman değişimi modellerinin incelenmesi öngörülmüştür. Bu iş paketinde bursiyer ve YL öğrencisi Muhammet Necat Deviren çalışmıştır. Bölüm 3.13'de tanıtılan algoritma ile EKDY ile otomatik TEİ haritaları oluşturulmuş ve Güneş Doğrultulu koordinat sisteminde TDA analizleri yapılmıştır. Bu iş paketi çalışmaları (ARIKAN vd, 2010;2011) ve (AKTUG vd, 2011) kaynaklarında verilmiştir. IONOLAB-MAP algoritması Mart 2011 ayı üzerinden özetlenerek aşağıda sunulmuştur.

1. Mart 2011 ayı içinde TUSAGA-Aktif ağında her istasyon için RINEX dosyaları toplanmıştır.
2. Mart 2011 ayı için uydu efemeris, uydu yanlışlık ve IONEX dosyalarının IGS sitesinden indirilmiştir.
3. Bölüm 3.1'de özetlenen yöntem ile dosyalar işlenmiş ve IONOLAB-TEC değerleri kestirilmiştir.

4. Bölüm 3.1’de özetlenen yöntem ile hata kodları dosyasından TUSAGA-Aktif ağında hangi istasyonların verilerinin sağlıklı olduğu belirlenmiştir.
5. Bölüm 3.2’de özetlenen yöntem ile eksik verilerin komşulardan ve önceki günlerden yararlanılarak STI-TEC1 aradeğerlemesi yapılmış ve eksik veriler elden geldiğince tamamlanmıştır.
6. Bölüm 3.9’te özetlenen yöntem ile GAD sürelerinin ve saatçi harita güncelleme aralıklarının belirlenmiş ve fırtınalı günlerin çokluğu ve gün-tün eşitliğinin değişimi nedeniyle 5 dk olmasına karar verilmiştir.
7. UTA yöntemi ile sık bir ızgara üzerinde ve her istasyon için 500 km sınırları içinde ön haritalama yapılmıştır. 28 ve 29 Mart 2011 günleri ve saat 1000 GS için yapılan UTA haritaları sırasıyla Şekil 4.50a ve Şekil 4.50b’de verilmiştir. 28 ve 29 Mart 2011 günleri ve saat 1000 GS için yapılan EKDY haritaları, sırasıyla, Şekil 4.50c ve Şekil 4.50d’de, deneysel YDS ve PSO ile parametreleri belirlenen teorik Matern YDS sırasıyla Şekil 4.50e ve Şekil 4.50f’de sunulmuştur. Mart 2011 ayı içinde 1, 10, 13 ve 29 Mart günlerinde ani iyonküre fırtına başlangıçları (‘sudden commencement’) ve iyonküre bozulmaları gözlenmiştir. Şekil 4.50e ve Şekil 4.50f’de ardışık iki gün içinde aynı saatte Matern fonksiyonu ve onun parametrelerinde oluşan farklılık 109E055 projesinde geliştirilen IONOLAB-MAP algoritmasının iyonküre bozulmalarını izlediği ve bu tür bozulmalara göre gürbüz haritalar yapabildiğini göstermektedir.
8. Bölüm 3.11.1’de özetlenen yöntem ile Mart 2011 için PSO kullanılarak doğrusal yönseme katsayıları belirlenmiştir. Şekil 4.51’da sol sütunda 0400 GS, 0700 GS, 1000 GS ve 1300 GS için, sağ sütunda 1500 GS, 1800 GS, 2000 GS ve 2300 GS için a_{21} , a_{22} , ve a_{23} katsayılarının aldıkları değerler gösterilmiştir. Şekil 4.51’den görüleceği gibi a_{21} değerleri güneşin doğuşu yada batışı saatlerinde ve bozulmalı günlerde yüksek çıkmıştır. Benzer bir durum a_{22} ve a_{23} için de söz konusudur. Bu durum Türkiye üzerinde iyonküre düzensizlik ve bozulmalarının yönseme fonksiyonunun parametrelerinin izlenmesi ile belirlenebileceğini ortaya koymaktadır.
9. Bölüm 3.11 ve Bölüm 3.11.2’de özetlenen yöntemler ile Mart 2011 için PSO kullanılarak Matern fonksiyonunun parametreleri belirlenmiştir. Şekil 4.52’da sol sütunda



Şekil 4.49: 28 Mart 2011 günü için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC değerlerinden PSO ile belirlenen Matern fonksiyon parametreleri, a) $\chi(\vartheta, \varpi)$ ve $h = 100$ km, b) ϑ , c) ϖ .



Şekil 4.50: a) 28 Mart 2011 günü 1000 GS için UTA haritası, b) 29 Mart 2011 günü 1000 GS için UTA haritası, c) 28 Mart 2011 günü 1000 GS için EKDY haritası, d) 29 Mart 2011 günü 1000 GS için EKDY haritası, e) 28 Mart 2011 günü 1000 GS için deneysel YDS ve Matern YDS, f) 29 Mart 2011 günü 1000 GS için deneysel YDS ve Matern YDS.

0400 GS, 0700 GS, 1000 GS ve 1300 GS için, sağ sütunda 1500 GS, 1800 GS, 2000 GS ve 2300 GS için ξ , ς , ϑ , ve ϖ parametrelerinin aldıkları değerler gösterilmiştir. Matern parametrelerinin bozulmalı günlere ve güneşin etkisine göre gün içinde önemli değişikliklere uğradığı görülmektedir. Bu nedenle TEİ haritalarının parametrelerinin bir veri tabanında tutulmasının çok güç olduğu ve iyonkürenin haritalanması istenen her anına göre yukarıda sayılan adımların atılmasının gerekli olduğu ortaya konmuştur.

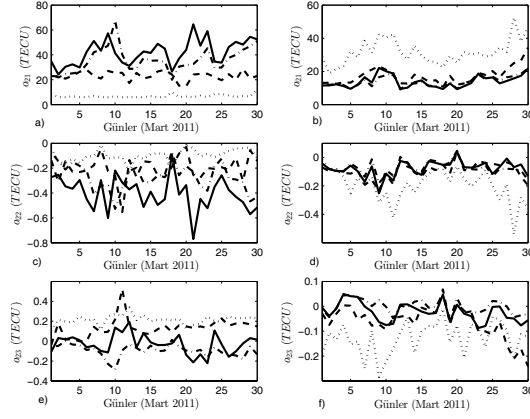
10. Bölüm 3.10.2'de özetlenen yöntem ile Mart 2011 ayı için 5 dk zaman çözünürlüğünde EKDY Krig haritaları yapılmıştır. 28 ve 29 Mart 2011 günleri ve saat 1000 GS için yapılan EKDY haritaları, sırasıyla, Şekil 4.50c ve Şekil 4.50d'de sunulmuştur.

Türkiye coğrafyasında değişkenliğin ve rassal alanın modellenmesi için geriçatma enerjisi ve değişkenliğin ölçüsünü gösteren TDA uygulanmıştır. IONOLAB-MAP algoritmasıyla 5 dk aralıklarla elde edilen EKDY haritaları, Bölüm 3.11.3'da anlatılan yöntemle Güneş Doğrultulu koordinat sistemine çevrilmiştir. 30 Mart 2011 günü, 1000 GS ve 1025 GS arasındaki GD koordinat sistemine dönüştürülmüş haritalar Şekil 4.53'de sunulmuştur.

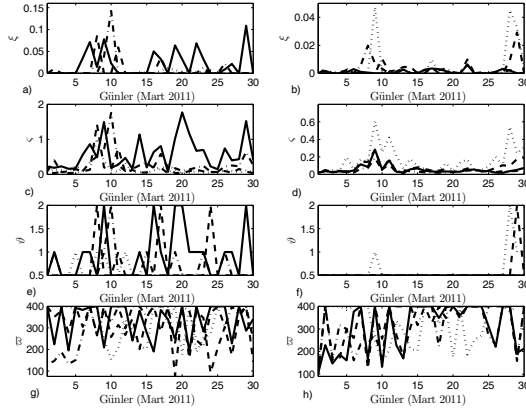
Yarım saatlik pencereler halinde 6 haritanın ortak koordinatları belirlenmiş ve ortak koordinatların içinde kalan bölgedeki TEİ değerlerine TDA uygulanmıştır. 25 ve 30 Mart 2011 tarihleri arasında 1015 GS için ortak GD koordinat haritaları Şekil 4.54'de sunulmuştur. 25 ve 30 Mart 2011 tarihleri arasında 1000-1025 GS saatleri için üstüste bindirilen TEİ değerlerinin her gün için hesaplanan tekil değerlerin birincisinin, enerjinin %99,9'una karşı geldiği görülmüştür. Ortak GD koordinat haritalarından 1000-1025 GS saatleri için üstüste bindirilerek elde edilen birinci tekil değer S_1 , Şekil 4.55'de sunulmuştur. Şekil 4.55'de açıkça görüldüğü üzere fırtınalı ve bozulmalı 29 Mart 2011, 1000-1025 GS aralığı için hesaplanan S_1 değeri, 25 Mart 2011 sakin gününe göre daha yüksektir. İyonküre değişkenliğinin gözlenmesinin bir yöntemi de ardışık günlerde ve aynı saat aralığında TDA ile enerjinin değişiminin izlenmesidir.

4.6 İş Paketi 6

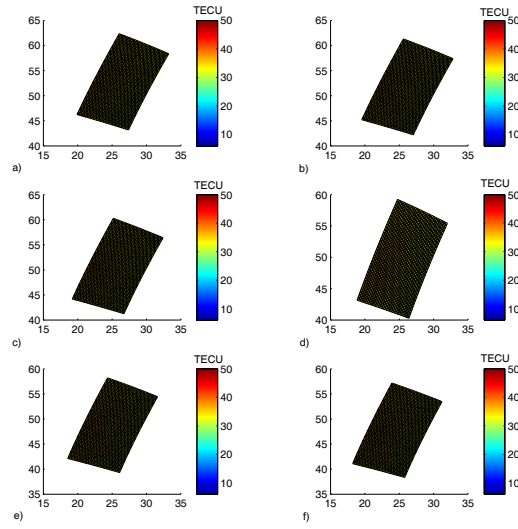
İş Paketi 6 için Proje Önerisindeki tanımı ve süresi :



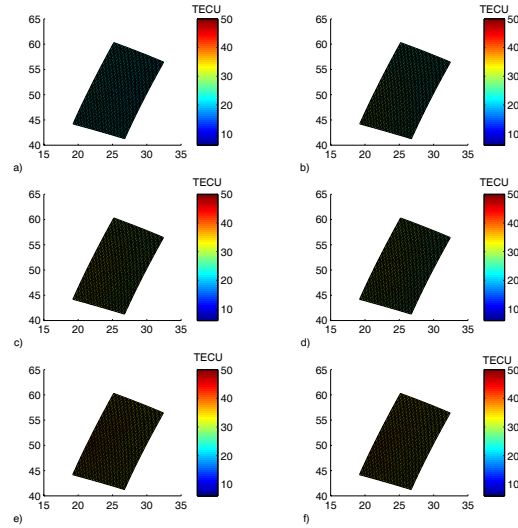
Şekil 4.51: Mart 2011 ayı için TUSAGA-Aktif IONOLAB-TEC değerlerinden PSO ile belirlenen doğrusal yönseme parametreleri; sol sütunda 0400 GS (noktalı), 0700 GS (kesikli), 1000 GS (düz) ve 1300 GS (nokta çizgi); sağ sütunda 1500 GS (noktalı), 1800 GS (kesikli), 2000 GS (düz) ve 2300 GS (nokta çizgi); a) ve b) a_{21} , c) ve d) a_{22} , e) ve f) a_{23} .



Şekil 4.52: Mart 2011 ayı için UTA haritasından PSO ile belirlenen Matern parametreleri; sol sütunda 0400 GS (noktalı), 0700 GS (kesikli), 1000 GS (düz) ve 1300 GS (nokta çizgi); sağ sütunda 1500 GS (noktalı), 1800 GS (kesikli), 2000 GS (düz) ve 2300 GS (nokta çizgi); a) ve b) ξ , c) ve d) ζ , e) ve f) ϑ , g) ve h) ϖ .



Şekil 4.53: 30 Mart 2011 günü GD koordinatlarında TEİ haritaları, a) 1000 GS, b) 1005 GS, c) 1010 GS, d) 1015 GS, e) 1020 GS, f) 1025 GS.



Şekil 4.54: 1015 GS için ortak GD koordinat haritaları, a) 25 Mart 2011, b) 26 Mart 2011, c) 27 Mart 2011, d) 28 Mart 2011, e) 29 Mart 2011, f) 30 Mart 2011.

4.6.1 İş Paketi 6 Tanımı

- **İş Paketi 6:** Sismik hareketliliğin uzay-zaman düzleminde TEİ bozulmaları ile eşleştirilmesi ve incelenmesi.

Süre: 7 - 36 ay

4.6.2 İş Paketi 6 Bulguları

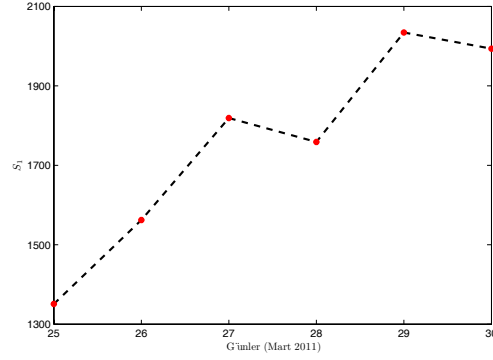
İş Paketi 6 kapsamında yerel TEİ değişimlerinin tespitinde herbir istasyonda elde edilen ardışık TEİ değerleri arasındaki mesafenin simetrik Kullback-Leibler metriği kullanılarak ölçülmesi, ve çapraz doğrulama yöntemi ile uzayda ve zamanda fay hatlarına yakın YKS istasyonlarından elde edilen TEİ verilerin kestirimlerinin ile karşılaştırılması bulunmaktadır. İstenilen bir veya daha fazla istasyon grubu için daha hassas şekilde değişiminin belirlenmesi amacıyla bu istasyonların verisi dışarıda bırakılarak civarındaki diğer istasyonların verileriyle bir TEİ haritası oluşturulacaktır. Oluşturulan TEİ haritasında seçilen istasyonun pozisyonundaki TEİ harita değeri ile bu istasyonun kendi verisi kullanılarak elde edilen TEİ değeri arasındaki fark değişimlere temel alınacaktır. Oluşturulan TEİ değerleri, meydana gelen sismik aktiviteye bağlı olarak izlenecek, değişimlerin çapraz kontrolüyle istatistiksel anlamlılıkları irdelenecektir. Bu iş paketinde Seçil Karatay, 105E171 nolu proje kapsamında başlayan doktora tezini tamamlamıştır (KARATAY, 2010). Baran Ersin Özilhan, YL tezini bitirmiştir (ÖZİLHAN, 2010). 110E296 nolu proje bursiyeri Ali Alp Akyol YL tezine devam etmektedir. Bu iş paketinde tez dışında yapılan yayın ve bildirimler (KARATAY vd, 2009a-b), (KARATAY vd, 2010a-d), (ARIKAN vd, 2009b;2012a), (ARIKAN O. vd, 2012b) (DEVİREN vd, 2012a) kaynaklarında sunulmuştur. Bölüm 3.14'de ayrıntılandırılan yöntemin uygulaması aşağıda özetlenmiştir.

İş paketi 6 kapsamında 105E171 projesinde geliştirilen özgün teknikler kullanılmış ve Türkiye için olası bir deprem alarm sinyalinin varlığı araştırılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar ve bulguların kısa bir özeti aşağıdadır:

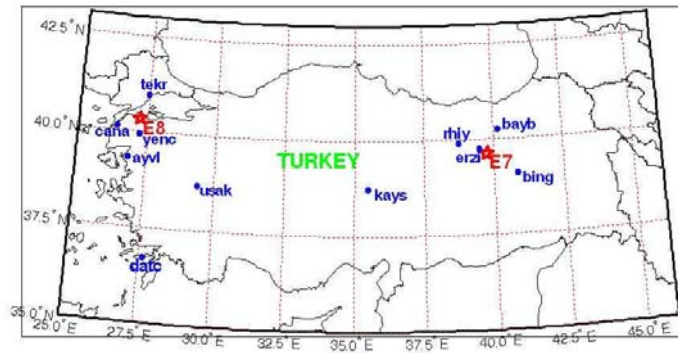
1. Türkiye üzerinde Şekil 2.4'da gösterilen MTA haritasıyla TUSAGA-Aktif istasyonlarının konumları eşleştirilmiştir. Jeolojik açıdan, fay yapılarının ilintisi için Şekil 3.16 incelenmiş ve HÜ Jeoloji Mühendisliği Öğretim Üyesi Prof. Dr. Erçin Kasapoğlu ve İTÜ Jeoloji Mühendisliği Öğretim Üyesi Prof. Dr. Yüksel Örgün ile görüş alışverişinde bulunulmuştur. Fay hatlarının ve jeolojik yapının temelde volkanik

kayaçlardan oluştuğu, ancak kompozisyon ve dağılım olarak çok değişken olduğu ortaya konmuştur.

2. Bölüm 2.10 ve Bölüm 3.14’de anlatılan ÇİK, SKLD, ve $\mathcal{L}2$ normu ile; ardışık günler, ODSG, ve istasyon çaprazlaması ile; a) Deprem olduğu günün 10 gün öncesinden, 10 gün sonrasına kadar olan zamanda; b) Bozulmanın olduğu fırtına sürelerinde; ve c) İyonküresel sakin dönemde; Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattı üzerinde 2009 yılında meydana gelmiş Çağlayan, Erzincan (30 Temmuz 2009, 1037 YS, M=5, z= 5 km, [39, 6°K 40, 3°D]) ve Yenice, Çanakkale (8 Ağustos 2009, 0452 YS, M=4,2, z= 10 km, [40, 3°K 27, 2°D]) depremleri incelenmiştir.
3. Sakin günler zaman aralığı için (SD1) 01 Ekim-15 Ekim 2009 tarihleri arasındaki günler, ODSG için (SD2) de 01-20 Haziran 2009 tarihleri arasındaki günler kullanılmıştır. Bu iki zaman aralığında, seçilen deprem bölgelerinde önemli sayılabilecek bir sismik hareketlilik yoktur.
4. Her iki depremdeki 21 günlük zaman aralığı boyunca önemli sayılabilecek bir jeomanyetik hareketlilik yoktur. Kp indisinin en büyük değeri 4 civarındadır. Bu anlamda deprem günleri zaman aralığı da jeomanyetik açıdan oldukça sakinidir.
5. TUSAGA-Aktif ağında deprem merkezine göre seçilen istasyonların uzaklıkları, 69 km’den 441 km’ye kadar değişmektedir. Şekil 4.56’de Çağlayan (E7) ve Yenice (E8) depremlerinin merkez istasyonları ve komşulukları gösterilmiştir. İstasyon çaprazlamasında ÇİK, SKLD, ve $\mathcal{L}2$ normu uygulamasına bir örnek Şekil 4.57’de sunulmuştur. ODSG ve istasyon uzaklığına göre yapılan incelemelere bir örnek Şekil 4.58’de sunulmuştur. Ardışık günler için yapılan incelemelere bir örnek Şekil 4.59’de sunulmuştur. (KARATAY, 2010) kaynağında tüm ayrıntılarıyla sunulan incelemelerden sonra M=5’den küçük depremlerde, depremden 2 ila 5 gün öncesine kadar iyonkürede bir bozulma olduğu ve 150 km komşuluğunda bulunan istasyonlarda, SKLD yöntemiyle, ODSG karşılaştırmalarında bir alarm sinyalinin oluşturulabileceği belirlenmiştir.
6. (ÖZİLHAN, 2010) tezinde ülkemizde en sık ve en yıkıcı depremlerin olduğu KAF için bir deprem alarm sinyali oluşturulmasını incelemiştir. ÇİK, SKLD, ve $\mathcal{L}2$ normu yöntemleri, 2009 yılında meydana gelen Daday, Kastamonu (22 Kasım 2009, 0401

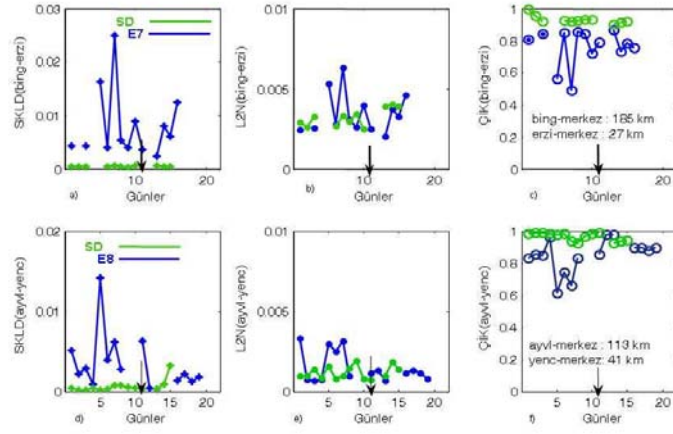


Şekil 4.55: 25 ve 30 Mart 2011 tarihleri arasında 1000-1025 GS saatleri için üstüste bindirilen ortak GD koordinat haritalarından elde edilen birinci tekil değer S_1 .

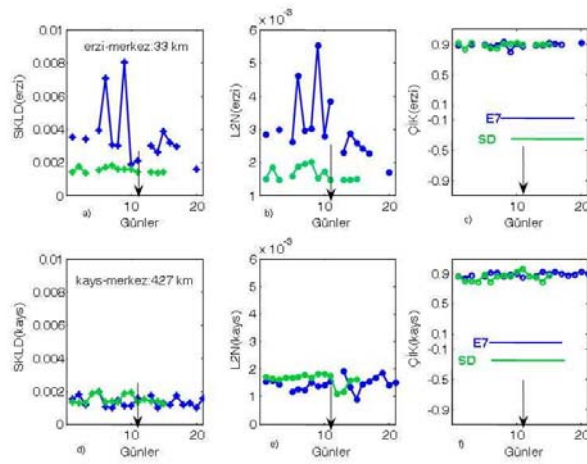


- **E7**: 30.07.2009 Cağlayan/Erzincan M=5 z: 5 km
- **E8**: 08.08.2009 Yenice/Çanakkale M=4.2 z: 10 km
- Her iki deprem de Kuzey Anadolu Fay hattında meydana gelmiştir.

Şekil 4.56: E7 ve E8 depremleri ve komşu TUSAGA-Aktif istasyonları.



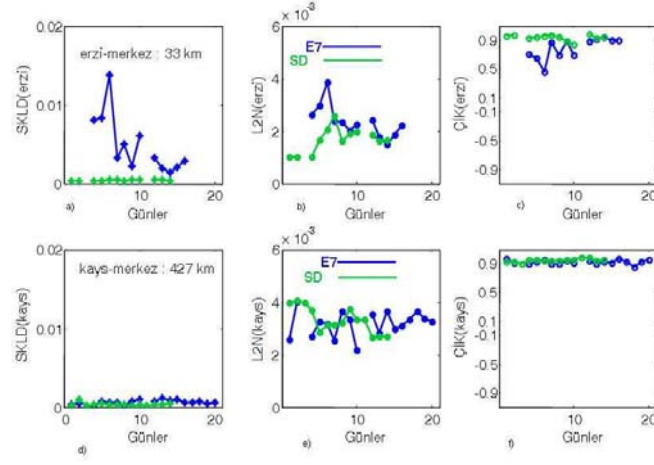
Şekil 4.57: Komşu TUSAGA-Aktif istasyonları arasında a) E7 depremi SKLD, b) E7 depremi L2N, c) E7 depremi ÇİK, d) E8 depremi SKLD, e) E8 depremi L2N, f) E8 depremi ÇİK.



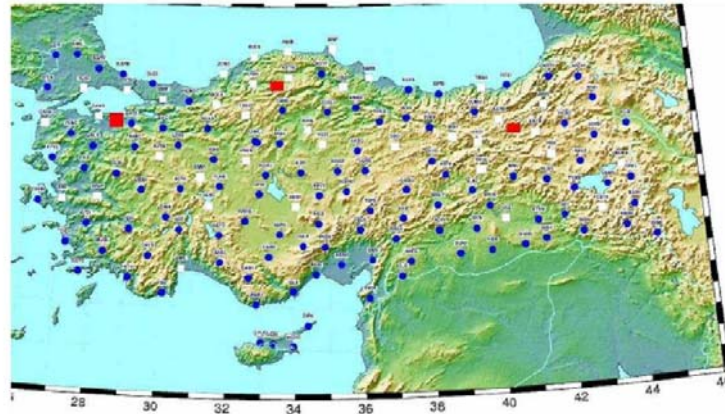
Şekil 4.58: E7 depreminde erzi (Erzincan, merkez) ve kays (Kayseri) TUSAGA-Aktif istasyonlarının ODSG analizleri a) erzi SKLD, b) erzi L2N, c) erzi ÇİK, d) kays SKLD, e) kays L2N, f) kays ÇİK.

YS, $M=4,5$, $z=5$ km, $[41, 4^0K 33, 4^0D]$), Pazaryolu, Erzurum (16 Nisan 2009, 0121 YS, $M=4,3$, $z=5$ km, $[40, 3^0K 40, 5^0D]$) ve Bandırma açıkları, Marmara Denizi (1 Ağustos 2009, 1942 YS, $M=4,1$, $z=9,1$ km, $[40, 4^0K 28, 2^0D]$) depremleri için ardışık günler, ODSG, ve istasyon çaprazlaması ile incelenmiştir. KAF depremlerinin merkezleri ve TUSAGA-Aktif komşulukları Şekil 4.60'de gösterilmiştir. Gerek istasyon çaprazlamalarında gerek ODSG ile karşılaştırmalarda iyonküre için seçilen Sakin Döneme göre deprem merkezine 150 km komşuluğunda olan istasyonların, depremden 2 ile 5 gün öncesinde IONOLAB-TEC değerlerinde bozulmaların olduğu belirlenmiştir. Bu düşünceden hareketle ÇİK, SKLD, ve $\mathcal{L}2$ normu yöntemleri için bir eşik değeri araştırılmıştır. Her deprem, her yöntem ve her istasyon için eşik değerinin aşılma yüzdeleri belirlenmiştir. 80 km'den yakın istasyonlarda aşılma yüzdesi %85'e ulaşan eşik değerleri seçilmiştir. Belirlenen eşik değerleri, 1 Ekim ve 1 Kasım 2009 tarihleri arasında svas (Sivas) merkez ve çevreleyen istasyonların IONOLAB-TEC değerlerinin ODSG ve ardışık günler için ÇİK, SKLD ve $\mathcal{L}2$ normu ile hazırlanan değerleri ile karşılaştırılmıştır. svas istasyonu ve 100 km yarıçapı komşuluğunda olan istasyonların 5 Ekim, 8 Ekim ve 10 Ekim tarihlerinde tüm yöntemlerde %75-%80 oranda eşik değerini geçtiği ve 10 Ekim 2009 tarihinde Kayadibi, Sivas'ta ($M=3,9$, $z=5$ km) deprem olduğu görülmüştür. Bu sonuçların kesinliğe ulaşmaması TUSAGA-Aktif ağının istasyonlarının daha önce sözü geçen nedenlerden dolayı aksama ve kesilmelerle çalışması ve eşik değerinin uyarlamalı olarak her istasyon için ayrı belirlenmesi nedenlerine bağlanmış ve proje öneri formunda ve iş paketi tanımında verilen radar sezim/kestirim kuramına dayalı bir yöntem izlenmesi gerekliliği ortaya konmuştur.

7. 23 Ekim 2011 günü, 1041 GS'de, $M=7,2$ büyüklüğünde bir depremle sarsılan Van bölgesi için ardışık günler ve ODSG ile SKLD yöntemi kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Deprem merkez üssü $[38.7^0K 43.3^0D]$ koordinatlarında ve $z=5$ km derinliktedir. HGK araştırmacıları deprem merkez üssüne 43 km uzaklıkta bulunan mura (Muradiye, Van) TUSAGA-Aktif istasyonu için Şekil 4.61'de verilen jeodezik zaman serisi analizleri yapmışlardır. Depremin merkez üssüne en yakın çalışan istasyon olan mura için sakin gün, deprem günü, depremden sekiz gün önce ve ODSG IONOLAB-TEC değerleri Şekil 4.62'de verilmiştir. Van depremi için yapılan analizlerde ODSG için 25-28 Mart 2011, ve SD için 25-28 Nisan 2011 aralıkları belirlenmiştir. Türkiye



Şekil 4.59: E7 depreminde erzi (Erzincan, merkez) ve kays (Kayseri) TUSAGA-Aktif istasyonlarının ardışık gün analizleri a) erzi SKLD, b) erzi L2N, c) erzi İK, d) kays SKLD, e) kays L2N, f) kays İK.



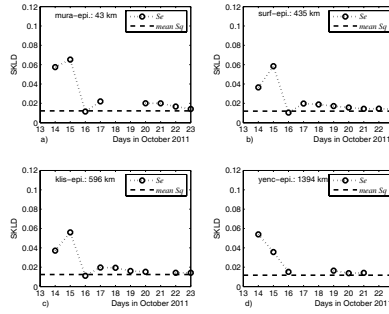
Şekil 4.60: Daday, Pazaryolu ve Marmara Denizi depremleri merkez üsleri ve TUSAGA-Aktif komşulukları.

Van depremi merkez üssüne yakınlık bakımından Çizelge 4.1’de verilen bölgelere bölünmüştür. Deprem günlerinin SKLD değeri Se ’nin, SD SKLD değeri Sq ’ya göre farkı her bölge için hesaplanmış ve Çizelge 4.1’de verilen ortalama değerlerin deprem bölgesine yakın istasyonlar için depremden 7-8 gün önceden başlayarak önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Şekil 4.63’de mura, surf (Şanlı Urfa), klis (Kilis) ve

Bölge	Aralık	D_m , 14 Ekim 2011	D_m , 15 Ekim 2011
Z1	<150 km	0,0452	0,0461
Z2	150 km - 360 km	0,0333	0,0517
Z3	360 km - 550 km	0,0245	0,0439
Z4	550 km - 780 km	0,0247	0,0351
Z5	780 km <	0,0233	0,0205

Çizelge 4.1: Bölgeler ve $D = Se - Sq$ değerlerinin ortalaması, D_m .

yenc istasyonlarının deprem süresi ve SD için ODSG ile SKLD karşılaştırmaları verilmiştir. Ardışık günler için SKLD karşılaştırması için bir örnek Şekil 4.64’de



Şekil 4.63: Sq değerlerinin ortalaması ve Se değerleri a) mura, b) surf, c) klis, d) yenc.

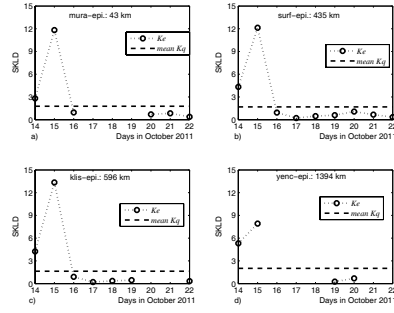
mura, surf, klis ve yenc istasyonları için verilmiştir. Sakin dönemin ardışık günlerinin SKLD değerleri Kq_u , deprem döneminin ardışık günlerinin SKLD değerleri Ke_u ile gösterilmiştir. Bu sonuçlar ODSG ile SKLD karşılaştırmasının deprem alarm sinyali oluşturulmasında en güçlü aday olabileceğini ve istatistiksel bir eşik düzeyi ile istasyonlar bazında IONOLAB-TEC değerlerinin sürekli izlenebileceğini göstermiştir.

- Bölüm 2.10 ve Bölüm 3.14’de anlatılan ve Şekil 3.17’de gösterilen radar sezim kuramına dayalı deprem uyarı sinyali algoritması TUSAGA-Aktif ağında uygulamaya konmuştur. TUSAGA-Aktif ağındaki istasyonlar Şekil 2.4’de gösterilen fay hatlarına yakınlıklarına göre iki gruba ayrılmıştır. Fay hatlarına yakın olan istasyonlarda

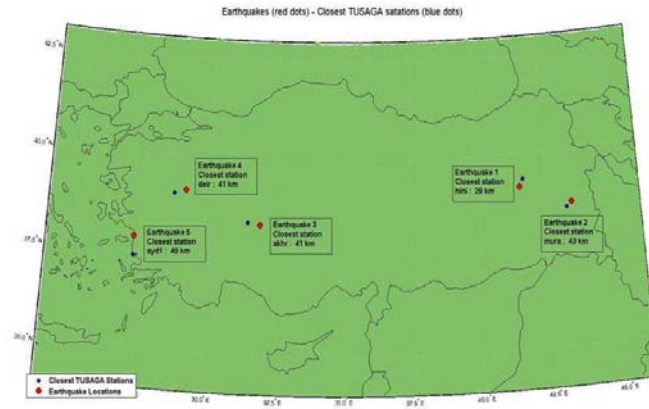
komşu istasyonların etkisinin azaltılması için STI-TEC2 aradeğerlemesi yapılmış ve istasyon dolulukları %75 düzeyine getirilmiştir.

9. Deprem öncesi iyonküre bozulmalarının jeomanyetik temelli bozulmalardan ayrılması için GLS zaman serisi uyarlamalı eşik değerinin bir değişkeni olarak kullanılmıştır.
10. Bölüm 3.14'de verilen yöntem ile her istasyon için komşuluklardan kestirim yapılmış ve istasyonun kendi kestirimleri ile karşılaştırılmıştır.
11. Artık hata değerleri OK1 algoritması ile haritalanarak bölgesel düzeyde uzay-zaman dağılımları incelenmiştir. Bu yöntem Hınıs (17 Kasım 2011, 0237 YS, $M=4,6$, $z=3,8$ km, $[39, 1^{\circ}K 41, 5^{\circ}D]$), Van (23 Ekim 2011, 1041 YS, $M=7,2$, $z=5$ km, $[38, 7^{\circ}K 43, 36^{\circ}D]$), Akhisar (27 Temmuz 2011, 0958 YS, $M=5$, $z=5$ km, $[38, 3^{\circ}K 31, 9^{\circ}D]$), Demirci (19 Mayıs 2011, 2015 YS, $M=5,9$, $z=7$ km, $[39, 1^{\circ}K 29, 1^{\circ}D]$), ve Aydın (6 Şubat 2011, 0209 YS, $M=4,1$, $z=0,5$ km, $[37, 8^{\circ}K 27, 2^{\circ}D]$) depremlerine uygulanmıştır. İncelenen depremlerinin merkezleri ve TUSAGA-Aktif komşulukları Şekil 4.65'de gösterilmiştir. Farklı eşik değerlerine göre sezim sonuçlarının değişmesi Şekil 4.66'de gösterilmiştir. Ortalamasız Krigleme ile hazırlanan alarm öngörü haritalarına bir örnek Şekil 4.67'de, Van depreminden yedi gün önce 16 Ekim 2011 tarihi için verilmiştir. Şekil 4.67'de gösterildiği üzere Van depreminin merkez üssüne yakın çok az sayıda TUSAGA-Aktif istasyonu çalışmaktadır. Bu durumda ortaya çıkan sezim belirsizlikleri gidermek amacıyla algoritmada değişiklik yapılması gündeme gelmiştir.

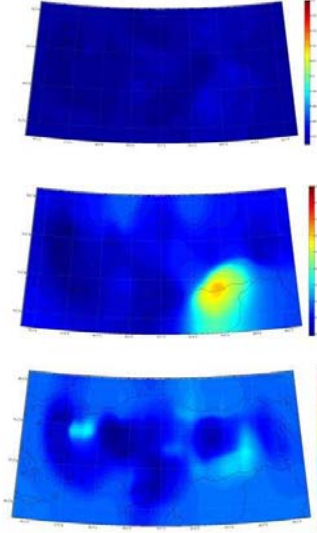
Bu bölümde her bir iş paketi için elde edilen bulgular özetlenmiştir. Sonuçlar ve öneriler Bölüm 5'te verilmiştir.



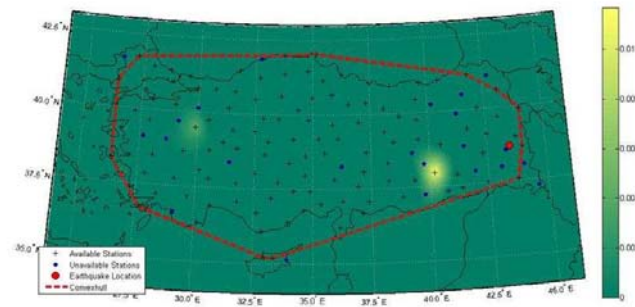
Şekil 4.64: Kq değerlerinin ortalaması ve Ke değerleri a) mura, b) surf, c) klis, d) yenc.



Şekil 4.65: Hınıs, Van, Akhisar, Demirci ve Aydın depremleri merkez üsleri ve TUSAGA-Aktif komşulukları.



Şekil 4.66: Farklı eşik değerlerine göre sezim sonuçlarının değişmesi.



Şekil 4.67: 16 Ekim 2011 günü için Krigleme öngörü haritası.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

TÜBİTAK 109E055 projesinin konu ve kapsamı 105E171 projesinde geliştirilen özgün TEİ kestirim, haritalama, tomografi ve deprem uyarı sinyali algoritmalarının TUSAGA-Aktif ağı üzerinden uygulanması ile Türkiye iyonküresinin uzaktan algılanması, istatistiklerinin belirlenmesi ve sürekli gözlenmesidir. 109E055 projesinde IONOLAB-TEC algoritması geliştirilerek yakın gerçek zamanda çalışır hale getirilmiş; TEİ veri keşimlerini tamir için özgün YKS ağı üzerinden çalışan uzay-zaman aradeğerleme algoritması geliştirilmiş; TEİ istatistikleri için otomatik çalışan bir algoritma hazırlanmış; Özgün eniyileme yöntemleri ile IRI-Plas modeli geliştirilerek yakın gerçek zamanlı haritalama, sanal iyonosonda ve tomografi algoritmaları ortaya konmuş; Türkiye üzerinde iyonküre F2 katmanı kritik frekansı ve ençok iyonlaşma yüksekliği model ve haritaları oluşturulmuş; TEİ yönseme ve yarıdeğişinti serimi modellenmiştir. Bölgesel otomatik TEİ haritalaması için özgün bir algoritma geliştirilmiştir. Sismik hareketliliğin $M=4,5$ üzerinde depremlerde KAF üzerinde depremden 2 ile 5 gün öncesinden bozulmalar oluşturduğu ve bu bozulmaların iyonküre fırtınalarına göre daha bölgesel bir etki alanı olduğu gözlenmiştir. Türkiye üzerinde deprem uyarı sinyali oluşturulması için TUSAGA-Aktif ağı ile istatistiksel sezim kuramına dayalı özgün bir uyarlamalı algoritmanın geliştirilmesine başlanmıştır.

109E055 nolu projede 17 lisans, yüksek lisans ve doktora öğrencisi çeşitli aşamalarda çalışmıştır. Eylül 2009 - Ekim 2012 arasında üç yüksek lisans ve bir doktora öğrencisi tezlerini tamamlamıştır. Üç yüksek lisans ve bir doktora öğrencisi tez çalışmalarına devam etmektedir. Dört davetli konuşma verilmiş, uluslararası konferans ve çalıştaylarda 21 bildiri, ulusal konferans ve çalıştaylarda 9 bildiri sunulmuştur. 105E171 projesinin devamında ve 109E055 projesinde toplam altı makale yayınlanmıştır. İki makale hakem incelemesindedir.

TUSAGA ve TUSAGA-Aktif RINEX dosyaları, IONOLAB-TEC kestirimleri ve IONOLAB-BIAS alıcı yanlılığı değerleri, her istasyon için hata kodu dosyaları, her istasyon için yıllık, saatliği TEİ istatistikleri, STI-TEC1 ve STI-TEC2 ile aradeğerlenen IONOLAB-TEC verileri, 2001 yılından 2012 yılı Ağustos ayına kadar iyonküre ve plazmaküre fırtınaları, Kandilli Rasathanesi'nden alınan 2009-2011 Türkiye deprem kataloğu veri tabanına konmuştur.

Türkiye için YKS ağlarından yararlanılarak özgün bir bölgesel TEİ haritalama algoritması, IONOLAB-MAP, geliştirilmiştir.

109E055 projesinde, ‘Proje Çıktıları ve Başarı Ölçütleri’ alanında listelenen özgün teknikler ve yazılımlar geliştirilmesi, öğrenci yetiştirilmesi ve desteklenmesi, ve Türkiye üzerindeki iyonkürenin yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde görüntülenmesi ve veri tabanı oluşturulması aşamaları başarıyla tamamlanmıştır.

109E055 projesiyle Türkiye üzerinde iyonkürenin rassal alan yönsemesinin enlem ve boylama bağlı doğrusal bir fonksiyon olduğu ve yarıdeğişinti seriminin Matern işleviyle modellebileceği gösterilmiştir. TEİ istatistiklerinin Lognormal ve Weibull dağılımlarından oluştuğu; Yıllık ve bölgesel bazda güneşin konumuna ve GLSye bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Türkiye ve KKTC coğrafyası enlem ve boylamda $2^0 \times 3^0$ altbölgelere bölünebilmekte ve her bölge bir istasyon ile temsil edilebilmektedir. Elektron yoğunluğu özellikle güneşin doğuşu ve batışı saatlerinde kuzeydoğu-güneybatı ekseninde, öğle saatlerinde ise kuzey-güney doğrultusunda değişim göstermektedir. Türkiye iyonküresinin konumsal ilintisi 100 km civarındadır. Deprem öncülleri büyüklükleri ile doğru orantılı bir alanda etkili olmaktadır ve deprem gününden beş gün öncesine kadar iyonkürede bozulma oluşturabilmektedirler.

ÖNERİLER:

109E055 projesi, incelenen her adımda gelişme ve iyileştirmeye açık alanlar belirlenmesini sağlamıştır. En önemli olanlar şu şekilde özetlenebilir:

- 109E055 projesinin en önemli tespiti, TUSAGA-Aktif ağının istasyonlarının pek çoğunun fiziksel nedenler yada veri aktarımı sırasındaki kayıplardan dolayı sağlıklı çalışmamasıdır. Kaydedilen verilerde sık sık kesintiler olmaktadır. Bu veri kaybı ve günlük veride kesintiler IONOLAB grubunun 109E055 projesinde önerdiği iş paketlerinde değişiklik ve güncellemeye gitmesine neden olmuştur. Uzay-zaman aradeğerlemesi bu gereksinimden doğmuştur ve doluluk oranlarını ortalama %65’ten %85’e çıkarmıştır. Dolayısıyla projede geliştirilen pek çok yöntem, düzeltilmiş veri kümesi ile yeniden uygulanmak zorunda kalmıştır.
- Türkiye üzerindeki iyonkürenin gözlenmesi ve uzaktan algılanması için çok önemli bir kaynak olan TUSAGA-Aktif ağı yeni istasyonlarla sıklaştırılarak sağlıklı veri toplar hale getirilmelidir.
- Oluşturulan veri tabanları sürekli yeni bilgi ve dosyalarla güncellenmelidir.

- TEİ ölçümleri yapan sistemler yaygınlaştırılarak TUSAGA-Aktif ağı verileri ile birleştirilebilir. Özellikle sanal iyonosonda modelinin geçerliliği gerçek iyonosonda ölçümleri ile test edilmelidir. verilerinin indirilip otomatik BİT programına dahil edilebilir.
- Gerçek anlamda bir deprem uyarı sinyali elde edilmesi için sismik ve atmosferik veri tabanları ile çok uzun süreli veriler toplanmalı ve istatistikler uzay ve zamanda birlikte değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- AKDOĞAN, K.E. Arıkan, F., Erol, C.B. Determining Wide Sense Stationarity Periods for Ionospheric Variability, Proceedings of Turkish National Geodetic Commission (TUJK) Scientific Meeting 2007, ODTÜ, Ankara, (2007).
- AKTUG, B. Arıkan, F., Arıkan, O., Sezen, U., Toker, C., Lenk, O., Kurt, M., Parmaksiz, E., Ozdemir, S., Space Weather activities of IONOLAB group using TNPGN GPS network, Proceedings of RAST-2011, Recent Advances in Space Research, 9-11 Haziran 2011, Harbiye Askeri Müze, Hava Harb Okulu, Istanbul, (2011).
- ARIKAN, F., Erol, C.B., Arıkan, O., Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *Journal of Geophysical Research* 108(A12), 1469-1480, (2003).
- ARIKAN, F., Erol, C. B., Arıkan, O., Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period, *Radio Sci.*, 39, RS6012, (2004).
- ARIKAN, F., Arıkan, O., Erol, C. B., Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model, *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2007.01.082, 39, 867-874, (2007a).
- ARIKAN, F., Yılmaz, A., Sayın, I., Sezen, U., Arıkan, O., Ertürk, O., Gürün Temur M., Investigation of Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling by Monitoring TEC and Computerized Ionospheric Tomography, Abstracts Booklet and CD of International Workshop on Early Warning and Monitoring Earthquake by Using Electromagnetism Detecting Satellite, Asia Pacific Multilateral Cooperation in Space Technology and Applications (AP-MCSTA), National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), Cakarta, Endonezya, (2007c).
- ARIKAN, F., Nayir, H., Sezen, U., Arıkan, O., Estimation of Single Station Inter-frequency Receiver Bias Using GPS-TEC, *Radio Science*, 43, RS4004, doi:10.1029/2007RS003785, (2008a).
- ARIKAN, F., Yılmaz, A., Arıkan, O., Sayın, I., Gurun, M., Akdogan, K.E., and Yıldırım, S.A., Space Weather Activities of IONOLAB Group: TEC Mapping, EGU General Assembly 2009, *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-6962, (2009a).
- ARIKAN, F., Karatay, S., Arıkan, O., Investigation of Ionospheric Disturbance due to

Strong Earthquakes Using Total Electron Content, EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, 11, EGU2009-8440, (2009b).

ARIKAN, F., Arikan, O., Sezen, U., Toker, C., Lenk, O., Kılıcoglu, A., Aktug, B., Aysezen, M.S., Sayın, I., Koroglu, O., IONOLAB group activities using CORS-TR GPS network, Beacon Satellite Symposium, BEACON 2010, 7-11 Haziran 2010, Barselona, İspanya, (2010).

ARIKAN, F., Arikan, O., Sezen, U., Toker, C., Aktug, B., Lenk, O., Kurt, M., Parmaksız, E., Space-Time Interpolation and Automatic Mapping of TEC Using TNPGN-Active, XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science, 13-20 Ağustos 2011, Lütfi Kırdar Konferans ve Sergi Merkezi, İstanbul, (2011).

ARIKAN, F., Deviren, M.N., Lenk, O., Sezen, U., and Arikan, O., Observed Ionospheric Effects of 23 October 2011 Van, Turkey Earthquake, Geomatics, Natural Hazards and Risk, 3, 1-8, (2012a).

ARIKAN, F., Deviren, M.N., and Arikan, O., A novel spatio-temporal TEC interpolation algorithm for GPS networks, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, 13-17 Ağustos 2012, Resorts World Sentosa, Singapur, (2012b).

ARIKAN, F., Gulyaeva, T.L., Sezen, U., Cilibas, O., Comparison of IRI-Plas TEC Maps with Optimized foF2 and hmF2 Inputs for Magnetic Conjugate Regions, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, 13-17 Ağustos 2012, Resorts World Sentosa, Singapur, (2012c).

ARIKAN, O., Arikan, F., Erol, C. B., 3-D Computerized Ionospheric Tomography with Random Field Priors, *Mathematical Methods in Engineering*, K. Tas, J.A. Tenreiro Machado and D. Baleanu (Eds.), Springer, Hollanda, (2007a), Pp. 325-334.

ARIKAN, O., Arikan, F., Erol, C. B., Computerized ionospheric tomography with the IRI model, *Advances in Space Research*, doi:10.1016/j.asr.2007.02.078, 39, 859-866, (2007b).

ARIKAN, O., Ertürk, O., Arikan, F., Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time, Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007, Institute of Atmospheric Physics, Prag, Çek Cumhuriyeti, (2007c), p:27.

ARIKAN, O., Tuna, H., Arikan, F., Gulyaeva, T.L., Reconstruction of 3-D ionospheric electron density distribution by using GPS measurements and IRI-Plas model,

AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, 13-17 Ağustos 2012, Resorts World Sentosa, Singapur, (2012a).

ARIKAN, O., Akyol, A.A., Arıkan, F., Investigation on the reliability of earthquake prediction based on ionospheric electron content variation, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, 13-17 Ağustos 2012, Resorts World Sentosa, Singapur, (2012b).

AYSEZEN, M.Ş., Nayir, H., Sezen, U., Arıkan, Lenk, O., Kılıçoğlu, A., F, Mekik, Ç, Receiver Code Bias Estimation in Turkish National Permanent GPS Network, Proceedings of Turkish National Geodetic Commission, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Scientific Meeting 2007 on Monitoring and Modeling of the Ionosphere and Troposphere, METU, Ankara (2007). p: 87.

AYSEZEN, M.Ş., Açıkgöz, M., Arıkan, F., Aktuğ, B., Lenk, O., Sabit GPS istasyonu ve GPS kampanya verilerini kullanarak lokal iyonosfer modeli oluşturulması, IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İTÜ, İstanbul, (2008), pp: 205-208.

AYSEZEN, M.Ş., *Türkiye için IONOLAB-TEC Kullanılarak GPS Tabanlı TEİ ve Alıcı Yanlılığı Veri Tabanı Hazırlanması*, (Yüksek Lisans Tezi), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2008).

BILITZA, D., International Reference Ionosphere 2000, Radio Sci., 36(2), 261-275, (2001).

BILITZA, D., Reinisch, B., International Reference Ionosphere 2007: Improvements and New Parameters, Adv. Space Res., 42, 599-609, (2008).

DEVIREN, M.N., Arıkan, F., Sezen, U. and Arıkan, O., Investigation of Ionospheric Precursors of 23 October 2011, Mw=7.2 Earthquake in Van, Turkey, European Geophysical Union, EGU General Assembly 2012, 22-27 Nisan 2012, Viyana, Avusturya, (2012a).

DEVIREN, M.N., Arıkan, F., Arıkan, O., Spatio-Temporal TEC Interpolation for TNPNGN-Active Stations, MASFOR 2012, Boğaziçi Üniversitesi, 21-23 Haziran 2012, İstanbul, (2012b).

DEVIREN, M.N., Arıkan, F., Arıkan, O., Spatio-Temporal Interpolation of Total Electron Content Using a GPS Network, Radio Science dergisinde hakem incelemesindedir (2012c).

EROL, C.B., Arıkan, F., Arıkan, O., A New Technique for TEC Estimation, 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian

Symposium on Remote Sensing IGARSS'02, Toronto, Kanada, (2002a).

EROL, C.B., Arıkan, F., Arıkan, O., An Alternate Method for Local Vertical TEC Estimation, Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium PIERS'2002, Cambridge MA, A.B.D. (2002b), p: 488.

EROL, C.B., Arıkan, F., Statistical Analysis of the Ionosphere Using GPS Signals, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 19(3), 373 - 387, (2005).

ERTÜRK, O., Arıkan, O., Arıkan, F., Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time, Proceedings of Turkish National Geodetic Commission, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Scientific Meeting 2007 on Monitoring and Modeling of the Ionosphere and Troposphere, METU, Ankara (2007), pp: 72-75.

ERTÜRK, O., Arıkan, O., Arıkan, F., Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time, *Adv. Space Res.* 43, 1702-1710, (2009).

GEO, Geomanyetik indisler, http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html

GOKDAG, Y.E., Arıkan, F., Toker, C., Arıkan, O., Sentetik TEİ yüzeyleri için parçacık sürü optimizasyonu ile parametre kestirimi, IEEE 20. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2012 Bildiriler CDsi, SİU 2012, Özyeğin Üniversitesi, 18-20 Nisan 2012, Lykia-World, Fethiye, Muğla, (2012).

GULYAEVA, T.L., Arıkan, F., Delay, S.H., Scale Factor Mitigating Non-Compliance of Double Frequency Altimeter Measurements of the Ionospheric Electron Content over the Oceans with GPS-TEC Maps, *Earth, Planets and Space*, 61, 1103-1109, (2009).

GULYAEVA, T.L., Arıkan, F., and Stanislawski, I., Inter-hemispheric imaging of the ionosphere with the upgraded IRI-Plas model during the space weather storms, *Earth Planets Space*, 63, 929-939, (2011a).

GULYAEVA, T.L., Arıkan, F., and Stanislawski, I., Virtual ionosonde network in conjugate hemisphere, XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science, 13-20 Ağustos 2011, Lütfi Kırdar Konferans ve Sergi Merkezi, İstanbul, (2011b).

GULYAEVA, T.L., Empirical model of ionospheric storm effects on the F2 layer peak height associated with changes of peak electron density, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JA017158, (2012).

GULYAEVA, T. L., BILITZA, D. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model, New Developments in the Standard Model, ed. R.J. Larsen, Nova Science Publishers Inc., (2012), Pp: 1-39.

GULYAEVA, T.L., Arıkan, F., Hernandez-Pajares, M., Stanislawski, I., Sezen, U., IRI-Plas in Real Time: the ionospheric foF2, hmF2 and W-index global maps produced from hourly GPS-TEC maps, Joint COST-ES0830 IRI-RT Workshop, 13-15 Mart 2012, Prag, Çek Cumhuriyeti, (2012a).

GULYAEVA, T.L., Arıkan, F., Hernandez-Pajares, M., Stanislawski, I., Sezen, U., Assimilating the IRI-Plas model to the ionospheric hourly maps of GPS-TEC to produce the artificial foF2 and hmF2 global maps, 39th COSPAR Scientific Assembly, 14-22 Temmuz 2012, Mysore, Hindistan, (2012b).

GÜRÜN, M., *Sinir Ağı Modelleme Yöntemleri Kullanarak TEİ Verileri ile Durağan ve Dinamik Bölgesel İyonosfer Haritalarının Oluşturulması*, (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2007).

GÜRÜN, M., Akdoğan, K. E., Yılmaz, A., Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Bölgesel İyonosfer Haritalaması, 15. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2007 Bildiriler CDsi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2007a).

GÜRÜN, M., Akdoğan, K. E., Yılmaz, A., Regional Ionosphere Mapping By Using Neural Networks, Proceedings of RAST-2007, Recent Advances in Space Research, Harbiye, İstanbul, (2007b).

GÜRÜN, M., Akdoğan, K. E., Yılmaz, A., Comparison of Neural Network Structures in TEC Based Regional Ionosphere Mapping, Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007, Institute of Atmospheric Physics, Prag, Çek Cumhuriyeti, (2007c), pp: 82-83.

HARRISON, R.G., Aplin, K.L., Rycroft, M.J., Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 72, 376-381, (2010).

ICEPAC User Manual, <http://www.its.bldrdoc.gov/elbert/hf.html>.

IDCE, Ionospheric Dispatch Center, http://www.cbk.waw.pl/rwc/q_d.daysctl

IGS, International GPS Service, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>.

IONEX, Ionex TEC Maps, <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/iono>.

IONOLAB, <http://www.ionolab.org>.

IRI-TEC, Maps, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri.html>.

- IRI-2007, Community Coordinated Modeling Center, International Reference Ionosphere, http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri_vitmo.php, (2007).
- KARATAY, S., Arıkan, F., Arıkan, O., Toplam Elektron İçeriği ile Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının İncelenmesi, 17. IEEE Sinyal İşlemeleri ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2009, 09-11 Nisan 2009, Kocaeli Üniversitesi, Antalya, (2009a).
- KARATAY, S., Arıkan, F., Arıkan, O., Investigation of Hourly and Daily Patterns for Lithosphere-Ionosphere Coupling Before Strong Earthquakes, Proceedings of RAST-2009, Recent Advances in Space Research, Harbiye, İstanbul, (2009b).
- KARATAY, S., Deprem ile İyonküredeki Toplam Elektron İçeriği Arasındaki İlişkinin Araştırılması, Doktora Tezi, Eş Danışman: Prof. Dr. Feza Arıkan, Fırat Üniversitesi, (2010).
- KARATAY, S., Arıkan, F., Arıkan, O., Sayın, I., Aysezen, M.Ş., Lenk, O., Aktuğ, B., Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının TUSAGA Aktif TEİ Kestirimleri İle İncelenmesi, 18. IEEE Sinyal İşlemeleri ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2010, 22-24 Nisan 2010, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, (2010a).
- KARATAY, S., Arıkan, F., Arıkan, O., Lenk, O., Aktuğ, B., Aysezen, M.S., Comparison of ionospheric variations in seismic and quiet days by CORS-TR IONOLAB-TEC estimates, Beacon Satellite Symposium, BEACON 2010, 7-11 Haziran 2010, Barselona, İspanya, (2010b).
- KARATAY, S., Arıkan, F., Arıkan, O., Comparison of ionospheric variations in seismic, geomagnetically disturbed and quiet days by IONOLAB-TEC estimates, Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes-EMSEV 2010, Chapman University, 3-6 Ekim 2010, Santa Ana, CA, ABD, (2010c), p. 92.
- KARATAY, S., Arıkan, F., Arıkan, O., Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere, Radio Sci., 45, RS5012, 1-12, (2010d).
- KLIMENKO, M.V., Klimenko, V.V., Zakharenkova, I.E., Pulinets, S.A., Zhao, B., Tsidilina, M.N., Formation mechanism of great positive TEC disturbances prior to Wenchuan earthquake on May 12, 2008, Advances in Space Research, 48(3), 488-499, (2011).
- KOMJATHY, A., *Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System*, (Doktora Tezi), University of New Brunswick, Department of

Geodesy and Geomatics Engineering, (1997).

KÖROĞLU, O., Arıkan, F., Türel, N., Aysezen, M.Ş., Lenk, O., Aktuğ, B., TUSAGA TEİ Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Kestirimi, 18. IEEE Sinyal İşlemeleri ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2010, 22-24 Nisan 2010, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, (2010).

KÖROĞLU, O. TUSAGA ve TUSAGA-Aktif Verileri ile Toplam Elektron İçeriğinin İstatistiksel Analizi, (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).

KUNITSYN, V. E., Tereshchenko, E. D., Ionospheric Tomography, Springer-Verlag, Berlin, (2003).

LANYI, G.E., Roth, T., A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations, Radio Science, 23, 483-492, (1988).

LEICK, A., GPS Satellite Surveying, 3. Basım, John Wiley and Sons, New York (2004).

MOON, Y., Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National and Regional GPS Networks in Canada, (Yüksek Lisans Tezi), The University of Calgary, (2004).

NAYİR, H., Yer Küresel Konumlama Sistemi Kullanılarak Toplam Elektron İçeriği Kestirimi, (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).

NAYİR, H., Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C. B., Total Electron Content Estimation with Reg-Est, J. Geophys. Res., 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459, (2007a).

NAYİR, H., Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C. B., IONOLAB tekniği ile İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi, 15. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2007 Bildiriler CDsi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2007b).

NAYİR, H., Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C. B., GPS/TEC Estimation with IONOLAB Method, Proceedings of RAST-2007, Recent Advances in Space Research, Harbiye, İstanbul, (2007c).

NAYİR, H., Arıkan, F., Sezen, U., Arıkan, O., Erol, C. B., Instrumental Bias Estimation Using Single Station GPS/TEC, Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007 , Institute of Atmospheric Physics, Prag, Çek Cumhuriyeti, (2007d), p: 63.

OLEA, R. A., Geostatistics For Engineers and Earth Scientists, Kluwer Academic Publishers, Londra (1999).

ONDOH, T., Seismo-Ionospheric Phenomena, Adv., Space Res., 26(8), 1267-1272, (2000).

- ÖZİLHAN, B.E., Kuzey Anadolu Fay Hattı Depremlerinin ve İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimlerinin Olası İlişkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, (2010).
- PULINETTS, S., Legen'ka, A.D., Spatial-Temporal Characteristics of Large Scale Disturbances of Electron Density Observed in the Ionospheric F-Region before Strong Earthquakes, *Cosmic Research*, 41(3), 221-229, (2003).
- PULINETTS, S., Ionospheric Precursors of Earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications, *TAO*, 15(3), 413-435, (2004).
- PULINETTS, S., Ouzounov, D., Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model-An unified concept for earthquake precursors validation, *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 371-382, (2011).
- RISHBETH, H., Ionoquakes: Earthquake Precursors in the Ionosphere?, *Eos*, 87(32), 316, (2006).
- RINEX, GPS Measurements in RINEX format. <http://igs.ensg.ign.fr>.
- RIZOS, C., GPS Tutorial, (1999),
http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/tutorials.
- SAHİN, O., Sezen, U., Arıkan, F., Arıkan, O., İyonosfer F2 tabakası parametrelerinin eniyileme yolu ile IRI modeli ve IONOLAB TEİ kestirimleri kullanılarak belirlenmesi, IEEE 19. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2011 Bildiriler CDsi, 20-22 Nisan 2011, Kemer, Antalya, Hacettepe Üniversitesi, (2011a), pp. 630-633.
- SAHİN, O., Sezen, U., Arıkan, F., Arıkan, O., Determining F2 layer parameters via optimization using IRI-Plas model and IONOLAB TEC estimations, Proceedings of RAST-2011, Recent Advances in Space Research, 9-11 Haziran 2011, Harbiye Askeri Müze, Hava Harb Okulu, İstanbul, (2011b).
- SAHİN, O., Sezen, U., Arıkan, F., Arıkan, O., Optimization of F2 layer parameters using IRI-Plas and IONOLAB TEC, XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science, 13-20 Ağustos 2011, Lütfi Kırdar Konferans ve Sergi Merkezi, İstanbul, (2011c).
- SAPAZ, M.S., Arıkan, F., Gulyaeva, T., TUSAGA-Aktif ağı için iyonküre delme noktalarının incelenmesi, IEEE 20. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2012 Bildiriler CDsi, SİU 2012, Özyeğin Üniversitesi, 18-20 Nisan 2012, Lykia-World, Fethiye, Muğla, (2012a).

- SAPAZ, M.S., Arıkan, F., Gulyaeva, T., Investigation of Ionospheric Pierce Points for TNPNG-Active Network and its Magnetic Conjugate Coordinates, MASFOR 2012, Boğaziçi Üniversitesi, 21-23 Haziran 2012, İstanbul, (2012b).
- SAYIN, I., Arıkan, F., Arıkan, O., Kriging ve Rassal Alan Öncülü ile Sentetik Toplam Elektron İçeriği Aradeğerlemesi, 15. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2007 Bildiriler CDsi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2007a).
- SAYIN, I., Arıkan, F., Arıkan, O., Synthetic TEC Mapping with Ordinary and Universal Kriging, Proceedings of RAST-2007, Recent Advances in Space Research, Harbiye, İstanbul, (2007b).
- SAYIN, I., Arıkan, F., Arıkan, O., 2007b, Regional Space-Time Interpolation of GPS-TEC with Kriging, Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007, Institute of Atmospheric Physics, Prag, Çek Cumhuriyeti, (2007c), pp: 70-71.
- SAYIN, I., Gürün, M., Yılmaz, A., Arıkan, F., Arıkan, O., Comparison of Kriging, Random Field Priors and Neural Network on Synthetic TEC Data, Proceedings of Turkish National Geodetic Commission, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Scientific Meeting 2007 on Monitoring and Modeling of the Ionosphere and Troposphere, METU, Ankara (2007d). pp: 22-27.
- SAYIN, I., Kriging ve Rassal Alan Öncülü ile Toplam Elektron İçeriği Haritalaması, (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2008).
- SAYIN, I., Arıkan, F., Gulyaeva, T., Regional Mapping of Total Electron Content with Kriging and Random Field Priors, IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İTÜ, İstanbul, (2008a), pp: 224-232.
- SAYIN, I., Arıkan, F., Arıkan, O., Regional TEC Mapping with Random Field Priors and Kriging, Radio Sci., 43, doi:10.1029/2007RS003786, (2008b).
- SAYIN, I., Akdoğan, K. E., Arıkan, F., Investigation of optimum TEC monitoring, Proceedings of RAST-2009, Recent Advances in Space Research, Harbiye, İstanbul, (2009).
- SAYIN, I., Arıkan, F., Akdoğan, K. E., Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring, Radio Sci., 45, RD6018, doi:10.1029/2009RS004316, (2010).
- SCHAER, S., Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System, (Doktora Tezi), University of Bern, Astronomical Institute, (1999).
- SEZEN, U. and Arıkan, F., A Novel Algorithm for Cycle Slip Detection and Repair,

European Geophysical Union, EGU General Assembly 2012, 22-27 Nisan 2012, Viyana, Avusturya, (2012).

SEZEN, U., Sahin, O., Arıkan, F., Arıkan, O., Estimation of hmF2 and foF2 Communication Parameters of Ionosphere F2-Layer Using GPS Data and IRI-Plas Model, IEEE Trans. Antennas and Propagation dergisine sunuldu, Ekim (2012).

ŞAHİN, O., İyonküre HMF2 ve FOF2 İletişim Parametrelerinin YKS Verileri ve IRI Modeli Kullanılarak Kestirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, (2011).

TASCIONE, T. F., Introduction to the Space Environment, Orbit Book Company, Florida, (1988).

TOKER, C., Gokdag, Y.E., Arıkan, F. , and Arıkan, O., Application of Modified Particle Swarm Optimization Method for Parameter Extraction of 2-D TEC Mapping, European Geophysical Union, EGU General Assembly 2012, 22-27 Nisan 2012, Viyana, Avusturya, (2012).

TSAI, L.C., Tsai, W.H, Schreiner, W.S., Berkey, F.T., Liu, J.Y., Comparisons of GPS/MET Retrieved Ionospheric Electron Density and Ground Based Ionosonde Data, *Earth Planets Space*, 53, 193-205, (2001).

TSUI, J.B., Fundamentals of Global Positioning System Receivers, John Wiley and Sons, New York, (2000).

TÜREL, N., Aktaş, E., Arıkan, F., TEİ İstatistikleri ve Korrelogram Uygulamaları, 15. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2007 Bildiriler CDsi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2007a).

TÜREL, N., Aktaş, E., Arıkan, F., Correlogram and PDF estimation for Total Electron Content, Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007 , Institute of Atmospheric Physics, Prag, Çek Cumhuriyeti, (2007b), pp: 81-82.

TÜREL, N., Arıkan, F., Aktaş, E., Ionolab-Tec & IRI-Tec Statistics and Regional Correlogram Applications, Proceedings of Turkish National Geodetic Commission, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Scientific Meeting 2007 on Monitoring and Modeling of the Ionosphere and Troposphere, METU, Ankara, (2007c), pp: 82-86.

TÜREL, N., Aktaş, E., Arıkan, F., PDF Estimation for Ionolab and IRI Total Electron Content, IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İTÜ, İstanbul, (2008), pp: 209-215.

TÜREL, N., İyonosfer Katmanının Toplam Elektron İçeriğinin İzgel Güç Yoğunluğu ve

Olasılık Yoğunluk Kestirimi, (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2008).

TUREL, N., Arıkan, F., Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content, *Radio Sci.*, 45, RS6016, doi:10.1029/2009RS004345, (2010).

UĞURLU, O., IONOLAB Yöntemi ile Web Tabanlı Toplam Elektron İçeriği (TEİ) Hesaplanması ve Sunumu, (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2007).

UĞURLU, O., Sezen, Sayın, I., Web Tabanlı IONOLAB TEİ Kestirimi, 15. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2007 Bildiriler CDsi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2007a).

UĞURLU, O., Sezen, U., Alkar, A. Z., Web Based Automated Total Electron Content Computation, *Proceedings of RAST-2007, Recent Advances in Space Research*, Harbiye, İstanbul, (2007b).

UĞURLU, O., Nayir, H., Arıkan, F., Sezen, U., Alkar, A. Z., WEB Based Automated TEC Estimation with IONOLAB, *Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007*, Institute of Atmospheric Physics, Prag, Çek Cumhuriyeti, (2007c), pp: 82-83.

WACKERNAGEL, H., *Multivariate Geostatistics*, Springer-Verlag, New York, (1998).

WIELGOSZ, P., Brzezinska, D., Kashani, I., Regional Ionosphere mapping with Kriging and Multiquadric method, *Journal of Global Pos. Sys.*, 2(1), 48-55, (2003).

YAVUZ, E., Arıkan, O., Arıkan, F., Erol, C.B., Computerized Ionospheric Tomography with the IRI Model, *Abstracts Booklet of IRI-2005*, Observatori de l'Ebre, Roquetes, İspanya, (2005a), p:41.

YAVUZ, E., Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C.B., Algorithms and Basis Functions in Tomographic Reconstruction of Ionosphere Electron Density, *Proceedings of EUSIPCO'2005, 13th European Signal Processing Conference*, Antalya, (2005b).

YILDIZ, A., Arıkan, O., Arıkan, F., İyonosfer TEİ verilerinin uzay-zamansal aradeğerlemesi, *IEEE 19. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2011 Bildiriler CDsi*, 20-22 Nisan 2011, Kemer, Antalya, Hacettepe Üniversitesi, (2011), pp. 817-820.

YILMAZ, A., Akdogan, K.E., Gurun, M., Regional TEC Mapping Using Neural Networks, *Radio Sci.*, 44, RS3007, doi:10.1029/2008RS004049, (2009).

EK-1

Yüksek Lisans ve Doktora Tezlerinin Kapak Sayfaları ve Özleri

EK-2

105E171 ve 109E055 Projeleri kapsamında 2009 yılından buyana yayınlanan makaleler, ulusal ve uluslararası konferans ve çalıştaylarda sunulan ve yayınlanan bildiriler ve hakem incelemesinde olan makaleler

**DEPREM İLE İYONKÜREDEKİ TOPLAM ELEKTRON
İÇERİĞİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI**

Seçil KARATAY

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet AYDOĞDU (F.Ü.)

E₂ Danışman: Prof. Dr. Feza ARIKAN (H.Ü.)

ERİM-2010

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEPREM İLE İYONKÜREDEKİ TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİ ARASINDAKİ
İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Seçil KARATAY

04214302

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 25 Ekim 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 25 Ekim 2010

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet AYDOĞDU (Fırat Üniversitesi)

E₂ Danışmanı: Prof. Dr. Feza ARIKAN (Hacettepe Üniversitesi)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Osman ÖZCAN

Doç. Dr. Raşit ZENGİN

Yrd. Doç. Dr. Esat GÜZEL

Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÜNAL

EKİM-2010

ÖZET

Yer'in iyonküresi, uzay-havaını incelemelerinde önemli bir etkidir ve bu nedenle iyonküresinin değişkenliğinin incelenmesi, başta iyonküre fiziği ve radyo iletişimi olmak üzere birçok alanda önemlidir. İyonküreyi karakterize eden temel parametreler, yükseklik, enlem, boylam, jeomanyetik yükseklik, Güneş ışıklığı ve sismik hareketlilikle değişimler gösteren elektron yoğunluğudur. İyonküreyi karakterize eden bir diğer parametre ise atmosferde bir yol boyunca hesaplanan serbest elektronların miktarına eşit olan Toplam Elektron İçeriğidir (TEİ). TEİ ölçümleri, uzay havasındaki değişimleri sergilemeye olanak sağlar. Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), yeryüzüne dağılmış istasyon ağlarıyla yerküresel olarak TEİ kestirimleri yapmak için çok yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Bu çalışmada, Japonya ve Çin'de konumlanmış sekiz YKS istasyonundan ve Türkiye'de konumlanmış on bir TUSAGA-Aktif YKS istasyonundan elde edilen TEİ verileri, Çapraz İlimi Katayısı (ÇİK), simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD), L2-Norma (L2N), kayan pencere istatistiksel analizi ve Dağılımın İraksaklığı (DI) ile Dağımlar Farkı (DF) yöntemleri kullanılarak iyonküresinin sakin günlerini, şiddetli jeomanyetik fırtınaların yaşandığı günlerini ve güçlü depremlerin yaşandığı günlerini kapsayan üç dönem için karşılaştırılmıştır. Buna göre, birbirine 340 km mesafe alanında bulunan istasyonlar için KLD ve L2N yönteminin sismik hareketliliği, jeomanyetik bozulmadan ve sakin durumlardan ayrabildiği gözlenmiştir. Her bir istasyonun üç dönem için elde edilen TEİ değerleri, ÇİK, KLD ve L2N yöntemleri kullanılarak ortalama bir sakin günde elde edilen TEİ değeriyle karşılaştırıldığında sadece KLD ve L2N yöntemlerinin deprem merkezine en fazla 150 km uzaklıkta olan istasyonlar için sismik hareketliliğin neden olduğu bozulmayı seçebildiği görülmüştür. Her bir istasyonun üç dönemi için elde edilen TEİ değerleri ardışık günler arasında karşılaştırıldığında ise, ÇİK, KLD ve L2N yöntemlerinin üçtününde iyonküredeki jeomanyetik bozulmayı çok iyi seçebildiği gözlenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında kayan pencere istatistiksel analizi kullanılarak TEİ değerlerinin kestirilen değişinti sınırları her bir istasyon ve üç dönem zaman aralığı için hesaplanmıştır ve ÇİK, KLD, L2N yöntemlerinin bu analiz yöntemiyle iyonküredeki bozulmaları seçmek için kullanılabilir yöntemler olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İyonküre, Toplam Elektron İçeriği, Deprem, Jeomanyetik Bozulma, Kullback-Leibler Mesafesi, L2-Norma, Yerküresel Konumlama Sistemi.

**KUZEY ANADOLU FAY HATTI
DEPREMLERİNİN
VE
İYONOSFER TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİ
KESTİRİMLERİNİN
OLASI İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF POSSIBLE RELATIONSHIPS
BETWEEN
NORTH ANATOLIAN FAULT ZONE EARTHQUAKES
AND
IONOSPHERE TOTAL ELECTRON CONTENT
ESTIMATES**

BARAN ERSİN ÖZİLHAN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim–Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2010

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Orhan ARIKAN

Üye : Prof. Dr. Feza ARIKAN

Üye : Doç. Dr. Emre AKTAŞ

Üye : Doç. Dr. Cenk TOKER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Umut SEZEN

ONAY

Bu tez, Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından 04/06/2010 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca .../.../2010 tarihinde kabul edilmiştir.

Kuzey Anadolu Fay Hattı Depremlerinin ve İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimlerinin Olası İlişkilerinin İncelenmesi

Baran Ersin Özilhan

ÖZ

İyonosfer, yeryüzünden 60 - 1100 km yükseklikte bulunan ve güneş ışınları ile iyonize olmuş gazlardan oluşan atmosfer tabakasıdır. İyonosfer uydu haberleşme sistemleri ve kısa dalga (KD) haberleşme sistemleri için büyük öneme sahiptir. İyonosferin karakteristiğini ifade eden önemli parametrelerden birisi güneş ışınımıyla değişim gösteren elektron yoğunluğunun bir fonksiyonu olan Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. Son 10 yılda hızla gelişen ve sivil kullanıma açılan Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), TEİ kestirimi için doğrudan ve fazla maliyet gerektirmeden kullanılabilir. F. Arıkan, C. B. Erol ve O. Arıkan tarafından geliştirilen Düzgünleştirilmiş TEİ Kestirim Yöntemi (D-TEİ) ile 10°'nin üstünde yükseklik açısına sahip uydulardan alınan 30 saniye çözünürlüğündeki ölçümler kullanılarak gürbüz ve yüksek çözünürlüklü TEİ kestirimi yapılabilir.

Bu tezde Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde meydana gelen bazı depremlerin çevresindeki Yerküresel Konumlama Sistemi istasyonlarından elde edilen düşey toplam elektron içeriği verilerine çapraz ilinti katsayısı, Kullback-Leibler Mesafesi, ve L_2 -Normu uygulanarak toplam elektron içeriği kestirimlerinin olası ilişkisi incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: İyonosfer, Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), Kuzey Anadolu Fay Hattı, Toplam Elektron İçeriği, Çapraz İlinti Katsayısı, Kullback-Leibler Mesafesi, L_2 -Normu

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Umut SEZEN, Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

**İYONKÜRE HMF2 VE FOF2 İLETİŞİM PARAMETRELERİNİN
YKS VERİLERİ VE IRI MODELİ KULLANILARAK
KESTİRİLMESİ**

**ESTIMATION OF HMF2 AND FOF2 COMMUNICATION
PARAMETERS OF IONOSPHERE USING GPS DATA AND
IRI MODEL**

OKTAY ŞAHİN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır

2011

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği
ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof. Dr. Orhan ARIKAN

Dye (Danışman) :
Yrd.Doç.Dr. Umut SEZEN

Dye :
Prof. Dr. Feza ARIKAN

Dye :
Doç.Dr. Cenk TOKER

Dye :
Doç.Dr. Emre AKTAŞ

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/..../..... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/..../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof.Dr.
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

İYONKÜRE HMF2 VE FOF2 İLETİŞİM PARAMETRELERİNİN YKS VERİLERİ VE IRI MODELİ KULLANILARAK KESTİRİLMESİ

Oktay Şahin

ÖZ

Yüksek frekans (HF) dalgalarının yayılmasında en önemli İyonküre tabakasının F2 tabakası olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, Uluslararası Referans İyonküre (IRI) modelinin enyilenebilir parametrelerinden olan F2 tabakasının yüksekliği (hmF2) ve kritik frekansının (foF2), İyonkürenin Toplam Elektron İçeriği (TEI) yapısı ile ilintili parametrik tanım aralığında incelenmiş ve bu iki parametre İONOLAB-TEC kestirimleri de kullanılarak enyilemeye tabi tutulmuştur. Bu parametrelerin enyillenmesinin ve İONOLAB-TEC verilerinin modele harici olarak verilmesinin model enyileme başarımını nasıl etkilediği ile ilgili sonuçlar elde edilmiş ve enyileme algoritmasının başarımı, günlük (24 saat) ile saatlik TEI verilerinin işlenmesi durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Saatlik veri kullanılmasının çok daha düşük hatalı sonuçlar ürettiği ve enyileme modelinde İONOLAB gözlem verilerini kullanmadan da başarılı TEI kestirimleri ve ilgili kestirim parametrelerinin bulunabildiği sonucuna varılmıştır. Çalışma içerisinde uygun model seçimi ve konfigürasyon ile kestirimi yapılan parametreler IRI modeline verilmiş, model çıktıları üretilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Yapılan bütün incelemeler model başarımının dünya üzerinde farklı bölgelerde nasıl olduğunun karşılaştırılması amacıyla seçili sakin günde alt, orta ve üst enlem bölgeleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Sonuçlar İyonosonda verileriyle karşılaştırılarak hata normunun kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Bu şekilde İyonkürenin daha gerçekçi elektrikselsel yapısına ulaşılabilmiştir. Son olarak, model kestirim parametreleri ve zamanla değişimleri Türkiye üzerindeki aktif YKS ağı üzerinde incelenmiş ve Türkiye üzerindeki İyonosfer yapısı daha iyi belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler : İyonküre, F2 Katmanı, Toplam Elektron İçeriği, IRI Modeli, IRI-Plus, İONOLAB, hmF2, foF2, Enyileme

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

**TUSAGA VE TUSAGA-AKTİF AĞI VERİLERİ İLE
TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİNİN İSTATİSTİKSEL
ANALİZİ**

**STATISTICAL ANALYSIS OF TOTAL ELECTRON
CONTENT USING TNPNG AND TNPNG-ACTIVE
NETWORK**

OZAN KÖROĞLU

Bartın Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yürütme Kurulu
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngörülmesi
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2012

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof. Dr. Gülbin DURAL

Üye (Danışman) :
Prof. Dr. Feza ARIKAN

Üye :
Doç. Dr. Cenk TOKER

Üye :
Doç. Dr. Atilla YILMAZ

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Umut SEZEN

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/..../2012 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/..../2012 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

..../..../2012

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

TUSAGA VE TUSAGA-AKTİF VERİLERİ İLE TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Ozan KÖROĞLU

ÖZ

İyonküre, güneş ışınları ile iyonize olmuş gazlardan oluşan, yeryüzünden 60 ile 1000 km yükseklikte bulunan bir havaküre katmanıdır. Kısa Dalga ve uydu haberleşmesi açısından büyük öneme sahip olan bu katman güneş ışıını, jeomanyetik, yerçekimsel, ve sismik etkenlere bağılı olarak uzayda ve zamanda farklı düzeylerde değişkenlik gösterir. İyonküre değişkenliğini anlamakta kullanılan en önemli parametrelerin başında Toplam Elektron İçeriği (TEİ) gelmektedir. Bu çalışmada, Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti üzerindeki iyonkürenin TEİ kestirimlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonları (OYF) ve geniş anlamda durağanlık (GAD) süreleri belirlenmiştir. Türkiye ve çevresi için ilk kez yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde istatistiksel tanımlamalar elde edilmiştir. TEİ değerleri, iyonkürenin orta enlem bölgesinde yer alan Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı (TUSAGA) ve TUSAGA-Aktif ağı Yerkişresel Konumlama Sistemi (YKS) istasyonlarının verilerine İONOLAB-TEC yöntemi uygulanarak kestirilmiştir. Güneş döngüsünü ve istasyon konumlarını dikkate alarak veri seti yıllara, ve enlem ve boylamda $2^{\circ} \times 3^{\circ}$ bölgelere ayrılarak saatlik olarak incelenmiştir. Her yıl, her bölge ve her saat için temsili OYF belirlenmiştir. Tipik olarak Lognormal ve Weibull olarak gözlenen dağılımların ortalaması ve standart sapmalarının 24 saatlik gün-tün ve 11 yıllık güneş döngülerinin yönsemelerini izlediği ortaya konmuştur. 2001-2011 yılları için tüm istasyonlarda GAD süreleri 2,5 ile 12,5 dakika arasında değişmiş ve ortanca değer 7,5 dakika olarak kabul edilmiştir. GAD sürelerinde güneşin doğuşu ve batışı sırasında kısalmalar, güneşin tepede olduğu saatlerde artışlar gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağları ile Türkiye ve KKTC üzerindeki iyonkürenin istatistiksel özelliklerini belirlemede kullanılabileceği ortaya konmuştur. OYF ve GAD sürelerini belirleyen algoritma otomatik hale getirilmiş ve İONOLAB grubuna sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar gelecek dönemlerde yapılacak iyonküre modellemesi ve otomatik TEİ harita güncellemesi çalışmalarında kullanılacaktır.

Anahtar Kelimeler: İyonküre, TEİ, İstatistiksel Analiz, TUSAGA, TUSAGA-Aktif
Danışman: Prof.Dr. Feza ARIKAN, Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content

N. Turel¹ and F. Arikan²

Received 25 December 2009; revised 29 June 2010; accepted 7 October 2010; published 8 December 2010.

[1] Ionospheric channel characterization is an important task for both HF and satellite communications. The inherent space-time variability of the ionosphere can be observed through total electron content (TEC) that can be obtained using GPS receivers. In this study, within-the-hour variability of the ionosphere over high-latitude, midlatitude, and equatorial regions is investigated by estimating a parametric model for the probability density function (PDF) of GPS-TEC. PDF is a useful tool in defining the statistical structure of communication channels. For this study, a half solar cycle data is collected for 18 GPS stations. Histograms of TEC, corresponding to experimental probability distributions, are used to estimate the parameters of five different PDFs. The best fitting distribution to the TEC data is obtained using the maximum likelihood ratio of the estimated parametric distributions. It is observed that all of the midlatitude stations and most of the high-latitude and equatorial stations are distributed as lognormal. A representative distribution can easily be obtained for stations that are located in midlatitude using solar zenith normalization. The stations located in very high latitudes or in equatorial regions cannot be described using only one PDF distribution. Due to significant seasonal variability, different distributions are required for summer and winter.

Citation: Turel, N., and F. Arikan (2010), Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content, *Radio Sci.*, 45, RS6016, doi:10.1029/2009RS004345.

1. Introduction

[2] Ionosphere is the uppermost part of atmosphere that is ionized primarily by solar radiation. Ionosphere lies approximately 60 km to 1000 km from the surface of the Earth [Budden, 1985]. The ionosphere enables civilian and military communication over very long distances in HF (3–30 MHz) band. The higher-frequency (L, S and X band) satellite signals are also affected by the ionosphere in both amplitude and phase. The inhomogeneous and dispersive multipath channel structure of the ionosphere is both spatially and temporally varying. In order to properly characterize the ionospheric channel, the structure of the ionosphere and the variability characteristics should be thoroughly investigated. The ionosphere varies with daily, and seasonal, periodicities and also with 11 year sunspot cycle. Solar activities, geo-

magnetic storms, traveling and sudden ionospheric disturbances (TID and SID) can also be counted among other causes of ionospheric variability. Geographically, the ionosphere shows different characteristics at equatorial, midlatitude and high-latitude regions. At midlatitude region the ionosphere is considerably calmer and less variable than other regions.

[3] The ionospheric parameters that are investigated for the characterization of ionospheric variability can be listed as maximum electron density (N_{max}), maximum usable frequency (MUF), critical frequencies of ionospheric layers (f_oE , f_oF1 , f_oF2), the F2 peak height (h_mF2) and total electron content (TEC). In the literature, mostly the mean, standard deviation and the median values of these measured parameters are used to observe ionospheric variability. Generally, the measured or calculated parameter values are sparse in space and in time. Moreover, hourly, daily and monthly variations are represented by daily or monthly mean or median value. The long-term statistics of the ionosphere are obtained by relative deviation [Fotiadis *et al.*, 2001], relative variability [Mosert *et al.*, 2003], upper interquartile, lower interquartile and interquartile difference [Zhang *et al.*, 2004]. Although these statistics provide a general trend

¹Aselsan Inc., Ankara, Turkey.

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey.

structure of the ionosphere over daily, monthly, seasonal, yearly and 11 year solar cycle periods, they are insufficient for ionospheric channel characterization and determination of within-the-hour variability.

[4] A distinctive parameter that inherently contains the variability of the ionosphere is TEC. TEC is defined as the line integral of electron density along a ray path or as a measure of the total number of electrons along a path of the radio wave [Budden, 1985; Hargreaves, 1992]. The unit of TEC is given in TECU where $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{el/m}^2$. TEC is a derived quantity and it is a function of electron density and the chosen ray path. In recent years, Global Positioning System (GPS) dual frequency signals are widely used to estimate both regional and global TEC values [Arikan *et al.*, 2003]. In GPS-TEC computation, TEC on the slant ray path from the satellite to the receiver is called the slant TEC (*STEC*). When the *STEC* values are projected to the local zenith at the ionospheric pierce point, assuming the thin shell model of the ionosphere with a mapping function, the computed TEC value is called the vertical TEC (*VTEC*). The height of the thin shell model is a determining parameter in the mapping function and it is usually taken as a variable between 350 km and 450 km by various researchers. In this study, the *VTEC* over the receiver station is denoted by the term TEC.

[5] In nature, the measured physical variability can be categorized as a random field (RF) or a stochastic process (SP) that describe the distribution of collective outcomes of a continuous random function where the observations are obtained at all points along one or more spatial coordinate axis and/or the time axis [Vanmarcke, 1983]. Ionosphere with its inherent spatiotemporal variability can be considered as a random field whose proper statistical behavior should be characterized as a probability density function (PDF) [Sayin *et al.*, 2008; Vanmarcke, 1983; Papoulis, 1991]. PDF of a random variable is a function which describes the density of probability at each point in the sample space [Proakis, 1995]. The statistical behavior of communication channels are generally characterized with their PDF and n^{th} order moments, along with ergodicity, stationarity, correlation and covariance functions and power density spectrum [Proakis, 1995].

[6] The empirical probability density function of TEC can be useful in establishing a reliable link between the physical nature and temporal variability of the ionosphere for the L band (satellite) and HF band ionospheric communication channels. In this study, GPS-TEC are computed for stations located at high-latitude, midlatitude and equatorial regions for a half solar cycle period of 6 years. Empirical probability density distributions (or histograms) of TEC are computed from 0000 LT to 2400 LT in 1 h intervals. Five different analog PDFs, namely, Rayleigh voltage, Rayleigh power, Weibull, lognormal and K distribution are compared for best fit to the hourly empirical TEC distribution using maximum likelihood

ratio method. General characteristics of PDF-TEC for midlatitude, high-latitude and equatorial regions are investigated for representative behavior. Being the first study of its kind, the results demonstrated that PDF-TEC can be used in characterization of temporal within-the-hour variability for all midlatitude, equatorial and most of high-latitude stations.

[7] In section 2, the probability density functions and maximum likelihood ratio method are summarized. In section 3, the results are provided for PDF estimates for three different geomagnetic regions.

2. PDF Estimation Method

[8] The purpose of this section is to derive a parametric test to identify the distribution among the Rayleigh, lognormal, Weibull and K distribution families which best fits to the hourly empirical distribution of TEC.

[9] The analog PDFs can be roughly categorized into two groups. One group uses only one parameter to describe the PDF and the second group consists of multiparameter distributions. In this study, we have chosen from both of the above mentioned groups to have a wide selection to represent the tail and center probability distribution of TEC. The chosen distributions can be listed as Rayleigh voltage (RV), Rayleigh power (RP), Weibull (W), lognormal (LN) and K distribution (K) as follows for Rayleigh voltage

$$p(x, \underline{\theta}_{RV}) = \frac{2x}{\alpha} \exp\left\{-\frac{x^2}{\alpha}\right\}, \quad (1)$$

for Rayleigh power

$$p(x, \underline{\theta}_{RP}) = \frac{1}{\mu} \exp\left\{-\frac{x}{\mu}\right\}, \quad (2)$$

for lognormal

$$p(x, \underline{\theta}_L) = \frac{1}{x(\pi\sigma^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{\sigma^2}\right\}, \quad (3)$$

for Weibull

$$p(x, \underline{\theta}_W) = n \frac{x^{n-1}}{\alpha} \exp\left\{-\frac{x^n}{\alpha}\right\}, \quad (4)$$

and for K distribution

$$p(x, \underline{\theta}_K) = \frac{2b}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{bx}{2}\right)^\nu K_{\nu-1}(bx), \quad (5)$$

where $0 \leq x < \infty$ [Papoulis, 1991; Arikan, 1998]. In the above equations, $\underline{\theta}_{RV} = [\alpha]$ is the parameter vector of

Table 1. GPS Stations Used in This Study

Station ID	Region	Location	Geographic (°E, °N)	Geomagnetic (°E, °N)
areq	E	Arequipa, Peru	288.50, -16.46	359.69, -3.60
ntus	E	Singapore, Rep. of Singapore	103.67, 1.34	175.10, -7.58
mbar	E	Mbarara, Uganda	30.73, -0.60	102.35, -10.22
mali	E	Malindi, Kenya	40.19, -2.99	111.86, -12.42
darw	E	Darwin, Australia	131.13, -12.84	203.05, -22.38
kit3	M	Kitab, Uzbekistan	66.88, 39.14	139.09, 34.21
ankr	M	Ankara, Turkey	32.75, 39.88	104.96, 34.23
alic	M	Alice Springs, Australia	133.88, -23.67	206.91, -34.29
cedu	M	Ceduna, Australia	133.80, -31.86	207.68, -43.42
brus	M	Brussels, Belgium	4.35, 50.79	82.15, 46.98
hers	M	Hailsham, U.K.	0.33, 50.86	78.93, 47.33
lama	M	Olsztyn, Poland	20.66, 53.89	96.74, 49.89
yakt	H	Yakutsk, Russian Federation	129.68, 62.03	200.62, 56.19
kir0	H	Kiruna, Sweden	21.06, 67.87	103.66, 64.49
tro1	H	Tromsø, Norway	18.93, 69.66	103.46, 66.44
yell	H	Yellowknife, Canada	245.51, 62.48	299.39, 69.71
maw1	H	Mawson, Antarctica	62.87, -67.60	89.58, -70.18
cas1	H	Casey, Antarctica	110.51, -66.28	155.70, -80.84

Rayleigh voltage; $\underline{\theta}_{RP} = [\mu]$ is the parameter vector of Rayleigh power; $\underline{\theta}_L = [\mu \ \sigma^2]$ is the parameter vector of lognormal; $\underline{\theta}_W = [n \ \alpha]$ is the parameter vector of Weibull; $\underline{\theta}_K = [\nu \ b]$ is the parameter vector of K distribution. $\Gamma(\nu)$ denotes the Gamma function, and K_ν is the modified Bessel function. In order to obtain a fit for empirical data, the parameters of the above mentioned distributions are estimated by the maximum likelihood (ML) method and Method of Moments method as detailed in *Arikan* [1998] and *Turel* [2008].

