



Karadeniz Kıyılarında Deniz Kaynaklı Doğal Afetlerin Modellenmesi için Yeni Araçlar ve Risk Değerlendirmesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 213M534

**Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Ahmet C. YALÇINER**

Araştırmacılar:

Gülizar ÖZYURT TARAKCIOĞLU

Danışman:

Bursiyerler:

Ayşe Duha Metin

Deniz Can Aydın

Çağıl Kirezci

**AĞUSTOS 2016
ANKARA**

ÖNSÖZ

TUBİTAK-213M534 Projesi çalışmaları Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ile Rusya Nizhny Novgorod State Technical University işbirliğinde gerçekleştirilmiştir. Proje çalışmaları, son zamanlarda Akdeniz’de gözlemlenen olağandışı olaylar, literatürde yer alan sayısal modeller, okyanus dalga hareketleri ve atmosferik basınç etkisinin eşleşmesi ile rezonans (salınım) oluşumu, basınç değişimi ile oluşan dalgaların modellenmesi, analitik yaklaşım, sayısal modelleme, sayısal modelin doğrulanması, farklı tipte basenler için sayısal çalışmalar (Üçgen tabanlı basen için benzetim çalışması, Basamaklı şelf basen için benzetim çalışması, 1/10 eğimli şelf basen, 1/100 eğimli şelf basen, 1/200 eğimli şelf basen), kıyıya doğru ya da açık denize doğru ilerleyen basınç hareketleri için benzetimler, Karadeniz’de fırtınaların, denize ilişkin afetlerin modellenmesi rezonans (tınlaşım) analizleri, uzun dönemli dalgaların Kuril adaları bölgesinde ilerlemesi ve adalar arası dar bölgelerden geçişlerinde enerji değişimleri, Giresun’u etkileyen fırtınaların modellenmesi konularını kapsamaktadır. Bu raporda proje çalışmalarının sonuçları tartışılarak sunulmuştur.

Proje süresi içinde Rusya tarafındaki araştırmacılar Doç. Dr. Andrey Zaytsev iki kez, Prof. Dr. Efim Pelinovsky, Doç. Dr. Tatiana Talipova, Dr. Ayrat Giniyatullin ve Yüksek Lisans öğrencisi Nikita bir kez olmak üzere 4 ayrı seyahat yapmışlardır. Ancak Türk araştırmacılar ilk yıl Rusya’ya seyahat yapmamışlar, seyahat planı ikinci yıla bırakılmıştır. Rusya’ya yapılması planlanan seyahatler, iki ülke arasında oluşan çeşitli siyasi nedenlerden dolayı gerçekleştirilememiştir.

Raporda sunulan sonuçların elde edilme süreci içinde konsorsiyum içinde ve dışında bilimsel destek ve/veya yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Efim Pelinovsky, Doç. Dr. Andrey Zaytsev, Prof. Dr. Andrey Kurkin, Doç. Dr. Tatiana Talipova, Ayrat Giniyatullin, ve Nikita Prof. Dr. Ayşen Ergin, Y. Doç. Dr. Gülizar Özyurt, Y. Doç. Dr. Cüneyt Baykal, Dr. Işıkhan Güler, Yüksek Lisans öğrencisi Deniz Can Aydın, Yüksek Lisans öğrencisi Ayşe Duha Metin, Doktora öğrencisi Araş Gör. Gökhan Güler, Yüksek Lisans öğrencisi Çağıl Kirezci, Doktora öğrencisi Naeimeh Shaghrivand’a ’ye teşekkür ederim. Projenin teknik koordinasyonu tamamen Y. Doç. Dr. Gülizar Özyurt Tarakcioğlu ve idari koordinasyonu Nuray Çimen tarafından yürütülmüştür. Dr. Tarakcioğlu ve Çimen’in bu önemli katkıları projenin ulusal ve uluslararası düzeyde başarısı ve tanınırlığını sağlamıştır. Kendilerine ayrıca özel teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Cevdet YALÇINER
Proje Yürütücüsü