[10] In statistics, the decision of whether an interface or statement to be accepted or rejected is called hypothesis testing. The decision boundaries in hypothesis testing are determined optimally by the likelihood ratio. For a random variable x with a PDF $p(x, \underline{\theta})$ to be observed with values $\{X_1, \dots, X_N\}$ over an unknown parameter vector $\underline{\theta}$, the likelihood function can be defined as

$$L(\underline{\theta}) = p(X_1, \underline{\theta})p(X_2, \underline{\theta}) \dots p(X_n, \underline{\theta})$$

$$L(\underline{\theta}) = \prod_{i=1}^N p(X_i, \underline{\theta}), \quad (6)$$

where the maximum likelihood estimate $\underline{\theta}_{ML}$ is the value of the parameter set that maximizes the likelihood function [*Hines and Montgomery*, 1990; *Arikan*, 1998].

[11] In order to decide for the best fitting distribution, the likelihood function ratios, R , are computed as follows for Rayleigh voltage over lognormal

$$R_{RVL} = \frac{L_{RV}}{L_L} = \frac{\prod_{i=1}^N p_{RV}(X_i, \underline{\theta}_{RV})}{\prod_{i=1}^N p_L(X_i, \underline{\theta}_L)}, \quad (7)$$

for Rayleigh power over lognormal

$$R_{RPL} = \frac{L_{RP}}{L_L} = \frac{\prod_{i=1}^N p_{RP}(X_i, \underline{\theta}_{RP})}{\prod_{i=1}^N p_L(X_i, \underline{\theta}_L)}, \quad (8)$$

for Weibull over lognormal

$$R_{WL} = \frac{L_W}{L_L} = \frac{\prod_{i=1}^N p_W(X_i, \underline{\theta}_W)}{\prod_{i=1}^N p_L(X_i, \underline{\theta}_L)}, \quad (9)$$

for K distribution over lognormal

$$R_{KL} = \frac{L_K}{L_L} = \frac{\prod_{i=1}^N p_K(X_i, \underline{\theta}_K)}{\prod_{i=1}^N p_L(X_i, \underline{\theta}_L)}. \quad (10)$$

From the above likelihood ratios, if R_{RVL} , R_{RPL} , R_{WL} and R_{KL} are all less than 1, then the decision for the best fitting distribution is lognormal. Otherwise, the distribution with the greatest likelihood ratio is picked. In section 3, hourly PDF estimates of TEC for half a solar cycle are presented.

3. Results and Discussion

[12] In this section, the PDF estimates of hourly TEC observations are obtained for high-latitude, midlatitude and equatorial regions of the ionosphere. The raw data for the GPS stations are obtained from the Web site of <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>. The geographic and geomagnetic coordinates and station ID's of the selected 18 GPS stations are provided in Table 1. The regions E, M and H denote equatorial, midlatitude and high-latitude stations, respectively. Both geographic and geomagnetic coordinates are provided in Table 1. The

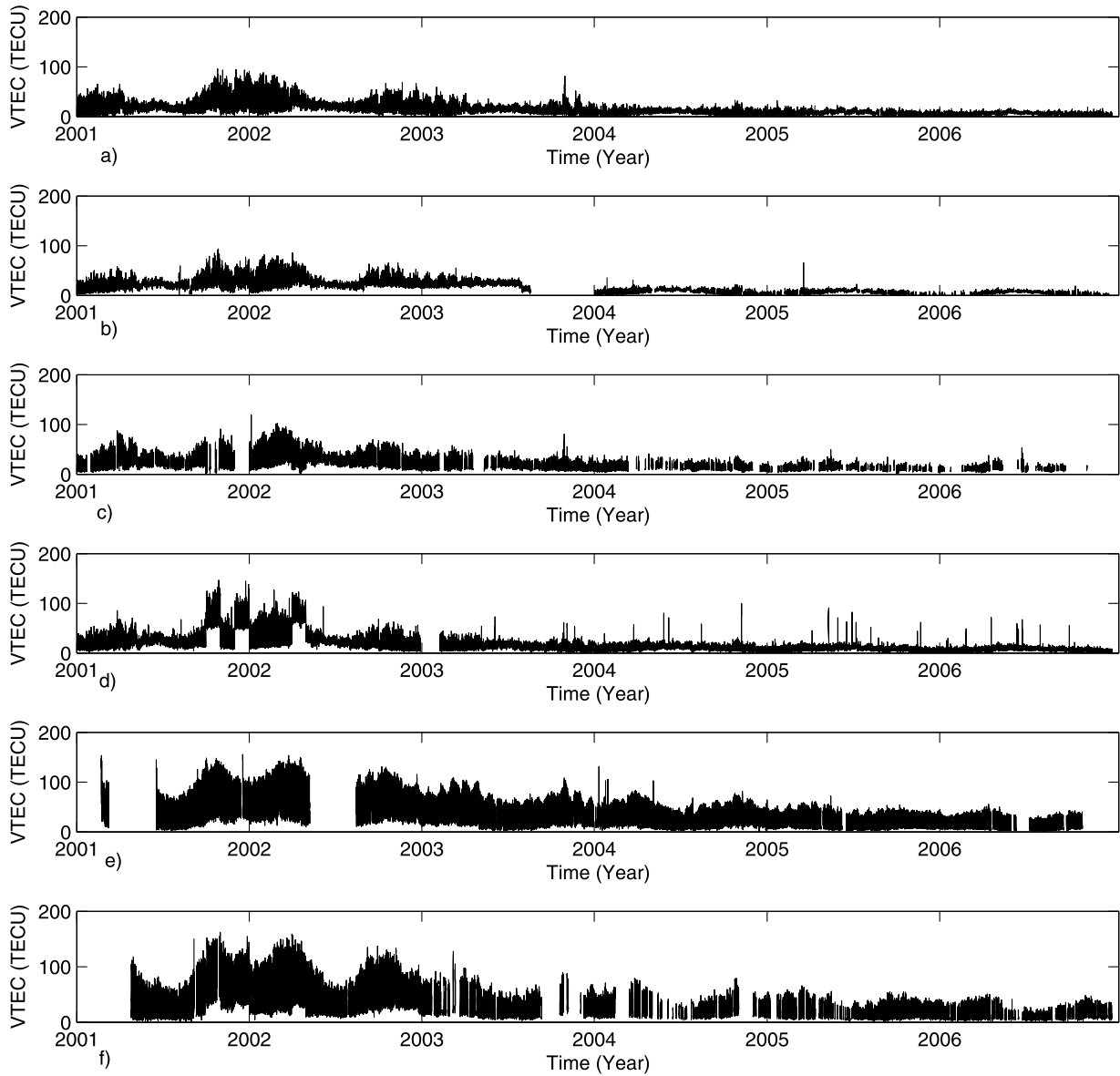


Figure 1. IONOLAB-TEC from 2001 to 2006 for (a) yell, (b) kir0, (c) ankr, (d) lama, (e) ntus, and (f) mali.

geomagnetic coordinates are obtained using Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic Coordinate System (AACGM 2006 epoch) from <http://www.wdc.rl.ac.uk/cgi-bin/wdcl/coordcnv.pl>.

[13] The raw GPS data recordings for each station is processed with Reg-Est method and TEC estimates are obtained using www.ionolab.org as IONOLAB-TEC [Arikan *et al.*, 2003; Arikan *et al.*, 2004; Arikan *et al.*, 2007; Nayir *et al.*, 2007]. For each GPS station in Table 1, the IONOLAB-TEC values are computed for

the half solar cycle of 2001 to 2006, where 2001 and 2006 correspond to solar maximum and solar minimum, respectively. Since the primary source of ionization is the solar radiation, TEC for equatorial stations is significantly higher than those of high-latitude stations. The value of TEC decreases for each station with approaching solar minimum. An example of this behavior is provided for some stations in Figure 1. In Figures 1a and 1b, two high-latitude stations, namely, yell and kir0 are provided. In Figures 1c and 1d, IONOLAB-TEC values for ankr

and lama, both midlatitude stations, are presented, respectively. Two examples for equatorial stations, ntus and mali are provided in Figures 1e and 1f, respectively. The variation of TEC values from solar maximum to solar minimum and also from high-latitude to equatorial region is highly visible in Figure 1. The missing data in Figure 1 are due to lack of GPS recordings.

[14] From Figure 1, the general cyclic trend of the ionosphere can be observed. In order to obtain a statistical description of TEC, IONOLAB-TEC within 24 h are grouped and sorted into histograms for each station. Grouping TEC into 4 hourly, 2 hourly, 1 hourly and half-hourly periods are investigated for parameter estimation and distribution optimization. It is observed that 1 hourly data intervals are optimum in terms of capturing the variability. Thus, experimental histograms of TEC data are obtained from 0000 LT to 2400 LT with 1 h intervals for each station. An example of these histograms for six different stations are plotted with a solid line in Figure 2.

[15] For each histogram (for each station and each hour), the optimum parameter values of all PDFs and the likelihood ratios provided in equations (7)–(10) are computed. The best fitting PDF is chosen as discussed in section 2. An example of the optimum distributions and their parameter values are provided in Table 2. An example of best fitting PDF estimates are provided in Figure 2 with dashed line. The corresponding optimum distribution parameter sets are given in Table 2, and likelihood ratios that are used in the decision are provided in Table 3. It is observed that for some stations and for some hours, the optimum PDF with selected parameters provide an excellent representation of the underlying experimental histogram. For example, for the stations and hours given in Figures 2a, 2c, 2d and 2e, the optimum distribution is lognormal and the representation of the histograms is very successful. When all stations and intervals within 24 h are considered, it is observed that, generally the TEC values are distributed as lognormal. Except ntus, areq, and cedu, all equatorial and midlatitude stations, and maw1 and yakt as high-latitude stations are distributed as lognormal for all hours. Yet, for stations that lie in high-latitude or equatorial regions where TEC values exhibit higher variability within the solar cycle, none of the PDFs studied in this paper may provide a proper fit. A most interesting histogram is obtained in Figure 2b for kir0 station for the time interval 0700 to 0800 LT. It seems that there is a double peak for this high-latitude station which may be due to seasonal variations around the sunrise hours. The best fitting distribution for this station and for this hour is obtained as Weibull. Yet, this optimum distribution does not totally characterize the structure of the histogram. For the equatorial station, mali, between 2000 LT and 2100 LT, in Figure 2f, the optimum PDF is lognormal. When the histograms and the optimum PDFs are investigated

together, for high-latitude and equatorial stations with higher within the hour variability, it might be better either to keep the experimental histograms or obtain a composite PDF designed for the specific station and specific hour. The Weibull distribution proved to be the best PDF for the following cases: For the equatorial station ntus, between 1300 LT and 1700 LT; for areq, between 0200–0500 LT and 1200–2000 LT; for cedu, between 0800 LT and 1800 LT; for yell, kir0, cas1 and tro1, between 0100–0600 LT and 1400–2200 LT. Yet, the chosen Weibull distributions are generally very similar to the lognormal distributions, and no great difference is observed.

[16] It is observed that the lognormal distribution is the predominant distribution for most hours for all GPS stations in all regions of the ionosphere. Therefore, it is very desirable to obtain a possible representative distribution that can provide a generic description of the probability density function for each region of the ionosphere. Using this representative distribution, the PDF of TEC in a region where there is no data available can also be obtained. With this idea in mind, the lognormal distribution with its ML parameter estimates for each station and for each hour are plotted over the optimum distributions. The ML estimates for lognormal parameters for all 18 stations and for all hours are provided in Figure 3. The mean, μ , is given in the left column and variance, σ^2 , is provided in the right column. The first row is for high-latitude stations; the second row is for midlatitude and the third row is for the equatorial stations in Local Time (LT). It is observed that the estimated parameters provide a very good description of distribution LN. The mean has its maximum value around local noon. Parameter μ for equatorial latitude stations are greater than those of other regions. The high-latitude station cas1 has the highest variability for σ^2 amongst high-latitude stations and also it has the highest geomagnetic latitude. For the station areq, the best fitting distribution is not lognormal for most hours. Therefore, neither μ nor σ^2 shows a very good agreement with other equatorial region stations.

[17] By examining Figure 3, it is decided that a representative distribution that fits to all stations in a given region can be obtained by taking median of the parameters for each hour. With the μ_m and σ_m^2 , a new lognormal distribution, p_{Lm} is computed for each region. In order to compare the representative distribution with the best fitting distribution for a given station and a given hour, we employed the Kullback-Leibler Divergence (KLD) which is defined as [Cover and Thomas, 2003]

$$D(\hat{p} \parallel \hat{q}) = \sum_{x \in X} \hat{p}(x) \log \frac{\hat{p}(x)}{\hat{q}(x)}, \quad (11)$$

where \hat{p} denotes the best fitting distribution and \hat{q} is the representative lognormal distribution with parameters μ_m

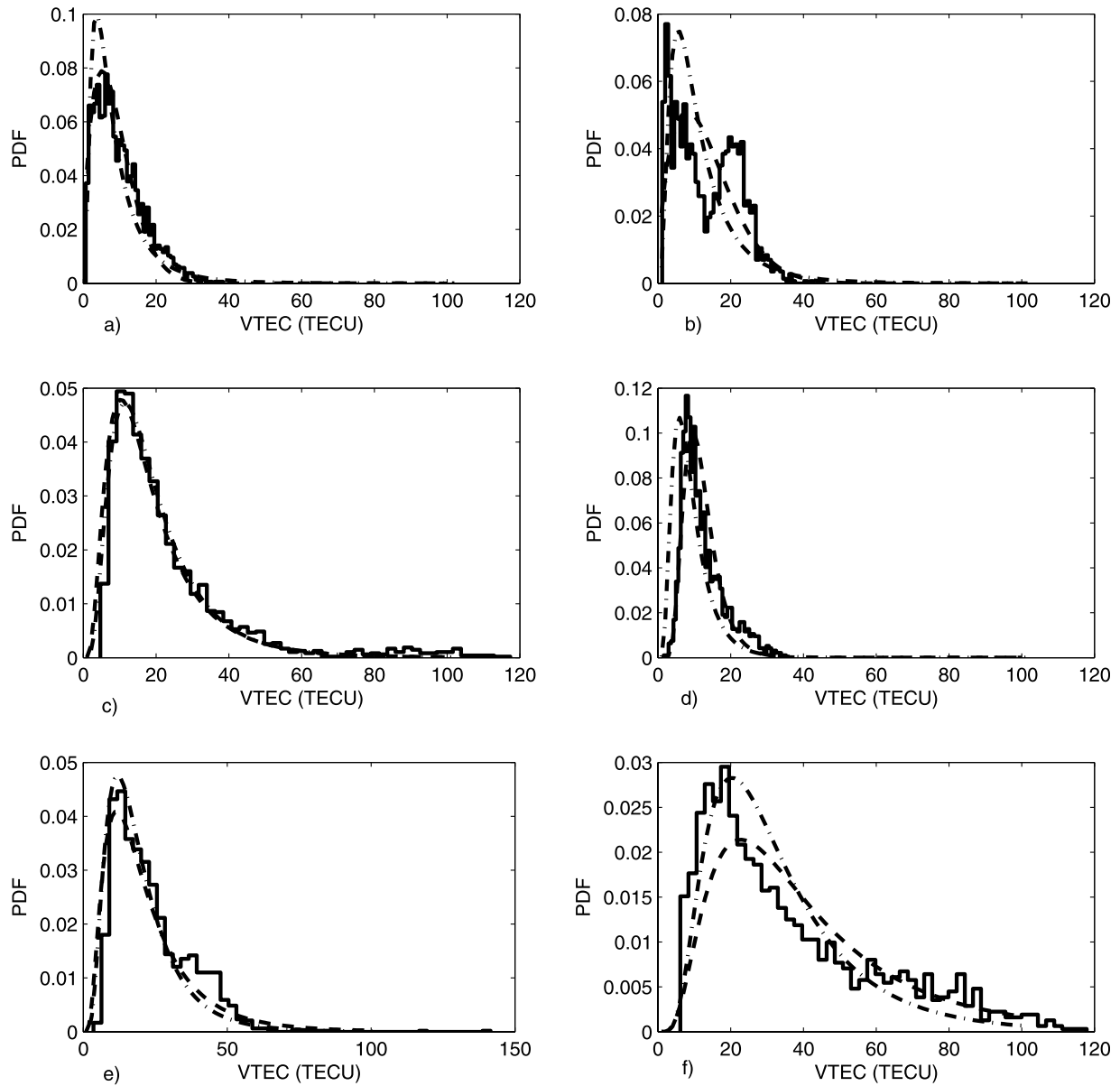


Figure 2. Hourly histograms (solid line), optimum PDF estimates (dashed line), and representative PDFs (dash-dotted line) for (a) yell (H), 0400–0500 LT; (b) kir0 (H), 0700–0800 LT; (c) lama (M), 0800–0900 LT; (d) ankr (M), 0300–0400 LT; (e) ntus (E), 0000–0100 LT; and (f) mali (E), 2000–2100 LT.

and σ_m^2 . KLD is a measure of similarity between the PDFs. If KLD of two compared PDFs is small, then the two distributions are said to be similar. In all regions, for most stations and hours, the representative PDF seems to be a satisfactory. An example of representative LN distribution is provided in Figure 2 with a dash-dotted line. The parameters of the representative LN distribution and

KLD are provided in Table 2. It is observed that even for stations that have Weibull distribution for a given hour, KLD between the optimum distribution and representative lognormal distribution is quite tolerable. Therefore, lognormal can be used as a representative distribution as an initial guess for any station and any hour.

Table 2. Optimum PDF and Representative PDF for Some Stations and Their Respective Parameters

Station	Hour (LT)	Optimum PDF Parameters	Representative PDF Parameters	KLD
yell	0400–0500	Weibull $n = 1.54, \alpha = 40.22$	Lognormal $\mu = 1.93, \sigma^2 = 0.80$	0.18
kir0	0700–0800	Weibull $n = 1.66, \alpha = 141.04$	Lognormal $\mu = 2.25, \sigma^2 = 0.73$	0.43
lama	0800–0900	Lognormal $\mu = 2.76, \sigma^2 = 0.65$	Lognormal $\mu = 2.81, \sigma^2 = 0.61$	0.01
ankr	0300–0400	Lognormal $\mu = 2.41, \sigma^2 = 0.38$	Lognormal $\mu = 2.07, \sigma^2 = 0.55$	0.84
ntus	0000–0100	Lognormal $\mu = 2.9, \sigma^2 = 0.67$	Lognormal $\mu = 2.83, \sigma^2 = 0.59$	0.04
mali	2000–2100	Lognormal $\mu = 3.56, \sigma^2 = 0.66$	Lognormal $\mu = 3.35, \sigma^2 = 0.58$	0.09

[18] Keeping the role of solar radiation in ionization process in mind, a possible normalization in TEC values according to the solar zenith angle of GPS station can be obtained according to the discussion in [Gulyaeva, 2007]. The solar zenith angle normalization of TEC can be computed as

$$\text{TEC}_n = \text{TEC} \times \frac{f(\chi)}{f(\chi_0)}, \quad (12)$$

where $f(x) = x^2 - \alpha x + \beta$ denotes a polynomial with coefficients $\alpha = 3.54$ and $\beta = 3.875$ as given in [Gulyaeva, 2007]. Here, χ is the solar zenith angle and χ_0 is the smallest value of χ that corresponds to high noon. The TEC values are normalized to TEC_n for all stations and for the period 2001 to 2006 using equation (12). Then, the experimental histograms, the optimum parameters for each PDF and best fitting probability distribution, PDF_n , are obtained as discussed in section 2. The lognormal parameters of normalized TEC are provided in Figure 4 for all stations and for all hours. Comparing Figures 3 and 4, solar zenith normalization is useful for stations that do not have large data gaps, and that have a latitude difference greater than 10° , and especially from sunrise to sunset. For example, for kit3, solar zenith normalization emphasized the missing data gaps and the best fitting lognormal distribution deviated

from those of other midlatitude stations. The problem with areq that did not fit to lognormal distribution for most hours continued even after solar zenith normalization. A very important improvement of solar zenith normalization can be observed in the lognormal parameter estimates. The variation in the parameter μ of the station with respect to its location (high latitude, mid-latitude, equatorial) is also normalized in μ_n . Thus, a representative PDF, PDF_{mn} , is computed using the median of parameters μ_n and σ_n^2 for each hour within each region. When PDF_{mn} is compared with PDF_n of each station using KLD in equation (11), it is observed that for stations that are within $\pm 5^\circ$ latitude difference from each other, solar zenith angle normalization is not necessary and PDF_{mn} and PDF_n are very similar to PDF_m and PDF , respectively. Yet, for stations that have $\pm 10^\circ$ latitude difference between each other, PDF_{mn} and PDF_n are significantly more successful in obtaining a representative PDF.

4. Conclusion

[19] The PDF is a very useful description in statistical characterization and modeling of TEC. In this study, the statistical characteristics of TEC is investigated for three geomagnetic regions of the ionosphere for the first time in literature. The TEC data is obtained using the GPS receiver stations with IONOLAB-TEC method for a half solar cycle period of 2001 to 2006. The estimated TEC value for every hour of each station is grouped and a histogram is obtained. The histograms can be considered as experimental PDFs and they are very useful in obtaining a parametric PDF for better characterization of the ionosphere. Five different PDFs are tried on the histograms in order to obtain the parameters in the maximum likelihood sense where available. Then, the best fitting parametric distribution is determined using the maximum likelihood ratio. The best fitting distributions and the estimated parameters for every station in each geographical region are compared with each other and a representative PDF is obtained. The representative distribution is compared to the individual PDFs using Kullback-Leibler Divergence as a measure for similarity or difference. The dominating effect of the sun on ioni-

Table 3. Likelihood Ratios for Some Stations

Station	Hour (LT)	$R_{R,L}$	$R_{R,L}$	R_{WL}	R_{KL}	Decision
yell	0400–0500	6.75×10^{-23}	3.43×10^{-132}	3.64×10^{12}	0	Weibull
kir0	0700–0800	5.51×10^{26}	4.83×10^{-55}	3.56×10^{54}	0	Weibull
lama	0800–0900	3.88×10^{-247}	2.86×10^{-241}	1.24×10^{-149}	0	Lognormal
ankr	0300–0400	2.48×10^{-94}	0	3.34×10^{-64}	0	Lognormal
ntus	0000–0100	2.79×10^{-44}	5.47×10^{-144}	6.39×10^{-20}	0	Lognormal
mali	2000–2100	1.11×10^{-29}	1.59×10^{-124}	1.04×10^{-14}	0	Lognormal

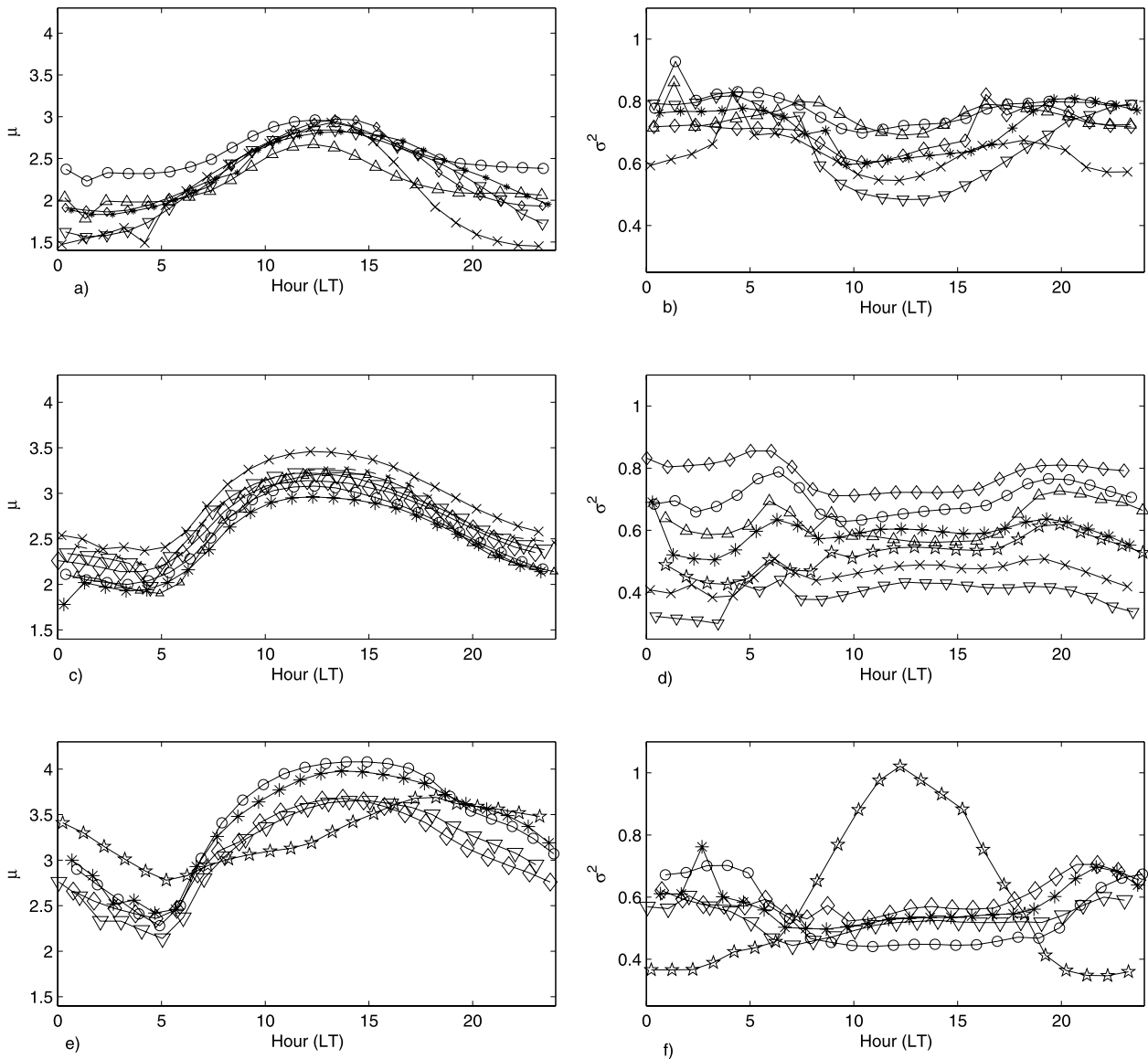


Figure 3. Estimated parameters for lognormal distribution of TEC (a) μ and (b) σ^2 for high-latitude stations, here kir0 (circles), yell (diamonds), yakt (asterisks), maw1 (triangles), cas1 (inverted triangles), and tro1 (crosses); (c) μ and (d) σ^2 for midlatitude stations, here lama (circles), hers (diamonds), brus (asterisks), ankr (crosses), kit3 (inverted triangles), cedu (triangles), and alic (stars); and (e) μ and (f) σ^2 for equatorial stations with ntus (circles), darw (diamonds), mali (asterisks), mbar (inverted triangles), and areq (stars).

zation is also observed using a solar zenith normalization of TEC for each station. Normalized PDFs and normalized representative PDFs are also obtained using the above procedure.

[20] The experimental PDFs are obtained for every hour of eighteen stations in high-latitude, midlatitude and

equatorial regions. Careful inspection of PDF estimates indicate that the PDF for stations located in midlatitude region in both hemispheres for every hour of the day are distributed as lognormal. The parameters of the lognormal distribution for stations within $\pm 5^\circ$ of latitude difference from each other are very similar. A representative

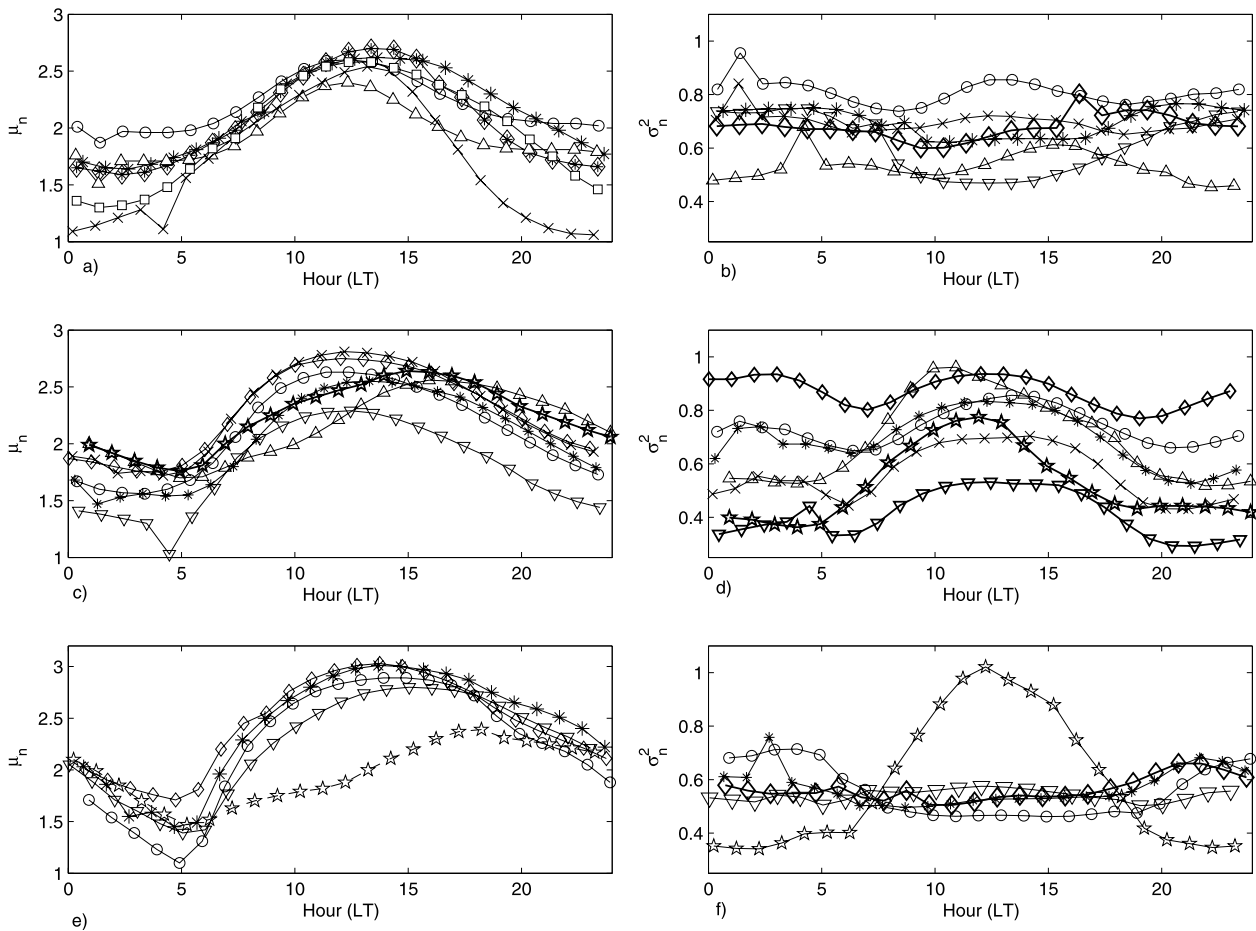


Figure 4. Estimated parameters for lognormal distribution of TEC_n (a) μ_n and (b) σ_n^2 for high-latitude stations, here kir0 (circles), yell (diamonds), yakt (asterisks), maw1 (triangles), cas1 (inverted triangles), and tro1 (crosses); (c) μ_n and (d) σ_n^2 for midlatitude stations, here lama (circles), hers (diamonds), brus (asterisks), ankr (crosses), kit3 (inverted triangles), cedu (triangles), and alic (stars); and (e) μ_n and (f) σ_n^2 for equatorial stations with ntus (circles), darw (diamonds), mali (asterisks), mbar (inverted triangles), and areq (stars).

distribution using solar zenith normalization during hours of sunlight can easily be obtained for stations that are located in midlatitude that have more than $\pm 5^\circ$ latitude difference from each other. The representative distribution for this case is also observed to be lognormal for all hours of the day. The PDFs of stations of equatorial region and high-latitude region that are close to midlatitude region are also predominantly lognormal. The stations located in very high latitudes cannot be described using only one PDF distribution. Due to significant seasonal variability, different distributions are required for summer and winter. For these cases, either a new composite PDF can be defined or the histograms can be

directly used as experimental PDFs. The PDFs of equatorial stations also vary in terms of characteristic and distribution from hour to hour. Yet, most stations are distributed lognormally and a representative distribution can be defined using solar zenith normalization due to longer hours of sunlight compared to those stations located in midlatitude and high-latitude regions.

[21] The PDFs obtained in this study will be used in regional space-time characterization of the ionosphere in terms of TEC and critical frequency mapping in the future. The hourly statistical characterization of the ionosphere will also be very useful in further development of empirical yet deterministic models of the ionosphere.

[22] **Acknowledgments.** This study is supported by TUBITAK EEEAG grant 105E171.

References

- Abramowitz, M., and I. Stegun (1972), *Handbook of Mathematical Functions*, Dover, New York.
- Arikan, F. (1998), Statistics of simulated ocean clutter, *J. Electromagn. Waves Appl.*, 12, 499–526.
- Arikan, F., C. B. Erol, and O. Arikan (2003), Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *J. Geophys. Res.*, 109(A12), 1469, doi:10.1029/2002JA009605.
- Arikan, F., C. B. Erol, and O. Arikan (2004), Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period, *Radio Sci.*, 39, RS6012, doi:10.1029/2004RS003061.
- Arikan, F., O. Arikan, and C. B. Erol (2007), Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model, *Adv. Space Res.*, 39(5), 867–874, doi:10.1016/j.asr.2007.01.082.
- Budden, K. G. (1985), *The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Cover, T. M., and J. A. Thomas (2006), *Elements of Information Theory*, 2nd ed., Wiley Intersci., Hoboken, N. J.
- Fotiadis, D. N., S. S. Kouris, and B. Zolesi (2001), Preliminary results on the within-the-hour ionospheric variability, *Phys. Chem. Earth, Part C*, 26(5), 315–318.
- Gulyaeva, T. L. (2007), Proxy for the ionospheric peak plasma density reduced by the solar zenith angle, *Earth Planets Space*, 61, 629–631.
- Hargreaves, J. K. (1992), *The Solar-Terrestrial Environment*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Hines, W. H., and D. C. Montgomery (1990), *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*, 3rd ed., John Wiley, New York.
- Mosert, M., R. Ezquer, R. del V. Oviedo, C. Jadur, and S. M. Radicella (2003), Temporal variability of TEC using ground-based ionosonde data from two Argentine stations, *Adv. Space Res.*, 31(3), 645–650.
- Nayir, H., F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol (2007), Total electron content estimation with Reg-Est, *J. Geophys. Res.*, 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459.
- Papoulis, A. (1991), *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd ed., McGraw-Hill, Singapore.
- Proakis, J. G. (1995), *Digital Communications*, McGraw-Hill, Singapore.
- Sayin, I., F. Arikan, and O. Arikan (2008), Regional TEC mapping with Random Field Priors and Kriging, *Radio Sci.*, 43, RS5012, doi:10.1029/2007RS003786.
- Turel, N. (2008) Power spectral density and probability density function estimation of the total electron content of the ionosphere layer, M.Sc. thesis, Hacettepe Univ., Ankara.
- Vanmarcke, E. (1983), *Random Fields: Analysis and Synthesis*, MIT Press, London.
- Zhang, M. L., J. K. Shi, X. Wang, and S. M. Radicella (2004), Ionospheric variability at low latitude station: Hainan, China, *Adv. Space Res.*, 34(9), 1860–1868, doi:10.1016/j.asr.2004.04.005.

F. Arikan, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Beytepe, 06800 Ankara, Turkey. (arikan@hacettepe.edu.tr)

N. Turel, Aselsan Inc., Yenimahalle, 06370 Ankara, Turkey. (nturel@aselsan.com.tr)

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Tomographic reconstruction of the ionospheric electron density as a function of space and time

Onur Erturk^a, Orhan Arikan^a, Feza Arikan^{b,*}

^a *Bilkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent Ankara 06800, Turkey*

^b *Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Beytepe Ankara 06800, Turkey*

Received 23 November 2007; received in revised form 2 July 2008; accepted 18 August 2008

Abstract

Electron density distribution is the major determining parameter of the ionosphere. Computerized Ionospheric Tomography (CIT) is a method to reconstruct ionospheric electron density image by computing Total Electron Content (TEC) values from the recorded Global Positioning Satellite System (GPS) signals. Due to the multi-scale variability of the ionosphere and inherent biases and errors in the computation of TEC, CIT constitutes an underdetermined ill-posed inverse problem. In this study, a novel Singular Value Decomposition (SVD) based CIT reconstruction technique is proposed for the imaging of electron density in both space (latitude, longitude, altitude) and time. The underlying model is obtained from International Reference Ionosphere (IRI) and the necessary measurements are obtained from earth based and satellite based GPS recordings. Based on the IRI-2007 model, a basis is formed by SVD for the required location and the time of interest. Selecting the first few basis vectors corresponding to the most significant singular values, the 3-D CIT is formulated as a weighted least squares estimation problem of the basis coefficients. By providing significant regularization to the tomographic inversion problem with limited projections, the proposed technique provides robust and reliable 3-D reconstructions of ionospheric electron density.

© 2009 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Ionosphere; Ionospheric reconstruction; Computerized Ionospheric Tomography (CIT); Ground Positioning Satellites (GPS); Occultation data; Singular Value Decomposition (SVD); Voxelization

1. Introduction

Estimation of electron density distribution of the ionosphere as a function of space and time is a challenging problem due to variability in space and time. Computerized Ionospheric Tomography (CIT) is a method to reconstruct ionospheric electron density image by computing Total Electron Content (TEC) values from the earth and satellite based recorded GPS signals. Due to the multi-scale variability of the ionosphere and inherent biases and errors in the computation of TEC, CIT constitutes an underdetermined ill-posed inverse problem. GPS satellites and receivers

provide Total Electron Content (TEC) measurements along a network of lines connecting satellites to the receivers. Therefore, a line-projection relates the electron density distribution to the available measurements resulting in a tomographic set up for the estimation problem. However, the classical tomographic reconstruction techniques fail to provide reliable results with the limited number of available line-projections.

In addition, the time varying nature of the electron density distribution creates further complications. Ionospheric imaging of electron density distribution has four dimensions in latitude, longitude, altitude (height) and time. Computerized Ionospheric Tomography is of utmost interest in recent years. Various approaches for the solution of the CIT include serial expansion of electron density into two dimensional basis functions, iterative algebraic

* Corresponding author.

E-mail addresses: oarikan@ee.bilkent.edu.tr (O. Arikan), arikan@hacettepe.edu.tr (F. Arikan).

reconstruction methods, neural network and statistical analysis methods. Reconstruction of the ionosphere by computerized tomography is first studied by Austen et al. (1988) using the Algebraic Reconstruction Technique (ART) which provides a 2-D reconstruction of the ionosphere. One of the first application of ART is performed by Pryse and Kersley (1992). A major group of studies use Abel Inversion Technique in the reconstruction (Hajj and Romans, 1998; Tsai et al., 2001). The reconstructions using this technique are improved by Garcia Fernandez et al. (2003a) by using the IRI model. In a later study by Garcia Fernandez et al. (2003b), ionosonde and GPS data are used for CIT. Hansen et al. (1997) applied computerized tomography using Radon transformation. In recent years, space and time reconstructions of the ionosphere are studied. However, the classical tomographic reconstruction techniques fail to provide reliable estimates due to the limited number of available line integrals. Furthermore, the time varying nature of the electron density creates challenging complications. Novel CIT reconstruction techniques are proposed in Arikan et al. (2007a,b) using Random Field Priors and basis functions from the set of Squeezed Legendre Polynomials, truncated Legendre Polynomials, Haar Wavelets and singular value decomposition (SVD) with IRI model. In Arikan et al. (2007b), it is shown that best results are obtained for the basis functions from the model itself through SVD.

In recent years, GPS dual frequency signals have been widely used to estimate both regional and global TEC values (Komjathy, 1997; Liao, 2000). The TEC computation methods and their advantages and disadvantages are widely discussed in the literature (Jakowski et al., 1996; Liao, 2000; Arikan et al., 2003). Regularized Estimation of TEC (Reg-Est) is a technique for estimation of high resolution, reliable and robust TEC estimation as discussed in detail by Arikan et al. (2003, 2004, 2007). In a study conducted by Arikan et al. (2003), regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data is researched and a new method is proposed. The GPS data used in this study is obtained by the developed Reg-Est method discussed in Nayir et al. (2007) and IONOLAB using the phase delay measurements.

In this study, to improve the reliability of the obtained 3-D estimates, we propose an SVD based tomographic reconstruction technique, where the IRI-2007 electron density profiles are used as a model and an a priori source of information based on the 2-D CIT reconstruction method and results discussed in Arikan et al. (2007b). To improve the performance of the reconstruction, we form a basis by using SVD of a matrix whose columns are generated from the IRI-2007 model for the required location and the time of interest. Also, to account for the variation as a function of solar activity, we consider IRI-2007 electron density profiles with similar sun-spot number index. The SVD basis varies significantly with respect to time of the day, and day of the year. Therefore, a reconstruction based on a fixed basis would have limited applicability around the

Earth with respect to time. Hence, the basis components should be updated in time. Although it will not be detailed in this paper, we observed that hourly updates on the reconstruction basis yield acceptable performance. We also investigated reconstruction quality of the proposed technique on synthetic measurements showing that robust estimation of the ionospheric electron density distribution that fits to the observed data as well as the IRI-2007 model is possible.

In Section 2, the proposed SVD basis approach for the ionospheric reconstruction is introduced. Section 3 contains the application of the proposed CIT algorithm on synthetic and model based electron density distributions.

2. Proposed approach for ionospheric reconstruction

The proposed SVD approach for the tomographic reconstruction of the ionospheric electron density in both space and time is discussed below. The first part of the section introduces the measurement model. The voxelization and basis formation are explained in detail in the second part. The third subsection discusses the reconstruction based on the proposed SVD approach.

2.1. Measurement model

STEC measurement model for GPS satellites can be closely approximated as a line integral between the satellite and receiver positions given by:

$$y_{u,m}(t_0) = \int_0^1 e(x_u + d_x\lambda, y_u + d_y\lambda, z_u + d_z\lambda, t_0) d_{u,m} d\lambda, \quad (1)$$

where d_x , d_y and d_z denote the difference between the coordinates of GPS satellite m and GPS receiver u ; satellite m has Cartesian coordinates (x_m, y_m, z_m) ; receiver u has Cartesian coordinates (x_u, y_u, z_u) at time t_0 and

$$d_{u,m} = \sqrt{(x_u - x_m)^2 + (y_u - y_m)^2 + (z_u - z_m)^2}. \quad (2)$$

This expression can be applied to occultation data by replacing GPS receiver coordinates with that of the LEO satellite coordinates.

2.2. Voxelization and basis formation

The reconstruction is implemented on a grid structure over the ionosphere made up of prisms that extend in latitude, longitude and altitude. Each prism is called a voxel and in total there are $N_r \times N_\theta \times N_\phi$ voxels considered in reconstruction problem, where N_r , N_θ and N_ϕ denote the number of grids in altitude, latitude and longitude, respectively. While each voxel has a different volume, they have equal dimensions in global coordinates. The electron density profile is typically less dense at higher altitudes as shown in Fig. 1. It is also known as spatially correlated. Hence, higher altitude voxels having similar spatial distributions can be combined for more reliable reconstructions.

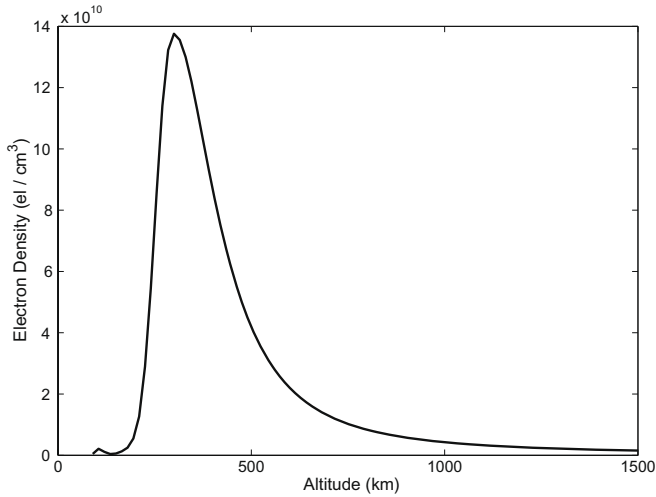


Fig. 1. The electron density profile as a function of altitude at $\theta = 0^\circ$ and $\phi = 0^\circ$ for July 15, 2004 at 0200 UT.

An application of nonuniform voxelization in radial dimensions as a function of altitude is provided in Fig. 2. In order to find reconstruction of a day in a month, we need to provide a basis for that time of the day and day of the year. In this way, we will be able to adapt the basis to the conditions of the ionosphere at the time of interest. We form this basis by using SVD of a matrix whose columns are formed by the IRI-2007 profiles of N_d days with similar sunspot numbers. Before the SVD computation, we vectorize the 3-D voxels using N_r , N_θ and N_ϕ . Spherical indices can be calculated as

$$n_r = (r_i - 90)/\Delta_r + 1, \quad 1 \leq n_r \leq N_r, \quad (3)$$

$$n_\phi = \phi_i/\Delta_\phi + 1, \quad 1 \leq n_\phi \leq N_\phi, \quad (4)$$

$$n_\theta = \theta_i/\Delta_\theta + 1, \quad 1 \leq n_\theta \leq N_\theta, \quad (5)$$

where r_i , ϕ_i and θ_i are the lower bounds of voxel i in altitude, longitude and latitude, respectively. Δ_θ , Δ_ϕ and Δ_r are the widths of voxels in altitude longitude and latitude,

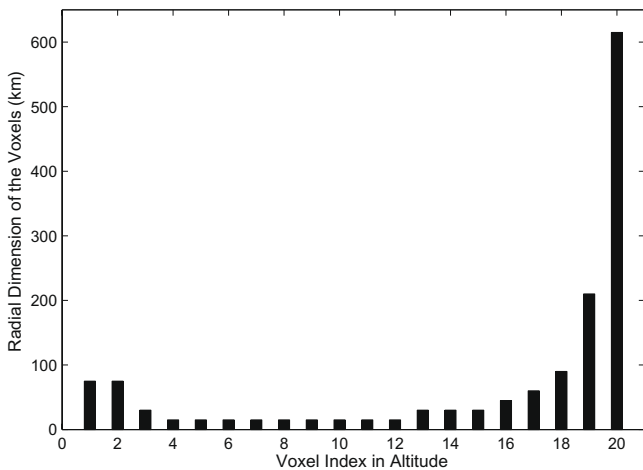


Fig. 2. Nonuniform voxelization of radial dimension as a function of altitude.

respectively. In Eq. 3, 90 km represent the lower bound of the ionosphere. Then, electron density matrix in 3-D Space can be vectorized by

$$\underline{e}_{day}(l) = e(n_r, n_\phi, n_\theta), \quad (6)$$

where index l is related to n_r, n_θ and n_ϕ indices

$$l = n_r + (n_\phi - 1)N_r + (n_\theta - 1)N_rN_\phi. \quad (7)$$

Note that in Eq. 6, we suppressed the time dependence of the electron density distribution. Here we will first focus on reconstruction of the density distribution at a given time. Later in this section, we will incorporate the time variation to the reconstruction. Then, by obtaining electron density distribution models of IRI-2007 from different days with similar conditions, we form the following matrix \mathbf{G} , whose columns corresponds to data from individual days:

$$\mathbf{G} = [\underline{e}_{day_1} \ \underline{e}_{day_2} \ \dots \ \underline{e}_{day_{N_d}}]. \quad (8)$$

We want to obtain a basis for the column spaces of this matrix. For this purpose Singular Value Decomposition (SVD) of \mathbf{G} can be used:

$$\mathbf{G} = \mathbf{U}_{N_d} \mathbf{\Sigma}_{N_d} \mathbf{V}_{N_d}^H, \quad (9)$$

where columns of \mathbf{U}_{N_d} form an orthogonal basis for the column space of \mathbf{G} , and $\mathbf{\Sigma}$ is a diagonal matrix:

$$\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{N_d}), \quad (10)$$

where the singular values are ordered in a decreasing order:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{N_d} \geq 0. \quad (11)$$

Although, columns of \mathbf{U}_{N_d} form a basis, in practice, a subset that corresponds to the significant singular σ values is sufficient. This is not only for reduction in the computational load, but also to introduce the required regularization for the reconstruction. In order to decide how many columns of \mathbf{U}_{N_d} should be kept in the inversion process, we investigate the cumulative energy sequence defined below:

$$E_j = \sum_{n=1}^j \sigma_n^2, \quad 1 \leq j \leq N_d. \quad (12)$$

Out of N_d basis, only N_s significant basis are selected. The selected basis set contains more than 99% of the energy spectrum. An example is provided in Fig. 3 for July 2004 at 0200 UT where the first four basis components contains the 99.98% of all the energy. Then, in the reconstruction, we will model the electron density distribution as:

$$\underline{e} = \mathbf{U}_{N_s} \underline{\alpha}, \quad (13)$$

where $\alpha[i], 1 \leq i \leq N_s$ are the basis coefficients that should be estimated in the reconstruction process.

2.3. 3-D electron density reconstruction based on SVD basis

For GPS data, we utilize data from each satellite and receiver combination that sees each other in a conical range of D_r degrees that provides a single line integral as

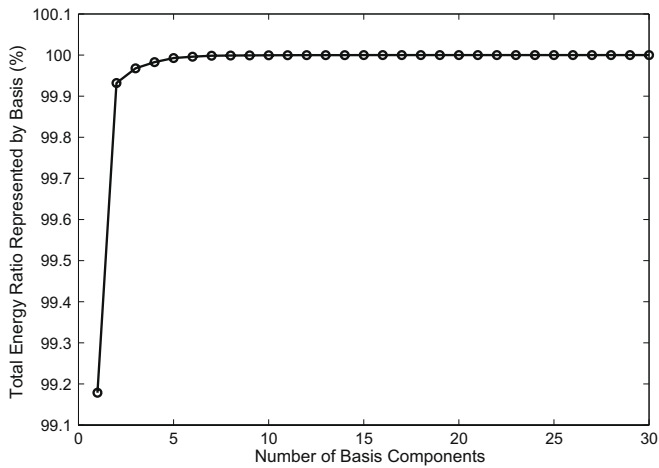


Fig. 3. The total energy captured by singular values as a function of their corresponding basis components for July 2004 at 0200 UT.

described in Eq. 1. For occultation data each LEO satellite pair that sees each other through ionosphere provides a line integral that can be used in the reconstruction. Assuming electron density profile remains about the same over a period of 15 min, data in this window of 15 min can be combined to achieve 30-fold increase in the available data for reconstruction. To investigate the accuracy of the inversion, in the reported results, we used IRI-2007 model result as the ground truth. Then, by using the actual satellite and receiver positions, we obtained synthetic STEC measurements, y_i , by computing the line integral given in Eq. 1. In order to apply Eq. 1 on a voxelized ionosphere, we calculated the segments of the line that passes through each voxel. From the available measurements, a measurement vector \underline{y} is formed. In the proposed reconstruction technique, the measurement vector is related to the electron density in the 3-D voxelized structure as:

$$\underline{y}_{N_m} = \mathbf{A}_{N_m \times N_v} \underline{e}_{N_v}, \quad (14)$$

where N_m denotes the number of available measurements and N_v denotes the number of voxels; i th row of matrix \mathbf{A} represents the length of line segments in each voxel that lies on the line connecting the receiver and the satellite corresponding to measurement i . Since electron density distribution can be expressed by basis components,

$$\underline{e}_{N_v} = \mathbf{U}_{N_v \times N_s} \underline{\alpha}_{N_s}, \quad (15)$$

Thus, the measurement model simplifies to the following form in terms of the unknown basis coefficients $\underline{\alpha}_{N_s}$

$$\underline{y}_{N_m} = \mathbf{B}_{N_m \times N_s} \underline{\alpha}_{N_s}, \quad (16)$$

where the measurement matrix $\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{U}_{N_s}$. This way, we can ease the computational load by decreasing the size of matrices drastically from $N_m \times N_v$ to $N_m \times N_s$. The unknown basis coefficients $\underline{\alpha}$ can be estimated as

$$\hat{\underline{\alpha}} = \arg \min_{\underline{\alpha}} ((\underline{y} - \mathbf{B}\underline{\alpha})^T \mathbf{W} (\underline{y} - \mathbf{B}\underline{\alpha})), \quad (17)$$

where \mathbf{W} is a weight matrix of the measurements added within a time interval around the exact reconstruction time that puts more importance on the close-time and small angle measurements. The solution to the weighted least squares optimization problem in terms of the basis coefficients can be found as

$$\hat{\underline{\alpha}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{W} \underline{y}. \quad (18)$$

Hence 3-D electron density can be estimated by

$$\hat{\underline{e}} = \mathbf{U} \hat{\underline{\alpha}}. \quad (19)$$

This reconstruction process is made for one time interval. We can compute the SVD basis components for each time slot, and provide reconstructions in a sliding window of time. This way we can obtain reconstruction of the electron density as a function of both space and time.

3. Results

The CIT technique discussed in this paper is applied for global ionospheric reconstruction. The focal point of this new CIT method discussed in the previous section relies on the fact that it uses SVD basis. In order to make a reconstruction based on this new method, we have to generate SVD basis offline. It is necessary to have a priori electron density profile for the construction of SVD basis. IRI-2007 is a strong alternative in presenting a global electron density profile (International Reference Ionosphere, 2007) and it is used for generating SVD basis in this study. Electron density profiles with high space and time resolutions provide better accuracy in the reconstruction. In both simulations and reconstructions from GPS data, first the ionosphere have to be represented in terms of voxels as discussed in Section 2.2. The resolution sizes of the voxels are chosen according to the electron density variations in height, latitude and longitude in IRI-2007. In choosing the Δ_r , we compared the magnitude of the electron density distribution in IRI-2007 for 5, 10, 15 and 45 km. It is observed that 15 km is a reasonable distance in height since the difference in the magnitude of the electron densities between 5, 10 and 15 km vertical resolutions are very small compared to the difference between 15 and 45 km. Fifteen kilometers represents the significant variation in electron density profile of IRI-2007. Another comparison is made for Δ_ϕ between 1° , 2° and 4° . The result is that an electron density profile with $\Delta_\phi = 2^\circ$ is the best representation of the variations in IRI-2007. A similar investigation is also carried out for Δ_θ where 2° is selected as a result. In summary, for global ionospheric tomography, the voxel sizes are chosen as $\Delta_r = 15 \text{ km}, \Delta_\phi = 2^\circ, \Delta_\theta = 2^\circ$ where $90 \text{ km} \leq r \leq 1500 \text{ km}, 0^\circ \leq \phi \leq 359^\circ$ and $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ for altitude, longitude and latitude coordinates, respectively. This method is independent of time resolution so reconstructions can be made for any time resolution period. In order to generate the SVD basis, the electron density profiles \underline{e}_{day} are obtained from IRI-2007 and \mathbf{G} in Eq. 8 is formed. SVD is applied to \mathbf{G} as discussed in Eq. 9 and the significant

basis set \mathbf{U}_{N_s} is chosen. An example set of \mathbf{U}_{N_s} for the first four basis components are provided in Figs. 4 and 5 for the whole globe obtained for January and July 2004 at 0200, respectively. The figures show a cross-section of the basis at 390 km altitude which is the maximum ionization altitude of the ionosphere at 0° latitude and 0° longitude. As it can be observed from Fig. 4a and 5a, the highest energy of the basis is collected in the first basis component. Other basis components have significantly lower energy than the first basis component and the energy collected in the basis drops going from the first to the last basis. As it can be observed, with only four basis the globe can be represented.

While SVD basis clearly decreases the computational complexity of the reconstruction by allowing a global CIT with only four basis, it has also an important physical meaning. SVD basis change with respect to the hour of the day and day of the year. Figs. 4a and 5a show the change of the basis with respect to seasons. While the peak point of the July basis shown in Fig. 5a is at the northern hemisphere near the tropic of cancer, the peak point of the January basis shown in Fig. 4a is at the southern hemisphere near the tropic of capricorn. In our simulations, it has also been seen that peak point of the basis rotates with respect to time following the Sun.

The CIT reconstruction technique discussed in this study is first applied to simulations based on IRI-2007 model. For these simulations, synthetic STEC measurements are calculated from IRI-2007 electron density profile. These synthetic measurements are calculated between 56 receivers and 29 satellites obtained from International GPS Service (2007). The receivers used in the simulations are shown in Fig. 6. A synthetic STEC measurement, $y_{r,s_m}(t_0)$ is obtained by line integral of the electron density values along the line that join the GPS station and satellite at that given time using Eq. 1. The collection of STEC mea-

surements form \underline{y} in Eq. 18. Using synthetic TEC measurements provide certain advantages. There are no measurement errors and they are calculated directly from IRI-2007 which provides a reconstruction refined from other error sources except the method itself. Since synthetic TEC measurements fit the SVD basis best, it forms a minimum error bound for the method proposed. Synthetic measurements also enables measurements to be obtained for regions where real data cannot be collected or very sparse like oceans and poles.

For each simulation, the reconstruction and the IRI-2007 model are compared and a normalized reconstruction error is found using the equation:

$$R_e = \|\underline{e} - \hat{\underline{e}}\| / \|\underline{e}\|, \quad (20)$$

where \underline{e} is defined in Eq. 13 and $\hat{\underline{e}}$ is given in Eq. 19. By using synthetic TEC measurements, we reconstructed ionosphere for January 15 and July 15, 2004 at 0200 UT. Reconstructed ionospheres in Fig. 7a (January) and 7c (July) are very close estimates to the IRI-2007 models in Fig. 7b (January) and 7d (July) where the respective normalized reconstruction errors are 0.0586 and 0.0663, respectively. Another comparison of reconstructed ionosphere with IRI-2007 model is made for July 15, 2004 at 0000 UT. The normalized error of reconstruction for this case is 0.0822. To investigate the performance of the reconstruction on noisy STEC measurements, we added independent identically distributed random noise with zero mean and a standard deviation equal to the 25% of the mean of STEC values on the synthesized STEC measurements. Then, we performed reconstruction on the noisy STEC measurements. Fig. 8a shows the reconstruction from noisy STEC measurements. The calculated normalized error is 0.0712 which is very slightly higher than the noise-free reconstruction error which is 0.0586. This shows that SVD based technique is very robust to noise. Using the

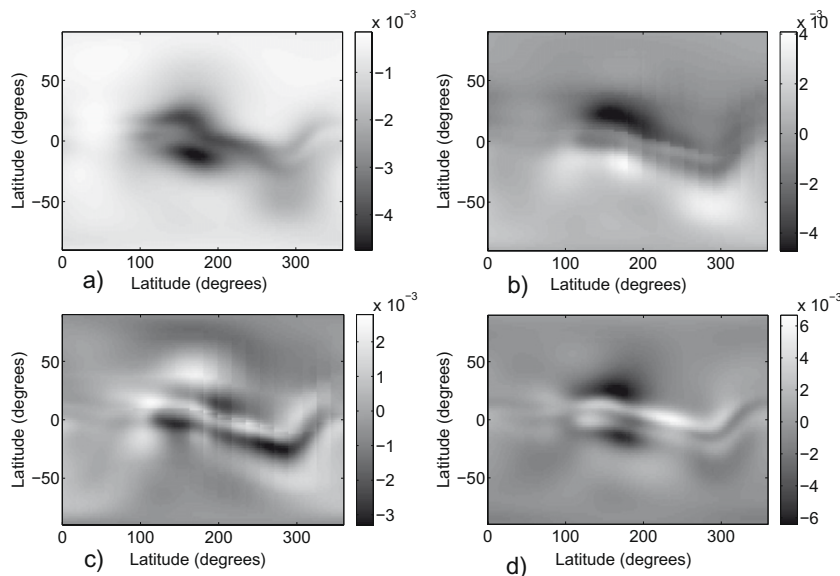


Fig. 4. The first four basis components for January 15, 2004 at 0200 UT at 390 km altitude. (a) First basis, (b) second basis, (c) third basis, (d) fourth basis.

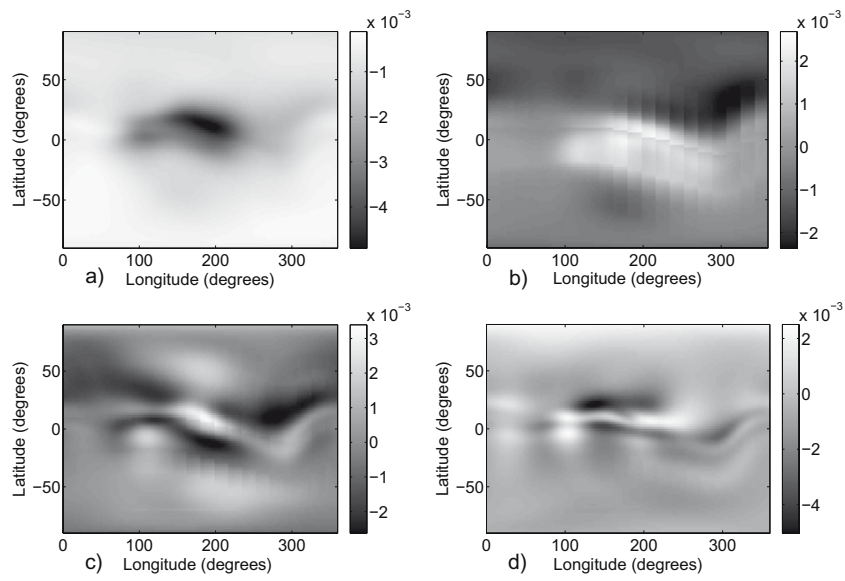


Fig. 5. The first four basis components for July 15, 2004 at 0200 UT at 390 km altitude. (a) First basis, (b) second basis, (c) third basis, (d) fourth basis.

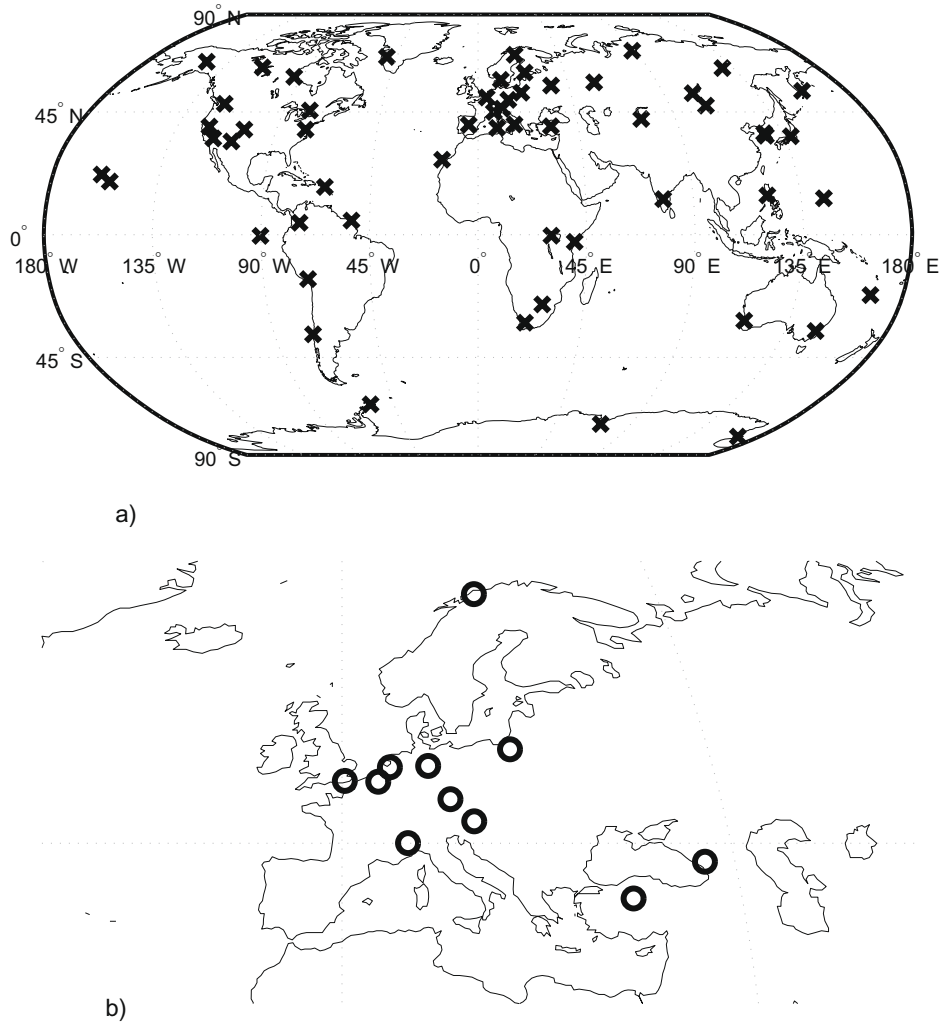


Fig. 6. Locations of the GPS receivers used in the reconstructions. (a) Receivers used for deriving synthetic measurements, (b) 11 receivers that are used in GPS-TEC measurements.

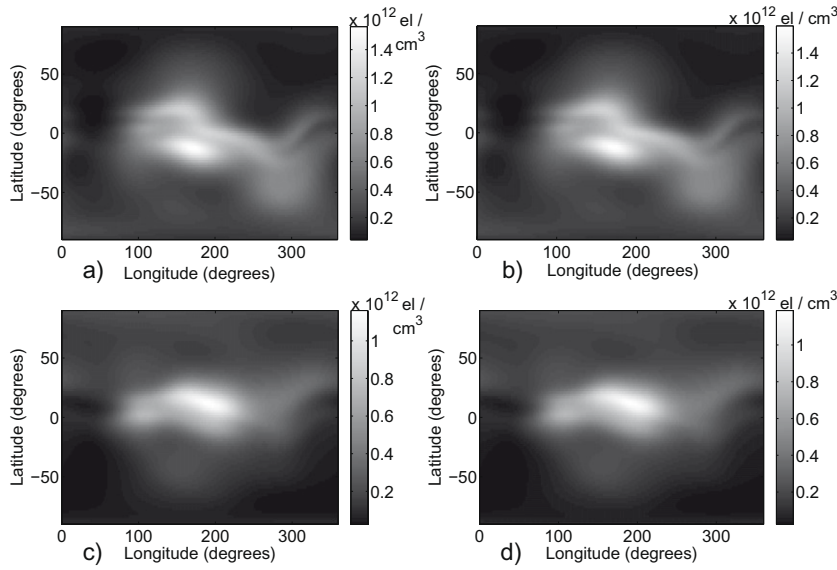


Fig. 7. Comparison of the IRI-2007 model with SVD-based CIT from synthetic data at 0200 UT at 390 km altitude. (a) Reconstruction for January 15, 2004, (b) IRI-2007 Model for January 15, 2004, (c) Reconstruction for July 15, 2004, (d) IRI-2007 Model for July 15, 2004.

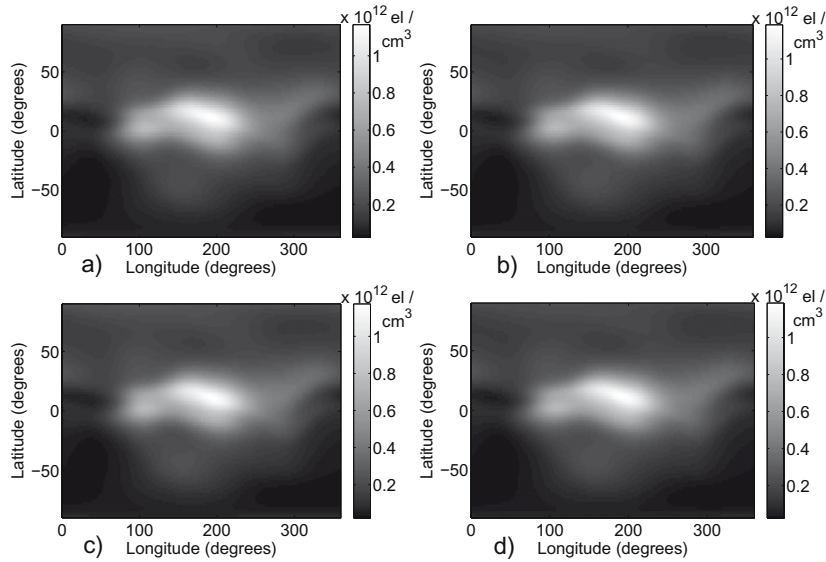


Fig. 8. Comparison of the IRI-2007 model with SVD-based CIT from noisy synthetic data and perturbed ionosphere for July 15, 2004 at 0200 UT at 390 km altitude. (a) Reconstruction from noisy synthetic data, (b) IRI-2007 Model, (c) reconstruction from perturbed ionosphere (d) IRI-2007 Model.

same technique we used to obtain synthetic STEC measurements from IRI-2007 model, a second set of STEC measurements between ankr receiver and available satellites are derived from the reconstructed ionosphere. The normalized error between initial noise-free STEC measurements and second set of STEC measurements obtained from reconstruction is 0.0077. We can consider the noisy STEC measurements we produced before as a third set of measurements. A fourth set of STEC measurements can be derived from the ionosphere reconstructed from noisy STEC measurements. The normalized error between noisy STEC measurements and the fourth set of STEC measurements is only 0.1348. This shows that the reconstruction method is very robust to noise.

In order to observe the robustness of the new SVD-based CIT technique on the possible perturbation of the IRI-2007 model, the original model is modified to include variations. For this purpose, the 3-D electron distributions are again obtained from the IRI model. Then, the model \underline{e} is multiplied by a perturbation distribution $\underline{\gamma}$ and a new distribution \underline{e}_p is obtained as:

$$\underline{e}_p(r, \phi, \theta) = \underline{e}(r, \phi, \theta) \cdot \underline{\gamma}(r, \phi, \theta), \quad (21)$$

where $\underline{\gamma}(r, \phi, \theta)$ is a perturbation array. The entries in $\underline{\gamma}$ are chosen as samples of a realization of a stationary 3-D random field with the following parameters: $E\{\underline{\gamma}(r, \phi, \theta)\} = 1$, $Var(\underline{\gamma}(r, \phi, \theta)) = E\{(\underline{\gamma}(r, \phi, \theta) - 1)^2\} = 0.16$,

Table 1
GPS Receivers and Coordinates.

City	Country	Station ID	Longitude	Latitude
Brussels	Belgium	brus	4.35	50.79
Graz	Austria	graz	15.49	47.06
Hailsham	England	hers	0.33	50.86
Torino	Italy	ieng	7.64	45.01
Kootwijk	Netherlands	kosg	5.81	52.18
Olsatyn	Poland	lama	20.67	53.89
Braunschweig	Germany	ptbb	10.46	52.30
Tromsø	Norway	tro1	18.94	69.66
Bad Koetzing	Germany	wtzt	12.88	49.14
Zelenchukskaya	Russia	zeck	41.56	43.29
Ankara	Turkey	ankr	32.76	39.89

$E\{(\gamma(r, \phi, \theta) - 1)(\gamma(r + \Delta_r, \phi + \Delta_\phi, \theta + \Delta_\theta) - 1)\} = 0.16f_r(\Delta_r)f_\phi(\Delta_\phi)f_\theta(\Delta_\theta)$, where E is the expectation operator, Var is the variance and $f_r(\Delta_r) = 1 - \Delta_r/1410$ km, $f_\phi(\Delta_\phi) = 1 - \Delta_\phi/360^\circ$ and $f_\theta(\Delta_\theta) = 1 - \Delta_\theta/180^\circ$. By choosing the random field as a spatially correlated one, we can perturb the IRI-2007 model in a spatially correlated way. By using the perturbed model, we achieved a reconstruction with error 0.0730 which also proves that SVD-based reconstruction can be used where the actual ionosphere deviates from the IRI-2007 model. Fig. 8c and 8d show the reconstruction from the perturbed ionosphere at July 15, 2004 at 0200 UT at 390 km altitude and the IRI-2007 model.

The new SVD-based CIT technique is also tried with experimental data obtained from GPS-TEC. From the 56 receiver locations given in Fig. 6a, only 11 of these are used for the reconstruction. These 11 receivers are indicated by circles on Fig. 6b. The list of these receivers and their coordinates are also provided in Table 1. The STEC from the GPS receivers are obtained using Reg-Est and Ionolab-TEC as discussed in detail in Nayir et al. (2007) and \underline{y} in Eq. 18 is formed. The SVD basis obtained as described in

Table 2
 M_e , for cross-validation for the reconstructions using GPS-TEC.

Station ID – Date – Hour (UT)	M_e
brus, July 15, 2004 at 0200	1.3819
brus, July 15, 2004 at 0000	1.2159
graz, January 15, 2004 at 0200	1.5117
graz, July 15, 2004 at 0200	1.8763
graz, July15, 2004 at 0000	0.8742
ptbb, January 15, 2004 at 0200	1.5505
ptbb, July 15, 2004 at 0200	1.7141
ptbb, July15, 2004 at 0000	1.7316

Eq. (9) and (13) from IRI-2007 model is used in reconstructions and \hat{z} in Eqs. (18) and (19) is formed. In Fig. 9a and 9c, examples for reconstruction are provided for January 15, 2004 and July 15, 2004, respectively, at 0200 UT at 390 km altitude. As it can be observed from Fig. 9, the reconstruction for the whole globe in latitude, longitude and altitude with only 11 GPS receivers is very successful compared to IRI-2007 model.

In order to cross-validate our results, STEC measurements from one of the receivers is left out as control data and the reconstruction is based on the remaining 10 receivers. For this purpose, STEC measurements are derived from the reconstructions obtained using 10 receivers and compared with the original STEC measurements for the control receiver. The cross-validation is checked for three different receivers, namely, graz, ptbb and brus for different dates and times. Table 2 shows mean square error

$$M_e(u, t_0) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\hat{y}_{u,m}(t_0) - y_{u,m}(t_0))^2}, \quad (22)$$

where $\hat{y}_{u,m}(t_0)$ denotes the STEC obtained from reconstructed ionosphere and $y_{u,m}(t_0)$ denotes the STEC from GPS measurements for receiver u and satellite m at time

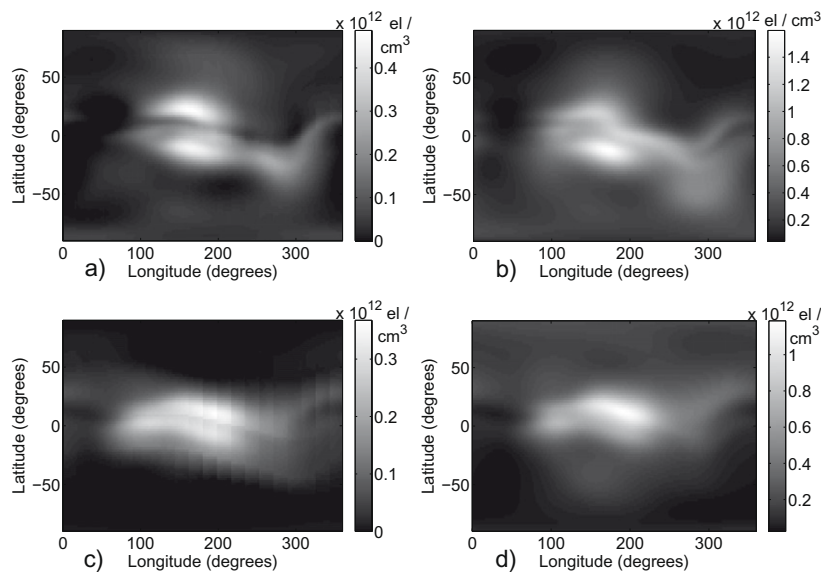


Fig. 9. Comparison of the IRI-2007 model with SVD-based CIT from GPS-TEC measurements at 0200 UT at 390 km altitude. (a) Reconstruction for January 15, 2004, (b) IRI-2007 Model for January 15, 2004, (c) reconstruction for July 15, 2004, (d) IRI-2007 Model for July 15, 2004.

instant t_0 . M is the total number of satellites within the view of receiver u at time t_0 . The mean square error values provided in Table 2 indicate the high performance of the new CIT technique. For all receivers and date, M_e is less than 2 TECU.

The results presented in this section denotes the success of the SVD-based CIT reconstruction technique both over simulated model data and experimental GPS–TEC data. The SVD basis not only represents the underlying ionosphere very well but also reduces the computational complexity significantly.

4. Conclusions

In the reconstruction, the 3-D ionospheric electron density distribution is modeled as a linear combination of few appropriately chosen basis components. To obtain the most representative basis components, IRI-2007 results obtained with the similar conditions, e.g., time of the day and solar activity, are analyzed by using Singular Value Decomposition (SVD). It is observed that the first 4 or 5 SVD basis components dominates the rest significantly. Thus, in the reconstruction, the ionospheric electron density distribution is assumed to be in the span of these few basis components, resulting in a very efficient and robust density distribution estimates. We provided reconstruction results based on both synthetic and real GPS based TEC measurement data. For the validation of the reconstructions on the real data, cross-validation approach indicated that the reconstruction error is about 1.50 TECU. The reconstruction technique can also utilize occultation measurements. It is expected that the accuracy of the reconstructions will improve further when the GPS based TEC measurements and occultation data are used together. Our current research is focused on this investigation. We will report results if this highly promising investigation is near future.

Acknowledgement

This work is supported by TÜBİTAK EEEAG Grant 105E171.

References

- Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O. Regularized estimation of vertical total electron content from global positioning system data. *J. Geophys. Res.* 108 (A12), 1469–1480, 2003.
- Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O. Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period. *Radio Sci.* 39 (6), RS6012, 2004.
- Arikan, F., Arikan, O., Erol, C.B. Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model. *Adv. Space Res.* 39, 867–874, 2007.
- Arikan, O., Arikan, F., Erol, C.B. 3-D Ionospheric Tomography with Random Field Priors Mathematical Methods in Engineering, in: Tas, K., Tenreiro Machado, J.A., Baleanu, D. (Eds.). Springer, Netherlands, pp. 334–335, 2007a.
- Arikan, O., Arikan, F., Erol, C.B. Computerized ionospheric tomography with the IRI model. *Adv. Space Res.* 39, 859–866, 2007b.
- Austen, J.R., Franke, S.J., Liu, C.H. Ionospheric image using computerized tomography. *Radio Sci.* 23, 299–307, 1988.
- Garcia Fernandez, M., Hernandez-Pajares, M., Juan, M., Sanz, J. Improvement of ionospheric electron density estimation with GPS–MET occultations using Abel inversion and VTEC information. *J. Geophys. Res.* 108, 1338, 2003a.
- Garcia Fernandez, M., Hernandez-Pajares, M., Juan, M., Sanz, J., Orus, R., Coisson, P., Nava, B., Radicella, S.M. Combining ionosonde with ground GPS Sata for electron density estimation. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 65, 683–691, 2003b.
- Hajj, G.A., Romans, L.J. Ionospheric electron density profiles obtained with GPS results from the GPS/MET experiment. *Radio Sci.* 33, 175–190, 1998.
- Hansen, A.J., Walker, T., Enge, P. Ionospheric correction using tomography. *Proc. Inst. Nav. GPS* 97, 249–257, 1997.
- International GPS Service, Available from: <http://igs.ens.ign.fr>.
- International Reference Ionosphere, Available from: <http://iri.gsfc.nasa.gov>.
- IONOLAB, Available from: <http://www.ionolab.org/>.
- Jakowski, N., Sardon, E., Engler, E., Jungstand, A., Klahn, D. Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations. *Ann. Geophysicae* 14, 1429–1436, 1996.
- Komjathy, A. Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System, Ph.D. Thesis, Dept. of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188, Univ. of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1997.
- Liao, X., Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network, M.Sc. Thesis, Univ. of Calgary, Canada, 2000.
- Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O., Erol, C.B. *Journal of Geophysical Research* 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459, 2007.
- Pryse, S.E., Kersley, L. A preliminary experimental test of ionospheric tomography. *J. Atmos. Terr. Phys.* 54, 1007–1012, 1992.
- Tsai, L.C., Tsai, W.H., Schreiner, W.S., Berkey, F.T., Liu, J.Y. Comparisons of GPS/MET retrieved ionospheric electron density and ground based ionosonde data. *Earth Planets Space* 53, 193–205, 2001.

instant t_0 . M is the total number of satellites within the view of receiver u at time t_0 . The mean square error values provided in Table 2 indicate the high performance of the new CIT technique. For all receivers and date, M_e is less than 2 TECU.

The results presented in this section denotes the success of the SVD-based CIT reconstruction technique both over simulated model data and experimental GPS–TEC data. The SVD basis not only represents the underlying ionosphere very well but also reduces the computational complexity significantly.

4. Conclusions

In the reconstruction, the 3-D ionospheric electron density distribution is modeled as a linear combination of few appropriately chosen basis components. To obtain the most representative basis components, IRI-2007 results obtained with the similar conditions, e.g., time of the day and solar activity, are analyzed by using Singular Value Decomposition (SVD). It is observed that the first 4 or 5 SVD basis components dominates the rest significantly. Thus, in the reconstruction, the ionospheric electron density distribution is assumed to be in the span of these few basis components, resulting in a very efficient and robust density distribution estimates. We provided reconstruction results based on both synthetic and real GPS based TEC measurement data. For the validation of the reconstructions on the real data, cross-validation approach indicated that the reconstruction error is about 1.50 TECU. The reconstruction technique can also utilize occultation measurements. It is expected that the accuracy of the reconstructions will improve further when the GPS based TEC measurements and occultation data are used together. Our current research is focused on this investigation. We will report results if this highly promising investigation is near future.

Acknowledgement

This work is supported by TÜBİTAK EEEAG Grant 105E171.

References

- Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O. Regularized estimation of vertical total electron content from global positioning system data. *J. Geophys. Res.* 108 (A12), 1469–1480, 2003.
- Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O. Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period. *Radio Sci.* 39 (6), RS6012, 2004.
- Arikan, F., Arikan, O., Erol, C.B. Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model. *Adv. Space Res.* 39, 867–874, 2007.
- Arikan, O., Arikan, F., Erol, C.B. 3-D Ionospheric Tomography with Random Field Priors Mathematical Methods in Engineering, in: Tas, K., Tenreiro Machado, J.A., Baleanu, D. (Eds.). Springer, Netherlands, pp. 334–335, 2007a.
- Arikan, O., Arikan, F., Erol, C.B. Computerized ionospheric tomography with the IRI model. *Adv. Space Res.* 39, 859–866, 2007b.
- Austen, J.R., Franke, S.J., Liu, C.H. Ionospheric image using computerized tomography. *Radio Sci.* 23, 299–307, 1988.
- Garcia Fernandez, M., Hernandez-Pajares, M., Juan, M., Sanz, J. Improvement of ionospheric electron density estimation with GPS–MET occultations using Abel inversion and VTEC information. *J. Geophys. Res.* 108, 1338, 2003a.
- Garcia Fernandez, M., Hernandez-Pajares, M., Juan, M., Sanz, J., Orus, R., Coisson, P., Nava, B., Radicella, S.M. Combining ionosonde with ground GPS data for electron density estimation. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 65, 683–691, 2003b.
- Hajj, G.A., Romans, L.J. Ionospheric electron density profiles obtained with GPS results from the GPS/MET experiment. *Radio Sci.* 33, 175–190, 1998.
- Hansen, A.J., Walker, T., Enge, P. Ionospheric correction using tomography. *Proc. Inst. Nav. GPS* 97, 249–257, 1997.
- International GPS Service, Available from: <http://igs.ens.ign.fr>.
- International Reference Ionosphere, Available from: <http://iri.gsfc.nasa.gov>.
- IONOLAB, Available from: <http://www.ionolab.org/>.
- Jakowski, N., Sardon, E., Engler, E., Jungstand, A., Klahn, D. Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations. *Ann. Geophysicae* 14, 1429–1436, 1996.
- Komjathy, A. Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System, Ph.D. Thesis, Dept. of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188, Univ. of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1997.
- Liao, X., Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network, M.Sc. Thesis, Univ. of Calgary, Canada, 2000.
- Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O., Erol, C.B. *Journal of Geophysical Research* 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459, 2007.
- Pryse, S.E., Kersley, L. A preliminary experimental test of ionospheric tomography. *J. Atmos. Terr. Phys.* 54, 1007–1012, 1992.
- Tsai, L.C., Tsai, W.H., Schreiner, W.S., Berkey, F.T., Liu, J.Y. Comparisons of GPS/MET retrieved ionospheric electron density and ground based ionosonde data. *Earth Planets Space* 53, 193–205, 2001.

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

Advances in Space Research 44 (2009) 641–652

**ADVANCES IN
SPACE
RESEARCH**
(a COSPAR publication)www.elsevier.com/locate/asr

Multipath Separation-Direction of Arrival (MS-DOA) with Genetic Search Algorithm for HF channels

Feza Arikan^{a,*}, Ozan Koroglu^a, Serdar Fidan^b, Orhan Arikan^c, Mehmet B. Guldogan^c

^a *Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Beytepe, Ankara 06800, Turkey*

^b *TURK TELEKOM, A.S. Ulus, Ankara, Turkey*

^c *Bilkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent, Ankara 06800, Turkey*

Received 20 November 2007; received in revised form 2 June 2008; accepted 8 September 2008

Abstract

Direction-of-Arrival (DOA) defines the estimation of arrival angles of an electromagnetic wave impinging on a set of sensors. For dispersive and time-varying HF channels, where the propagating wave also suffers from the multipath phenomena, estimation of DOA is a very challenging problem. Multipath Separation-Direction of Arrival (MS-DOA), that is developed to estimate both the arrival angles in elevation and azimuth and the incoming signals at the output of the reference antenna with very high accuracy, proves itself as a strong alternative in DOA estimation for HF channels. In MS-DOA, a linear system of equations is formed using the coefficients of the basis vector for the array output vector, the incoming signal vector and the array manifold. The angles of arrival in elevation and azimuth are obtained as the maximizers of the sum of the magnitude squares of the projection of the signal coefficients on the column space of the array manifold. In this study, alternative Genetic Search Algorithms (GA) for the maximizers of the projection sum are investigated using simulated and experimental ionospheric channel data. It is observed that GA combined with MS-DOA is a powerful alternative in online DOA estimation and can be further developed according to the channel characteristics of a specific HF link.

© 2009 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Ionosphere; HF channel; Direction of Arrival (DOA); Direction Finding (DF); Multipath Separation and Direction of Arrival (MS-DOA) Estimation; Genetic Algorithm (GA)

1. Introduction

HF links between 3 and 30 MHz provide a very secure and ever available channel for long distance communication. The transmitted signals are reflected from the ionosphere and can reach to thousands of kilometers without being able to be detected by other users. Yet, being spatially and temporally varying and dispersive, ionospheric channels can cause various degrading effects on the transmitted signals that require a wide bandwidth and increased bit rates. The problem is more complicated by the multi-

path and polarization fading phenomena (Goodman, 1992). Thus, for proper recovery of the transmitted signals, the modes and multipath components need to be successfully separated at the receiver. There have been various efforts to separate the modes and overcome the degrading effects of fading including diversity techniques in angle of arrival (AOA), polarization, frequency and time, RAKE receivers designed to counter the effects of multipath fading by using several correlators each assigned to a different multipath component resulting in a high signal-to-noise ratio (Proakis, 1995), polarization separation (Afraimovich et al., 1999), adaptive DF eigenstructure methods such as Multiple Signal Classification (MUSIC) (Schmidt, 1986) and algebraic methods (Van Der Veen, 1998). As discussed in detail in Arikan et al. (2003) all of these methods have advantages and disadvantages in various kinds of applications, yet it is being widely observed that for deter-

* Corresponding author.

E-mail addresses: arikan@hacettepe.edu.tr (F. Arikan), koroglu.ozan@gmail.com (O. Koroglu), mustafaserdar.fidan@turktelekom.com.tr (S. Fidan), oarikan@ee.bilkent.edu.tr (O. Arikan), guldogan@ee.bilkent.edu.tr (M.B. Guldogan).

ministic source separation and direction of arrival estimation, algebraic methods have certain advantages over the adaptive techniques (Arikan et al., 2003).

Multipath Separation-Direction of Arrival (MS-DOA) is a blind source estimation technique that can separate the multipath modes successfully and find their arrival angles with high accuracy (Arikan et al., 2003). In MS-DOA, both the array output vector and incoming signal vector are expanded in terms of a basis vector set. A linear system of equations is formed using the coefficients of the basis vector for the array output vector, the incoming signal vector and the array manifold. The angles of arrival in elevation and azimuth are obtained as the maximizers of the sum of the magnitude squares of the projection of the signal coefficients on the column space of the array manifold. Once the array manifold is estimated then the incoming signals can also be determined using the basis vectors and signal coefficients. For certain array configurations, the search for maximizing angles can be eliminated by using closed form solutions of the constructed linear system (Yilmaz et al., 2000). The angular resolution with typical array apertures can get as low as 0.2° without the help of any preprocessing techniques. For homogeneous arrays, the number of antennas that are required in the array has to be one more than the number of incoming signals. The developed technique also allows the user to recover the multipath signals with very high accuracy. When there are more than one mode impinging on the array or when the region of interest is not restricted, the search for the maximizer of the projections with brute force requires a time interval that inhibits the use of MS-DOA for online signal and angle estimation. Therefore, in this study, we developed the use Genetic Algorithm (GA) as an alternative search routine that can operate online for multiple direction of arrival estimation.

GA forms a major group of nonlinear search algorithms based on the mechanics of natural selection and natural genetics. GA differ from traditional search methods in various aspects such as the GA work with coded parameter set, not with the parameters themselves; search for a population of points, not with a single point; use an objective function, not derivatives; and use probabilistic transition rules, not deterministic ones. GA can be adapted to work with multiple parameter problems easily and search for all the parameter optimizers at the same time. There are various efforts in the literature where GA is used directly for DOA or it is used together with other methods for fast optimization of objective function in arrival angle estimation (Goldberg, 1989; Varlamos and Capsalis, 2004; Li and Lu, 2004; Man et al., 1996).

In this study, the MS-DOA is combined with GA to provide fast and accurate estimates for arrival angles and the technique is tested on simulated and experimental data. The results are compared with those from plain MUSIC that is widely used as a DOA estimator for its ease in implementation and speed in convergence. It is observed that MS-DOA with GA has superior performance over plain

MUSIC for HF multipath separation and arrival angle estimation.

In Section 2, a brief overview of MS-DOA technique is provided. Section 3 is a summary of GA algorithm and how it is implemented for the given problem. In Section 4, plain MUSIC is discussed and Section 5 includes the performance comparison of the methods for simulation and experimental data.

2. Brief review of MS-DOA

In this section, brief review of the incoming signal model, sensor array model and MS-DOA algorithm are provided. A more detailed explanation is given in Arikan et al. (2003).

Consider K incoming signals are impinging on an L element array of sensors. Let \mathbf{r}_l denote the position vector of the reference sensor. The time delay introduced on the l th element ($1 \leq l \leq L$) by k th ($1 \leq k \leq K$) incoming signal can be given by $\gamma_l(\theta_k, \phi_k)$ where

$$\gamma_l(\theta_k, \phi_k) = \frac{\mathbf{r}_l}{c} \cdot \hat{\mathbf{v}}(\theta_k, \phi_k) \quad (1)$$

and \mathbf{r}_l is the position vector of l th sensor; $\hat{\mathbf{v}}$ is the unit vector in the direction of k th signal and c is velocity of light in vacuum. The demodulated baseband output of reference sensor is given by $y_k(t)$ and $x_l(t)$ denotes the output signal of the l th sensor due to K impinging signals as

$$x_l(t) = \sum_{k=1}^K y_k(t) e^{j\omega_0 \gamma_l(\theta_k, \phi_k)} \quad (2)$$

Following a down-conversion stage, the baseband output of the sensors are sampled with Nyquist rate and the receiving antenna system can be expressed as a linear system of equations. The measurement model of the signals can be given in

$$\mathbf{X} = \mathbf{Y}\mathbf{A}^T \quad (3)$$

where

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_l \dots \mathbf{x}_L] \quad (4)$$

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_1 \dots \mathbf{y}_k \dots \mathbf{y}_K] \quad (5)$$

and

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1(\mathbf{a}_1) & \dots & A_1(\mathbf{a}_K) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ A_L(\mathbf{a}_1) & \dots & A_L(\mathbf{a}_K) \end{bmatrix} \quad (6)$$

denotes the array manifold. Here, $A_l(\mathbf{a}_k) = e^{j\omega_0 \gamma_l(\theta_k, \phi_k)}$ and $\mathbf{a}_k = [\theta_k, \phi_k]^T$. Since x_l 's are linear combinations of y_k 's, the rank of \mathbf{X} can be at most K (Arikan et al., 2003). This implies that K basis vectors are necessary and sufficient to represent the measurement vector. In determining the basis that spans the column space, Singular Value Decomposition (SVD) is used (Haykin, 1989). SVD is used to deter-

mine the number of impinging waves on the receiving array by checking the number of significant singular values as follows:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H \quad (7)$$

where the superscript H denotes the Hermitian operator throughout the text and

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_l \dots \mathbf{u}_L] \quad (8)$$

and

$$\mathbf{V} = [v_1 \dots v_k \dots v_L] \quad (9)$$

Here,

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

An effective set of basis vectors can be chosen corresponding to the significant singular values as

$$\mathbf{U}_{\text{eff}} = [\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_l \dots \mathbf{u}_K] \quad (11)$$

and

$$\mathbf{V}_{\text{eff}} = [v_1 \dots v_k \dots v_K] \quad (12)$$

Then \mathbf{X} can be written as

$$\mathbf{X} = [\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_l \dots \mathbf{u}_K][\mathbf{X}_1 \dots \mathbf{X}_k \dots \mathbf{X}_K]^T \quad (13)$$

and

$$[\mathbf{X}_1 \dots \mathbf{X}_k \dots \mathbf{X}_K]^T = \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_K \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Sigma}_{\text{eff}}} \mathbf{V}_{\text{eff}}^H \quad (14)$$

and $\mathbf{\Sigma}_{\text{eff}}$ denotes the singular value matrix which holds the K most significant singular values. By using above derivations the linear system of equations can be rewritten as

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_g} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_K \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}_g} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_K \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_g} \quad (15)$$

For the optimum solution of the above set of equations, the following least squares cost function is defined as

$$J(\mathbf{a}_1; \dots \mathbf{a}_K; \mathbf{y}_g) = \|\mathbf{A}_g \mathbf{y}_g - \mathbf{x}_g\|^2 \quad (16)$$

where $\|\cdot\|$ denotes the $\mathcal{L}2$ norm (Arikani et al., 2003). By using this cost function and writing for all components as a summation

$$J(\mathbf{a}_1; \dots \mathbf{a}_K; \mathbf{y}_g) = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{A}\mathbf{Y}_k - \mathbf{X}_k\|^2 \quad (17)$$

We investigate the values \mathbf{a}_k and \mathbf{y}_g which will minimize J . Because of the orthogonality property of the least squares cost function, the individual J_k 's are minimized when the projection of \mathbf{X}_k 's onto the range space of \mathbf{A} are maximized. The projections are defined as

$$\mathbf{P}_k(\mathbf{a}_k) = \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{X}_k \quad (18)$$

where $1 \leq k \leq K$. Therefore, the optimal solution can be obtained as the maximizer of the following function \mathcal{M} :

$$\mathcal{M}(\mathbf{a}_1; \dots; \mathbf{a}_K) = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{P}_k\|^2 \quad (19)$$

Once the arrival directions are estimated as the maximizer of \mathcal{M} , then \mathbf{Y}_k 's can be obtained as

$$\mathbf{Y}_k = (\mathbf{A}^H(\tilde{\mathbf{a}}_1; \dots; \tilde{\mathbf{a}}_K)\mathbf{A}(\tilde{\mathbf{a}}_1; \dots; \tilde{\mathbf{a}}_K))^{-1} \mathbf{A}^H(\tilde{\mathbf{a}}_1; \dots; \tilde{\mathbf{a}}_K)\mathbf{X}_k \quad (20)$$

The computed \mathbf{Y}_k 's, the output signals of the reference antenna for the k th mode, are then inserted into Eq. (20) to obtain \mathbf{Y} . Thus, with MS-DOA algorithm, not only the arrival angles of the incoming signals are estimated but also the incoming signals themselves at the output of the reference antennas are determined. The search for the maximizers can be performed either by brute force (optimum solution but has higher computational time) or by a suboptimum but fast nonlinear search algorithm such as Genetic Search as discussed in the next section.

3. Implementation of GA

Genetic Algorithms (GA) are search algorithms based on the mechanics of natural selection and natural genetics and they differ from traditional search methods (Goldberg, 1989). GA has the ability of solving multiple parameter problems. The parameters of the GA are usually converted to binary form according to the provided translation procedure which is called a chromosome. The combination of one set of parameters forms a gene. Thus, the algorithm uses these genes in the operation. Every gene has a fitness values according to the objective function (Goldberg, 1989; Man et al., 1996). In the application of GA for DOA problem, a number of different paths can be taken in the choice of the objective function, initial population, crossover and mutation and the termination of the algorithm. In DOA applications, the optimization is performed on the real values of the parameters to be searched instead of converting them to binary form which is called the floating point representation.

The operating steps of the Genetic Algorithm combined with MS-DOA is as follows:

(1) Initialization of the population

Initial population in DOA applications are formed by sets of possible angle values in elevation and azimuth. In most DOA problems, a pre-estimator is used to determine the range of the initial population (Li and Lu, 2005). In this study, a plain MUSIC algorithm is used for a rough estimate of region of interest. Each possible solution set in the initial population is defined by column vectors of containing the real valued floating point representation of elevation and azimuth angles

$$\mathbf{P}_n = [\theta_{1n} \phi_{1n} \dots \theta_{kn} \phi_{kn}]^T \quad (21)$$

Initial population \mathbf{P} is composed of these column vectors, where N denotes the population size:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} [\theta_{11}] & [\theta_{12}] & \dots & [\theta_{1N}] \\ [\phi_{11}] & [\phi_{12}] & \dots & [\phi_{1N}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\theta_{k1}] & [\theta_{k2}] & \dots & [\theta_{kN}] \\ [\phi_{k1}] & [\phi_{k2}] & \dots & [\phi_{kN}] \end{bmatrix} \quad (22)$$

(2) Ranking

Members of the population are sorted according to their fitness values. The fittest solution sets have higher rank and more closer to the desired solutions.

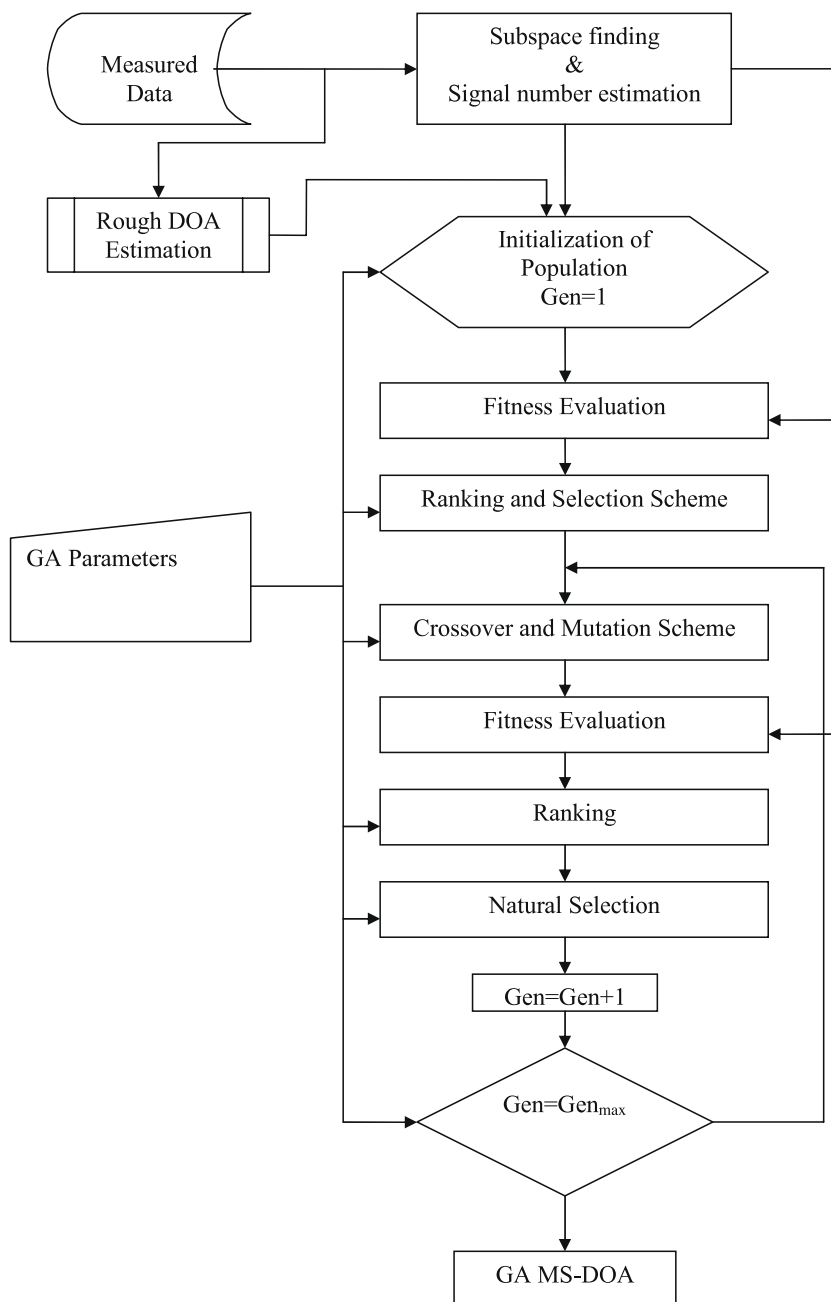


Fig. 1. The flowchart of Genetic Algorithm as search routine for MS-DOA.

In this study, the objective function or the fitness function is chosen as the minimizer of the cost function in Eq. (16) and thus the maximizer of the sum of the projections in Eq. (20).

- (3) Production of next generation by using parents: mating scheme

Mating scheme is a the most important part of the GA for the offsprings that have the best fit for the objective function are determined and ranked. There are various methods for mating schemes that include the crossover, mutation and selection routines. In this study, the Emperor Selective Scheme (EMS) is used to select the parents which are qualified to mate with each other. Crossover operation generates new offsprings from their parents. Crossover is usually carried out on the binary coded chromosomes but in this problem the chromosomes are defined by floating point representation and the crossover is performed on the real values of the angles (Yeo and Lu, 1999; Li and Lu, 2005; Man et al., 1996). Here, Extrapolation Crossover (EPX) technique is used on the real valued chromosomes. EPX is based on the generation of new offsprings according to the range defined by two parents. EPX takes two parents, P1 and P2, to produce two offsprings, C1 and C2, that lie outside the range, a , of the two parents. The offsprings have equal probability to lie within the range a , extended in both directions from P1 and P2. C1 will then lie on the same side as P1 and C2 on the same side as P2. The range, a , of the parents is defined by $\delta = (P2, P1)$ where $P2 > P1$ and $C1 = P1 + a\delta$, $C2 = P2 + a\delta$. Here δ is a random number chosen between 1 and 2. For the given DOA application, the optimum value of δ is set to 1.5 to have the maximum extrapolation (Yeo and Lu, 1999). Mutation is used to guarantee the variation of the populations. By using this operator the algorithms are prevented from approaching the local maxima instead of the global maxima. As in crossover operators, mutation is normally performed on binary coded forms of the chromosomes. In this study, the mutation is carried out on real valued chromosomes by inserting a new solution set into the population.

- (4) Elitism property

The convergence of GA can be improved by keeping some of previous population to next generation. Keeping some of fittest parents of previous population and inserting them into the new generation is called the elitism property (Goldberg, 1989; Man et al., 1996). In this study, 0.1 percent of the initial population is considered to be the elite population and kept for next generation.

- (5) Termination criteria

Termination criteria defines the quality of the selected or optimized population where the algorithm must stop. In most applications, the termination criteria is defined by the probability of being close to the desired value. In DOA applications, the termination

criteria is usually determined by the convergence of the solution set and the angles that satisfy the fitness function for a number of generations (Li and Lu, 2004; Varlamos and Capsalis, 2004). The solution sets that are considered as best parents for the upcoming selection routine are observed and if the fitness of the new offspring set does not improve the original parent set, then it can be determined to terminate the search algorithm. For the given problem scenario, the optimum termination is determined over the simulated channel signals for various ionospheric parameters.

An outline of the above described GA algorithm as the search routine for the MS-DOA is summarized in Fig. 1.

4. Plain MUSIC

Adaptive Direction Finding (DF) algorithms are more commonly used to separate the signals arriving on to the antenna array from various directions. All the modes exiting the ionosphere arrive to the receiving antenna with different elevation and azimuth angles. Adaptive DF algorithms are used to determine these arrival angles and thus separate the signals accordingly. Although various methods are reported in the literature for separation of multipath signals (Godara, 1997), eigenstructure methods such as MULTiple Signal Classification (MUSIC) (Schmidt, 1986), CLOSEST (Buckley and Xu, 1990) and Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT) (Roy and Kailath, 1989) are widely used since they can separate the angles with high resolution. Although these techniques are advantageous over the classical DF methods, with typical homogeneous array apertures, the algorithms fail to distinguish signals which are highly correlated (like multipath signals) and the resolution capability may be a couple of degrees (Godara, 1997; Pillau, 1989; Roy and Kailath, 1989). In order to cope with these disadvantages, preprocessing techniques like forward-backward smoothing are employed (Godara, 1997; Pillau, 1989). Yet, in order to use these preprocessing methods, the number of antennas that are utilized in the receiving array has to be doubled and also the computational complexity increases (Pillau, 1989).

Regardless of its shortcomings in separation of highly correlated multipath signals, MUSIC is one of the widely used DOA algorithms due to its ease in implementation and application. Unlike the MS-DOA algorithm as discussed in Section 2, the MUSIC algorithm operates on the estimated correlation matrix of the received source signals as

$$\mathbf{R}_x = \mathcal{E}\{\mathbf{x}_n \cdot \mathbf{x}_n^H\} \quad (23)$$

where \mathcal{E} is the expectation operator; superscript H denotes the Hermitian; and

$$\mathbf{x}_n = [\mathbf{x}_1(n) \ \dots \ \mathbf{x}_l(n) \ \dots \ \mathbf{x}_L(n)]^T \quad (24)$$

is the received antenna outputs at time sample n . Note that, in practice, the expectation operator is replaced by time averaging on a recent block of array outputs. Therefore, in MUSIC, the signal and noise subspaces are separated based on their differences in the power spectral domain. Such a treatment provides robust estimates to the direction of arrivals of impinging signals when the SNR is above a certain threshold and the impinging waveforms are not strongly correlated (Godara, 1997).

For additive noise in the channel, the eigenvectors of the correlation matrix should be separated into signal subspace and noise subspace. The Akaike Information Criterion (AIC) is a widely used measure for the ranking of eigenvalues. The MUSIC spectrum is computed by

first forming a steering vector $\mathbf{s}(\theta, \phi)$ for all θ and ϕ angles as

$$\mathbf{s}(\theta, \phi) = [e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta, \phi)} \dots e^{j2\pi f_0 \tau_L(\theta, \phi)}] \quad (25)$$

and the matrix containing the eigenvectors of noise subspace \mathbf{U} as

$$P_{MU}(\theta, \phi) = \frac{1}{|\mathbf{s}^H \mathbf{U}|^2} \quad (26)$$

The peaks of $P_{MU}(\theta, \phi)$ correspond to estimated DOA angles corresponding to the peaks of signal subspace. The outline of MUSIC algorithm as it is implemented in this study is provided in Fig. 2.

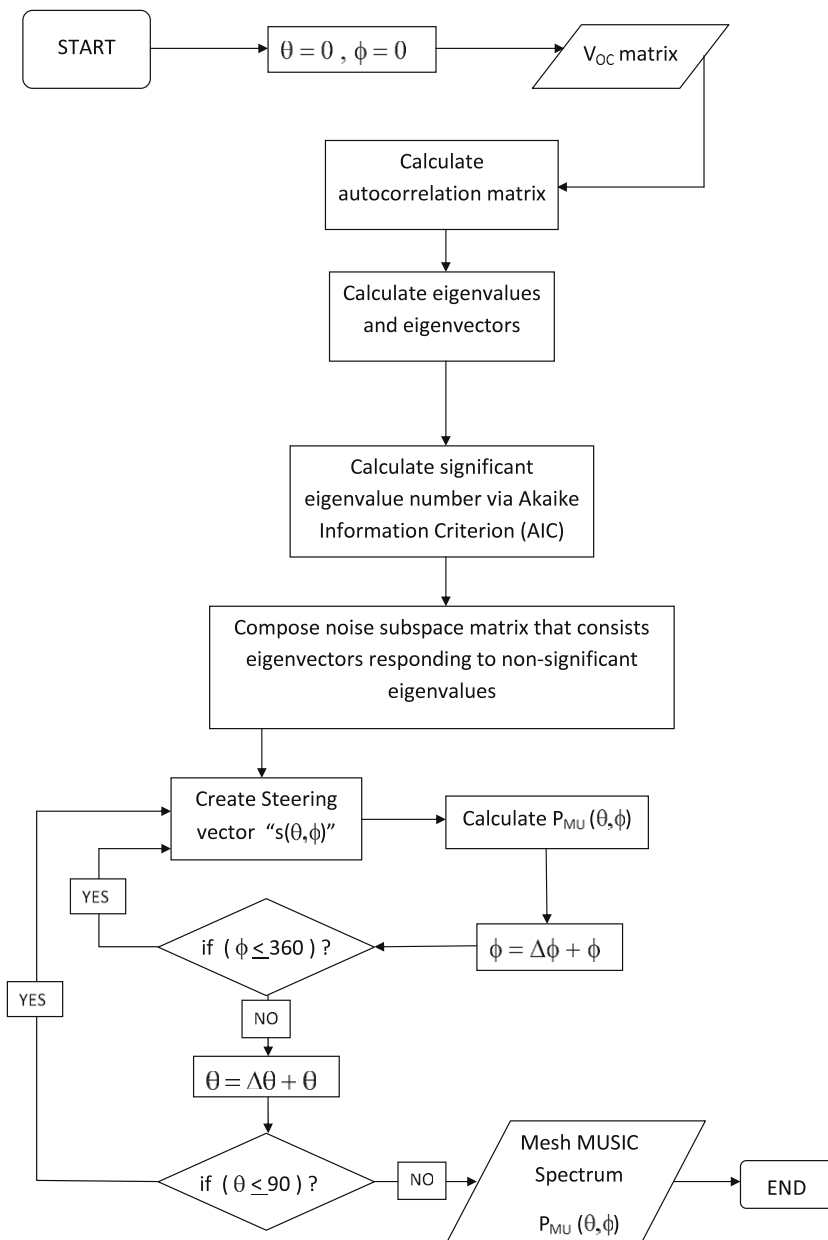


Fig. 2. The flowchart of MUSIC algorithm for DOA estimation.

5. Results

In this section, the performance of MS-DOA with GA is compared with Plain MUSIC algorithm both for simulated and experimental data. As discussed previously in this paper, MUSIC is the most commonly used Direction Finding (DF) method in the literature for high resolution spatial analysis due to its ease in implementation (Rogier et al., 1991). In spite of its drawbacks for HF DOA estimation, it forms a basis of comparison with other methods. For simulated data, the performance is based the root-mean-square-error (RMSE) for the following parameter set: ionospheric channel condition, receiver array type, receiver antenna type and signal-to-noise ratio (SNR). The RMSE is defined as

$$RMSE_{n_p} = \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{n_t=1}^{N_t} [(\theta_{0,n_p}(n_t) - \theta_{e,n_p}(n_t))^2 + (\phi_{0,n_p}(n_t) - \phi_{e,n_p}(n_t))^2]} \quad (27)$$

where $RMSE_{n_p}$ is the RMSE for path n_p ; N_t is the total number of trials for each simulation scenario and n_t is the trial index; $\theta_{0,n_p}(n_t)$ and $\phi_{0,n_p}(n_t)$ denote the original elevation and azimuth angles for the path n_p and trial n_t in the simulations, respectively; and $\theta_{e,n_p}(n_t)$ and $\phi_{e,n_p}(n_t)$ denote the estimated elevation and azimuth angles for the path n_p and trial n_t in the simulations, respectively. The channel simulations are done for various ionospheric conditions including good, moderate and poor ionosphere. The ionospheric channel simulations and forming of scenario sets are defined in detail in Arikan et al. (2003) and Arikan and Arikan (2003). For the time varying HF channel impulse response used in the simulation program is based on the model proposed in Watterson et al. (1970) where a Finite Impulse Response (FIR) filter is used to generate tap coefficients in delay for each sampling interval in time. The parameter set for simulation is obtained from the document (ITU-R, 1992). In the modified Watterson model implemented in this manuscript, we have multiplied the

tap coefficients with a spread function and superposed the spread functions with appropriate time delays at the filter output. The summary of the parameters of the modified Watterson model for ‘good’, ‘moderate’ and ‘poor’ ionospheric conditions are provided in Table 1 of Arikan and Arikan (2003). The amount of delay spread for good, moderate and poor conditions extends as 2, 4 and 6 pulses, respectively. 1-D linear antenna arrays, and 2×2 , 3×3 , and 5 element V shaped 2-D arrays are included in the simulations. The receiving antennas are chosen from widely used HF antennas such as vertical dipole, horizontal dipole, crossed loop and tripole.

Differentiating closer modes is a challenge when the angle separation and SNR are low due to the correlation of modes from the same origin. Thus, the first performance criterion for a DOA algorithm is how well it can differentiate the incoming signals for various SNRs. The separation of angles of the incoming signals, whether they are correlated or not, number and configuration of the receiving antennas and SNR are some of the factors that are effective in the performance of the DOA algorithms. When the RMSE errors for various scenarios are compared, it is observed that the linear array produces major ambiguity when signals arrive both from elevation and azimuth for MUSIC. The best performance is obtained when the array aperture increases from 1-D to 2-D and also wider the array aperture, lower SNR signals can be resolved with plain MUSIC without any preprocessing. Antennas that can receive from both polarizations such as crossed loop and tripole have higher performance compared to vertical or horizontal dipole arrays. When ionospheric conditions change from good to poor, large array apertures with 5 to 9 tripole antennas can keep their performance for SNR levels lower than 15 dB. Yet, for antenna arrays with a minimum number of antennas and smaller apertures, the performance degrades significantly for poor ionospheric conditions.

The parameters of GA such as the size of the initial population, percent of elitism, number of runs for convergence are optimized using various ionospheric conditions, array sizes and antenna types. When the MS-DOA with GA is

Table 1
The estimation of arrival angles for elevation and azimuth in degrees for 4.636001 MHz on May 02, 2003 between 23:03:19 and 23:24:19.

Time	MUSIC		MS-DOA with GA			
	Path 1		Path 1		Path 2	
	Elevation	Azimuth	Elevation	Azimuth	Elevation	Azimuth
23:03:19	25.7	194.8	29.5	196.5	35.9	195.7
23:06:19	20	117	28.9	194	34.7	193.6
23:09:19	25.1	195.6	27.9	196	33	194.7
23:12:19	32.9	196.3	26.3	196	32.4	195.6
23:15:19	42.9	197.4	26.5	196.8	34.8	195.2
23:18:19	27.5	195.3	27.5	196.1	33.6	195
23:21:19	30.2	194.8	28.7	195	34.7	194.8
23:24:19	29.3	195.7	28.8	194.8	33.5	194.7
Mean	29.2	185.9	28	195.7	34.1	194.9
Median	28.4	195.5	28.3	196	34.2	194.9

compared with MS-DOA with brute force search, it is observed that if the initial search space is narrowed down and only a limited number of paths (one or two) are received, then the MS-DOA estimates the arrival angles with higher accuracy and a computation time comparable to GA search. Yet, when the number of signals impinging on the array increases, the required computational time for brute force search grows exponentially with each path. MS-DOA with GA, on the other hand, is capable of producing reasonable estimates with a computational time that can be implemented on-line.

The performance of the two methods are compared with respect to an average scenario where for good ionospheric conditions the computational time is similar to each other. Figs. 3–5 denote the comparison of RMSE for SNR varying from 0 dB to 40 dB. The scenarios are formed for good ionospheric conditions for *a* and *b* subplots and poor ionospheric conditions for *c* and *d* subplots. The subplots *a* and *c* denote the RMSE from path 1 and subplots *b* and *d* are the RMSE for path 2. A 2×2 planar array with crossed loop antennas is implemented. For all figures, 20 trials are run for each scenario and the incremental step size in search was 0.1° in both elevation and azimuth. In Fig. 3, the signals arrive from angles $[35^\circ, 125^\circ]$ for path 1 and $[36^\circ, 123^\circ]$ for path 2. This scenario demonstrates a case where the angles of arrival are very close to each other both in elevation and azimuth. It is observed from Fig. 3 that plain MUSIC cannot resolve signals in elevation and azimuth for SNR lower than 25 dB, yet although RMSE

increases, MS-DOA with GA can resolve them even for 0 dB SNR. In Fig. 4, the signals arrive from angles $[36^\circ, 125^\circ]$ for path 1 and $[32^\circ, 125^\circ]$ for path 2. This scenario demonstrates a case where the angles of arrival is the same for azimuth and they are widely separated in elevation. For this case plain MUSIC can not resolve signals in elevation and azimuth for SNR lower than 25 dB for good ionosphere and 28 dB for poor ionosphere, due to the fact that MUSIC can not resolve with high accuracy in elevation. Again, although RMSE increases, MS-DOA with GA can resolve the two paths and estimate arrival angles for both elevation and azimuth even for 0 dB SNR. In Fig. 5, the signals arrive from angles $[36^\circ, 122^\circ]$ for path 1 and $[36^\circ, 126^\circ]$ for path 2. This scenario demonstrates a case where the angles of arrival is the same for elevation and they are widely separated in azimuth. For this case plain MUSIC can not resolve signals in elevation and azimuth for SNR lower than 15 dB for both good and poor ionosphere. The RMSE performance is better compared to two previous scenarios due to the fact that MUSIC can resolve with higher accuracy in azimuth. MS-DOA with GA can resolve the two paths and estimate arrival angles for both elevation and azimuth even for 0 dB SNR with lower RMSE compared to two previous scenarios.

For the application of plain MUSIC and MS-DOA with GA to experimental data, the data set from a high latitude path is chosen. The data set is provided by Dr. E.M. Warrington from University of Leicester, UK. The HF

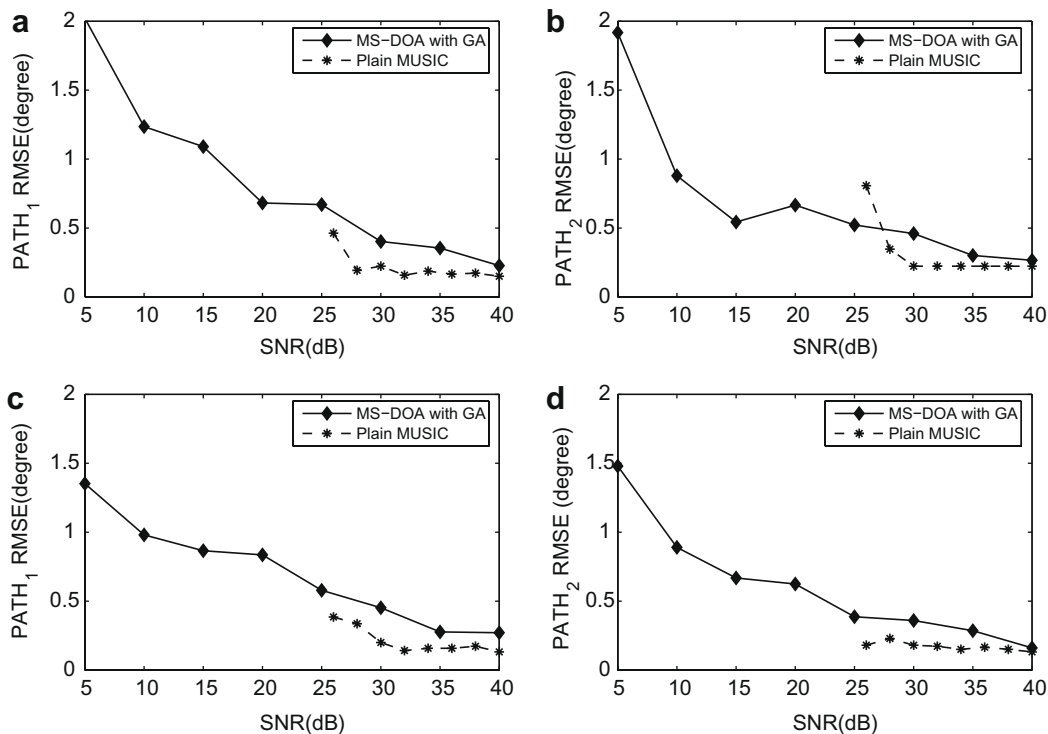


Fig. 3. RMSE versus SNR for 2×2 planar array with crossed loop antennas for good ionosphere (a) path 1, (b) path 2; and for poor ionosphere (c) path 1, (d) path 2 with arrival angles $[35^\circ, 125^\circ]$ for path 1 and $[36^\circ, 123^\circ]$ for path 2.

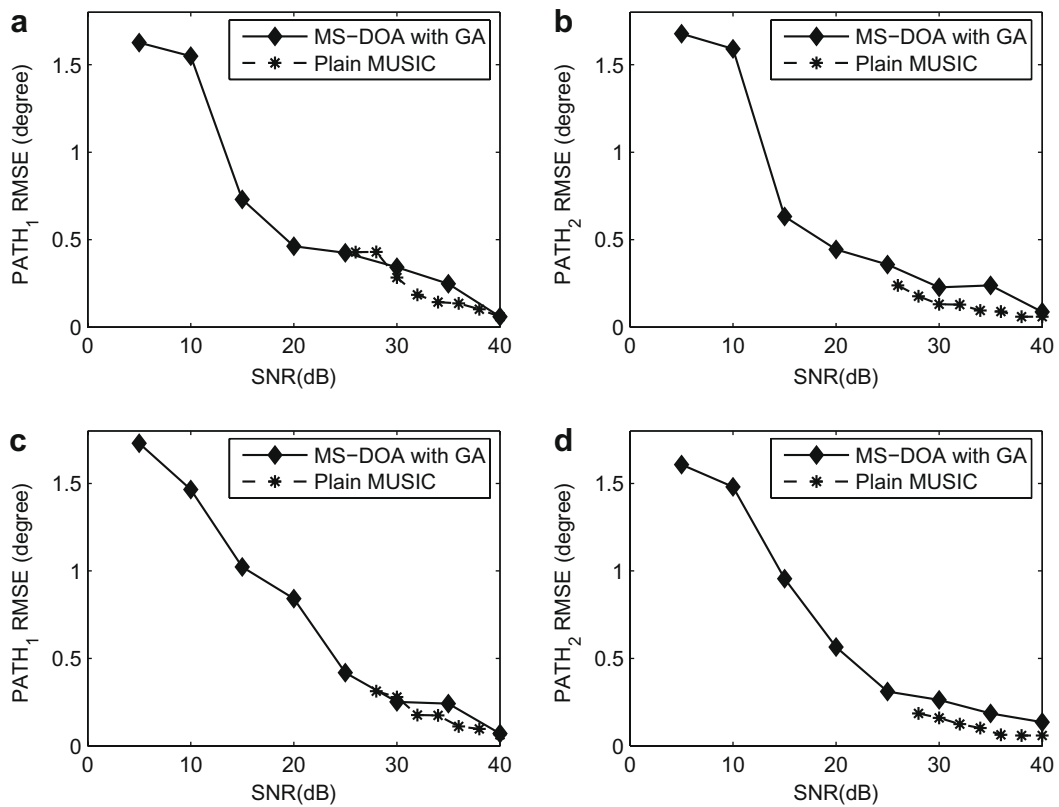


Fig. 4. RMSE versus SNR for 2×2 planar array with crossed loop antennas for good ionosphere (a) path 1, (b) path 2; and for poor ionosphere (c) path 1, (d) path 2 with arrival angles $[36^\circ, 125^\circ]$ for path 1 and $[32^\circ, 125^\circ]$ for path 2.

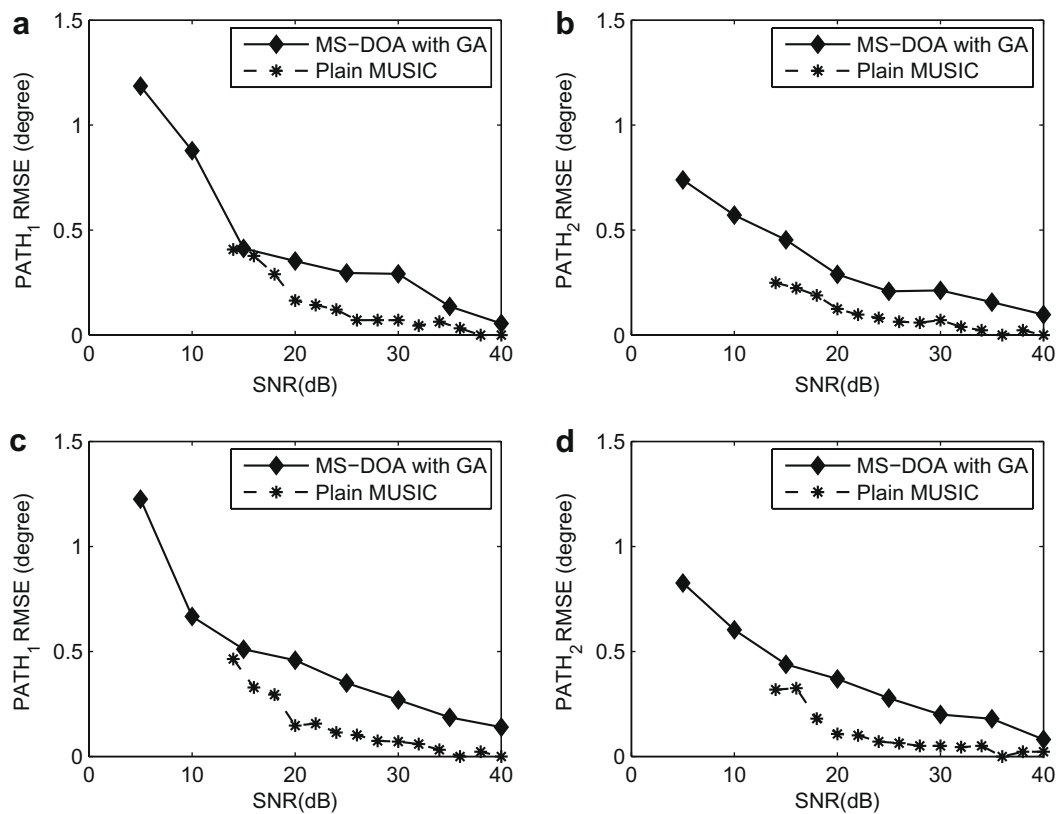


Fig. 5. RMSE versus SNR for 2×2 planar array with crossed loop antennas for good ionosphere (a) path 1, (b) path 2; and for poor ionosphere (c) path 1, (d) path 2 with arrival angles $[36^\circ, 122^\circ]$ for path 1 and $[36^\circ, 126^\circ]$ for path 2.

transmitter is located at Uppsala, Sweden and the receiver array is at Kiruna, Sweden. The receiver array is formed of 6 antennas, distributed inhomogeneously in a circular array. Out of this set of 6 antennas, only 5 antennas are calibrated and used in the DF problem. The transmitted signals are Barker-13 coded BPSK pulses modulated at 1667 baud with a repetition rate of 55 coded pulses per second. Signal duration is 2 s. The carrier frequency is changed

every 30 s. The frequencies are repeated every 3 min. The details of the transmitted signal are provided in Siddle et al. (2004) and the receiver array is given (Warrington et al., 2000). Due to the structure of the HF link, only the signals at 4.63 MHz and 6.95 MHz proved to be useful in the analysis. The antenna output signals are normalized with respect to their $\mathcal{L}2$ norm before they are introduced to the DF algorithms. The estimates of arrival angles for

Table 2
The estimation of arrival angles for elevation and azimuth in degrees for 6.953 MHz on May 02, 2003 between 23:00:49 and 23:24:49.

Time	MUSIC		MS-DOA with GA			
	Path 1		Path 1		Path 2	
	Elevation	Azimuth	Elevation	Azimuth	Elevation	Azimuth
23:00:49	30.8	196	33.4	193.1	36.5	194.8
23:03:49	31.7	196.5	33	193.2	37.1	194.3
23:06:49	31.9	195.7	33.4	194	37.2	195.6
23:09:49	32.6	195.3	33.7	194.2	37.8	195.7
23:12:49	33	195.2	33.3	193.5	37.4	195.3
23:15:49	33.3	197.4	32.6	194.6	36.5	196
23:18:49	32.4	196.1	33.4	194.3	37.9	196.2
23:21:49	32.3	196.3	32.9	194.4	36.7	196.1
23:24:49	32.8	195.8	32.3	194.2	36.3	195.6
Mean	32.3	196	33.1	193.9	37	195.5
Median	32.4	196	33.3	194.2	37.1	195.6

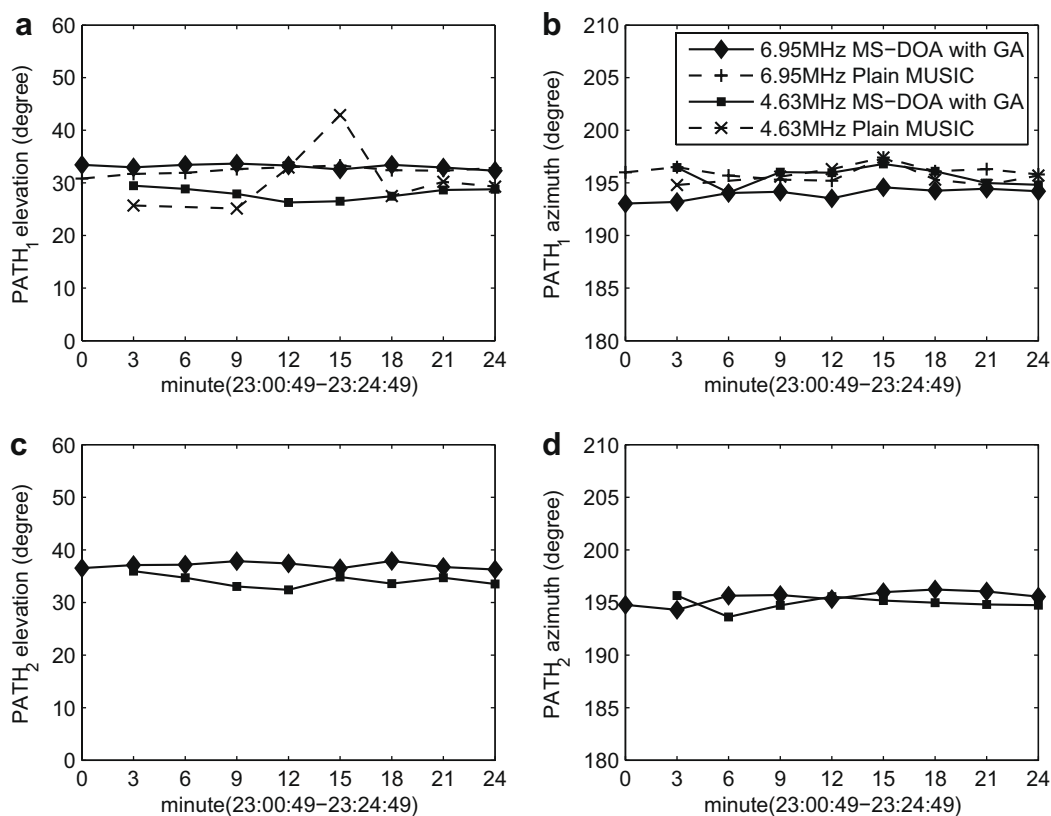


Fig. 6. Estimation of arrival angles for MS-DOA with GA and MUSIC for two frequencies for path 1 (a) elevation, (b) azimuth; for path 2 (c) elevation, (d) azimuth.

the test cases for 4.636001 MHz between 23:03:19 and 23:24:19 are provided in Table 1 on May 2, 2002. Here, the numbers denote the hour, the minute and the seconds, respectively. On May 2, 2002, at 2300 UT, sunspot number was 86, Kp index was 2+, Ap index was 9 and Dst index was -17 . The approximate distance between the Uppsala and Kiruna is 886 km and Uppsala is 193° from the local north of Kiruna in the azimuth. The elevation of multipath components for both frequencies are expected to be between 20° and 40° according to the results in Siddle et al. (2004).

The estimates of arrival angles for the test cases for 6.953 MHz between 23:00:49 and 23:24:49 are provided in Table 2. Here, the numbers denote the hour, the minute and the seconds, respectively.

As it might be readily observed from Tables 1 and 2, for both frequencies, Plain MUSIC is able to detect only one path, yet for MS-DOA with GA, two paths are estimated. The estimate of the MUSIC in one path corresponds to the first path estimated with MS-DOA. The mean and median of the angles during the estimation interval are also provided in the tables. With MS-DOA estimates, both the mean and the median are close to each other for all paths indicating a consistency and robustness in the estimates. When the two paths estimated are compared, it is also observed that the two paths are very close to each other in azimuth and they are separated with couple of degrees in elevation. The mean estimates for the arrival angles are in very well accordance with the expected azimuth and elevation angles. The angle spread is larger in MUSIC than MS-DOA with GA for both frequencies. The estimates are also provided in Fig. 6 for easier viewing. In Fig. 6a and b, the estimates for the arrival angle in elevation and azimuth, respectively, are provided for the first path and for the two frequencies. The first path is estimated by both MUSIC and MS-DOA with GA. In Fig. 6c and d, the elevation and azimuth estimates for the two frequencies are given for path 2. The second path is only estimated by MS-DOA with GA. From the analysis of both simulated and experimental data, it can be observed that MS-DOA with GA provides a powerful alternative in direction of arrival and multipath separation problems in HF links.

6. Conclusion

In this paper, Multipath Separation-Direction of Arrival (MS-DOA), is combined with Genetic Algorithm to estimate arrival angles in elevation and azimuth for signals incoming from various ionospheric paths. The signals at the output of the reference antenna can also be identified with high accuracy. In MS-DOA, both the array output vector and incoming signal vector are expanded in terms of a basis vector set. A linear equation is formed using the coefficients of the basis vector for the array output vector and the incoming signal vector and the array manifold. The angles of arrival in elevation and azimuth which max-

imize the sum of the magnitude squares of the projection of the signal coefficients on the range space of the array manifold are the required separation angles. Once the array manifold is estimated then the incoming signals can also be determined using the basis vectors and signal coefficients. The search for maximizing angles can be eliminated by solving the above mentioned system in closed form for certain antenna configurations; it can be performed by brute force checking each possible angle pair in the search space; or by a nonlinear search algorithm like Genetic Search. The performance of the MS-DOA is a function of the array configuration and number of antennas in the receiving array. As the number of receiving sensors increase the performance of the MS-DOA improves. The optimum array configuration should be determined according to the statistical structure of the desired HF link. In this paper, the performance of MS-DOA with GA is compared with plain MUSIC, for both simulation and experimental data. According to our analysis, MS-DOA with GA provides very accurate estimates of arrival angles both in elevation and azimuth even at low SNRs and small angle separations. With MS-DOA, it is also possible to estimate the incoming signals at the output of the reference antenna successfully. This feature is not available in MUSIC. Thus, MS-DOA provides significant improvement over MUSIC algorithm with ease in implementation and shortened search time. MS-DOA with GA proves itself as a very powerful alternative in arrival angle estimation and multipath separation.

Acknowledgments

This work is supported by TÜBİTAK EEEAG Grant 105E171. The authors thank to Dr. E.M. Warrington of University of Leicester, UK, for supplying the experimental data.

References

- Afraimovich, E.L., Chernukhov, V.V., Kobzar, V.A., Palamartchouk, K.S. Determining polarization parameters and angles of arrival of HF radio signals using three mutually orthogonal antennas. *Radio Sci.* 34 (5), 1217–1225, 1999.
- Arikan, F., Yilmaz, N., Arikan, O., Miled, M.K.B.H. Mode separation-direction of arrival angle estimation. *Radio Sci.* 38(1), 1007, 7-1/7-14, 2003. doi:10.1029/2002RS002606.
- Arikan, F., Arikan, O. Adaptive tracking of narrowband HF channel response. *Radio Sci.* 38(6), 1108, 16-1/16-0, 2003. doi:10.1029/2003RS002879.
- Buckley, K.M., Xu, X.L. Spatial spectrum estimation in a location sector. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* ASSP-38, 1842–1852, 1990.
- Godara, J. Application of antenna arrays to mobile communications, part II: beamforming and direction of arrival considerations. *Proc. IEEE* 85, 1193–1245, 1997.
- Goldberg, D.E. *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Canada, 1989.
- Goodman, J.M. *HF Communications – Science and Technology*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.

- Haykin, S. Adaptive Filter Theory. Prentice Hall, USA, 1989.
- ITU-R, CCIR. Recommendation 520-2: use of high frequency ionospheric channel simulators. Recommendations and Reports of CCIR, ITU, Geneva, 1992.
- Li, M.H., Lu, Y.L. Improving the performance of GA-ML DOA estimator with a resampling scheme. *Signal Process.* 84, 1813–1822, 2004.
- Li, M.H., Lu, Y.L. Accurate direction of arrival estimation of multiple sources using a genetic approach. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 5, 343–353, 2005.
- Man, K.F., Halang, W.A., Tang, K.S., Kwong, S. Genetic Algorithms for Control and Signal Processing. Springer-Verlag, New York, 1996.
- Pillau, S.U. Array Signal Processing. Springer-Verlag, New York, 1989.
- Proakis, J.G. Digital Communications. third ed.. McGraw Hill, New York, 1995.
- Rogier, J.L., Multedo, G., Bertel, L., Baltazart, V. Ionospheric multipaths separation with a high resolution direction finding algorithms mapped on an experimental system. *Proc. IEE Fifth International Conference, HF Radio Systems and Techniques*, Conference Publication No. 339, July 1991.
- Roy, R., Kailath, T. ESPRIT – estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* ASSP-37, 984–995, 1989.
- Schmidt, R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. Antenna Propagat.* AP-34 (3), 276–280, 1986.
- Siddle, D.R., Stocker, A.J., Warrington, E.M. Time of flight and direction of arrival of HF radio signals received over a path along the midlatitude trough: observations. *Radio Sci.* 39, RS4008, 2004. doi:10.1029/2004RS003049.
- Van Der Veen, A. Algebraic methods for deterministic blind beamforming. *Proc. IEEE* 86 (10), 1987–2008, 1998.
- Varlamos, P.K., Capsalis, C.N. Direction-of-Arrival estimation (DoA) using switched parasitic planar arrays and the method of genetic algorithms. *Wireless Pers. Commun.* 28, 59–75, 2004.
- Warrington, E.M., Jackson, C.A., Lundborg, B. Directional diversity of HF signals received over high latitude paths, and the possibility of improved data throughput by means of spatial filtering. *IEE Proc. Microw. Antenna Propagat.* 147, 487–494, 2000.
- Watterson, C.C., Jurashek, J.R., Bensema, W.D. Experimental confirmation of an HF channel model. *IEEE Trans. Commun.* 18, 792–803, 1970.
- Yeo, B.K., Lu, Y. Array failure correction with a genetic algorithm. *IEEE Trans. Antenna Propagat.* 47 (5), 823–828, 1999.
- Yilmaz, N. A New Algorithm for HF Multipath Separation and Computation of Arrival Angles. M.Sc. Thesis (in Turkish), Hacettepe University, Ankara, Turkey, 2000.

Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring

I. Sayin,¹ F. Arikan,¹ and K. E. Akdogan¹

Received 23 October 2009; revised 19 August 2010; accepted 25 August 2010; published 23 December 2010.

[1] Monitoring of the ionospheric variability is necessary for improving the performance of communication, navigation, and positioning systems. Total electron content (TEC) is an important parameter in analyzing the variability of the ionosphere. Owing to sparse distribution of TEC in a given region, spatial interpolation methods are used for mapping TEC on a dense grid. Typically, TEC maps are produced at time intervals that do not match the variability of the regional ionosphere. To capture the local, small-scale variability, the temporal update period (TUP) in regional TEC monitoring has to be optimized. In this study, the wide sense stationarity (WSS) period is proposed to be used as the optimum TUP of the regional TEC maps. Individual WSS periods of TEC are obtained by the sliding window statistical analysis method. Four types of measures are employed to compute the differences between TEC maps. When WSS periods of the sampling points and the differences of TEC maps are compared with each other, it is observed that for the quiet days of the ionosphere where the general temporal trends dominate, the maximum WSS period in the region can be chosen as the optimum TUP. For the disturbed days of the ionosphere where high temporal and spatial variability is observed, averages or the minimums of WSS periods in a given region have to be chosen as the optimum TUP. Thus, WSS period can be developed into a useful tool in monitoring the ionospheric variability in a given region.

Citation: Sayin, I., F. Arikan, and K. E. Akdogan (2010), Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring, *Radio Sci.*, 45, RS6018, doi:10.1029/2009RS004316.

1. Introduction

[2] The ionosphere affects the operation of various systems such as high frequency (HF), satellite communication, and navigation systems. The performance of these systems can be improved by adjusting the system parameters or correcting the ionospheric error with respect to the varying nature of the ionosphere. Monitoring the ionospheric variability that constitutes an important component of space weather is a complicated task due to the coupling of solar, geomagnetic, and seismic activity. The ionosphere is a temporally and spatially varying medium that is characterized by its electron density distribution. Total electron content (TEC), defined as the total number of free electrons in a tube with cross-sectional area of 1 m^2 centered along a

raypath, is one of the important parameters used to investigate ionospheric variability. TEC is measured in terms of TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$). TEC can be obtained from the worldwide network of dual frequency global positioning system (GPS) receivers [Manucci *et al.*, 1993; Wilson and Mannucci, 1994; Komjathy, 1997; Komjathy *et al.*, 1998; Manucci *et al.*, 1998; Hernández-Pajares *et al.*, 1999; Schaer, 1999; Arikan *et al.*, 2003, 2004; Nayir *et al.*, 2007]. Owing to sparse and irregular distribution of these receivers, TEC cannot be directly obtained everywhere on the ionosphere. Accurate and robust interpolation methods can be used to estimate TEC for every desired location in a given region [Hernández-Pajares *et al.*, 2002; Opperman *et al.*, 2007; Foster and Evans, 2008; Sayin, 2008; Sayin *et al.*, 2008b; Yilmaz *et al.*, 2009; Arikan *et al.*, 2009]. To better visualize the spatial ionospheric variation, TEC maps can be produced by estimating TEC values on a dense grid.

[3] The temporal update period (TUP) of consecutive TEC maps (time between consecutive TEC maps) is an important parameter in regional and global monitoring of ionospheric variability. The optimum TUP should be

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Beytepe, Ankara, Turkey.

sufficiently small to capture the significant variations in the underlying physics of the ionosphere; however, it should be sufficiently large to allocate computational and storage resources efficiently [Erol and Arikan, 2005; Akdogan et al., 2007; Sayin et al., 2009]. Typically, TEC maps are produced at time intervals that do not necessarily capture the variability of regional ionospheres. For example, the global ionospheric maps (GIM) are produced with a time resolution of 2 hours and a spatial resolution of 2.5° in latitude and 5° in longitude by the analysis centers of the International GNSS Service (IGS), available at <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>. Although these maps indicate the general temporal and spatial trends of the ionosphere, regional variations in both time and space cannot be observed with a desired level of sensitivity and accuracy. Furthermore, the Jet Propulsion Laboratory (JPL), <http://iono.jpl.nasa.gov>, provides GIMs updated every 5 minutes; the Space Weather Application Center-Ionosphere (SWACI), <http://swaciweb.dlr.de/>, provides TEC maps over Europe for every 5 minutes; the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Space Weather Prediction Center (SWPC) in the USA, <http://www.swpc.noaa.gov>, provides TEC maps over the USA for every 15 minutes; and MIT Haystack Observatory, <http://madrigal.haystack.mit.edu/madrigal/>, provides TEC values over global landmass where GPS receivers are operational for every 5 minutes. Also, there are satellite-based augmentation systems (SBAS) such as the Wide Area Augmentation System (WAAS), <http://www.nstb.tc.faa.gov> and European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), <http://www.egnos-pro.esa.int>, that provide real-time ionospheric corrections to their users. In the literature, there is no study discussing the optimum temporal update periods or how these 5 minute, 15 minute, or 2 hour temporal update periods are chosen. In this study, we propose a novel technique to choose the optimum TUP adaptively for regional ionosphere monitoring. Owing to the time-varying nature of the ionosphere, standard statistical methods do not provide reliable information. Therefore, the TUP should be estimated by using statistical analysis methods with a regional random field model [Sayin et al., 2008a; Sayin, 2008].

[4] Investigation of a regional wide sense stationarity (WSS) period can be considered a practical solution in optimizing the TUP [Akdogan et al., 2007; Sayin et al., 2009]. In a WSS period, first- and second-order moments that correspond to the mean and variance are constants [Papoulis and Pillai, 2002]. The regional WSS period of a stochastic process is the time interval in which the mean and variance of the process can be considered as constants. If the WSS period is chosen as the TUP, then significant variations of the regional ionosphere can be captured. In the work of Arikan and Erol [1998], an efficient tool is developed to obtain the statistical characterization of the time variability of HF channel

response. The method employs sliding window statistical analysis to estimate the time-varying mean and variance to capture the temporal variability. In the work of Erol and Arikan [2005], the method is applied to the TEC data computed from GPS observables, and the WSS periods of individual GPS stations are estimated manually for both quiet and disturbed days of the ionosphere. In the work of Akdogan et al. [2007], the method is further developed to obtain the WSS periods automatically.

[5] In this study, the WSS period is proposed to be used as the optimum TUP of the regional TEC maps. For this purpose, GPS-TEC is obtained for a wide selection of European IGS stations for quiet and disturbed days of the ionosphere. The WSS period of TEC for individual IGS stations is estimated for each hour of the chosen days. Also, TEC maps are produced by the ordinary Kriging interpolation algorithm for every 2.5 minute time interval. To quantify the variation from one map to the other, we have employed four different techniques: namely, symmetric Kullback-Leibler Distance (KLD), K ; pointwise maximum of the KLD, k_m ; sum of the absolute value of the pointwise differences, A ; and the maximum of absolute value of the pointwise differences, A_m . The differences between the TEC maps during a day are obtained using all of these methods from 0000 UT to 2400 UT with a step size of 2.5 minutes. The difference levels between maps are compared with the WSS periods of the regional TEC maps. It is observed that WSS periods of TEC for individual GPS stations are a promising and cost-efficient indicator of ionospheric temporal variability for the regional TEC maps for both quiet and disturbed days.

2. Estimation of WSS Period

[6] In the literature, the variability of the ionosphere is generally investigated using the mean, the standard deviation, and the median values of TEC and layer critical frequencies. Generally, these measured or calculated parameter values are sparse in space and in time. Moreover, hourly, daily, and monthly variations are represented by daily or monthly mean or median values. The long-term statistics of the ionosphere are obtained by relative deviation, relative variability, upper interquartile, lower interquartile, and interquartile difference methods. Although these statistics provide a general trend structure of the ionosphere over daily, monthly, seasonal, yearly, and 11-year solar cycle periods, they are insufficient for ionospheric channel characterization and determination of within-the-hour variability. TEC shows a random time- and space-varying structure, which can be modeled as a stochastic process. Previously, the sliding window analysis method has been used to determine locally stationary time intervals of the stochastic processes to calculate first- and second-order statistics of the HF channel and TEC [Arikan and Erol, 1998; Erol and Arikan, 2005]. The time

interval in which the time-varying ionosphere is assumed to be WSS can be taken as the optimum TUP as discussed in *Akdogan et al.* [2007]. Within the WSS interval, the first- and second-order moments of the TEC can be taken as constants [*Papoulis and Pillai*, 2002].

[7] *Arikan and Erol* [1998] proposed a statistical analysis method to obtain the statistical characterization of the time variability of an HF channel response. The method employs sliding window statistical analysis to estimate the time-varying first-order and second-order moments of the channel response. In the work of *Erol and Arikan* [2005], the method is applied manually to the TEC data obtained from one high-latitude and three midlatitude GPS stations, namely, Kiruna (Sweden), Kiev (Ukraine), Ankara (Turkey), and Metzoke Dragot (Israel), for the solar maximum period of 23 to 28 April 2001. The date 23 April 2001 is a negatively disturbed day, 28 April 2001 is a positively disturbed day, and 25 April 2001 is a quiet day of the ionosphere. The quiet and disturbed days of the ionosphere are classified and provided in the web site of the Ionospheric Dispatch Center in Europe (IDCE), <http://www.cbk.waw.pl/rwc/idce.html>. It is found that for the midlatitude stations, the WSS period is within 15 to 20 minutes during the ionospheric quiet day. During the negatively or positively disturbed days, the WSS can be 3 to 25 minutes. For the high-latitude station, the WSS period is found to be generally shorter than the WSS period of midlatitude stations owing to increased ionospheric activity. The WSS period for the high-latitude GPS station is found to be about 10 minutes for the quiet day and 5 to 7.5 minutes for the disturbed days of the ionosphere. In the work of *Akdogan et al.* [2007], the method is improved to obtain the WSS periods automatically and is applied to the TEC data obtained from three IGS stations Tromsø (Norway), Ankara (Turkey), and Malindi (Kenya) located in different geomagnetic regions. In daily WSS period analysis, the high-latitude ionosphere has the shortest WSS period and the low-latitude ionosphere has the longest WSS period. In the yearly WSS analysis of 2006, the WSS period of high and midlatitude ionosphere are close to each other, and at low latitude the WSS period is the longest owing to lower variability.

[8] In this study, the WSS period is investigated to determine whether it is possible to use this parameter as the TUP of the regional TEC maps. The WSS periods are estimated by the method of *Akdogan et al.* [2007] and compared with the differences of TEC maps. TEC maps are obtained by the Kriging algorithm, which is introduced in the next section.

3. Kriging Interpolation Method

[9] In geostatistics, environmental sciences, geology, and hydrogeology, random function models are used to

model the processes distributed in nature that show spatial and temporal variability [*Wackernagel*, 1998]. Since TEC is a complex function of many parameters such as solar activity, geomagnetic storms, latitude, longitude, and time, it is necessary to model TEC statistically as a random function. Kriging is a widely used spatial interpolation method that employs this random function model. Kriging estimation at a point is a linear combination of the values at sampled points. The weights are calculated taking into account the correlation or semivariogram of values as a function of the distance between the data points and by minimizing the error variance and satisfying the unbiasedness constraints. In the works of *Sayin* [2008], *Sayin et al.* [2007], and *Sayin et al.* [2008a], several Kriging algorithms, including ordinary Kriging (OK) and universal Kriging (UK), are compared over the interpolation error values. The OK algorithm is demonstrated to be a robust algorithm owing to its high performance for sparse sampling of the ionosphere. In the works of *Sayin* [2008] and *Sayin et al.* [2008a], the OK method is also applied to the TEC values derived from GPS stations for different hours within a day, and it is observed that the OK algorithm can represent the general trends of the TEC variation.

[10] In this study, the OK algorithm is used as the interpolation method for regional TEC mapping. The experimental semivariogram function is estimated from the residuals, which are found by fitting a linear trend to the TEC values on the sampling points and subtracting the trend from the TEC values. An exponential semivariogram model is fitted to the experimental semivariogram, which is finally used in the OK algorithm as explained in detail by *Sayin et al.* [2007, 2008a, 2008b] and *Sayin* [2008]. In the next section, the comparison method of WSS periods and the difference of consecutive TEC maps are given.

4. Comparison of WSS Periods and TEC Maps

[11] In this study, the WSS period for each station is estimated and the TEC maps of the chosen region are produced throughout a day. The differences between TEC map pairs are calculated and compared with the estimated WSS periods.

[12] The differences between TEC maps are calculated by four different functions having different characteristics. These are symmetric Kullback-Leibler distance (KLD) [*Cover and Thomas*, 2006], K ; pointwise maximum of the KLD, k_m ; sum of the absolute value of the pointwise differences, A ; and the maximum of absolute value of the pointwise differences, A_m .

[13] Let $\mathbf{z}(n_t) = [z(1, n_t) \dots z(n_p, n_t) \dots z(N_p, n_t)]$ be a vector whose elements are TEC map values, $z(N_p, n_t)$,

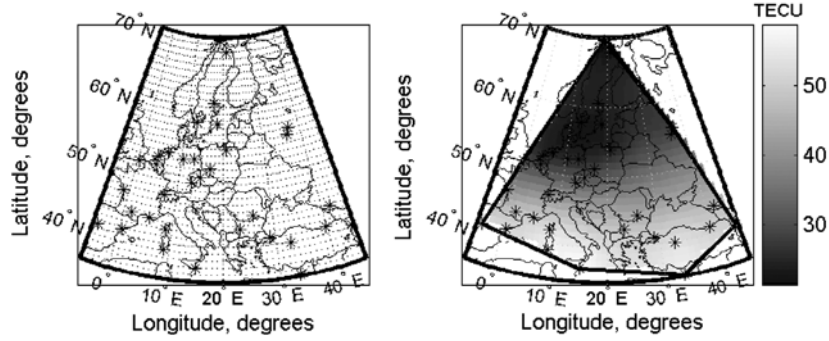


Figure 1. (a) Position of GPS stations (asterisks) and reconstruction grid (dots), (b) TEC map reconstructed using ordinary Kriging inside the convex hull for 29 October 2003 at 1200 UT.

estimated by the OK algorithm at time n_t . N_p is the total number of points on which the TEC values are estimated, and n_p is the index of the points.

[14] The difference function $K(n_t, n_t + \tau)$ is the KLD between two TEC maps estimated at times n_t and $n_t + \tau$:

$$K(n_t, n_t + \tau) = \sum_{n_p=1}^{N_p} \hat{p}(n_p, n_t) \ln \frac{\hat{p}(n_p, n_t)}{\hat{p}(n_p, n_t + \tau)} + \sum_{n_p=1}^{N_p} \hat{p}(n_p, n_t + \tau) \ln \frac{\hat{p}(n_p, n_t + \tau)}{\hat{p}(n_p, n_t)} \quad (1)$$

In equation (1), $\hat{p}(n_p, n_t)$ is the normalized element of the vector $\hat{\mathbf{p}}(n_t)$, which is given in equation (2):

$$\hat{\mathbf{p}}(n_t) = \frac{\mathbf{z}(n_t)}{\sum_{n_p} z(n_p, n_t)} \quad (2)$$

The pointwise maximum of the KLD, $k_m(n_t, n_t + \tau)$, is calculated in equation (3):

$$k_m(n_t, n_t + \tau) = \max_{n_p=1, \dots, N_p} \left(\hat{p}(n_p, n_t) \ln \frac{\hat{p}(n_p, n_t)}{\hat{p}(n_p, n_t + \tau)} + \hat{p}(n_p, n_t + \tau) \ln \frac{\hat{p}(n_p, n_t + \tau)}{\hat{p}(n_p, n_t)} \right) \quad (3)$$

where $\max(\cdot)$ function gives the maximum argument over the n_p index. Another difference measure $A(n_t, n_t + \tau)$, which is defined as the sum of the absolute differences of the Kriging maps, is given in equation (4):

$$A(n_t, n_t + \tau) = \sum_{n_p=1}^{N_p} |z(n_p, n_t) - z(n_p, n_t + \tau)| \quad (4)$$

The difference function $A_m(n_t, n_t + \tau)$, which gives the maximum absolute value of the element-wise subtraction, is given in equation (5):

$$A_m(n_t, n_t + \tau) = \max_{n_p=1, \dots, N_p} |z(n_p, n_t) - z(n_p, n_t + \tau)| \quad (5)$$

Since K and A functions are the sum of the measures of distances at all points, they indicate the overall differences throughout the maps. Thus, it makes it difficult to detect small-scale local variations with these two difference measures. However, the A_m and k_m functions are the maxima of the pointwise differences, and they are more sensitive to the small-scale local differences between the TEC maps. By observing both the sum and the maximum differences, global and local differences between the maps can be investigated.

[15] The results of the comparisons of differences between TEC maps throughout a day and WSS periods are given in the next section.

5. Results

[16] The choice of the WSS period of TEC as an optimum TUP is tried over Europe using IGS stations for number of days with different geomagnetic disturbance levels. The 39 IGS stations are denoted by asterisks in Figure 1a, and the convex hull for optimum OK reconstruction is demarcated by Yerevan, Armenia (40.23° N, 44.50° E), Robledo, Spain (40.43° N, 4.25° W), Tromsø, Norway (69.66° N, 18.94° E), and Nicosia, South Cyprus (35.14° N, 33.39° E), as shown in Figure 1b. The complete list of IGS GPS stations is given in the work by Sayin [2008]. The vertical TEC values are obtained by IONOLAB-TEC from www.ionolab.org using the Reg-Est algorithm discussed in Arıkan et al. [2003], Arıkan et al. [2004], Arıkan et al. [2007], and Nayir et al. [2007].

Table 1. A_p and K_p Indices of the Days

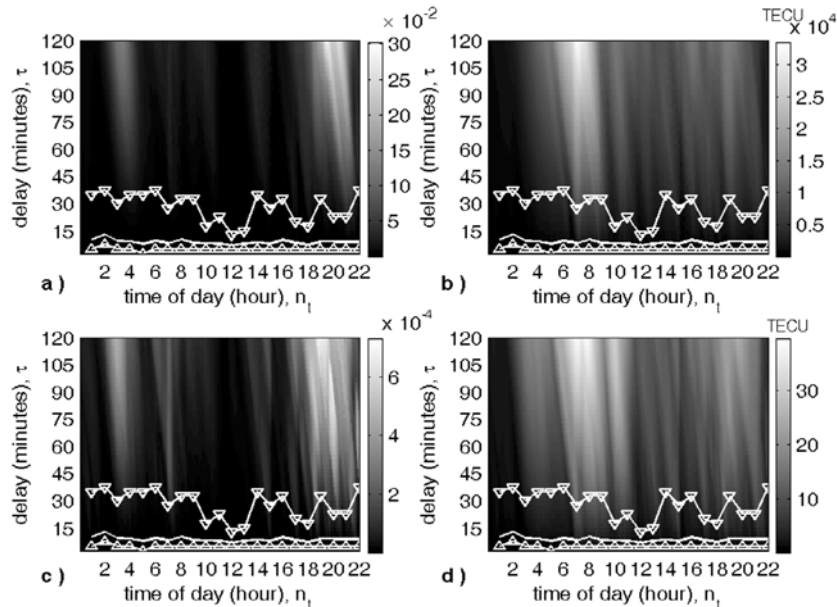
Days	A_p	K_p at UT							
		0030	0330	0630	0930	1230	1530	1830	2130
29 October 2003	189	4	3	9	8	7	7	9	8
24 August 2005	110	3	3	7	9	8	5	6	5
29 April 2006	3	1	0	0	0	1	2	1	1
5 May 2006	13	4	3	4	3	2	2	0	1

[17] For this study, two geomagnetically disturbed days are chosen as 29 October 2003 and 24 August 2005. Also, 29 April 2006 and 5 May 2006 are chosen as the quiet days. The A_p and K_p indices that show the geomagnetic disturbance level are taken from the web site of the Space Weather Prediction Center, www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html. In Table 1, A_p and K_p indices for the chosen days are provided. For the days 29 October 2003 and 24 August 2005, A_p exceeds 30 and K_p exceeds 5, which indicate storm conditions. For the days 29 April 2006 and 5 May 2006, A_p and K_p are smaller than the threshold values and these days are the quiet days of the ionosphere.

[18] The error variance of Kriging reconstruction increases rapidly for grid points (indicated with small dots in Figure 1a) that are not encircled by data points. Therefore, to improve the interpolation, we have limited the reconstruction to the convex hull that is demarcated by the data points. The number of points interpolated inside the convex hull encircled by the GPS stations is

approximately 1,000. Then the sampling rate (number of points that provide the measurement versus the total number of grid points inside the convex hull) is calculated as $\frac{40}{1000} \times 100 = 4\%$. An example reconstruction using the ordinary Kriging algorithm is provided in Figure 1b for the date 29 October 2003 at 1200 UT.

[19] For $0000 \text{ UT} \leq n_t \leq 2359 \text{ UT}$, TEC maps are produced with 2.5 minute intervals, since it is observed that the ionosphere does not change significantly within this period. Equations 1, 3, 4, and 5 are applied to the TEC maps where τ varies from 2.5 minutes to 120 minutes, with 2.5 minute steps. $K(n_t, n_t + \tau)$, $k_m(n_t, n_t + \tau)$, $A(n_t, n_t + \tau)$, and $A_m(n_t, n_t + \tau)$ values are compared with wss_{avg} , wss_{max} , and wss_{min} in Figures 2 to 5 for 29 October 2003, 24 August 2005, 29 April 2006, and 5 May 2006, respectively. In all figures, subfigures (a), (b), (c), and (d) correspond to difference measures $K(n_t, \tau)$, $A(n_t, \tau)$, $k_m(n_t, \tau)$ and $A_m(n_t, \tau)$, respectively, and the color bar shows the values of the difference measure in grayscale. Solid lines indicate wss_{avg} , and the triangles and nablas are for wss_{min} and wss_{max} , respectively. For all chosen days, wss_{avg} is approximately 10 minutes for every hour from 0000 UT to 2359 UT. Similarly, wss_{min} does not show significant variance from quiet days to disturbed days, and it is bounded between $5 \text{ minutes} \leq wss_{min} \leq 7.5 \text{ minutes}$. Yet, the period of maximum WSS, wss_{max} can be as long as 35 minutes for quiet days and as short as 10 minutes for disturbed days.

**Figure 2.** Difference of TEC maps and WSS periods for 29 October 2003, (a) K , (b) A , (c) k_m , (d) A_m .

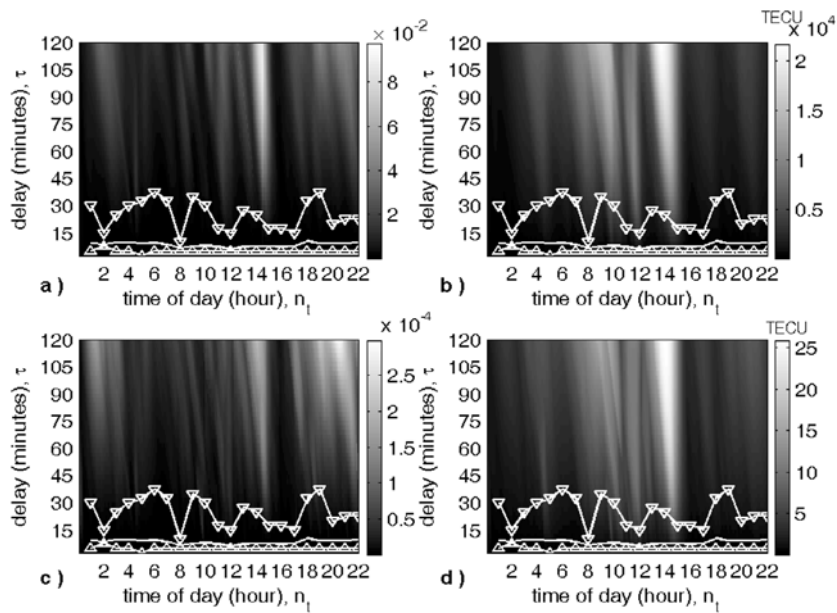


Figure 3. Difference of TEC maps and WSS periods for 24 August 2005, (a) K , (b) A , (c) k_m , (d) A_m .

[20] In Figure 2a, $K(n_t, n_t + \tau)$ indicates the strong disturbance at 1830 UT when the K_p index reaches 9. In Figure 2b, $A(n_t, n_t + \tau)$ is sensitive to the strong distur-

bance at 0630 UT. Similarly, in Figures 3a and 3b, $K(n_t, n_t + \tau)$ and $A(n_t, n_t + \tau)$ are sensitive to the rising geomagnetic storm indices. When the $K(n_t, n_t + \tau)$ and $A(n_t,$

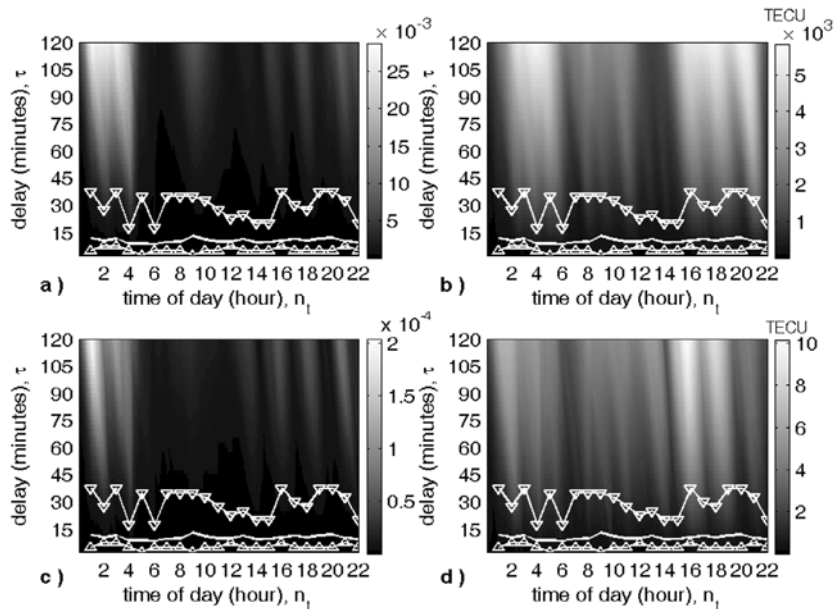


Figure 4. Difference of TEC maps and WSS periods for 29 April 2006, (a) K , (b) A , (c) k_m , (d) A_m .

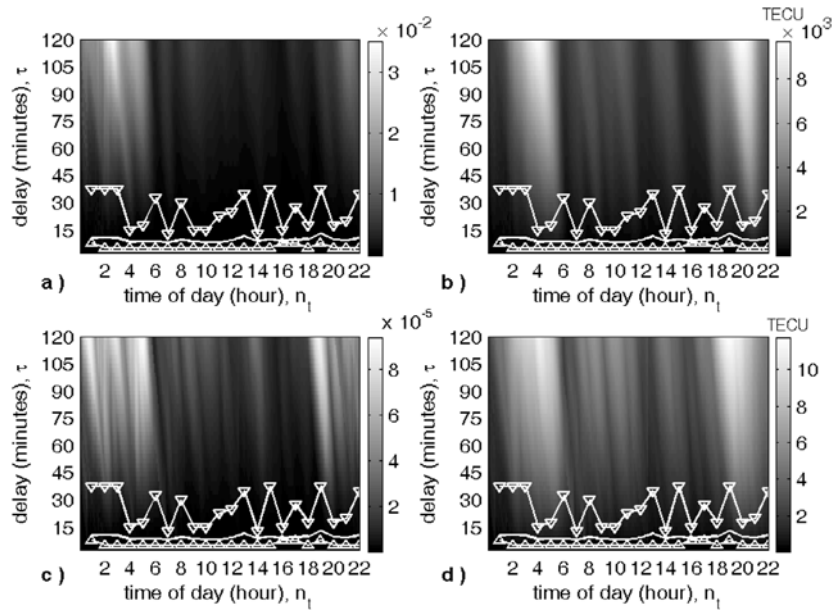


Figure 5. Difference of TEC maps and WSS periods for 25 May 2006, (a) K , (b) A , (c) k_m , (d) A_m .

$n_t + \tau$) of quiet days of Figure 4 and 5 are compared, it is observed that the K and A measures indicate daily ionization and recombination processes. As the K values indicate, the ionization process during sunrise generates stronger variability in the structure of the ionosphere than the recombination process during sunset. Also, the K and A values of disturbed days are significantly higher in magnitude than those of quiet days.

[21] From Figures 2 to 5, the k_m and A_m measures provided in (c) and (d) subfigures indicate both general temporal trends and small-scale local variability with very high sensitivity. For example, if 3 to 4 TECU is considered a significant variability between the TEC maps, the time delays corresponding to these A_m values can be taken as optimum TUPs. It is observed that for the quiet days given in Figures 4 and 5, wss_{max} coincides with this value of TUP. Yet, for the disturbed days of Figures 2 and 3, the increased ionospheric variability requires that either wss_{avg} or wss_{min} be chosen as the optimum TUP. Thus, TEC maps can be updated for time intervals estimated as the WSS periods and can be adjusted adaptively with respect to the variability of the ionosphere.

6. Conclusions

[22] Ionospheric variability should be monitored continuously for improving the performance of communi-

cation and navigation systems. To capture the local, small-scale variability, the temporal update period is proposed to be used as the optimum TUP of regional TEC maps. As a first step, GPS-TEC for each IGS station in a given region is estimated using IONOLAB-TEC for both quiet and disturbed days of the ionosphere. Then WSS periods of TEC for each station are obtained by the sliding window statistical analysis method. For all chosen days, the average of WSS periods of the IGS stations is approximately 10 minutes. Similarly, minima of the WSS period do not show significant variance from quiet days to disturbed days, and it is bounded between 5 minutes and 7.5 minutes. Yet, the maxima of the WSS period can be as long as 35 minutes for quiet days and as short as 10 minutes for disturbed days. Regional TEC maps using the IGS station coordinates as sample points are constructed by the ordinary Kriging interpolation algorithm with 2.5 minute intervals from 0000 UT to 2359 UT. The symmetric Kullback-Leibler distance, pointwise maximum of the KLD, sum of the absolute value of the pointwise differences, and the maximum of absolute value of the pointwise differences are computed between the TEC maps of varying time delays. When WSS periods of the IGS stations and the differences of TEC maps are compared with each other, for the quiet days of the ionosphere where the general temporal trends dominate, the maximum WSS period in the region can be chosen as the optimum TUP. For the disturbed days of the iono-

sphere where high temporal and spatial variability is observed, averages or the minima of the WSS periods in a given region should be chosen as optimum TUP. Therefore, to capture and track local and small-scale ionospheric variability, the regional TEC maps should be updated every 20 to 30 minutes for quiet days and every 5 to 10 minutes for disturbed days. According to the changing variability levels during a day, the TUP can be adjusted automatically. Thus, the WSS period can be developed into a useful tool in monitoring the ionospheric variability in a given region. In future studies, the method will be applied for a wider selection of days and the TEC data set will be gathered from a denser network of GPS stations.

[23] **Acknowledgments.** This study is supported by TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) grant no. 109E055.

References

- Akdogan, K. E., F. Arikan, and C. B. Erol (2007), Determining wide sense stationarity periods for ionospheric variability, TUJK 2007, METU, Ankara, Turkey, 14–16 November, 77–81.
- Arikan, F., and C. B. Erol (1998), Statistical characterization of time variability in midlatitude single-tone HF channel response, *Radio Sci.*, 33(5), 1429–1444, doi:10.1029/98RS01889.
- Arikan, F., C. B. Erol, and O. Arikan (2003), Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *J. Geophys. Res.*, 108(A12), 1469, doi:10.1029/2002JA009605.
- Arikan, F., C. B. Erol, and O. Arikan (2004), Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period, *Radio Sci.*, 39, RS6012, doi:10.1029/2004RS003061.
- Arikan, F., O. Arikan, and C. B. Erol (2007), Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model, *Adv. Space Res.*, 39(5), doi:10.1016/j.asr.2007.01.082.
- Arikan, F., A. Yilmaz, O. Arikan, I. Sayin, M. Gurun, K. E. Akdogan, and S. A. Yildirim (2009), Space weather activities of IONOLAB group: TEC mapping, *Geophys. Res. Abstr.*, vol. 11, EGU2009-6962, EGU General Assembly 2009.
- Cover, T. M., and A. J. Thomas (2006), *Elements of Information Theory*, Second Edition, Wiley Interscience, New York, USA.
- Erol, C. B., and F. Arikan (2005), Statistical characterization of the ionosphere using GPS signals, *J. Electromagnetic Waves Applic.*, 19(3), 373–387.
- Foster, M. P., and A. N. Evans (2008), An evaluation of interpolation techniques for reconstructing ionospheric TEC maps, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46(7), doi:10.1109/TGRS.2008.916642.
- Hernández-Pajares, M., J. M. Juan, and J. Sanz (1999), New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 61(16), 1237–1247.
- Hernández-Pajares, M., J. M. Juan, J. Sanz, and D. Bilitza (2002), Combining GPS measurements and IRI model values for space weather specification, *Adv. Space Res.*, 29(6), 949–958, doi:10.1016/S0273-1177(02)00051-0.
- Komjathy, A. (1997), Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System, Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
- Komjathy, A., R. B. Langley, and D. Bilitza (1998), Ingesting GPS-derived TEC data into the International Reference Ionosphere for single frequency radar altimeter ionospheric delay corrections, *Adv. Space Res.*, 22(6), 793–801, doi:10.1016/S0273-1177(98)00100-8.
- Mannucci, A. J., B. D. Wilson, and C. D. Edwards (1993), A new method for monitoring the Earth's ionospheric total electron content using the GPS global network, Proceedings of ION GPS-93, Salt Lake City, UT, 22–24 September.
- Mannucci, A. J., B. D. Wilson, D. N. Yuan, C. H. Ho, U. J. Lindqwister, and T. F. Runge (1998), A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements, *Radio Sci.*, 33(3), 565–582, doi:10.1029/97RS02707.
- Nayir, H., F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol (2007), Total electron content estimation with Reg-Est, *J. Geophys. Res.*, 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459.
- Opperman, B. D. L., P. J. Cilliers, L. A. McKinnell, and R. Haggard (2007), Development of a regional GPS-based ionospheric TEC model for South Africa, *Adv. Space Res.*, 39(5), 808–815.
- Papoulis, A., and S. U. Pillai (2002), *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, p. 852, McGraw-Hill, New York.
- Sayin, I. (2008), Total electron content mapping using Kriging and random field priors, M.S. thesis, Hacettepe University, Ankara, Turkey.
- Sayin, I., F. Arikan, and O. Arikan (2007), Synthetic TEC Mapping with ordinary and universal Kriging, RAST 2007, Istanbul, 14–16 June.
- Sayin, I., F. Arikan, and O. Arikan (2008a), Regional TEC mapping with random field priors and Kriging, *Radio Sci.*, 43, RS5012, doi:10.1029/2007RS003786.
- Sayin, I., F. Arikan, T.L. Gulyaeva (2008b), Regional mapping of total electron content with Kriging and random field prior, ATMOS 2008, Istanbul, 25–28 March.
- Sayin, I., K. E. Akdogan, and F. Arikan (2009), Investigation of optimum temporal update periods for regional TEC monitoring, RAST 2009, Istanbul, Turkey, 11–13 June.

- Schaer, S. (1999), Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system, Ph.D. dissertation, University of Berne, Berne, Switzerland.
- Wackernagel, H. (1998), *Multivariate Geostatistics*, p. 387, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Wilson, B., and A. J. Mannucci (1994), Extracting ionospheric measurements from GPS in the presence of anti-spoofing, Proceedings of ION GPS-94, Salt Lake City, UT, 20–23 September.
- Yilmaz, A., K. E. Akdogan, and M. Gurun (2009), Regional TEC mapping using neural networks, *Radio Sci.*, 44, RS3007, doi:10.1029/2008RS004049.
-
- K. E. Akdogan, F. Arıkan, and I. Sayın, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Beytepe, Ankara, 06800, Turkey. (isiltan@ee.hacettepe.edu.tr)

Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere

Secil Karatay,¹ Feza Arikan,² and Orhan Arikan³

Received 19 October 2009; revised 23 March 2010; accepted 27 May 2010; published 20 October 2010.

[1] Variations in solar, geomagnetic, and seismic activity can cause deviations in the ionospheric plasma that can be detected as disturbances in both natural and man-made signals. Total electron content (TEC) is an efficient means for investigating the structure of the ionosphere by making use of GPS receivers. In this study, TEC data obtained for eight GPS stations are compared with each other using the cross-correlation coefficient (CC), symmetric Kullback-Leibler distance (KLD), and L2 norm (L2N) for quiet days of the ionosphere, during severe geomagnetic storms and strong earthquakes. It is observed that only KLD and L2N can differentiate the seismic activity from the geomagnetic disturbance and quiet ionosphere if the stations are in a radius of 340 km. When TEC for each station is compared with an average quiet day TEC for all periods using CC, KLD, and L2N, it is observed that, again, only KLD and L2N can distinguish the approaching seismicity for stations that are within 150 km radius to the epicenter. When the TEC of consecutive days for each station and for all periods are compared, it is observed that CC, KLD, and L2N methods are all successful in distinguishing the geomagnetic disturbances. Using sliding-window statistical analysis, moving averages of daily TEC with estimated variance bounds are also obtained for all stations and for all days of interest. When these bounds are compared with each other for all periods, it is observed that CC, KLD, and L2N are successful tools for detecting ionospheric disturbances.

Citation: Karatay, S., F. Arikan, and O. Arikan (2010), Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere, *Radio Sci.*, 45, RS5012, doi:10.1029/2009RS004313.

1. Introduction

[2] The ionosphere is an important layer of Earth's upper atmosphere that extends from 60 to 1000 km and is ionized to a plasma state primarily by radiation from the sun with density N_e varying with altitude up to 10^{12} m^{-3} . The determining parameter of the ionospheric plasma is the electron concentration, which is a complex function of variations and coupling in solar, geomagnetic, and seismic activities such as solar flares, sunspot number, solar wind, geomagnetic storms, and earthquakes. An important measurable quantity of the electron density is the total electron content (TEC), which provides an

efficient means to investigate the structure of the ionosphere and upper atmosphere. TEC is defined as the line integral of electron density along a raypath or as a measure of the total number of electrons along a raypath. The unit of TEC is given in TECU, where $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$ [Nayir *et al.*, 2007; Arikan *et al.*, 2003]. The variations and disturbances of the ionosphere can be obtained effectively and efficiently by computing and monitoring TEC. In recent decades, the Global Positioning System (GPS), with its network of worldwide receivers, provides a cost-effective solution in estimating TEC (GPS-TEC) and monitoring ionospheric variability over a significant proportion of global landmass [Nayir *et al.*, 2007; Arikan *et al.*, 2003].

[3] The general trends of temporal and spatial variability of the ionosphere depend on Earth's diurnal and annual rotation and the distribution of magnetic field lines of the geomagnetic dipole. Earth's magnetic field is seldom quiet, even when there are no storms. The underlying trends and standard periodical variations make up the dynamics of quiet ionosphere [Rishbeth and Garriot, 1969]. It has long been observed that variations

¹Department of Physics, Faculty of Arts and Sciences, Firat University, Elazig, Turkey.

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey.

³Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey.

in the solar and geomagnetic activity and seismicity can cause deviations from the quiet conditions and these changes can be detected as disturbances in both natural and man-made signal parameters. If the magnetic field is severely disturbed, a magnetic storm is said to occur. The geomagnetic storms can be listed as one of the major sources of severe temporal and spatial variability in the ionosphere. Several empirical indices have been developed to describe the amount of the variability at any given time. These disturbances are due to the coupling of solar activity with Earth's magnetic field that involves highly complicated dynamics in the magnetosphere and ionosphere. A large number of studies in the literature [Rishbeth and Garriot, 1969; Biqiang et al., 2007; Vlasov et al., 2003; Zhang and Xiao, 2000] investigating the ionospheric disturbances suggest that geomagnetic storms can cause strong disturbances in the electron density distribution and TEC. Also, in recent years, the coupling of seismic activity in the lithosphere with the troposphere and ionosphere has been observed through the variations in electromagnetic signals, Earth's electric and magnetic fields, and the chemical composition of the atmosphere. Recently, there have been some theories that try to explain electromagnetic anomalies associated with preseismic activity and their effects in the ionosphere. The forecast methods [e.g., Ondoh, 2000; Pulnests, 2004; Pulnests et al., 2004, 2005, 2007; Liu et al., 2000, 2004; Chuo et al., 2001; Plotkin, 2003; Trigunait et al., 2004] suggest that, before the strong earthquakes, there are several disturbances in the ionospheric parameters, especially in the critical frequency of the F2 layer (foF2), ion temperatures (T_i), and TEC.

[4] In the literature, the basic statistical tools that are used to investigate the effect of ionospheric disturbances on ionospheric parameters include but are not limited to relative deviation [Kouris and Fotiadis, 2002; Kouris et al., 2006], time derivative analysis [Ciraolo and Spalla, 1999], interquartile range analysis [Liu et al., 2004; Chuo et al., 2001; Lazo et al., 2004; Zhang et al., 2004], correlation analysis [Pulnests, 2004; Pulnests et al., 2004, 2005, 2007], TEC difference analysis [Plotkin, 2003], and ionospheric correction [Trigunait et al., 2004]. All of these methods are applied to severe geomagnetic storms or major earthquakes with magnitudes $M \geq 6$. Yet the investigated disturbance periods and data sets are still very limited. Also, the reliability and accuracy of the applied statistical tools still need to be reconsidered for a precursor alarm signal before geomagnetic or seismic disturbances.