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLO LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	2
2.1 Son Zamanlarda Gözlemlenen Olaylar.....	2
2.2 Literatürde Yer Alan Atmosferik Basınç Etkisi ile Dalga Oluşumu Konusundaki Sayısal Modeller.....	7
2.3 Okyanus Dalga Hareketi ve Atmosferik Basınç Kuvvetinin Eşleşmesiyle Rezonans Oluşumu.....	9
2.4 Fırtına Kabarması Konusundaki Çalışmalar.....	10
2.5 Fırtına ile oluşan Çevrim Modelleri.....	11
2.6 Birleştirilmiş Modeller.....	12
2.7 Karadeniz ile İlgili Çalışmalar.....	15
2.8 Proje İçinde Fırtına Kabarması Konusunda Kullanılan Sayısal Modeller.....	16
2.8.1 ADCIRC.....	16
2.8.2 Simulating WAVes Nearshore (SWAN).....	21
2.8.3 ADCIRC – SWAN Birleşim Modeli.....	22
3. BASINÇ DEĞİŞİMLERİ İLE OLUŞAN DALGALARIN MODELLEMESİ.....	24
3.1 Analitik Çözüm.....	24
3.2 Sayısal Modelleme.....	27
3.3 Sayısal Modelin Doğrulanması.....	29
3.4 Farklı Tipte Basenler için Sayısal Çalışmalar.....	33
3.4.1 Üçgen Tabanlı Basen için Benzeşim Çalışması.....	33
3.4.2 Basamaklı Şelf Basen için Benzeşim Çalışması.....	38
a) 1/10 Eğimli Şelf Basen.....	40
b) 1/100 Eğimli Şelf Basen.....	44
c) 1/200 Eğimli Şelf Basen.....	48
3.4.3 Kıyıya ve Açık Denize Doğru İlerleyen Basınç Hareketleri için Benzeşim Çalışması.....	52
3.5 Sonuçlar.....	57
4. KARADENİZDEKİ FIRTINALARIN ANALİZİ.....	59
5. KARADENİZDEKİ DENİZ AFETLERİNİN MODELLEMESİ VE REZONANS ANALİZLERİ.....	70
5.1 Rezonans (Tınlama) Etkilerinin Araştırılması.....	74
5.2 Uzun Dönemli Dalgaların Kurul Adalarında İlerlemesi ve Adalar Arası Boğazlardan Geçişleri.....	75
6. GİRESUN'U ETKİLEYEN FIRTINALARIN MODELLEMESİ.....	78

6.1 Çalışma Alanı ve Seçilen Fırtına (Eylül, 2014).....	78
6.2 Girdi Verilerinin Seçimi	79
6.3 Sonlu Elemanlar Ağ Modeli	83
6.4 Eylül 2014 Fırtınası Simülasyon Sonuçları.....	84
6.4.1 1. Durum Sonuçları	85
6.4.2 2. Durum Sonuçları	89
6.4.3 3. Durum Sonuçları	90
6.4.4 4. Durum Sonuçları	91
6.4.5 5. Durum Sonuçları	91
6.4.6 6. Durum Sonuçları	92
6.5 Eylül 2014 Fırtınası Simülasyon Sonuçlarının Analizi	93
6.6 ADCIRC-SWAN Birleşik Modellemesi ile Hesaplanan Su Basması Sonuçları	95
6.6.1 Durum A Sonuçları.....	96
6.6.2 Durum B Sonuçları.....	97
6.6.3 Durum C Sonuçları.....	99
6.7 Eylül 2014 Fırtınası Su basması Çalışmalarının Sonuçlarının Analizi	101
6.8 Eylül 2014 Fırtınasının Modelleme Sonuçları.....	102
6.9 Şubat 1999 Fırtınası Su Basması Modelleme Çalışmaları	103
KAYNAKLAR	104