[5] In statistics and information theory, the Kullback-Leibler divergence is a widely used measure of distance of discrimination between two probability density distributions [Cover and Thomas, 2006; Hall, 1987; Inglada, 2003]. Similarly, the L2 norm is used to define

the Euclidian distance between two vectors [Kreyszig, 1988]. Sliding-window statistical analysis with moving average and variance bounds is a useful tool in defining the time-varying general trend of the data and characterization of the underlying structure of the disturbances in terms of wide sense stationarity [Arikan and Erol, 1998; Erol and Arikan, 2005]. In this study, the variability of GPS-TEC is investigated by comparison of the disturbed days with the quiet-day trends of the ionosphere over a large data set using the measures of Kullback-Leibler divergence, L2 norm, and sliding-window statistical analysis for the first time in the literature [Arikan et al., 2009; Karatay et al., 2009a, 2009b]. The correlation coefficients of data sets are also computed in spatial and temporal domains. Six earthquakes with different seismic properties and two very severe geomagnetic disturbances are chosen for investigation in this study. GPS-TEC is computed for 15 days before and after each earthquake (earthquake-days period) for all the GPS stations at various distances from the earthquake epicenter. TEC values are also obtained for the periods when there is no seismic activity but the ionosphere is under the influence of strong geomagnetic disturbances (disturbed-days period) and also for the periods when there are no significant disturbances or seismic activity in the regions of interest (quiet-days period). The results are obtained for three groups of application. In the first group, the statistical tools are applied between neighboring stations for all periods. In the second group, an average quiet-day TEC estimate is obtained for each station and TEC estimates for all periods are compared with this average quiet-day TEC using statistical tools. In the third group, TEC estimates for consecutive days of all periods are compared with each other. The statistical methods used in the study and the results for the data are presented in sections 2 and 3, respectively.

2. Methods of the Statistical Analysis

[6] In GPS-TEC computation, TEC on the slant ray-path from the satellite to the receiver is called the slant TEC (STEC). When the STEC values are projected to the local zenith at the ionospheric pierce point, the computed TEC value is called the vertical TEC (VTEC) [Nayir et al., 2007; Arikan et al., 2003]. Let

$$\mathbf{x}_{u,d} = [x_{u,d}(1) \cdots x_{u,d}(n) \cdots x_{u,d}(N)]^T \quad (1)$$

represent the set of VTEC data of length N estimated for day d . Here, u denotes the receiver, n is the index where $1 \leq n \leq N$, and T is the transpose operator. To compare VTEC values obtained from different seasons and days, data vectors as in equation (1) are normalized. The experimental probability density function (PDF) of TEC

for station u and day d can be approximated using the TEC measurements as

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d} = \mathbf{x}_{u;d} \left[\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u;d}(n) \right]^{-1} \quad (2)$$

where N_i and N_s denote the initial and final indices for the measurement set, respectively. To compare the behavior of TEC for the quiet days with those from the disturbed and earthquake days, an average quiet-day TEC (AQDT) estimate for each GPS station is obtained. For N_d quiet days for station u , the AQDT is defined as

$$\mathbf{x}_{u;d_i-d_s} = \frac{1}{N_d} \sum_{n_d=d_i}^{d_s} \mathbf{x}_{u;n_d}, \quad (3)$$

where n_d is the index for the quiet-day period which extends from d_i to d_s . An approximation for the PDF of the AQDT is defined as follows:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s} = \mathbf{x}_{u;d_i-d_s} \left[\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u;d_i-d_s}(n) \right]^{-1}. \quad (4)$$

[7] Using the normalized distributions given in equations (2) and (4), the following statistical tools are applied to the VTEC data.

2.1. Cross-Correlation Coefficient

[8] In statistics, the correlation function measures the relationship between two random variables. In this study, daily cross-correlation coefficients are computed between two GPS stations as presented in the literature. First, the station nearest the epicenter, which is denoted as the central station, is chosen. Then, the correlation coefficients are computed between VTEC data of the central station and that of the other stations. Finally, correlation coefficients are computed between the TEC values for all station pairs. For N_T samples from N_i to N_s , the cross-correlation coefficient (CC) for day d between stations u and v is defined as

$$r(\mathbf{x}_{u;d}; \mathbf{x}_{v;d}) = \frac{1}{N_T \sigma_{u;d} \sigma_{v;d}} \sum_{n=N_i}^{N_s} (x_{u;d}(n) - \bar{x}_{u;d})(x_{v;d}(n) - \bar{x}_{v;d}), \quad (5)$$

where $\bar{x}_{u;d}$ and $\sigma_{u;d}$ denote the mean and the standard deviation of $\mathbf{x}_{u;d}$, respectively. Using the normalized average quiet-day TEC given in equation (4), the CC is computed for station u between day d and the normalized

average quiet day as $r(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s})$. For the consecutive days of station u , the CC is computed as $r(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$.

2.2. Kullback-Leibler Distance

[9] Kullback-Leibler (KL) divergence is used in various disciplines to define similarity and difference between two distributions [Cover and Thomas, 2006; Arikan et al., 2009; Karatay et al., 2009a, 2009b]. The KL divergences of normalized experimental PDFs defined in equation (2) for day d between stations u and v can be defined as

$$\text{KL}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{P}_{u;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{P}_{u;d}(n)}{\hat{P}_{v;d}(n)} \right), \quad (6)$$

$$\text{KL}(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{P}_{v;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{P}_{v;d}(n)}{\hat{P}_{u;d}(n)} \right), \quad (7)$$

where $N_i < n < N_s$. The symmetric Kullback-Leibler distance (KLD) is defined as the sum of the Kullback-Leibler divergences [Cover and Thomas, 2006; Hall, 1987; Inglada, 2003; Arikan et al., 2009; Karatay et al., 2009a, 2009b] as

$$\text{KLD}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \text{KL}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) + \text{KL}(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}). \quad (8)$$

[10] Using normalized AQDT, for day d of station u , symmetric KLD is defined as $\text{KLD}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s})$. For consecutive days of station u , symmetric KLD is defined as $\text{KLD}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$.

2.3. L2 Norm

[11] The L2 norm (L2N) is a metric measure that quantifies the distance between two vectors. Using the normalized experimental PDFs given in equation (2), the L2 norm for day d , between stations u and v , can be defined as [Kreyszig, 1988; Arikan et al., 2009; Karatay et al., 2009a, 2009b]

$$\text{L2N}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \sqrt{\sum_{n=N_i}^{N_s} (\hat{P}_{u;d}(n) - \hat{P}_{v;d}(n))^2}, \quad (9)$$

where $N_i < n < N_s$. For station u between day d and normalized AQDT, the L2 norm is defined as $\text{L2N}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s})$. For consecutive days of station u , the L2 norm is computed as $\text{L2N}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$.

Table 1. Date, Time, Geographical Location, Magnitude, and Depth of the Chosen Earthquakes

Earthquakes	Date	Time (UT)	Latitude	Longitude	M	z (km)	Central Station
E1	25 Sep 2003	1950	41°N	143°E	8.3	27	mizu
E2	5 Sep 2004	1457	33°N	137°E	7.4	10	kgni
E3	13 Jun 2008	2343	39°N	140°E	6.9	10	mizu
E4	11 Jun 2006	2001	33°N	131°E	6.3	154	usud
E5	23 Jul 2005	0734	35°N	139°E	5.9	65	mtka
E6	12 May 2008	0628	30°N	103°E	7.9	19	kunm

2.4. Sliding-Window Statistical Analysis

[12] The ionosphere presents a spatial and temporal variability at different scales. To determine the characterization of the variability of the TEC values, the sliding-window statistical analysis method is applied to the VTEC data sets. The sliding-window moving average and estimated standard deviation of normalized TEC distributions of station u and day d can be given as [Arikan and Erol, 1998; Erol and Arikan, 2005; Karatay et al., 2009b]

$$\hat{\mu}_{u;d}(n) = \frac{1}{N_w} \sum_{i=-\frac{N_w-1}{2}}^{\frac{N_w-1}{2}} \hat{P}_{u;d}(n+i), \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}_{\mu;u;d}(n) = \sqrt{\frac{1}{N_w} \sum_{j=-(N_w-1)}^{N_w-1} r_{u;d}(|j|;n) \left(1 - \frac{|j|}{N_w}\right) - \hat{\mu}_{u;d}^2(n)}, \quad (11)$$

where N_w is the window size which is chosen as an odd number and $r_{u;d}(j;n)$ is the local correlation function that can be approximated as [Arikan and Erol, 1998; Erol and Arikan, 2005; Karatay et al., 2009b]:

$$r_{u;d}(j;n) \simeq \frac{1}{2N+1-j} \sum_{i=-N}^N \hat{P}_{u;d}(n-i) \hat{P}_{u;d}(n-i+j), \quad (12)$$

where N can be chosen close to N_w . The window size N_w is chosen to be as long as possible to provide better statistical characterization and to be short enough to capture the local variability. The sliding-window moving average and estimated standard deviation are also computed for the normalized average quiet-day TEC given in equation (4). Using the sliding-window moving average, [equation (10)], and estimated standard deviation [equation (11)], a bound b for station u and day d is computed as follows:

$$b_{u;d}(n) = \hat{\mu}_{u;d}(n) + \hat{\sigma}_{\mu;u;d}(n). \quad (13)$$

[13] Using equation (13), for AQDT, and those of each day for all earthquake-, disturbed-, and quiet-day periods of each station, CC, KLD, and L2N are computed for station u between day d and the normalized average quiet day as $r_b(\hat{P}_{u;d}, \hat{P}_{u;di-ds})$, $KLD_b(\hat{P}_{u;d}, \hat{P}_{u;di-ds})$, and $L2N_b(\hat{P}_{u;d}, \hat{P}_{u;di-ds})$, respectively. Between the bounds of consecutive days of all periods of station u , CC, KLD, and L2N are computed as $r_b(\hat{P}_{u;d}, \hat{P}_{u;d+1})$, $KLD_b(\hat{P}_{u;d}, \hat{P}_{u;d+1})$, and $L2N_b(\hat{P}_{u;d}, \hat{P}_{u;d+1})$, respectively.

3. Results and Discussion

[14] The statistical analysis tools described in section 2 are applied to VTEC data in search of a precursor signal for geomagnetic and seismic disturbances. These methods are used in three major groups of application. In group I, the relationship between the GPS stations is investigated in terms of distance between them. In group II, VTEC data of each station are compared to average quiet-day VTEC data for that station. In group III, VTEC data of consecutive days for each station are compared with each other.

[15] For this study, five earthquakes with magnitudes between 5.9 and 8.3 that occurred in Japan and one earthquake with magnitude 7.9 that occurred on 12 May 2008 in China are chosen. The geographical location of the epicenter, GPS station closest to the epicenter (central station), date, time (universal time), magnitude (M , Richter scale), and depth (z , kilometers) of the chosen earthquakes, E , are presented in Table 1 (data available at <http://earthquake.usgs.gov/regional/world>). The earthquake day periods (EDPs) for each earthquake are defined as the time period from 15 days prior to the earthquake, the earthquake day, and 15 days after the earthquake (31 days). There are no significant geomagnetic disturbances during the chosen EDPs. The days of the earthquakes in EDPs are indicated by an arrow in all figures.

[16] The geomagnetic disturbance days are chosen such that there is no significant seismic activity in the region of interest. The first period is chosen as DDP_1 , from 14 October to 11 November 2003 (29 days), and the second period is chosen as DDP_2 , from 23 August to 21 September 2005 (30 days). The quiet days are chosen such that there are no significant geomagnetic or seismic

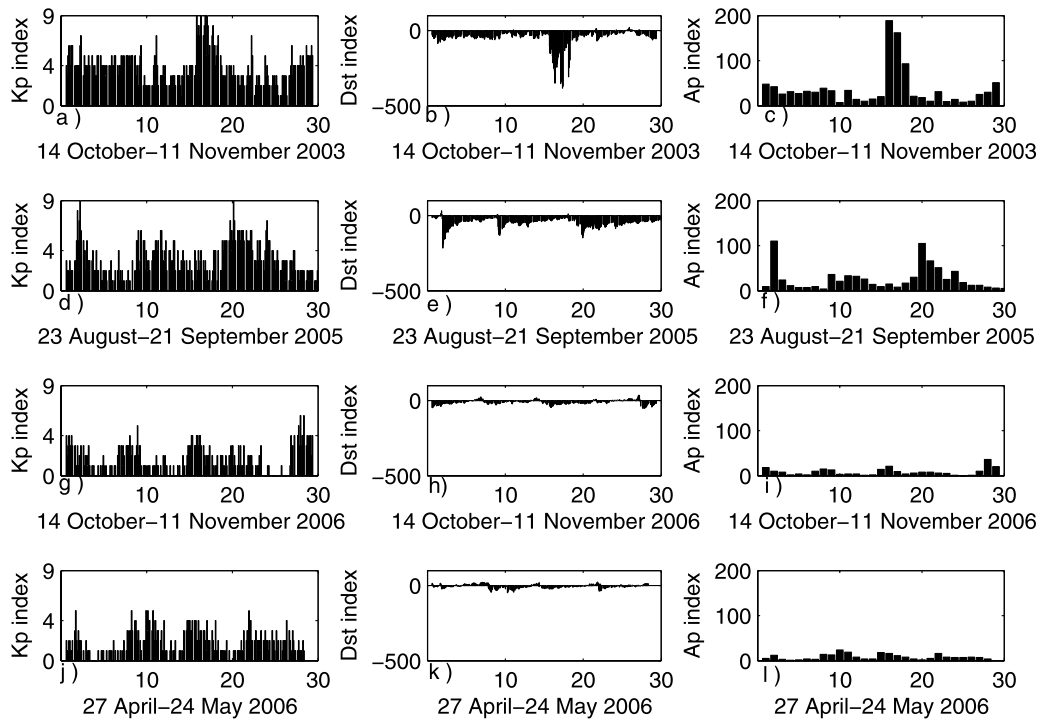


Figure 1. Daily geomagnetic indices Kp , Dst , and Ap for (a–c) DDP_1 , (d–f) DDP_2 , (g–i) QDP_1 , and (j–l) QDP_2 .

activities in the region of interest. The first quiet-days period is chosen as QDP_1 , from 14 October to 11 November 2006 (29 days), and the second quiet-days period is chosen as QDP_2 , from 27 April to 24 May 2006 (28 days). The time interval from 27 April to 24 May 2006 for the AQDT is chosen for the GPS stations placed in Japan and the time interval from 14 October to 11 November 2006 for the AQDT is chosen for the GPS station placed in China. (Quiet- and disturbed-day periods are chosen according to the information provided at http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>, and <http://www.cbk.waw.pl/rwc/idce.html>.) The Kp , Ap , and Dst indices corresponding to DDP_1 and DDP_2 are given in Figures 1a–1f. The Kp , Ap , and Dst indices corresponding to QDP_1 and QDP_2 are provided in Figures 1g–1l.

[17] The raw data for the corresponding seven GPS stations in the region of interest are obtained from the International Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Service (IGS; data available at <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>). The distance between IGS-GPS stations to the earthquake epicenters varies from 33 to 2000 km. The geographical locations of the GPS stations are listed in Table 2. The VTEC values for each station are estimated by IONOLAB-TEC using the Reg-Est algorithm described in the literature [Nayir *et al.*, 2007; Arikan *et al.*, 2003,

2004; see also <http://www.ionolab.org>] with a time resolution of 2.5 min. The missing values in tables and figures in this section are due to the lack of raw data for those stations and days.

[18] In group I analysis, the GPS stations are ordered in pairs according to the great circle distance between them. For the earthquakes given in Table 1 and GPS stations given in Table 2, the distance k for station pairs are categorized into six groups: k_1 , $k < 20$ km; k_2 , 30 km $< k < 70$ km; k_3 , 80 km $< k < 150$ km; k_4 , 150 km $< k < 340$ km; k_5 , 340 km $< k < 450$ km; and k_6 , 450 km $< k$. These distance categories are chosen such that there is at least one station pair in each category. The IONOLAB-TEC for each station and for all the days of EDP; DDP_1

Table 2. Selected GPS Receiver Stations

Receiver Station	Station ID	Latitude	Longitude
Koganei, Japan	kgni	35.5°N	139.4°E
Kashima, Japan	ksmv	35.7°N	140.6°E
Mizusawa, Japan	mizu	38.9°N	141.1°E
Mitaka, Japan	mtka	35.4°N	139.5°E
Tsukuba, Japan	tskb	35.9°N	140.0°E
Usuda, Japan	usud	35.9°N	138.3°E
Yuzh-Sakh, Russia	yssk	46.8°N	142.7°E
Kunminiumg, China	kunm	24.8°N	102.8°E

Table 3. Percentage of CC Values Less Than 0.9 for Station Pairs for Quiet-Day Period, Days Before the Earthquakes, and Disturbed-Day Period

Period	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$
Quiet-day period (QDP ₁)	0	1.2	5	7.6	2.9	31.6
Disturbed-day period (DDP ₁ , DDP ₂)	0	1.6	5.1		0	0
Days before each earthquake	2.5	3	3	3.3	9.2	35.8

for *kgni*, *ksmv*, *mtka*, and *tskb*; and DDP₂ for *mizu*, *usud*, and QDP₁ are compared with each other using CC, KLD, and L2N given in equations (5), (8), and (9), respectively. The total number of CCs in all distance categories and for all periods is 2171. In the literature [Pulinets *et al.*, 2004, 2005, 2007], two data sets are considered to be highly correlated if the daily CC is higher than 0.9. In this study, the ratio of CC that is under the threshold 0.9 to the total number of CC in each period and distance category is computed and presented in Table 3 as percentage values. It is observed from Table 3 that CC is not a good measure to differentiate either geomagnetically or seismically disturbed days from the quiet days. For distance categories of $k1$ and $k2$,

the VTEC is highly correlated for all EDP, DDP₁, DDP₂, and QDP₁. Although VTEC is still highly correlated during DDP₁ and DDP₂ for categories $k5$ and $k6$, the correlation decreases for both QDP₁ and days before the earthquakes. In Table 3, the number of days before the earthquakes is chosen as 15 days before each earthquake. These time intervals are 10–24 September 2003 for E1, 21 August to 4 September 2004 for E2, 29 May to 12 June 2008 for E3, 27 May to 10 June 2006 for E4, and 8–22 July 2005 for E5. A similar result is demonstrated in Figure 2 for two station pairs, one pair in category $k2$, *mtka*-*tskb* (67 km), and the other pair in $k6$, *mtka*-*yssk* (1436 km). In Figures 2a, 2b, and 2c, the correlation coefficients for the *mtka*-*tskb* pair are given for earthquake E5, QDP₁, and DDP₁, respectively. It is observed that the station pair that is in category $k2$ has high correlation coefficients for all EDP, QDP₁, and DDP₁. In Figures 2d, 2e, and 2f, the correlation coefficients for the *mtka*-*yssk* pair are given for earthquake E5, QDP₁, and DDP₁, respectively. It is observed that the station pair that is in category $k6$ has low correlation coefficients for all EDP, QDP₁, and DDP₁. Thus, it is impossible to discriminate the earthquake and disturbed-day periods from quiet-day periods.

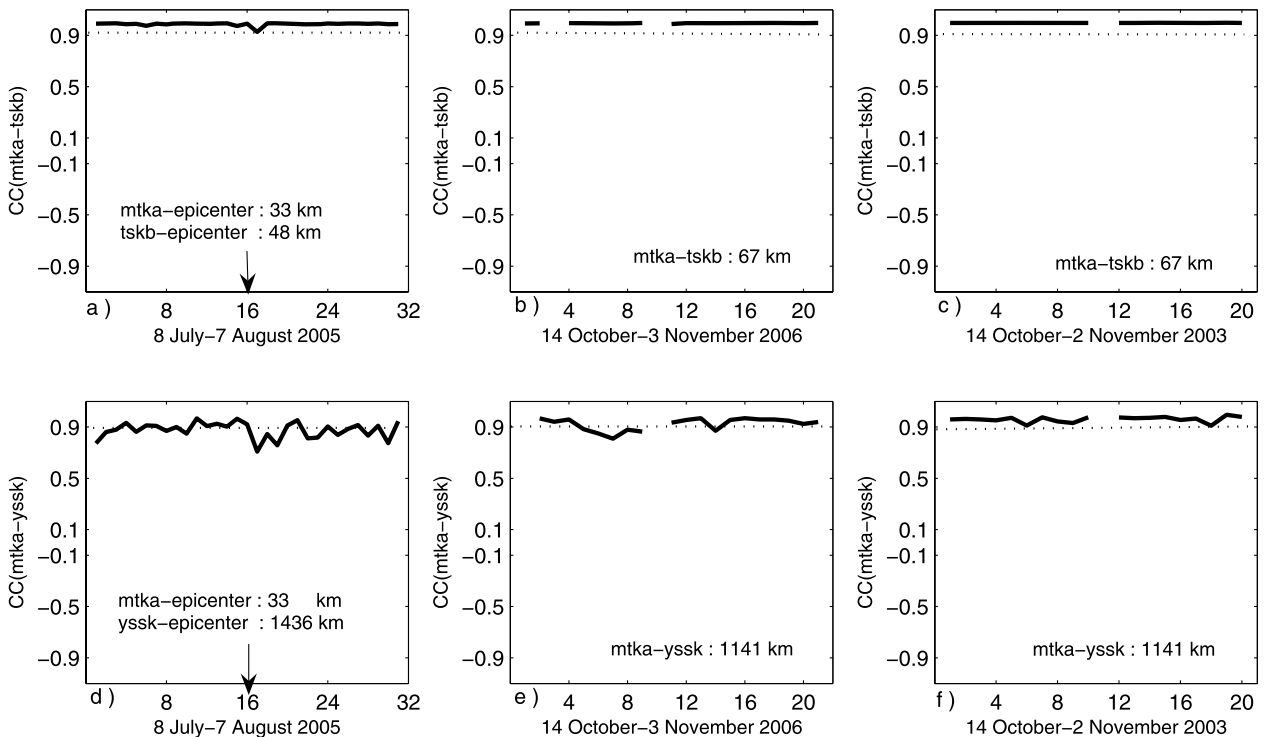


Figure 2. Cross-correlation coefficients between (a) *mtka*-*tskb* in EDP for E5, (b) *mtka*-*tskb* in QDP₁, (c) *mtka*-*tskb* in DDP₁, (d) *mtka*-*yssk* in EDP for E5, (e) *mtka*-*yssk* in QDP₁, and (f) *mtka*-*yssk* in DDP₁. The day of the earthquake is indicated by the arrow in Figures 2a and 2d.

Table 4. Values of Δ_{KLD} for All Station Pairs in Distance Categories $k1$ to $k6$ for QDP₁, DDP₁, and DDP₂ and E1, E2, E3, E4, and E5 Earthquakes

Period	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$
QDP ₁	0.0005	0.0008	0.0005	0.0006	0.008	0.06
DDP ₁ , DDP ₂	0.0006	0.0014	0.0014		0.009	0.064
E1	0.0196	0.0094	0.0053	0.0009	0.023	0.028
E2		0.0013	0.00069	0.0008	0.017	0.021
E3			0.002	0.023	0.006	
E4	0.0156	0.0096	0.013	0.001	0.0087	0.02
E5	0.0898	0.049	0.048	0.0047		0.054

[19] The symmetric Kullback-Leibler distance (KLD) and L2N given in equations (8) and (9), respectively, are computed using IONOLAB-TEC for each station pair in categories $k1$ to $k6$ and for all periods in group I. It is observed that when the distance between the stations is less than 150 km (categories $k1$ to $k3$), KLD and L2N values of earthquake days are significantly greater than those for quiet days. For the distance between stations greater than 340 km (category $k4$), KLD and L2N values of earthquake days and quiet days are similar. In addition, if the station pairs are close to the earthquake epicenters as in E3 and E5, the KLD and L2N values of those station pairs in earthquake days are significantly greater than those of quiet days. To demonstrate this observation, the difference between the maximum and minimum of KLD and L2N values in a given period are computed as $\Delta_{\text{KLD}} = \max(\text{KLD}) - \min(\text{KLD})$ and $\Delta_{\text{L2N}} = \max(\text{L2N}) - \min(\text{L2N})$. Δ_{KLD} and Δ_{L2N} for all station pairs in a distance category k , and for all earthquake-, quiet-, and disturbed-day periods according to the GPS stations of concern in Japan are given in Tables 4 and 5, respectively. The missing values in Tables 4 and 5 are due to the lack of raw data for the GPS stations in those station pairs. It is observed from Tables 4 and 5 that for distances larger than 340 km between the station pairs corresponding to $k5$ and $k6$, the Δ_{KLD} and Δ_{L2N} values are similar for both quiet and disturbed days. Even for distances less than 150 km between the stations (categories $k1$ to $k3$), the Δ_{KLD} and Δ_{L2N} are very similar for quiet and disturbed days. Yet, for earthquake-day periods, Δ_{KLD} and Δ_{L2N} are significantly larger from those of quiet- and disturbed-day periods for all distance categories. Thus, KLD and L2N are possible candidates to be used as indicators of earthquakes if these measures are constantly monitored for the stations that are close to the earthquake zones.

[20] To demonstrate the performance of CC, KLD, and L2N methods for earthquake and disturbed days, an example is given in Figure 3 for E2 and DDP₁ for the station pair kgni-ksmv in category $k3$. Station kgni is the central station for E2 and the distance between the stations is 109 km. In Figures 3a and 3b, the CC for the

station pair is always very high all through the earthquake and disturbed days. In Figures 3c and 3e, it is observed that KLD and L2N have high values for 6 days (day 10) to 2 days (day 14) before the earthquake. KLD and L2N values of disturbed days are smaller than those of earthquake days as shown in Figures 3d and 3f, respectively. Thus, KLD and L2N are better indicators of approaching seismic disturbance than CC.

[21] In the group II analysis, an average distribution of TEC is obtained from the days in the chosen quiet-day period for each station as in equation (3). The VTEC data for earthquake-, disturbed-, and quiet-day periods are compared with AQDT using the cross-correlation coefficient $r(\mathbf{P}_{u,d}; \mathbf{P}_{u,di-ds})$, symmetric Kullback-Leibler distance $\text{KLD}(\mathbf{P}_{u,d}; \mathbf{P}_{u,di-ds})$, and L2 norm $\text{L2N}(\mathbf{P}_{u,d}; \mathbf{P}_{u,di-ds})$. It is observed that if the distance of the station to the epicenter is less than 150 km, KLD and L2N values of this station for earthquake days are greater than those of quiet and disturbed days. For stations that are more than 150 km away from the epicenter, KLD and L2N values of earthquake and quiet days are similar to each other. It is observed that KLD and L2N values computed between the disturbed-day TEC and AQDT cannot be differentiated between disturbed- and quiet-day periods. The correlation coefficients between AQDT and earthquake-, disturbed-, and quiet-day periods vary between +0.2 and +0.7 for any station regardless of the distance to the epicenter. An exception to this observation is provided in Figure 4 for E6 and station kunm for the 12 May 2008 earthquake. Although the distance of kunm is more than 600 km to the epicenter, the CC, KLD, and L2N values for 2 days before the earthquake (day 14) are significantly different than those of the other days in E6, as shown in Figures 4a, 4d, and 4g, respectively. The comparison of AQDT values with those of DDP₁ and QDP₂ using CC, KLD, and L2N are provided in Figures 4b, 4c, 4e, 4f, 4h, and 4i, respectively. The correlation coefficients are close to +1 in quiet- and disturbed-day periods. The averages of KLD and L2N values for DDP₁ and QDP₂ are similar to each other.

[22] In group II, the bounds defined in equation (13) are computed for all days in earthquake-, disturbed-,

Table 5. Values of Δ_{L2N} for All Station Pairs in Distance Categories $k1$ to $k6$ for QDP₁, DDP₁, and DDP₂ and E1, E2, E3, E4, and E5 Earthquakes

Periods	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$
QDP ₁	0.0013	0.0013	0.0012	0.00082	0.0023	0.0048
DDP ₁ , DDP ₂	0.0011	0.001	0.001		0.0026	0.0057
E1	0.0083	0.0049	0.0036	0.00082	0.0053	0.0052
E2		0.0035	0.0024	0.00054	0.0029	0.0037
E3			0.009	0.0063	0.0031	
E4	0.0066	0.0026	0.0035	0.00087	0.0026	0.0036
E5	0.011	0.0055	0.0065	0.0018		0.0073

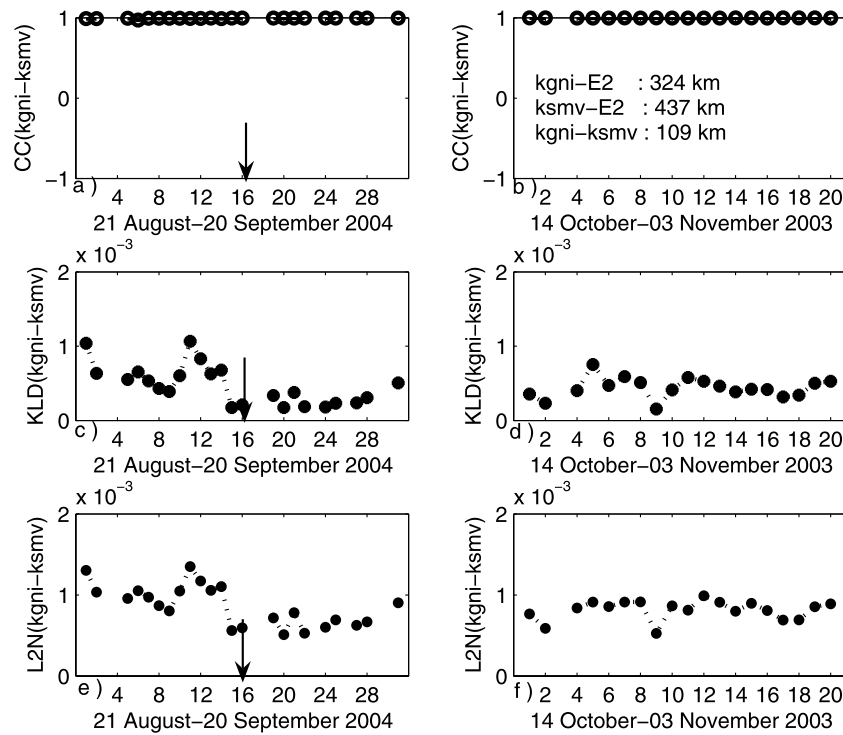


Figure 3. For stations kgni and ksmv, the values of (a) CC for E2, (b) CC for DDP₁, (c) KLD for E2, (d) KLD for DDP₁, (e) L2N for E2, and (f) L2N for DDP₁. The day of the earthquake is indicated by the arrow.

and quiet-day periods. These bounds are compared with the bound of AQDT using the cross-correlation coefficient $r_b(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d_i-ds})$, symmetric Kullback-Leibler distance $KLD_b(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d_i-ds})$, and L2 norm $L2N_b(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d_i-ds})$. It is observed that when bounds in equation (13) are used in comparisons, all three tools are successful in discriminating the earthquake days from AQDT. Yet disturbed days cannot be differentiated from AQDT. An example is provided in Figure 5 for E6 and station kunn. The CC, KLD, and L2N values between the bounds of AQDT and earthquake, quiet, and disturbed days are given in Figures 5a–5c, respectively. It is observed that all of the CC, KLD, and L2N values 2 days before the earthquake are significantly different from those in DDP₁ and QDP₂.

[23] In group III, the daily VTEC data of each station are compared with data of the consecutive day for all earthquake-, disturbed-, and quiet-day periods. For this purpose, the cross-correlation coefficient $r(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1})$, symmetric Kullback-Leibler distance $KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1})$, and L2 norm $L2N(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1})$ are computed. It is observed that when CC, KLD, and L2N methods are applied for disturbed days, all three methods can differentiate the geomagnetically disturbed days, especially for the storm days when $Kp > 6$. No significant variation

between the consecutive days of earthquake- and quiet-day periods is observed for CC, KLD, and L2N values. An example is provided in Figure 6 for E3 and station mizu. Station mizu is the central station for E3 and its distance to the epicenter is 43 km. From Figure 6, it is observed that KLD and L2N values for consecutive earthquake and quiet days are very similar to each other. Correlation coefficients for those cases are very high. Yet, for DDP₂, especially in the storm days (2nd and 18th days with $Kp \geq 6$), KLD and L2N values increase significantly and CC values are less than 0.9.

[24] In group III, the bounds defined in equation (13) are computed for all days in earthquake-, disturbed-, and quiet-day periods. These bounds are compared with the bounds of consecutive days using the cross-correlation coefficient $r_b(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1})$, symmetric Kullback-Leibler distance $KLD_b(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1})$, and L2 norm $L2N_b(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1})$. It is observed that KLD and L2N methods can measure ionospheric disturbance, but they cannot differentiate the seismic disturbances from the geomagnetic ones. When the correlation coefficients of the bounds for consecutive days are computed, it is observed that the CC for disturbed-day periods are consistently lower from those of earthquake- and quiet-day periods. Thus, CC analysis between the bounds of

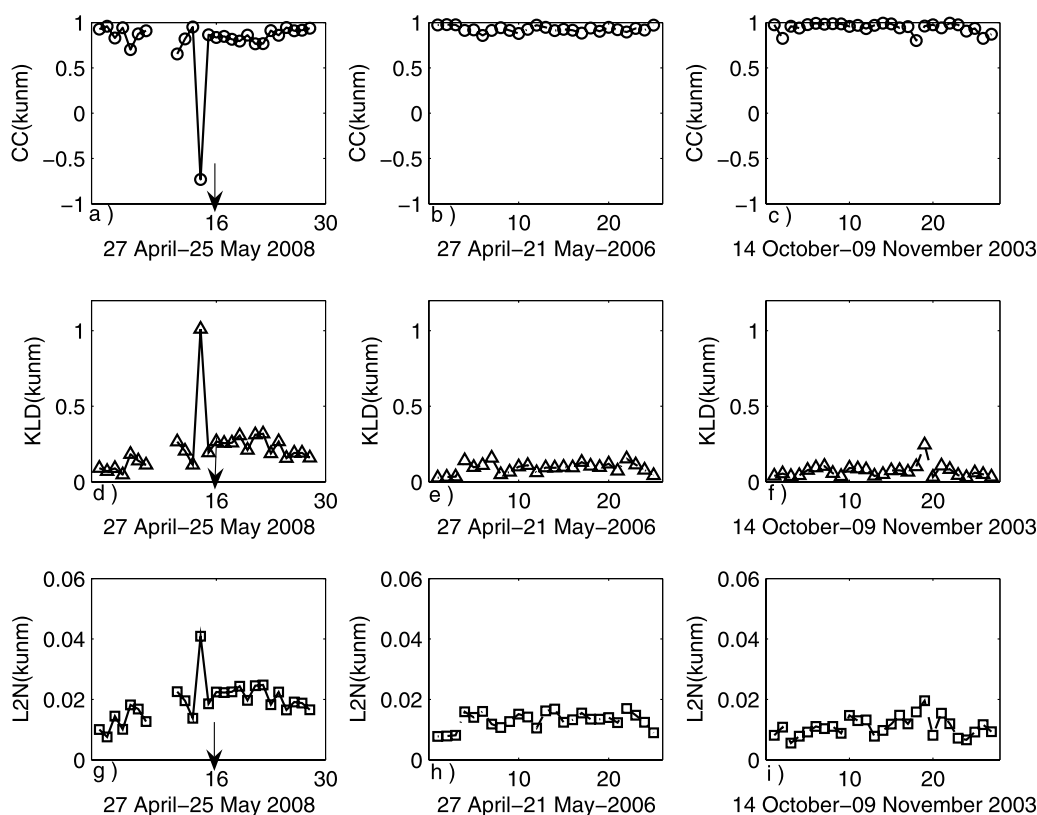


Figure 4. For station kunm, CC values between (a) EDP for E6 and AQDT, (b) QDP₂ and AQDT, and (c) DDP₁ and AQDT; KLD values between (d) EDP for E6 and AQDT, (e) QDP₂ and AQDT, and (f) DDP₁ and AQDT; and L2N values between (g) EDP for E6 and AQDT, (h) QDP₂ and AQDT, and (i) DDP₁ and AQDT. The earthquake day is indicated by the arrow in Figures 4a, 4d, and 4g.

consecutive days can be considered a precursor for geomagnetic disturbance in the ionosphere. An example case is provided in Figure 7 for E3 and station mizu. The CC, KLD, and L2N values between bounds of the consecutive days for E3, DDP₂, and QDP₁ are presented in Figures 7a–7c, respectively. KLD and L2N values in Figures 7b and 7c for the disturbed and earthquake days are greater than those for the quiet days. Yet, in Figure 7a, CC values for DDP₂ are significantly less than those of earthquake days and QDP₁.

[25] In this section, for all six earthquakes, eight GPS stations, two geomagnetic storms, and two quiet-day periods, the comparisons are computed using the cross-correlation coefficient, symmetric Kullback-Leibler distance, and L2 norm between daily VTEC values and sliding-window estimated bounds b . To differentiate the ionospheric variability, the statistical tools are applied to both quiet days and an average quiet day for any chosen GPS station. It is observed that CC, KLD, and L2N methods can be used separately or in combination in

discriminating disturbed days from quiet days. For certain cases, these methods can even distinguish the type of disturbance. As a result, with further investigation, these methods can be developed into precursors for ionospheric disturbance.

4. Conclusion

[26] In this study, the coupling of seismic and geomagnetic activity to the ionosphere is investigated through the variability of GPS-TEC by using four statistical tools, namely, the cross-correlation coefficient, the symmetric Kullback-Leibler distance, the L2 norm, and sliding-window statistical analysis. Six earthquakes with different seismic properties and two severe geomagnetic disturbances are chosen for investigation in this study. IONOLAB-TEC is computed for each of 15 days before and after each earthquake, geomagnetically disturbed days, and quiet days for eight GPS stations in the regions of interest. For all distance categories (group I),

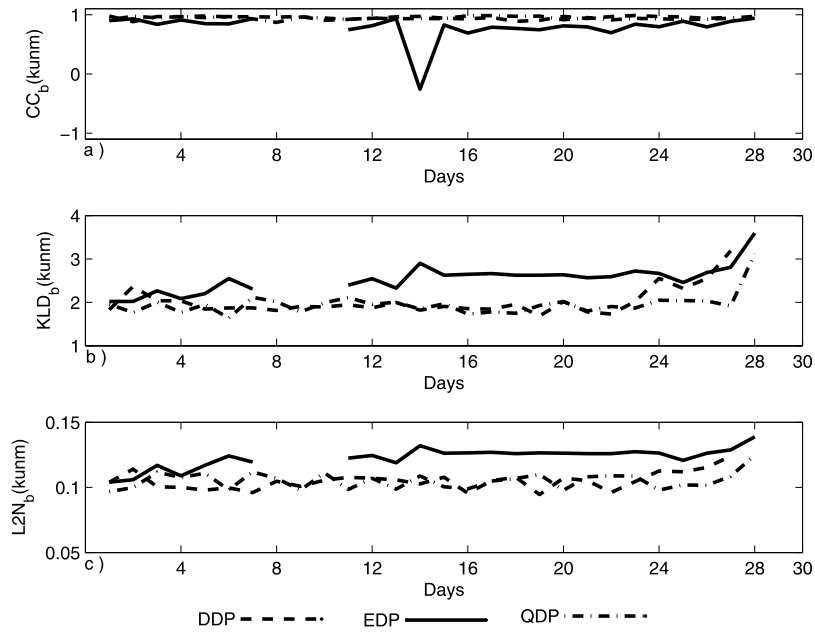


Figure 5. For station kunm, (a) CC, (b) KLD, and (c) L2N values between the bound of AQDT and bounds of EDP for E6, QDP₂, and DDP₁.

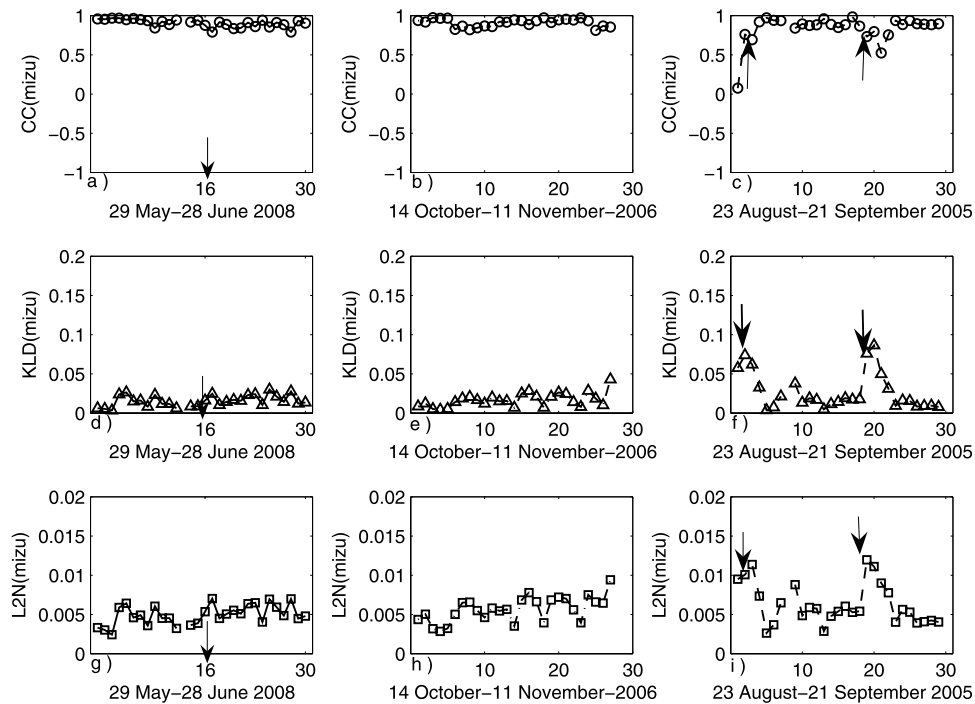


Figure 6. Comparison for consecutive days of station mizu: CC values in (a) EDP for E3, (b) QDP₁, and (c) DDP₂; KLD values in (d) EDP for E3, (e) QDP₁, and (f) DDP₂; and L2N values in (g) EDP for E3, (h) QDP₁, and (i) DDP₂. The earthquake day is indicated by the arrow in Figures 6a, 6d, and 6g, and the days of the geomagnetic storm are indicated by the arrows in Figures 6c, 6f, and 6i.

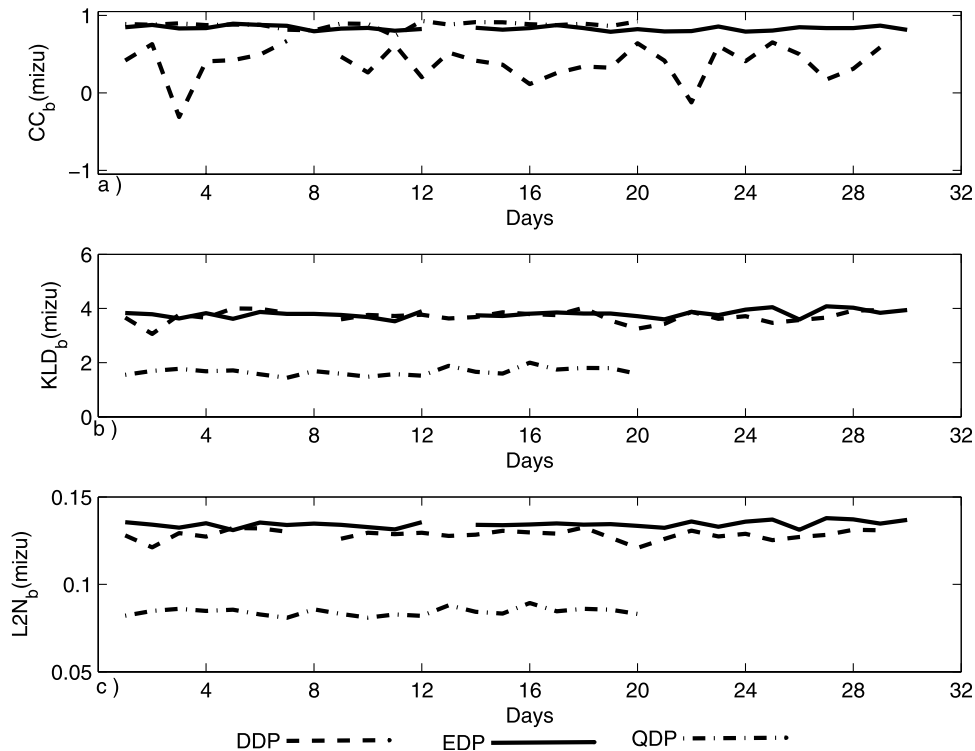


Figure 7. For station mizu, (a) CC, (b) KLD, and (c) L2N values between the bounds of consecutive days of EDP for E3, QDP₁, and DDP₂.

AQDT comparisons (group II), and consecutive-day comparisons (group III), more than 9500 values are computed and sorted according to the magnitude of the earthquake, the distance between the stations, the distance between the stations and epicenters, and the depth of earthquakes and periods of quiet and disturbed days. It is observed that the CC between the neighboring GPS stations cannot be used as a definitive earthquake precursor. KLD and L2N between the neighboring stations can be used to distinguish the earthquake days when the distance between the stations is less than 340 km and also when selected station pairs are close to the earthquake epicenter. For the comparison between AQDT and EDP, it is observed that KLD and L2N are strong candidates for developing an earthquake precursor tool for the stations that are located less than 150 km from the earthquake zones. In the comparison of the consecutive days for each station, it is observed that CC, KLD, and L2N can all distinguish geomagnetic disturbance from the seismic disturbance. This study demonstrates that CC, KLD, and L2N can be developed into precursor tools for distinguishing geomagnetic and seismic activity. Yet further long-term analysis is necessary for these tools to produce definitive precursor signals for those GPS stations that are on the earthquake zones. Also, for more reliable estimates of

preseismic activity, joint space-time analysis of TEC is necessary over a denser GPS network in the earthquake zones.

[27] **Acknowledgment.** This study is supported by TUBITAK EEEAG grants 105E171 and 109E055.

References

- Arikan, F., and C. B. Erol (1998), Statistical characterization of time variability in midlatitude single tone HF channel response, *Radio Sci.*, *33*(5), 1429–1444.
- Arikan, F., C. B. Erol, and O. Arikan (2003), Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *J. Geophys. Res.*, *108*(A12), 1469, doi:10.1029/2002JA009605.
- Arikan, F., C. B. Erol, and O. Arikan (2004), Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period, *Radio Sci.*, *39*, RS6012, doi:10.1029/2004RS003061.
- Arikan, F., S. Karatay, and O. Arikan (2009), Investigation of ionospheric disturbance due to strong earthquakes using total electron content, *Geophys. Res. Abstr.*, *11*, Abstract EGU2009-8440.

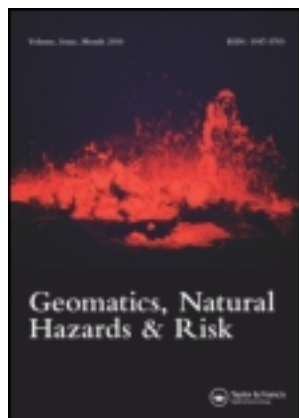
- Biqiang, Z., W. Weixing, L. Libo, and M. Tian (2007), Morphology in the total electron content under geomagnetic disturbed conditions: Results from global ionosphere naps, *Ann. Geophys.*, 25(7), 1555–1568.
- Chuo, Y. J., Y. I. Chen, J. Y. Liu, and S. A. Pulinets (2001), Ionospheric f0F2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area, *Adv. Space Res.*, 27(6), 1305–1310.
- Ciraolo, L., and P. Spalla (1999), A statistics of time and space variability of ionospheric electron content at middle latitudes, paper presented at 4th COST 251 Workshop, Madeira, Portugal, 22–25 March.
- Cover, T. M., and A. J. Thomas (2006), *Elements of Information Theory*, Wiley-Interscience, New York.
- Erol, C. B., and F. Arikan (2005), Statistical characterization of the ionosphere using GPS signals, *J. Electromagn. Waves Appl.*, 19(3), 373–387.
- Hall, P. (1987), On Kullback-Leibler loss and estimation, *Ann. Stat.*, 15(4), 1491–1519.
- Inglada, J. (2003), Change detection on SAR images by using a parametric estimation of the Kullback-Leibler divergence, in *IGARSS 2003: Learning from Earth's Shapes and Sizes*, vol. 6, pp. 4104–4106, Int. of Electr. and Electr. Eng., Piscataway, N. J.
- Karatay, S., F. Arikan, and O. Arikan (2009a), Investigation of lithosphere-ionosphere coupling using total electron content, paper presented at SIU-2009 Symposium of Signal Processing and Applications, Int. of Electr. and Electr. Eng., Antalya, Turkey, 9–11 April.
- Karatay, S., F. Arikan, and O. Arikan (2009b), Investigation of hourly and daily patterns for lithosphere-ionosphere coupling before strong earthquakes, in *4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2009*, pp. 670–674, Inst. of Electr. and Electr. Eng., New York.
- Kouris, S. S., and D. N. Fotiadis (2002), Ionospheric variability: A comparative statistical study, *Adv. Space Res.*, 29(6), 977–985.
- Kouris, S. S., K. V. Polymeris, and L. R. Cander (2006), Specifications of TEC variability, *Adv. Space Res.*, 37(5), 983–1004.
- Kreyszig, E. (1988), *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley, New York.
- Lazo, B., K. Alazo, M. Rodriguez, and A. Calzadilla (2004), TEC variability over Havana for different solar activity conditions, *Adv. Space Res.*, 34(9), 2044–2048.
- Liu, J. Y., Y. I. Chen, S. A. Pulinets, Y. B. Tsai, and Y. J. Chuo (2000), Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 27(19), 3113–3116.
- Liu, J. Y., Y. J. Chuo, S. J. Shan, Y. B. Tsai, Y. I. Chen, S. A. Pulinets, and S. B. Yu (2004), Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements, *Ann. Geophys.*, 22(5), 1585–1593.
- Nayir, H., F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol (2007), Total electron content estimation with Reg-Est, *J. Geophys. Res.*, 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459.
- Ondoh, T. (2000), Seismo-ionospheric phenomena, *Adv. Space Res.*, 26(8), 1267–1272.
- Plotkin, V. V. (2003), GPS detection of ionospheric perturbations before the 13 February 2001 El Salvador earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 249–253.
- Pulinets, S. A. (2004), Ionospheric precursors of earthquakes: Recent advances in theory and practical applications, *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, 15(3), 413–435.
- Pulinets, S. A., T. B. Gaivoronska, L. A. Contreras, and L. Ciraolo (2004), Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 697–702.
- Pulinets, S. A., A. L. Contreas, G. Bisiacchi-Giraldi, and L. Ciraolo (2005), Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003, *Geofis. Int.*, 44(4), 369–377.
- Pulinets, S. A., A. N. Kotsarenko, L. Ciraolo, and I. A. Pulinets (2007), Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation, *Adv. Space Res.*, 39(5), 970–977.
- Rishbeth, H., and O. K. Garriot (1969), *Introduction to Ionospheric Physics*, Academic, New York.
- Trigunait, A., M. Parrot, S. A. Pulinets, and F. Li (2004), Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event, *Ann. Geophys.*, 22(12), 4123–4131.
- Vlasov, M., M. C. Kelley, and H. Kil (2003), Analysis of ground-based and satellite observations of F-region behavior during the great magnetic storm of July 15, 2000, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65, 1223–1234.
- Zhang, D., and Z. Xiao (2000), Study of ionospheric TEC using GPS during the large solar flare burst on November 6, 1997, *Chin. Sci. Bull.*, 45(19), 1749–1752.
- Zhang, M. L., J. K. Shi, X. Wang, and S. M. Radicella (2004), Ionospheric variability at low latitude station: Hainan, China, *Adv. Space Res.*, 34(9), 1860–1868.

F. Arikan, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Beytepe, 06800 Ankara, Turkey. (arikan@hacettepe.edu.tr)

O. Arikan, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Bilkent, 06800 Ankara, Turkey. (oarikan@ee.bilkent.edu.tr)

S. Karatay, Department of Physics, Faculty of Arts and Sciences, Firat University, 23100 Elazig, Turkey. (karatays@gmail.com)

This article was downloaded by: [Hacettepe University]
On: 14 February 2012, At: 23:22
Publisher: Taylor & Francis
Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Geomatics, Natural Hazards and Risk

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tgnh20>

Observed Ionospheric Effects of 23 October 2011 Van, Turkey Earthquake

Feza Arikan^a, M. N. Deviren^a, O. Lenk^b, U. Sezen^a & O. Arikan^c

^a Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Beytepe, 06800, Ankara, Turkey

^b General Command of Mapping, Defense Ministry, Cebeci, Ankara, Turkey

^c Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Bilkent, 06800, Ankara, Turkey

Available online: 17 Jan 2012

To cite this article: Feza Arikan, M. N. Deviren, O. Lenk, U. Sezen & O. Arikan (2012): Observed Ionospheric Effects of 23 October 2011 Van, Turkey Earthquake, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 3:1, 1-8

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2011.638027>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae, and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand, or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Express Letter

Observed Ionospheric Effects of 23 October 2011 Van, Turkey Earthquake

FEZA ARIKAN*†, M.N. DEVIREN†, O. LENK‡, U. SEZEN†, and
O. ARIKAN§

†Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Beytepe,
06800 Ankara, Turkey

‡General Command of Mapping, Defense Ministry, Cebeci, Ankara, Turkey

§Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Bilkent,
06800 Ankara, Turkey

(Received 27 October 2011; in final form 1 November 2011)

On 23 October 2011, a very strong earthquake with a magnitude of $M_w = 7.2$ shook Eastern Anatolia, and tremors were felt up to 500 km from the epicentre. In this study, we present an early analysis of ionospheric disturbance due to this earthquake using Global Positioning Satellite-Total Electron Content (GPS-TEC). The variability with respect to average quiet day TEC (AQDT) and variability between the consecutive days are measured with symmetric Kullback–Leibler divergence (SKLD). A significant variability in total electron content (TEC) is observed from the GPS stations in the 150 km neighbourhood of the epicentre eight and nine days prior to the earthquake. An ionospheric disturbance is observed from GPS stations even more than 1,000 km to the epicentre, especially those on the North Anatolian fault (NAF). The present results support the existence of lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling (LAIC) associated with Van, Turkey earthquake.

1. Introduction

In recent years, increased earth and space-based observations of the ionosphere indicate that there exists a coupling mechanism between seismic activities in the lithosphere and deviations or disturbances in the electron concentrations in the ionosphere, especially before strong earthquakes. These observations usually include variability in the critical frequency of the F2 layer, foF2 and Total Electron Content (TEC) (Ondoh 2000, Chuo *et al.* 2001, Pulinets 2004, Karatay 2010). With a world-wide dense network, global positioning satellite (GPS) receivers offer a cost-effective and efficient way of computing TEC compared to expensive and sparse foF2 measurements from earth or space-based ionosondes (Arikan *et al.* 2003, Nayir *et al.* 2007). TEC is defined as the line integral of electron density on a path joining the satellite and the receiver (Arikan *et al.* 2003). The unit of TEC is given in TECU where $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$. In statistics and information theory, symmetric Kullback–Leibler divergence (SKLD) is a widely used measure of distance between

*Corresponding author. Email: arikan@hacettepe.edu.tr

two probability density distributions (Cover and Thomas 2006). Previously, SKLD is applied to measure the difference between the experimental probability density functions (e-pdf) of average quiet day TEC (AQDT) and days prior to the earthquake, and it has been observed that GPS stations within 150–350 km to the epicentre demonstrate a significant variability nine to two days prior to the earthquake (Arikan *et al.* 2009, Karatay *et al.* 2009, Karatay 2010, Karatay *et al.* 2010a). According to the results of these studies, SKLD proved itself to be a better measure of disturbance or difference compared to cross correlation coefficient and L2-norm methods. Further, SKLD has been applied to earthquakes in North Anatolian Fault (NAF) using GPS recordings of Turkish National Permanent GPS Network (TNPNG) (Karatay 2010, Karatay *et al.* 2010b, 2010c, Özilhan 2010). Even with magnitude 4 or 5 earthquakes, close or on NAF, significant variability in TEC is observed using SKLD in comparisons with AQDT and consecutive days. In this study, the variability of Global Positioning Satellite-Total Electron Content (GPS-TEC) prior to 23 October 2011 earthquake in Van is investigated using SKLD in comparisons with AQDT and consecutive days.

2. Application of SKLD to detect TEC variability

In this section, we will summarize the SKLD measurement method (Karatay 2010, Karatay *et al.* 2010a, Özilhan 2010). Let

$$\mathbf{X}_{u,d} = [\mathbf{X}_{u,d}(1) \dots \mathbf{X}_{u,d}(n) \dots \mathbf{X}_{u,d}(N)]^T \quad (1)$$

represent the set of TEC data of length N estimated for day d and GPS station u . Here, n is the index where $1 \leq n \leq N$ and subscript T is the transpose operator. In order to compare TEC values obtained from different seasons and days, data vectors as in equation (1) are normalized. The experimental probability density function (e-pdf) of TEC for station u and day d can be approximated using the TEC estimates as:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u,d} = \mathbf{X}_{u,d} \left[\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u,d}(n) \right]^{-1} \quad (2)$$

where N_i and N_s denote the initial and final indices for the measurement set, respectively. In order to compare the behaviour of TEC for the quiet days with those from the EQD, an AQDT estimate for each GPS station is obtained. For N_d quiet days for station u , AQDT is defined as:

$$\mathbf{X}_{u;d_i-d_s} = \frac{1}{N_d} \sum_{n_d=d_i}^{d_s} \mathbf{X}_{u;n_d} \quad (3)$$

where n_d is the index for quiet day period (QDP) which extends from d_i to d_s . Approximation for the e-pdf of AQDT is defined as follows:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s} = \mathbf{X}_{u;d_i-d_s} \left[\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u;d_i-d_s}(n) \right]^{-1} \quad (4)$$

The Kullback–Leibler (KL) divergences of normalized e-pdfs defined in equation (2) for day d between stations u and v can be defined as:

$$KL(\hat{P}_{u,d} \setminus \hat{P}_{v,d}) = \sum_{n=N_i}^{N_x} \hat{P}_{u,d}(n) \ln \left(\frac{\hat{P}_{u,d}(n)}{\hat{P}_{v,d}(n)} \right) \quad (5)$$

$$KL(\hat{P}_{v,d} \setminus \hat{P}_{u,d}) = \sum_{n=N_i}^{N_x} \hat{P}_{v,d}(n) \ln \left(\frac{\hat{P}_{v,d}(n)}{\hat{P}_{u,d}(n)} \right) \quad (6)$$

where $N_i < n < N_s$. The SKLD is defined as the sum of the KL divergences (Cover and Thomas 2006, Karatay 2010) as:

$$KLD(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{v,d}) = KL(\hat{P}_{u,d} \setminus \hat{P}_{v,d}) + KL(\hat{P}_{v,d} \setminus \hat{P}_{u,d}) \quad (7)$$

Using normalized AQDT, for day d of station u , SKLD is defined as $KL\bar{D}(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d-d_x})$. For consecutive days of station u , SKLD is defined as $KL\bar{D}(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d+1})$.

3. A summary of the 23 October 2011, Van Earthquake

According to Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI) of Bogazici University, National Earthquake Monitoring Center (NECM), an earthquake of magnitude $M_w = 7.2$ ($ML = 6.6$) took place on 23 October 2011 at 10:41 UT (Universal Time) in Eastern Turkey to the northeast of Lake Van approximately 30 km to the north of the city Van with a population of 380,000. The earthquake epicentre is located at (38.7578°N, 43.3602°E) with a depth of 5.0 km. The earthquake was felt within a 500 km radius and along the Iran–Turkey border region. The main shock has been followed by an intensive aftershock activity published at <http://www.koeri.boun.edu.tr/scripts/lasteq.asp>. The size of the largest aftershock recorded until present is $ML = 5.7$ on 23 October 2011 at 20:45 UT. The number of aftershocks above magnitude 3 has reached 307 as of 13:45 UT, 24 October 2011. Historically, Eastern Anatolia has suffered from severe earthquakes. The most recent one in the area occurred on 24 November 1976 at 12:22 UT, with $M_s = 7.5$ in Caldiran (39.05°N, 44.04°E), close to Van. In figure 1, the time series evolution of mura, a TNPNG station 43 km to the epicentre, is presented. The coseismic displacement due to the first shock is highly evident in north–south and east–west directions. In the following section, SKLD will be applied to TNPNG stations for 23 October 2011, Van earthquake.

4. Results

The possible seismic disturbances in the ionosphere due to the Van earthquake is investigated using the SKLD measure described in section 2. The Receiver INdependent EXchange (RINEX) data from GPS stations are obtained from the TNPNG. TNPNG is the reference station network of 146 continuously operating

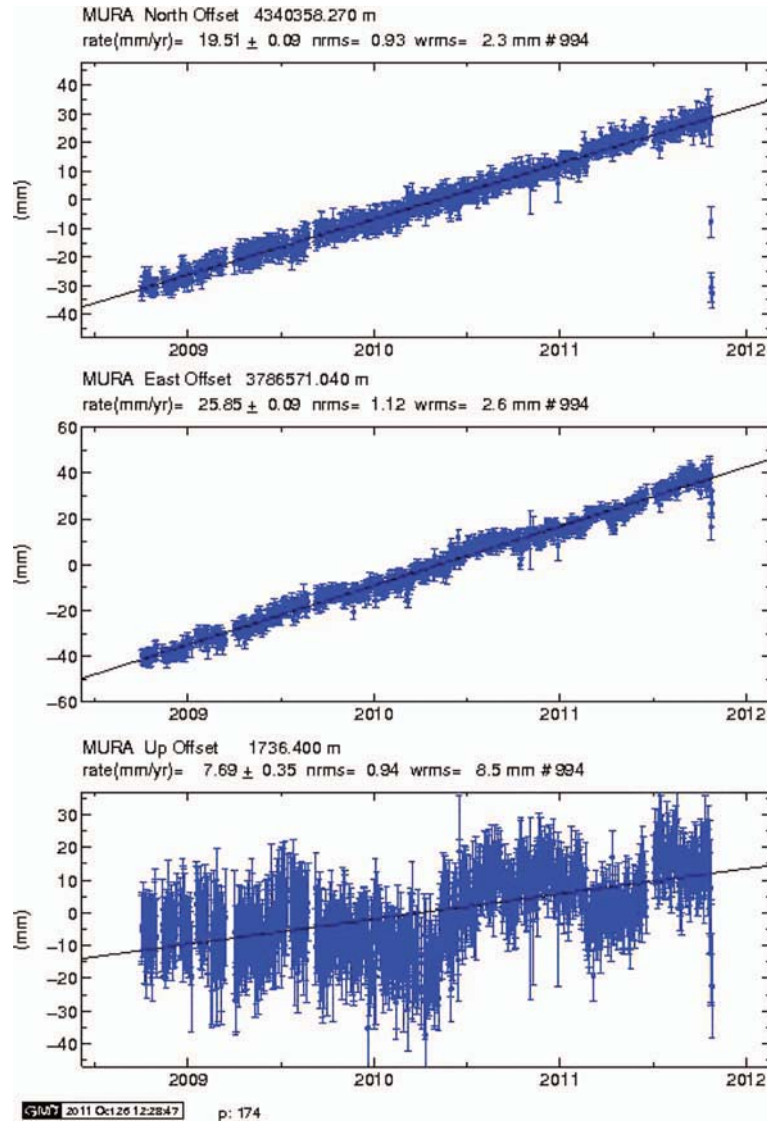


Figure 1. Survey mode observations and coseismic displacement due to the first shock for mura, 43 km to the epicentre.

GNSS stations (CORS) which are distributed uniformly across Turkey and North Cyprus Turkish Republic since May 2009. The GPS-TEC values for each station are estimated by IONOLAB-TEC using the Reg-Est algorithm described in Arikan *et al.* (2003) and Nayir *et al.* (2007), www.ionolab.org with a time resolution of 2.5 min. The missing values of TEC or SKLD in figures of this section are due to the lack of RINEX data for those stations and/or days.

AQDT is obtained using the IONOLAB-TEC in equation (4) from 25 to 28 March 2011. AQDT is compared with a magnetically QDP of 25–28 April 2011 and also with EQD, 14–23 October 2011. Quiet days are chosen according to the Kp and Dst indices provided in <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>, and also there are no recorded

earthquakes during those periods in Turkey. The geomagnetic disturbance indices of Kp and Dst indicate that the EQD period is also magnetically quiet. Therefore, we expect that the disturbances in the ionosphere to be due to seismic activities.

The 146 GPS stations in TNPNG are divided into five categories with respect to the distance to the epicentre. The first zone, Z1, includes stations which are within 150 km radius of the epicentre; Z2 includes stations which are 150–360 km to the epicentre; Z3 stations are within 360–550 km to the epicentre; Z4 zone includes stations within 550–780 km to the epicentre and finally, Z5 have stations whose distances to the epicentre is larger than 780 km. An AQDT is obtained for each of these stations and it is compared with QDP and EQD using SKLD. It is observed that for all the stations in the network, SKLD of EQD (Se) is significantly larger than SKLD of QDP (Sq), on 14 and 15 October 2011, eight and nine days prior to the earthquake. The difference ($D_u = Se_u - Sq_u$) for each station is computed and then an average is taken within the zone, D_m . In table 1, D_m is presented for five zones for both 14 and 15 October 2011. It is observed that eight and nine days before the earthquake with 7.2 magnitude, $D_u = Se_u - Sq_u$ values for all the stations in TNPNG network indicated a significant difference compared to the quiet days. The mean difference D_m is highest in the first two zones that are close to the epicentre. D_m reduces as the distance from the epicentre gets larger in zones Z3, Z4 and Z5. A comparison of SKLD of AQDT with QDP and EQD is also provided for four stations in figure 2. In figure 2, Se_u and mean Sq_u values of mura, surf, klis and yenc are provided. The mura station is 43 km, surf is 435 km, klis is 596 km and yenc is 1,394 km from the epicentre. The yenc station is located on the western edge of NAF. The difference $D_u = Se_u - Sq_u$ is significant for all stations either 43 km or 1,394 km from the epicentre. In figure 3, IONOLAB-TEC values are presented for mura for 23 October 2011 (earthquake day, dotted line), 15 October 2011 (eight days prior to the earthquake, solid line), 26 April 2011 (quiet day, dashed line) and AQDT (dash dot line). The significant increase in ionization levels is apparent starting from nine days prior to the earthquake, compared to AQDT and quiet day TEC. Eight days prior to the earthquake, TEC has the same level for the night hours and there is an increase in peak TEC for the day hours. Yet, on earthquake day, the ionization is very high even during night hours. Also, the uncharacteristic increase in figure 3 for earthquake day between 16:00 UT and 22:00 UT might be due to other effects. SKLD is also applied to find the difference of TEC between consecutive days, $KLD(\hat{P}_{u;d}, \hat{P}_{u;d+1})$. For each station starting with nine days prior to the earthquake, SKLD of consecutive days Ke_u are computed. Similarly, SKLD of consecutive days are computed for days in QDP as Kq_u . In figure 4, Ke_u and mean of Kq_u are presented for four stations, namely mura, surf, klis and yenc. The SKLD are indicated for the first day for a day 1 and day 2 comparison. For example, the

Table 1. D_m , mean of the differences $D = Se - Sq$ within a distance zone.

Zone	D_m for 14 October 2011	D_m for 15 October 2011
Z1	0.0452	0.0461
Z2	0.0333	0.0517
Z3	0.0245	0.0439
Z4	0.0247	0.0351
Z5	0.0233	0.0205

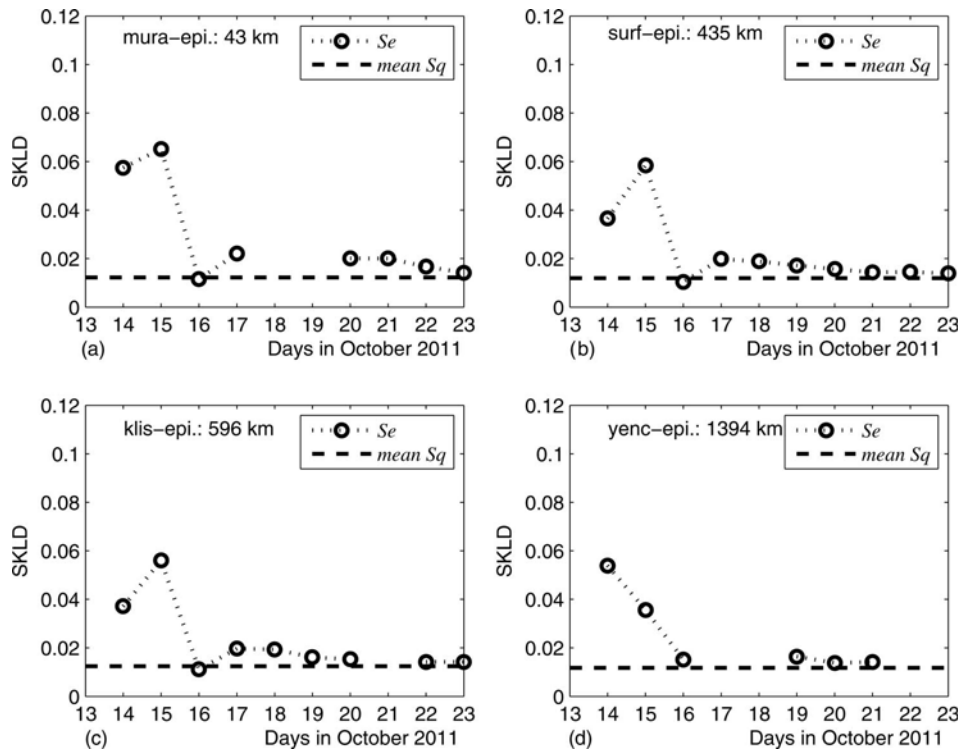


Figure 2. Comparison of SKLD values of Se (AQDT with EQD) and mean of Sq (AQDT with QDP) (a) mura, (b) surf, (c) klis and (d) yenc.

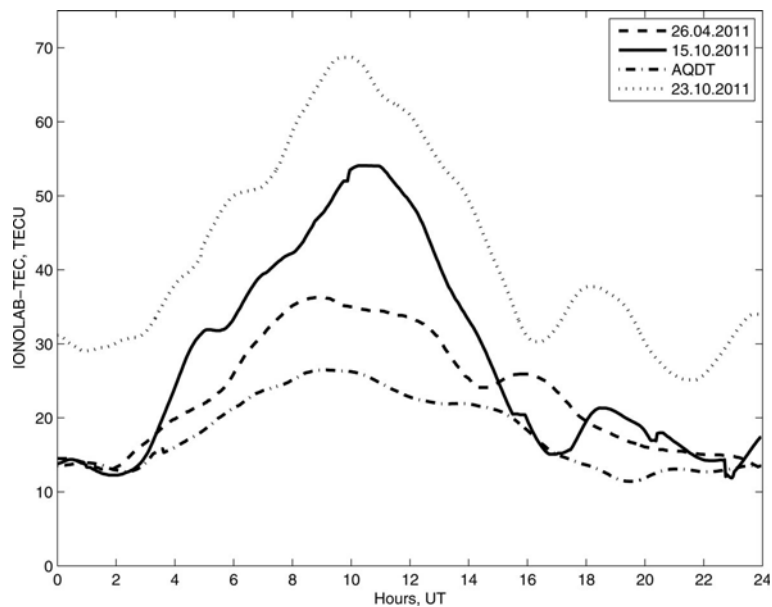


Figure 3. IONOLAB-TEC values for mura on 23 October 2011 (earthquake day, dotted line), 15 October 2011 (eight days prior to the earthquake, solid line), 26 April 2011 (quiet day, dashed line) and AQDT (dash dot line).

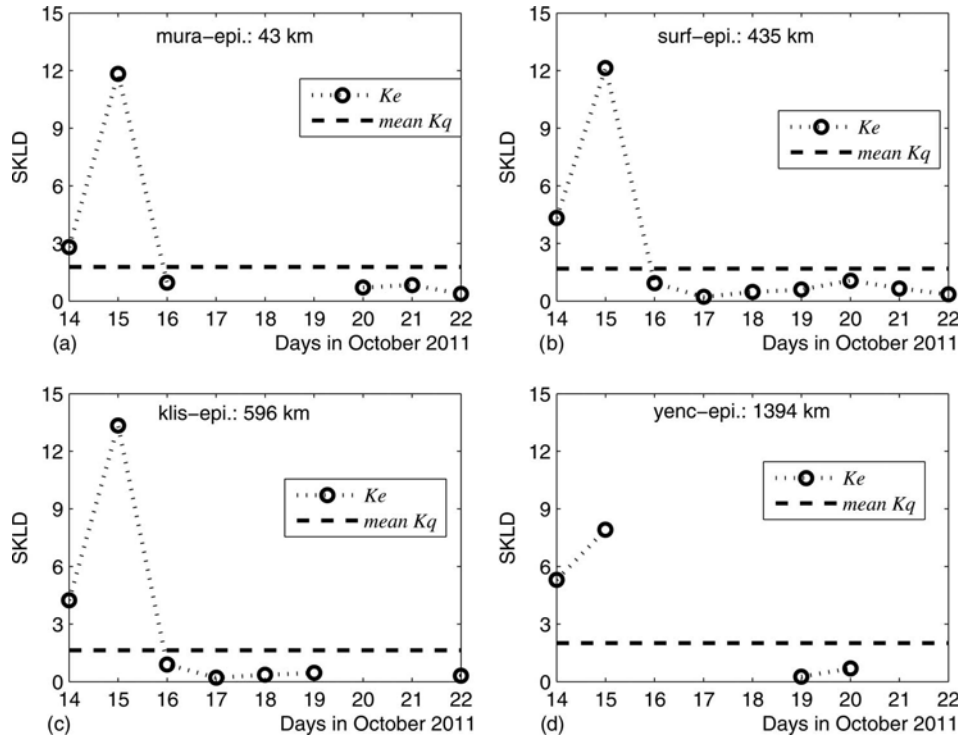


Figure 4. Comparison of SKLD values of consecutive days: K_e (EQD) and mean of K_q (QDP) for (a) mura, (b) surf, (c) klis and (d) yenc. The SKLD are indicated for the first day for a day 1 and day 2 comparison. For example, the comparison of 14 and 15 October is plotted for 14 October.

comparison of 14 and 15 October is plotted for 14 October and the comparison of 22 and 23 October is plotted for 22 October. It is observed that there is a major difference in consecutive EQD nine and eight days prior to the earthquake.

5. Conclusions

In this study, initial results for a possible the coupling of seismic activity to the ionosphere are presented for 7.2 magnitude earthquake in Van, Turkey that occurred on 23 October 2011. The variability of GPS-TEC between EQD and quiet days, and also between consecutive days prior to the earthquake is investigated using SKLD. In previous studies, for comparison between AQDT and EQD for earthquakes with magnitudes 4 and 5 on NAF, it is observed that SKLD is a strong candidate for developing an earthquake precursor tool for the stations that are located less than 150 km from the earthquake zones. In Van earthquake with magnitude 7.2, even stations 1,394 km from the epicentre on the NAF deviated significantly from the quiet day threshold. In the comparison of the consecutive days for each station, similar results are obtained. These initial results demonstrate that SKLD can be developed into a precursor tool for distinguishing seismic activity with a long-term constant analysis. Detailed geodetic analysis of displacement of GPS stations in TNPGN for Van earthquake is prepared by General Command of Mapping. For

future studies, the earthquake precursor signal has to be identified as residuals in a local area over a known fault zone with a dense GPS receiver grid. Observation space, probabilistic transition mechanism and the thresholds will be formed with constant monitoring.

Acknowledgements

This study is supported by TUBITAK EEEAG grant no. 109E055. The authors wish to thank the anonymous referee for his/her careful revision of the manuscript.

References

- ARIKAN, F., EROL, C.B. and ARIKAN, O., 2003, Regularized estimation of vertical total electron content from global positioning system data. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, **108**, pp. 1469–1480.
- ARIKAN, F., KARATAY, S. and ARIKAN, O., 2009, Investigation of ionospheric disturbance due to strong earthquakes using total electron content. In *Geophysical research abstracts, Vol. 11, EGU2009-8440*, EGU General Assembly, 19–24 April 2009, Vienna, Austria.
- CHUO, Y.J., CHEN, Y.I., LIU, J.Y. and PULINETS, S.A., 2001, Ionospheric foF2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area. *Advances in Space Research*, **27**, pp. 1305–1310.
- COVER, T.M. and THOMAS, A.J., 2006, *Elements of Information Theory* (New York, NY: Wiley Interscience Publishers).
- KARATAY, S., ARIKAN, F. and ARIKAN, O., 2009, Investigation of hourly and daily patterns for lithosphere–ionosphere coupling before strong earthquakes. In *Proceedings of the Recent Advances in Space Technologies, RAST-2009*, 11–13 June 2009, Istanbul, Turkey.
- KARATAY, S., 2010, Investigation of relationship between earthquakes and ionospheric total electron content (in Turkish). PhD thesis, Firat University, Elazig, Turkey.
- KARATAY, S., ARIKAN, F. and ARIKAN, O., 2010a, Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere. *Radio Science*, **45**, p. RS5012.
- KARATAY, S., ARIKAN, F. and ARIKAN, O., 2010c, Comparison of ionospheric variations in seismic, geomagnetically disturbed and quiet days by IONOLAB-TEC estimates. In *Abstracts of the Workshop on Electromagnetic Signals Associated with Earthquakes and Volcanoes, EMSEV 2010*, 3–6 October 2010, Chapman University, Orange, CA, USA, pp. 92.
- KARATAY, S., ARIKAN, F., ARIKAN, O., LENK, O., AKTUG, B. and AYSEZEN, M.S., 2010b, Comparison of ionospheric variations in seismic and quiet days by CORS-TR IONOLAB-TEC estimates. In *Proceedings of The International Beacon Satellite Symposium, BSS2010*, 7–11 June 2010, Campus Nord UPC, Barcelona, Spain.
- NAYIR, H., ARIKAN, F., ARIKAN, O. and EROL, C.B., 2007, Total electron content estimation with Reg-Est. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, **122**, p. A11313.
- ONDOH, T., 2000, Seismo-ionospheric phenomena. *Advances in Space Research*, **26**, pp. 1267–1272.
- ÖZILHAN, B.E., 2010, Investigation of possible relationships between North Anatolian Fault zone earthquakes and ionosphere total electron content estimates (in Turkish). MS thesis, Hacettepe University, Ankara, Turkey.
- PULINETS, S.A., 2004, Ionospheric precursors of earthquakes – Recent advances in theory and practical applications. *TAO*, **15**, pp. 413–435.



Space Weather Activities of IONOLAB Group: TEC Mapping

F. ARIKAN (1), A. YILMAZ (2), O. ARIKAN (3), I. SAYIN (4), M. GURUN (5), K.E. AKDOGAN (6), and S.A. YILDIRIM (7)

(1) Hacettepe University, Ankara, Turkey (arikan@hacettepe.edu.tr, 90 312 299 2125), (2) Hacettepe University, Ankara, Turkey (ayilmaz@hacettepe.edu.tr, 90 312 2992125), (3) Bilkent University, Ankara, Turkey (oarikan@ee.bilkent.edu.tr, 90 312 2664192), (4) Hacettepe University, Ankara, Turkey (isiltan@ee.hacettepe.edu.tr, 90 312 2992125), (5) TUBITAK UZAY, Ankara Turkey (melike.gurun@uzay.tubitak.gov.tr), (6) Hacettepe University, Ankara, Turkey (kurtulus@ee.hacettepe.edu.tr, 90 312 2992125), (7) Hacettepe University, Ankara, Turkey

Being a key player in Space Weather, ionospheric variability affects the performance of both communication and navigation systems. To improve the performance of these systems, ionosphere has to be monitored. Total Electron Content (TEC), line integral of the electron density along a ray path, is an important parameter to investigate the ionospheric variability. A cost-effective way of obtaining TEC is by using dual-frequency GPS receivers. Since these measurements are sparse in space, accurate and robust interpolation techniques are needed to interpolate (or map) the TEC distribution for a given region in space. However, the TEC data derived from GPS measurements contain measurement noise, model and computational errors. Thus, it is necessary to analyze the interpolation performance of the techniques on synthetic data sets that can represent various ionospheric states. By this way, interpolation performance of the techniques can be compared over many parameters that can be controlled to represent the desired ionospheric states. In this study, Multiquadrics, Inverse Distance Weighting (IDW), Cubic Splines, Ordinary and Universal Kriging, Random Field Priors (RFP), Multi-Layer Perceptron Neural Network (MLP-NN), and Radial Basis Function Neural Network (RBF-NN) are employed as the spatial interpolation algorithms. These mapping techniques are initially tried on synthetic TEC surfaces for parameter and coefficient optimization and determination of error bounds. Interpolation performance of these methods are compared on synthetic TEC surfaces over the parameters of sampling pattern, number of samples, the variability of the surface and the trend type in the TEC surfaces. By examining the performance of the interpolation methods, it is observed that both Kriging, RFP and NN have important advantages and possible disadvantages depending on the given constraints. It is also observed that the determining parameter in the error performance is the trend in the Ionosphere. Optimization of the algorithms in terms of their performance parameters (like the choice of the semivariogram function for Kriging algorithms and the hidden layer and neuron numbers for MLP-NN) mostly depend on the behavior of the ionosphere at that given time instant for the desired region. The sampling pattern and number of samples are the other important parameters that may contribute to the higher errors in reconstruction. For example, for all of the above listed algorithms, hexagonal regular sampling of the ionosphere provides the lowest reconstruction error and the performance significantly degrades as the samples in the region become sparse and clustered. The optimized models and coefficients are applied to regional GPS-TEC mapping using the IONOLAB-TEC data (www.ionolab.org). Both Kriging combined with Kalman Filter and dynamic modeling of NN are also implemented as first trials of TEC and space weather predictions.



Investigation of Ionospheric Disturbance due to Strong Earthquakes Using Total Electron Content

F. ARIKAN (1), S. KARATAY (2), and O. ARIKAN (3)

(1) Hacettepe University, Ankara, Turkey (arikan@hacettepe.edu.tr, 90 312 2992125), (2) Firat University, Elazig, Turkey (karatays@gmail.com), (3) Bilkent University, Ankara, Turkey (oarikan@ee.bilkent.edu.tr, 90 312 2664192)

The reliable and accurate prediction of highly destructive earthquakes hours before their impact is extremely beneficial both economically and socially. Increased observations of the ionosphere with the ionosondes, both top-side and bottom-side, before, during and after the strong earthquakes suggest that there are several disturbances and variations in the ionosphere especially in the critical frequency, ion temperatures and Total Electron Content (TEC) distributions. Therefore, many scientists all over the world suspect that the major cause of the disturbance of the ionosphere before, during and after the seismic activity might be due to the variation in the electromagnetic (EM) field and the chemical composition of the ionosphere. There have been various theories that try to explain EM anomalies associated with pre-seismic activity, and several theories have been formulated to explain their causes. Yet, ionosphere is a layer of the atmosphere which is an integral part of whole geomagnetic and geological framework. Therefore, relying on the evidence that there have been variations observed in the VLF, LF and HF signals, magnetic field of the earth and in the local electric field, a unified theory, that would explain the mechanism and cause of the disturbance in the layers of atmosphere, is a widely investigated research topic. In this study, the relation between Total Electron Content (TEC) estimates obtained from Earth-based GPS receivers and the strong earthquakes is examined using various statistical analysis tools both for the period that includes the earthquake, and ionospheric quiet and disturbed days during which no strong earthquakes are registered. For this investigation, five earthquakes in Japan that occurred over magnitude 5.9 in Richter Scale between 2003-2008, and the Sichuan, China earthquake with magnitude 7.9 that occurred on 12 May 2008 are chosen. For each earthquake, IONOLAB-TEC is computed for 15-days before and after the registered earthquakes; for the chosen ionospheric quiet days; and for the days which have very strong geomagnetic disturbance. For the statistical analysis, the cross-correlation coefficient (CC) which is used in the literature before, and the Kullback-Leibler Divergence (KLD) and L2-Norm Measures (L2M) which are used for the first time in literature in this context, are applied to the data sets. The analysis is performed on three different groups. In the first group, the CC, KLD and L2M are applied between neighboring GPS stations for the period before and after the earthquakes, ionospheric quiet day period and the ionospheric disturbed day period. In the second group, the TEC estimates for each day are compared with the TEC estimate of the consecutive day both for the earthquake period, quiet day period and disturbed day period. In the third group, an average quiet day TEC estimate is obtained for each station and the TEC estimates for the earthquake period and disturbed day period are compared with this average quiet day TEC estimate using CC, KLD and L2M. In total, more than 9500 values are computed and sorted according to magnitude of the earthquake, distance between the GPS stations, distance between the GPS station and the earthquake epicenter, depth of the epicenter, the 15-day period before the earthquake, 15-day period after the earthquake, ionospheric quiet day and disturbed day periods, and finally for the performance of CC, KLD and L2M. It is observed that none of the used methods can single out to be used as an earthquake precursor or an alarm signal. This is basically due to the fact that there are various external seismic and computational parameters that may contribute to a definitive conclusion. Some anomalies that are observed with limited numbers for the above mentioned methods for the earthquake days have also occurred for some quiet and disturbed days, especially with CC method. For the earthquakes with scale larger than 6, and with a certain proximity to the epicenter, the possibility of generating an alarm signal is more likely with a future detailed comparative study of the estimated TEC from nearby GPS stations in space and time.

Investigation of Hourly and Daily Patterns for Lithosphere-Ionosphere Coupling Before Strong Earthquakes

Seçil KARATAY¹, Feza ARIKAN², Orhan ARIKAN³

¹Fırat University, Department of Physics, skaratay@firat.edu.tr
23100, Elazığ, Turkey

²Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics, arikan@hacettepe.edu.tr
06800, Beytepe, Ankara, Turkey

³Bilkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering, oarikan@ee.bilkent.edu.tr
06800, Bilkent, Ankara, Turkey

Abstract—The ionosphere can be characterized with its electron density distribution which is a complex function of spatial and temporal variations, geomagnetic, solar and seismic activity. An important measurable quantity about the electron density is the Total Electron Content (TEC) which is proportional to the total number of electrons on a line crossing the atmosphere. TEC measurements enable monitoring variations in the space weather. Global Positioning System (GPS) and the network of world-wide receivers provide a cost-effective solution in estimating TEC over a significant proportion of global land mass. In this study, five earthquakes between 2003–2008 that occurred in Japan with different seismic properties, and the China earthquake in May 2008 are investigated. The TEC data set is investigated by using the Kullback-Leibler Divergence (KLI), Kullback-Leibler Distance (KLD) and L2-Norm (L2N) which are used for the first time in the literature in this context and Cross Correlation Function (CCF) which is used in the literature before for quiet day period (QDP), disturbed day period (DDP), periods of 15 days before a strong earthquake (BE) and after the earthquake (AE). In summary, it is observed that the CCF, KLD and L2N between the neighbouring GPS stations cannot be used as a definitive earthquake precursor due to the complicated nature of earthquakes and various uncontrolled parameters that effect the behavior of TEC such as distance to the earthquake epicenter, distance between the stations, depth of the earthquake, strength of the earthquake and tectonic structure of the earthquake. KLD, KLI and L2N are used for the first time in literature for the investigation of earthquake precursor for the first time in literature and the extensive study results indicate that for more reliable estimates further space-time TEC analysis is necessary over a denser GPS network in the earthquake zones.

Keywords—component; Ionosphere, Total Electron Content, Kullback-Leibler, L2-Norm, Earthquake, Coupling

I. INTRODUCTION

Earth's ionosphere is a dominant factor in space weather and the variability of the ionosphere is important for the ionospheric physics and radio communications. The ionosphere can be characterized with its electron density distribution which is a complex function of spatial and temporal variations, geomagnetic, solar and seismic activity. An important measurable quantity about the electron density is the Total Electron Content (TEC) which is proportional to the total number of electrons on a line crossing the atmosphere. The unit of TEC is given in TECU where $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{el/m}^2$. TEC measurements enable monitoring variations in the space weather. Global Positioning System (GPS) and the network of world-wide receivers provide a cost-effective solution in estimating TEC over a significant proportion of global land mass [1].

Recent studies in the literature indicate that there is a possible coupling between lithosphere and ionosphere before strong earthquakes [2-5]. In these studies, it is suggested that seismic activity causes several disturbances and variations in the ionosphere especially in the frequency and electron and ion compositions. To investigate this interaction, different statistical and physical models have been presented by using some parameters like electron density, Total Electron Content and critical frequency of F2-Layer. In the literature, the statistical tools that are used to investigate the effect of presismic activity on the ionosphere can be grouped into Correlation Analysis [3,4], Inter Quartile Range Analysis [6,7], TEC Difference Analysis [8] and Ionospheric Correction [8,9]. Among these studies, the most dominant and successful to provide pre-earthquake information is shown to be Correlation Analysis.

Kullback-Leibler Divergence (KLI), Kullback-Leibler Distance (KLD) [10,11] and L2-Norm (L2N) [12] are used in

various description to define the similarity and the difference between two distributions. In this study, the Cross-Correlation Coefficient (CCF), KLI, KLD and the L2N are applied to TEC data for detailed investigation of lithosphere-ionosphere coupling. KLI, KLD and the L2N are used for the first time in the literature in this context. In addition, sliding window statistical properties of TEC are observed using moving average and standard deviation. In this study, five earthquakes between 2003–2008 that occurred in Japan with different seismic properties, and the China earthquake in May 2008 are chosen. TEC values are estimated for periods of 15 days before a strong earthquake (BE) and after the earthquake (AE) with a time resolution of 2.5 minutes and for all the GPS stations positioned near and far from the earthquake epicenter. TEC values are also obtained for the same GPS station group and with the same time resolution for the days when Ionosphere is under the influence of strong disturbances (disturbed day period-DDP) and also for the periods when there are no significant disturbances, geomagnetic storm or seismic activity in the regions (quiet day period-QDP). The statistical method used in the study and the results on the data are summarized in Section 2 and Section 3 respectively.

II. DESCRIPTION OF THE METHOD

Vertical Total Electron Content (VTEC) is the sum of the free electrons estimated in the direction of the local zenith angle of the GPS receiver location. Let

$$\mathbf{x}_{u;d} = [x_{u;d}(1) \dots x_{u;d}(n) \dots x_{u;d}(N)]^T \quad (1)$$

represent the set of VTEC data of length N estimated for day of the d . Here, u indicates the receiver, n is the sample number ($1 \leq n \leq N$) and T is transpose of the operator.