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Literatürdeki meteotsunamiler ve maksimum dalga yükseklikleri.....	4
Tablo 2.2. Türkiye'nin batı ve güney kıyılarındaki olayların listesi	6
Tablo 3.1. Sayısal ve Analitik Q/P oranlarının 20. Dakikadaki Karşılaştırmaları	32
Tablo 3.2. Bütün Basen Şekilleri ve Durumlar İçin Maksimum Su Seviyeleri.....	57
Tablo 4.1. Kilyos Dalga Modeli - Uç Değer İstatistiği Çalışması	63
Tablo 4.2. Akçakoca Dalga Modeli - Uç Değer İstatistiği Çalışması	63
Tablo 4.3. Amasra Dalga Modeli - Uç Değer İstatistiği Çalışması	63
Tablo 4.4. Sinop Dalga Modeli - Uç Değer İstatistiği Çalışması	63
Tablo 5.1. Dar alan olarak benzetimleri yapılan Odesa körfez bölgesi için hesaplanan tınlaşım periyotları.....	75
Tablo 6.1. Durum koşulları.....	85
Tablo 6.2. Farklı durumlar için dalga koşulları.....	95
Tablo 6.3. 3 durum için hesaplanan su altında kalan toplam alan miktarları.....	102

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Literatürde meteotsunami olayları (Pattiaratchi ve Wijeratne, 2015 'den uyarlanmıştır.).....	3
Şekil 2.2. Türkiye'nin batı ve güney kıyılarında deniz çekilmelerini gösteren harita (2005-2016)	6
Şekil 2.3. Fırtına ile Deniz Kabarması ve Çekilmesi	11
Şekil 2.4. Rüzgâr enerji transferi (Kamphuis, 2000)	18
Şekil 2.5. Arka bölüm (fırtına hareketi vektörüne göre 151-240 derece) 2) Sağ bölüm (21-150 derece) , ve 3) Sol ön bölüm (241- 020 derece).....	19
Şekil 2.6. Rüzgâr sürüklenme katsayıları	20
Şekil 2.7. Birleşim mekanizması	23
Şekil 3.1. Hareketli sabit atmosferik basınç tarafından oluşturulan uzun periyotlu dalganın yayılmasının genel kesit görünümü.....	26
Şekil 3.2. Düz Batimetrisinin Üstten görünümü.....	29
Şekil 3.3. Düz Batimetrisinin A-A Kesitinden Görünümü.....	29
Şekil 3.4. Düz Batimetri üzerinde Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü.....	30
Şekil 3.5. Düz Batimetri üzerinde Yüksek Basınç Bandının A-A Kesitinden Görünümü.....	30
Şekil 3.6. Düz Batimetri için $V=200$ m/s ve $c=70$ m/s Olduğundaki Sonuçlar (Test 1)	31
Şekil 3.7. Düz Batimetri için $V=70$ m/s ve $c=70$ m/s Olduğundaki Sonuçlar (Test 2)	31
Şekil 3.8. Düz Batimetri için $V=40$ m/s ve $c=70$ m/s Olduğundaki Sonuçlar (Test 3)	32