In order to compare the behavior of TEC for the QDP period with those from the DDP, BE and AE periods, an average quiet day TEC estimate (AQDT) for each GPS station is obtained. From the overall amount of N_d days of u^{th} station, AQDT is defined as:

$$\mathbf{x}_{u;d_i-d_s} = \frac{1}{N_d} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{x}_{u;d_n} \quad (2)$$

where d_i is the initial day and d_s is the final day of QDP. To eliminate the seasonal and annual effects, the data vectors are normalized. For the day d , the experimental Probability Density Function (PDF), $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}$ of the $\mathbf{x}_{u;d_i-d_s}$ vector, can be approximated as follows:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s} = \mathbf{x}_{u;d_i-d_s} \left(\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u;d_i-d_s}(n) \right)^{-1} \quad (3)$$

where N_i is the initial sample and N_s is the final sample Using this approximation described in Equation 3, the Kullback-Leibler Divergence KLI is defined as:

$$\begin{aligned} \text{KLI}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \parallel \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}) &= \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}(n)} \right) \\ \text{KLI}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s} \parallel \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) &= \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n)} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

From the Equation 4, the symmetric Kullback-Leibler Distance KLD can be defined as follows [10,11-15]:

$$\text{KLD}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}) = \text{KLI}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \parallel \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}) + \text{KLI}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s} \parallel \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) \quad (5)$$

For the energy normalized TEC distribution, the L2-Norm can be given as [12]:

$$\text{L2N}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \parallel \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}) = \sqrt{\sum_{n=N_i}^{N_s} (\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n) - \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}(n))^2} \quad (6)$$

The cross correlation coefficients (CCF) are determined by an correlation function as:

$$r_{u;d,d_i-d_s} = \frac{1}{N_T \sigma_{u;d} \sigma_{u;d_i-d_s}} \sum_{n=N_i}^{N_s} (\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n) - \bar{\hat{\mathbf{P}}}_{u;d}) (\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}(n) - \bar{\hat{\mathbf{P}}}_{u;d_i-d_s}) \quad (7)$$

where $\bar{\hat{\mathbf{P}}}_{u;d}$ and $\bar{\hat{\mathbf{P}}}_{u;d_i-d_s}$ denote the average of $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$, $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}$ for day d and the period d_i-d_s , respectively N_T is the total number of TEC values, $\sigma_{u;d}$ and $\sigma_{u;d_i-d_s}$ are standard deviations of $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$ and $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}$ vectors. Sliding rectangular moving average (MAQDT) and standard deviation (STDQDT) of estimates of the normalized $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}$ can be given as [16]:

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(n) &= \frac{1}{N_w} \sum_{i=-\frac{N_w-1}{2}}^{\frac{N_w-1}{2}} \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}(n+i) \\ \hat{\sigma}^2(n) &= \frac{1}{N_w} \sum_{i=-\frac{N_w-1}{2}}^{\frac{N_w-1}{2}} \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}^2(n+i) - \hat{\mu}^2(n) \end{aligned} \quad (7)$$

where N_w is the sliding window size, which is chosen as an odd number. The normalized MAQDT $\hat{\mu}(n)$ is compared with the normalized TEC estimates for the QDP, DDP, BE and AE periods by using the bounds derived from the STDQDT $\hat{\sigma}^2(n)$.

For station u , the Kullback-Leibler Divergence $\text{KLI}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \parallel \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$ and $\text{KLI}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d+1} \parallel \hat{\mathbf{P}}_{u;d})$, the Kullback-Leibler

Distance $KLD(\hat{P}_{u;d} \setminus \setminus \hat{P}_{u;d+1})$ and $KLD\hat{P}_{u;d+1} \setminus \setminus \hat{P}_{u;d}$, L2-Norm $L2N(\hat{P}_{u;d+1} \setminus \setminus \hat{P}_{u;d})$ and Cross Correlation Coefficient $r_{u;d,d+1}$ functions are computed between the consecutive d and $d+1$ days in QDP, DDP, BE and AE periods. The results of KLI, KLD, L2N and CCF applications are presented in the next section.

III. RESULTS

In this study, five earthquakes between 2003–2008 that occurred in Japan with different seismic properties, and the China earthquake in May 2008 are investigated. This earthquakes are composed in Table I as date, time (Universal Time-UT), geographical location (latitude, longitude: in degrees), magnitude in Richter Scale (M), depth (z-km) and central station which is chosen as the nearest recording GPS station to the epicenter [17]. The epicenters which are coded as E1, E2, E3, E4, E5 and E6 represent Hokkaido, Honshu, Honshu, Kyushu, Honshu and Sichuan earthquakes, respectively.

TABLE I :Indicator of date, time, geographical location, magnitude and depth of the earthquakes.

	date	UT	°N	°E	M	z	central station ID
E1	25.09 2003	195 0	41	143	8.3	27	mizu
E2	05.09 2004	145 7	33	137	7.4	10	kgni
E3	13.06 2008	234 3	39	140	6.9	10	mizu
E4	11.06 2006	200 1	33	131	6.3	154	usud
E5	23.07 2005	073 4	35	139	5.9	65.6	mtka
E6	12.05 2008	062 8	30	103	7.9	19	kunm

There have been seven GPS stations that used in this study. These stations are given in Table II. The distance between IGS-GPS stations to the epicenter vary from 35 km to 1000 km.

Table II : GPS Stations that are used in the content of the study.

GPS Station	Station ID	Latitude	Longitude
Koganei, Japan	kgni	35.5 °N	139.4° E
Kashima, Japan	ksmv	35.7 °N	140.6° E
Mizusawa, Japan	mizu	38.9 °N	141.1° E
Mitaka, Japan	mtka	35.4 °N	139.5° E
Tsukuba, Japan	tskb	35.9 °N	140.0° E
Usuda, Japan	usud	35.9 °N	138.3° E
Yuzh.-Sakh, Russia	yssk	46.8 °N	142.7° E
Kunminimumg, China	kunm	24.8 °N	102.8° E

The TEC is estimated using the Reg-Est method as IONOLAB-TEC [18,19,20]. There are no significant disturbances in the AE and BE periods [21]. 14 October-02 November 2003 and 23 August-21 September 2005 periods are chosen as DDP. 14 October-03 November 2006 and 27 April-21 May 2006 periods are chosen as QDP [21].

In the first group of the study, in order to compare the behavior of IONOLAB-TEC for the QDP period with those from the DDP, BE and AE periods, an average quiet day TEC estimate (AQDT) for each GPS station is obtained by Equation 2. Equations 4, 5, 6 and 7 are applied AE, BE, QDP and DDP data of seven stations in Table II. It is observed that days of the DDP and AQDT are highly correlated. In the both of the AE and BE periods (EA) and QDP, the correlation coefficients vary between 0.2 and 0.7. The values of EA – AQDT and QD-AQDT are lowly correlated. Difference between minimum and maximum values of KLI, KLD and L2N (D) are larger when the distance of the station decreases and the magnitude of the earthquake increases. If the distance of the station is less far from 150 km, the KLD and the L2N methods select the EA days from the QDP. At the distance less from 150 km, D difference of the KLD, KLI and L2N of DDP-AQDT is greater although there are highly correlation coefficients. For the kunm, KLD, L2N and CCF variations of E6-AQDT, QDP-AQDT and DDP-AQDT are shown at the Figure 1a, 1b, 1c, respectively. For the mizu, KLD, L2N and CCF variations of E3-AQDT, QDP-AQDT and DDP-AQDT are shown in the Figure 1d, 1e, 1f, respectively. At the E6, which is the greater earthquake than the E3, it is shown that KLD and L2N values of EAP have greater scale than the E3 and KLD and L2N values of both E6 and E3 are greater than the QDP and the DDP.

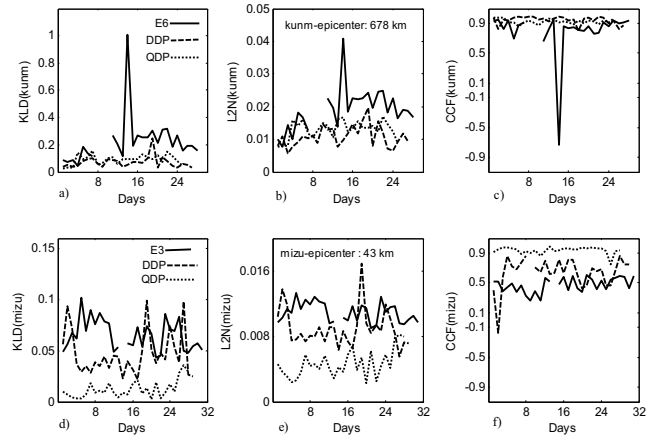


Figure 1. E6-AQDT, DDP-AQDT and QDP-AQDT of kunm for: a) KLD b) L2N c) CCF and E3-AQDT, DDP-AQDT and QDP-AQDT of mizu for: a) KLD b) L2N c) CCF.

Figure 2a, and 2b show KLD variations of station mizu for DDP 23 August-21 September 2005, and QDP 14 October-11 November 2006, respectively. It is observed that even on QDP, KLD variation has low ranged scattered distribution. Even on DDP, KLD variation is different from QDP but has smaller level than AE and BE.

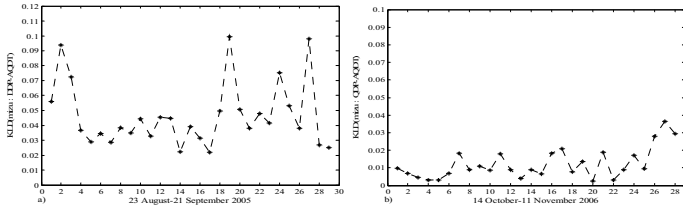


Figure 2. KLD variations of mizu a) DDP-AQDT b) QDP-AQDT.

In the second group of study, the Kullback-Leibler Divergence $KLI(\hat{P}_{u;d} \parallel \hat{P}_{u;d+1})$ and $KLI(\hat{P}_{u;d+1} \parallel \hat{P}_{u;d})$, the Kullback-Leibler Distance $KLD(\hat{P}_{u;d} \parallel \hat{P}_{u;d+1})$ and $KLD(\hat{P}_{u;d+1} \parallel \hat{P}_{u;d})$, L2-Norm $L2N(\hat{P}_{u;d+1} \parallel \hat{P}_{u;d})$ and Cross Correlation Coefficient $r_{u;d,d+1}$ functions are applied to the d and $d+1$ consecutive days of QDP, DDP, and BE and AE (EAP) periods for each earthquake given at the Table I and each GPS station given at the Table II. For the consecutive days, all of the CCF values of the QDP days vary between 0.8 and 1 and so consecutive QDP days are highly correlated. Consecutive EAP days become low correlated at the nearest stations to the epicenter. At the consecutive days, the values smaller than the 0.8 are %4 at E1, %17 at E2, %3 at E3, %1 at E5, %1 at E6, %5 at QDP and %6 at DDP. The effects of the EAP are observed better than DDP with CCF method for consecutive days. Difference between minimum and maximum values of KLI, KLD and L2N (D) are greater when the distance of the station decreases and the magnitude of the earthquake increases. D values of DDP are similar to the QDP, so KLI, KLD and L2N methods are less sensitive for the consecutive DDP days. Figure 3 shows the KLD and L2N variations of mizu and tskb for the E3. It is shown from Figure 3a and 3b that KLD values for mizu, which has 43 km distance to the epicenter and tskb which has 358 km distance to the epicenter, are very similar. It is also shown from Figure 3c and 3d, L2N values of both stations vary very similar level.

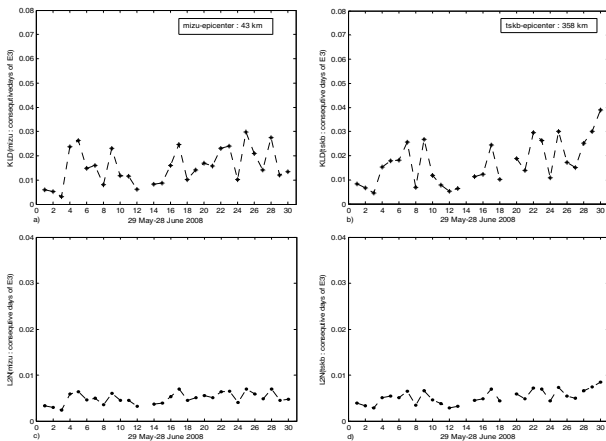


Figure 3. KLD variations of a) mizu b) tskb and L2N variations of c) mizu d) tskb .for consecutive days of E3.

For the tskb, KLD, L2N and CCF variations of E6, QDP and DDP are shown at the Figure 3a, 3b, 3c, respectively. For the mizu, KLD, L2N and CCF variations of E6, QDP and DDP

are shown at the Figure 3d, 3e, respectively. It is shown for mizu that there is no significant difference for the KLD and L2N values of E5, DDP and QDP periods. For the mizu, KLD and L2N values of both E1 and E3 and QDP periods vary very similar level. Both E1 and E3 are the large scaled earthquakes and distances of mizu to the E1 and E3 are 392 km and 43 km, respectively. There are no important difference on the KLD and L2N values of E1, E3 and QDP periods. For storm days in the DDP, KLD and L2N values are larger for mizu.

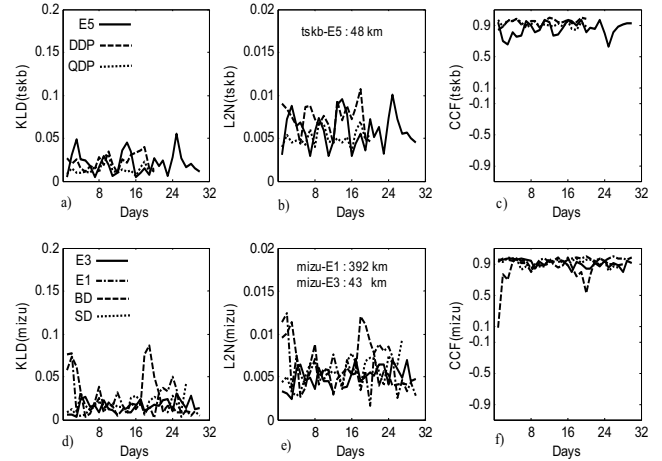


Figure 3. Variations of a) KLD b) L2N c) CCF for consecutive days of E5, DDP and QDP of tskb and variations of a) KLD b) L2N c) CCF for consecutive days of E1 E3, DDP and QDP of mizu.

Finally, in group four, the normalized MAQDT is compared with the normalized TEC estimates for QDP, DDP and EAP by using the bounds derived from SQDT in Equation 7 for each earthquake given at the Table I and each GPS station given at the Table II. It is observed that for the MAQDT comparisons and the EAP TEC estimates that are not bounded by STDQDT, especially for those stations that are closer to the epicenter. For the EAP, QDP and DDP of a station, TEC estimates can not be categorized by statistical differentiation because of abundance unbounded values in both of the EAP, DDP and QDP.

IV. CONCLUSION

In this study, the relation between earthquakes and the TEC obtained from GPS is examined. Five earthquakes between 2003-2008 occurred in Japan with different properties and China earthquake in May 2008 are chosen for the purpose. For the statistical analysis, the cross correlation function (CC) which is used in the literature before, and the Kullback-Leibler Divergence (KLD) with L2-Norm (L2N) methods which are used for the first time in this context, are applied to the data sets. It is observed that the CCF, KLD and L2N between the neighbouring GPS stations cannot be used as a definitive earthquake precursor due to the complicated nature of earthquakes and various uncontrolled parameters that effect the behaviour of TEC such as distance to the earthquake epicenter, distance between the stations, depth of the earthquake, strength of the earthquake and tectonic structure of the earthquake. The investigation of CCF, KLD and L2N for the consecutive days for each station indicates that when

similar disturbances occur for days in a row, these methods are inadequate in identifying the disturbance due to earthquakes. The most promising results are obtained for the analysis of Kullback-Leibler divergence between the AQDT and the TEC estimates for the BE. For this group of study, it is observed that the seismic activity before the strong earthquakes have a diurnal disturbance structure which can be distinguished from the ionospheric disturbances due to geomagnetic storms or solar flares. The increasing levels of KLD for preseismic activity is also a promising candidate for further investigation in this direction, especially for those GPS stations that are closer to the epicenter. Similar results are also observed for the MAQDT comparisons and the BE TEC estimates that are not bounded by STDQDT, especially for those stations that are closer to the epicenter. KLD, KLI and L2N are used for the first time in literature for the investigation of earthquake precursor for the first time in literature and the extensive study results indicate that for more reliable estimates further space-time TEC analysis is necessary over a denser GPS network in the earthquake zones.

ACKNOWLEDGMENT

This study is sported by TUBİTAK EEEAG Grant No: 105E171.

REFERENCES

- [1] Nayir, H., *Ionospheric total Electron Content Estimation Using GPS Signals (in Turkish)*, M. Sc. Thesis, Hacettepe University, Ankara, Turkey, 2007.
- [2] Ondoh, T., "Seismo-Ionospheric Phenomena", *Advances in Space Research*, 26(8): 1267-1272, 2000..
- [3] Pulinets, S.A., "Ionospheric precursors of earthquakes; recent advances in theory and practical applications", *TAO*, 15(3):413-435, 2004.
- [4] Pulinets, S.A., Gaivoronska, T.B., Contreras L.A. and Ciralo, I., "Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquake", *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 4:697-702, 2004.
- [5] Liu J.Y., Chen, Y.I., Pulinets S.A., Tsai Y.B. and Chuo Y.J., "Seismo-ionospheric signatures prior to M \geq 6.0 Taiwan earthquakes", *Geophysical Research. Letters*, 27(19): 3113-3116, 2000.
- [6] Liu, J.Y., Chuo Y.J., Shan, S.J., Tsai, Y.B., Chen, Y.I., Pulinets, S.A. and Yu, S.B., "Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements", *Annales Geophysicae*, 22(5): 1585-1593, 2004.
- [7] Liu, J.Y., Chuo Y.J., Shan, S.J., Tsai, Y.B., Chen, Y.I., Pulinets, S.A. and Yu, S.B., "Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements", *Annales Geophysicae*, 22(5): 1585-1593, 2004.
- [8] Chuo. Y.J., Chen, Y.I., Liu, J.Y. and Pulinets, S.A., "Ionospheric f_0F_2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area", *Advances in Space Research*, 27(6):1305-1310, 2001.
- [9] Plotkin, V.V., "GPS detection of ionospheric perturbations before the 13 February 2001 El Salvador earthquake", *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 3: 249-253, 2003.
- [10] Trigunait, A., Parrot, M., Pulinets, S.A. and Li, F., "Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event", *Annales Geophysicae*, 22(12): 4123-4131, 2004.
- [11] Fante, R.L., *Signal Analysis and Estimation*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.
- [12] Papoulis, A., *Signal Analysis*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1977.
- [13] Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.
- [14] Inglada, J., "Change detection on SAR images by using a parametric estimation of the Kullback-Leibler Divergence", *IGARSS*, 6(21-25): 4104-4106, 2003.
- [15] Cho, C., Kim, S., Lee, J. And Lee, DW, "A tandem clustering process for multimodal datasets", *European Journal of Operational Research*, 168(3): 998-1008, 2006.
- [16] Erol, C.B., Arkan, F., "Statistical characterization of the ionosphere using GPS signals", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 29(13): 373-387, 2005.
- [17] <http://earthquake.usgs.gov/regional/world>
- [18] Arikan, F., Erol, C.B., Arikan O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12): 1469-1480, 2003.
- [19] Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O. and Erol, C.B., "Total Electron Content Estimation with Reg-Est", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 112: A11313, 2007.
- [20] www.ionolab.org
- [21] http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices

COMPARISON OF IONOSPHERIC VARIATIONS IN SEISMIC AND QUIET DAYS BY CORS-TR IONOLAB-TEC ESTIMATES

Secil Karatay^{*}, Feza Arikan[†], Orhan Arikan[‡], Onur Lenk[°], Bahadır Aktug[°]
and Melih Sukru Aysezen[°]

^{*}Department of Physics
Firat University
23100, Elazig, Turkey

[†]Department of Electrical and Electronics Engineering
Hacettepe University
06800, Beytepe, Ankara, Turkey

[‡]Department of Electrical and Electronics Engineering
Bilkent University
06800, Bilkent, Ankara, Turkey

[°]General Command of Mapping
Cebeçi, Ankara, Turkey

Key words: GPS, Total Electron Content, Litosphere-Ionosphere Coupling.

Abstract. The variability of the ionosphere is important for radio communications and ionospheric studies. In this study, the variability of the ionosphere due to seismic activity is investigated by using Total Electron Content (TEC) estimates obtained from CORS-TR Global Positioning System (GPS) stations. Two earthquakes occurred on Northern Anatolian Fault in Turkey are chosen for the purpose. The TEC data set is investigated by using Cross Correlation Coefficient (CC), symmetric Kullback-Leibler Distance (KLD) and L2-Norm for seismically active days and geomagnetically quiet days. It is observed that CC values of quiet days are highly correlated for quiet days. CC values of earthquake days decrease down to 0.2 in earthquake days. KLD values of earthquake days are 10 times greater than those of the quiet days. In order to form a proper earthquake precursor alarm signal, more earthquakes with different properties have to be investigated in the future.

1 INTRODUCTION

Increased observations of the ionosphere in the literature show that there are several disturbances and variations in some parameters of the ionosphere before the strong earthquakes, especially in TEC and critical frequency of the ionosphere[1-8]. There have been

some theories that try to explain the ionospheric anomalies associated with pre-seismic activity and their effects in the ionosphere and some statistical tools have been used to explain their causes by using some parameters like TEC and critical frequency of F2-Layer. TEC is defined as the total number of electrons on a line crossing the atmosphere. The unit of TEC is given in TECU where $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{el/m}^2$. Global Positioning System (GPS), with the network of the world-wide receivers, provides cost effective solutions in estimating TEC and also, in monitoring the variability of the ionosphere [9,10].

In statistics and information theory, Kullback-Leibler Divergence is a widely used measure of distance between two probability density distributions [6,7,8,11,12]. Similarly, L2-Norm is used to define the metric distance between two vectors [6,7,8,13]. In this study, the variability of GPS-TEC is investigated over two different time period data set using Cross Correlation Coefficient (CC), symmetric Kullback-Leibler Distance (KLD) and L2-Norm (L2N). These three statistical tools are used before in five earthquakes in Japan that occurred over magnitude 5.9 in Richter scale and Sichuan China earthquake with magnitude 7.9 [6-8]. In these studies, the distances of the GPS stations to the epicenters varied from 30 km to 2000 km. In Sichuan, China earthquake, only one GPS station was available. So, the TEC difference between the stations can not be investigated. In this study, two earthquakes with same seismic properties that occurred on Northern Anatolian Fault in Turkey are chosen for the purpose. It will be the first time in the literature that the magnitudes smaller than 5.9 will be investigated for possible pre-seismic activity in ionosphere. The GPS-TEC estimates are obtained as IONOLAB-TEC [9,10,17] using CORS-TR GPS stations that are placed over Turkey by General Command of Mapping. The distances between these GPS stations vary from 80 km to 100 km. Thus, it is possible to study many GPS stations that are close to epicenters for investigating any earthquake occurred in the different seismic zones of Turkey.

2 THE STATISTICAL ANALYSIS TOOLS

For this study, chosen statistical tools, CC, KLD and L2N, are applied on three different groups. In the first group, CC, KLD and L2N are applied between TEC values of neighboring GPS stations. In the second group, an Average Quiet Day TEC (AQDT) estimate is obtained for each GPS station and TEC values of seismic and quiet days are compared with this AQDT using CC, KLD and L2N. In the third group, TEC values for consecutive seismic and quiet days of each GPS station are compared with each other. These techniques are discussed in detail in [6-8]. Application of these statistical tools are given in Section 3.

3 APPLICATION OF STATISTICAL ANALYSIS TOOLS TO CORS-TR NETWORK

Two time intervals are chosen for the investigation. Firstly, the earthquake day periods are chosen as the time period from 10 days prior and after the earthquake day. Secondly, the quiet days are chosen such that there are no significant geomagnetic and solar activities in the region of the interest according to the information provided from Dst, Kp and Ap indices. There are no significant geomagnetic disturbances during the earthquake days periods. For this study, 30 July 2009 Erzincan (E1) [14] (M=5 Richter scale, depth=5 km, $Lat = 39.6^{\circ}N$, $Lon = 40.3^{\circ}E$, UT=1037) and 08 August 2009 anakkale (E2) [15] (M=4.2 Richter scale, depth=10 km, $Lat = 40.3^{\circ}N$, $Lon = 27.2^{\circ}E$, UT=0452) earthquakes are chosen. These earthquakes both occurred on Northern Anatolian Fault. The quiet days are chosen from 1 October to 15 October 2009. The second quiet days period for AQDT is chosen from 1 June to 20 June 2009 [16]. The raw data for corresponding GPS stations in the region of the interest are estimated by using data of CORS-TR network [9,10,17].

In the first group of the study, CC, KLD and L2N are applied between TEC values of stations bayb ($40.25^{\circ}N$, $40.19^{\circ}E$), bing ($39.08^{\circ}N$, $40.83^{\circ}E$), erzi ($39.74^{\circ}N$, $39.50^{\circ}E$) and rhiy ($39.90^{\circ}N$, $38.77^{\circ}E$) in E1 and ayvl ($39.31^{\circ}N$, $26.88^{\circ}E$), band ($40.33^{\circ}N$, $27.99^{\circ}E$), cana ($40.11^{\circ}N$, $24.41^{\circ}E$), tekr ($40.95^{\circ}N$, $27.49^{\circ}E$) and yenc ($39.93^{\circ}N$, $27.24^{\circ}E$) in E2. It is observed that CC values in quiet days are highly correlated and vary close to +1. CC values in earthquake days decrease down to +0.5. KLD values between the stations in earthquake days are 10 times greater than those from quiet days values. L2N values between the stations vary from 0 to 0.005 in both earthquake and quiet days. L2N is not an indicator in the first group of the analysis. A similar result is demonstrated in Figure 1. It is observed from figure that CC values of earthquake days (Figure 1a) have small correlation coefficients. KLD values of earthquake days (Figure 1b) are 10 times greater than quiet days (Figure 1e). The earthquake day is represented by the arrow in Figure 1.

In the second group, TEC estimates of each station for earthquake and quiet days are compared with an AQDT using CC, KLD and L2N. It is observed that CC values for both earthquake and quiet days vary between 0.8 and 1. KLD and L2N values for earthquake days are greater than quiet days. KLD and L2N values increase significantly in some of days before the earthquake day. An example to this observation is provided in Figure 2 for E1 and station rhiy. CC values are similar with each other in E1 and quiet days as shown in Figure 2a and 2b, respectively. KLD values increase significantly 2 and 6 days before the earthquake as shown in Figure 2b. Same increases are also shown in L2N values in Figure 2c. The earthquake day is represented by the arrow in Figure 2.

In the third group, the daily VTEC data of each station is compared with those of consecutive day for all earthquake and quiet days. It is observed that CC values vary

close to +1 in quiet days. CC values in earthquake decrease down to 0.2. KLD values in consecutive earthquake days are 10 times greater than consecutive quiet days. Similarly, L2N values in consecutive earthquake days are 2 times greater than consecutive quiet days. A similar result is demonstrated in Figure 3 for E1 and nearest station to epicenter erzi. From Figure 3, it is observed that CC values in E1 (Figure 3a) are low correlated. KLD and L2N values in E1 (Figure 3b and 3c) are significantly greater than those of values in consecutive quiet days (Figure 3e and 3f).

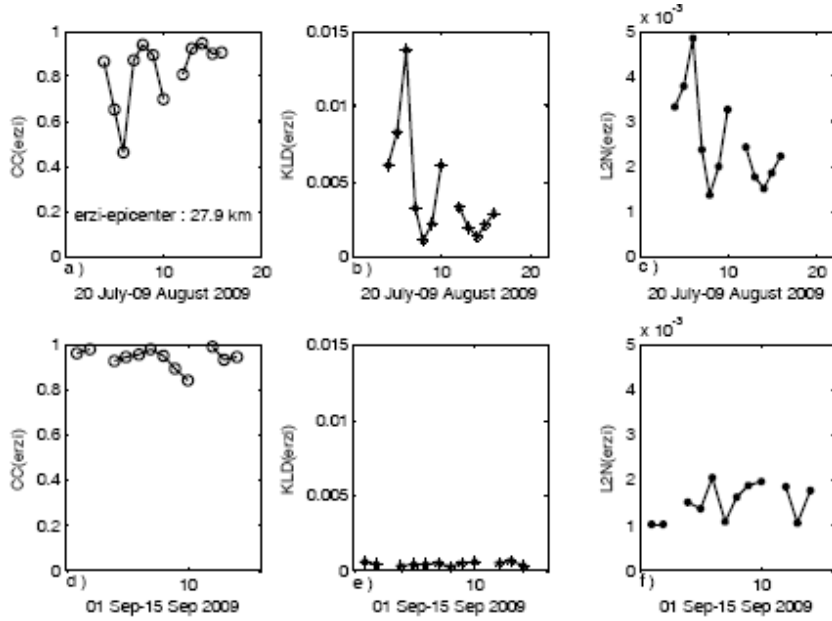


Figure 1: The values of a) CC, b) KLD and c) L2N in E2; d) CC, e) KLD and f) L2N in quiet days between stations ayvl and yenc.

4 CONCLUSIONS

In this study, a disturbance in the ionosphere due to seismic activity is investigated by using TEC estimates obtained from CORS-TR GPS stations. For the purpose, Cross Correlation Coefficient, Kullback-Leibler and L2-Norm methods are used. These statistical tools are applied on three major of group. Two earthquake with same seismic and geophysical properties occurred on Northern Anatolian Fault are chosen. It is observed that CC method between the neighboring stations can differentiate the earthquake days form quiet days as different from the previous studies [8,9,10]. KLD and L2N have similar results in the previous studies. In this study, KLD are better indicator of approaching seismic disturbance compared to L2N. In order to form a proper earthquake precursor alarm signal, more earthquakes with different properties have to be investigated in the future.

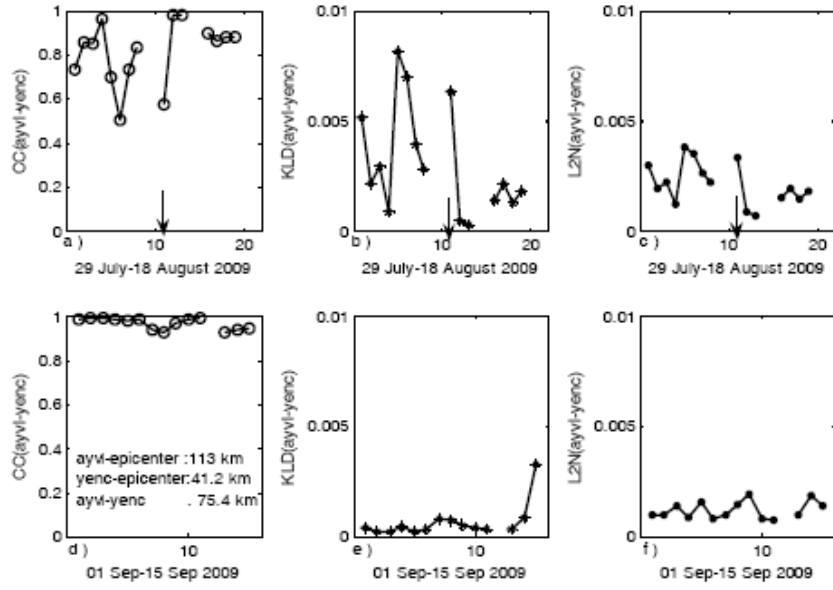


Figure 2: For rhiy, values of a) CC, b) KLD and c) L2N between days of E1 and AQDT; d) CC, e) KLD and f) L2N between quiet days and AQDT.

ACKNOWLEDGMENT

This study is sported by TUBITAK EEEAG Grant No: 109E055.

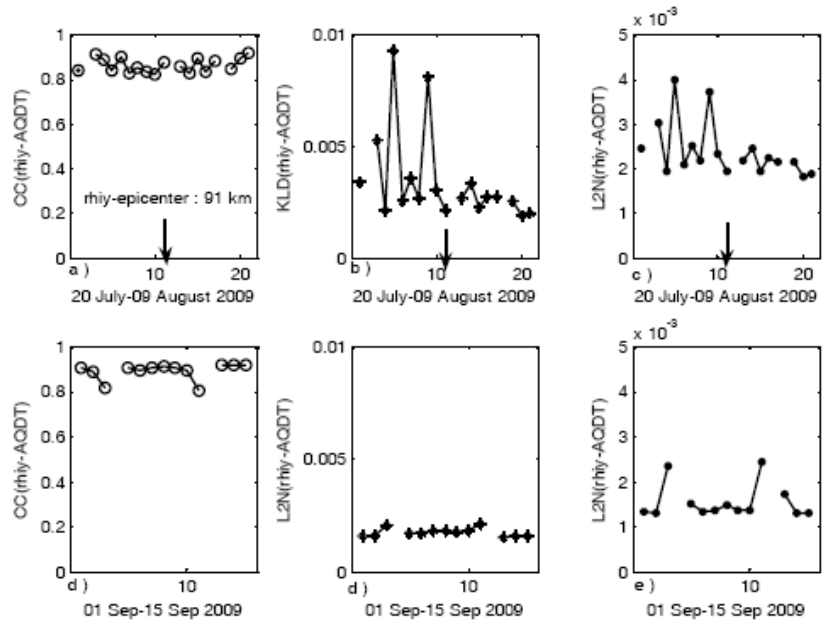


Figure 3: For erzi, values of a) CC, b) KLD and c) L2N in consecutive E1 days; d) CC, e) KLD and f) L2N in consecutive quiet days.

REFERENCES

- [1] Ondoh, T., Seismo-ionospheric phenomena, *Advances in Space Research*, 26(8), 1267-1272, (2000).
- [2] Pulnests, S.A., Ionospheric precursors of earthquakes; recent advances in theory and practical applications, *TAO*, 15(3), 413-435, (2004).
- [3] Liu J.Y., Chen, Y.I., Pulnests S.A., Tsai Y.B. and Chuo Y.J., Seismo-ionospheric signatures prior to M6.0 Taiwan earthquakes, *Geophysical Research. Letters*, 27(19), 3113-3116, (2000).
- [4] Chuo. Y.J., Chen, Y.I., Liu, J.Y. and Pulnests, S.A., Ionospheric f0F2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area, *Advances in Space Research*, 27(6),1305-1310, (2001).
- [5] Trigunait, A., Parrot, M., Pulnests, S.A.and Li, F., Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event, *Annales Geophysicae*, 22(12), 4123-4131, (2004).
- [6] Karatay, S., Arikan, F. and Arikan, O., Investigation of Litosphere-Ionosphere coupling using Total Electron Content, *Proceeding of SIU-2009, Antalya, Turkey, 9-11 April (2009)*.
- [7] Arikan, F., Karatay, S. and Arikan, O., Investigation of ionospheric disturbance due to strong earthquakes using total electron content, *Proceedings of EGU-2009, Vienna, Austria, 19-24 April (2009)*.
- [8] Karatay, S., Arikan, F. And Arikan, O., Investigation of hourly and daily patterns for Litosphere- Ionosphere coupling before strong earthquakes, *Proceedings of RAST-2009, stanbul, Turkey, 11-13 June (2009)*.
- [9] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12), 1469-1480, (2003).
- [10] Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O. and Erol, C.B., Total electron content estimation with Reg-Est, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 122, A11313, (2007).
- [11] Cover, T.M. and Thomas, A.J., *Elements of Information Theory*, Wiley Interscience Publishers, New York, (2006).
- [12] Hall, P., "On Kullback-Leibler loss and estimation", *The Annals of Statistics*, 15(4), 1491-1519, (1987).

- [13] Kreyszig, E., Advanced Engineering Mathematics, John Wiley & Sons Inc. Publishers, New York, (1988).
- [14] www.koeri.boun.edu.tr
- [15] www.earthquake.usgs.gov
- [16] www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices
- [17] www.ionolab.org

IONOLAB GROUP ACTIVITIES USING CORS-TR GPS NETWORK

**Feza Arikan^{*}, Orhan Arikan[°], Umut Sezen^{*}, Cenk Toker^{*}, Onur Lenk[†], Ali Kilicoglu[†],
Bahadir Aktug[†], Melih Sukru Aysezen[†], Isiltan Sayin^{*} and Ozan Koroglu[′]**

^{*} Department of Electrical and Electronics Engineering Hacettepe University
06800, Beytepe, Ankara, Turkey

e-mail: arikan@hacettepe.edu.tr, U.Sezen; cenk.toker; isiltan@ee.hacettepe.edu.tr

[°] Department of Electrical and Electronics Engineering Bilkent University
06800, Bilkent, Ankara, Turkey

e-mail: oarikan@ee.bilkent.edu.tr

[†] General Command of Mapping Cebeci
Ankara, Turkey

e-mail: onur.lenk; ali.kilicoglu; bahadir.aktug; melihsukru.aysezen@hgk.mil.tr

[′] Roketsan Inc.

Ankara, Turkey

e-mail: koroglu.ozan@gmail.com

Key words: GPS, Total Electron Content, Computerized Ionospheric Tomography, Ionospheric Mapping

Summary: Monitoring of the ionospheric variability is necessary for improving the performance of communication, navigation and positioning systems. In this study, we introduce the activities of the IONOLAB group in statistical modelling and characterization of the ionosphere over Turkey using the new CORS-TR GPS network.

1 INTRODUCTION

IONOLAB group is formed by researchers from various disciplines gathered together to handle the challenges of the ionosphere using state-of-the-art signal processing techniques over a GPS network. The group currently has researchers from Hacettepe University, Bilkent University and General Command of Mapping of Turkish Army. Constantly Operating Reference Station-Turkey (CORS-TR) Network is a recently installed system of 147 GPS stations homogeneously distributed over Turkey and North Cyprus Turkish Republic as shown in Figure 1. The CORS-TR network is in operation since May 2009 and it provides a wide variety of possibilities for active research not only in geodetics but also in areas from geology to tropospheric and ionospheric characterization. Ionosphere is the main source of

error for navigation and positioning systems and it can also cause major disturbance for satellite communication. Therefore, characterization and constant monitoring of variability of the ionosphere is of utmost importance for the performance improvement of these aforementioned systems. IONOLAB group has been active in estimation of Total Electron Content (TEC) using single station GPS recordings in IGS network, regional spatial interpolation (mapping) of TEC, global Computerized Ionospheric Tomography (CIT), statistical analysis of TEC, and investigation of lithosphere- ionosphere coupling through seismic activity¹⁻¹⁵. The techniques that have been developed for various purposes are applied to randomly distributed GPS stations in IGS network. With the new CORS-TR, it is observed that there are various prospective areas in processing GPS recordings for higher accuracy and reliability in characterization of the regional ionosphere. In this study, we will introduce these possible sectors for performance improvement in monitoring the regional ionosphere and possible impacts on navigation, positioning and communication systems.

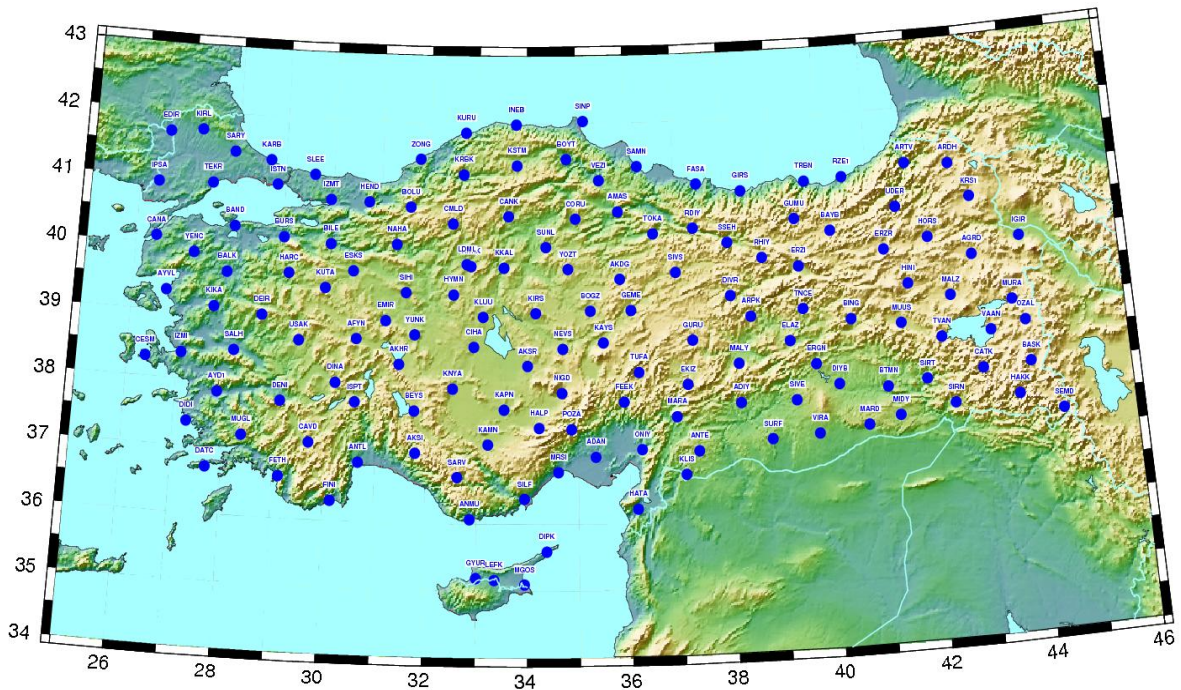


Figure 1: 147 GPS stations in CORS-TR Network.

2 ESTIMATION OF TEC THROUGH 4-D REGIONAL COMPUTERIZED IONOSPHERIC TOMOGRAPHY (CIT)

Ionosphere is a temporally and spatially varying, dispersive, anisotropic and inhomogeneous medium that is characterized primarily by its electron density distribution. Electron density is a complex function of spatial and temporal variations of solar, geomagnetic, and seismic activities. Unfortunately, a complete physical model of this important quantity is not available universally. Ionospheric electron density distribution can not be obtained by direct measurements either. Due to these inconveniences, an important derivable quantity about the electron density, the Total Electron Content (TEC) is used widely in attempts to characterize the ionosphere. TEC is proportional to the total number of electrons on a line crossing the atmosphere. TEC can be computed using the measurements and recordings of the vertical ionosondes both bottom-side and top-side, Faraday Rotation of satellite signals such as GLONASS and EISCAT, TOPEX/POSEIDON and JASON satellites with double frequency altimeters, GPS phase and delay recordings and incoherent backscatter radar signals. In recent years, Global Positioning System (GPS) dual frequency signals are widely used to estimate both regional and global TEC values over a significant proportion of global land mass. IONOLAB group has developed an important tool in estimation of TEC with a single GPS station, IONOLAB-TEC^{1,2,4,7,11,15}. IONOLAB-TEC provides reliable and robust estimates for all latitudes and both calm and disturbed days by using RINEX, IONEX and satellite ephemeris data provided from the IGS centers. IONOLAB-TEC consists of a regularized signal estimation algorithm which combines signals from all GPS satellites for a given instant and a given receiver, for a desired time period or for 24 hours, with 30 s time resolution. IONOLAB-TEC values also include the receiver differential code bias (DCB) for each GPS station estimated uniquely by the IONOLAB-BIAS algorithm. The web based computation program is written in JAVA and it is provided both in Turkish and English at www.ionolab.org. The estimated IONOLAB-TEC values are used in a novel Singular Value Decomposition (SVD) based CIT reconstruction technique for the imaging of electron density in both space (latitude, longitude, altitude) and time^{5,6,10}. The underlying model is obtained from International Reference Ionosphere (IRI). Based on the IRI-2007 model, a basis is formed by SVD for the required location and the time of interest.

Selecting the first few basis vectors corresponding to the most significant singular values, the 3-D CIT is formulated as a weighted least squares estimation problem of the basis coefficients. By providing significant regularization to the tomographic inversion problem with limited projections, the proposed technique provides robust and reliable 3-D reconstructions of global ionospheric electron density.

The CORS-TR opens up new possibilities in estimation of TEC and CIT with its homogeneously distributed, dense GPS Reference Station network. Turkey extends between 26°-45°E and 36°-42°N. It has a midlatitude, respectively quiet ionosphere. A parametric (empirical) electron density model can be tried in a linearized tomographic inversion algorithm where GPS recordings can be directly used in the measurement model. IONOLAB group is investigating possibilities in the choice of the parametric electron density model and devising a novel GPS measurement model. The estimated electron density over Turkish ionosphere will be integrated in the local zenith directions for computation of TEC.

3 INTERPOLATION OF TEC SAMPLES WITH ANISOTROPIC KRIGING: TEC MAPPING

IONOLAB group employed Multiquadrics, Inverse Distance Weighting (IDW), Cubic Splines, Ordinary and Universal Kriging, Random Field Priors (RFP), Multi-Layer Perceptron Neural Network (MLP-NN), and Radial Basis Function Neural Network (RBF-NN) as the spatial interpolation algorithms for TEC Mapping^{8,9,12}. These mapping techniques are initially tried on synthetic TEC surfaces for parameter and coefficient optimization and determination of error bounds. Interpolation performance of these methods are compared on synthetic TEC surfaces over the parameters of sampling pattern, number of samples, the variability of the surface and the trend type in the TEC surfaces. By examining the performance of the interpolation methods, it is observed that both Kriging, RFP and NN have important advantages and possible disadvantages depending on the given constraints. It is also observed that the determining parameter in the error performance is the trend in the Ionosphere. Optimization of the algorithms in terms of their performance parameters (like the choice of the semivariogram function for Kriging algorithms and the hidden layer and neuron numbers for MLP-NN) mostly depend on the behavior of the ionosphere at that given time instant for the desired region. The sampling pattern and number of samples are the other important parameters that may contribute to the higher errors in reconstruction. The east-west extend of Turkey indicates a major anisotropy in TEC distribution during sunrise and sunset hours. A north-south anisotropy is also observed for hours with full sun exposure and during night hours. IONOLAB group is currently investigating a novel method in introducing anisotropy into Ordinary Kriging for TEC mapping and an accurate temporal model for the semivariogram function for CORS-TR Network. TEC maps will be generated automatically according to a specialized, optimum temporal update period (TUP). This way, the ionospheric variability will be monitored and characterized accurately with low computational complexity and data storage. A random space-time model of ionosphere over Turkey can be developed using the TEC maps with optimum TUP.

4 CONCLUSION

Monitoring of ionosphere with a dense, homogeneous GPS network provides important possibilities in characterization and modeling of electron density and TEC. In this study, activities of IONOLAB group are introduced for CIT, TEC Mapping and development of a random space-time model using the new CORS-TR GPS network.

ACKNOWLEDGMENT

This study is sported by TUBITAK EEEAG Grant No: 109E055.

REFERENCES

- [1] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., “Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data”, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12), 1469-1480, (2003).
- [2] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., “Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period”, *Radio Science*, 39(6), RS6012, (2004).
- [3] Erol, C.B. and Arikan, F., “Statistical analysis of the ionosphere using GPS signals”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 19(3), 373-387, (2005).
- [4] Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O. and Erol, C.B., “Total electron content estimation with Reg-Est”, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 122, A11313, (2007).
- [5] Arikan, O., Arikan, F., and Erol, C.B., “Computerized ionospheric tomography with the IRI model”, *Advances in Space Research*, 39, 859-866, (2007).
- [6] Arikan, O., Arikan, F., and Erol, C.B., “3-D Ionospheric Tomography with Random Field Priors”, in *Mathematical Methods in Engineering*, K. Tas, J.A. Tenreiro Machado and D. Baleanu (Eds), Springer, Netherlands, 335-334, (2007).
- [7] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., Arikan, O., “Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC”, *Radio Science*, 43, RS4004, 1-13, (2008).
- [8] Sayin, I, Arikan, F., and Arikan, O., “Regional TEC mapping with Random Field Priors and Kriging”, *Radio Science*, 43, (2008).
- [9] Yilmaz, A., Akdogan, K.E., and Gurun, M., “Regional TEC Mapping Using Neural Networks”, *Radio Science*, 44, RS3007, (2009).
- [10] Erturk, O., Arikan, O., and Arikan, F., “Tomographic reconstruction of the ionospheric electron density as a function of space and time”, *Advances in Space Research*, 43, 1702-1710, (2009).
- [11] Arikan, F., Sezen, U., Arikan, O., Ugurlu, O., and Nayir, H., “Space weather activities of IONOLAB group; IONOLAB-TEC”, *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-5188, *EGU-General Assembly*, Vienna, Austria, 19- 24 April (2009).

- [12] Arikan, F., Yilmaz, A., Arikan, O., Sayin, I, Gurun, M., Akdogan, K.E., and Yildirim, S.A., “Space weather activities of IONOLAB group; TEC mapping”, *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-6962, *EGU-General Assembly*, Vienna, Austria, 19-24 April (2009).
- [13] Arikan, F., Karatay, S. and Arikan, O., “Investigation of ionospheric disturbance due to strong earthquakes using total electron content”, *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-8440, *EGU-General Assembly*, Vienna, Austria, 19-24 April (2009).
- [14] Karatay, S., Arikan, F. And Arikan, O., “Investigation of hourly and daily patterns for Lithosphere- Ionosphere coupling before strong earthquakes”, *Proceedings of RAST-2009*, Istanbul, Turkey, 11-13 June (2009).
- [15] www.ionolab.org

COMPARISON of IONOSPHERIC VARIATIONS in SEISMIC, GEOMAGNETICALLY DISTURBED and QUIET DAYS by IONOLAB –TEC ESTIMATES

Secil KARATAY (1), Feza ARIKAN (1) and Orhan ARIKAN (2)

(1) Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey, arikan@hacettepe.edu.tr.

(2) Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey, oarikan@ee.bilkent.edu.tr.

Earth's ionosphere is a dominant factor in space weather and the variability of the ionosphere is important for the ionospheric physics and radio communications. The characterizing property of the ionosphere is the electron density distribution that shows variation as a function of height, latitude, longitude, and geomagnetic, solar and seismic activity. An important measurable quantity about the electron density is the Total Electron Content (TEC) which is proportional to the total number of electrons on a line crossing the atmosphere. TEC measurements enable monitoring variations in the space weather. Global Positioning System (GPS) and the network of world-wide receivers provide a cost-effective solution in estimating TEC over a significant proportion of global land mass. In this study, TEC obtained for eight GPS stations located in Japan and China and eleven TUSAGA-Active GPS stations located in Turkey are compared with each other using the Cross Correlation Coefficient (CC), symmetric Kullback-Leibler Distance (KLD), L2-Norm (L2N) and sliding window statistical analysis for quiet days of the ionosphere, during severe geomagnetic storms, and strong earthquakes. It is observed that only KLD and L2N can differentiate the seismic activity from the geomagnetic disturbance and quiet ionosphere if the stations are in a radius of 340 km. When TEC for each station is compared with an average quiet day TEC for all periods using CC, KLD and L2N, it is observed that, again, only KLD and L2N can distinguish the approaching seismicity for stations that are within 150 km radius to the epicenter. When the TEC of consecutive days for each station and for all periods are compared, it is observed that CC, KLD and L2N are all successful in distinguishing the geomagnetic disturbances. Using sliding window statistical analysis, moving averages of daily TEC with estimated variance bounds are also obtained for all stations and for all days of interest. When these bounds compared with each other for all periods, it is observed that all CC, KLD and L2N are successful tools for detecting ionospheric disturbances.

Keywords: Ionosphere, Total Electron Content, Earthquake, Geomagnetic Disturbance, Kullback-Leibler Distance, L2-Norm, Global Positioning System.

This study is supported by grant TUBITAK EEEAG 109E055.

SPACE WEATHER ACTIVITIES OF IONOLAB GROUP USING TNPGN GPS NETWORK

Bahadır AKTUĞ
Onur LENK
Mustafa KURT
Erdem PARMAKSIZ
Soner OZDEMIR
Department of Geodesy
General Command of Mapping
06100 Cebeci, Ankara, Turkey
bahadir.aktug@hgk.msb.gov.tr

Feza ARIKAN
Umut SEZEN
Cenk TOKER
Department of Electrical and Electronics Engineering
Hacettepe University
06800, Beytepe, Ankara, Turkey
arikan@hacettepe.edu.tr

Orhan ARIKAN
Department of Electrical and Electronics Engineering
Bilkent University
06800, Bilkent, Ankara, Turkey
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Abstract— Characterization and constant monitoring of variability of the ionosphere is of utmost importance for the performance improvement of HF communication, Satellite communication, navigation and guidance systems, Low Earth Orbit (LEO) satellite systems, Space Craft exit and entry into the atmosphere and space weather. Turkish National Permanent GPS Network (TNPGN) is the Reference Station Network of 146 continuously-operating GNSS stations of which are distributed uniformly across Turkey and North Cyprus Turkish Republic since May 2009. IONOLAB group is currently investigating new techniques for space-time interpolation, and automatic mapping of TEC through a TUBITAK research grant. It is utmost importance to develop regional stochastic models for correction of ionospheric delay in geodetic systems and also form a scientific basis for communication link characterization. This study is a brief summary of the efforts of IONOLAB group in monitoring of space weather, and correction of geodetic positioning errors due to ionosphere using TNPGN.

Keywords-GPS, Ionosphere, Space Weather, Monitoring of Ionospheric Variability, TEC, TEC Mapping

I. INTRODUCTION

Space Weather (SW) is the concept of changing environmental conditions in outer space and its effects on Earth and technological systems. SW is a consequence of the solar activities and the coupling of solar energy on Earth's atmosphere due to the Earth's magnetic field. The monitoring and prediction of SW has utmost importance for HF communication, Satellite communication, navigation and guidance systems, Low Earth Orbit (LEO) satellite systems, Space Craft exit and entry into the atmosphere. Ionosphere is the plasma layer of the atmosphere that is ionized by solar radiation and it is a key player of SW. Ionosphere is a

temporally and spatially varying, dispersive, anisotropic and inhomogeneous medium that is characterized primarily by its electron density distribution. IONOLAB is a group of researchers of various disciplines, getting together to handle challenges of the Earth's ionosphere. The team has researchers from Hacettepe University and Bilkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering and General Command of Mapping of Turkish Army. Turkish National Permanent GPS Network (TNPGN) is the Reference Station Network of 146 continuously-operating GNSS stations of which are distributed uniformly across Turkey and North Cyprus Turkish Republic since May 2009 (Figure 1). TNPGN provides a wide variety of possibilities for active research not only in geodetics but also in areas from geology to tropospheric and ionospheric characterization.



Figure 1: 146 GPS stations in TNPGN Network.

Ionosphere is the main source of error for navigation and positioning systems and it can also cause major disturbance for satellite communication. Therefore, characterization and constant monitoring of variability of the ionosphere is of utmost importance for the performance improvement of these aforementioned systems and space weather. IONOLAB group has been active in estimation of Total Electron Content (TEC) using single station GPS recordings in IGS network, regional spatial interpolation (mapping) of TEC, global Computerized Ionospheric Tomography (CIT), statistical analysis of TEC, and investigation of lithosphere-ionosphere coupling through seismic activity. The techniques that have been developed for various purposes can be applied to any GPS station in IGS or EUREF network. With the new TNPGN, it is observed that there are various prospective areas in processing GPS recordings for higher accuracy and reliability in characterization of the regional ionosphere. The first one of these areas is an efficient and effective signal processing algorithm for computation of TEC using 146 GPS stations operating in a network. This goal will be achieved by modification of the physical International Reference Ionosphere model extending to Plasmasphere (IRI-Plas) with the IONOLAB-TEC estimates. A new parametric tomographic reconstruction technique working on the modified IRI-Plas will provide an updated regional ionosphere model. The second task is the monitoring of the TEC using optimized and automatic spatial interpolation, i.e. mapping. IONOLAB group is currently investigating a novel method in introducing anisotropy into Ordinary Kriging for TEC mapping and an accurate temporal model for the semivariogram function for TNPGN Network. In the following section, a selection of the new results and investigations by IONOLAB group on TEC computation, TEC mapping and statistical analysis of TEC are presented.

II. REGIONAL SPACE-TIME PARAMETRIC MODELING OF IONOSPHERE

One of the main observable parameters of ionosphere is Total Electron Content (TEC) and it is defined as the number of free electrons in a column of 1 m^2 base joining the ground GPS reference station and the GPS satellite. The unit of TEC is TECU corresponding to 10^{16} electrons/ m^2 . IONOLAB group has developed an important tool in estimation of TEC with a single GPS station, IONOLAB-TEC [1-4]. IONOLAB-TEC provides reliable and robust estimates for all latitudes and both calm and disturbed days by using RINEX, IONEX and satellite ephemeris data provided from the IGS centers. IONOLAB-TEC consists of a regularized signal estimation algorithm which combines signals from all GPS satellites for a given instant and a given receiver, for a desired time period or for 24 hours, with 30 s time resolution. IONOLAB-TEC values also include the receiver differential code bias (DCB) for each GPS station estimated uniquely by the IONOLAB-BIAS algorithm. The web based computation program is written in JAVA and it is provided both in Turkish and English at www.ionolab.org. An example of IONOLAB-TEC for three IGS stations ista (Istanbul), tubi (Tubitak, Gebze, Kocaeli), and ankr (Ankara) is presented in Figure 2 for August 30, 2009. That is the most positively disturbed day in August where K_p and Dst indices

for that day indicate that there is a sudden commencement of a geomagnetic storm.

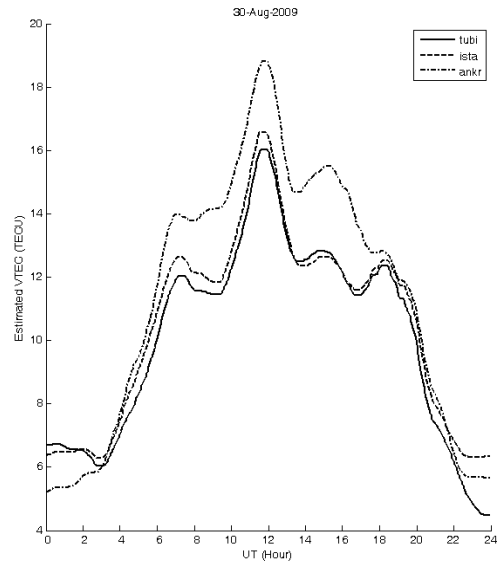


Figure 2: IONOLAB-TEC for August 30, 2009 for ankr (dashdot), ista (dashed) and tubi (solid) IGS stations.

The experimental hourly probability density functions (pdf) for some GPS reference station sites are investigated according to the method presented in [5] between 2001 and 2008, and it is been observed that yearly pdf distributions are Weibull distributed for hours that correspond to sunrise and sunset. Other hours are Lognormally distributed. As for years with low solar activity, all hours tend to be Lognormally distributed. In Figure 3, the Lognormal pdf first and second parameters are presented for years 2001 to 2008 with respect to Local Time (LT, UT+2h) for ankr station.

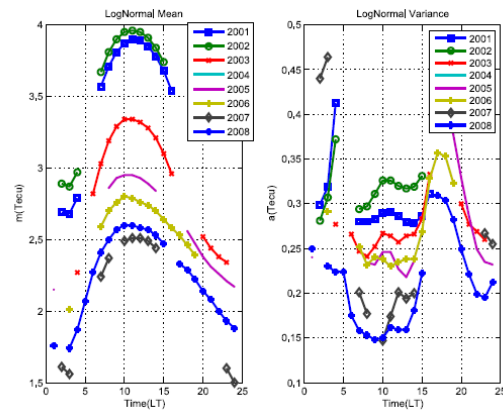


Figure 3: Lognormal pdf first and second parameters for ankr.

The hourly pdf values are obtained in a similar manner for 146 TNPGN stations for years 2009 and 2010. These pdf distributions will be used in space time stochastic modeling of ionosphere over Turkey.

The east-west extend of Turkey indicates a major anisotropy in TEC distribution during sunrise and sunset hours. A north-south anisotropy is also observed for hours with full sun exposure and during night hours. IONOLAB group is currently investigating a novel method in introducing anisotropicity into Ordinary Kriging for TEC mapping and an accurate temporal model for the semivariogram function for TNPNG Network. The IONOLAB-TEC from 146 stations can be spatially interpolated using Ordinary Kriging and Universal Kriging. Optimum theoretical semivariogram functions can be obtained by investigating synthetic TEC maps generated for this purpose. In Figure 4, an example synthetic surface having a linear trend with additive small scale variability and TNPNG sampling is presented.

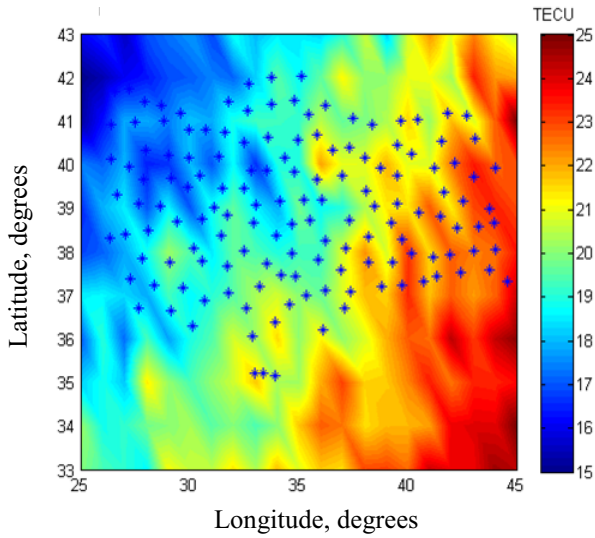
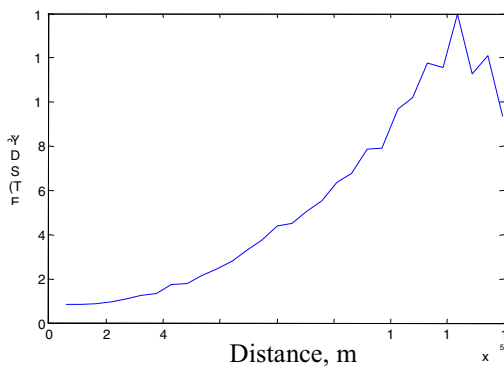
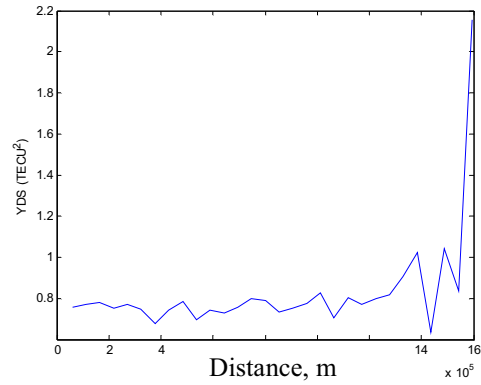


Figure 4: Synthetic TEC surface, linear trend with small scale variabilities using TNPNG sampling.

Experimental semivariogram functions for Ordinary Kriging and Universal Kriging with Linear Trend for the surface presented above are provided in Figure 5a, and 5b respectively.



a)



b)

Figure 5: Experimental semivariogram functions for a) Ordinary Kriging b) Universal Kriging with Linear Trend

In Figure 6, TEC map of Turkey, using TNPNG stations for July 22, 2009 at 1200 UT, obtained using isotropic Ordinary Kriging, is presented. A linear north to south TEC variation is very apparent from this map. Black dots indicate location of TNPNG stations.

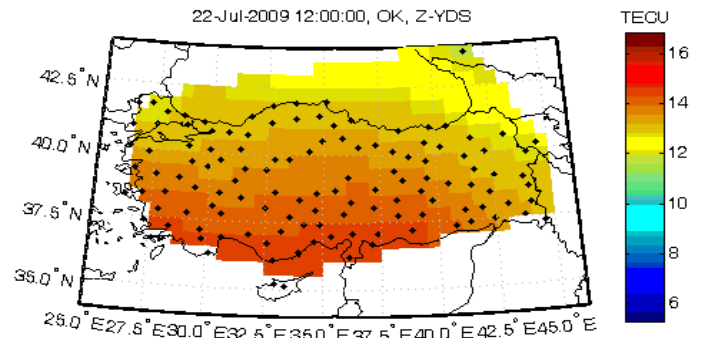


Figure 6: TEC map of Turkey using TNPNG on July 22, 2009, at 1200 UT with Ordinary Kriging.

TEC maps will be generated automatically according to a specialized, optimum temporal update period (TUP). This way, the ionospheric variability will be monitored and characterized accurately with low computational complexity and data storage. A random space-time model of ionosphere over Turkey can be developed using the TEC maps with optimum TUP. Active seismicity will also be monitored using the TNPNG network by observing and monitoring the disturbances in the regional ionosphere due to tectonic movements. The IONOLAB-TEC values are also used in ionospheric modeling programs such as IRI-Plas [6] for investigating the possibilities of parametric tomographic reconstruction of ionospheric electron density over Turkey.

III. CONCLUSION

Monitoring of ionosphere with a dense, homogeneous GPS network provides important possibilities in characterization and modeling of electron density and TEC. In this study, activities of IONOLAB group are introduced for Parametric CIT, TEC

Mapping and development of a random space-time model using the new GPS network TNPNG. An updated statistical space-time model of regional ionosphere will enable classification of disturbances and prediction of parameters of SW. Also, statistical channel models for satellite links and HF communication can be obtained in the future.

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by TUBITAK EEEAG Grant No: 109E055.

REFERENCES

- [1] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, vol. 108(A12), 1469-1480, 2003.
- [2] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period", *Radio Science*, vol. 39(6), RS6012, 2004.
- [3] Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O. and Erol, C.B., "Total electron content estimation with Reg-Est", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, vol. 122, A11313, 2007.
- [4] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., Arikan, O., "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC", *Radio Science*, vol.43, RS4004, 1-13, 2008.
- [5] N.Turel, and F. Arikan, "Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron," *Radio Science*, vol. 45, RS6016, 1-10, 2010.
- [6] T.L. Gulyaeva, "Storm time behavior of topside scale height inferred from the ionosphere-plasmasphere model driven by the F2 layer peak and GPS-TEC observations," *Advances in Space Research*, doi: 10.1016/j.asr.2010.10.025, 2010.

Optimization of F2 Layer Parameters Using IRI-Plas Model and IONOLAB Total Electron Content

Oktaç SAHIN

Department of Avionics and Naval Systems Design
Aselsan Inc. Microelectronics, Guidance and Electro-Optics
Division
Akyurt, Ankara 06750, Turkey
oksahin@aselsan.com.tr

Orhan ARIKAN

Department of Electrical and Electronics Engineering,
Bilkent University
Bilkent, Ankara 06800, Turkey
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Umut SEZEN, Feza ARIKAN

Department of Electrical and Electronics Engineering,
Hacettepe University
Beytepe, Ankara 06800, Turkey
u.sezen@ee.hacettepe.edu.tr
arikan@hacettepe.edu.tr

Bahadır AKTUG

General Command of Mapping
Cebeci, Ankara, Turkey
bahadir.aktug@hgk.mil.tr

Abstract — In this study, the relation of the maximum ionization height (HmF2) and the critical frequency (FoF2) of F2 layer is examined within their parametric range through the International Reference Ionosphere extended towards the plasmasphere (IRI-Plas) model and the IONOLAB-TEC (Total Electron Content) observations. HmF2 and FoF2 are optimized using an iterative loop through Non-Linear Least Squares method by also using a physical relation constraint between these two parameters. Performance evaluation of optimization algorithm is performed separately for the cases running IRI-Plas with optimized parameters and TEC input; only with optimized parameters; only with TEC and finally with no optimized parameter and TEC input. As a conclusion, it is seen that using optimized parameters and TEC together as input produces best IRI-TEC estimates. But also using only optimized parameters (without TEC update) gives estimates with also very low RMS errors and is suitable to use in optimizations. HmF2 and FoF2 estimates are obtained separately for a quiet day, positively corrupted day, negatively corrupted day, a northern latitude and a southern latitude. HmF2 and FoF2 estimation results are compared with ionosonde data where available. This study enables the modification and update of empirical and deterministic IRI Model to include instantaneous variability of the ionosphere.

I. INTRODUCTION

Ionosphere is the layer of the atmosphere that lies between 60 km and 1000 km above Earth surface. Ionosphere has a great importance in high frequency (HF) and satellite communications because of its electrical and ionic structure. Its ionization characteristics and electron density vary according to the location on Earth, time, Sun, geomagnetic and seismic effects. Ionosphere consists of three distinct layers, namely, D, E and F. F layer can be divided into F1 and F2 layers. F2 layer, having the highest electron density, is the most stable layer for

HF communication and it has major importance in satellite communications [1]. Many experimental and theoretical models have been studied in order to obtain a realistic physical structure of ionosphere. The most significant and commonly used one of these models is International Reference Ionosphere (IRI) Model [2]. IRI is an international project sponsored by the Committee on Space Research (COSPAR) and the International Union of Radio Science (URSI). For a given location, time and date, IRI provides monthly averages of the electron density, electron temperature, ion temperature, and ion composition (www.iri.org). In a recent study, IRI model is extended to include plasmasphere (IRI-Plas) upto the height of 20,000 km corresponding to the height of GPS satellites [3]. In IRI-Plas, TEC estimates can be provided externally for scaling of topside and plasmasphere extensions. In this study, GPS-TEC is obtained as IONOLAB-TEC [4-5] and provided externally for scaling of F2 layer parameters. The goal of this study is to update IRI-Plas with IONOLAB-TEC in an iterative optimization loop by also including the physical correlations between IRI parameters formed by Non-Linear Least Squares method, and also to obtain more realistic IRI-Plas outputs for TEC and ionosphere electrical and ionic structure estimates by this way. In this study, IONOLAB TEC method is shortly defined in Section 2. IRI-Plas model is defined in Section 3 and optimization method for finding the F2 layer parameters is defined in Section 4.

II. TEC ESTIMATIONS USING IONOLAB METHOD

IGS analysis centers can produce TEC estimations, but resolution of these estimates is low or they depend on observational data availability. In this study, GPS-TEC data is obtained from www.ionolab.org as IONOLAB-TEC [4-6]. IONOLAB-TEC combines data from all the GPS satellites

that are above 10° elevation angle (horizon limit) of the GPS station with a temporal resolution of 30 seconds. The method calculates VTEC (Vertical Total Electron Content) per satellite and combines them using a weighting function based on satellite positions which reduces the contamination caused by multipath effects [5-6]. The receiver differential code bias are estimated using the method described in [4].

III. IRI-PLAS MODEL

IRI-Plas model is an ionospheric empirical model that can be updated with different observational data sources [3]. In IRI-Plas, the region of interest can be extended to plasmasphere, i.e. 20,000 km. Ion and electron density distributions and TEC estimates along the local zenith axis can be obtained using this model. The model computations can be scaled by the input of external parameters such as GPS-TEC. Some of the model input parameters, such as sun spot number and geomagnetic coordinates are non-adaptive and kept constant in the data set. Some parameters are option selection flags such as FoF2 and TEC. Output parameters of the model are layer TEC estimates and related critical values. In this study, HmF2, FoF2 and TEC are investigated as input parameters. If we define parameter h as HmF2, f as critical frequency of the signal in layer and \mathbf{x} vector as non-optimized parameters such as selected receiver latitude, longitude, date, time, daily sun spot number and K_p index (Sun spot number and K_p index are database inputs independent of user entries), model finds estimation vector $\hat{\mathbf{y}}$ as given:

$$\hat{\mathbf{y}} = \text{iriplas}(h, f, \mathbf{x}) \quad (1)$$

An optional parameter of hourly TEC values (e.g. IONOLAB-TEC estimates) is also available in IRI-Plas model. In this case IRI-Plas model would be defined as

$$\hat{\mathbf{y}} = \text{iriplas}(h, f, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (2)$$

and here \mathbf{y} represents the hourly IONOLAB-TEC estimates.

IV. DETERMINATION OF F2 LAYER PARAMETERS

During day light, all ionosphere layers appear but when ionization effect of Sun disappears at nights, only F2 layer remains in spite of its decreasing electron density profile. So F2 layer is needed to be carefully examined. Main two characterizing parameters of this layer is HmF2 (km) and FoF2 (MHz). Only electrical signals above a critical frequency level can traverse the ionosphere and propagate into outer space. Signals with lower frequencies are refracted and reflected. Therefore, FoF2 is very important in radio communication. IRI-Plas model, estimates critical frequency and height values by analyzing its preset coefficient matrices. If IRI-Plas is updated with GPS-TEC, more realistic HmF2 and FoF2 estimates can be obtained. The iterational

optimization loop model for minimizing the TEC error is provided in Figure 1.

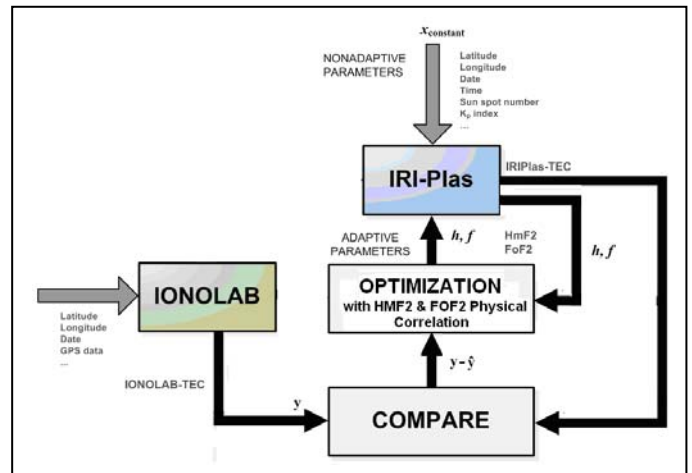


Figure 1: IRI-Plas Iterative Optimization Model

Defining error vector \mathbf{e} as the difference of observational data set \mathbf{y} and IRI-Plas TEC estimations $\hat{\mathbf{y}}$ for each hour of day,

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \quad (2)$$

and minimizing error norm $\|\mathbf{e}\|$ in an iterative loop leads us to optimized h and f parameters.

First of all, for a selected quite day (e.g. “ankr” IGS station and “15 Oct 2008”) IRI-Plas input parameter-set affecting TEC estimates are investigated in their defined parametric range. To do that, root-mean-square (RMS) error of daily TEC estimations which is the error of IRI-Plas TEC estimations and IONOLAB-TEC observations are calculated in 150-500 km parametric range of HmF2 with 10 km stepsize and 4-9 MHz parametric range of FoF2 with 0.1 MHz stepsize separately to see the single parameter variation effects on the TEC estimates. While dealing with TEC dependency to HmF2 single parameter, FoF2 is taken as a constant average value which is 6 MHz. Result is shown on Figure 2. It is seen that this characteristics is a parabolic curve.

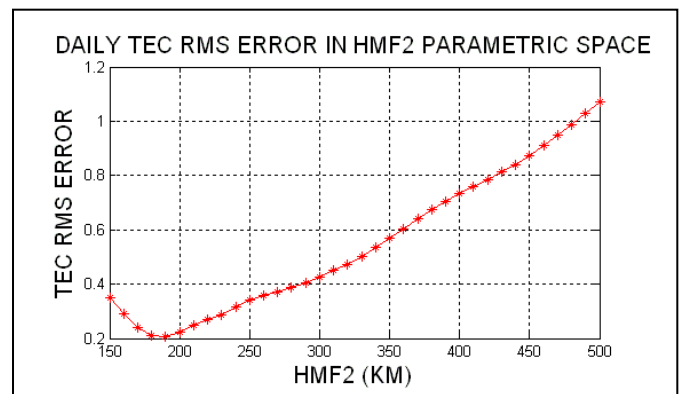


Figure 2: Ankara 15 October 2008 quite day - HmF2 single parameter search for daily RMS TEC Estimation Errors

By the same way for FoF2 cost function analysis, HmF2 is taken as a constant average value which is 250 km. Result is shown on Figure 3. It is also a parabolic curve.

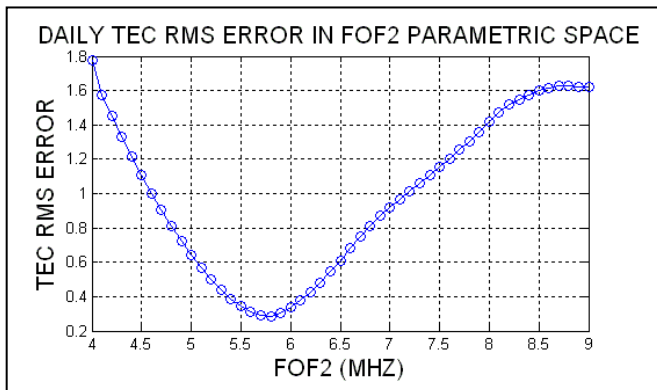


Figure 3: Ankara 15 October 2008 quite day - FoF2 single parameter search for daily RMS TEC Estimation Errors

So after having parabolic structures for single parameter sets, it is expected that a quadratic surface will be formed for double parameter search. As expected it is found to be a quadratic surface as given in Figure 4 below. Contour plot is given also in Figure 5.

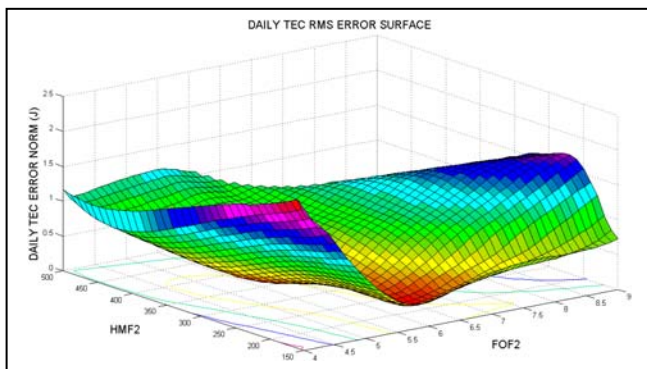


Figure 4: Ankara 15 October 2008 quite day - HmF2-FoF2 double parameter search for daily RMS TEC Estimation Error (surface plot)

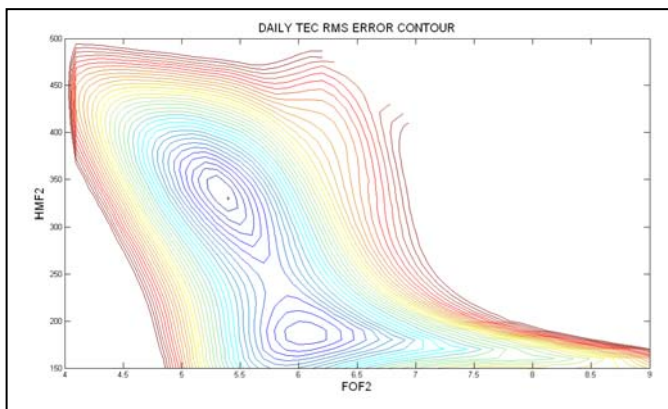


Figure 5: Ankara 15 October 2008 quite day - HmF2-FoF2 double parameter search for daily RMS TEC Estimation Error (contour plot)

After examining of TEC error characteristics curves and surface for a day, it is seen that there are no local minima, only a global minimum. So, selecting Non-Linear Least Squares method for optimizing HmF2 and FoF2 parameters, initializing the algorithm with HmF2 and FoF2 estimates obtained from IRI-Plas model (without using IONOLAB TEC) and running algorithm with IONOLAB TEC updates would lead us to a meaningful solution.

After choosing Non-Linear Least Squares method as optimization algorithm, performance evaluation of IRI-Plas model is investigated for different input combinations:

- running IRI-Plas with optimized parameters and TEC input,
- running IRI-Plas only with optimized parameters (no TEC input),
- running IRI-Plas only with TEC input (no optimized parameter input),
- running IRI-Plas without optimized parameter and TEC inputs.

Results can be seen on Figure 6.

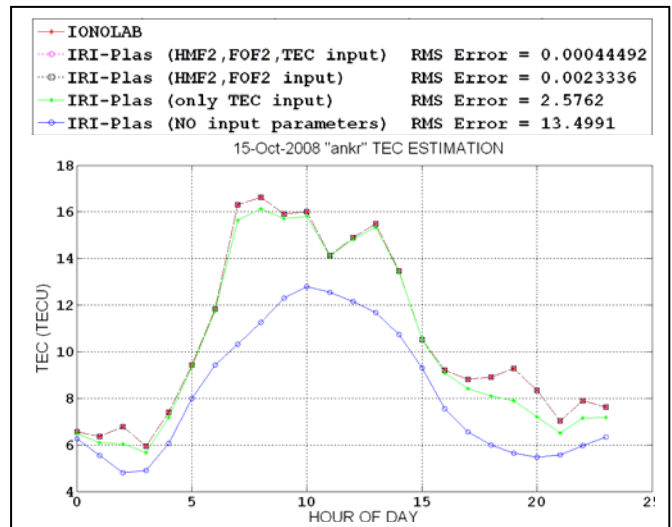


Figure 6: Ankara, 15 Oct 2008, quiet day daily TEC Estimation Performance Plot

It can easily be seen that using optimized parameters and TEC together has best TEC estimations performance and one-to-one matching with IONOLAB TEC observations. TEC estimation RMS error is found to be 0.0004 TECU in this case. But also using only optimized parameters (without TEC update) gives an estimate with a very low RMS error of 0.0023 TECU. Because optimization algorithm doesn't use IONOLAB-TEC data as input to the IRI-Plas model during optimization and used only for error calculations inside the loop. So we can also get very good results with the case "no TEC, only with optimized parameters running". Giving TEC only i.e. without the optimized parameters produces a significant RMS error of 2.5762 TECU, especially for night-

time as clearly can be seen on Figure 6. Using IRI Model without optimization parameter and TEC inputs is not a appropriate solution with an RMS error of 13.4991 TECU.

From now on, IRI-Plas is run via using second input combination in this study. Giving optimized HmF2 and FoF2 as intern parameters to the model and using hourly obtained TEC data only in error calculations (i.e. and not giving to the model as extern parameter) lead us to a meaningful solution with acceptable errors. One to one matching of IRI-Plas TEC and IONOLAB TEC is given separately again in Figure 7 below.

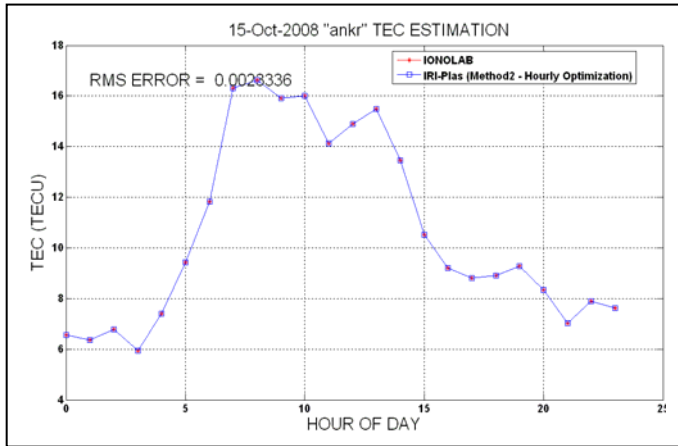


Figure 7: Comparison of IONOLAB-TEC with modified IRI-Plas TEC estimate for Ankara, 15 Oct 2008.

The optimization algorithm is tried for the same latitudes as Turkey with closer ionosonde-receiver locations. Ionosonde AT138 located in Athens and noa1 (Athens) EUREF receiver are selected for comparison.. Comparison of HmF2 and FoF2 estimated parameters and ionosonde data for 15 Oct 2008, noa1 (Greece) EUREF receiver are given on Figure 8 below. Red lines are observational ionosonde data and blue ones are estimates.

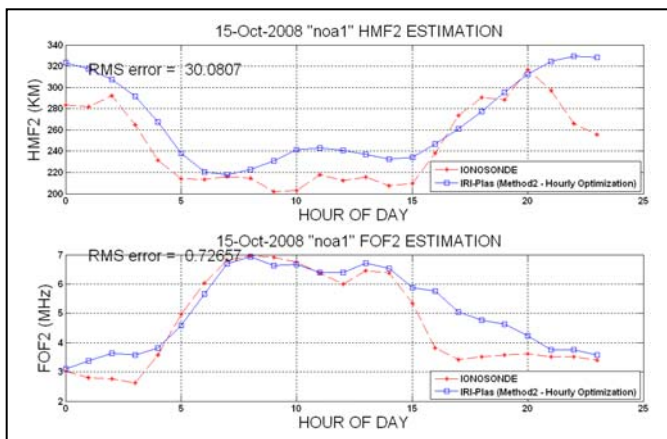


Figure 8: Comparison of estimation with ionosonde data for noa1 - AT138 a) HmF2, b) FoF2

The HmF2 and FoF2 graphs matched well with the ionosonde data. Matching RMS errors of HmF2 and FoF2 are 30.08 km and 0.73 MHz, respectively. The error between the ionosonde data and modified IRI-Plas data are in very good agreement.

The optimization algorithm is tried for higher latitudes with closer ionosonde-IGS receiver locations. The results for wroc (Wroclaw) IGS receiver and nearest Juliusruh/Rugen (JR055) ionosonde are provided in Figure 9.

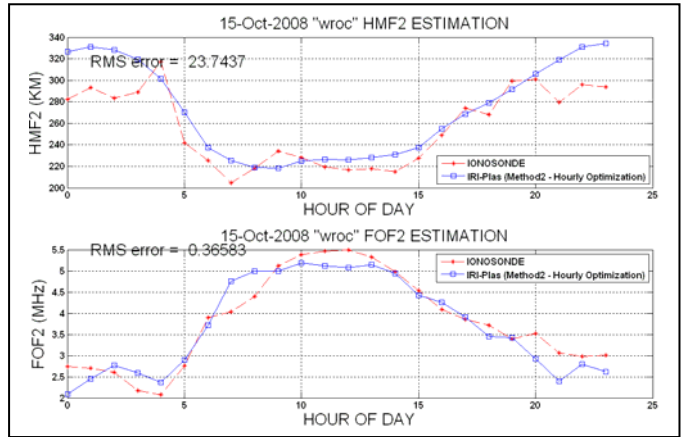


Figure 9: Comparison of estimation with ionosonde data for wroc - JR055 a) HmF2, b) FoF2

Again, red lines denote the ionosonde data and the blue ones are estimates. Rms Error is found as 23.74 km for HmF2 and 0.36 MHz for FoF2. It is observed that with closer IGS station-ionosonde pair, the estimates are in better agreement with the experimental data. In Figure 10, the comparison is provided for karr (Karratha) IGS receiver and Learmonth (LM42B) ionosonde. On Figure 10, red lines are ionosonde data and the blue ones are the estimates. Error norm is found as 13.69 km for HmF2 and 0.32 MHz for FoF2. An excellent agreement between the estimates and ionosonde data is obtained in this case also.

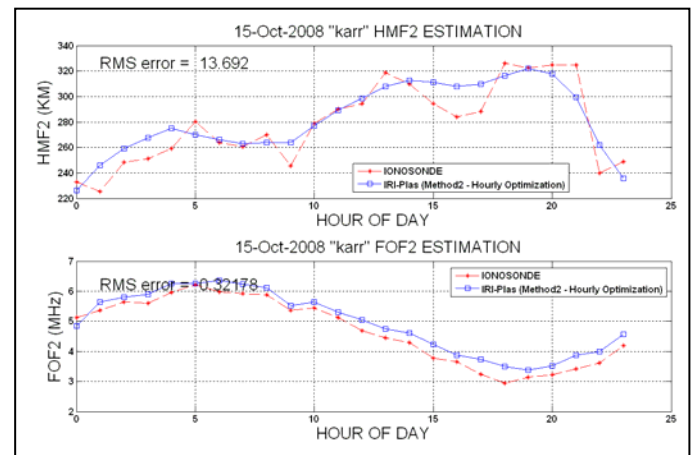


Figure 10: Comparison of estimation with ionosonde data for karr - LM42B a) HmF2, b) FoF2

V. CONCLUSION

IRI-Plas model is updated externally using IONOLAB-TEC estimates through an iterative optimization loop, and an updated HmF2 and FoF2 parameter set are obtained from the IRI-Plas model. These new set of FoF2 and HmF2 estimates obtained with the IRI-Plas model and IONOLAB-TEC estimates are compared with nearest ionosonde data set and it is observed that the FoF2 and HmF2 estimates were in excellent agreement with the ionosonde data. Estimation errors were higher for night hours.

From another perspective, these results also justify the reliability of the IRI-Plas model. This optimization method allow computation of the HmF2 and FoF2 parameters of the ionosphere F2 layer using the IRI-Plas model and GPS TEC estimations (or TEC measurements) where the ionosonde data are not available.

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by TUBITAK EEEAG Grant No:
109E055

REFERENCES

- [1] M.O. Kolawole, *Radar Systems, Peak Detection and Tracking*, Oxford, UK: Newnes, 2002.
- [2] D. Bilitza (ed.), *International Reference Ionosphere 1990*, NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
- [3] T.L. Gulyaeva, "Storm time behavior of topside scale height inferred from the ionosphere-plasmasphere model driven by the F2 layer peak and GPS-TEC observations," *Advances in Space Research*, doi: 10.1016/j.asr.2010.10.025, 2010.
- [4] F. Arikan, H. Nayir, U. Sezen and O. Arikan, "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC", *Radio Science*, 43, RS4004, 2008, pp. 1-13.
- [5] H. Nayir, F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol, "Total Electron Content Estimation with Reg-Est", *J. Geophys. Res -Space Physics*, 112(A11313), 2007, pp. 1-11.
- [6] F. Arikan, U. Sezen, O. Arikan,, O. Ugurlu, H. Nayir, "SpaceWeather Activities of IONOLAB Group: IONOLAB-TEC", *Geophysical Research Abstracts*, 11:EGU2009-5188, 2009.

Space-Time Interpolation and Automatic Mapping of TEC Using CORS-TR

Feza Arikan¹, Orhan Arikan², Umut Sezen¹, Cenk Toker¹, Bahadır Aktug³, Onur Lenk³, Mustafa Kurt³ and Erdem Parmaksiz³

¹Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Beytepe, Ankara 06800, Turkey
arikan@hacettepe.edu.tr, U.Sezen@ee.hacettepe.edu.tr, cenk.toker@ee.hacettepe.edu.tr

²Bilkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent, Ankara 06800 Turkey
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

³General Command of Mapping, Turkish Army, Cebeci, Ankara Turkey bahadir.aktug@hgk.msb.gov.tr,
onur.lenk@hgk.msb.gov.tr, mustafa.kurt@hgk.msb.gov.tr, erdem.parmaksiz@hgk.msb.gov.tr

Abstract

CORS-TR is the Constantly Operating Reference Station Network composed of 146 GPS receivers, distributed uniformly in Turkey and North Cyprus Turkish Republic since May 2009. IONOLAB group, formed by researchers and students in Hacettepe University, Bilkent University and General Command of Mapping of Turkish Army, is currently investigating new techniques for space-time interpolation, and automatic mapping of TEC through a TUBITAK research grant. This study presents the developments in monitoring of space weather, and correction of geodesic positioning errors due to ionosphere using CORS-TR.

1. Introduction

Ionosphere is the main source of positioning error for GNSS receivers due to its high spatial and temporal variability. It is of utmost importance to estimate and predict the variability in space weather and compute the signal delays due to ionospheric and plasmaspheric frequency dependent refractivity. Continuously Operating Reference Station-Turkey (CORS-TR) Network is a recently installed system of 146 GPS stations homogeneously distributed over Turkey and North Cyprus Turkish Republic. The CORS-TR network is in operation since May 2009 and it provides a wide variety of possibilities for active research not only in geodetics but also in areas from geology to tropospheric and ionospheric characterization. IONOLAB is a group of researchers of various disciplines, getting together to handle challenges of the Earth's ionosphere. The team has researchers from Hacettepe University and Bilkent University, Departments of Electrical and Electronics Engineering, and General Command of Mapping of Turkish Army. IONOLAB group has been active in estimation of Total Electron Content (TEC) using single station GPS recordings in IGS network [1-4], regional spatial interpolation (mapping) of TEC [5-6], global Computerized Ionospheric Tomography (CIT) [7-9], statistical analysis of TEC [10-11], and investigation of lithosphere-ionosphere coupling through seismic activity [12]. The techniques that have been developed for various purposes can be applied to any GPS station in IGS or EUREF network. With the new CORS-TR, it is observed that there are various prospective areas in processing GPS recordings for higher accuracy and reliability in characterization of the regional ionosphere. The first one of these areas is an efficient and effective signal processing algorithm for computation of TEC using 146 GPS stations operating in a network. A new technique is developed to recover TEC data gaps utilizing a weighted time and space interpolation. The second task is the monitoring of the TEC using optimized and automatic spatial interpolation, i.e. mapping. The east-west extend of Turkey indicates a major anisotropy in TEC distribution especially during sunrise and sunset hours. A north-south anisotropy is also observed for hours with full sun exposure and during night hours. IONOLAB group is currently investigating new techniques in introducing anisotropy into Ordinary Kriging for TEC mapping and generation of an accurate temporal model for the semivariogram function for CORS-TR Network. In this study, these goals and the developments will be discussed in the following sections.

2. Space-Time Interpolation of TEC

GPS signals are affected by multipath, environmental or physical conditions and various disruptions of data or problems like cycle slips may occur in the estimation of TEC. This situation causes TEC to be computed in discrete epochs. Since most of these shortage periods are due to factors outside ionosphere as listed above, the gaps in estimated TEC should be recovered. A novel algorithm is being developed by IONOLAB group that combines temporal

interpolation with spatial interpolation according to pre-determined weight coefficients. The Cubic Spline (C-Spline) is chosen as the temporal interpolation method. For spatial interpolation, GPS reference stations within 200 km neighborhood are chosen and a linear regression algorithm similar to Ordinary Kriging is employed. The weights are chosen according to the level of disturbance in the ionosphere and the length of data loss. If the data loss is less than one hour, temporal interpolation has higher weight and for durations longer than one hour, spatial interpolation dominates. Figure 1a denotes a histogram of number of stations that has discontinuities in IONOLAB-TEC. A further analysis indicates that most of data loss occur for durations under two hours. The technique is demonstrated for the IONOLAB-TEC values of adan (37°N, 35.4°E) on August 1, 2009 as indicated with crosses in Figure 1b .

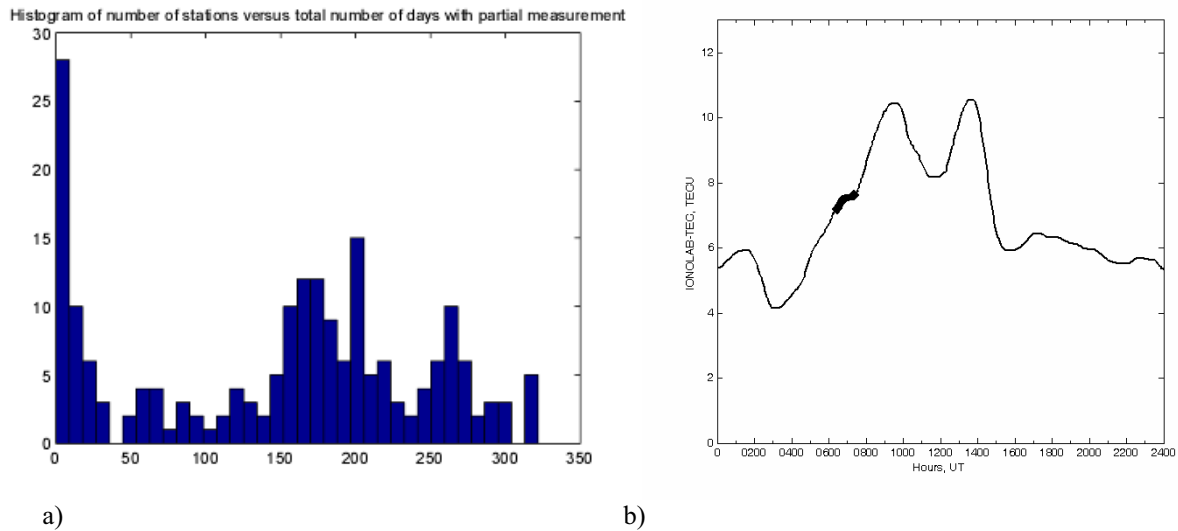


Figure 1: a) Histogram of number of stations versus total number of days with partial measurement in the 2009 in CORS-TR b) IONOLAB-TEC for adan on August 1, 2009; crosses indicate the region chosen for interpolation

In Figure 2a, the original IONOLAB-TEC estimates are indicated with temporal interpolation only; spatial interpolation only and the proposed space-time interpolation method. The chosen neighborhood stations are klis, mers and ante that are 180 km, 80 km and 200 km to adan, respectively. The interpolation method is tried for 10 different days for the same period of time and the root mean square (RMS) error is indicated in Figure 2b. As it can be observed, the proposed method with space-time interpolation has the smallest RMS error for all days.

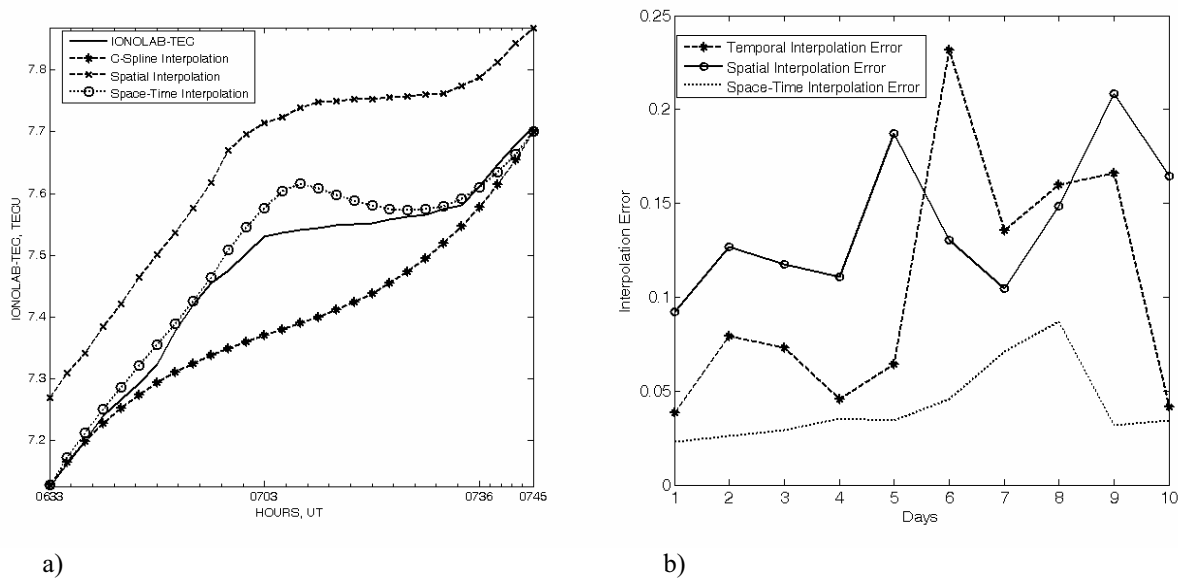
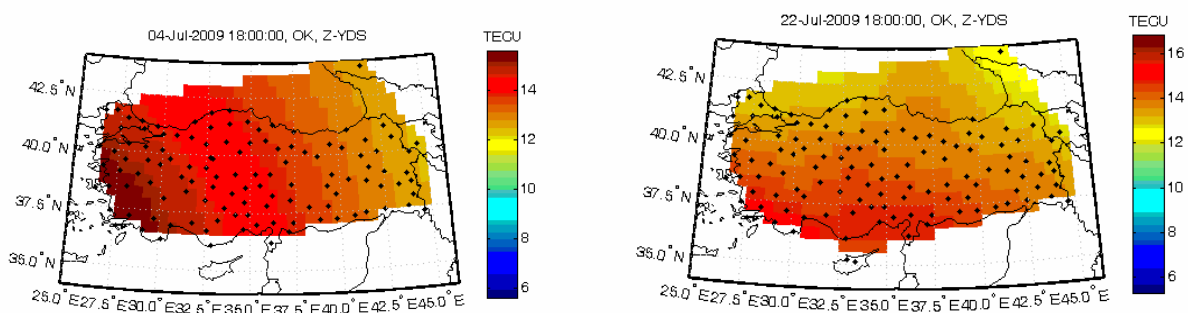


Figure 2: a) IONOLAB-TEC (solid line), and interpolated values with temporal interpolation only (asterisk-dashed line), spatial interpolation only (cross-dashed line) and space-time interpolation (circles-dotted line) b) RMS error for

10 different days for adan for the same time period; temporal interpolation only (asterisk-dashed line), spatial interpolation only (circles-solid line) and space-time interpolation (dotted line)

3. Automatic TEC Mapping

Automatic TEC Maps generated at optimum Temporal Update Periods (TUP) [13] form an important data base for derivation of space-time random model TEC, monitoring space weather and update of IRI-Plas model [14]. Turkey is located in midlatitude region with a predominant east-west extension. IONOLAB group investigates the automatic TEC mapping problem through automatic generation of theoretical semivariogram function for Ordinary Kriging method [5]. Making use of synthetic TEC surfaces similar to those in [5-6], it is determined that the trend in TEC distribution is the most important factor in the semivariogram function. Also, the semivariogram function for TEC like surfaces deviate from those functions that are widely used in geophysics and mining. In Figures 3a and 3b, TEC maps of Turkey are provided at 1200 UT for July 4, 2009 (quiet day) and July 22, 2009 (positively disturbed day), respectively. The black dots represent the CORS-TR stations. These maps are generated by Ordinary Isotropic Kriging. An east-west linear trend in Figure 3a is replaced with a north-south more complex trend in Figure 3b. Local anisotropies can also be observed in both cases and optimum description for anisotropic Ordinary Kriging is currently investigated in TUBITAK project through synthetic TEC surfaces that have various trends and anisotropies. These studies indicate that local small scale variabilities may be recovered by anisotropic Kriging. In standard Ordinary or Universal Kriging methods, the local variations are overlooked due to the predomination of the trend.



a) b)
 Figure 3: TEC map of Turkey with Isotropic Ordinary Kriging at 1200 UT on a) July 4, 2009 b) July 22, 2009. The black dots indicate CORS-TR stations.

4. Conclusion and Future Work

IONOLAB group is currently investigating new methods in space-time interpolation of TEC and automatic mapping of TEC with anisotropic Ordinary Kriging. The developed techniques will be implemented for all available data in CORS-TR. The novel space-time interpolation algorithm will be tried for not only quiet, and disturbed days but also for stations that lack data before an earthquake in North Anatolian Fault. These results will form a basis for investigations on Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling models. Theoretical semivariogram functions will be based on particle swarm optimization of experimental data and a look-up library will be formed. Optimum anisotropic semivariogram functions will also be investigated and appropriate Kriging algorithms will be developed.

5. Acknowledgments

This study is sported by TUBITAK EEEAG Grant No: 109E055

7. References

1. F. Arikan, C.B. Erol and O. Arikan, "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data," *Journal of Geophysical Research-Space Physics* , **108(A12)**, 2003,), pp. 1469 -1480.
2. F. Arikan, C.B. Erol, and O. Arikan, "Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period," *Radio Science* , **39(6)**, RS6012, 2004.
3. H. Nayir, F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol, "Total Electron Content Estimation with Reg-Est", *J. Geophys. Res - Space Physics* , **112(A11313)**, 2007, pp. 1-11.
4. F. Arikan, H. Nayir, U. Sezen and O. Arikan, "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC," *Radio Science* , **43, RS4004**, 2008, pp. 1-13.
5. I. Sayin, F. Arikan, and O. Arikan, "Regional TEC Mapping with Random Field Priors and Kriging," *Radio Science* , **43, RS5012**, 2008, pp. 1-14.
6. Yilmaz, A., K. E. Akdogan, and M. Gurun, "Regional TEC mapping using neural networks," *Radio Science*, **44, RS3007**, 2009.
7. O. Arikan, F. Arikan, C.B.Erol, "3-D Ionospheric Tomography with Random Field Priors," in K. Tas, J.A. Tenreiro Machado and D. Baleanu (eds), *Mathematical Methods in Engineering* , Netherlands, Springer, 2007, pp. 335-334.
8. O. Arikan, F. Arikan, and C.B. Erol, "Computerized ionospheric tomography with the IRI model," *Advances in Space Research* , **39**, 2007, pp. 859-866.
9. O. Erturk, O. Arikan, F. Arikan, "Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time," *Advances in Space Research* , **43**, 2009, pp. 1702-1710.
10. C.B. Erol and F. Arikan, "Statistical analysis of the ionosphere using GPS signals," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* , **19(3)**, 2005, pp. 373 - 387.
11. N. Turel and F. Arikan, "Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content," *Radio Science*, **45, RS6016**, 2010, pp. 1-10.
12. S. Karatay, F. Arikan, O. Arikan, "Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere", *Radio Science*, **45, RS5012**, 2010, pp. 1-12.
13. I. Sayin, F. Arikan, K.E. Akdogan, "Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring," *Radio Science*, **45, RS6018**, 2010, pp. 1-9.
14. T.L. Gulyaeva, "Storm time behavior of topside scale height inferred from the ionosphere-plasmasphere model driven by the F2 layer peak and GPS-TEC observations," *Advances in Space Research*, doi: 10.1016/j.asr.2010.10.025, 2010.

Optimization of F2 Layer Parameters Using IRI-Plas and IONOLAB-TEC

Oktay ŞAHİN¹, Umut SEZEN², Feza ARIKAN², Orhan ARIKAN³

¹ Aselsan A.Ş.

oksahin@aselsan.com.tr

² Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Beytepe, Ankara 06800, Turkey
u.sezen@ee.hacettepe.edu.tr, arikan@hacettepe.edu.tr,

³ Bilkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent, Ankara 06800, Turkey
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Abstract

In this study, the relation of the maximum ionization height (HmF2) and the critical frequency (FoF2) of F2 layer is examined within their parametric range through the International Reference Ionosphere extended towards the plasmasphere (IRI-Plas) model and the IONOLAB-TEC. HmF2 and FoF2 are optimized using an iterative loop through Non-Linear Least Squares method. HmF2 and FoF2 are obtained for various locations including Turkey for the same quiet day. Results are compared with ionosonde data where available. This study enables the modification and update of empirical and deterministic IRI Model to include instantaneous variability of the ionosphere.

1. Introduction

Ionosphere is the layer of the atmosphere that lies between 60 km and 1000 km above Earth surface. Ionosphere has a great importance in high frequency (HF) and satellite communications because of its electrical and ionic structure. Its ionization characteristics and electron density change according to the location on Earth, time, Sun, geomagnetic and seismic effects. Ionosphere consists of three distinct layers, namely, D, E and F. F layer can be divided into F1 and F2 layers. F2 layer, having the highest electron density, is the most stable layer for HF communication and it has major importance in satellite communications [1]. Many experimental and theoretical models have been investigated for obtaining a realistic physical structure of ionosphere. The most significant and commonly used one of these models is International Reference Ionosphere (IRI) Model [2]. IRI is an international project sponsored by the Committee on Space Research (COSPAR) and the International Union of Radio Science (URSI). For a given location, time and date, IRI provides monthly averages of the electron density, electron temperature, ion temperature, and ion composition (www.iri.org). In a recent study, IRI model is extended to include plasmasphere (IRI-Plas) upto the height of 20,000 km corresponding to the height of GPS satellites [3]. In IRI-Plas, TEC estimates can be provided externally for scaling of topside and plasmasphere extensions. In this study, GPS-TEC is obtained as IONOLAB-TEC [4-5] and provided externally for scaling of F2 layer parameters. The goal of this study is to update IRI-Plas with IONOLAB-TEC in an iterative optimization loop formed by Non-Linear Least Squares method. In this study, IONOLAB TEC method is shortly defined in Section 2. IRI-Plas model is defined in Section 3 and optimization method for finding the F2 layer parameters is defined in Section 4.

2. TEC Estimations Using Ionolab Method

IGS analysis centers can produce TEC estimations, but resolution of these estimates is low or they depend on observational data availability. In this study, GPS-TEC data is obtained from www.ionolab.org as IONOLAB-TEC [4-6]. IONOLAB-TEC combines data from all the GPS satellites that are above 10° elevation angle (horizon limit) of the GPS station with a temporal resolution of 30 seconds. The method calculates VTEC (Vertical Total Electron Content) per satellite and combines them using a weighting function based on satellite positions which reduces the contamination caused by multipath effects [5-6]. The receiver differential code bias are estimated using the method described in [4].

3. IRI-Plas Model

IRI-Plas Model is an ionospheric empirical model that can be updated with different observational data sources [3]. In IRI-Plas, the region of interest can be extended to plasmasphere, i.e. 20,000 km. Ion and electron density distributions and TEC estimates along the local zenith axis can be obtained using this model. The model

computations can be scaled by the input of external parameters such as GPS-TEC. Some of the model input parameters, such as sun spot number and geomagnetic coordinates are non-adaptive and kept constant in the data set. Some parameters are option selection flags such as FoF2 and TEC. Output parameters of the model are layer TEC estimates and related critical values. In this study, HmF2, FoF2 and TEC are investigated as input parameters. If we define parameter h as HmF2, f as critical frequency of the signal in layer, y as IONOLAB-TEC data of that hour and x vector as non-optimized parameters such as selected receiver latitude, longitude, date, time, daily sun spot number and K_p index (Sun spot number and K_p index are database inputs independent of user entries), model finds estimation vector \hat{y} as given:

$$\hat{y} = \text{iriplas}(h, f, x, y) \quad (1)$$

4. Determination of F2 Layer Parameters

During day light, all ionosphere layers appear but when ionization effect of Sun disappears at nights, only F2 layer remains in spite of its decreasing electron density profile. So F2 layer is needed to be carefully examined. Main two characterizing parameters of this layer is HmF2 (km) and FoF2 (MHz). Only electrical signals above a critical frequency level can traverse the ionosphere and propagate into outer space. Signals with lower frequencies are refracted and reflected. Therefore, FoF2 is very important in radio communication. IRI-Plas model, estimates critical frequency and height values by analyzing its preset coefficient matrices. If IRI-Plas is updated with GPS-TEC, more realistic HmF2 and FoF2 estimates can be obtained. The iterational optimization loop model for minimizing the TEC error is provided in Figure 1.

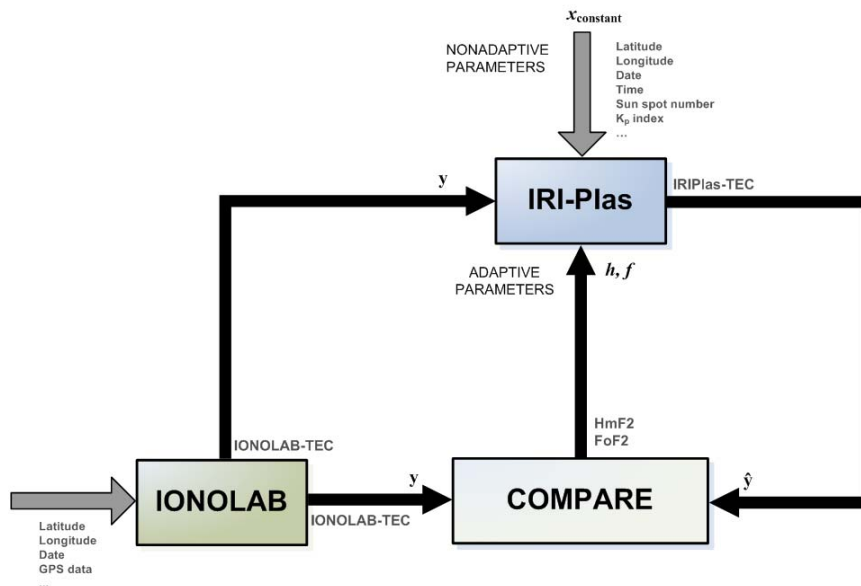


Figure 1: IRI-Plas Iterative Optimization Model

Defining error vector e as the difference of observational data set y and IRI-Plas TEC estimations \hat{y} for each hour of day,

$$e = y - \hat{y} \quad (2)$$

and minimizing error norm $\|e\|$ in an iterative loop leads us to optimized h and f parameters.

Norm characteristics of daily TEC error vector is investigated in 150-500 km parametric range of HmF2 with 50 km stepsize and 4-9 MHz parametric range of FoF2 with 0.5 MHz step size separately and results are shown on Figure 2. For HmF2 cost function analysis, FoF2 is taken as a constant average value which is 6 MHz. By the same way for FoF2 cost function analysis, HmF2 is taken as a constant average value which is 250 km. After examining of TEC error characteristics, it is seen that there are no local minima (only a global minimum). So, selecting Non-Linear Least Squares method for optimizing HmF2 and FoF2 parameters, initializing the algorithm with HmF2 and FoF2 estimations obtained from IRI-Plas model (without using IONOLAB TEC) and running algorithm with IONOLAB TEC updates would lead us to a meaningful solution.

It is clearly seen in Figure 3 that optimization leads us to a one-to-one matching TEC estimations with IONOLAB TEC observations.

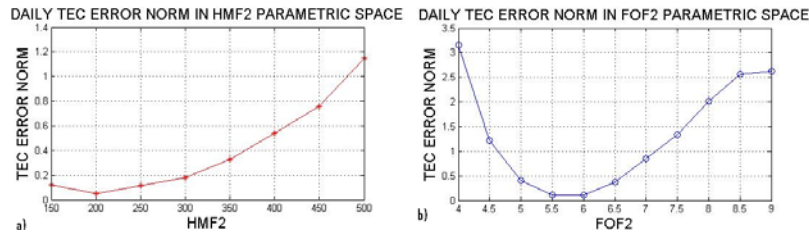


Figure 2: Ankara, 15 Oct 2008, quiet day daily TEC error norm plot for a) HmF2, b) FoF2 parametric range

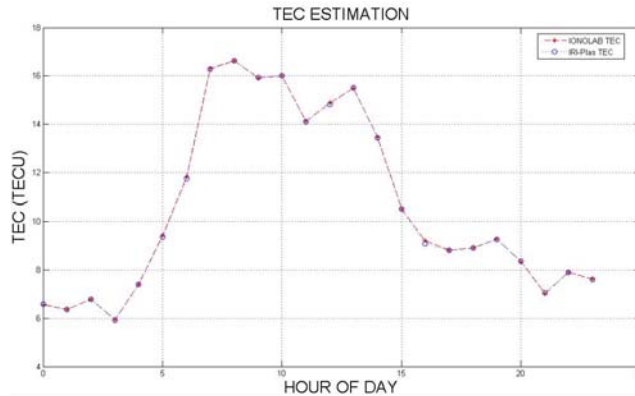


Figure 3: Comparison of IONOLAB-TEC with modified IRI-Plas TEC estimate for Ankara, 15 Oct 2008.

For selected day and IGS receiver, daily resulting TEC estimation error norm (using $\|e\|$) for optimizing parameters is found as $4.5875e-007$ TECU. Nearest ionosonde to Ankara is AT138 that is located in Athens, Greece on same latitudal coordinates. Comparison of HmF2 and FoF2 estimated parameters and ionosonde data for 15 Oct 2008, ankr (Ankara, Turkey) IGS receiver are given on Figure 4 below. Red lines are observational ionosonde data and blue ones are estimations.

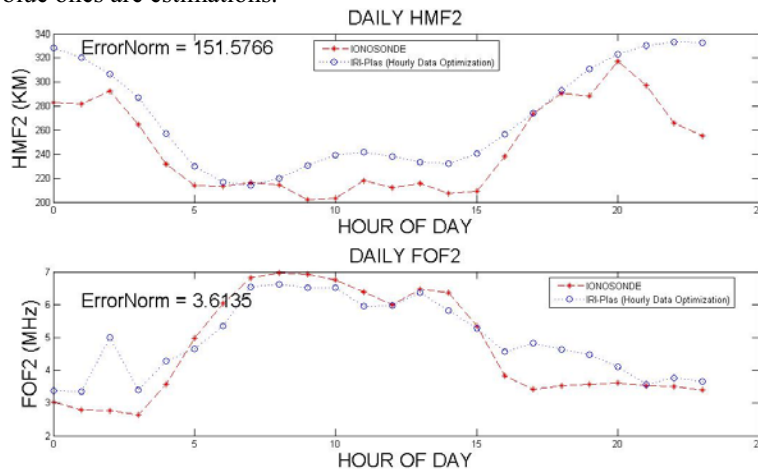


Figure 4: Comparison of estimation with ionosonde data for ankr - AT138 a) HmF2, b) FoF2

The HmF2 and FoF2 graphs matched well with the ionosonde data. Matching RMS errors of HmF2 and FoF2 are 151.58 km and 3.61 MHz, respectively. Although ankr and AT138 are not colocated, the error between the ionosonde data and modified IRI-Plas data are in very good agreement.

The optimization algorithm is tried for higher latitudes with closer ionosonde-IGS receiver locations. The results for wroc (Wroclaw) IGS receiver and nearest Juliusruh/Rugen (JR055) ionosonde are provided in Figure 5. Again, red lines denote the ionosonde data and the blue ones are estimates. Error norm is found as 117.62 km for HmF2 and 1.39 MHz for FoF2. It is observed that with closer IGS station-ionosonde pair, the estimates are in better agreement with the experimental data. In Figure 6, the comparison is provided for karr (Karratha) IGS receiver and Learmonth (LM42B) ionosonde. On Figure 6, red lines are ionosonde data and the blue ones are the estimates. Error norm is found as 79.18 km for HmF2 and 2.15 MHz for FoF2. An excellent agreement between the estimates and ionosonde data is obtained in this case also.

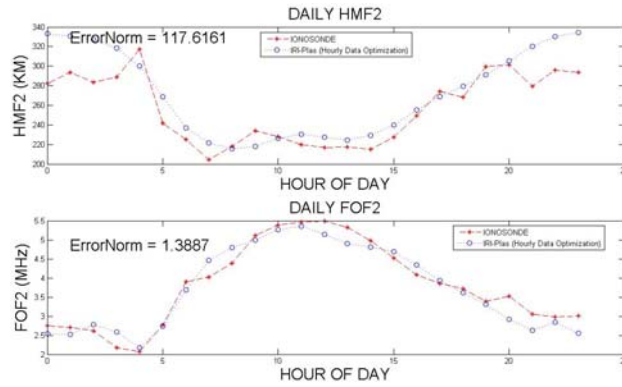


Figure 5: Comparison of estimation with ionosonde data for wroc - JR055 a) HmF2, b) FoF2

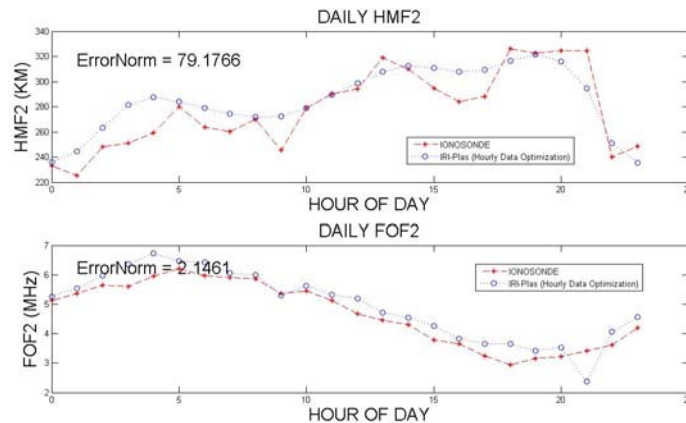


Figure 6: Comparison of estimation with ionosonde data for karr - LM42B a) HmF2, b) FoF2

5. Conclusion

IRI-Plas model is updated externally using IONOLAB-TEC estimates through an iterative optimization loop, and an updated HmF2 and FoF2 parameter set are obtained from IRI-Plas. These new set of FoF2 and HmF2 estimates from IRI-Plas are compared with nearest ionosonde data set and it is observed that the estimations were in excellent agreement with the ionosonde data. Estimation errors were higher for night hours.

From another perspective, these results also justify the reliability of the IRI-Plas model. This optimization method allow computation of the HmF2 and FoF2 parameters of the ionosphere F2 layer using the IRI-Plas model and GPS TEC estimations (or TEC measurements) where the ionosonde data are not available.

6. Acknowledgments

This study is supported by TUBITAK EEEAG Grant No: 109E055

7. References

1. M.O. Kolawole, *Radar Systems, Peak Detection and Tracking*, Oxford, UK: Newnes, 2002.
2. D. Bilitza (ed.), *International Reference Ionosphere 1990*, NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
3. T.L. Gulyaeva, "Storm time behavior of topside scale height inferred from the ionosphere-plasmasphere model driven by the F2 layer peak and GPS-TEC observations," *Advances in Space Research*, doi: 10.1016/j.asr.2010.10.025, 2010.
4. F. Arikan, H. Nayir, U. Sezen and O. Arikan, "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC", *Radio Science*, 43, RS4004, 2008, pp. 1-13.
5. H. Nayir, F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol, "Total Electron Content Estimation with Reg-Est", *J. Geophys. Res -Space Physics*, 112(A11313), 2007, pp. 1-11.
6. F. Arikan, U. Sezen, O. Arikan, O. Ugurlu, H. Nayir, "SpaceWeather Activities of IONOLAB Group: IONOLAB-TEC", *Geophysical Research Abstracts*, 11:EGU2009-5188, 2009.

Space-Time Interpolation and Automatic Mapping of TEC Using TNPNG-Active

Feza Arikan¹, Orhan Arikan², Umut Sezen¹, Cenk Toker¹, Bahadır Aktug³, Onur Lenk³, Mustafa Kurt³ and Erdem Parmaksiz³

¹Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Beytepe, Ankara 06800, Turkey
arikan@hacettepe.edu.tr, U.Sezen@ee.hacettepe.edu.tr, cenk.toker@ee.hacettepe.edu.tr

²Bilkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent, Ankara 06800 Turkey
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

³General Command of Mapping, Defense Ministry, Cebeci, Ankara Turkey bahadir.aktug@hgk.msb.gov.tr,
onur.lenk@hgk.msb.gov.tr, mustafa.kurt@hgk.msb.gov.tr, erdem.parmaksiz@hgk.msb.gov.tr

Abstract

Turkish National Permanent GPS Network (TNPNG) is the Reference Station Network of 146 continuously-operating GNSS stations which are distributed uniformly across Turkey and North Cyprus Turkish Republic since May 2009. IONOLAB group, formed by researchers and students in Hacettepe University, Bilkent University and General Command of Mapping is currently investigating new techniques for space-time interpolation, and automatic mapping of TEC through a TUBITAK research grant. This study presents the developments in monitoring of space weather, and correction of geodetic positioning errors due to ionosphere using TNPNG.

1. Introduction

Ionosphere is the main source of positioning error for GNSS receivers due to its high spatial and temporal variability. It is of utmost importance to estimate and predict the variability in space weather and compute the signal delays due to the ionospheric and plasmaspheric frequency dependent refractivity. TNPNG consisting of 146 GNSS stations which are homogenously distributed over Turkey and North Cyprus Turkish Republic, has been recently established. TNPNG has been operational since May 2009 and it provides a wide variety of possibilities for active research not only in geodesy but also in the fields ranging from geology to the tropospheric and ionospheric characterization. IONOLAB is a group of researchers of various disciplines, getting together to handle challenges of the Earth's ionosphere. The team has researchers from Hacettepe University and Bilkent University, Departments of Electrical and Electronics Engineering, and General Command of Mapping. IONOLAB group has been active in the estimation of Total Electron Content (TEC) by using single station GPS recordings in the IGS network [1-4], regional spatial interpolation (mapping) of TEC [5-6], global Computerized Ionospheric Tomography (CIT) [7-9], statistical analysis of TEC [10-11], and the investigation of lithosphere-ionosphere coupling through seismic activity [12]. The techniques that have been developed for various purposes can be applied to any GNSS station in IGS or EUREF network. With the new TNPNG, it is observed that there are various prospective areas in the data processing GNSS measurements for higher accuracy and reliability in the characterization of the regional ionosphere. The first one of these areas is an efficient and effective signal processing algorithm for computation of TEC using 146 GNSS stations continuously operating in a network. A new technique is developed to recover TEC data gaps utilizing a weighted time and space interpolation. The second task is the monitoring of the TEC using optimized and automatic spatial interpolation, i.e. mapping. The east-west extend of Turkey indicates a major anisotropy in TEC distribution especially during sunrise and sunset hours. A north-south anisotropy is also observed for hours with full sun exposure and during night hours. IONOLAB group is currently investigating new techniques for incorporating anisotropy into Ordinary Kriging for TEC mapping and generation of an accurate temporal model for the semivariogram function for TNPNG. In this study, these goals and the developments will be discussed in the following sections.

2. Space-Time Interpolation of TEC

GPS signals are affected by multipath, environmental or physical conditions and various disruptions of data or problems like cycle slips may occur in the estimation of TEC. This situation causes TEC to be computed in discrete epochs. Since most of these shortage periods are due to the factors outside ionosphere as listed above, the gaps in estimated TEC should be recovered. A novel algorithm is developed by IONOLAB group that combines temporal

interpolation with spatial interpolation employing pre-determined weight coefficients. The Cubic Spline (C-Spline) is chosen as the temporal interpolation method. For spatial interpolation, GNSS reference stations within 200 km neighborhood are chosen and a linear regression algorithm similar to Ordinary Kriging is employed. The weights are chosen according to the level of disturbance in the ionosphere and the length of data loss. If the data loss is less than one hour, the temporal interpolation has higher weight and for durations longer than one hour, spatial interpolation dominates. Figure 1a denotes a histogram of number of stations that has discontinuities in IONOLAB-TEC. A further analysis indicates that most of data loss occurs for durations shorter than two hours. The technique is demonstrated for the IONOLAB-TEC values of Adana station (37°N, 35.4°E) on August 1, 2009 as indicated with crosses in Figure 1b.

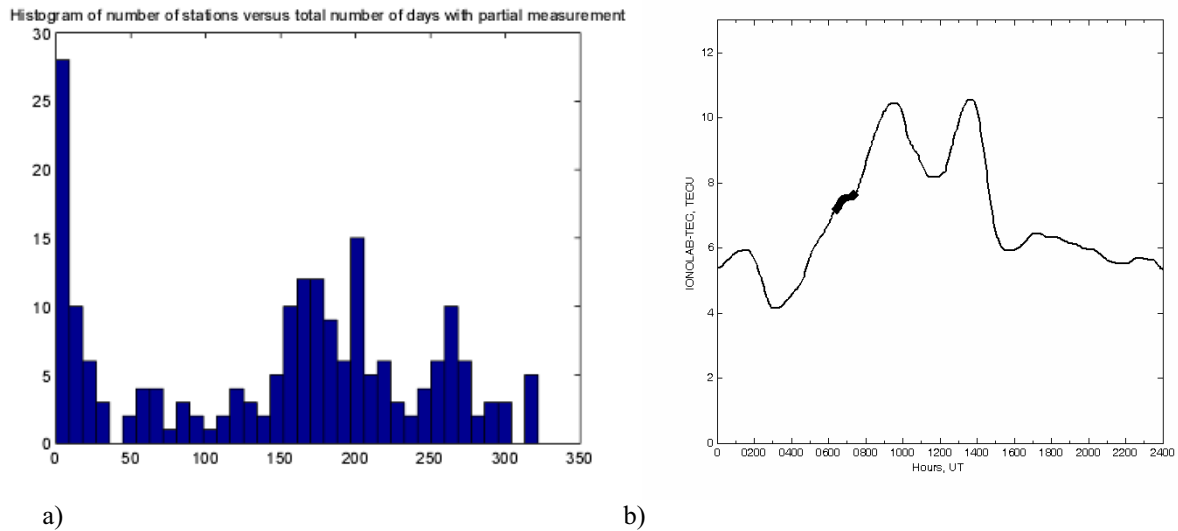


Figure 1: a) Histogram of number of stations versus total number of days with partial measurement in the 2009 in TNPNG b) IONOLAB-TEC for Adana station on August 1, 2009; crosses indicate the region chosen for interpolation

In Figure 2a, the original IONOLAB-TEC estimates are indicated with temporal interpolation only; the spatial interpolation only and the proposed space-time interpolation method. The chosen neighborhood stations are Kilis, Mersin, Gaziantep that are 180 km, 80 km and 200 km to Adana station, respectively. The interpolation method is tried for 10 different days for the same period of time and the root mean square (RMS) error is indicated in Figure 2b. As it can be observed, the proposed method with space-time interpolation has the smallest RMS error for all days.

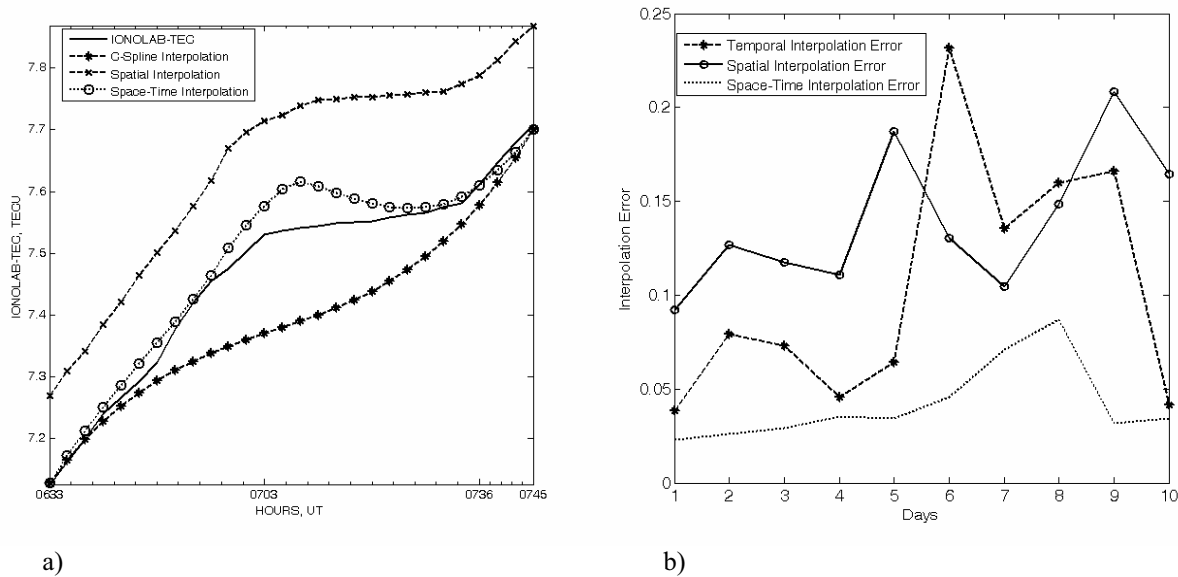
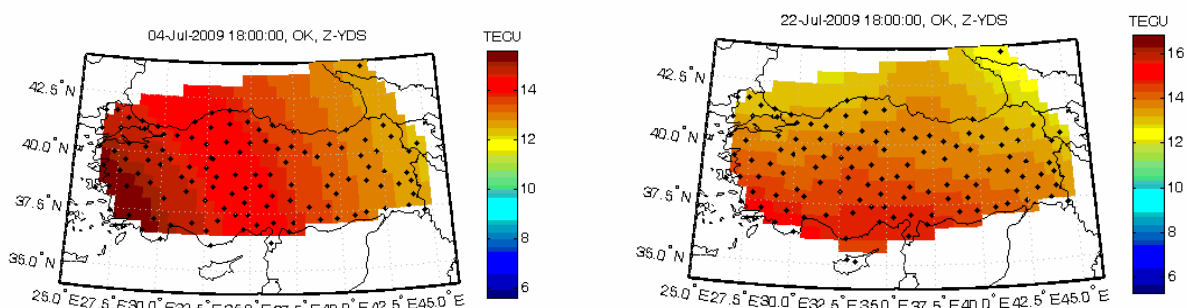


Figure 2: a) IONOLAB-TEC (solid line), and interpolated values with temporal interpolation only (asterisk-dashed line), spatial interpolation only (cross-dashed line) and space-time interpolation (circles-dotted line) b) RMS error for

10 different days for adan for the same time period; temporal interpolation only (asterisk-dashed line), spatial interpolation only (circles-solid line) and space-time interpolation (dotted line)

3. Automatic TEC Mapping

Automatic TEC Maps are generated at optimum Temporal Update Periods (TUP) [13] form an important data base for derivation of space-time random model TEC, monitoring space weather and update of IRI-Plas model [14]. Turkey is located in a mid-latitude region with a predominant east-west extension. IONOLAB group investigates the automatic TEC mapping problem through the automatic generation of theoretical semi-variogram function for Ordinary Kriging method [5]. Making use of synthetic TEC surfaces similar to those in [5-6], reveals that the trend in TEC distribution is the most important factor in the semivariogram function. Also, the semivariogram function for TEC such as surfaces deviates from those functions that are widely used in geophysics and mining. In Figures 3a and 3b, TEC maps of Turkey are provided at 1200 UT for July 4, 2009 (quiet day) and July 22, 2009 (positively disturbed day), respectively. The black dots represent the CORS-TR stations. These maps are generated by Ordinary Isotropic Kriging. An east-west linear trend in Figure 3a is replaced with a north-south more complex trend in Figure 3b. Local anisotropies can also be observed in both cases and optimum description for anisotropic Ordinary Kriging is currently investigated in TUBITAK project through synthetic TEC surfaces that have various trends and anisotropies. These studies indicate that local small scale variabilities may be recovered by anisotropic Kriging. In standard Ordinary or Universal Kriging methods, the local variations are overlooked due to the predomination of the trend.



a) b)
 Figure 3: TEC map of Turkey with Isotropic Ordinary Kriging at 1200 UT on a) July 4, 2009 b) July 22, 2009. The black dots indicate CORS-TR stations.

4. Conclusion and Future Work

IONOLAB group is currently investigating new methods in space-time interpolation of TEC and automatic mapping of TEC with anisotropic Ordinary Kriging. The developed techniques will be implemented for all available data in TNPGN. The novel space-time interpolation algorithm will be tried for not only quiet, and disturbed days but also for stations that lack data before an earthquake in North Anatolian Fault. These results will form a basis for investigations on Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling models. Theoretical semivariogram functions will be based on particle swarm optimization of the experimental data and a look-up library will be formed. Optimum anisotropic semivariogram functions will also be investigated and appropriate Kriging algorithms will be developed.

5. Acknowledgments

This study is sported by TUBITAK EEEAG Grant No: 109E055

7. References

1. F. Arikan, C.B. Erol and O. Arikan, "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data," *Journal of Geophysical Research-Space Physics* , **108(A12)**, 2003,), pp. 1469 -1480.
2. F. Arikan, C.B. Erol, and O. Arikan, "Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period," *Radio Science* , **39(6)**, RS6012, 2004.
3. H. Nayir, F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol, "Total Electron Content Estimation with Reg-Est", *J. Geophys. Res - Space Physics* , **112(A11313)**, 2007, pp. 1-11.
4. F. Arikan, H. Nayir, U. Sezen and O. Arikan, "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC," *Radio Science* , **43, RS4004**, 2008, pp. 1-13.
5. I. Sayin, F. Arikan, and O. Arikan, "Regional TEC Mapping with Random Field Priors and Kriging," *Radio Science* , **43, RS5012**, 2008, pp. 1-14.
6. Yilmaz, A., K. E. Akdogan, and M. Gurun, "Regional TEC mapping using neural networks," *Radio Science*, **44, RS3007**, 2009.
7. O. Arikan, F. Arikan, C.B.Erol, "3-D Ionospheric Tomography with Random Field Priors," in K. Tas, J.A. Tenreiro Machado and D. Baleanu (eds), *Mathematical Methods in Engineering* , Netherlands, Springer, 2007, pp. 335-334.
8. O. Arikan, F. Arikan, and C.B. Erol, "Computerized ionospheric tomography with the IRI model," *Advances in Space Research* , **39**, 2007, pp. 859-866.
9. O. Erturk, O. Arikan, F. Arikan, "Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time," *Advances in Space Research* , **43**, 2009, pp. 1702-1710.
10. C.B. Erol and F. Arikan, "Statistical analysis of the ionosphere using GPS signals," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* , **19(3)**, 2005, pp. 373 - 387.
11. N. Turel and F. Arikan, "Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content," *Radio Science*, **45, RS6016**, 2010, pp. 1-10.
12. S. Karatay, F. Arikan, O. Arikan, "Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere", *Radio Science*, **45, RS5012**, 2010, pp. 1-12.
13. I. Sayin, F. Arikan, K.E. Akdogan, "Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring," *Radio Science*, **45, RS6018**, 2010, pp. 1-9.
14. T.L. Gulyaeva, "Storm time behavior of topside scale height inferred from the ionosphere-plasmasphere model driven by the F2 layer peak and GPS-TEC observations," *Advances in Space Research*, doi: 10.1016/j.asr.2010.10.025, 2010.

Online Application of W-index, foF2 and hmF2 Maps using IRI-Plas and IGS-TEC

Feza Arikan¹, Umut Sezen¹, Tamara Gulyaeva², Onur Cilibas¹

1 Hacettepe University, Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

2 IZMIRAN, Troitsk, Moscow Region, Russia

Ionosphere is a key player in Space Weather applications. Ionosphere, which is primarily ionized by solar radiation, is the plasma layer of the atmosphere. The most important parameter of ionosphere is Electron Density, yet there are not direct measurement methods for this time and space varying variable. Ionosonde measurements, which are sparsely distributed, are far from determining world wide distribution of the critical frequency, foF2, and maximum height, hmF2, of the highest ionization layer, F2. Another important measurable quantity is Total Electron Content (TEC). TEC is defined as the line integral of electron density in a ray path. TEC estimates, that are obtained from Global Positioning Satellite (GPS) System and presented by IGS analysis centers, provide a cost-effective means for obtaining world wide distribution of 2-D ionospheric view. International Reference Ionosphere extended to Plasmasphere (IRI-Plas) is the latest and most developed ionospheric model, which can input TEC, foF2 and hmF2 values as an input and can output desired parameters for a region that extends to GPS orbit of 20,000 km. Since IRI-Plas refers to monthly median values of parameters, input of critical parameters is important in scaling the model values towards actual ionospheric variability. Recently introduced W-index provides a new measure of ionospheric and geomagnetic storms. In this study, we will present two online applications for obtaining global distribution of foF2 and hmF2 maps and W-index maps on www.ionolab.org web site. Global Ionospheric Maps (GIM) from IGS centers will be used as an input to IRI-Plas and W-index program and world wide distribution of foF2, hmF2 and W-index will be provided in a movie format for major geomagnetic storms. In the future, the dates of online maps will be chosen by the user.

This study is supported by joint grants from TUBITAK EEEAG 109E055, TUBITAK EEEAG 110E296 and RFBR 11-02-91370-CT_a.



Investigation of Ionospheric Precursors of 23 October 2011, Mw=7.2 Earthquake in Van, Turkey

M. N. Deviren (1), F. Arikan (2), U. Sezen (3), and O. Arikan (4)

(1) Hacettepe University, Ankara, Turkey (mncatdeviren@gmail.com), (2) Hacettepe University, Ankara, Turkey (arikan@hacettepe.edu.tr), (3) Hacettepe University, Ankara, Turkey (U.Sezen@ee.hacettepe.edu.tr), (4) Bilkent University, Ankara, Turkey (oarikan@ee.bilkent.edu.tr)

In recent years, a strong coupling between ionospheric disturbances and seismic activity has been observed through the increase of ion temperatures, critical frequencies of ionospheric layers and Total Electron Content (TEC) before high magnitude earthquakes. TEC is defined as total number of electrons over a ray path through the ionosphere. TEC can be estimated in a cost-effective way with dual-frequency Global Positioning Satellite (GPS) System receivers. The unit of TEC is given by TECU where $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$. In this study, the disturbances in daily TEC values before 23 October 2011, Mw=7.2 Earthquake in Van, Turkey are investigated using Turkish National Permanent GPS Network (TNPGN-Active). Earthquake Day Period (EDP) is chosen between October 1 and 31, 2011. Daily TEC values, for each station and each day, are estimated as IONOLAB-TEC (www.ionolab.org) with 30 s time resolution. EDP-TEC values are compared with an Average Quiet Day TEC (AQDT) which is obtained by averaging the TEC values between 25 and 28 March, 2011. Statistical comparison is accomplished using Symmetric Kullback-Leibler Divergence (SKLD), which is also a method for measuring entropy of a system. It has been previously observed that SKLD is a better method for measuring the amount of disturbances compared to L2 norm and cross-correlation coefficient. AQDT is also compared with magnetically Quiet Day Period (QDP) from 25 to 28 April, 2011, during which Kp and Dst indices indicate a very quiet ionospheric and magnetospheric period. Also, in order to measure the variability between the consecutive days, TEC values for each day during EDP and QDP are compared with the TEC values of the following day. A third measure of W-index is also applied to identify the local disturbances in the ionosphere, where TEC of a given day is compared to the median of seven days prior to the day of investigation logarithmically. Since W-index is obtained for each epoch, the within-the-day variability can also be monitored. It has been observed that peak TEC values for all stations in TNPGN increase 10 to 15 TECU two days prior to the earthquake. The SKLD values for comparison of EDP and AQDT also peak on 21st of October, 2011, two days prior to the earthquake. Since ionospheric disturbance can be observed on all days prior to the earthquake, comparison of TEC for consecutive days for each station using SKLD does not provide extra information. The W-index values indicate that there may be small scale variability for stations closer to the earthquake epicenter. When compared with previous earthquakes that occurred in Turkey with magnitudes 4.5 and 5.2 on Richter scale, this 7.2 magnitude earthquake has been felt as an ionospheric disturbance for stations especially on Northern Anatolian Fault. The results also indicate the need for constant monitoring and statistical decision theory for detection of earthquake precursors.

This study is supported by TUBITAK EEEAG Grant 109E055.



Application of Modified Particle Swarm Optimization Method for Parameter Extraction of 2-D TEC Mapping

C. Toker (1), Y. E. Gokdag (2), F. Arikan (3), and O. Arikan (4)

(1) Hacettepe University, Ankara, Turkey (cenk.toker@ee.hacettepe.edu.tr), (2) Hacettepe University, Ankara, Turkey (yungok05@hacettepe.edu.tr), (3) Hacettepe University, Ankara, Turkey (arikan@hacettepe.edu.tr), (4) Bilkent University, Ankara, Turkey (oarikan@ee.bilkent.edu.tr)

Ionosphere is a very important part of Space Weather. Modeling and monitoring of ionospheric variability is a major part of satellite communication, navigation and positioning systems. Total Electron Content (TEC), which is defined as the line integral of the electron density along a ray path, is one of the parameters to investigate the ionospheric variability. Dual-frequency GPS receivers, with their world wide availability and efficiency in TEC estimation, have become a major source of global and regional TEC modeling. When Global Ionospheric Maps (GIM) of International GPS Service (IGS) centers (<http://iono.jpl.nasa.gov/gim.html>) are investigated, it can be observed that regional ionosphere along the midlatitude regions can be modeled as a constant, linear or a quadratic surface. Globally, especially around the magnetic equator, the TEC surfaces resemble twisted and dispersed single centered or double centered Gaussian functions.

Particle Swarm Optimization (PSO) proved itself as a fast converging and an effective optimization tool in various diverse fields. Yet, in order to apply this optimization technique into TEC modeling, the method has to be modified for higher efficiency and accuracy in extraction of geophysical parameters such as model parameters of TEC surfaces.

In this study, a modified PSO (mPSO) method is applied to regional and global synthetic TEC surfaces. The synthetic surfaces that represent the trend and small scale variability of various ionospheric states are necessary to compare the performance of mPSO over number of iterations, accuracy in parameter estimation and overall surface reconstruction. The Cramer-Rao bounds for each surface type and model are also investigated and performance of mPSO are tested with respect to these bounds. For global models, the sample points that are used in optimization are obtained using IGS receiver network. For regional TEC models, regional networks such as Turkish National Permanent GPS Network (TNPNGN-Active) receiver sites are used.

The regional TEC models are grouped into constant (one parameter), linear (two parameters), and quadratic (six parameters) surfaces which are functions of latitude and longitude. Global models require seven parameters for single centered Gaussian and 13 parameters for double centered Gaussian function. The error criterion is the normalized percentage error for both the surface and the parameters. It is observed that mPSO is very successful in parameter extraction of various regional and global models. The normalized reconstruction error varies from 10^{-4} for constant surfaces to 10^{-3} for quadratic surfaces in regional models, sampled with regional networks. Even for the cases of a severe geomagnetic storm that affects measurements globally, with IGS network, the reconstruction error is on the order of 10^{-1} even though individual parameters have higher normalized errors. The modified PSO technique proved itself to be a useful tool for parameter extraction of more complicated TEC models.

This study is supported by TUBITAK EEEAG under Grant No: 109E055.



A Novel Algorithm for Cycle Slip Detection and Repair

U. Sezen (1) and F. Arikan (2)

(1) Hacettepe University, Ankara, Turkey (U.Sezen@ee.hacettepe.edu.tr), (2) Hacettepe University, Ankara, Turkey (arikan@hacettepe.edu.tr)

Accurate and reliable estimation of ionospheric parameters are very important for correct functioning of communication, navigation and positioning satellite systems. In recent years, dual-frequency GPS receivers are widely used for estimation of Total Electron Content (TEC), which is defined as the line integral of the electron density along a ray path. Since both electron density and TEC are functions of solar, geomagnetic, gravitational and seismic activity, any disturbance along the ray path can be detected using GPS receiver observables. It is observed that, with the development of recent sophisticated receivers, disruptions due to the receiver antenna, hardware or outside obstructions are minimized. Most of the observed sudden disturbances are signal phase lock losses due to ionosphere. These sudden phase shifts are named as cycle slips and if not corrected, they may lead to positioning errors or incorrect TEC estimates. There are many methods in the literature that deal with cycle slips and their repairs, yet these methods are not matured to detect all kinds of cycle slips. Most algorithms require double differencing, and/or complicated Kalman Filters, Wavelet transforms, Neural Network models, and integration of external INS systems. In this study, we propose a fast and efficient algorithm for identifying the cycle slips on individual observables, classifying them for future investigations and finally repairing them for more accurate and reliable TEC estimates. The algorithm traces the pseudorange and phase observables and computes the geometry free combinations of L4 and P4. The sudden disturbances on L1, L2, P1, C1 and P2 are classified and noted for further use. Most of the cases, the disruptions are on phase observables, yet for a few occasions, a sudden disturbance is also observed on pseudorange observables. The algorithm, then, checks the epoch section where P4 exists continually. When a disruption on L1 or L2 occurs, it becomes evident on L4. When P4 and L4 sections are compared with each other, with the use of a common base, the sudden disruptions up to three epochs can be corrected using second order interpolation. For disruptions that continue for more than three epochs are considered to be separate sections and treated within that epoch section. Any cycle slip occurring within an epoch section is corrected efficiently using thresholds based on cumulative mean of the derivatives. With the efficient repair of cycle slips, Slant TEC (STEC) values can be reliably estimated, and by categorizing the cycle slips with respect to the observables, satellite and epoch, the reason of disturbance can be identified. The cycle slip detection and repair algorithm is incorporated into the web version of IONOLAB-TEC and they can be reached presently from the site www.ionolab.org.

This study is supported by TUBITAK EEEAG under Grant No: 109E055.

Assimilating the IRI-Plas model to the ionospheric hourly maps of GPS-TEC to produce the artificial foF2 and hmF2 global maps

T.L. Gulyaeva¹, F. Arikani², M. Hernandez-Pajares³, I. Stanislawski⁴, U.Sezen²

¹ IZMIRAN, 142190 Troitsk, Moscow Region, Russia gulyaeva@izmiran.ru

² Department of EEE, Hacettepe University, Beytepe, Ankara 06800, Turkey arikan@hacettepe.edu.tr

³ Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) Barcelona, Spain manuel@ma4.upc.edu

⁴ Space Research Center, PAS, Warsaw, Poland stanis@cbk.waw.pl

Abstract

The requirement for quasi-real-time products based upon current ionospheric specification has increased the necessity and importance of the real-time ionospheric models. For using the International Reference Ionosphere extended to the plasmasphere, IRI-Plas, in real-time, input of critical parameters is important to scale the model values towards actual ionospheric variability. Recently, IRI-Plas has been upgraded for assimilation of global maps of Total Electron Content (TEC). When one-to-one correspondence is established between a value of TEC at a given location on the Earth with a key parameter of Ne(h) profile, NmF2, the empirical hmF2 correction model associated with changes of NmF2 is derived from topside sounding data and applied by IRI-Plas code. TEC values are estimated using dual-frequency GPS receivers. TEC data are downloaded from the hourly Global Ionospheric Maps (GIM) of Polytechnical University of Catalonia (UPC), at <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>. Since October 2010, UPC is using a Kriging based interpolation scheme to generate hourly 'uhrg' TEC maps listed under the year and day in IONEX format. The maps are arranged from 87.5°N to 87.5°S in latitude with a resolution of 2.5°. In longitude, the maps extend from 180°W to 180°E in steps of 5°. The hourly TEC maps have time resolution of 1h from 0000 UT to 2400 UT but their availability via Internet is delayed by about 2 days due to insufficient stock of more recent source GPS-derived observations.

To fill the gaps in GIM-TEC for two recent days, the harmonic analysis is applied to the temporal changes of TEC, NmF2 and hmF2 at each grid point of a map for four preceding days similar to prediction of foF2. The harmonic analysis provides forecast of an ionospheric parameter 24 hours in advance. Also, each harmonic can be treated as a separate object of a particular physical meaning. Thus, the 1st harmonic of the diurnal variation of NmF2 and TEC depicts results of the ionosphere structure primarily ionized by solar radiation. The 2nd harmonic is related with half-diurnal variations of the plasma density separated on the Earth by the solar terminator. The higher order harmonics may be due to the solar wind energy input captured by the magnetosphere, transformed and dissipated in the polar upper atmosphere that triggers and drives ionospheric storm effects along the magnetic lines of force between the conjugate hemispheres.

IRI-Plas and world wide distribution of foF2 and hmF2 will be provided in a movie format for major geomagnetic storms. In the future, the dates of online maps will be chosen by the user on www.ionolab.org web site. Results of IRI-Plas modeling and forecasting the ionospheric parameters foF2, hmF2 and TEC in real-time for the network of magnetic-conjugate locations and in the numerical global ionospheric maps are provided at <http://www.izmiran.ru/services/iweather/>. The IRI-Plas is included in the project DIS-16457 of the International Standardization Organization for standard model of the Earth's ionosphere and plasmasphere.

This study is supported by the joint grant from TUBITAK EEEAG 110E296 and RFBR 11-02-91370-CT_a, and TUBITAK EEEAG 109E055.

IWG04-A001

A Novel Spatio-Temporal TEC Interpolation Algorithm for GPS Networks

Feza ARIKAN^{1#+}, M Necat DEVIREN¹, Orhan ARIKAN²

¹*Hacettepe University, Turkey*, ²*Bilkent University, Turkey*

[#]*Corresponding author: arikan@hacettepe.edu.tr* ⁺*Presenter*

Total Electron Content (TEC) is an important parameter to observe the trend and small scale variability of ionosphere for space weather applications. Dual-frequency GPS receivers provide a cost-effective means to observe TEC. Due to physical or operational problems, GPS signal reception can be disrupted or impaired. This causes gaps in TEC estimates either for a limited time period during the day or TEC may be lacking for the whole day. In this study, a robust space-time interpolation algorithm is proposed to fill the gaps in TEC data estimated from a GPS network. The algorithm is based on a least squares minimization technique similar to Kriging in spatial interpolation and cubic splines for temporal interpolation. These two methods are joined using a confidence coefficient that favors cubic splines at the gap ends and neighborhood spatial coefficients for the middle section of the gap. The joint space-time interpolation algorithm is applied to the data of Turkish National Permanent GPS Network (TNPNGN-Active) for 2009 to 2011. Each GPS station is centered in a 150 km radius neighborhood that has at least two other GPS stations. The TEC for each station is estimated using IONOLAB-TEC (www.ionolab.org) and through a log file the missing data are identified and classified. The TEC from neighbors are compared to median TEC to eliminate the specific problems related to station hardware. The neighbors that are representative are used for spatio-temporal interpolation. It is observed that missing TEC data for a GPS station can be robustly interpolated from its neighbors within a 150 km radius. The typical spatial interpolation coefficients are Gaussian distributed with specific mean and standard deviation for each neighborhood radius.

Supported by TUBITAK 109E055.

ST02-A007

Reconstruction of 3-D Ionospheric Electron Density Distribution by Using GPS Measurements and IRI-Plas Model

Orhan ARIKAN^{1#+}, Hakan TUNA¹, Feza ARIKAN², Tamara GULYAEVA³

¹*Bilkent University, Turkey*, ²*Hacettepe University, Turkey*, ³*Institute of Earth magnetism, ionosphere and radiowaves propagation, Russian Federation*

[#]*Corresponding author: oarikan@ee.bilkent.edu.tr* ⁺*Presenter*

Estimation of 3-D ionospheric electron density distribution (IEDD) at a given time is the ultimate goal of CIT. For this purpose, Slant Total Electron Content (STEC) estimates generated from dual frequency GPS receiver networks provide valuable information on IEDD. Even for a dense network of receivers, available estimates are too sparse to support a reliable non-model based reconstruction of IEDD. A novel approach is proposed for the reconstruction of IEDD that utilizes IRI-Plas model and STEC estimates obtained from GPS networks. The IEDD reconstruction problem is formulated as an optimization problem over a set of parameters, that quadratically model f_0F_2 and h_mF_2 surfaces. An optimization problem is formulated to minimize the fit error between the STEC estimates and the synthetically generated STEC values from the IRI-Plas model which admits at its input the parametrized f_0F_2 and h_mF_2 surfaces. To account for the physical dependence between f_0F_2 and h_mF_2 surfaces, an additional term is added to the fit error based cost function so that deviation of the surfaces from this physical relationship is also penalized. Once the optimal f_0F_2 and h_mF_2 surface parameters are obtained, the corresponding 3-D ionospheric electron density distribution is obtained as the collection of vertical electron density profiles generated by the IRI-Plas software when both f_0F_2 and h_mF_2 surface samples are provided as input. To avoid local minima, Particle Swarm Optimization is utilized in search for the global optimum. The superior performance of the proposed optimization approach is illustrated by using the data of Turkish National Permanent GPS Network with STEC estimates provided by IONOLAB-TEC (www.ionolab.org).

Supported by TUBITAK 109E055, 110E296 and RFBR 11-02-91370-CT_a.

ST23-17-A003

Comparison of IRI-Plas TEC Maps with Optimized foF2 and hmF2 Inputs for Magnetic Conjugate Regions

Feza ARIKAN^{1#}, Tamara GULYAEVA², Umut SEZEN¹, Onur CILIBAS³

¹*Hacettepe University, Turkey*, ²*Institute of Earth magnetism, ionosphere and radiowaves propagation, Russian Federation*, ³*FINTEK, Turkey*

[#]*Corresponding author: arikan@hacettepe.edu.tr* ⁺*Presenter*

International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) has proved itself as a versatile climatic model for monthly median values of critical ionospheric parameters. With recent modifications, Total Electron Content (TEC), critical frequency of F2 layer, foF2, and peak height of F2 layer, hmF2, can be input to IRI-Plas for further scaling of median outputs to instantaneous variability of ionosphere and plasmasphere. It has been shown that with Nonlinear Least Squares optimization, the ionospheric critical parameters can be modified using GPS-TEC values, and IRI-Plas works as a virtual ionosonde to produce critical ionospheric parameters. With Global Ionospheric Maps (GIM) TEC input, the IRI-Plas percent error in TEC estimates world wide reduces from 30% to 3% for a quiet day and 40% to 6% for a stormy day. In this study, regional TEC maps are used in optimization of ionospheric critical parameters. These optimized parameter sets are fed to IRI-Plas input to obtain foF2, hmF2 and IRI-TEC maps for two magnetic conjugate regions. It has been observed that for quiet days, the ionospheric critical parameters of magnetic conjugate regions are similar to each other. For geomagnetically disturbed days, these parameters can differ significantly, depending on the type of the storm.

Supported by TUBITAK 109E055, and by a joint grant of TUBITAK 110E296 and RFBR 11-02-91370-CT_a.

ST23-17-A005

Investigation on the Reliability of Earthquake Prediction Based on Ionospheric Electron Content Variation

Orhan ARIKAN^{1#}, Ali Alp AKYOL¹, Feza ARIKAN²

¹*Bilkent University, Turkey*, ²*Hacettepe University, Turkey*

[#]*Corresponding author: oarikan@ee.bilkent.edu.tr* ⁺*Presenter*

Total Electron Content (TEC) has been a basic parameter indicating the variability of ionosphere before strong earthquakes. Due to the lack of statistical reliability analysis of earthquake precursors, earthquake prediction from ionospheric parameters is considered to be controversial. In this study, reliability of earthquake prediction is investigated using the dense TEC data estimated from the Turkish National Permanent GPS Network. Detection signals at each receiver station of interest are generated as a set of distances between the computed daily TEC at the site and its estimate from the neighboring stations. For this purpose, the neighboring sites are separated into two sets as the sites that are closer than 150 km distance, and the sites that are within 150 to 300 km distance from the site of interest. Optimal coefficients of spatial interpolation are obtained for each set of neighboring sites that are specific to the site of interest and the sun-spot number of the date of interest. For the distance metric between the computed and estimated daily TEC values, normalized L2-Norm and Kullback-Leibler Divergence are used. Unlike previous results published on the subject, a thorough investigation is conducted for the detection and false-alarm performance of alternative detection techniques. For each earthquake of magnitude larger than 4 occurred between 2009 to 2011 in Turkey, the performance of detection is quantified. For those dates when there is no significant earthquake within a window of 10 days prior and after, the probability of false alarm is quantified. Since Turkey has different earthquake fault systems, the effect of the fault type to the performance of the detection will also be investigated.

Supported by TUBITAK 109E055 and 110E296.

Toplam Elektron İçeriği ile Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının İncelenmesi

Investigation of Litosphere-Ionosphere Coupling Using Total Electron Content

Seçil KARATAY, Feza ARIKAN, Orhan ARIKAN

1. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Fırat Üniversitesi
karatays@gmail.com
2. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr
3. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada Yerküresel Konumlama Sisteminden (YKS) elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri ile depremler arasındaki ilişki incelenmiştir. Deprem gününün de içinde olduğu 30 günlük zaman aralığında İyonosferin sakin olduğu günlerde, 2003-2008 yılları arasında Japonya'da meydana gelen farklı özellikteki beş deprem ve Mayıs 2008'de Çin'de meydana gelen deprem, çalışma kapsamında ele alınmıştır. Çalışmanın istatistiksel analizi için daha önce literatürde önerilen çapraz ilinti katsayı (İK) yöntemi ve yeni olarak Kullback-Leibler İraksaklığı (KLI) ile L2-Mesafesi (L2M) yöntemleri kullanılmıştır. TEİ üzerinde İK, KLI ve L2M yöntemleri ile istasyonlar ve günler arasında İyonosferin sakin ve bozulmalı durumları da göz önüne alınarak incelemeler yapılmıştır. Deprem zaman aralıklarında gözlenen etkiler ile sakin ve bozulmalı zaman aralıklarında gözlenen etkiler karşılaştırılmıştır. İK analizi yöntemiyle incelemelerde sismik hareketliliğin olduğu zamanlarda gözlenen anormalliklerin, sakin günler için seçilen zamanlarda da bulunabildiği ortaya çıkmıştır. Şiddeti 6.0'dan büyük olan depremler için sismik hareketliliğin yoğun olduğu ve bu anlamda tehlike arz eden bölgelere birbirine çok yakın YKS istasyonlarından elde edilecek TEİ ile uzay-zaman kestirimlerinin karşılaştırılmasının gelecek çalışmada ele alınmasının önemi ortaya konmuştur.

Abstract

In this study, the relation between Total Electron Content (TEC) estimates obtained from GPS and the earthquakes is examined. Five earthquakes between 2003-2008 occurred in Japan with different properties and China earthquake in May 2008 are chosen for the purpose. The 15-days period before and after the registered earthquakes are considered for the basis of this investigation. Also the TEC is computed for each GPS station for the time periods including Ionosphere quiet and disturbed days not without any serious earthquake in the region. For the statistical analysis, the cross correlation function (IK) which is used in the literature before, and the Kullback-Leibler Divergence (KLI) with L2-Norm (L2M) methods which are used for the first time in this context, are applied to the data sets. The computed values for IK, KLI and L2M are compared for both between different GPS stations where available and between consecutive days for the time periods in the data set. With IK analysis, the anomalies

existed in the earthquake time intervals are also observed for the quiet days data set. For the earthquakes with scale larger than 6, the possibilities of generating an alarm signal is more likely with a future detailed comparative study of the estimated TEC nearby GPS station estimates in space and time.

1. GİRİŞ

İyonosfer, Atmosfer'in yaklaşık 60-1000 km arasında, EUV ve X-ışınlarıyla şekillenen doğal plazma katmanıdır. İyonosfer katmanının en önemli parametresi zaman, konum, güneşin hareketliliği, ve jeomanyetik alana bağlı olarak değişim gösteren elektron yoğunluğudur. Elektron yoğunluğuna bağlı olan ve İyonosferin karakteristik yapısını ifade eden diğer bir parametre ise Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. Toplam Elektron İçeriği, 1 m² kesitli bir silindir boyunca toplam serbest elektron miktarıdır. Birimi TECU olup 1 TECU, 10¹⁶ elektron /m²'dir. TEİ kestirimi için yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. Bunlardan içinde en kullanışlı olanı Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) dir [1].

Son yıllarda yerkabuğundaki sismik hareketliliğin çeşitli modeller altında İyonosfere bağlaştığı ve iyon-elektron yoğunluğunu değiştirdiğine dair yoğun gözlemler yapılmıştır [2-5]. Bu etkileşimleri ve değişimleri incelemek için istatistiksel, fiziksel teoriler; elektron yoğunluğu, Toplam Elektron İçeriği (TEİ) gibi parametrelerinin kullanıldığı farklı modeller ortaya konmuştur. Litosfer'de başlayan anormal bir işleyişin, İyonosferde elektron yoğunluğunda ve buna bağlı bir parametre olan TEİ değerlerinde de büyük ölçekli düzensizlikler yarattığı ileri sürülmektedir.

Literatürde İyonosferin deprem öncesi hareketliliğini inceleyen modeller İlinti Analizi [3,4], Çeyrekler Arası Alan (IQR-Inter Quartile Range) Analiz [6,7], TEİ Farkı Analizi [8], İyonosferik Düzeltme [8,9] başlıkları altında toplanabilir. Bunlardan öne çıkan ve deprem öncesi kestirimine olanak sağlamada daha başarılı bir yöntem olan ilinti analizidir [3,4]. İlinti analizi için, sakin ve jeomanyetik açıdan karışık günlerde İyonosonda ile ölçülen kritik frekans ve YKS ağlarıyla ölçülen Toplam Elektron İçeriğinin (TEİ) değişkenliği çalışılmıştır. Bu çalışma için iki ölçüm noktası kullanılmıştır: Birincisi, depremin etki alanı içindeki "alıcı-sensör"; ikincisi, bu bölge dışında kalan "kontrol-alıcı"dır [3,4]. Bu çalışmalarda Rusya aktif sismik bölgesi içinde belirlenen alıcı sensör ve kontrol alıcılar ile Batı Pasifik alanında; Rusya'nın uzak doğusu, Tayvan ve Japonya'daki bir dizi deprem incelenmiştir. Bu yöntemle, Dik Toplam Elektron

İçeriği (VTEC-Vertical Total Electron Content) değerleriyle çapraz-ilitinti katsayıları hesaplanmıştır. Ocak 2003 Collima depreminde çapraz-ilitinti katsayısının, deprem tarihinden beş gün önce 0.7'ye, sekiz gün önce 0.9'un altına kadar düştüğü gözlenmiştir. Aynı işlemler Aralık 2003 San Simeon depreminde de test edilmiştir. Bu incelemelerde de deprem gününden 2, 4 ve 8 gün önceki günlerde sırasıyla 0.5, 0.65 ve 0.6, 0.65 değerlerine düştüğü kaydedilmiştir. Bu keskin düşüşlerin, deprem habercisi bir anormallik olduğu ileri sürülmüştür [3,4,10].

İki sayısal dağılım arasında benzerlik ve farklılıkları belirlemekte sık sık kullanılan yöntemler arasında Kullback-Leibler İraksaklığı (KLI) [11,12] ve L2-Mesafesi (L2M) [13] sayılabilir. KLI ve L2M analizleri, TEİ verileri üzerinde deprem etkisi ile bozulmayı araştırmak için daha önce hiç kullanılmamıştır.

Bu çalışmada İK, KLI, L2M yöntemleri, sismik hareketlilik ile İyonosferde iyon ve elektron dağılımları arasındaki olası ilişkiyi araştırmak amacıyla, TEİ verileri üzerinde kullanılmıştır. Çalışma için 2003–2008 yılları arasında Japonyada meydana gelen ve büyüklüğü 5.9'dan başlayan beş deprem ile 12 Mayıs 2008 tarihinde Çin'in Şiyan bölgesinde meydana gelen 7.9 büyüklüğünde olan deprem seçilmiştir. Kullanılan yöntemler Bölüm 2'de, inceleme sonuçları Bölüm 3'te sunulmuştur.

2. YÖNTEM

Dik Toplam Elektron İçeriği (VTEC), dünya üzerindeki bir YKS alıcısına göre yerel zenit doğrultusunda hesaplanan toplam serbest elektron miktarıdır. d. gün için hesaplanan İONOLAB-TEC VTEC verileri $\mathbf{x}_{u,d}$ vektörüyle ifade edilebilir:

$$\mathbf{x}_{u,d} = [x_{u,d}(1), \dots, x_{u,d}(n), \dots, x_{u,d}(N)]^T \quad (1)$$

Burada u, alıcı numarasını; N, toplam ölçüm sayısını; n, örnek numarasını ($1 \leq n \leq N$); T ise matris devriğini göstermektedir.

Seçilen birinci istasyona ait günlük VTEC verileri \mathbf{x}_u vektörüyle, ikinci istasyona ait günlük VTEC verileri \mathbf{x}_v vektörüyle tanımlanırsa, N_i başlangıç N_s bitiş örnek numarası ve N_T toplam örnek sayısı olmak üzere bu iki istasyonun d. gününe ait günlük çapraz ilitinti fonksiyonu $\mathbf{r}_{u,v;d}$, aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [3,4]:

$$\mathbf{r}_{u,v;d} = \frac{1}{N_T \sigma_{u,d} \sigma_{v,d}} \sum_{n=N_i}^{N_s} (x_{u,d}(n) - \bar{x}_{u,d})(x_{v,d}(n) - \bar{x}_{v,d}) \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\bar{x}_{u,d}$ ve $\bar{x}_{v,d}$ sırasıyla d. gün için N_T örnek üzerinden $\mathbf{x}_{u,d}$ ve $\mathbf{x}_{v,d}$ vektörlerinin ortalama değerini $\sigma_{u,d}$ ve $\sigma_{v,d}$ ise bu vektörlerin standart sapmasını vermektedir. Bu çalışmada Tablo 1'de verilen tüm istasyonlar için deprem öncesi ve deprem sonrası 15 gün aralığındaki tüm ardışık günler için Eşitlik 3 ile tanımlanan öz-ilitinti katsayıları da hesaplanmıştır. Aynı istasyonun ardışık d. ve d+1. günleri için özilitinti katsayısı

$$\mathbf{r}_{u,d;d+1} = \frac{1}{N_T \sigma_{u,d} \sigma_{u,d+1}} \sum_{n=N_i}^{N_s} (x_{u,d}(n) - \bar{x}_{u,d})(x_{u,d+1}(n) - \bar{x}_{u,d+1}) \quad (3)$$

eşitliği ile tanımlanmıştır.

TEİ veri setleri üzerine olasılık ve bilgi teorisinde kullanılan, farklı bir istatistiksel analiz yöntemi olan KLI analizi uygulanmıştır. Bu yöntem için veri setindeki değerler, mevsimsel ve yıllık farkları ortadan kaldırmak için önce düzelenmiştir. İki istasyonun d. günündeki $\mathbf{x}_{u,d}$ ve $\mathbf{x}_{v,d}$

vektörlerinin günlük deneysel Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları (OYF) $\hat{\mathbf{P}}_{u,d}$:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u,d} = \mathbf{x}_{u,d} \left(\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u,d}(n) \right)^{-1} \quad (4)$$

şeklinde yaklaşılmıştır. u ve v istasyonları arasında Eşitlik 4'te verilen yaklaşımlar yardımıyla elde edilen ve Eşitlik 5 ile ifade edilen simetrik Kullback-Leibler İraksaklığı ifadesi kullanılmıştır [11,12,14,15]:

$$\text{KLD}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{v,d}) = \text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v,d}) + \text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{v,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u,d}) \quad (5)$$

Burada $\text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v,d}), \text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{v,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u,d})$ fonksiyonları:

$$\text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v,d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{u,d}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{u,d}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{v,d}(n)} \right) \quad (6)$$

$$\text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{v,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u,d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{v,d}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{v,d}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{u,d}(n)} \right)$$

eşitlikleriyle ifade edilmiştir. Bir istasyonun birbirini izleyen d. ve d+1. günleri arasındaki simetrik KLI hesaplamaları için

$$\text{KLD}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1}) = \text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1}) + \text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d+1} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u,d}) \quad (7)$$

eşitliği kullanılmıştır. u istasyonunun sakin günler zaman aralığındaki toplam N_d kadar gününden elde edilen ortalama vektörü Eşitlik 8'deki gibi tanımlanmıştır.

$$\bar{\mathbf{x}}_{u;d_i-d_s} = \frac{1}{N_d} \sum_{n=d_i}^{d_s} \mathbf{x}_{u;n_d}(n) \quad (8)$$

Burada İyonosferin sakin gün zaman aralığında d_i başlangıç gününü, d_s bitiş gününü temsil etmektedir. Eşitlik 8 ile tanımlanan sakin günlerin ortalama vektörü ile bir istasyonun deprem ve bozulmalı günleri arasındaki Eşitlik 9 ile ifade edilen KLI değerleri hesaplanmıştır:

$$\text{KLD}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}) = \text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}) + \text{K}(\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u,d}) \quad (9)$$

Tablo 1'de yer alan depremler için Eşitlik 4'ten yararlanılarak elde edilen düzelenmiş değerler ile Eşitlik 10 ile ifade edilen L2M değerleri hesaplanmıştır. L2M, Olasılık Yoğunluk Fonksiyon vektörleri arasındaki farkın bir ölçütüdür [13]:

$$\text{L2M}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v,d}) = \sqrt{\sum_{n=N_i}^{N_s} (\hat{\mathbf{P}}_{u,d}(n) - \hat{\mathbf{P}}_{v,d}(n))^2} \quad (10)$$

Bir istasyonun ardışık günlerindeki $\hat{\mathbf{P}}_{u,d}$, $\hat{\mathbf{P}}_{u,d+1}$ fonksiyonları için $\text{L2M}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u,d+1})$ ve sakin günlerinin ortalama vektörü $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s}$ için $\text{L2M}(\hat{\mathbf{P}}_{u,d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i-d_s})$ hesaplanmıştır. Bu bölümde önerilen istatistiksel yöntemlere ait uygulamalar Bölüm 3'te sunulmuştur.

3. SONUÇLAR

Bölüm 2'de verilen eşitliklerle tanımlanan İK, KLI ve L2M yöntemleri, 2003-2008 yılları arasında Japonya'da meydana gelen beş depreme ve Mayıs 2008 Çin depremine uygulanmıştır. Seçilen depremler Tablo 1'de tarih, zaman (Greenwich Saati-GS), coğrafik konum (enlem, boylam-derece), Richter ölçeğine göre büyüklük (M), yer yüzeyine derinlik (z-km) ve deprem merkezine en yakın seçilen YKS istasyonu verilmiştir [16]. Tabloda E1, E2, E3, E4, E5, E6

olarak kodlanan deprem merkezleri sırasıyla Hokkoido, Honşu, Honşu, Kiyuşiyu, Honşu, Şiyan bölgelerini temsil etmektedir.

Tablo 1: Depremlerin konum, zaman, büyüklük ve derinlik ve seçilen merkez istasyon göstergesi

yer	tarih	GS	°K	°D	M	z	Merkez İstasyon
E1	25.09 2003	1950	41	143	8.3	27	mizu
E2	05.09 2004	1457	33	137	7.4	10	kgni
E3	13.06 2008	2343	39	140	6.9	10	mizu
E4	11.06 2006	2001	33	131	6.3	154	usud
E5	23.07 2005	0734	35	139	5.9	65.6	mtka
E6	12.05 2008	0628	30	103	7.9	19	kunm

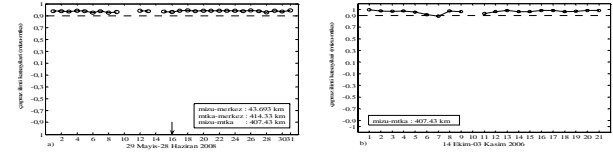
Tablo 2’de çalışmada kullanılan, deprem aralıklarında sürekli çalışan YKS istasyonlarının konum ve kodları verilmiştir. Bu istasyonlara ait YKS (RINEX) uydu yörünge ve uydu yanlışlığı verileri IGS merkezlerinin (IGS), IONEX formatında alınmıştır. Bu dosyalar D-TEİ yöntemi ile birleştirilmiş ve IONOLAB-TEC yüksek zaman çözünürlüklü gürbüz TEİ değerleri elde edilmiştir [17,18,19]. Çalışma için seçilen İyonosferin sakin zaman aralığında ve deprem günlerinde İyonosferik fırtına yoktur [20]. Tablo 1’de verilen E1-E5 depremlerini karşılaştırmak için İyonosferin sakin günleri 14 Ekim-03 Kasım 2006 aralığında, bozulmalı günleri ise 14 Ekim-09 Kasım 2003 aralığında seçilmiştir.

Tablo 2: Çalışma kapsamında kullanılan verilerin ait olduğu istasyonlar ve koordinatları

YKS İstasyonu	Alıcı Kodu	Enlem	Boylam
Koganei, Japonya	kgni	35.5 °K	139.4° D
Kashima, Japonya	ksmv	35.7 °K	140.6° D
Mizusawa, Japonya	mizu	38.9 °K	141.1° D
Mitaka, Japonya	mtka	35.4 °K	139.5° D
Tsukuba, Japonya	tskb	35.9 °K	140.0° D
Usuda, Japonya	usud	35.9 °K	138.3° D
Yuzh.-Sakh, Rusya	yssk	46.8 °K	142.7° D
Kunming, Çin	kunm	24.8 °K	102.8° D

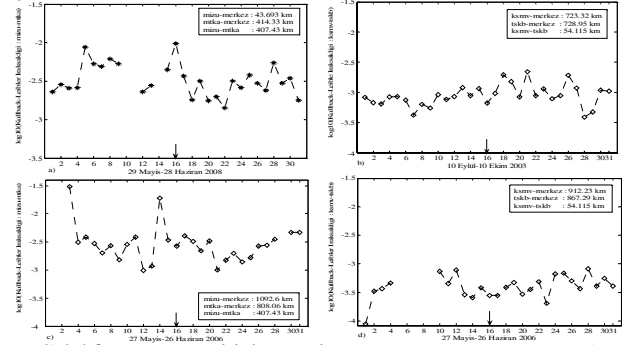
E1-E5 depremleri için Tablo 2’de yer alan ilk yedi istasyona ait veriler kullanılarak Eşitlik 2 yardımıyla elde edilen istasyonlar arası çaprazlama İK analizinde 1736, sakin ve bozulmalı günler için ise toplam 435 İK hesaplanmıştır. Bu incelemelerde ele alınan depremler için şiddeti 6’dan küçük olan depremlerde birbirine uzaklığı 119-208 km olan istasyonların çaprazlamasında 0.6 değerinde dört katsayı hesaplanmıştır. Deprem öncesi günleri için istasyonlar arası İK değerinin deprem şiddeti ile doğru orantılı olarak daha fazla gün için 0.9 değerinin altına düştüğü gözlenmiştir. Merkez istasyonun, deprem merkezine uzaklığına göre 30-70 km ve 70-300 km mesafelerinde istasyonlar arası katsayı değerlerinde 0.9’un altına düşen değer gözlenmemiştir. Merkez istasyonun deprem merkezine yakınlığı 300 km’den, diğer YKS istasyonlarına uzaklığı ise 30 km’den az iken İK 0.9 değerinin altına bir kez düşmüştür. Deprem merkezine yakınlığı 300 ile

800 km arasındayken İK değerlerinin yaklaşık %2 oranında 0.9’un altına düştüğü gözlenmiştir. Deprem merkezine 100-300 km alanda bulunan istasyonlar arasında ilinti yüksek, 300 km mesafeden büyük yerlerde ise ilinti daha düşük çıkmıştır. Birbirine en fazla 20 km mesafede bulunan istasyonlar arasında deprem günleri, sakin ve bozulmalı günler aralığında toplam 2171 İK değerinden sadece bir tanesinin 0.9’un altına düştüğü gözlenmiştir. Mesafe 20-70 km arasında olduğunda 0.9’dan küçük deprem günlerinde dört, sakin günlerde bir, bozulmalı günlerde ise bir değer gözlenmiştir. İstasyonlar arası uzaklık 70 km’nin üstüne çıktıkça deprem günlerinde, sakin ve bozulmalı günlerde 0.9’un altında kalan katsayı artmıştır. Birbirine en fazla 20 km mesafede bulunan istasyonlarda deprem dönemleri de dahil ilinti yüksek çıkmıştır. Örnek olarak Şekil 1-a’da E3 depreminde mizu-mtka istasyonları arası İK değerleri, Şekil 1-b’de bu istasyonların sakin günlerindeki İK değerleri verilmiştir. Deprem merkezine 43.6 km mesafede olan mizu istasyonu ve bu istasyona 407.4 km bulunan mtka istasyonu arasında deprem günlerinde İK değerlerinin 0.9 ile 1 arasında değiştiği, aynı istasyonların sakin günlerdeki İK değerlerinde 7. günde katsayının 0.8’e kadar düştüğü görülmektedir.



Şekil 1.a) E3 depremi için mizu-mtka ve b) sakin günler için mizu-mtka istasyonları arası çapraz ilinti katsayıları

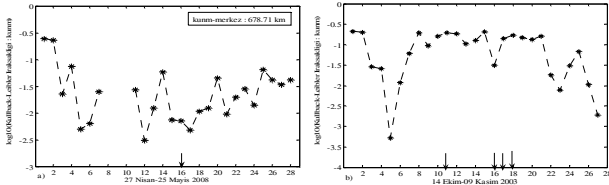
E1-E5 depremleri için Tablo 2’de verilen ilk yedi istasyonla Eşitlik 5 ve Eşitlik 10 kullanılarak istasyonlar arası çaprazlama 2604 KLI değeri ve 2604 L2M değeri hesaplanmıştır. Birbirine en fazla 70 km uzaklık olan istasyonlar arasında KLI değerlerinde sakin ve deprem günleri için fark gözlenmemiştir. Aralarındaki uzaklık 70 km’den fazla olduğunda ve depremin ölçeği küçüldükçe sakin, bozulmalı günler ve deprem günleri arasındaki fark azalmıştır. L2M analizlerinde de KLI sonuçlarına paralel sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2-a’da birbirine 407 km mesafe bulunan mizu-mtka istasyonlarına ait E1 depremi için ve Şekil 2-c’de E4 depremi için KLI değerleri verilmiştir. Aynı deprem için birbirine daha yakın olan 54 km mesafedeki ksmv-tskb istasyonları arası değerler Şekil 2-b’de E1 depremi için Şekil 2-d’de E4 depremi için gösterilmiştir. İstasyonlar arası mesafe azaldıkça ve deprem şiddeti arttıkça değerlerin sakin günler için oluşan eşik değerine yaklaştığı gözlenmiştir.



Şekil 2. E3 depremi için a) mizu-mtka b) ksmv-tskb ve E4 depremi için c) mizu-mtka d) ksmv-tskb istasyonları arası log10(KLI) değerleri

Eşitlik 3 ve 7 ve $L2M(\hat{P}_{u;d} \setminus \hat{P}_{u;d+1})$ fonksiyonu ile elde edilen E1-E6 depremleri için bir istasyonun deprem günlerinde deprem öncesi, deprem sonrası, sakin ve bozulmalı günlerde KLI ve L2M değerlerinin ardışık günler için ani değişiklik göstermediği gözlenmiştir. Ardışık sakin ve bozulmalı günlerde İK değerleri 0.8 ile 1 arasında olmasına karşın deprem günlerinde ilintiler depremden 2 gün önce -0.8 3 gün önce -0.7, 1 gün önce 0.3 değerlerine kadar düşmüştür.