Şekil 3.9. Üçgen Batimetrisinin Üstten görünümü	33
Şekil 3.10. Üçgen Batimetrisinin A-A&B-B&C-C&D-D Kesitinden Görünümleri.....	33
Şekil 3.11. Üçgen Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü.....	34
Şekil 3.12. Üçgen Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının A-A Kesitinden Görünümü..	34
Şekil 3.13. Üçgen Batimetri için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1)	35
Şekil 3.14. Üçgen Batimetri için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2)	36
Şekil 3.15. Üçgen Batimetri için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3)	37
Şekil 3.16. Üçgen Batimetri için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Maksimum Su Yüksekliği	38
Şekil 3.17. 1/10 Eğimli Şelf Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü	38
Şekil 3.18. 1/100 Eğimli Şelf Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü	39
Şekil 3.19. 1/200 Eğimli Şelf Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü	39
Şekil 3.20. Bütün Şelf Batimetrisinin Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının A-A Kesit Görünümü	39
Şekil 3.21. 1/10 Eğimli Şelf Batimetrisinin Üstten Görünümü.....	40
Şekil 3.22. 1/10 Eğimli Şelf Batimetrisinin A-A Kesitinden Görünümü.....	40
Şekil 3.23. 1/10 Eğimli Şelf Basen için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1).....	41
Şekil 3.24. 1/10 Eğimli Şelf Basen için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2).....	42
Şekil 3.25. 1/10 Eğimli Şelf Basen için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3).....	43
Şekil 3.26. 1/100 Eğimli Şelf Batimetrisinin Üstten Görünümü.....	44
Şekil 3.27. 1/100 Eğimli Şelf Batimetrisinin A-A Kesit Görünümü	44
Şekil 3.28. 1/100 Eğimli Şelf Basen için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1).....	45
Şekil 3.29. 1/100 Eğimli Şelf Basen için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2).....	46
Şekil 3.30. 1/100 Eğimli Şelf Basen için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3).....	47
Şekil 3.31. 1/200 Eğimli Şelf Batimetrisinin Üstten Görünümü.....	48
Şekil 3.32. 1/200 Eğimli Şelf Batimetrisinin A-A Kesit Görünümü	48
Şekil 3.33. 1/200 Eğimli Şelf Basen için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum	