Eşitlik 9 ve $L2M(\hat{P}_{u;d} \setminus \hat{P}_{u;d-d_s})$ ile ifade edilen eşitlik E1-E6 depremlerine ve bozulmalı günlere uygulanmıştır. Sakin gün aralığında ortalama sakin gün elde edilmiş ve düzleşmiştir. Ortalama Değer Sakin Gün (ODSG), E1-E6 depremleri tüm istasyonları deprem öncesi ve deprem sonrası 15 günlük zaman aralıkları için ve tüm YKS istasyonlarında hesaplanan 28 günlük bozulmalı gün aralıkları için incelenmiştir. ODSG-deprem eşleşmesi için KLI ve L2M farkı az, ODSG-bozulmalı eşleşmesi için ise daha büyük çıkmıştır. Bozulmalı günlerde farkın büyük olmasına karşın İK değerleri 0.8 ile 1 arasında değişmiştir. E6 depremi için deprem merkezine 678 km uzaklıkta bulunan istasyonun bozulmalı günlerine ait değerlerinin deprem günlerinden daha yüksek olduğu Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3.a) E6 depremi için kum ve b) bozulmalı günler için kum istasyonu log10 KLI değerleri

TARTIŞMA

Bu çalışmada Yerküresel Konumlama Sisteminden (YKS) elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri ile depremler arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu çalışmanın için daha önce kullanılan İK analizi ve yeni olarak KLI ile L2M analizleri uygulanmıştır. Yedi YKS istasyonu üzerinde sakin, bozulmalı ve deprem günlerinde ilk olarak çaprazlama yapılarak uzay boyutunda İK, KLI ve L2M hergün için hesaplanmıştır. İK analizi yöntemiyle seçilen depremlerde deprem öncesi belirti niteliği taşıyan ve aynı depremin aynı istasyonlarında kendini tekrar eden etkiler gözlenmemiştir. Buna karşın depremin ölçeği büyüdükçe sakin, bozulmalı günler ve deprem günleri arasındaki fark artmıştır. Bu nedenle İK yöntemiyle istasyonlar arası çaprazlama yapılarak deprem öncesi belirtiler elde etmek ve deprem kestirimi yapmak, aynı belirtilerin sakin günlerde de ortaya çıkmasından ötürü çok zordur. İkinci olarak tek bir istasyonun birbirini izleyen günleri arasında üç yöntem üç zaman aralığı için incelenmiştir. Bu şekilde deprem öncesi, deprem sonrası, sakin ve bozulmalı günlerde KLI ve L2M değerlerinin ardışık günler için ani değişiklik göstermediği gözlenmiştir. İK değerlerinde deprem günlerinde sakin ve bozulmalı günlere göre ilinti çok zayıf çıkmıştır. Son olarak üç yöntem düzleşmiş ODSG-deprem ve ODSG-bozulmalı eşleşmelerine uygulanmıştır. Deprem eşleşmesi için KLI ve L2M farkı küçük, bozulmalı eşleşmesi için ise daha büyük gözlenmiştir. Bozulmalı günlerde farkın büyük olmasına karşın İK değerlerinde yüksek ilinti katsayısı bulunmuştur. Bu çalışmada, verilerin ışığında İK, KLI ve L2M yöntemlerinin tek başlarına bir deprem alarm sinyali oluşturulmasına

yetmeyeceği ve gelecek çalışmaların birbirine yakın konulanmış YKS istasyonlarının uzay-zaman TEİ kestirimleri üzerinden yapılması gerektiği ortaya konmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK EEEAG 105E171 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Nayir, H., 2007, Yerküresel Konumlama Sistemi işaretleri kullanarak İyonküre toplam elektron içeriği kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-6.
- [2] Ondoh, T., Seismo-Ionospheric Phenomena, Advanced in Space Research, 26, 8.
- [3] Pulinets, S., A., 2004, Ionospheric precursors of earthquakes; recent advances in theory and practical applications, TAO, Vol. 15, No. 3, 413-435.
- [4] Pulinets, S., A., Gaivoronska, T., B., Contreras Leyva, A., Ciraolo, I., 2004, Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquake, Natural Hazards and Earth Systems Sciences 4, 697-702.
- [5] Liu J. Y., Chen Y. I., Pulinets S. A., Tsai Y. B., Chuo Y. J., 2000, Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes, Geophysical Research Letters, 27, 3113-3116.
- [6] Liu, J., Y., Chuo, Y., J., Shan, S., J., Tsai, Y., B., Chen, Y., I., Pulinets, S., A., Yu, S., B., 2004, Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements, Annales Geophysicae 22, 1585-1593.
- [7] Chuo, Y., J., Chen, Y., I., Liu, J., Y., Pulinets, S., A., (2001), Ionospheric f_oF2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area, Adv. Space Res. 27, 1305-1310.
- [8] Plotkin, V., V., 2003, GPS detection of ionospheric perturbations before the 13 february 2001 El Salvador earthquake, Natural Hazards and Earth Systems Sciences 3, 249-253.
- [9] Trigunait, A., Parrot, M., Pulinets, S., A., Li, F., 2004, Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event, Annales Geophysicae 22, 4123-4131.
- [10] Biqiang, Z., Weixing, W., Libo, L., Tian, M., 2007, Morphology in the total electron content under geomagnetic disturbed conditions: results from global ionosphere maps, Annales Geophysicae, 25, 1555-1568.
- [11] Fante, R., L., Signal Analysis and Estimation, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [12] Papoulis, A., Signal Analysis, McGraw-Hill Book Company, New York.
- [13] Kreyszig, E., Advanced Engineering Mathematics, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [14] İnglada, J., 2003, Change detection on SAR images by using a parametric estimation of the Kullback-Leibler Divergence, IGARSS, 6, 4104-4106.
- [15] Cho, C., Kim, S., Lee, J., Lee, DW, 2006, A tandem clustering process for multimodal datasets, European Journal of Operational Research, 168, 998-1008.
- [16] <http://earthquake.usgs.gov/regional/world>
- [17] <http://www.ionolab.org>
- [18] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan O., 2004, Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period, Radio Science. 39, RS6012.
- [19] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan O., 2003, Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, Journal of Geophysical Research-Space Physics, 108.
- [20] http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices

TUSAGA TEİ Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Kestirimi Estimation of Probability Density Function for TUSAGA TEC

Ozan KÖROĞLU¹, Feza ARIKAN², Nisa Türel³, Melih Ş. AYSEZEN⁴, Dr. Müh. Onur LENK⁴, Doç. Müh. Bahadır AKTUĞ⁴

1. Roketsan A.Ş.
okoroglu@roketsan.com.tr

2. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr

3. Aselsan A.Ş.
nisaturel@hotmail.com

4. Harita Genel Komutanlığı
{melihsukru.aysezen,onur.lenk,bahadir.aktug}@hgk.mil.tr

Özetçe

Bu çalışmada, Türkiye üzerindeki TUSAGA Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) istasyon ağından elde edilen verilerle Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri kullanılarak iyonosfer katmanının istatistiksel değişimi incelenmiştir. Daha çok Batı Anadolu da konuşlanmış 14 YKS istasyonundan alınan veriler işlenmiş ve kestirilen TEİ üzerinde, YKS istasyonlarının coğrafi koordinatları göz önünde bulundurularak, deneysel dağılımlar ve Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda birbirine yakın olan YKS istasyonlardan elde edilen verilerin Lognormal dağıldığı istatistiksel özelliklerinin yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca orta enlem bölgesinde bulunan başka verilerden elde edilmiş OYF'leri ile de uyumlu olduğu görülmüştür. Genel olarak OYF ortalama değerlerinin Güneşin tam tepede olduğu zamanlarda arttığı Güneş doğmadan hemen önce düşüş gösterdiği görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında, tüm Türkiye'yi kapsayan bir YKS istasyon ağından elde edilecek TEİ kestirimlerinin Türkiye üzerindeki iyonosferin istatistiksel özelliklerini belirlemede önem taşıdığı ortaya çıkmıştır.

Abstract

In this study, the statistical properties of the Ionosphere are investigated by using Total Electron Content (TEC) estimates obtained from TUSAGA GPS stations in Turkey. The hourly histograms of TEC are computed using the processed data from 14 GPS stations located mostly in western Anatolia. Optimum Probability Density Function (PDF) that fits the histograms is investigated in Maximum Likelihood sense. It is observed that for all the stations and all hours of the day, TEC is distributed as Lognormal. The parameters of the Lognormal distribution are also very similar to each other. Generally, the mean of the PDF increases when the sun is close to local zenith and it decreases right before the sun rise and sunset. It is observed that a representative TEC PDF that can be used in statistical modeling of ionosphere over Turkey using a GPS network that covers Turkey homogeneously.

1. Giriş

Kısa Dalga ve uydu haberleşmesinin en önemli belirleyicilerinden olan iyonosfer katmanı, vericiden yayılan sinyalin zaman, konum, ve verici frekansına bağlı olarak kırılmasına neden olur ve genel anlamda çok yollu, dağıtım ve sönmülmeli bir kanal yapısı sergiler. İyonosferin bu değişkenliğinin doğru belirlenmesi ve modellenmesi için en önemli parametrelerden biri 1 m^2 kesitli bir silindirik boyunca toplam serbest elektron miktarı olarak tanımlanan Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. Birimi TECU olup 1 TECU , 10^{16} elektron $/\text{m}^2$ 'dir. TEİ kestirimi için yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. Bunlardan içinde en kullanışlı olanı Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS)'dir [1-2]. YKS uydularından L-bandında eş zamanlı gönderilen iki farklı frekanstaki sinyal, iyonosferin zaman, konum ve dağıtım değişkenliğine bağlı olarak kırılır ve yeryüzüne konuşlanmış olan YKS alıcısına birbirine göre zamanda biraz gecikme ile ulaşır. Bu gecikmenin temel nedeni iyonosfer kırılması olduğu için TEİ buradan kestirilebilir [1-2]. TEİ değişkenliğini tanımlamak için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmış ama istatistiksel değişimin belirlenmesi en anlamlı olarak Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) ile [3-6]'da nitelenmiştir. Bu çalışmada Türkiye'den sadece Ankara (ankr) YKS istasyonu incelenen ve küresel düzeyde yüksek enlem, orta enlem ve ekvatorial bölgeleri ortak olarak temsil edebilecek bir OYF dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır. Türkiye üzerindeki iyonosferin özelliklerinin ve değişkenliğinin belirlenmesi için düzenli olarak alınan iyonosonda ölçümleri olmadığı için Harita Genel Komutanlığı'nın (HGK) kurup işlettiği Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı (TUSAGA) içinde yer alan 14 istasyondan alınan veriler İONOLAB (D-TEİ) [1-2] yöntemi ile işlenmiş ve TEİ kestirimleri elde edilmiştir. Bu çalışmada [3-6]'da detaylı olarak anlatılan OYF fonksiyonu TUSAGA ağı içindeki bu 14 istasyonun genellikle 2002-2007 arasında düzensiz olarak alınan verilerine uygulanmış ve Türkiye için ilk kez yüksek çözünürlüklü bir değişiklik istatistiği çıkarılmıştır. Yapılan çalışmada Türkiye'nin orta ve batı bölgelerinde kümelenmiş

seyrek YKS istasyonlarından kestirilen TEİ değerlerinin günün her saati için Lognormal olarak dağıldığı ve dağılım parametrelerinin birbirine çok benzediği gözlenmiştir. Bu parametreler ile iyonosfer plazma frekansları arasındaki ilişkinin belirlenmesiyle kısa dalga ve uydu haberleşme alanlarına dolaylı katkı yapılabilir. Bu çalışmada kullanılan istatistiksel yöntem Bölüm 2’de, elde edilen sonuçlar ise Bölüm 3’te verilmiştir.

2. TEİ Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) Kestirimi

Yeryüzüne konuşlanmış YKS alıcıları gelen uydulardan yayılan sinyalleri iyonosfer ve troposfer bozulmalarına uğramış güçte zayıflamış, fazda ve zamanda gecikmiş olarak sözde menzil ve faz kayması olarak özel bir formatta kaydediler. Sözde menzil ve faz kaymaları kullanılarak TEİ değerleri kestirilebilir. Hacettepe Üniversitesi İyonosfer Araştırma Laboratuvarı İONOLAB Düzgünleştirilmiş TEİ Kestirim Yöntemi (D-TEİ) ile, 30 saniye çözünürlüğünde alıcının yerel zeniti doğrultusunda gürbüz ve yüksek çözünürlüklü TEİ kestirimi yapılabilmektedir [1-2]. Bu yöntemde alıcının üzerindeki TEİ kestirimi, yükseklik açısı 10°’den fazla olan uydulardan hesaplanan yerel zenit doğrultusundaki TEİ (VTEC) değerlerinin yüksek geçiren ceza filtresi kullanan en az kareler yöntemi ile birleştirilmesine dayanır. Kayan ortanca filtre ile kestirilen değerlerdeki düzensizlikler giderilmektedir. Yöntem VTEC değerlerini uyduların yükseklik açılarına göre ağırlıklandırarak çokluoy etkisinden kaynaklanan hataları azaltmaktadır [1-2]. D-TEİ yöntemi ile istenilen bir gün boyunca TEİ kestirimi yapılabildiği gibi, bir günün sınırlı bir zaman aralığında da TEİ kestirimi yapılabilmektedir. İncelenen herbir YKS istasyonu için kestirilen TEİ değerlerinin bir saat içindeki değişim istatistikleri bu çalışmada OYF ile yapılmıştır. Herbir istasyonun veri toplanan yıllar üzerinden bir saat aralıklarda gruplanan TEİ değerlerinden saatlik deneysel dağılımlar (histogram) elde edilmiştir. Bu deneysel dağılımlara en iyi uyacak OYF ise [3-6]’da ayrıntılı anlatıldığı üzere Rayleigh genlik, Rayleigh güç, Lognormal, Weibull ve K-dağılımları üzerinden En Yüksek Olabilirlik ölçütüne göre denenmiştir. Dağılımların eniyi değişkenlerinin seçimi ise veriye dayalı En Büyük Olabilirlik ve Momentler yöntemleri ile seçilmiştir. Sonraki kısımda bu yöntemlerin TUSAGA YKS istasyonlarından elde edilen verilerin üzerinde uygulanması anlatılacaktır.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada HGK tarafından 2002-2007 yılları arasında kurulan ve işletilen 14 TUSAGA YKS istasyonundan (Tablo 1) alınan verilerin üzerinden kestirilen TEİ değerlerinin 0000 dan 2400’a her saat için değerlerinin deneysel dağılımları elde edilmiştir. Bu deneysel dağılımlara örnek olarak Şekil 1’de İstanbul, Trabzon, Akhisar ve Antalya YKS istasyonlarının 1400 ile 1500 saatleri arası deneysel dağılımları düz çizgi şeklinde verilmiştir. Bu deneysel dağılımlara [3-6]’da anlatıldığı şekilde Rayleigh genlik, Rayleigh güç, Lognormal, Weibull ve K-dağılımları uygulanmış ve değişkenler En Büyük Olabilirlik ölçütüne göre seçilmiştir. Deneysel dağılıma en uygun olan OYF En Büyük Olabilirlik Oranına göre belirlenmiştir. Tablo 1’de verilen tüm istasyonlar ve günün tüm saatleri için dağılım Lognormal olarak

bulunmuştur. Şekil 1’de seçilen en uygun OYF’ler kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Lognormal dağılımın OYFsi ve değişkenlerinin En Büyük Olabilirlik yöntemi ile belirlenen değerleri aşağıda verilmiştir [3-6]:

Lognormal OYF $p(x)$:

$$p(x) = \frac{1}{x(\pi a)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - m)^2}{a}\right), \quad (1)$$

En Büyük Olabilirlik ölçütüne göre değişkenler m ve a :

$$m_{ML} = (1/N) \sum_{i=1}^N \ln(X_i), \quad (2)$$

$$a_{ML} = (2/N) \sum_{i=1}^N \left[\ln(X_i) - m_{ML} \right]^2, \quad (3)$$

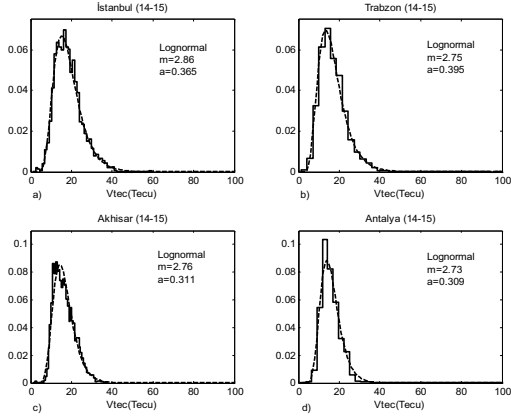
Yukardaki denklemlerde X_i deneysel dağılımdaki veri değerlerini, ve N deneysel dağılımdaki toplam veri sayısını göstermektedir. Tablo 1’de yer alan 14 istasyon için elde edilen saatlik m_{ML} ve a_{ML} değerleri Şekil 2’de verilmiştir. 14 YKS istasyonundan Trabzon (trab) en kuzeyde ve en doğuda, Antalya (anta) en güneyde, Menteş (mnts) en batıda yer almaktadır. İstasyonlar daha çok batı ve iç anadolu bölgesinde konuşlanmış ve kümeli dağılmışlardır. Tablo 1’de gösterildiği üzere mnts ve Yunak (yuna) istasyonlarından sadece 2003-2004 yıllarında veri alınmıştır ve bu zaman aralığı Güneş Lekesi Sayısının (Sun Spot Number) en az olduğu yıllardan biri olduğu için Şekil 2a’da en çok m_{ML} ve Şekil 2b’de en az a_{ML} değerine sahiptir. En uzun veriye sahip ankr, tubi, ve ista istasyonların değişkenleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Gün içerisinde en az m_{ML} güneş doğmadan hemen önce, en çok m_{ML} güneşin yerel saat içerisinde en tepede olduğu saatlerde gözlenmiştir. İyonosferin ve iyonlaşmanın bir numaralı oluş nedeni yüksek enerjili güneş ışınımı olduğu için m_{ML} ’nin güneşin yerel saate göre hareketiyle değişmesi TEİ kestirim değerleriyle uyumludur. Benzer bir durum bir anda değişiminin en yüksek değerlerinin güneşin doğması ve batması sırasında olduğu Şekil 2b’de gözlenmektedir.

Orta Enlemde yer alan diğer bazı istasyonların incelenmesiyle Lognormal dağılımın bu bölgenin karakteristik TEİ OYF dağılımı olduğu ortaya çıkmaktadır. İncelenen orta enlem istasyonlarının (Olsztyn, Polonya (lama), Hailsham, İngiltere (hers), Brüksel, Belçika (brus), Kitab, Özbekistan (kit3), Ankara, Türkiye (ankr) deneysel dağılımlarından kestirilen saatlik m_{ML} ve a_{ML} değerleri Şekil 3’te verilmiştir. Dünya üzerinde istasyonları Şekil 2 ve Şekil 3’teki saatlik m_{ML} ve a_{ML} değerleri karşılaştırıldığında Türkiye’deki tüm istasyonların TEİ OYFlerini karakterize edebilecek bir ortalama dağılımın ve değişkenlerinin kolayca elde edilebileceği gözlenmektedir. Bu durum TEİ’nin uzay-zaman rassal alan modelinin oluşturulmasında çok önemli bir gelişme olarak göze çarpmaktadır. Bununla birlikte Türkiye üzerindeki iyonosfer katmanının istatistiksel özellikleri ile iyonosfer plazma frekansları arasındaki ilişkinin belirlenmesiyle uydu haberleşmesi ve kısa dalga haberleşme alanlarına dolaylı olarak katkı yapılması hedeflenmiştir.

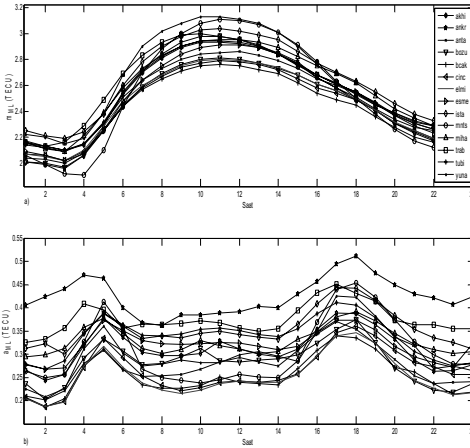
Tablo 1: İncelenen TUSAGA YKS istasyonları, koordinatları ve ilgili YKS istasyonlarından elde edilen yıl bazında veri aralıkları. YKS İstasyonu Alıcı Kodu Enlem Boylam Veri (yıl)

YKS İstasyonu	Alıcı Kodu	Enlem	Boylam	Veri (yıl)
Akhisar	akhi	38.96°K	28.01°D	2003-2006
Ankara	ankr	39.89°K	32.76°D	2003-2007
Antalya	anta	36.83°K	30.61°D	2003-2007
Bozuyuk	bozu	39.88°K	30.05°D	2003-2007
Bucak	bcak	37.32°K	30.72°D	2005-2007

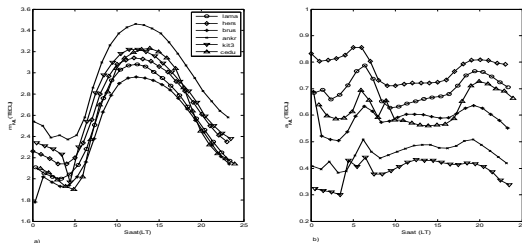
Çine	cinc	37.63°K	27.96°D	2005-2007
Elmalı	elmi	36.79°K	29.81°D	2005-2007
Eşme	esme	38.51°K	28.99°D	2003-2007
Istanbul	ista	41.01°K	29.02°D	2002-2007
Menteş	mmts	38.43°K	26.72°D	2003-2004
Mihaliccik	miha	39.87°K	31.49°D	2002-2005
Trabzon	trab	41,00°K	39,78°D	2003-2007
Tübitak	tubi	40,79°K	29,45°D	2003-2007
Yunak	yuna	38,80°K	31,73°D	2003-2004



Şekil 1: TEİ kestirimlerinden elde edilen deneysel dağılımlar ve OYF dağılımları a) İstanbul (1400-1500), b) Trabzon (1400-1500), c) Akhisar (1400-1500), d) Antalya (1400-1500)



Şekil 2: 14 adet TUSAGA YKS istasyonu için a) m_{ML} , b) a_{ML}



Şekil 3: Orta enlem bölgesinde belirlenmiş istasyonlar için a) m_{ML} , b) a_{ML}

4. Tartışma

Bu çalışmada, iyonosfer katmanının istatistiksel özellikleri, TUSAGA ağında yer alan daha çok Batı Anadolu da konuşlanmış 14 YKS istasyonlarından kestirilen TEİ değerleri kullanılarak incelenmiştir. İnceleme için ilgili TEİ verilerinin deneysel dağılımları ve Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları kullanılmıştır. Daha önce yapılmış olan çalışmalara [3-6] ek olarak bu çalışma Türkiye üzerindeki iyonosfer katmanının istatistiksel özelliklerini kestirmeye yöneliktir. Türkiye coğrafi konum itibari ile orta enlem kuşağında bulunduğu için 14 istasyondan kestirilmiş TEİ verilerinin istatistiksel özellikleri benzerlik göstermektedir. İncelenen istasyonlardan coğrafi konum itibariyle aynı enlem de kabul edilebilecek İstanbul (ista) ve Trabzon (trab) çok benzer istatistiksel özelliklere sahiptir. Aynı zamanda bu istasyonlar en uzun veriye sahip istasyonlar olduğundan sonuçlar birbirleri ile çok uyumludur. m_{ML} üzerindeki değişim 0.2 mertebesinde olması istasyonlar arası enlem ve boylam farklılıklarına rağmen benzer istatistiksel özelliklere sahip olduklarının göstergesidir. Bunun sonucunda Türkiye üzerine daha geniş çapta yerleştirilmiş YKS istasyon ağından kestirilecek TEİ verileri üzerinde yapılacak çalışmalar Türkiye üzerindeki iyonosferin daha iyi bir modelini oluşturmada kullanılabilir. Buna ek olarak sürekli güncellenen veriler ışığında da kalıcı, güncel ve Türkiye için tek bir istatistiksel model oluşturulabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK EEEAG 109E055 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynakça

- [1] Arıkan, F., Erol, C.B. and Arıkan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12): 1469-1480, 2003.
- [2] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O. and Erol, C.B., "Total electron content estimation with Reg-Est", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 122: A11313, 2007.
- [3] Türel, N., İyonosfer Katmanının Toplam Elektron İçeriğinin İzgel Güç Yoğunluğu ve Olasılık Yoğunluk Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2008.
- [4] Türel, N., Aktaş, E., Arıkan, F., 'Correlogram and PDF estimation for Total Electron Content', IRI/COST 296-2007, Institute of Atmospheric Physics, Prag, Çek Cumhuriyeti, 10 - 14 Temmuz 2007.
- [5] Türel, N., Arıkan, F., Aktaş, E., 'Ionolab-Tec & IRI-Tec Statistics and Regional Correlogram Applications', (İngilizce) Turkish National Geodetic Commission, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Scientific Meeting 2007 on Monitoring and Modeling of the Ionosphere and Troposphere, ODTÜ, Ankara, 14-16 Kasım 2007.
- [6] Türel, N., Aktaş, E., Arıkan, F., 'PDF Estimation for Ionolab and IRI Total Electron Content', IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İTÜ, Maslak İstanbul, 25-28 Mart 2008, pp: 209-215.
- [7] Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons Inc. Publishers, New York, 1988.
- [8] www.ionolab.org

Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının TUSAGA Aktif TEİ Kestirimleri İle İncelenmesi

A Study of Lithosphere-Ionosphere Coupling Using TUSAGA Active TEC Estimates

Seçil KARATAY¹, Feza ARIKAN², Orhan ARIKAN³, Işıltañ SAYIN², Melih Ş. AYSEZEN⁴ Dr. Müh. Onur LENK⁴, Doç. Müh. Bahadır AKTUĞ⁴

1. Fizik Bölümü
Fırat Üniversitesi
skaratay@firat.edu.tr

2. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr, isiltan@ee.hacettepe.edu.tr

3. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

4. Harita Genel Komutanlığı
{melihsukru.aysezen,onur.lenk,bahadir.aktug}@hgk.mil.tr

Özetçe

Bu çalışmada, Türkiye üzerindeki TUSAGA Aktif Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) istasyon ağından elde edilen verilerle Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri kullanılarak sismik hareketliliğin iyonosferde meydana getirdiği bozulmalar incelenmiştir. Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattında meydana gelmiş iki deprem çalışması kapsamında ele alınmıştır. Çalışmanın istatistiksel analizi için İlinti katsayı (İK) yöntemi, simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD) ve L2-Normu (L2N) yöntemleri kullanılmıştır. TEİ üzerinde İK, KLD ve L2N yöntemleri ile istasyonlar ve günler arasında iyonosferin jeomanyetik ve sismik açıdan sakin durumları da göz önüne alınarak incelemeler yapılmıştır. Sakin günlerde İK değerleri yüksek ilinti sergilerken, deprem günlerinde İK değerleri 0.2'ye kadar düşmüştür. Deprem günlerinde elde edilen KLD değerlerinin sakin günlerde elde edilen değerlerden 10 kat büyük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, Türkiye üzerinde yer alan farklı fay hatlarında meydana gelmiş ve farklı sismik, jeolojik özelliklere sahip depremlerin incelenmesinin, gelecek çalışmada ele alınmasının önemi ortaya konmuştur.

Abstract

In this study, the disturbances in the ionosphere due to the seismic activity are investigated by using Total Electron Content estimates obtained from TUSAGA Active GPS stations in Turkey. Two earthquakes with same geophysical properties occurred on Northern Anatolia Fault are chosen for the study. TEC estimates are compared with each other using correlation coefficient (IK), symmetric Kullback-Leibler Distance (KLD) and L2-Norm (L2N) for geomagnetically and seismically quiet days of ionosphere and the earthquakes days. It is observed that IK values of quiet days are highly correlated in quiet days. IK values of earthquake days decrease down to 0.2 in earthquake days. KLD values of earthquake days are 10 times greater than those of the quiet days. In order to form a proper earthquake precursor alarm

signal, more earthquakes with different properties have to be investigated in the future.

1. Giriş

İyonosfer, atmosferin 60 ile 1000 km arasında yer alan önemli bir katmanıdır. İyonosfer katmanının en önemli parametresi konum, zaman, güneş, jeomanyetik ve sismik hareketlilikle değişim gösteren elektron yoğunluğudur. İyonosferi karakterize eden birçok parametre elektron yoğunluğuna bağlı fonksiyonlardır. Bunlardan biri de Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, 1 m² kesitli bir silindir boyunca toplam serbest elektron miktarıdır. Birimi TECU olup 1 TECU, 10¹⁶ elektron /m²'dir. TEİ kestirimi için yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. Bunlardan içinde en kullanışlı olanı Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS)'dir [1-2].

Litosferde başlayan sismik hareketliliğin, iyonosferde ve atmosferdeki elektromanyetik ve kimyasal yapıda değişimler yarattığına dair son zamanlarda yoğun incelemeler yapılmıştır [3-10]. Literatürde yer alan bu çalışmalarda iyonosferin sismik hareketlilik dönemlerindeki değişkenliğini incelemek için elektron yoğunluğu, TEİ ve iyonosferin kritik frekansı gibi parametrelerin kullanıldığı istatistiksel ve fiziksel yaklaşımlar yapılmıştır. Bu çalışmalarda [3-10], sismik aktivitenin başlamasıyla deprem gününden birkaç gün öncesinden başlayarak iyonosferde TEİ değerlerinde de büyük ölçekli düzensizlikler meydana geldiği ileri sürülmüştür.

İstatistik ve enformasyon teorisinde Kullback-Leibler İraksaklığı, iki olasılık yoğunluk fonksiyonu arasındaki farklılıkları ölçmek için kullanılan bir yöntemdir [8-12]. Benzer olarak, L2-Normu, iki vektör arasındaki farkı tanımlamak için kullanılır [8-10,13]. Bu çalışmada İlinti analizi (İK) ile simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD) ve L2-Normu (L2N) analizleri kullanılmıştır. Bu üç yöntem daha önce Japonya'da meydana gelmiş ölçeiği 5'ten büyük beş

depremde ve 12 Mayıs 2008 Çin depreminde uygulanmıştır [8-10]. Ölçeği 5.9'dan daha küçük olan depremler bu çalışmalarda incelenmemiştir. Japonya üzerinde mevcut olan YKS istasyon sayısının sınırlı oluşundan ötürü, kullanılan istasyonların deprem merkezine olan uzaklığı 2000 km'ye kadar çıkabilmektedir. 12 Mayıs 2008 Çin depremi için veri sağlanabilen istasyon sayısı ise bir istasyonla sınırlı kaldığından dolayı, istasyonlar arası farklar incelenememiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'de meydana gelmiş farklı ölçekli iki deprem seçilmiştir. Daha önceki çalışmalardan [10-12] farklı olarak ölçeği 5 ve 4.2 olan daha küçük ölçekli depremler incelenmiştir. TEİ verileri Harita Genel Komutanlığı tarafından Türkiye üzerine düzgün olarak yerleştirilmiş TUSAGA Aktif YKS istasyonlarından elde edilmiştir. Bu istasyonların birbirlerine olan uzaklığı 80 ile 100 km arasında değişmektedir. Bu nedenle Türkiye'nin farklı sismik bölgelerinde meydana gelebilecek bir depremi incelerken, deprem merkezi etrafına konumlanmış birden fazla istasyon ile çalışabilmek mümkün olacaktır. Bu çalışmada, daha önceki çalışmalardan [8-10] farklı olarak, seçilen YKS istasyonları deprem merkezine ve birbirlerine çok yakın mesafede yer almaktadır. TEİ verileri, her bir YKS istasyonu için deprem gününden 10 gün öncesi ve sonrası zamanlarda hesaplanmıştır. Her bir istasyonun TEİ verileri, iyonosferin jeomanyetik ve sismik aktivitenin olmadığı dönem için de elde edilmiştir. Üç yöntem, istasyonlar arası çaprazlama karşılaştırması, Ortalama Sakin Gün (OSG) karşılaştırması ve bir istasyonun ardışık günleri karşılaştırması olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmıştır. Kullanılan yöntemler Bölüm 2'de, elde edilen sonuçlar ise Bölüm 3'te verilmiştir.

2. İstatistiksel Analiz Yöntemleri

Dünya üzerindeki bir YKS alıcısına göre yerel zenit doğrultusunda hesaplanan toplam serbest elektron miktarına Dik Toplam Elektron İçeriği (VTEC) denir. d. gün için hesaplanan VTEC verileri, u, alıcı numarası; N, toplam ölçüm sayısı; n, örnek numarası ($1 \leq n \leq N$); T ise matris devriği olmak üzere $\mathbf{x}_{u;d}$ vektörüyle ifade edilebilir:

$$\mathbf{x}_{u;d} = [x_{u;d}(1) \dots x_{u;d}(n) \dots x_{u;d}(N)]^T \quad (1)$$

TEİ veri setleri üzerinde mevsimsel ve yıllık farkları kaldırmak; farklı zaman aralıklarındaki değerleri karşılaştırabilmek için düzelenmiştir. Eşitlik 1 ile ifade edilen bir u istasyonunun d. gününün deneysel Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d} = \mathbf{x}_{u;d} \left[\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u;d}(n) \right]^{-1} \quad (2)$$

şeklinde yaklaşılmıştır. Deprem dönemlerinde elde edilen TEİ değerlerinin, sismik açıdan hareketliliğin olmadığı dönemlerdeki TEİ değerlerinden ne kadar fark ettiğini gözlemleyebilmek için iyonosferik açıdan sakın günlerden elde edilmiş TEİ değerleriyle bir Ortalama Sakin Gün (OGS) vektörü hesaplanmıştır. u istasyonunun sakın günler zaman aralığındaki toplam N_d kadar gününden elde edilen ortalama vektörü Eşitlik 3'teki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathbf{x}_{u;d_1-d_s} = \frac{1}{N_d} \sum_{n=d_s}^{d_s} \mathbf{x}_{u;n_d} \quad (3)$$

Burada İyonosferin sakın gün zaman aralığında d_i başlangıç gününü, d_s bitiş gününü temsil etmektedir. Eşitlik 3 ile

tanımlanan OGS vektörü için OYF, $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s}$ olarak hesaplanmıştır.

İki istasyonun VTEC verileri \mathbf{x}_u ve \mathbf{x}_v vektörleriyle tanımlanırsa, N_i başlangıç N_s bitiş örnek numarası ve N_T toplam örnek sayısı olmak üzere bu iki istasyonun d. gününe ait günlük çapraz ilinti fonksiyonu

$$r(\mathbf{x}_{u;d}; \mathbf{x}_{v;d}) = \frac{1}{N_T \sigma_{u;d} \sigma_{v;d}} \sum_{n=N_i}^{N_s} (x_{u;d}(n) - \bar{x}_{u;d})(x_{v;d}(n) - \bar{x}_{v;d}) \quad (4)$$

eşitliği ile tanımlanabilir [8-10]. Burada $\bar{x}_{u;d}$ ve $\bar{x}_{v;d}$ sırasıyla d. gün için N_T örnek üzerinden $\mathbf{x}_{u;d}$ ve $\mathbf{x}_{v;d}$ vektörlerinin ortalama değerini $\sigma_{u;d}$ ve $\sigma_{v;d}$ ise bu vektörlerin standart sapmasını vermektedir.

Eşitlik 2 ile tanımlanan OYF fonksiyonları kullanılarak u ve v istasyonları arasındaki simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD) Eşitlik 5'te ifade edilmiştir [8-12].

$$KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) + K(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) \quad (5)$$

Burada $K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d})$, $K(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d})$ fonksiyonları:

$$K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n)} \right) \quad (6)$$

$$K(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n)} \right)$$

eşitlikleri ile tanımlanmıştır. Yine Eşitlik 2 ile tanımlanmış olan deneysel OYF kullanılarak u ve v istasyonları için L2-Norm (L2N), aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir [8-10,13]:

$$L2N(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \sqrt{\sum_{n=N_i}^{N_s} (\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n) - \hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n))^2} \quad (7)$$

Tablo 1'de verilen depremler için Tablo 2'de yer alan her bir istasyonun, iyonosferin sakın günlerinden elde edilmiş olan TEİ değerleri ile Eşitlik 3 ile verilen OGS vektörü hesaplanmıştır. OGS vektörü ile elde edilen $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s}$ kullanılarak her bir istasyonun deprem ve sakın gün veri setleri üzerinde $r(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s})$, $KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s})$ ve $L2N(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s})$ fonksiyonları kullanılarak OSG karşılaştırılması yapılmıştır. Tablo 2'de yer alan her bir istasyonun deprem ve sakın dönemindeki d. ve d+1. ardışık günleri, $r(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$, $KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$ ve $L2N(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$ fonksiyonları uygulanarak karşılaştırılmıştır. Bu bölümde önerilen yöntemlere ait uygulamalar Bölüm 3'te sunulmuştur.

3. Sonuçlar

Bölüm 2'de anlatılan istatistiksel yöntemler, deprem öncesi sismik hareketliliğin iyonosfer üzerindeki etkilerini saptayabilmek için TEİ veri setleri üzerinde uygulanmıştır. Veri setleri için iki grup zaman aralığı seçilmiştir. İlk olarak, Güneş'te meydana gelen hareketliliğe bağlı olarak jeomanyetik hareketliliğin yaşanmadığı sakın günler zaman aralığı saptanmıştır. Bunun için jeomanyetik hareketliliği ölçeklendiren D_{st} , K_p ve A_p indisleri göz önüne alınarak sakın günler seçilmiştir. İkinci olarak, her iki depremde de her

bir YKS istasyonu için deprem gününden on gün öncesi ve sonrası zaman aralığındaki günlerden TEİ değerleri elde edilmiştir. Her iki depremdeki 21 günlük zaman aralığı boyunca önemli sayılabilecek bir jeomanyetik hareketlilik yoktur. Kp indisinin en büyük değeri 4 civarındadır. Bu anlamda deprem günleri zaman aralığı da jeomanyetik açıdan oldukça sakinidir. Analiz yöntemleri üç farklı uygulama grubu içinde kullanılmıştır. Çalışmanın amacı için Türkiye’de meydana gelen farklı ölçekteki iki deprem seçilmiştir. Her iki deprem de Kuzey Anadolu Fay hattı üzerinde bulunup benzer jeofiziksel özellikler taşımaktadır. Depremlerin tarihi, oluş zamanı, konumu ($^{\circ}K-^{\circ}D$), ölçüğü (M-Richter) ve derinliği (z-km) Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 2’de E1 ve E2 olarak temsil edilen depremler sırasıyla 30.07.2009 tarihli Çağlayan/Erzincan [14] ve 08.08.2009 tarihli Çanakkale [15] depremidir.

Tablo 1: Depremlerin konum, zaman, büyüklük ve derinlik göstergesi

yer	tarih	saat	$^{\circ}K$	$^{\circ}D$	M	z
E1	30.07 2009	10 37	39.6	40.3	5	5
E2	08.08 2009	04 52	40.3	27.2	4.2	10

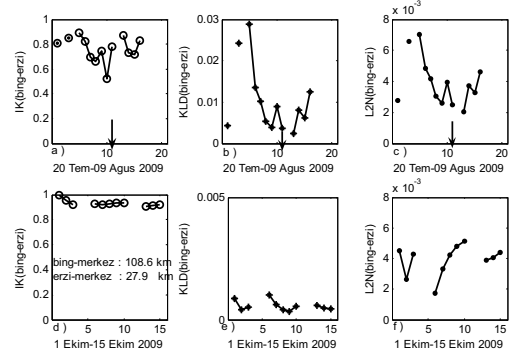
İyonosferin sakin olarak seçilen zaman aralığı 1 Ekim-15 Ekim 2009, OSG vektörü elde etmek için seçilen ikinci sakin zaman aralığı ise 1 Haziran-20 Haziran 2009’dur [16]. Bu çalışmada kullanılan Türkiye üzerine düzgün dağılmış TUSAGA Aktif YKS istasyonlarından elde edilen veriler üzerinden hesaplanan TEİ kestirimleri kullanılmıştır [1,2,17]. Kullanılan istasyonların konum ve kodları Tablo 2’de, alfabetik sıraya göre verilmiştir.

Tablo 2: TUSAGA aktif istasyonları ve koordinatları.

YKS İstasyonu	Alıcı Kodu	Enlem	Boylam
Ayvalık	ayvl	39.31°K	26.88°D
Bandırma	band	40.33°K	27.99°D
Bayburt	bayb	40.25°K	40.19°D
Bingöl	bing	39.08°K	40.83°D
Çanakkale	cana	40.11°K	26.41°D
Erzincan	erzi	39.74°K	39.50°D
Refahiye	rhiy	39.90°K	38.77°D
Tekirdağ	tekr	40.95°K	27.49°D
Yenice	yenc	39.93°K	27.24°D

İlk grup çalışmada, Eşitlik 3, 5 ve 7, E1 depreminde bayb, bing, erzi, rhiy ve E2 depreminde ayvl, band, cana, tekr, yenc istasyonlarının TEİ değerleri arasında uygulanmıştır. Bu grup çalışmaya göre her iki depremde kullanılan istasyonların çaprazlama İK değerleri sakin günlerde +1’e yakın iken deprem günlerinde +0.5 değerine kadar düşmüştür. İstasyonların deprem dönemi çaprazlama KLD değerlerinin sakin günlerde elde edilen değerlerden 10 kat büyük olduğu gözlenmiştir. İstasyonlar arası L2N değerleri hem deprem dönemlerinde hem de sakin dönemlerde 0 ile 0.005 arasında değişmiştir. L2N yöntemi, deprem dönemi ile sakin dönemde istasyonlar arasındaki farkı ölçmemiştir. Şekil 1’de deprem merkezine uzaklıkları sırasıyla 108 km ve 27 km olan bing ve erzi istasyonlarının deprem ve sakin dönemlerdeki çaprazlama İK, KLD ve L2N değerleri verilmiştir. İK değerlerinin deprem döneminde çok düşük olduğu (Şekil 1a) ve deprem dönemi

KLD değerlerinin (Şekil 1b) sakin dönemin (Şekil 1e) nerdeyse 10 katı olduğu Şekil 1’den gözlenmektedir. L2N değerlerinin deprem ve sakin dönemde aynı aralıkta değiştiği yine Şekil 1c ve 1f’de görülmektedir. Depremin olduğu 11. gün Şekil 1a, 1b ve 1c’de ok ile gösterilmiştir.

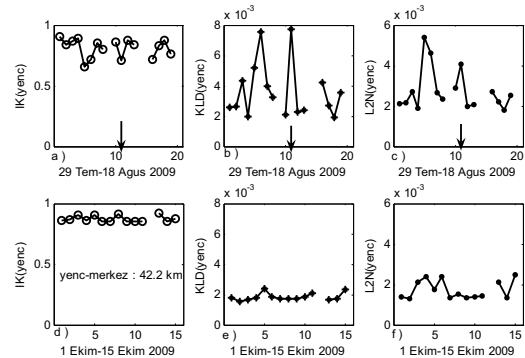


Şekil 1: bing-erzi istasyonları arası a) E1 dönemi İK, b) E1 dönemi KLD, c) E1 dönemi L2N, d) sakin dönem İK, e) sakin dönem KLD, f) sakin dönem L2N değerleri.

İkinci grup çalışmada $r(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d_1-d_s})$,

$KLD(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d_1-d_s})$ ve $L2N(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d_1-d_s})$ fonksiyonları

Tablo 2’de yer alan her bir istasyonun OSG vektörü ile deprem dönemi ve sakin dönem günleri arasında uygulanmıştır. Bu grup çalışmaya İK değerleri hem OSG-deprem hem de OSG sakin eşleşmesi için 0.8 ile 1 arasında değişmiştir. Deprem öncesi bazı günlerde İK değerleri 0.6’ya kadar düşmüştür. KLD ve L2N değerleri bu uygulamada paralel sonuçlar vermiştir. OSG-deprem eşleşmesinin KLD ve L2N değerleri, OSG-sakin eşleşmesi değerlerinden çok daha büyük çıkmıştır. KLD ve L2N değerlerinde özellikle OSG-deprem eşleşmesinde ani artışlar gözlenmiştir. Şekil 2’de deprem merkezine 42 km mesafede bulunan yenc istasyonuna ait İK, KLD ve L2N değerleri verilmiştir. KLD ve L2N değerlerinin OSG-deprem dönemi değerlerinin (Şekil 2b, 2c) OSG-sakin günler değerlerinden (Şekil 2d, 2e) çok daha büyük olduğu ve İK değerlerinin OSG-deprem eşleşmesinde (Şekil 2a, 2d) zayıf ilinti sergilediği görülmektedir. Depremin olduğu 11. gün Şekil 2a, 2b ve 2c’de ok ile gösterilmiştir.

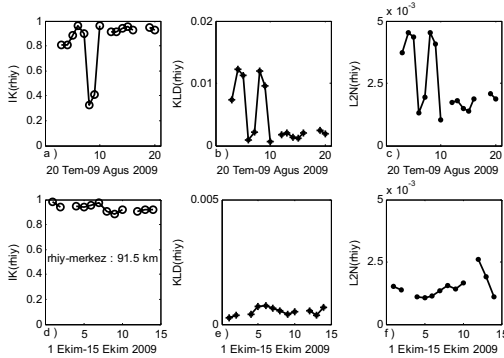


Şekil 2: yenc istasyonu için a) OSG-E2 İK, b) OSG-E2 KLD, c) OSG-E2 L2N, d) OSG-sakin İK, e) OSG-sakin KLD, f) OSG-sakin L2N değerleri.

Üçüncü grup olarak $r(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d+1})$, $KLD(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d+1})$

ve $L2N(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d+1})$ fonksiyonları Tablo 2’de yer alan her bir

istasyonun ardışık deprem günleri ve sakin günleri arasında uygulanmıştır. Bu uygulamayla, ardışık sakin günler arasındaki İK değerleri +1'e yakın değişirken, ardışık deprem günlerinde değerler +0.2'ye kadar düşerek zayıf iliti sergilemiştir. Ardışık deprem günleri KLD değerleri, ardışık sakin günlerin değerlerinden 10 kat büyük çıkmıştır. Paralel olarak ardışık deprem günlerindeki L2N değerleri, ardışık sakin günlerden yaklaşık olarak 2 kat büyük olarak gözlenmiştir. Bu uygulamada her üç yöntem de ardışık deprem günleri arasındaki farkı büyük olarak ölçmüştür ve sakin günlerden ayırmıştır. Şekil 3'te, deprem merkezine 91 km uzaklıkta bulunan rhiy istasyonunun ardışık deprem ve sakin günlerinde elde edilmiş İK, KLD ve L2N değerleri verilmiştir. Ardışık deprem günlerindeki İK değerlerinin (Şekil 3a), deprem gününden bir ve iki gün önce ani düşüşle 0.2'ye kadar indiği görülmektedir. Ardışık deprem günlerindeki KLD değerlerinin (Şekil 3b) özellikle deprem öncesi günlerde ardışık sakin günler değerlerinin (Şekil 3e) 10 katı büyüklükte olduğu gözlenmektedir. Deprem günlerindeki L2N değerlerinin sakin günlerden çok çok büyük olduğu yine Şekil 3c ve 3f'de görülmektedir.



Şekil 3: rhiy istasyonu için ardışık E1 günlerindeki a) İK, b) KLD, c) L2N; ardışık sakin günlerindeki d) İK, e) KLD, f) L2N değerleri.

4. Tartışma

Bu çalışmada, sismik hareketliliğin ionosferde meydana getirdiği bozulma etkileri, TUSAGA Aktif ağında yer alan YKS istasyonlarından kestirilen TEİ değerleri kullanılarak incelenmiştir. İnceleme için İK, KLD ve L2N olmak üzere dört farklı istatistiksel analiz yöntemi, daha önce yapılmış olan çalışmalara [10-12] benzer olarak üç farklı uygulama grubu içinde kullanılmıştır. Kuzey Anadolu Fay hattı üzerinde meydana gelen benzer jeolojik özelliklere sahip Çanakkale ve Erzincan depremleri inceleme kapsamında ele alınmıştır. İnceleme zaman aralıkları olarak kullanılan her bir TUSAGA istasyonunun depremden 10 gün öncesi ve sonrası olmak üzere 21 günlük deprem aralığı ile jeomanyetik ve sismik açıdan hareketliliğin yaşanmadığı, ionosferin sakin olduğu 15 günlük zaman aralığı seçilmiştir. Kullanılan istasyonlar bu bağlamda yapılmış olan daha önceki çalışmalara göre deprem merkezlerine ve birbirine çok yakındır. Buna bağlı olarak istasyonlar arası çaprazlama uygulamasında daha önceki çalışmalarda deprem ve sakin günler arasındaki farkı ölçemeyen İK yöntemi, bu çalışmada deprem günlerini sakin günlerden ayırmıştır. KLD ve L2N yöntemi önceki çalışmalarda birbirlerine paralel sonuçlar ortaya koyarken bu çalışmada deprem bozulmasını çaprazlama uygulamasında KLD yöntemi ölçmüş, L2N yöntemi de ölçmüştür. İK

yöntemi daha önceki çalışmaların OSG eşleşmelerinde ayırt edici değilken, Türkiye üzerinden elde edilen sonuçlarda ayırt edici olmuştur. KLD ve L2N yöntemleri ise önceki çalışmalara kıyasla OSG ve ardışık günler uygulamasında Türkiye üzerindeki değerlendirmede daha ayırt edici olmuştur. Türkiye üzerindeki YKS alıcılarının birbirine yakın olması bu çalışmada avantaj sağlamıştır. Bu nedenle bu çalışmayla, Türkiye üzerinde yer alan farklı fay hatlarında meydana gelmiş ve farklı sismik, jeolojik özelliklere sahip depremlerin incelenmesi gerekliliği ortaya konmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, TUBİTAK EEEAG 109E055 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynakça

- [1] Arıkan, F., Erol, C.B. and Arıkan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12): 1469-1480, 2003.
- [2] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O. and Erol, C.B., "Total electron content estimation with Reg-Est", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 122: A11313, 2007.
- [3] Ondoh, T., "Seismo-ionospheric phenomena", *Advances in Space Research*, 26(8): 1267-1272, 2000.
- [4] Pulnits, S.A., "Ionospheric precursors of earthquakes; recent advances in theory and practical applications", *TAO*, 15(3): 413-435, 2004.
- [5] Liu J.Y., Chen, Y.I., Pulnits S.A., Tsai Y.B. and Chuo Y.J., "Seismo-ionospheric signatures prior to M \geq 6.0 Taiwan earthquakes", *Geophysical Research Letters*, 27(19): 3113-3116, 2000.
- [6] Chuo. Y.J., Chen, Y.I., Liu, J.Y. and Pulnits, S.A., "Ionospheric f_oF_2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area", *Advances in Space Research*, 27(6):1305-1310, 2001.
- [7] Trigunait, A., Parrot, M., Pulnits, S.A. and Li, F., "Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event", *Annales Geophysicae*, 22(12): 4123-4131, 2004.
- [8] Karatay, S., Arıkan, F. and Arıkan, O., "Toplam Elektron İçeriği ile Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının İncelenmesi", *SIU-2009*, Antalya, Türkiye, 9-11 Nisan 2009.
- [9] Arıkan, F., Karatay, S. And Arıkan, O., "Investigation of ionospheric disturbance due to strong earthquakes using total electron content", *Proceedings of EGU-2009*, Vienna, Austria, 19-24 April 2009.
- [10] Karatay, S., Arıkan, F. And Arıkan, O., "Investigation of hourly and daily patterns for Lithosphere-Ionosphere coupling before strong earthquakes", *Proceedings of RAST-2009*, İstanbul, Turkey, 11-13 June 2009.
- [11] Cover, T.M. and Thomas, A.J. *Elements of Information Theory*, Wiley Interscience Publishers, New York, 2006.
- [12] Hall, P., "On Kullback-Leibler loss and estimation", *The Annals of Statistics*, 15(4): 1491-1519, 1987.
- [13] Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons Inc. Publishers, New York, 1988.
- [14] www.koeri.boun.edu.tr
- [15] www.earthquake.usgs.gov
- [16] http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices
- [17] www.ionolab.org



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



IONOLAB

UZAY HAVASI VE İYONOSFER ARAŞTIRMALARI GRUBU

WWW.IONOLAB.ORG

PROF. DR. FEZA ARIKAN arikan@hacettepe.edu.tr

IONOLAB, İyonosfer katmanının yapısını ve haberleşme sinyallerine etkisini araştırmayı ve sorunlara çözümler getirmeyi amaçlayan bir araştırma grubudur.

EKİBİMİZ

- Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
- Bilkent Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
- Harita Genel Komutanlığı

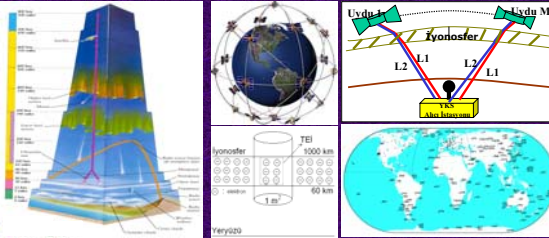
öğretim üyeleri, lisans, yüksek lisans ve doktora öğrencilerinden ve araştırmacılarından oluşmaktadır.

HEDEFİMİZ, disiplinlerarası bir bilgi ve araştırma platformu yaratarak yere yakın uzayın bilimsel zorluklarını aşmaktır.



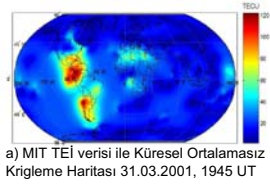
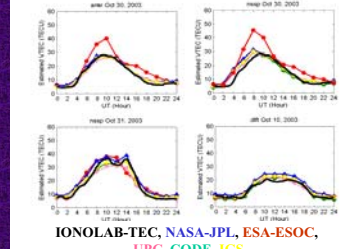
ÇALIŞMA ALANLARI

- Uzay Havası Kestirimi ve Öngörüsü
- İyonosferin Uzaktan Algılaması ve Sürekli Gözlenmesi
- Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS/GPS) ile Toplam Elektron İçeriği (TEİ) Kestirimi
- 2-D TEİ Haritalaması (TEC Mapping)
- 4-D Bilgisayarlı İyonosfer Tomografisi (BİT/CIT)
- Kısa Dalga (KD/HF) Kanalları için Haberleşme
- KD kanalında Yön Bulma ve Geliş Açısı Kestirimi (DF-DOA)
- YKS-TEİ ile Deprem Öncülü Araştırması



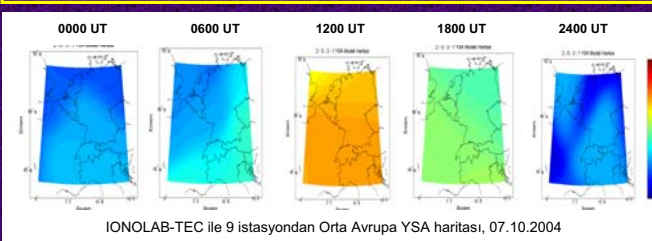
• **IONOLAB-TEC** : www.ionolab.org sitesinden IGS'e bağlı bir veya birden çok YKS istasyonundan, hiç bir yazılım indirilmesine gerek duyulmadan, bir gün yada bir tarih aralığı için, görsel yada excel dosyası şeklinde, 2.5 dakika zaman çözünürlüğünde TEİ kestirimi elde edilebilir.

• Tamamen özgün bir algoritma ile çalışan JAVA tabanlı program, istenirse diğer kestirim merkezleri ile karşılaştırma olanağı da veren dünyada tek örnektir.



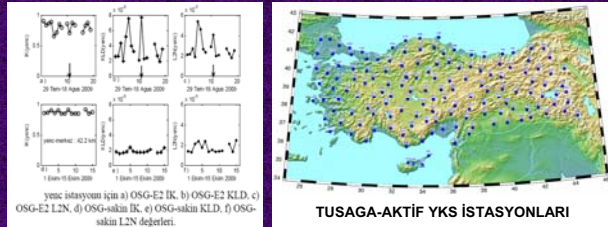
a) MIT TEİ verisi ile Küresel Ortalamasız Krigleme Haritası 31.03.2001, 1945 UT

• **TEİ HARİTALAMA** : Bir bölgede elde edilen seyrek TEİ ölçümlerinden enlem ve boylamda aradeğerleme çalışmaları yapılmıştır. Denenen dokuz farklı algoritmadan en başarılı olanları: Krigleme ve Yapay Sinir Ağları (Neural Network)



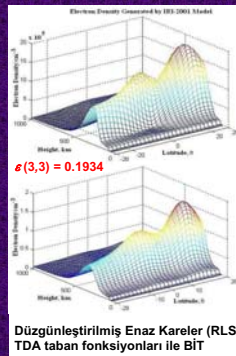
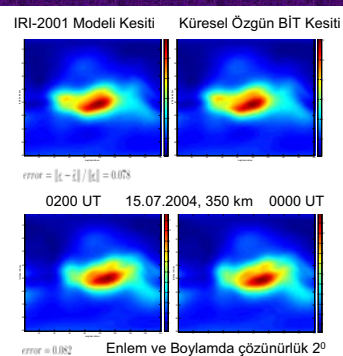
IONOLAB-TEC ile 9 istasyondan Orta Avrupa YSA haritası, 07.10.2004

• **DEPREM ÖNCÜLÜ ARAŞTIRMASI** : Japonya, Çin ve Türkiye'de, 2003-2009 arasında, ölçekleri 4.2 ve 8.3 arasında değişen sekiz depremin İyonosferde yarattığı etki, IONOLAB-TEC kestirimleri kullanılarak, jeomanyetik bozulmanın olduğu günler ve sakin günler ile dört farklı analiz tekniğiyle karşılaştırılmıştır. Sismik hareketliliğin İyonosferde oluşturduğu bozulma TUSAGA-Aktif YKS Ağı ile incelenecektir.



TUSAGA-AKTİF YKS İSTASYONLARI

• **BİLGİSAYARLI İYONOSFER TOMOGRAFİSİ** : Dünya ve bölgesel ölçeklerde beş değişik tomografi algoritması denenmiş; Tekil Değer Ayrıştırması (TDA/SVD) taban fonksiyonu kullanarak enlem, boylam, yükseklik ve zamanda (4-D) özgün ve çok başarılı bir geri-çatma algoritması geliştirilmiştir.



Düğüleştirilmiş Enaz Kareler (RLS) TDA taban fonksiyonları ile BİT

TÜBİTAK EEEAG 105E171

ELEKTRON DAĞILIMININ GPS ÖLÇÜMLERİYLE BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİK GÖRÜNTÜLENMESİ

2006 – 2008; 10 Araştırmacı; 8 Yüksek Lisans Tezi; 1 Doktora ve 3 Lisans öğrencisi
10 Bursiyer; 10 Makale; 1 Kitap Bölümü; 14 Uluslararası Bildiri; 13 Ulusal Bildiri

TÜBİTAK EEEAG 109E055

BÖLGESEL OTOMATİK TEİ HARİTALAMASI VE SÜREKLİ GÖZLENMESİ

2009 – 2012; 10 Araştırmacı; 4 Yüksek Lisans ve 2 Doktora öğrencisi; 6 Bursiyer
1 Makale; 2 Uluslararası Bildiri; 2 Ulusal Bildiri

İYONOSFER F2 TABAKASI PARAMETRELERİNİN ENİYİLEME YOLU İLE IRI MODELİ VE İONOLAB TEİ KESTİRİMLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

DETERMINING F2 LAYER PARAMETERS VIA OPTIMIZATION USING IRI MODEL AND İONOLAB TEC ESTIMATIONS

Oktay ŞAHİN¹, Umut SEZEN², Feza ARIKAN³, Orhan ARIKAN⁴

¹ Aselsan A.Ş.
oksaahin@aselsan.com.tr

² Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.
Hacettepe Üniversitesi
u.sezen@ee.hacettepe.edu.tr

³ Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.
Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr

⁴ Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.
Bilkent Üniversitesi
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

ÖZETÇE

Yüksek frekans (HF) dalgalarının yayılmasında en önemli tabakanın iyonosferin F2 tabakası olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, Uluslararası Referans İyonosfer (IRI) modelinin parametrelerinden olan F2 tabakasının yüksekliği (HmF2) ve kritik frekansının (FoF2) iyonosferin Toplam Elektron İçeriği (TEİ) yapısı ile ilintisi parametrik tanım aralığında incelenmiş ve bu iki parametre İONOLAB TEİ kestirimleri de kullanılarak eniyilemeye tabi tutulmuştur. Eniyileme algoritmasının performansı, günlük (24 saat) ile saatlik TEİ verilerinin işlenmesi durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Saatlik veri kullanılmasının çok daha düşük hatalı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Bu eniyileme yöntemi kullanılarak, F2 tabakasının yüksekliği ve kritik frekansı, Türkiye de dahil olmak üzere yüksek ve alçak enlemdeki ülkelerde aynı gün için elde edilmiştir. Sonuçlar iyonosonda verileriyle karşılaştırılmış ve hata normunun kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Bu şekilde iyonosferin daha gerçekçi elektriksel yapısına ulaşılabilmektedir.

ABSTRACT

We know that F2 layer of the ionosphere is most important layer in the propagation of high frequency (HF) waves. In this study, The relation of the height (HmF2) and the critical frequency (FoF2) of F2 layer—among the parameters of the International Reference Ionosphere (IRI) model—to the Total Electron Content (TEC) structure of ionosphere is investigated within their defined parametric range. These two parameters are then optimized using İONOLAB TEC estimations. Performance of the optimization algorithm is examined separately for the cases of processing daily (24-hour) and hourly TEC data. It is observed that using hourly data produce results with much smaller errors. By using this optimization method, the height and the critical frequency of F2 layer are obtained for countries located on low and high latitudes including Turkey for the same quite day. Results are compared with ionosonde data and it is observed that error norms were in an acceptable range. By this way it is attained the more realistic electrical structure of ionosphere.

1. GİRİŞ

İyonosfer, elektriksel olarak nötr bir ortamda genellikle eşit miktarda serbest elektron ve pozitif iyon içeren, kısa dalga (KD) ve uydu haberleşmesinin en önemli belirleyicilerinden olan ve atmosferin 60 ile 1000 km yükseklikleri arasında yer alan katmandır. İyonlaşma ve elektron yoğunluğu konuma, zamana, güneşe, jeomanyetik ve sismik hareketliliklere göre değişim gösterir. Yapısını karakterize eden birçok parametre elektron yoğunluğuna bağlı fonksiyonlardır. Bunlardan biri de Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, 1 m² kesitli bir silindirik boyunca toplam serbest elektron miktarıdır. Birimi TECU olup 1 TECU, 10¹⁶ elektron /m²'dir. TEİ kestirimi için yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. Bunların içinde en kullanışlı olanı Yerkesel Konumlama Sistemi (GPS)'dir [1-2].

Güneş aktivitelerinin iyonlaşmayı etkilemesi nedeniyle iyonosfer, farklı iyonik özelliklere sahip tabakalardan oluşur. Bu tabakalar; D, E ve F katmanlarıdır. Güneş aktivitelerinden çok etkilendiği için iyonik yapısı değişen F2 tabakasının, yüksek frekans (HF) haberleşmesindeki önemi nedeniyle ayrıca incelenmesi gerekmektedir [3].

Dünden bugüne iyonosferdeki değişiklikleri ve etkilerini incelemek amaçlı teorik ve ampirik olmak üzere çeşitli modeller geliştirilerek iyonosferin gizemi çözülmeye çalışılmıştır. Bunlardan en öne çıkan ve yaygın olarak kullanılan Uluslararası Referans İyonosfer (IRI) modelidir. IRI modeli, Uzay Araştırma Komitesi (COSPAR) ve Uluslararası Radyo Bilimi Birliği (URSI) sponsorluğunda geliştirilmiştir. IRI modeli belirli bir konum ve zaman için elektron yoğunluğu, elektron içeriği, elektron sıcaklığı, iyon sıcaklığı ve iyon bileşimi kestirimleri üretebilmektedir (www.iri.org).

İONOLAB TEİ yöntemiyle işlenmiş uydu verilerinden elde edilen TEİ kestirimlerinin hata sinyalinin üretilmesi amacıyla model TEİ kestirim çıktısı ile birlikte parametrelerin güncelleme faktörü olarak kullanılabilmesi IRI modelinin güvenilirliğinin sınanması açısından da önem arz etmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada IRI modelini döngüsel bir yapı

içerisine oturtup IONOLAB TEİ kestirimleri ile arasındaki hata sinyalinin oluşturulması ve model çıktılarını ve girdilerini kullanarak F2 tabakasının iletişimle ilgili parametrelerini eniyileme ile elde etmek amaçlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan TEİ kestirimlerini üreten IONOLAB TEİ yöntemi Bölüm 2’de, IRI modeli Bölüm 3’te ve F2 katmanı parametrelerini belirleyen eniyileme yöntemi Bölüm 4’te anlatılmıştır. Bölüm 5’te sonuçlar detaylandırılmış ve kestirimler ionosonda verisi ile karşılaştırılmıştır. Son değerlendirmelere de Bölüm 6’da yer verilmiştir.

2. IONOLAB YÖNTEMİYLE TEİ KESTİRİMİ

IGS analiz merkezleri TEİ kestirimleri üretebilmesine rağmen, bu kestirimlerin zamansal çözünürlüğü düşüktür veya kestirimler ampirik veriler üzerine kuruludur. IONOLAB (www.ionolab.org) kestirim yöntemi ile Dünya üzerindeki herhangi bir GPS alıcı istasyonu ve zaman dilimi için TEİ kestirimi, alıcının en alt başucu açısı olan 10° üzerindeki tüm uyduların verileri kullanılarak ve alıcıların sınırı olan 30 saniye zaman çözünürlüğünde “Düzgünleştirilmiş En Küçük Kareler” yöntemi ile yapılabilmektedir [4]. Bu yöntemin IGS merkezlerinin ve IRI Modelinin kestirimlerine göre daha yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür [5]. TEİ değerleri elde edilirken uydu pozisyonlarına göre ağırlıklandırılarak verilerdeki çoklu yol etkilerinden kaynaklanan bozulmalar azaltılmaktadır [6-7]. IONOLAB TEİ kestirimleri, IRI modelinin Bölüm 3’te belirtilen parametrelerinin eniyilenmesi esnasında ölçüm verisi olarak kullanılacaktır.

3. IRI MODELİ

IRI modeli [8] değişik ölçüm kaynaklarından elde edilen verilerle güncellenen ampirik bir modeldir. Bu çalışmada kullanılan IRI modeli (IRI-Plas), ek olarak 20000 Km yüksekliğe kadar olan plazmaküreyi de hesaplamalarına dahil etmektedir [9]. Modelin giriş parametrelerinin bir kısmı güncel veriler, bir kısmı hesaplama yöntemlerine karar verme mekanizmasının seçim parametreleri ve diğer kısmı da katman karakteristiklerini içeren eniyilenebilir parametrelerdir. IRI modelinin çıktısı parametreler ile belirlenen ionosfer modeline göre elde edilen TEİ kestirimidir (IRI modelinden her katman için ayrı TEİ kestirim çıktısı alınabilmektedir) [8].

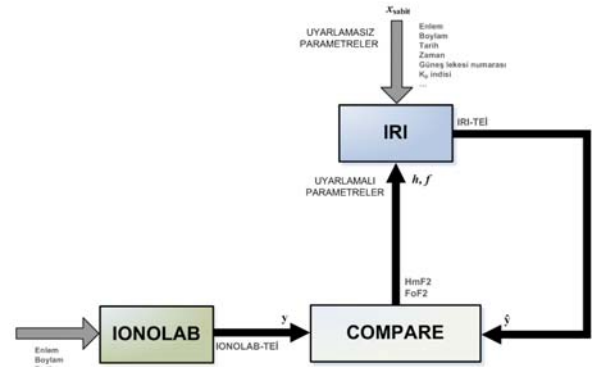
$$\hat{y} = \text{iri}(h, f, \mathbf{x}_{\text{sabit}}) \quad (1)$$

Burada h ionosferin F2 katmanının yüksekliğini, f ionosferin F2 katmanının kritik frekansını, ve $\mathbf{x}_{\text{sabit}}$ vektörü ise hedef enlem, boylam, tarih, zaman, günlük güneş lekesi ve K_p indisi gibi eniyilemeye girmeyen parametreleri ifade etmektedir. Bu parametrelerden güneş lekesi ve K_p indisi kullanıcıdan bağımsız olarak veri tabanından alınan günlük verilerdir. Giriş parametrelerine göre hesaplanan ve IRI modelinin çıktısı olan TEİ kestirimi ise \hat{y} ile ifade edilmiştir.

4. F2 KATMANI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Gündüz bütün ionosfer katmanları oluşurken, gece olup güneşin ionosfer etkisi ortadan kalkınca F2 katmanının altında kalan bütün katmanlar yok olur. Azalan elektron yoğunluğuna rağmen yalnızca F2 katmanı kalır. Dolayısıyla uzun mesafeli yüksek frekans iletişimde F2 katmanı büyük önem arz eder. F2 tabakasını karakterize eden başlıca iki iletişim parametresi HmF2 kritik yüksekliği ve FoF2 kritik frekansdır. Çünkü ionosfer, iyonik yapısı gereği kritik bir frekans değerinin üzerindeki sinyalleri geçirirken, düşük frekanslı sinyallerin kırılmasına neden olduğu için uzun mesafe iletişimde ve uydu iletişimde bu frekans değeri (FoF2) önemlidir. Aynı şekilde bu kritik frekans değeriyle sinyalin gidebileceği maksimum yüksekliğin de (HmF2) bilinmesi sağlıklı kestirim yapabilmemiz için gereklidir. IRI modeli kullandığı veri seti ile kritik frekans ve yükseklik analizi yapar ve bulduğu değerleri elektron yoğunluğu hesabında kullanır, TEİ kestirimi yapar. Olması gereken TEİ değerlerinden ne kadar uzak olduğumuzu bilirsek ve HmF2 ve FoF2 eniyilemesi yapabilirsek ionosferin yapısını oluşturmada büyük bir adım atmış oluruz.

Bunun için, IONOLAB TEİ verilerini (y) gözlem verileri olarak alıp IRI modelinin çıktısı olan model TEİ kestirimi (\hat{y}) ile arasındaki farkı minimize edecek bir eniyileme döngüsü kurmamız yeterli olacaktır. Bu amaçla oluşturulan eniyileme döngüsü Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: IRI Döngüsel Optimizasyon Modeli

Gözlem TEİ değerleri ile model TEİ değerleri arasındaki hata vektörünü e ile ifade edersek,

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \quad (2)$$

döngüsel model içerisinde kestirim hatası normunu $\|\mathbf{e}\|$ minimize edecek şekilde h ve f parametrelerini eniyileyerek en uygun ionosfer modelini oluşturmuş oluruz.

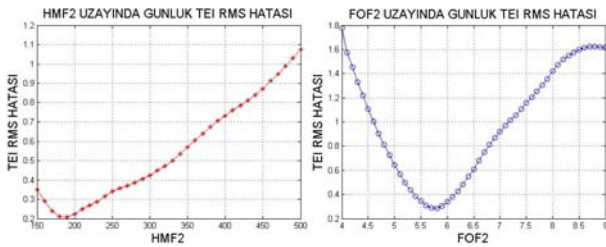
Kestirim hatası normunu saatlik veya günlük vektör seti ($\|\mathbf{e}_{\text{saatlik}}\|$ veya $\|\mathbf{e}_{\text{günlük}}\|$) olarak minimize ederek HmF2 kritik yükseklik (Km) ve FoF2 kritik frekans (Mhz) parametrelerinin saatlik veya günlük ortalama değerlerini elde etmiş oluruz.

IRI modelinin kullanacağı eniyileme modeline karar vermek için HmF2 ve FoF2 parametre uzayının oluşturacağı model TEİ kestirimi hata normu yüzeyinin incelenmesi gerekmektedir. Bütün parametre tanım aralığında hata norm karakteristiğinin global ve lokal minimumların sayısına ve konumuna göre bir eniyileme algoritması ilklendirilmiş ve çalıştırılmıştır. Bu incelemeler sonucunda eniyileme metodu olarak “Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler” yönteminin fazlasıyla yeterli olacağı görülmüştür. TEİ kestirim hata vektörü günlük ($\|e_{günlük}\|$) ve saatlik ($\|e_{saatlik}\|$) olmak üzere farklı zaman aralıkları içinde minimize edilmiş ve buna göre günlük ve saatlik ortalama HmF2 ve FoF2 değerleri eniyileme döngüsüyle elde edilmiştir.

5. ALGORİTMANIN SINANMASI

İlk örnek olarak, sakin gün olan “15 Ekim 2008” ve Türkiye’de Ankara’da yer alan “ankr” IGS istasyonu alınmıştır.

HmF2 tanım aralığı olan 150-500 km aralığında 10 km’lik adımlarla ve FoF2 tanım aralığı olan 4-9 Mhz aralığında 0.1 Mhz’lik adımlarla olmak üzere ayrı ayrı günlük ortalama kareler kökü (RMS) hata karakteristiği çıkartılmış ve sonuçlar Şekil 2’de gösterilmiştir. HmF2’ye bağlı hata grafiği oluşturulurken FoF2 için ortalama bir değer olan 6 Mhz değeri sabit alınmıştır. Benzer şekilde FoF2’ye bağlı hata grafiği oluşturulurken HmF2 için ortalama bir değer olan 250 Km değeri sabit alınmıştır. HmF2 ve FoF2 parametre setindeki TEİ hata karakteristikleri incelendiğinde parametrik tanım aralıklarında lokal minimum noktalarının olmadığı ve dolayısıyla minimumların global minimum olduğu görülmektedir.

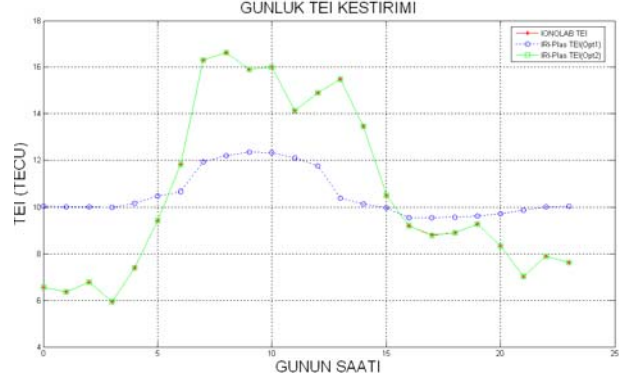


Şekil 2: Ankara 15 Ekim 2008 sakin günü için a) HmF2, b) FoF2 parametre setinde TEİ hata normu incelemesi

Bu nedenle, eniyileme metodu olarak “Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler” yöntemi seçilmiştir. Döngü içerisinde eniyileme parametrelerinin başlangıç değerleri olarak IONOLAB TEİ kestirimi (y) olmadan IRI’in hesapladığı değerler kullanılmıştır.

Daha sonraki inceleme konusu ise kestirim hatası normunu $\|e_{saatlik}\|$ ya da $\|e_{günlük}\|$ olarak minimize etmenin eniyileme performansına ve sonuçlarına olan etkileridir. Şekil 3’te IONOLAB TEİ kestirim vektörü y kırmızı yuvarlak, günlük uyduruma göre elde edilen IRI TEİ kestirimi yeşil kare ve

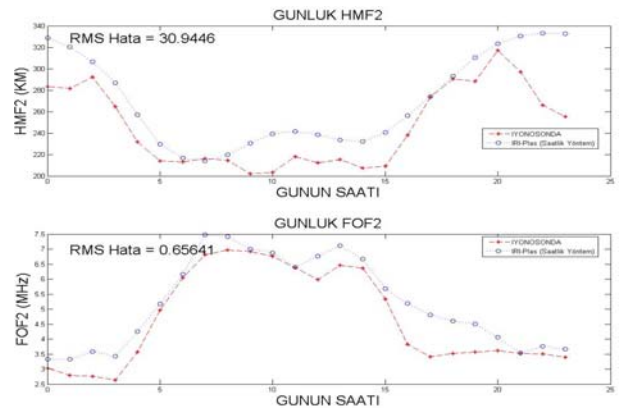
saatlik uyduruma göre elde edilen IRI TEİ kestirimi mavi yuvarlak ile gösterilmiştir.



Şekil 3: TEİ kestirimi sonuçları (15 Ekim 2008, Ankara)

Seçili gün ve alıcı istasyonu için, sırasıyla $\|e_{günlük}\|$ ve $\|e_{saatlik}\|$ hata vektörlerine göre parametre eniyilemesi sonucunda oluşan günlük TEİ kestirimlerinin RMS hata değerleri sırasıyla 2.89 TECU ve $1.84e-4$ TECU olarak bulunmuştur. Şekil 3’te görüldüğü gibi IONOLAB kestirimleri ile saatlik veri işlenerek yapılan IRI kestirimleri birebir örtüşmekte iken, günlük veriyi birlikte kullanarak yapılan IRI kestirimlerinde yüksek oranda bir hata oluşmaktadır. Bu nedenle saatlik eniyileme yapılmasının uygun olduğu ve döngüsel modelin saatlik veriyi işleyecek şekilde oluşturulması uygundur. Sonraki analizler saatlik veri eniyilemesi çıktılarında göre yapılmıştır ve verilen saatlik hata normunun $\|e_{saatlik}\|$ minimize edilmesi sonucu elde edilen parametreler kullanılarak üretilen 24 saatlik IRI modeli TEİ kestirimleridir.

Ankara ile aynı enlemdaki en yakın ionosonda Atina (AT138) ionosondası olduğu için karşılaştırmalı sonuçlar için bu istasyon kullanılmıştır. Buna göre 15 Ekim 2008 tarihi için Ankara için elde edilen HmF2 ve FoF2 değerlerinin, Atina ionosonda verileri ile karşılaştırılması Şekil 4’te verilmiştir. Şekilde ionosonda verileri kırmızı, eniyileme sonucu elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri de mavi ile gösterilmiştir.

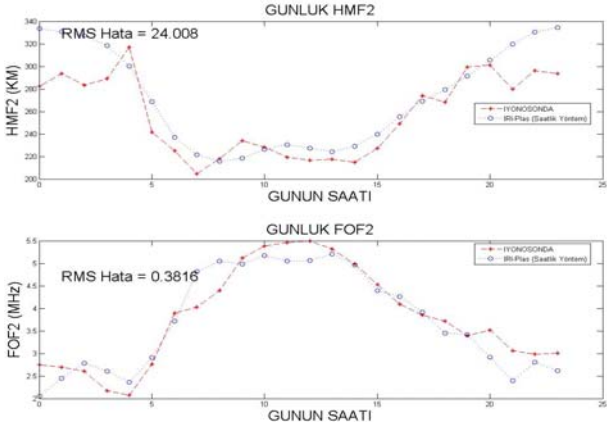


Şekil 4: ankr - AT138 a) HmF2, b) FoF2 karşılaştırması

Burada RMS hatalar HmF2 için 30.95 Km ve FoF2 için de 0.66 MHz olarak bulunmuştur. Grafiklerin benzerlik göstermesine rağmen hataların büyük olmasının temel nedeni

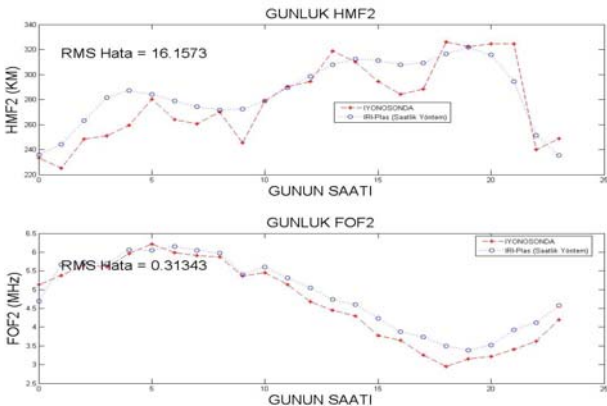
Ankara’da bir ionosonda olmaması nedeniyle Atina’daki ionosonda verilerinin kullanılmasdır.

Yüksek enlem bölgesinde örnek olarak Polonya’daki “wroc” (Wroclaw) IGS istasyonu ve bu istasyona yakın olan Juliusruh/Rugen (JR055) ionosondası seçilmiştir. Şekil 5’te 15 Ekim 2008 günü için elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri ile ionosonda verilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde ionosonda verileri kırmızı, eniyileme sonucu elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri de mavi ile gösterilmiştir. Yine bu durumda da kestirimlerin birbiri ile oldukça uyumlu olduğu gözükmektedir. RMS hatalar ise HmF2 için 24.01 Km ve FoF2 için de 0.38 MHz olarak bulunmuştur.



Şekil 5: wroc - JR055 a) HMF2, b) FOF2 karşılaştırması

Alçak enlem bölgesinde ise örnek olarak Avustralya’daki “karr” (Karratha) IGS istasyonu ve bu istasyona yakın olan Learmonth (LM42B) ionosondası kullanılmıştır. Şekil 6’da elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri ile ionosonda verilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde ionosonda verileri kırmızı, eniyileme sonucu elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri de mavi ile gösterilmiştir. Grafiklerin birbiri ile yine oldukça uyumlu olduğu gözükmektedir. RMS hatalar ise HmF2 için 16.16 Km ve FoF2 için de 0.31 MHz olarak bulunmuştur.



Şekil 6: karr - LM42B a) HMF2, b) FOF2 karşılaştırması

6. SONUÇLAR

Sonuç olarak IRI ve TEİ kestirimleri döngüsel model içerisinde işlenerek HmF2 ve FoF2 parametreleri düşük hata

oranıyla eniyilenebilmektedir. Farklı enlemlerdeki yerler için alınan sonuçlar, oluşturulan eniyileme algoritmasının düzgün çalıştığını göstermektedir. Eniyileme algoritması ile bulunan HmF2 ve FoF2 model parametreleri ionosonda verileriyle (www.spidr.ngdc.noaa.gov/spidr) karşılaştırılmış ve oluşan hataların kabul edilebilir büyüklükte olduğu sonucuna varılmıştır. HmF2 ve FoF2 için karşılaştırmalı sonuçlar incelendiğinde kestirim hatasının gece saatlerinde gündüze göre daha büyük olduğu, ama gün genelinde ionosonda verileriyle kestirimlerin örtüştüğü görülmektedir. Bu çalışma ile literatürdeki daha önceki çalışmalara getirilen yeniliklerden bir tanesi de kullandığı IRI modelinde 20000 Km’ye kadar çıkarılabilmektedir. Plazma tabakası için elektron içeriği ölçülmesinde IONOLAB TEİ yöntemiyle kestirilen TEİ değerleri kullanılarak bugüne kadar yapılmamış olan HmF2 ve FoF2 parametre eniyilemesi yapılabilmiş ve ionosfer yapısının en gerçekçi modellenmesine biraz daha yaklaşılmıştır. Türkiye üzerine daha geniş çapta yerleştirilmiş YKS istasyonu ağından kestirilecek TEİ verileri ile Türkiye üzerindeki ionosferin daha iyi bir modeli oluşturulabilir ve sürekli güncellenen veriler ışığında kalıcı, güncel ve Türkiye’ye özel istatistiksel bir model oluşturulabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TUBITAK EEEAG 109E055 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

7. KAYNAKÇA

- [1] Arıkan, F., Erol, C.B. and Arıkan, O., “Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data”, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12): 1469-1480, 2003.
- [2] Nayır, H., “Yerküresel Konumlama Sistemi İşaretleri kullanarak İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi”, *Hacettepe Ü. Ele-Elo. Müh. Yüksek Lisans Tezi*, 2007.
- [3] Kolawole, M. O., *Radar Systems, Peak Detection and Tracking*, Oxford, UK: Newnes, 2002.
- [4] Arıkan, F., Nayır, H., Sezen, U. and Arıkan, O., “Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC”, *Radio Science*, 43: RS4004, 2008
- [5] Uğurlu, O., “IONOLAB Yöntemi ile WEB tabanlı TEİ Hesaplanması ve Sunumu”, *Hacettepe Ü. Ele-Elo. Müh. Yüksek Lisans Tezi*, 2007.
- [6] Arıkan, F., Sezen, U., Arıkan, O., Uğurlu, O., Nayır, H., “SpaceWeather Activities of IONOLAB Group: IONOLAB-TEC”, *Geophysical Research Abstracts*, 11:EGU2009-5188, 2009.
- [7] Nayır, H., Arıkan, F., Arıkan, O. and Erol, C.B., “Total electron content estimation with Reg-Est”, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 112: A11313, 2007.
- [8] D. Bilitza (ed.), *International Reference Ionosphere 1990*, NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
- [9] T.L. Gulyaeva, “Storm time behavior of topside scale height inferred from the ionosphere-plasmasphere model driven by the F2 layer peak and GPS-TEC observations,” *Advances in Space Research*, 2010 doi:10.1016/j.asr.2010.10.025, 2010.

İYONOSFER TEİ VERİLERİNİN UZAY-ZAMANSAL ARADEĞERLEMESİ

SPATIO-TEMPORAL INTERPOLATION OF IONOSPHERIC TEC DATA

Aykut Yıldız, Orhan Arıkan

Feza Arıkan

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
ayildiz, oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr

ÖZETÇE

GPS sinyalleri iyonosferdeki elektron yoğunluğunun kestirilmesi için önemli bir bilgi kaynağıdır. Ancak, GPS alıcılarında sinyallerin kaydedilemediği durumlar olmaktadır. Bu kesinti sırasında iyonosfer elektron içeriğinin kestiriminin yapılabilmesi için kesinti süreleri içinde kalan verilerin aradeğerleme ile kestirimi gereklidir. Bu çalışmada, bir GPS ağındaki ölçümlerin uzay-zamansal ilintileri kullanılarak yeni bir aradeğerleme tekniği geliştirilmiştir. Gerçek veriye dayalı sonuçlar, geliştirilen tekniğin yüksek başarılı kestirimler ürettiğini göstermiştir.

ABSTRACT

GPS signals are crucial, because they are used to estimate the electron density in the ionosphere. However, sometimes GPS receivers can not receive signals. In order to estimate ionospheric electron density during this cutoff, the interpolation of the data is necessary. In this paper, a new interpolation scheme that uses spatio-temporal correlation in the GPS network is proposed. The simulation results on real data show that the proposed technique produces promising results.

1. GİRİŞ

Atmosferin yaklaşık 80km yüksekliğinden başlayan ve 1200km'ye kadar yükselen iyonosfer tabakası zaman ve uzayda değişiklik gösteren dinamik bir iyon dağılımına sahiptir [1], [2]. İyonosferin HF iletişimi için uygun bir kanal olması çok önemli uygulamaların hayata geçmesini sağlamıştır. Modern iletişim ihtiyaçlarının gereği olan yüksek kapasitelere erişim iyonosferin gerçek zamanda izlenmesini ve bu izleme sonucunda kullanılması gereken frekans bölgelerinin alıcı/verici pozisyonlarına uygun olarak belirlenmesini gerektirmektedir [3], [4].

Gerçek zamanlı olarak yer belirleme ve rota takip sistemleri GPS alıcılarını kullanmaktadır. Bu alıcılara ulaşan sinyaller iyonosferden geçerken kırılmakta ve faz kaymasına uğramaktadır. Yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda iyonosfer kaynaklı bu etkilerin düzeltilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, iletişim sistemlerinde olduğu gibi, iyonosferin gerçek zamanda gözlenmesi gerekmektedir [2], [3], [4], [5].

İyonosferin çok yüksek bir irtifa aralığında olması iyonosferdeki iyon dağılımının kısa zaman aralıklarıyla geniş bir

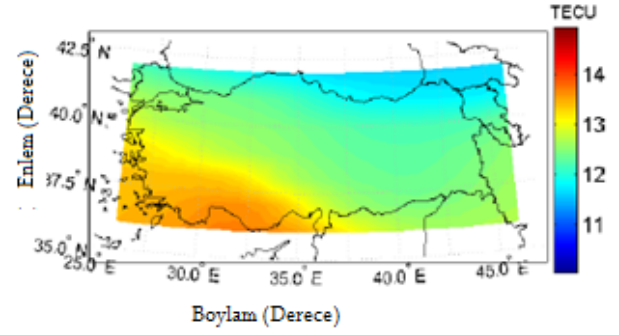
coğrafi bölgede doğrudan ölçülmesini imkansız kılmaktadır. Bu nedenle iyonosferin gözlenme ihtiyacı dolaylı ölçümlerle yapılmaktadır. Bu amaçla kullanılan en etkin yöntemlerden birisi hassas GPS alıcılarındaki ham veriler üzerinde iyonosfer kaynaklı faz kaymalarının tespitine dayanmaktadır. GPS uydusundan GPS alıcısına ulaşan sinyaller arasındaki faz kayması, uydu-alıcı arasındaki yol üzerindeki toplam iyon sayısı ile ilintilidir [2], [3]. Bu fiziksel bağıntı kullanılarak ölçülen faz farklarından uydu-alıcı arasındaki Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri elde edilir. Bir GPS ağındaki tüm alıcılar ve her an görülebilen en az 4 GPS uydusu sayesinde, geniş bir coğrafi bölge üzerinde yer alan iyonosferin çeşitli noktalarında TEİ kestirimleri elde edilmiştir [1], [2], [3], [4], [6].

Türkiye'nin bu amaçla kullanılacak çok güçlü bir ölçüm altyapısı bulunmaktadır. Şekil 1'de gösterilen TUSAGA-aktif ölçüm ağı sayesinde yaklaşık 80km×80km aralıklarla yerleştirilmiş 147 istasyonda gerçek zamanla TEİ kestirimleri elde edilmektedir [1], [3], [5]. Bu kestirimlerin birlikte değerlendirilmesiyle yurdumuz üzerinde TEİ haritaları elde edilmektedir [1], [2], [3]. Bir örneği Şekil 3'de gösterilen bu TEİ haritaları iletişim ve pozisyon belirleme ihtiyaçlarına karşılık verebilecek gerçek zamanlı bilgi üretmektedir. Bu haritaların kesintisiz olarak yenilenmesi, GPS istasyonlarında yapılan ölçümlerde oluşabilecek boşlukların aradeğerlemesiyle doldurulmasını gerektirmektedir. Şekil 2'de TUSAGA-aktif ağında 2009 yılında oluşan boşlukların sürelerinin dağılımı verilmiştir. Bu dağılımdan gözüktüğü gibi boşlukların %90'ı 40 dakikadan kısa olmasına rağmen, oldukça uzun süreli boşluklar da bulunmaktadır. Bu çalışmada GPS istasyonlarında elde edilen TEİ verilerinin uzay-zamansal aradeğerlemesini yaparak kesintisiz TEİ haritalarının oluşmasını sağlayan gerçek zamanda kullanılabilir bir teknik geliştirilmiştir.

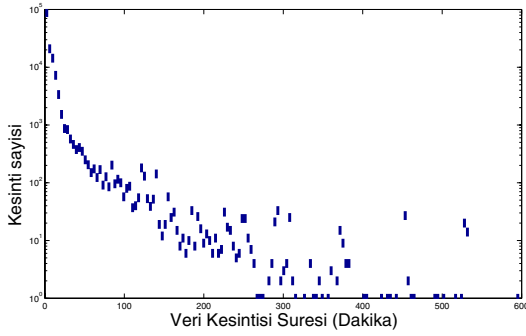
TEİ verileri zaman ve uzayda ilintili bir yapıdadır. Şekil 4'te bir istasyonda ölçülen TEİ verisinin bir gün içinde değişimine bir örnek verilmiştir. Görüldüğü gibi TEİ verilerinin zamansal ilintisi kısa süreli boşlukların kolaylıkla var olan diğer verilerden doldurulmasını sağlamaktadır. Ancak uzun süreli boşluklar bu şekilde güvenilir biçimde doldurulamamaktadır. Bu durumda TEİ ölçümlerindeki uzaysal ilintinin kullanılması gereklidir. Şekil 3'de gösterilen TEİ haritasında bu ilintinin özellikle birbirlerine 200km'ye kadar yakın olan istasyonlarda önemli seviyede olduğu gözlenmektedir.



Şekil 1: TUSAGA aktif istasyonları haritası.



Şekil 3: TEİ verisinin uzaysal iltintisi



Şekil 2: Veri kesintisi süresi histogramı

2. TEİ Verilerindeki Boşlukların Uzak-zamansal Aradeğerlemesi

Uzak ve zamansal iltintinin birlikte kullanılmasını sağlamak amacıyla geliştirilen aradeğerleme tekniği iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada TEİ verisindeki boşluğa karşılık gelen uzaysal ve zamansal aradeğerleme hesaplanmakta, ikinci aşamada ise aradeğerlemenin bir dışbükey birleşimi ile uzak-zaman aradeğerleme sonuçları birleştirilmektedir.