1).....	49
Şekil 3.34. 1/200 Eğimli Şelf Basen için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2).....	50
Şekil 3.35. 1/200 Eğimli Şelf Basen için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3).....	51
Şekil 3.36. Artan ve Azalan Eğimli Batimetrisinin Üstten Görünümü.....	52
Şekil 3.37. Artan ve Azalan Eğimli Batimetrisinin A-A&B-B ve C-C Kesit Görünümü.....	52
Şekil 3.38. Artan ve Azalan Eğimli Batimetrisinin Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü.....	53
Şekil 3.39. Artan ve Azalan Eğimli Batimetrisinin Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının A-A Kesit Görünümü.....	53
Şekil 3.40. Artan ve Azalan Eğimli Basen için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1).....	54
Şekil 3.41. Artan ve Azalan Eğimli Basen için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2).....	55
Şekil 3.42. Artan ve Azalan Eğimli Basen için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3).....	56
Şekil 4.1. Dalga yüksekliği ve bölgeler (mavi – Batı Karadeniz, yeşil – Orta Karadeniz, kırmızı – Doğu Karadeniz).....	60
Şekil 4.2. Yıllara göre fırtına sayısı dağılımı ve bölgeler (mavi – Batı Karadeniz, yeşil – Orta Karadeniz, kırmızı – Doğu Karadeniz).....	60
Şekil 4.3. Yıllara göre fırtına sayıları – bölgeler için ayrıntılı gösterim (mavi – Batı Karadeniz, yeşil – Orta Karadeniz, kırmızı – Doğu Karadeniz).....	61
Şekil 4.4. Modellenen yıllık en yüksek dalgalar ve trend çizgileri.....	62
Şekil 4.5. 1999 fırtınası sırasında Giresun Limanı ana mendireğin yıkılış görüntüleri.....	64
Şekil 4.6. Sanal istasyonlar – 1. Çalışma.....	65
Şekil 4.7. 1999 ve 2014 Fırtınalarının Karadeniz’de yarattığı dalga yükseklikleri.....	65
Şekil 4.8. 1999 fırtınası model sonuçları: G1, G3 ve G5 istasyonları için verilmektedir.....	66
Şekil 4.9. 2014 Fırtınası model sonuçları : G1, G3 ve G5 istasyonları için verilmektedir.....	67
Şekil 4.10. Çalışma alanı ve sanal istasyonlar.....	68
Şekil 4.11. 1999 fırtınası derin deniz noktaları akıntı çalışması.....	69
Şekil 4.12. 1999 fırtınası batimetre etkisi karşılaştırması.....	69
Şekil 5.1. 23-27 Haziran tarihleri arasında Akdeniz ve Karadeniz’de birbiri ardına devam eden olağan dışı dalga olaylarının gerçekleştiği yerler.....	71
Şekil 5.2. Odessa kıyısında 27 Haziran 2014 tarihinde gözlenen olağandışı dalgalar.....	71
Şekil 5.3. Benzetimlerde kullanılan çalışma alanları a) Geniş alan (Karadeniz) b) Dar alan (Odessa).....	72
Şekil 5.4. Geniş Alan Basınç haritaları (27 Haziran 2014), a) Saat 08:00 (UTC) b) saat 09:00 (UTC) saat 10:00 (UTC).....	72
Şekil 5.5. Geniş Alanda Basınca bağlı su düzeyi haritaları (27 Haziran 2014), a) Saat 08:00 (UTC) b) saat 09:00 (UTC) saat 10:00 (UTC).....	73
Şekil 5.6. Dar Alan Basınç haritaları (27 Haziran 2014), a) Saat 08:00 (UTC) b) saat 09:00 (UTC) saat 10:00 (UTC).....	73
Şekil 5.7. Dar Alanda Basınca bağlı su düzeyi haritaları (27 Haziran 2014), a) Saat 08:00 (UTC) b) saat 09:00 (UTC) saat 10:00 (UTC).....	73
Şekil 5.8. Benzetimler sonucunda elde edilen en yüksek su düzeyi değerleri (geniş alan).....	73
Şekil 5.9. Benzetimler sonucunda elde edilen en yüksek su düzeyi değerleri (dar alan).....	74
Şekil 5.10. Tınlama Analizi için Odesa Körfezinde yaratılan dairesel etkinin yayılması.....	75
Şekil 5.11. Çalışma alanları a) Kuril adalarının dahil olduğu b) Kuril adalarının dahil olmadığı.....	76
Şekil 5.12. a)Tsunami kaynağı b) Benzetim sonucu çalışma alanındaki tsunami enerjisinin dağılımı.....	76
Şekil 5.13. İki farklı çalışma alanı için dalga genliklerinin karşılaştırılması.....	77
Şekil 6.1. Çalışma alanı, üst resimdeki kırmızı kutu ADCIRC+SWAN model sınırlarını kapsarken alt resimdeki kırmızı kutu NAMI DANCE model sınırlarını kapsamaktadır.....	78
Şekil 6.2. Giresun'daki fırtına sırasında çekilen fotoğraflar (http://www.habername.com/).....	79
Şekil 6.3. Tüm çalışma alanı için batimetri seviyeleri, kontürler m cinsinde.....	80