Uzak aradeğerlemesinde yakın ölçüm istasyonlarında elde edilen verileri arasındaki iltinti kullanılmaktadır. Aradeğerleme yapılması gereken TEİ verisinin j . istasyon ve bu istasyonun yakın komşuluğundaki istasyon indislerinin K_j kümesinde yer aldığı durumda, uzak aradeğerlemesi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir:

$$\hat{\mathbf{X}}_{j,u} = \sum_{i \in K_j} \mathbf{X}_i \alpha_i \quad (1)$$

Bu ifadeye yer alan \mathbf{X}_i vektörleri komşu istasyonlardaki TEİ ölçümlerine α_i değişkenleri aradeğerleme katsayılarına ve $\mathbf{X}_{j,u}$ ise j . istasyondaki TEİ ölçümlerinin uzaysal aradeğerlemesine karşılık gelmektedir.

Uzaysal aradeğerleme katsayıları aynı bölgede daha önce kesintisiz olarak kaydedilmiş TEİ verileri kullanılarak en iyi uyumu sağlayacak şekilde aşağıdaki eniyileme probleminin çözümü olarak seçilmektedir.

$$\alpha^* = \underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \sum_{m=1}^{G_s} \left\| \mathbf{X}_j^m - \sum_{i \in K_j} \mathbf{X}_i^m \alpha_i \right\|^2 \quad (2)$$

Burada G_s ayrı günün verisi kullanılmaktadır. Bu eniyileme probleminin çözümü tektir ve aşağıdaki kapalı ifadeyle bulunabilir.

$$\alpha^* = \left(\sum_{m=1}^{G_s} (\mathbf{A}^{mT} \mathbf{A}^m) \right)^{-1} \left(\sum_{m=1}^{G_s} (\mathbf{A}^{mT} \mathbf{b}^m) \right) \quad (3)$$

Bu ifadeye yer alan \mathbf{A} matrisinin sütunları m . gündeki komşu istasyonlardaki TEİ ölçümlerinden oluşmaktadır:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^m &= [\mathbf{X}_1^m \ \mathbf{X}_2^m \ \dots \ \mathbf{X}_{K_j}^m] \\ \mathbf{b}^m &= \mathbf{X}_j^m \end{aligned} \quad (4)$$

ve \mathbf{b}^m de aradeğerlemesi yapılacak istasyonunun m .gündeki TEİ ölçümüdür.

Bu bildiride zaman aradeğerleme tekniği olarak Kobra eğrisi oturtması kullanılmıştır. Dnk.5'deki z zamansal aradeğerleme anlamındadır. Bu formülde j istasyonundaki verinin boşluk dışındaki kısmı \mathbf{X}_{j,I^c} ve doldurulması gereken zaman aralıkları t_1 ve t_2 girdi olarak verilir. Tekniğin çıktısı ise boşluğu doldurulmuş bir günlük komple TEİ verisi $\hat{\mathbf{X}}_{j,z}$ 'dir. Girdi ve çıktıları bu şekilde verilen Kobra eğrisi oturtması esasen veri boşluğuna 3.dereceden bir polinom oturtmaktadır. Bu polinomun katsayıları uç noktalarda zaman sinyalinin kendisinin, 1. türevinin ve 2. türevinin sürekli olmasını sağlar. Bu düzgünlük özellikleriyle Kobra eğrisi aradeğerlemesi uç noktalarda başarıyı yüksek sonuçlar vermektedir. Ayrıca parametrik olmayan yapısıyla bu teknik gürbüz bir özellik taşır.

$$\hat{\mathbf{X}}_{j,z} = K_z(\mathbf{X}_{j,I^c}; t_1, t_2) \quad (5)$$

Uzak aradeğerlemesi ve zaman aradeğerlemesi gerçekleştirildikten sonra bu iki aradeğerleme 6'deki gibi birleştirilmiştir. Bu sentezde kullanılan \mathbf{D} köşegen bir matristir. Bu \mathbf{D} matrisinin çözümünü veren Dnk. 7'in kapalı biçimde bir çözümü mevcut değildir.

Tablo 1: İstasyonların optimal doğrusal kombinasyon katsayıları

Mersin	Kilis	Antep
0.3531	0.3023	0.2907

$$\hat{\mathbf{X}}_{j,u,z} = \mathbf{D}\hat{\mathbf{X}}_{j,u} + (\mathbf{I} - \mathbf{D})\hat{\mathbf{X}}_{j,z} \quad (6)$$

$$\mathbf{D}^* = \underset{\mathbf{D}}{\operatorname{argmin}} \sum_{m=1}^{G_s} \left\| \mathbf{X}_{j,I}^m - \left(\mathbf{D}\hat{\mathbf{X}}_{j,u}^m(\alpha^*) + (\mathbf{I} - \mathbf{D})\hat{\mathbf{X}}_{j,z}^m \right) \right\|^2 \quad (7)$$

Bu optimizasyon problemini çözülebilir hale getirmek için Dnk. 9'de görüldüğü gibi \mathbf{D} matrisi $\check{\mathbf{D}}$ vektörüne dönüştürülürken $\hat{\mathbf{X}}$ vektörleri ise $\check{\check{\mathbf{X}}}$ köşegen matrislerine dönüştürülür.

$$\mathbf{D}\hat{\mathbf{X}}_{j,u}(\alpha^*) + (\mathbf{I} - \mathbf{D})\hat{\mathbf{X}}_{j,z} = \check{\check{\mathbf{X}}}_{j,u}(\alpha^*)\check{\mathbf{D}} + \check{\check{\mathbf{X}}}_{j,z}(\mathbf{I} - \check{\mathbf{D}}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \operatorname{Diag}(\check{D}_1, \check{D}_2, \dots, \check{D}_N) \\ \check{\check{\mathbf{X}}}_{j,u}(\alpha^*) &= \operatorname{Diag}(\hat{X}_{j,u}^1(\alpha^*), \hat{X}_{j,u}^2(\alpha^*), \dots, \hat{X}_{j,u}^N(\alpha^*)) \\ \check{\check{\mathbf{X}}}_{j,z} &= \operatorname{Diag}(\hat{X}_{j,z}^1, \hat{X}_{j,z}^2, \dots, \hat{X}_{j,z}^N) \end{aligned} \quad (9)$$

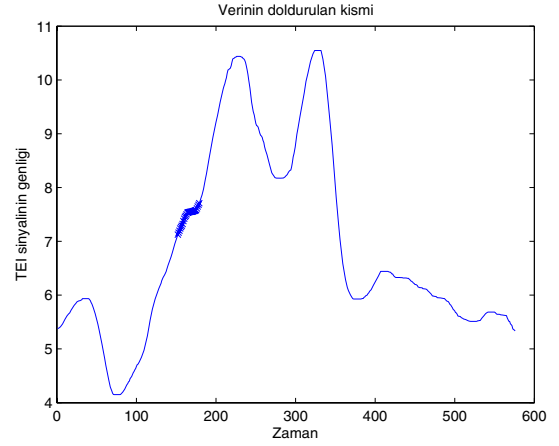
$$\begin{aligned} \mathbf{A}^m &= \check{\check{\mathbf{X}}}_{j,z}^m - \check{\check{\mathbf{X}}}_{j,u}^m(\alpha^*) \\ \mathbf{b}^m &= \check{\check{\mathbf{X}}}_{j,z}^m \cdot \mathbf{1} - \mathbf{X}_j^m \end{aligned} \quad (10)$$

Dnk. 9'daki dönüşümlerden sonra Dnk.7'in çözümü yine Dnk.3'daki gibi elde edilir. Burada kullanılan \mathbf{A}_m ve \mathbf{b}_m parametreleri Dnk.10'daki gibi seçilir. Bu şekilde elde edilen \mathbf{D}^* vektörü optimaldir ve önceden hesaplanmış uzaysal aradeğerlemenin ve zamansal aradeğerlemenin birleştirilmesi amacıyla kullanılır.

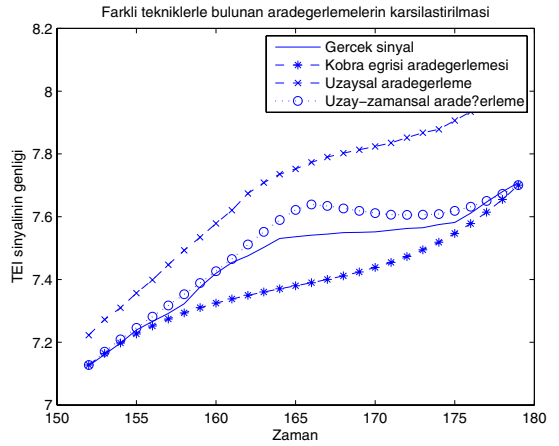
3. Deney sonuçları ve başarımların analizi

Bu bölümde uzay-zamansal aradeğerlemenin sadece uzaysal ve sadece zamansal aradeğerleme teknikleriyle karşılaştırılması yapılacaktır. Bu karşılaştırılmanın yapılabilmesi için aradeğerleme yapılan sinyal kısmının bilinmesi gerekir. Bu yüzden Şekil 4'da gösterilen boşluk içermeyen bir TEI verisi örneği alınarak bu verinin işaretli kısmı atılmıştır. Aradeğerleme algoritmamıza girdi olarak verilen bu veri 1 Ağustos 2009 tarihinde Adana'da ölçülen Tusaga-Aktif verisidir.

Uzaysal aradeğerlemenin ilk aşaması olarak optimal α katsayılarının bulunması gerekmektedir. Bu katsayılara sahip çevre istasyonlar olarak Mersin, Antep ve Kilis tercih edilmiştir. Katsayıların eğitilmesi için aradeğerleme tarihine yakın $G_s = 10$ gün seçilmiştir. Bu parametre seçimleri altında Dnk. 3'deki kapalı biçim formülü kullanılarak Tablo 1'te gösterilen katsayılar elde edilmiştir.



Şekil 4: 1 Ağustos 2009 tarihinde Adana'da ölçülen TEI verisi ve atılan kısmı



Şekil 5: Farklı tekniklerle elde edilen aradeğer sinyalleri

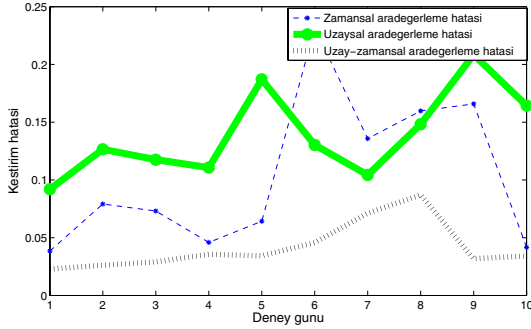
Uzaysal aradeğerlemeyle, zamansal aradeğerlemeyle ve bu ikisinin kombinasyonuyla elde edilen sinyaller Şekil 5'ta gösterilmiştir. Burada, zaman aradeğerlemesinin uç noktalarda daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle uç noktalarda uzay-zamansal aradeğerleme zaman aradeğerlemesine daha yakın bir görünüm arz etmektedir. Orta noktalarda ise uzaysal aradeğerleme eğrisi de sonuca etki ederek sonucu iyileştirmektedir. Söz konusu üç aradeğerleme tekniğinin hata değerleri Dnk.11'deki gibi hesaplanır ve elde edilen hata değerleri Tablo 2'ta gösterilmektedir. Bu tabloda uzay-zamansal aradeğerlemenin yüksek başarıma sahip olduğu gözlemlenmektedir.

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} |\mathbf{X}_j^m - \hat{\mathbf{X}}_j^m|^2}{N}} \quad (11)$$

Elde edilen aynı α^* ve \mathbf{D}^* parametreleri kullanılarak yapılan bir başarımların analizi Şekil 6'ta gösterilmektedir. Bu teknikte bir önceki deneye yakın olmak suretiyle seçilen

Tablo 2: Üç farklı aradeğerleme tekniğinin hata performansı

Uzaysal aradeğerleme hatası	Zamansal aradeğerleme hatası	Uzay-zamansal aradeğerleme hatası
0.2291	0.0889	0.0439



Şekil 6: 10 farklı gün için hata performansı

10 gün için Adana verisi üzerinde aynı saat aralığı atılarak aradeğerleme yapılmış ve hata başarımları karşılaştırılmıştır. Burada uzaysal aradeğerlemenin her gün belirli bir başarımları artışı sağladığı gözlemlenmektedir.

4. Sonuçlar

Bu makalede zamansal ve uzaysal aradeğerlemeler birleştirilerek elde edilen uzay-zamansal aradeğerleme tekniği sunulmuştur. Krig tabanlı uzay aradeğerlemesinin ve Kobra zamansal aradeğerlemesinin optimal bir kombinasyonla birleştirilmesiyle elde edilen tekniğin başarımları yüksek ve gülbüz bir teknik olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bir parametre eğitim sürecinden sonra aradeğerlemenin yapılması son derece hızlı bir şekilde uygulanabilmektedir. Buna ek olarak, teknik hem kısa veri boşluklarının hem de uzun veri boşluklarının doldurulmasında kullanılabilir. Bu iyi nitelikleriyle ön plana çıkan tekniğin TUSAGA-aktif verilerine uygulanması için eğitilen parametrelerin zamana ve uzaya karşı bağımlılığı incelenecektir.

Teşekkür

Bu çalışma, TUBITAK EEEAG 109E055 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data" Journal of Geophysical Research-Space Physics, 108(A12), 1469-1480, 2003.
- [2] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Regularized esti-

mation of VTEC from GPS data for a desired time period" Radio Science, 39(6), RS6012, 2004.

- [3] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model" Advances in Space Research, doi:10.1016/j.asr.2007.01.082, 39, 867-874, 2007.
- [4] Nayir, H., Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Total Electron Content Estimation with Reg-Est", J. Geophys. Res., 112, A11313, 1-11, 2007.
- [5] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., and Arikan, O., "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC", Radio Sci., 43, RS4004, 1-13, 2008.
- [6] Erturk, O., Arikan, O. and Arikan, F., "Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time", Adv. Space Res., 43, 1702-1710, 2009.
- [7] Gulyaeva, T.L., Arikan, F. and Delay, S.H., "Scale Factor Mitigating Non-Compliance of Double Frequency Altimeter Measurements of the Ionospheric Electron Content over the Oceans with GPS-TEC Maps", Earth, Planets and Space, 61, 1103-1109, 2009.
- [8] Sayin, I., Arikan, F., and Arikan, O., "Regional TEC Mapping with Random Field Priors and Kriging", Radio Sci., 43, RS5012, 1-14, 2008.
- [9] Sayin, I., Arikan, F., Arikan, O. "Synthetic TEC Mapping with Ordinary and Universal Kriging", Proceedings of RAST-2007, Recent Advances in Space Research, Harbiye Askeri Muze, Hava Harb Okulu, Istanbul, 14 - 16 Haziran 2007.
- [10] Sayin, I., Arikan, F., Arikan, O. "Regional Space-Time Interpolation of GPS-TEC with Kriging", Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007, Institute of Atmospheric Physics, Prag, Cek Cumhuriyeti, 10 - 14 Temmuz 2007.
- [11] Sayin, I., Yilmaz, A., Arikan, F., Gurun, M., O. Arikan, "Comparison of Kriging, Random Field Priors and Neural Network on Synthetic TEC Data", (Ingilizce) Turkish National Geodetic Commission, Turkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Scientific Meeting 2007 on Monitoring and Modeling of the Ionosphere and Troposphere, ODTU, Ankara, 14-16 Kasim 2007.
- [12] Sayin, I., Arikan, F., Gulyaeva, T., "Regional Mapping of Total Electron Content with Kriging and Random Field Priors", (Ingilizce) IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu AT-MOS'2008 Bildiriler Kitabı, ITU, Maslak Istanbul, 25-28 Mart 2008, pp: 224-232.

SENTETİK TEİ YÜZEYLERİ İÇİN PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU İLE PARAMETRE KESTİRİMİ PARAMETER EXTRACTION BY USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Yunus Engin Gökdağ¹, Feza Arıkan¹, Cenk Toker¹, Orhan Arıkan²

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi, Beytepe

yungok@ee.hacettepe.edu.tr, arikan@ee.hacettepe.edu.tr, cenk.toker@ee.hacettepe.edu.tr

²Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi, Bilkent

oarikan@ee.bilkent.edu.tr,

ÖZETÇE

Bu çalışmada yerküresel ve bölgesel Toplam Elektron İçeriği modellerinin gürültülü ve gürültüsüz sentetik yüzeyleri üzerinden Parçacık Sürü Optimizasyonu ile parametrelerinin kestirimleri amaçlanmıştır. Ayrıca algoritmanın daha iyi çalışabilmesi için PSO üzerinde yapılan iyileştirmeler anlatılmıştır. İyonkürenin bölgesel ve yerküresel olarak bozulmalı ve sakin günlerini modelleyebilecek yönseme fonksiyonları gösterilmiştir. Gürültülü yüzeyler için enlem kuşağına göre farklı değışitili eklenebilir beyaz Gauss gürültüsü konmuştur. Yerküresel örnekleme olarak Uluslararası YKS Sistem Ağı (IGS) ve hem yerküresel hem de bölgesel örnekleme için Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Aktif Ağı (TUSAGA-Aktif) kullanılmıştır. Başarım ve hata kriterleri belirlenip çift çekirdekli Gauss yönseme yüzeyi için gürültülü ve gürültüsüz sonuçlar konmuştur.

ABSTRACT

In this study, parameter extraction is made for regional and global ionospheric Total Electron Content (TEC) on both noiseless and noisy synthetic surfaces by using modified Particle Swarm Optimization (PSO). In addition, the improvements made in the PSO algorithm to obtain better results are presented. Trend functions that best regionally and globally represent the quiet and distorted ionosphere are given. For noisy trend surfaces, additive white Gaussian noise is added on trend surfaces according to latitude. International GPS System stations (IGS) are used for regional sampling whereas TNPNG-Active stations are used for both regional and global sampling. A brief discussion of PSO and its improvements for modified PSO is provided. Performance and error criteria are determined for the results of noisy and noiseless dual-core Gaussian trend surfaces.

Bu çalışma TüBİTAK EEEAG 109E055 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

978-1-4673-0056-8/12/\$26.00 ©2012 IEEE

1. GİRİŞ

Dünyanın elektriksel olarak iletken bir üst katmanı olan iyonküre, yüksek enerjili ultraviyole, mor ötesi ve X-ışınlarının gaz atomlarını ve moleküllerini son yörüngelerinde dolaan elektronları serbest hale geçirmesiyle oluşmuş negatif ve pozitif yüklü iyonların ve serbest elektronların atmosferin 60 ile 1000 km arasında yer alan nötr plazma katmanıdır. Elektron yoğunluğu iyonkürenin en önemli parametresidir. Güneş enerjisinde meydana gelen yaklaşık 11 yıllık değışimler, güneş patlamaları, güneş lekeleri, jeomanyetik aktivitede olabilecek değışimler ve dünyanın eksenini gibi birçok olay iyonkürede değışimlere yol açar. Atmosferin iyonize katmanı kısa dalga yayılımında ve haberleşmede, uyduların haberleşmesinde, uzay bazlı yön bulma sistemlerinde ve alçak yörünge uydularında önemli bir rol oynar. Ayrıca literatürde yapılan son araştırmalarda yer kabuğundaki sismik hareketler ile iyonküredeki ani değışimler ve düzensizlikler arasında bir ilinti olduğu gösterilmiştir [1]. Bu nedenle iyonküre üzerindeki etkileri anlayabilmek için elektron yoğunluğunun davranışlarını ve değışimlerini incelemek gerekir. Uzay iklimi tahmini ve iyonküreyi konumsal ve anlık en iyi gösteren model kestirimi için iyonküreyi modelleyen istatistiksel ve analitik tanımlamalara ihtiyaç vardır. Geçerli olan analiz modelleri bu ihtiyaçları karşılamaktan uzaktır. İyonküredeki bu değışkenliğin ve zaman-uzamsal yapının elde edilmesi çoğunlukla Toplam Elektron İçeriğinin (TEİ) kestirimiyle mümkündür. Toplam Elektron İçeriği (TEİ), bir metrekaresi silindirik boyunca toplam serbest elektron miktarını ifade eder. Birimi TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$) olan TEİ değerleri son yıllarda Yerküresel Konumlama Sistemi gibi uyduların işlenmesiyle hesaplanabilir. Böylece TEİ değerleri incelenerek iyonküredeki kısa ve uzun dönemli değışimler takip edilebilir. Uzayda ve zamanda her noktada TEİ ölçümü imkansızdır. Bunun için TEİ haritalamasında ölçüm yapılan istasyon değerleri kullanılarak, aradeğerleme ve dışdeğerleme yöntemleriyle kaliteli ve yüksek çözünürlükte düzenli kestirimler yapılabilir. Önceki çalışmalarda Harita Genel Komutanlığı

tarafından Türkiye üzerine düzgün yerleştirilmiş TUSAGA-Aktif YKS alıcı ağı üzerinden elde edilen TEİ kestirimleri kullanılmıştır [8]. Ayrıca Uluslararası YKS Servisi'ne (IGS) bağlı istasyonlar ve bunlardan elde edilerek yayımlanan, zamanda 2 saat, enlemde 2.5° , boylamda 5° çözünürlükte olan yerküresel iyonosferik haritalar da (GIM) mevcuttur. GIM haritalarına IONEX formatında ulaşılabilir. IONEX haritaları manyetik ekvator çevresindeki en fazla iyonlaşmanın olduğu konumu ve bu konunun dünyanın hareketiyle doğudan batıya doğru ilerleyişini gösterir. İyonlaşma tepeleri yerküresel olarak iki boyutlu tek ve çift çekirdekli Gauss fonksiyonlarıyla modellenilebilir. Bölgesel olarak da TEİ değerleri sabit, doğrusal ve kuadratik fonksiyonlarla gösterilebilir. TEİ dağılımını en iyi ifade eden herhangi bir fonksiyonun parametrelerini bulmada eniyileme yöntemlerinden biri olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. PSO popülasyon tabanlı, stokastik bir eniyileme tekniğidir [2]. Bu çalışmada en iyi parametre kestirimi için PSO üzerinde yapılan değişiklikler, gürültüsüz ve gürültülü sentetik TEİ yönseme yüzeylerinin oluşturulması ve PSO'nun bu yüzeylerdeki parametre kestirim başarımları anlatılmıştır.

2. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU

Parçacık Sürü Optimizasyonu genel amaçlı, çalıştırılması kolay, fazla işlem gerektirmeyen, en iyi sonucu bulmada öne çıkan ve birçok mühendislik alanında kullanılan bir eniyileme tekniğidir. 1995 yılında hayvanların yiyecek bulmadaki hareket mantığından yola çıkarak Russel Eberhart ve James Kennedy tarafından geliştirilmiştir. Algoritmada, çözüm için arama uzayında hareket eden ve o uzayda belirli bir çözüme sahip her bireye parçacık adı verilir. Parçacık topluluğuna sürü adı verilir. Sürüdeki her parçacık ilk olarak rassal bir şekilde arama uzayına dağıtılırlar. Her parçacık tanımlı uzayda belirli hızla, tanımlanmış bir maliyet fonksiyonu üzerinde ilerler ve her hareket sonunda parçacıkların hızları ve arama uzayındaki konumları sürünün ve parçacığın başarımına göre güncellenir. Parçacıkların temel hareket formülleri [3, 4]:

$$\begin{aligned} v_{n_c, n_p}^{t+1} &= \omega \times v_{n_c, n_p}^t + \phi_p r (p_{n_c, n_p}^{localbest} - p_{n_c, n_p}^t) \\ &\quad + \phi_g r (p_{n_c, n_p}^{globalbest} - p_{n_c, n_p}^t) \\ p_{n_c, n_p}^{t+1} &= p_{n_c, n_p}^t + v_{n_c, n_p}^{t+1} \end{aligned} \quad (1)$$

burada v_{n_c, n_p} parçacık hızı (yerdeğiştirme), p_{n_c, n_p}^t parçacık konumu, $p_{n_c, n_p}^{localbest}$, $p_{n_c, n_p}^{globalbest}$ sürünün ve her parçacığın yineleme boyunca buldukları en iyi çözümlerdir. ω , ϕ_p , ϕ_g kullanıcı tanımlı PSO davranış parametreleridir. ϕ_p , her parçacığın kendi başarımına olan bağlılığını gösteren özgüven katsayısıdır. ϕ_g , parçacığın sürü başarımına olan bağlılığını gösteren sosyal katsayısıdır. ω ise parçacığın çözüme ulaşırken sergilediği durağanlılığını gösteren eylemsizlik katsayısıdır. Parçacıkların menzillerini belirleyen $r \sim U(a, b)$ rassal sayısı, olasılıksal olarak düzgün dağılıma sahip bir rassal sayı üreticiden elde edilir. Gözlem $\mathbf{g}_{s, \mu}(\mathbf{c}; \mathbf{x})$ ve sentetik model $\mathbf{m}_{\hat{\mu}}(\hat{\mathbf{c}}; \mathbf{x})$ TEİ verileri kullanılarak maliyet fonksiyonu çıkarılır.

$$J(\mathbf{c}, \mathbf{x}) = \frac{\|\mathbf{g}_{s, \mu}(\mathbf{c}; \mathbf{x}) - \mathbf{m}_{\hat{\mu}}(\hat{\mathbf{c}}; \mathbf{x})\|_2^2}{\|\mathbf{g}_{s, \mu}(\mathbf{c}; \mathbf{x})\|_2^2} \quad (2)$$

burada $\mathbf{x} = [\theta \ \phi]^T$ olmak üzere, θ enlemleri, ϕ boylamları göstermektedir ve $\|\cdot\|_2$ L_2 normu olmak üzere $\|\mathbf{g}_s\|_2^2 = \sum_{l=1}^{N_a} [g_s(l)]^2$. Sürünün içindeki her n_p parçacığı $\xi = \{\mathbf{c}_1 \dots \mathbf{c}_{n_p} \dots \mathbf{c}_{N_p}\}$ için N_c boyutlu parçacık vektörü,

$$\mathbf{c} = [c(1) \dots c(n_c) \dots c(N_c)]^T \quad (3)$$

Her t yinelemede, parçacıkların hızları ve konumları Eş.1'e göre güncellenir. Eylemsizlik katsayısı ω , global değer üst üste üç yinelemede değişmeden kalırsa $k_\omega = 0.975$ katsayısıyla çarpılarak güncellenir.

$$\omega^{t+1} = k_\omega \omega^t \quad (4)$$

Yinelemeleri sona erdiren sonlandırma kriterleri olarak, maksimum yineleme sayısı t_{max} ve buna ek olarak her parçacığın global değere olan öklid uzaklığı, sürü nüfusunun %75'i global değere arama uzayının maksimum menzil uzaklığının yüzde birinden daha az ise PSO sonlandırılır [5, 6]. Böylelikle hem sonuca yakınsandığında zaman kaybedilmez hem de çözüm sağlanamıyorsa gereksiz yineleme yapılmaz. Yerküresel olarak tek ve çift çekirdekli Gauss yüzeylerinin parametreleri kestirilirken, dünyanın yuvarlaklığından ve yerküresel Gauss yüzeylerinin çekirdeklerinin dünyanın kendi etrafında dönmesi nedeniyle doğudan batıya doğru hareket eder. -180° batı boylamıyla, $+180^\circ$ doğu boylamı aynı boylamlar olduğundan, dünyanın yuvarlaklığından dolayı iki boyutlu yüzeyde bir katlama işlemi yapılmıştır. Bunun için:

- Eğer Gauss çekirdeği doğudaysa $\phi_G \geq 0$, çekirdeğin 180° batısından daha da ötesinde olan parçacıklar $\phi_p \leq \phi_G - 180^\circ$, 360° doğuya konumlandırılır
- Eğer Gauss çekirdeği batıdaysa $\phi_G \leq 0$, çekirdeğin 180° doğusundan daha da ötesinde olan parçacıklar $\phi_p \geq \phi_G + 180^\circ$, 360° batıya konumlandırılır

3. GÜRÜLTÜSÜZ VE GÜRÜLTÜLÜ YÜZEYLER

İyonkürede zamandaki ve konumdaki değişiklikler Eş.5'deki gibi bir yönseme ve istatistiksel değişikliğe sahip kalıntı fonksiyonunun toplamı olarak düşünülebilir.

$$G(\mathbf{x}) = \mu(\mathbf{x}) + Y(\mathbf{x}) \quad (5)$$

Sentetik TEİ yüzeyleri, leksikografik l indeksi kullanarak oluşturulmuş $g_s(l) = G(\theta, \phi)$, enlem aralığı $\theta_i \leq \theta \leq \theta_f$ olan, N_θ enlem noktasından oluşan ve boylam aralığı $\phi_i \leq \phi \leq \phi_f$ olan, N_ϕ boylam noktasından oluşan bir bölgede ızgara noktaları üzerinde tanımlanmıştır. Izgara noktalarının derecesel çözünürlüğü IGS-GIM noktalarının çözünürlüğü olan, enlemde 2.5° , boylamda 5° 'yle aynıdır. Bölgesel olarak gözlemlenen yönseme yüzeyleri için $\theta_i = 30$ ve $\theta_f = 45$, $\phi_i = 20$ ve $\phi_f = 50$ olarak seçilmiştir. Bölgesel sentetik TEİ yüzeyleri için yönseme fonksiyonları [7]:

$$\mu_1(\mathbf{x}) = a_{11} \quad (6)$$

$$\mu_2(\mathbf{x}) = a_{21} + a_{22}\theta + a_{23}\phi \quad (7)$$

$$\mu_3(\mathbf{x}) = a_{31} + a_{32}\theta + a_{33}\phi + a_{34}\theta^2 + a_{35}\theta\phi + a_{36}\phi^2 \quad (8)$$

Eş. 6'teki sabit yönseme, Eş. 7'teki doğrusal yönseme ve Eş. 8'teki kuadratik yönsemedir. $\mu_1(\mathbf{x})$ için $a_{11} = 27.5$, $\mu_2(\mathbf{x})$ için $a_{21} = 13.8$, $a_{22} = 0.01$, $a_{23} = 0.01$, $\mu_3(\mathbf{x})$ için $a_{31} = 81.721$, $a_{32} = 0.890$, $a_{33} = -1.834$, $a_{34} = -0.04684$, $a_{35} = 0.0323$, $a_{36} = 4.696 \times 10^{-3}$ olarak seçilmiştir. Yerküresel sentetik TEİ yüzeyleri için yönseme fonksiyonları:

$$\mu_5(\mathbf{x}) = a_{51} + a_{52} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \phi - a_{53} & \theta - a_{54} \end{bmatrix} \mathbf{R}_{a_{55}}^T \begin{bmatrix} a_{56} & 0 \\ 0 & a_{57}a_{56} \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R}_{a_{55}} \begin{bmatrix} \phi - a_{53} \\ \theta - a_{54} \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

$$\mu_6(\mathbf{x}) = a_{61} + a_{62} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \phi - a_{63} & \theta - a_{64} \end{bmatrix} \mathbf{R}_{a_{65}}^T \begin{bmatrix} a_{66} & 0 \\ 0 & a_{67}a_{66} \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R}_{a_{65}} \begin{bmatrix} \phi - a_{63} \\ \theta - a_{64} \end{bmatrix} \right\} + a_{68} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \phi - a_{69} & \theta - a_{610} \end{bmatrix} \mathbf{R}_{a_{65}}^T \begin{bmatrix} a_{612} & 0 \\ 0 & a_{613}a_{612} \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R}_{a_{65}} \begin{bmatrix} \phi - a_{69} \\ \theta - a_{610} \end{bmatrix} \right\} \quad (10)$$

Eş. 9'teki tek çekirdekli Gauss yüzeyi, Eş. 10'teki dişe iki çekirdekli Gauss yüzeyidir. $\mu_5(\mathbf{x})$ için $a_{51} = 6.7$, $a_{52} = 39.4$, $a_{53} = 36.9$, $a_{54} = 2.9$, $a_{55} = 0.26$, $a_{56} = 774$, $a_{57} = 5.98$, $\mu_6(\mathbf{x})$ için $a_{61} = 6.8$, $a_{62} = 55$, $a_{63} = 15$, $a_{64} = 15$, $a_{65} = 17$, $a_{66} = 250$, $a_{67} = 10$, $a_{68} = 39$, $a_{69} = 35$, $a_{610} = 18.5$, $a_{611} = 7$, $a_{612} = 200$, $a_{613} = 15$ olarak seçilmiştir. Gürültüsüz 5 sentetik yüzey için bölgesel TUSAGA-Aktif örnekleme, yerküresel IGS ve TUSAGA-Aktif örnekleme kullanılarak PSO $N_r = 1000$ defa koşturulmuştur. Her PSO koşturumunda ızgara noktaları ve örnekleme noktaları için normalize geriatma hatası,

$$\epsilon_n = \frac{\|\mathbf{g}_{s,\mu}(\mathbf{c}; \mathbf{x}) - \mathbf{m}_{\bar{\mu}}(\hat{\mathbf{c}}; \mathbf{x})\|_2}{\|\mathbf{g}_{s,\mu}(\mathbf{c}; \mathbf{x})\|_2} \quad (11)$$

bağıl parametre hatası,

$$\epsilon_a(n_c) = \frac{|c_o(n_c) - \hat{c}(n_c)|}{|c_o(n_c)|} \quad (12)$$

hesaplanmış, N_r koşturum üzerinden hataların ve PSO yineleme sayısının değışintileri ve ortalamaları alınmıştır. Ortalama normalize geriatma hatası,

$$\mu_{\epsilon_n} = (\epsilon_n)_{av} = \frac{1}{N_r} \sum_{n_r=1}^{N_r} \epsilon_n(n_r) \quad (13)$$

standart sapması,

$$\sigma_{\epsilon_n} = \sqrt{\frac{1}{N_r} \sum_{n_r=1}^{N_r} (\epsilon_n(n_r) - \mu_{\epsilon_n})^2} \quad (14)$$

ve ortalama bağıl parametre hatası,

$$\mu_{\epsilon_a(n_c)} = \frac{1}{N_r} \sum_{n_r=1}^{N_r} \epsilon_a(n_r, n_c) \quad (15)$$

standart sapması,

$$\sigma_{\epsilon_a(n_c)} = \sqrt{\frac{1}{N_r} \sum_{n_r=1}^{N_r} (\epsilon_a(n_r, n_c) - \mu_{\epsilon_a(n_c)})^2} \quad (16)$$

olarak bulunmuştur. Bu çalışmada kalıntı değeri $Y(\mathbf{x})$, eklenebilir beyaz Gauss gürültüsü kullanarak oluşturulmuştur. Üç farklı durum için oluşturulan gürültü değışintileri:

1. Sakin Durum:

- Orta Kuşakta ($\pm 60^\circ - \pm 30^\circ$ enlemler arasında), Az Hareketlilik: $\sigma^2 = 3.2 \text{ TECU}^2$
- Diğer Yerlerde, Orta Hareketlilik: $\sigma^2 = 9.6 \text{ TECU}^2$

2. Ilımlı Durum:

- Orta Kuşakta ($\pm 60^\circ - \pm 30^\circ$ enlemler arasında), Orta Hareketlilik: $\sigma^2 = 9.6 \text{ TECU}^2$
- Diğer Yerlerde, Yüksek Hareketlilik: $\sigma^2 = 16 \text{ TECU}^2$

3. Fırtınalı Durum:

- Her Yerde, Yüksek Hareketlilik: $\sigma^2 = 16 \text{ TECU}^2$

3 farklı durum için gürültülü eklenmiş 5 sentetik yüzey için bölgesel TUSAGA-Aktif ve bölgesel RGIM örnekleme, yerküresel IGS ve TUSAGA-Aktif örnekleme kullanılarak her durum için $N_{rg} = 250$ gürültü oluşturulmuş ve her gürültülü yüzey için PSO $N_r = 1000$ defa koşturulmuştur. Her PSO koşturumunda ızgara noktaları ve örnekleme noktaları için normalize geriatma hatası,

$$\epsilon_{ng} = \frac{\|\mathbf{m}_{\mu}(\mathbf{c}; \mathbf{x}) - \mathbf{m}_{\bar{\mu}}(\hat{\mathbf{c}}; \mathbf{x})\|_2}{\|\mathbf{m}_{\mu}(\mathbf{c}; \mathbf{x})\|_2} \quad (17)$$

bağıl parametre hatası,

$$\epsilon_a(n_c) = \frac{|c_o(n_c) - \hat{c}(n_c)|}{|c_o(n_c)|} \quad (18)$$

hesaplanmıştır, toplam $N_{rg} \times N_r$ koşturum üzerinden hataların ve PSO yineleme sayısının değışintileri ve ortalamaları alınmıştır. Her gürültü geriatması için hesaplanan ortalama normalize geriatma hatası,

$$\mu_{\epsilon_{ng}} = (\epsilon_{ng})_{av} = \frac{1}{N_r} \sum_{n_r=1}^{N_r} \epsilon_{ng}(n_r) \quad (19)$$

tüm gürültü geriatmalarının ortalama normalize geriatma hatasının ortalaması,

$$\mu_{\epsilon_{nG}} = (\mu_{\epsilon_{ng}})_{av} = \frac{1}{N_{rg}} \sum_{n_{rg}=1}^{N_{rg}} \mu_{\epsilon_{ng}}(n_{rg}) \quad (20)$$

ortalama bağıl parametre hatası,

$$\mu_{\epsilon_a(n_c)} = \frac{1}{N_r} \sum_{n_r=1}^{N_r} \epsilon_a(n_r, n_c) \quad (21)$$

olarak bulunmuştur. Yerküresel $\epsilon_n(GIM)$ için $N_a = N_\theta N_\phi$ ve $N_\theta = 71$, $N_\phi = 73$, bölgesel $\epsilon_n(RGIM)$ için $N_a = N_\theta N_\phi$ ve $N_\theta = 7$, $N_\phi = 7$ 'dir.

	IGS	TUSAGA-Aktif
μ_{ϵ_n}	2.4751×10^{-2}	2.7512×10^{-3}
σ_{ϵ_n}	4.3442×10^{-2}	1.8531×10^{-3}
μ_{Iter}	4814	4739
σ_{Iter}	819	833
$\mu_{\epsilon_n(GIM)}$	4.6681×10^2	4.0852×10^0
$\sigma_{\epsilon_n(GIM)}$	1.1775×10^1	4.4518×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{61}}}$	4.6681×10^2	4.0852×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{61}}}$	1.1775×10^1	4.4518×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{62}}}$	3.1802×10^2	8.4464×10^1
$\sigma_{\epsilon_{a_{62}}}$	1.3059×10^1	2.7984×10^1
$\mu_{\epsilon_{a_{63}}}$	2.8061×10^1	5.1481×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{63}}}$	6.3475×10^1	6.3776×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{64}}}$	1.0556×10^0	4.8676×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{64}}}$	4.4399×10^1	4.0223×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{65}}}$	2.0508×10^0	1.9771×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{65}}}$	3.7982×10^1	8.5046×10^1
$\mu_{\epsilon_{a_{66}}}$	5.9092×10^1	1.0217×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{66}}}$	1.5609×10^1	9.2693×10^1
$\mu_{\epsilon_{a_{67}}}$	3.5540×10^1	1.4324×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{67}}}$	5.3356×10^1	9.7787×10^1
$\mu_{\epsilon_{a_{68}}}$	4.0680×10^1	5.4604×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{68}}}$	1.8495×10^1	8.0760×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{69}}}$	5.5472×10^1	3.9229×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{69}}}$	1.4366×10^0	6.3309×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{610}}}$	7.3065×10^1	2.0503×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{610}}}$	7.2951×10^1	1.6812×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{611}}}$	1.7775×10^0	1.1029×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{611}}}$	3.9735×10^1	8.2421×10^1
$\mu_{\epsilon_{a_{612}}}$	1.5726×10^0	3.1885×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{612}}}$	1.0023×10^0	2.6551×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{613}}}$	3.3528×10^1	1.7645×10^0
$\sigma_{\epsilon_{a_{613}}}$	6.3766×10^1	1.3094×10^0

Tablo 1: μ_6 -Çift Çekirdekli Gürültüsüz Sentetik Gauss Yüzeyi

4. SONUÇLAR

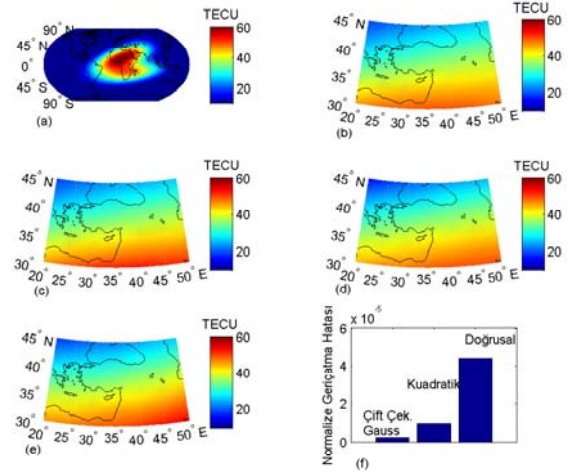
PSO 13 parametrelili kestirimlerde bile başarılı sonuç verebilmektedir. Sentetik yüzeylerde bölgesel olarak Türkiye üzerine doğrusal yönseme seçmek kabul edilebilir sonuçlar verebilir. Çift çekirdekli Gauss yüzeyi için çok gürültü konulduğunda bile ortalama geriçatma hatası 20 kat artmaktadır ve hatalar kabul edilebilir düzeydedir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Ondoh, T., "Seismo-ionospheric phenomena", Advances in Space Search, 26(8):1267-1272,2000.
- [2] Kennedy, J. and Eberhart, R. C. "Particle swarm optimization" Proc. IEEE int'l conf. on neural networks Vol. IV, pp. 1942-1948. IEEE service center, Piscataway, NJ, 1995.
- [3] Clerc M. Particle Swarm Optimization ISTE, 2006 - 243p.
- [4] Haupt, S. E., Haupt, R. L., Practical Genetic Algorithms. Wiley Inter-Science, Second Edition, 2004

	IGS	TUSAGA-Aktif
μ_{ϵ_n} (Maliyet)	1.1602×10^1	5.3560×10^2
μ_{Iter}	182	337
$\mu_{\epsilon_n(GIM)}$ (Maliyet)	2.2773×10^1	1.2846×10^1
$\mu_{\epsilon_{a_{61}}}$	1.2984×10^1	1.3949×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{62}}}$	8.2616×10^1	7.7008×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{63}}}$	1.2497×10^0	6.5116×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{64}}}$	1.4569×10^0	1.6656×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{65}}}$	5.7041×10^1	1.1989×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{66}}}$	1.4354×10^0	9.0964×10^1
$\mu_{\epsilon_{a_{67}}}$	9.3759×10^1	9.0662×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{68}}}$	1.0621×10^0	8.286×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{69}}}$	1.1765×10^0	2.3911×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{610}}}$	1.3863×10^0	9.2419×10^1
$\mu_{\epsilon_{a_{611}}}$	2.3674×10^0	2.3008×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{612}}}$	8.4707×10^1	1.2976×10^0
$\mu_{\epsilon_{a_{613}}}$	3.6316×10^0	8.0750×10^0

Tablo 2: μ_6 -Çok Gürültülü Çift Çekirdekli Sentetik Gauss Yüzeyi



Şekil 1: Bölgesel PSO sonucu (a) Gürültüsüz Çift Çekirdekli Gauss (b) (a)'nın Türkiye bölgesindeki hali (c) μ_6 model kestirimi sonucu (d) μ_3 model kestirimi sonucu (e) μ_2 model kestirimi sonucu (f) Normalizasyon Geriçatma Hataları

- [5] D. Peters, K. Zielinski and R. Lasur, Stopping Criteria for Single-Objective Optimization.
- [6] K. Zielinski and R. Lasur, 2006, Stopping Criteria for a Constrained Single-Objective PSO Algorithm
- [7] Sayin, I., (2008), Kriging ve Rassel Alan Öncülü ile Toplam Elektron İçeriği Haritalanması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [8] Nayir, H., 2007a, Yer Küresel Konumlama Sistemi Kullanılarak Toplam Elektron İçeriği Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

TUSAGA-Aktif Ağı için İyonküre Delme Noktalarının İncelenmesi

Investigation of Ionospheric Pierce Points for TNPNGN-Active Network

Memduh Serkan Sapaz¹, Feza Arıkan¹, Tamara Gulyaeva²

¹ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi

mserkansapaz@hacettepe.edu.tr, arikan@hacettepe.edu.tr

² IZMIRAN, 142190 Troitsk, Moskova, Rusya

gulyaeva@izmiran.ru

ÖZETÇE

Bu çalışmada, Türkiye ve Kuzey Kıbrıs'a konuşlanmış TUSAGA-Aktif Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) TRIMBLE istasyon ağından elde edilen verilerle iyonküre yüksekliğinin, komşu istasyonların ve uydu konumlarının iyonküre delme noktaları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla her bir uydu için alıcı ile uydu arasındaki yol boyunca Toplam Elektron İçeriği (TEİ) değeri, Eğik Toplam Elektron İçeriği (STEC) incelenmiştir. Bu kapsamda YKS istasyonlarından alınan veriler işlenmiş ve YKS istasyonlarının coğrafi koordinatları göz önünde bulundurularak Türkiye üzerinde alıcı ile uydu arasındaki yol boyunca iyonküre delme noktaları hesaplanmıştır. Türkiye'ye özgü STEC modelinde uygun örneklem aralıklarının belirlenmesi amacıyla delme noktası arası uzaklıklar incelenmiştir. 200 km ile 450 km arası iyonküre yükseklikleri için delme noktası arası yay uzunluğu değerleri, komşuluklar arası mesafe ile orantılı ve anlamlı büyüklüktedir. Bu sonuçlar ışığında, Türkiye üzerinde yer alan istasyonlar için, delme noktaları arası mesafe uygun örneklem aralıklarını ifade etmektedir.

ABSTRACT

In this study, the effects of height of the ionospheric thin shell, neighboring stations and satellite positions on the ionospheric pierce points are investigated by using the data obtained from TNPNGN-Active GPS TRIMBLE receivers in Turkey and North Cyprus. For this purpose, Total Electron Content (TEC) value along the path between receiver and satellite, Slant Ray Total Electron Content (STEC) are examined for each satellite and receiver pair. Hence, the data obtained from GPS stations is processed and ionospheric pierce points along the way between receiver and satellite are calculated by considering geographical coordinates of GPS stations. In order to determine the appropriate sampling intervals in the STEC model specific to Turkey, the distance between pierce points are investigated. At the ionospheric heights between 200 km and 450 km, the arc lengths between pierce points are reasonable and proportional

Bu çalışma, TUBİTAK EEEAG 110E296 ve RFBR 11-02-91370-CT.a, ve TUBİTAK EEEAG 109E055 numaralı projeler tarafından desteklenmiştir.

978-1-4673-0056-8/12/\$26.00 ©2012 IEEE

to the distance between neighborhoods. Depending on these results, the distance between pierce points represents appropriate sampling intervals for the stations in Turkey.

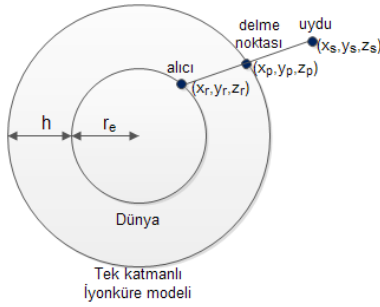
1. GİRİŞ

Toplam Elektron İçeriği (TEİ) iyonkürenin yapısı hakkında bilgi veren önemli parametrelerden biridir. TEİ, bir hat boyunca elektron yoğunluğu üzerinden alınan çizgi integralidir. Birimi TECU ile ifade edilir. 1 TECU= 10^{16} el/m²'dir [1-2]. TEİ, Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) alıcılarından elde edilen verilerle kestirilebilir. YKS uydularından yeryüzüne iki farklı frekansta işaret gönderilir. İyonküre YKS işaretlerinde frekansa bağlı kırılmaya neden olur. Kırılma etkisiyle bu işaretler alıcıya farklı gecikmeler ile ulaşır. Bu işaretlerin gecikmeleri arasındaki fark gözlenerek iyonkürenin yapısı incelenebilir [2-4]. Bu ölçüm modeli iyonküreden kaynaklanan frekansa bağlı grup gecikmesi ile yine frekansa bağlı alıcı ve uydu yansılıklarının toplamını içerir [2-5]. TEİ ölçüm modeli STEC ve VTEC olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir. Her bir uydu için alıcı ile uydu arasındaki yol boyunca TEİ değerine Eğik Toplam Elektron İçeriği (STEC) denir. VTEC ise yalnızca alıcıya göre yerel zenit doğrultusunda hesaplanan toplam serbest elektron miktarıdır. STEC değerlerinden yola çıkarak VTEC değeri bir ağırlık fonksiyonu ile hesaplanır [1-6]. Bu dönüşüm için iyonkürenin, en yüksek iyonküre elektron yoğunluğunu içeren sonsuz incelikte bir tabakadan oluştuğu varsayılmaktadır. Bu model tek katmanlı iyonküre modeli (SLIM) olarak adlandırılmaktadır. Alıcı ile uydu arasındaki yol boyunca, tek katmanlı iyonküre modelini kesen noktalara iyonküre delme noktaları denir [6-7]. STEC'ten VTEC'e dönüşümü sağlayan ağırlık fonksiyonu, VTEC değerleri ile elde edilen TEİ kestirimine bir yaklaştırma getirmektedir. STEC ile TEİ ölçüm modeli alıcı ile uydu arasındaki hat boyunca elektron yoğunluğunun çizgi integrali değerine daha uygundur. Bu nedenle iyonküre delme noktalarında elde edilen STEC değerleri kullanılarak daha iyi bir TEİ kestirimi elde etmek amaçlanmaktadır. Türkiye ve Kuzey Kıbrıs üzerine düzgün dağılmış Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı (TUSAGA-Aktif) TRIMBLE alıcı sisteminden oluşmuştur. Bu ağ ve bu alıcı sistemi için Türkiye'ye özgü STEC modeli oluşturmak amaçlanmaktadır. Bu çalışmada STEC modeli

için uygun örneklem aralıklarını belirlemek amacıyla iyonküre delme noktaları arası uzaklıklar incelenmiştir. TUSAGA-Aktif içinde yer alan istasyonlar için, iyonküre katmanının yüksekliği 200 km'den 450 km'ye 10'ar km aralıklarla artırılarak farklı iyonküre yüksekliklerine bağlı delme noktaları bulunmuştur. Uydularının etkisini incelemek için YKS uydularının yörüngeleri göz önünde bulundurularak TUSAGA ağı içerisindeki istasyonların bu uyduları gördükleri yol boyunca yükseklik açıları hesaba katılmıştır. Bu çalışmada kullanılan yöntem Bölüm 2'de, elde edilen sonuçlar ise Bölüm 3'te verilmiştir.

2. VERİ VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Delme noktası koordinatları, alıcı ile uydudan geçen çizgi denklemi ile tek katmanlı iyonküre modelini temsil eden küresel denklemin ortak çözümünden bulunabilir [6-7]. Alıcı ve uydudan geçen çizgi denklemi



Şekil 1: SLIM modeli delme noktası, uydusu ve alıcı koordinatları.

dan geçen çizgi denklemi

$$\alpha = \frac{x_p - x_r}{x_s - x_r} = \frac{y_p - y_r}{y_s - y_r} = \frac{z_p - z_r}{z_s - z_r} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir; Dünya'nın coğrafi merkezi referans alındığında bu ifadede yer alan x_r, y_r, z_r YKS istasyonunun, x_p, y_p, z_p iyonküre delme noktasının, x_s, y_s, z_s ise YKS uydusunun Kartezyen koordinatlarını göstermektedir. Böylelikle, denklem (1)'de ifade edilen çizgi denklemi kullanıldığında, delme noktası koordinatları aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$x_p = \alpha(x_s - x_r) + x_r, \quad (2)$$

$$y_p = \alpha(y_s - y_r) + y_r, \quad (3)$$

$$z_p = \alpha(z_s - z_r) + z_r. \quad (4)$$

Delme noktası ile Dünya'nın yarıçapı arasındaki eşitlik denklem (5)'te verilmiştir. h tek katmanlı iyonküre modelinin yeryüzünden yüksekliğini, r_e ise Dünya'nın yarıçapını göstermektedir.

$$x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 = (r_e + h)^2. \quad (5)$$

(2)-(4) numaralı denklemlerde verilen delme noktasının x, y, z koordinatları, denklem (5)'teki ifadede yerine konulursa aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$(r_e + h)^2 = \alpha^2 d_{rs}^2 + 2\alpha\beta_{rs} + r_e^2. \quad (6)$$

Bu ifadede,

$$d_{rs}^2 = (x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2, \quad (7)$$

$$\beta_{rs} = x_r(x_s - x_r) + y_r(y_s - y_r) + z_r(z_s - z_r), \quad (8)$$

$$r_e^2 = x_r^2 + y_r^2 + z_r^2. \quad (9)$$

olarak tanımlanmıştır ve d_{rs} alıcı ile uydudaki uzaklığı ifade etmektedir. (6) numaralı ikinci dereceden denklem çözüldüğünde, α için aşağıdaki formül elde edilmektedir.

$$\alpha^2 d_{rs}^2 + 2\alpha\beta_{rs} - (2r_e h + h^2) = 0, \quad (10)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{-\beta_{rs} \pm \sqrt{\beta_{rs}^2 + d_{rs}^2(2r_e h + h^2)}}{d_{rs}^2}. \quad (11)$$

(11) numaralı denkleme göre α pozitif ve negatif olmak üzere iki değer almaktadır. Pozitif α değeri hesaplandıktan sonra alıcı ve uydunun bilinen koordinatlarıyla birlikte (2)-(4) numaralı denklemlerden delme noktası koordinatları x_p, y_p , ve z_p bulunur.

Bu çalışma kapsamında TUSAGA-Aktif YKS istasyonlarından elde edilen verilerle 200 ile 450 km arası iyonküre yüksekliği arasında 144 istasyon ve 32 uydusu için 30 sn zaman çözünürlüğünde delme noktaları bulunmuştur. İyonküre delme noktalarında yükseklik, komşuluk ve uydularının etkisi üç başlık altında incelenmiştir. Öncelikle sabit alıcı ve sabit yükseklik açılarındaki uydusu için iyonküre kritik yüksekliğinin etkisi araştırılmıştır. Uydusu ve alıcı parametreleri sabit tutulup iyonküre modelinin yükseklik artışına bağlı olarak her bir delme noktası arası uzaklık hesaplanmıştır. İyonküre etkin yüksekliğinin delme noktaları arası uzaklığa etkisi incelenmiştir. İyonküre kritik yüksekliğinin etkisi komşu alıcılar ve çeşitli yükseklik açılarındaki uydusu için araştırılmıştır. Komşu iki alıcının delme noktaları için sabit iyonküre yüksekliğinde yay uzunluğu hesaplanmıştır. Komşu iki delme noktası arası yay uzunluğu iyonküre yükseklik artışına göre uydunun hareketine göre karşılaştırılmıştır.

Uydusu hareketinin çeşitli zaman çözünürlüklerindeki etkisi; Sabit alıcı ve çeşitli yükseklik açılarındaki uydusu için iyonküre kritik yüksekliğinin etkisi başlığı altında incelenmiştir. Değişen yükseklik açısına karşılık yay uzunluğu değerleri sırasıyla 30 saniye ve 2.5, 5, 10 dakikada bir alınan verilerle hesaplanmıştır ve karşılaştırılmıştır. Sonraki bölümde bu bölümde önerilen yöntemlerin uygulamaları anlatılacaktır.

3. SONUÇLAR

Bölüm 2'de anlatılan yöntemler, STEC modelinde uygun örneklem aralıklarını belirlemek amacıyla iyonküre delme noktaları üzerinde uygulanmıştır. Tablo 1'de alıcı kodu ve koordinatları verilen YKS istasyonları üzerinde çalışılmıştır. Tablo 1'den de anlaşıldığı üzere, aynı enlem üzerinde bulunan YKS istasyon çiftleri seçilmiştir. Bu bölümde, Ankara, Çanakkale ve Iğdır YKS istasyonlarına ait sayısal sonuçlar sunulmuştur. Yükseklik, komşuluk ve uydularının delme noktası üzerindeki etkileri üç farklı durumda incelenmiştir.

3.1. Sabit alıcı ve sabit yükseklik açılarındaki uydusu için iyonküre kritik yüksekliğinin etkisi

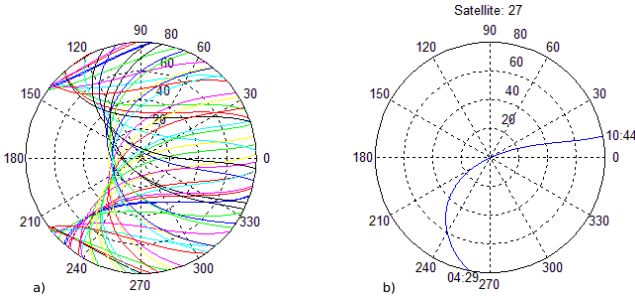
Uydusu ve alıcı sabit iken yükseklik artışına bağlı olarak her bir delme noktası arası uzaklık hesaplanmıştır. Alıcı olarak 'ank'

Tablo 1: TUSAGA aktif istasyonları ve koordinatları

YKS İstasyonu	Alıcı Kodu	Enlem	Boylam
Ankara	anrk	39.89°K	32.76°D
Ağrı	agrd	39.72°K	43.03°D
Çanakkale	cana	40.11°K	26.41°D
Erzincan	erzi	39.74°K	39.50°D
İğdir	igir	39.93°K	44.02°D
Kırıkkale	kkal	39.84°K	33.52°D
Refahiye	rhiy	39.90°K	38.77°D
Yenice	yenc	39.93°K	27.24°D

istasyonu, uydu olarak 27 numaralı uydu seçilmiştir.

Şekil 2a 32 uydunun tamamının, Şekil 2b ise sadece 27 numaralı uydunun Ankara üzerindeki hareketini göstermektedir. Şekil 2b'den anlaşıldığı üzere 1 Ekim 2010 tarihinde Ankara YKS istasyonunun tepe noktasına en yakın geçmiş olan 27 numaralı uydudur.



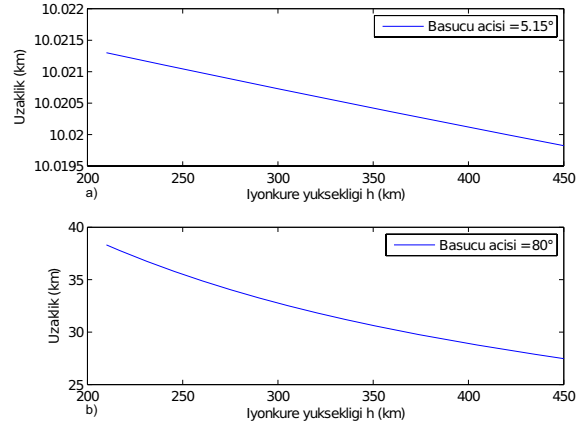
Şekil 2: 1 Ekim 2010 tarihinde 'anrk' istasyonu için yerel koordinatlarda uydu konumları a) 32 uydu, b) 27 uydu.

İyonküre yüksekliği 200 km ile 450 km arasında değişirken başucu açısı 5.15° ve 80° iken delme noktaları arası uzaklıklar sırasıyla Şekil 3a'da ve Şekil 3b'de gösterilmektedir. Delme noktaları 'anrk' istasyonu ve 27 numaralı uyduya göre hesaplanmıştır.

Alıcı ile uydu arasındaki doğrunun yerküre ile yaptığı açıya yükseklik açısı, local zenit doğrultusu ile yaptığı açıya başucu açısı denir. Böylelikle, uydu alıcıya göre en tepe noktada iken, yükseklik açısı en büyük değerini alırken başucu açısı en küçük değerini alır. Şekil 3'te görüldüğü üzere başucu açısı 5.15° iken, iyonküre yüksekliği arttıkça delme noktaları arası uzaklık çok az değişmekte ve iyonküre yüksekliği artış miktarına eşit olmaktadır. Şekil 3'ten çıkarılacak diğer bir sonuç ise, başucu açısı arttıkça, 5.15°'den 80°'ye geldiğinde delme noktaları arası uzaklık giderek açılmakta fakat aynı zamanda iyonküre yüksekliğinin artışı ile de bir miktar azalmaktadır. Bunun sonucunda, bu ağ ve alıcı sistemi için iyonküre etkin yükseklik miktarının ne kadar değiştiği belirlenmiştir.

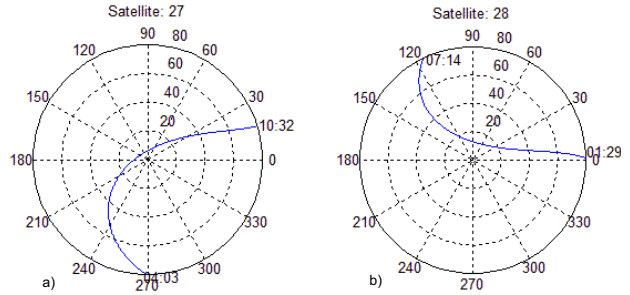
3.2. Komşu alıcılar ve çeşitli yükseklik açılarındaki uydu için iyonküre kritik yüksekliğinin etkisi

Komşu alıcılar için, her bir alıcı ile sabit uydu arasındaki yol boyunca delme noktaları bulunmuştur ve bu noktalar arasındaki



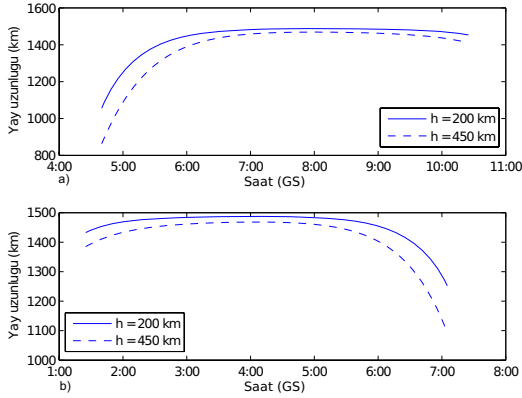
Şekil 3: 'anrk' istasyonu için iyonküre yüksekliğine göre delme noktaları arası uzaklık a) başucu açısı 5.15°, b) başucu açısı 80°.

yay uzunluğu sabit iyonküre yüksekliğinde hesaplanmıştır. Tablo 1'deki istasyonlar; yakın, orta ve uzak komşuluklar olmak üzere incelenmiştir. Uzak komşu alıcılar olan Çanakkale ve İğdir için elde edilen sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 4, Çanakkale YKS istasyonu için 3 Ekim 2010 tarihinde 27 ve 28 numaralı uyduların konumu gösterilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere, 27 ve 28 numaralı uydular birbirine göre kuzey-güney yönünde tersine hareket etmektedir. Şekil 5, 'cana' ve 'igir' istasyonlarının delme nokta-



Şekil 4: 3 Ekim 2010 tarihinde 'cana' istasyonu için uydu pozisyonları a) 27. uydu, b) 28. uydu.

ları arasındaki yay uzunluğu değerinin sırasıyla 27 ve 28 numaralı uyduların 3 Ekim 2010 tarihinde gün içindeki hareketine göre değişimini göstermektedir. Yay uzunluğuna zaman grafiklerinde uydunun hareketi Greenwich saati (UT)'ye göre hesaplanmıştır. Şekil 5'e göre komşu iki delme noktası arası yay uzunluğu iyonküre yüksekliği arttıkça azalmaktadır. 200 km ile 450 km iyonküre yükseklikleri için delme noktası arası yay uzunluğu değerleri, komşuluklar arasındaki mesafe ile orantılı ve anlamlı büyüklüktedir. Bu uzunluk uydunun yükselme açısı azaldıkça artmaktadır ve en yüksek değerine de uydu alıcıya göre tepe noktasında iken ulaşmaktadır. Uydunun kuzey-güney yönündeki hareketi doğu-batı yönündeki

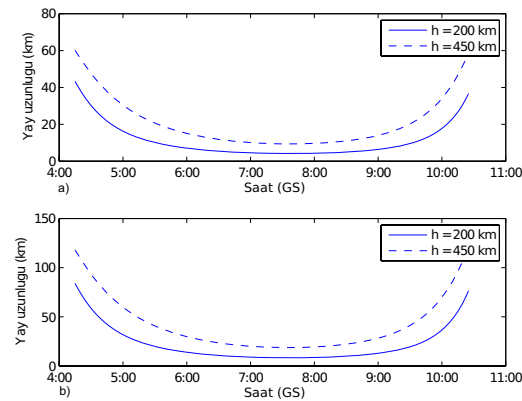


Şekil 5: 'cana' ve 'igir' istasyonlarının delme noktaları arasındaki yay uzunluğu değeri a) 27. uydusu, b) 28. uydusu.

hareketine göre bu mesafeyi daha çok etkilemektedir. Kuzey-güney yönünde yükselme açısı azaldıkça yay uzunluğu daha çok azalmaktadır. Bu sonuçlarla, bu ağ içerisinde bulunan istasyonların herbirinden alınacak verinin önemli olduğu, TEİ hesaplamalarında bütün istasyonların verilerinin kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

3.3. Sabit alıcı ve çeşitli yükseklik açılarındaki uydu için iyonküre kritik yüksekliğinin etkisi

Belirli bir iyonküre yüksekliği için, alıcının uydusu gördüğü yol boyunca iyonküre delme noktaları belirlenmiştir. Uydunun ha-



Şekil 6: 'anrk' istasyonu için çeşitli yükseklik açılarındaki yay uzunlukları a) 2.5 dakikada bir alınan veri, b) 5 dakikada bir alınan veri.

reketi sonucu, her bir yükseklik açısı için bulunan iyonküre delme noktaları arası yay uzunlukları hesaplanmıştır. Şekil 6, 27. uydunun gün içindeki konumuyla birlikte değişen yükseklik açısına göre yay uzunluğunu sırasıyla 2.5 ve 5 dakikada bir alınan verilerle göstermektedir. İyonküre yüksekliği 200 km ve 450 km olarak alınmıştır. Delme noktalarının aldığı yol

iyonküre yüksekliği arttıkça artmıştır. Yükseklik açısı arttıkça da azalmıştır. Ancak yükseklik açısının en büyük olduğu, uydunun alıcıya göre tepe noktasına yaklaştığı anda 2.5 dakikalık değerler için 5 km'lik yay uzunluğu değerleri elde edilmiştir. Bu da her bir delme noktasının birbirinden anlamlı derecede farklı olduğunu göstermektedir. Yükseklik açısı 40° 'nin üstünde iken yay uzunlukları arası fark birbirinden çok uzak değildir. Yükseklik açısının en küçük değerleri için iki delme noktası arası yay uzunluğu oldukça büyümektedir. Bu sonuç, bu ağ ve alıcı sistemi için 5 dakikadan daha uzun aralıklarla alınan verilerin uygun olmadığını göstermektedir.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, TUSAGA-Aktif TRIMBLE alıcı sistemi kullanılarak Türkiye'ye özgü STEC modeli oluşturmak için uygun örnekleme aralıklarını belirlemek amacıyla iyonküre delme noktaları arası uzaklıklar incelenmiştir. TUSAGA-Aktif içinde yer alan istasyonlar için farklı iyonküre yüksekliklerine bağlı delme noktaları bulunmuştur ve iyonküre delme noktalarına yükseklik, komşuluk ve uydu konumlarının etkisi araştırılmıştır. Komşu istasyonların aynı anda gördükleri uyduların delme noktaları arası mesafe uygun örnekleme aralıklarını ifade etmektedir. Her bir delme noktasının birbirinden anlamlı derecede farklı olduğu görülmektedir. Bir çok alanda kullanılmak üzere veriler sunan sistem için yapılan çalışma, bu ağ ve alıcı sisteminin kapasitesi ve yeterliliği konusunda literatürde yapılan ilk çalışmadır. Bu kapsamda Türkiye üzerindeki iyonkürenin daha iyi bir modelini oluşturmada STEC modeline eklenecek alıcı ve uydu yanlıklarının etkisi incelenecektir ve STEC modeline eklenecek yeni yöntem seçilecektir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Arıkan, F., Erol, C.B. and Arıkan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12): 1469-1480, 2003.
- [2] Arıkan, F., Erol, C.B. and Arıkan, O., "Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period", *Radio Science*, 39(6), RS6012, 2004.
- [3] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O. and Erol, C.B., "Total electron content estimation with Reg-Est", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 122: A11313, 2007.
- [4] İyonosfer Araştırma Laboratuvarı.
<http://www.ionolab.org/>
- [5] Arıkan, F., Nayir, H., Sezen, U., Arıkan, O., "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC", *Radio Science*, 43, RS4004, 1-13, 2008.
- [6] Nayir, I., Yerkesel Konumlama Sistemi İşaretleri Kullanılarak İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2007.
- [7] Sayın, I., Kriging ve Rassal Alan Öncülü ile Toplam Elektron İçeriği Haritalaması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2008.

Spatio-Temporal TEC Interpolation for TNPNG-Active Stations



Muhammet Necat Deviren*, Feza Arıkan*, Orhan Arıkan**
 Department of Electrical and Electronics Engineering
 *Hacettepe University
 **Bilkent University



INTRODUCTION

- Constant monitoring and prediction of Space Weather events require investigation of the variability of Total Electron Content (TEC), an observable feature of ionosphere using dual-frequency GPS receivers.
- Due to various physical and/or technical obstructions, the recordings of GPS receivers may be disrupted resulting in data loss in TEC estimates.
- Data recovery is very important for both filling in the data gaps, and for spatial and/or temporal prediction of TEC.
- Spatial prediction can be obtained using the neighboring stations in a network of a dense grid.
- Temporal prediction recovers data using previous days of the GPS station in a less dense grid.
- In this study, two novel and robust spatio-temporal interpolation algorithms, STI-TEC1 and STI-TEC2, are introduced to recover TEC through optimization by using least squares fit to available data.
- The two algorithms are applied to a regional GPS network and for a typical station, the number of days with full data increased from 68% to 85%.
- STI-TEC1 and STI-TEC2 are applied to disrupted TEC data of Turkish National Permanent GPS Network (TNPNG-Active) between 2001-2011.

SPATIO-TEMPORAL INTERPOLATION

• TEC is the line integral of electron density distribution on a given ray path. In this study, TEC values are estimated using IONOLAB-TEC (www.ionolab.org).

• The goal is to combine spatial and temporal interpolation in a unique way to compensate for the missing TEC vector $x_{u;d}$ for station u on the d^{th} day :

$$x_{u;d} = [x_{u;d}(1) \dots x_{u;d}(n) \dots x_{u;d}(N_{u;d})]^T \quad (1)$$

• Third degree polynomial fit is used for temporal interpolation between n_i and n_s where $N_n = n_s - n_i - 1$, denoted by f_p .

$$\hat{x}_{u;d;N_n} = f_p(x_{u;d}(n_i), x_{u;d}(n_s), N_n) \quad (2)$$

• **STI-TEC1** → The separate temporally and spatially interpolated data combined using Eqn. 3.

$$\hat{x}_{u;d;c} = G\hat{x}_{u;d;R_r} + (I - G)\hat{x}_{u;d;N_n} \quad (3)$$

$$g_k = \frac{\sum_{d_n=d_i}^{d_s} (\hat{x}_{u;d;n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d;n;N_n}(k)) (x_{u;d;n}(k) - \hat{x}_{u;d;n;N_n}(k))}{\sum_{d_n=d_i}^{d_s} (\hat{x}_{u;d;n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d;n;N_n}(k))^2} \quad (4)$$

where g_k are the k^{th} element of the combiner diagonal matrix G and

$$\hat{x}_{u;d;R_r} = \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) x_{v;d;R_r} \quad (5)$$

where $\alpha_{u;d;R_r}(v)$ is the spatial interpolation coefficient for station v in the R_r neighborhood of station u for day d . Alternatively g_k 's can be chosen as

$$g_k = 1 - \frac{e^{-\beta(k-1)} + e^{-\beta(N_n-k)}}{1 + e^{-\beta(N_n-1)}} \quad (6)$$

• **STI-TEC2** → The separate temporally and spatio-temporally interpolated data combined using Eqn. 7.

$$\hat{x}_{u;d;t} = G_t \hat{x}_{u;d} + (I - G_t) \hat{x}_{u;d;N_n} \quad (7)$$

Elements of diagonal matrix G_t are similar to those in Eqn. 6.

$x_{u;d}$ for station u , day d from $x_{u;d-1}$ and $x_{u;d+1}$ are obtained as

$$\hat{x}_{u;d} = \sum_{\substack{d_n=d-1 \\ d_n \neq d}}^{d+1} r_{d;d_n} \alpha_{u;d_n} \bar{x}_{v;d_n} \quad (8)$$

$$r_{d;d_n} = \frac{1}{N_{u;R_r}} \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \frac{\bar{x}_{v;d}}{\bar{x}_{v;d_n}} \quad (9)$$

$$\underline{\alpha}_{u;d} = [1/2 \quad 1/2]^T \quad (10)$$

where overline denotes the mean of TEC for station v , day d or d_n .

RESULTS

- STI-TEC1 and STI-TEC2 interpolation methods are applied to 23 TNPNG network stations between 2001- 2008 and 146 TNPNG-Active network stations between 2009 - 2011.
- STI-TEC1 is applied to 52 % of TNPNG-Active stations.
- STI-TEC2 is applied to 48 % of TNPNG-Active stations that are on or very close to known earthquake fault lines.



Figure 1. 146 TNPNG-Active GPS receiver stations.

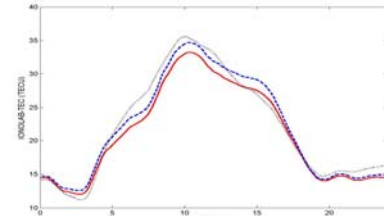


Figure 2. Application of spatial part of STI-TEC1 (Eqn. 5) (dashed) and spatio-temporal part of STI-TEC2 (Eqn. 8) (dotted) to geome (solid line) on March 29, 2011.

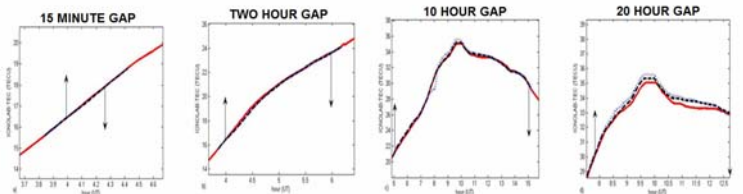


Figure 3. Application of STI-TEC1 (Eqn. 3) with Eqn. 4 (dashed) and Eqn. 6 (dotted) to geome (solid line) on March 31, 2011

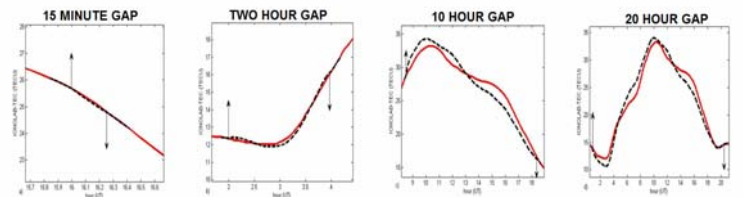


Figure 4. Application of STI-TEC2 (Eqn. 7) with Eqn. 6 (dotted) to geome (solid line) on March 30, 2011

CONCLUSION

- Two novel and robust spatio-temporal interpolation algorithms, STI-TEC1 and STI-TEC2 are introduced to fill the data gaps and prediction of spatio-temporal variability in TEC.
- The algorithms are applied to TNPNG stations to compensate the data loss from 2001-2011.
- Data gaps from a few minutes to 24 hours can be interpolated and typically 25 % of the data are recovered for each station for a given year.

Acknowledgments

This study is supported by TUBITAK EEEAG grant no 109E055.

References

1. H. Nayir, F. Arıkan, O. Arıkan and C. B. Erol "Total Electron Content Estimation with Reg-Est," *J. Geophys. Res.*, vol. 112, no. A11313, pp. 1-11, 2007.
2. F. Arıkan, H. Nayir, U. Sezen and O. Arıkan, "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC," *Radio Sci.*, vol. 43, no. RS4004, pp. 1-13, 2008.

Spatio-Temporal TEC Interpolation for TNPNGN-Active Stations

Total Electron Content (TEC) is the line integral of electron density over a ray path. Due to various structural or physical problems, TEC estimates may be missing in a time interval. A robust spatio-temporal interpolation algorithm based on a least squares minimization of spatial regression and temporal cubic splines is applied to TNPNGN-Active Network, between 2009 and 2011. The interpolation algorithm relies on cubic splines at the end points of a TEC gap and a gradual passage to spatial interpolation takes places for the middle section of gap. With the developed technique, approximately 20% to 25% of missing TEC data for each station in TUSAGA-Active Network are recovered.

Supported by TUBITAK 109E055.

• **Spatio-Temporal Interpolation of Total
• Electron Content Using a GPS Network**

M.N. Deviren,¹ F. Arikun,¹ O. Arikun,²

*

F. Arikun, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University,
Beytepe, Ankara, 06800 Turkey. (arikon@hacettepe.edu.tr)

O. Arikun, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University,
Bilkent, Ankara, 06800 Turkey. (oarikon@ee.bilkent.edu.tr)

M. N. Deviren, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe Univer-
sity, Ankara, 06800 Turkey. (mmecatdeviren@gmail.com)

¹Department of Electrical and Electronics
Engineering, Hacettepe University, Ankara,
Turkey.

²Department of Electrical and Electronics
Engineering, Bilkent University, Ankara,
Turkey.

1 Constant monitoring and prediction of Space Weather events require in-
2 vestigation of the variability of Total Electron Content (TEC), which is an
3 observable feature of ionosphere using dual-frequency GPS receivers. Due to
4 various physical and/or technical obstructions, the recordings of GPS receivers
5 may be disrupted resulting in data loss in TEC estimates. Data recovery is
6 very important for both filling in the data gaps for constant monitoring of
7 ionosphere, and also for spatial and/or temporal prediction of TEC. Spatial
8 prediction can be obtained using the neighboring stations in a network of
9 a dense grid. Temporal prediction recovers data using previous days of the
10 GPS station in a less dense grid. In this study, two novel and robust spatio-
11 temporal interpolation algorithms are introduced to recover TEC through
12 optimization by using least squares fit to available data. The two algorithms
13 are applied to a regional GPS network and for a typical station, the num-
14 ber of days with full data increased from 68% to 85%.

Estimation of $hmF2$ and $foF2$ Communication Parameters of Ionosphere $F2$ -Layer Using GPS Data and IRI-Plas Model

Umut Sezen, Oktay Sahin, Feza Arıkan and Oshan Arıkan

Abstract— $F2$ -layer is the most important and characteristic layer of the ionosphere in the propagation of high frequency (HF) waves due to the highest level of conductivity in the propagation path. In this study, the relation of Total Electron Content (TEC) with the maximum ionization height ($hmF2$) and the critical frequency ($foF2$) of $F2$ -layer are investigated within their defined parametric range using the IRI model extended towards the plasmasphere (IRI-Plas). These two parameters are optimized using daily observed GPS-TEC (IONOLAB-TEC) in an iterative loop through Non-Linear Least Squares (NLSQ) optimization while keeping the physical correlation between $hmF2$ and $foF2$ parameters. Optimization performance is examined for daily (24-hour) and hourly TEC optimizations separately. It is observed that hourly TEC optimization produces results with much smaller estimation errors. As a result of the hourly optimization, we obtain the hourly $hmF2$ and $foF2$ estimates as they are the optimization parameters. Obtained $hmF2$ and $foF2$ estimates are compared with the ionosonde estimates at three different low, middle and high latitude locations for the same quite day. The results show that $hmF2$ and $foF2$ estimates obtained from IRI-Plas optimization and ionosonde are very much in agreement with each other. These results also signify that IRI-Plas provides a reliable background model for ionosphere. With the proposed method, it is possible to build a virtual ionosonde via optimization of IRI-Plas model using the observed TEC values.

Index Terms—Virtual ionosonde, $hmF2$, $foF2$, IRI-Plas, TEC, GPS, IONOLAB.

I. INTRODUCTION

Ionosphere is the layer of the atmosphere that lies between 60 km and 1000 km above Earth surface and has a great importance in high frequency (HF) and satellite communications because of its electrical and ionic structure. The ionization characteristics and electron density distribution vary according to the location on Earth, time, solar, geomagnetic and seismic effects. Ionosphere consists of three distinct layers, namely D , E and F . F layer is normally divided into $F1$ and $F2$ layers. $F2$ -layer, having the highest electron density, is the most stable layer for HF communications and it has major importance in satellite communications [1]. $F2$ -layer models can be found in various studies including but not limited to [2], [3], [4], [5]. The critical parameters of $F2$ -layer can be estimated using ionosondes [6], [7], [8]. $F2$ -layer model estimates are

also investigated in the context of HF communications in [9] and [10]. In [10], HF channel electromagnetic parameters are estimated via ray tracing using a modified International Reference Ionosphere (IRI) model.

Many experimental and theoretical models have been studied to date in order to obtain a realistic physical structure of ionosphere. The most complete and widely used one of these models is the IRI model [5], [11]. IRI is an international project sponsored by the Committee on Space Research (COSPAR) and the International Union of Radio Science (URSI). For a given location, time and date, IRI provides the estimates of the electron density, electron temperature, ion temperature, and ion composition based on the monthly averages (www.iri.org). In a recent study, IRI model is extended to include plasmasphere (IRI-Plas) upto 20,000 km corresponding to the height of GPS satellites [12]. In IRI-Plas, TEC estimates can be also provided externally as input for the proper scaling of topside and plasmasphere extensions. In this study, TEC values are the IONOLAB-TEC [13], [14] estimates obtained from GPS (Global Positioning System) data. The goal of this study is to optimize IRI-Plas with the IONOLAB-TEC values using the two IRI-Plas parameters $hmF2$ and $foF2$ while considering the physical correlation between these two parameters in a well-designed iterative optimization loop. With the proposed method, it is aimed to obtain more realistic ionospheric communication parameters with a high resolution representation of time and location on Earth. This study will extend the single dimensional ionospheric structure characterized only by TEC values to a three dimensional structure by adding $hmF2$ and $foF2$ estimates, for better characterization of HF channel. Preliminary results of IRI-Plas optimization are presented in [15], [16], [17] and [18], respectively. IRI-Plas optimizations with TEC input and without TEC input are considered in [17] and [15], respectively, while the physical relationship between the $hmF2$ and $foF2$ parameters are not taken into account. [17] added the physical relationship between the $hmF2$ and $foF2$ parameters and [18] included the $hmF2$ and $foF2$ variations over Turkey. In this study, both the topside scaling effect of IRI-Plas and the error-band of $hmF2$ and $foF2$ estimations are investigated in the optimization process.

In Section II, IONOLAB TEC method is briefly described in Section II and IRI-Plas model is explained. Then, the optimization structure used for the estimation of $F2$ -layer parameters is explained in Section IV. Later, Section V discusses the optimization strategy and presents the optimization results

U. Sezen and F. Arıkan are with the Department of Electrical and Electronic Engineering, Hacettepe University, Ankara, TURKEY

O. Sahin is with the Department of Avionics and Naval Systems Design, Arıkan Inc. Microelectronics/Guidance and Electro-Optics Division, Akşart, Ankara 06790, TURKEY

O. Arıkan is with the Department of Electrical and Electronic Engineering, Bilkent University, Ankara, TURKEY

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. FEZA ARIKAN
Proje No:	109E055
Proje Başlığı:	Bölgesel Otomatik TEİ Haritalaması ve Sürekli Gözlenmesi
Proje Türü:	Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	BAHADIR AKTUĞ, YASİN ERKAN, AYHAN ÇİNGÖZ, UMUT SEZEN, AHMET ONUR LENK, ORHAN ARIKAN, CENK TOKER
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	HACETTEPE Ü. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.B.(İNGİLİZCE)
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2009 - 01/09/2012
Onaylanan Bütçe:	254926.0
Harcanan Bütçe:	227035.0
Öz:	<p>Türkiye üzerinde iyonküre değişkenliğinin uzaktan algılanması ve değişikliklerin öngörüsü yer-uydu ve KD haberleşme, uzaydan seyir, güdüm ve konumlama sistemlerinin başarımının iyileştirilmesi için çok büyük önem taşımaktadır. İyonkürenin yapısını uzay ve zamanda tanımlayan en önemli parametreler elektron yoğunluğu dağılımı ve Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. Bu projede, iyonküre değişkenliğinin YKS alıcılarından kestirilen TEİ ile incelenmesi için TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağları kullanılmıştır. 109E055 nolu proje kapsamında güvenilir, gürbüz, ve yüksek çözünürlüklü otomatik TEİ kestirim algoritması İONOLAB-TEC geliştirilmiş ve yakın gerçek zamanlı hesaplama için internet üzerinden kullanıcılara açılmıştır. Bölgesel ve yerküresel IRI-Plas modeli temelli otomatik haritalama algoritması IRI-Plas-G, www.ionolab.org sitesinden hizmet vermeye başlamıştır.</p> <p>Hesaplama hassasiyeti, kullanım kolaylığı ve geliştirilmeye açık yapısı ile İONOLAB-TEC ve IRI-Plas-G hizmetleri dünyada bir ilki oluşturmaktadır. IRI-Plas-Opt algoritması ile TEİ kullanarak sanal iyonosonda üretilmiştir.</p> <p>TEİ istatistikleri için otomatik bir algoritma geliştirilmiş ve TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağları İONOLAB-TEC verilerine uygulanmıştır. Türkiye üzerinde yıllık, saatçi ve bölgesel TEİ istatistikleri elde edilmiştir. Uzay ve zamanda özgün aradeğerleme algoritmaları geliştirilmiştir. İONOLAB-TEC değerlerinin, TEİ istatistiklerinin ve yapılan haritaların saklanacağı veri tabanı oluşturulmuştur. Literatürde ilk kez bölgesel olarak enlem-boylam-yükseklik-zaman boyutlarında gürbüz ve yüksek çözünürlüklü model tabanlı tomografi algoritması, OPT-IRI-Plas geliştirilmiştir.</p> <p>Türkiye iyonküresinde bozulmalar, İONOLAB-TEC üzerinden deprem öncesi, deprem sonrası, sakin ve bozulmalı günler için çapraz ilinti katsayıları, simetrik Kullback-Leibler ölçütü ve L2 normu kullanılarak incelenmiştir. Kuzey Anadolu Fay hattı ve Van depremi için ayrıntılı analizler yapılmış radar sezim/kestirim kuramına dayanan özgün istatistiksel bir deprem uyarı sinyali algoritması geliştirilmeye başlanmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Sinyal ve Görüntü İşleme, Toplam Elektron İçeriği, Krigleme, Aradeğerleme, İyonküre
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

<p>Projejen Yapılan Yayınlar:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1- IONOLAB Group Activities Using CORS_TR GPS Network (Bildiri), 2- Comparison of Ionospheric Variations in Seismic and Quiet Days by CORS-TR IONOLAB-TEC Estimates (Bildiri), 3- İyonosfer F2 tabakası parametrelerinin eniyileme yolu ile IRI modeli ve IONOLAB TEİ kestirimleri kullanılarak belirlenmesi (Bildiri), 4- İyonosfer TEİ verilerinin uzay-zamansal aradeğerlemesi (Bildiri), 5- Determining F2 Layer Parameters via Optimization Using IRI-Plas model IONOLAB TEC Estimations (Bildiri), 6- Space Weather Activities of IONOLAB Group Using CORS-TR GPS Network (Bildiri), 7- Space-Time Interpolation and Automatic Mapping of TEC Using TNPGN-Active (Bildiri), 8- Optimization of F2 Layer Parameters Using IRI-Plas and IONOLAB TEC (Bildiri), 9- Optimization of F2 layer parameters using IRI-Plas model IONOLAB total electron content (Bildiri), 10- Signal processing techniques for imaging of ionosphere using GPS-TEC (Bildiri), 11- Space Weather activities of IONOLAB group using TNPGN GPS network (Bildiri), 12- IONOLAB group activities using CORS-TR GPS network (Bildiri), 13- Space-Time Interpolation and Automatic Mapping of TEC Using TNPGN-Active (Bildiri), 14- A novel spatio-temporal TEC interpolation algorithm for GPS networks (Bildiri), 15- Comparison of IRI-Plas TEC Maps with Optimized foF2 and hmF2 Inputs for Magnetic Conjugate Regions (Bildiri), 16- Reconstruction of 3-D ionospheric electron density distribution by using GPS measurements and IRI-Plas model (Bildiri), 17- Investigation on the reliability of earthquake prediction based on ionospheric electron content variation (Bildiri), 18- Investigation of Ionospheric Precursors of 23 October 2011, Mw=7.2 Earthquake in Van, Turkey (Bildiri), 19- Spatio-Temporal TEC Interpolation for TNPGN-Active Stations (Bildiri), 20- Sentetik TEİ yüzeyleri için parçacık sürü optimizasyonu ile parametre kestirimi (Bildiri), 21- IRI-Plas in Real Time: the ionospheric foF2, hmF2 and W-index global maps produced from hourly GPS-TEC maps (Bildiri), 22- Assimilating the IRI-Plas model to the ionospheric hourly maps of GPS-TEC to produce the artificial foF2 and hmF2 global maps (Bildiri), 23- Toplam Elektron İçeriği ile Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının İncelenmesi (Bildiri), 24- Investigation of Hourly and Daily Patterns for Lithosphere-Ionosphere Coupling Before Strong Earthquakes (Bildiri), 25- Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının TUSAGA Aktif TEİ Kestirimleri İle İncelenmesi (Bildiri), 26- Comparison of ionospheric variations in seismic and quiet days by CORS-TR IONOLAB-TEC estimates (Bildiri), 27- Comparison of ionospheric variations in seismic, geomagnetically disturbed and quiet days by IONOLAB-TEC estimates (Bildiri), 28- TUSAGA TEİ Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Kestirimi (Bildiri), 29- İyonosfer F2 tabakası parametrelerinin eniyileme yolu ile IRI modeli ve IONOLAB TEİ kestirimleri kullanılarak belirlenmesi (Bildiri), 30- Determining F2 layer parameters via optimization using IRI-Plas model and IONOLAB TEC estimations (Bildiri), 31- Optimization of F2 layer parameters using IRI-Plas and IONOLAB TEC (Bildiri), 32- TUSAGA-Aktif ağı için İyonküre delme noktalarının incelenmesi (Bildiri), 33- Investigation of Ionospheric Pierce Points for TNPGN-Active Network and its Magnetic Conjugate Coordinates (Bildiri), 34- Investigation of optimum TEC monitoring (Bildiri), 35- A Novel Algorithm for Cycle Slip Detection and Repair (Bildiri), 36- Application of Modified Particle Swarm Optimization Method for Parameter Extraction of 2-D TEC Mapping (Bildiri), 37- İyonosfer TEİ verilerinin uzay-zamansal aradeğerlemesi (Bildiri), 38- Virtual ionosonde network in conjugate hemisphere (Bildiri), 39- Space Weather Activities of IONOLAB Group: TEC Mapping (Bildiri), 1- Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 2- Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 3- Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 4- Observed Ionospheric Effects of 23 October 2011 Van, Turkey Earthquake
-----------------------------------	---

	<p>(Makale/Kitap/Kitapta Bölüm),</p> <p>5- Observed Ionospheric Effects of 23 October 2011 Van, Turkey Earthquake (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm),</p> <p>6- Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm),</p> <p>7- Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm),</p> <p>8- Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm),</p> <p>9- Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm),</p> <p>10- Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm)</p>
--	--

TÜBİTAK