Şekil 6.4. Odaklanılan alan için batimetri seviyeleri, kontürler m cinsinde	80
Şekil 6.5. Rüzgar vektörleri ile metre olarak su yüksekliği cinsinden atmosferik basınç kontürleri	
a) 22 Eylül 2014 öğlen saat 12:00 b)23 Eylül 2014 00:00 c) 23 Eylül 2014 12:00	81
Şekil 6.5 devamı. d)24 Eylül 2014 00:00 e)24 Eylül 2014 12:00 f)25 Eylül 2014 00:00	82
Şekil 6.6. Tüm çalışma alanı için grid aralık kontürleri (m)	83
Şekil 6.7. Odaklanılan alan için grid aralık kontürleri (m).....	84
Şekil 6.8. NAMI DANCE simülasyonları için oluşturulan ağ modeli alanı ve yükseklikler (m) ..	84
Şekil 6.9. Temsili dalga yükseklik kontürleri (m) ile rüzgâr hız vektörleri a) 24 Eylül 2014 saat	
00:15am b) 24 Eylül 2014 saat 02:45am c) 24 Eylül 2014 saat 06:30am	86
Şekil 6.10: m/s cinsinden akıntı hız kontürleri	87
Şekil 6.11. m cinsinden maksimum su yükseklikleri	87
Şekil 6.12. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m).....	88
Şekil 6.13. Maksimum pik periyod dağılımı (s).....	88
Şekil 6.14. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m).....	89
Şekil 6.15. Maksimum pik periyod dağılımı (s).....	89
Şekil 6.16. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m).....	90
Şekil 6.17. Maksimum pik periyod dağılımı (s).....	90
Şekil 6.18. Maksimum su yükseklikleri (m).....	91
Şekil 6.19. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m).....	91
Şekil 6.20. Maksimum pik periyod dağılımı (s).....	92
Şekil 6.21. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m).....	92
Şekil 6.22. Maksimum pik periyod dağılımı (s).....	93
Şekil 6.23. 1. durum ile 2. durum arasındaki maksimum temsili dalga yükseklikleri farkları %	
olarak	94
Şekil 6.24. 1. durum ile 6. durum arasındaki maksimum temsili dalga yükseklikleri farkları %	
olarak	94
Şekil 6.25. 1. durum ile 3. durum arasındaki maksimum temsili dalga yükseklikleri farkları %	
olarak	95
Şekil 6.26. Giresun açıklarında girdi olarak verilen ($H_s = 6m$ $T_s = 11s$) için düzensiz dalga	
zaman grafiği.....	96
Şekil 6.27. Simülasyon sırasında hesaplanan kıyı boyunca maksimum su yükseklikleri (üst	
kısım) ve su altında kaldığı hesaplanan alanlar (alt kısım).....	97
Şekil 6.28. Giresun açıklarında girdi olarak verilen ($H_s = 5.5m$ $T_s = 12s$) için düzensiz dalga	
zaman grafiği.....	98
Şekil 6.29. Simülasyon sırasında hesaplanan kıyı boyunca maksimum su yükseklikleri (üst	
kısım) ve su altında kaldığı hesaplanan alanlar (alt kısım).....	99
Şekil 6.30. Giresun açıklarında girdi olarak verilen ($H_s = 4.5m$ $T_s = 10s$) için düzensiz dalga	
zaman grafiği.....	100
Şekil 6.31. Simülasyon sırasında hesaplanan kıyı boyunca maksimum su yükseklikleri (üst	
kısım) ve su altında kaldığı hesaplanan alanlar (alt kısım).....	101
Şekil 6.10.1. Giresun açıklarında girdi olarak verilen ($H_s = 6m$ $T_s = 18s$) için düzensiz dalga	
zaman grafiği.....	103
Şekil 6.10.2. Simülasyon sırasında hesaplanan kıyı boyunca maksimum su yükseklikleri (üst	
kısım) ve su altında kaldığı hesaplanan alanlar (alt kısım).....	104

ÖZET

Karadeniz'de, kapalı bir havza olmasına rağmen, aşırı şiddetli fırtınalar ve fırtına kabarmaları, tsunami, ender dalgalar ve hortumlar periyodik olarak görülmektedir. Ekstrem fırtınaların frekansında son yıllarda artış olduğu düşünülmektedir. Projenin genel amacı, doğal afetlerle (tsunami, fırtınalar ve ender dalgalar) ilişkili olan uzun dönemli dalgaları modellemek ve kıyıda yarattıkları etkileri yeni araçlar ve sayısal analiz teknikleri ile çalışılmış ve yeni yazılım ve araçlar üretilmiştir. Fırtına kabarmasının etkilerinin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi ile ilgili ulusal bir modelleme aracı yoktur. Projede, tarihteki ekstrem fırtına, tsunami, seşş ve ender dalga afetlerinin yazılı basında, raporlarda, ölçümlerde ve yerel gözlemlerde bulunan bilgiler kullanılarak incelenmiştir. Fırtına kabarmasının dinamikleri ve parametrelerini analiz etmek için sayısal model geliştirilecek ve bu model bir modül olarak NAMI DANCE yazılımına entegre edilmiştir. Böylece, fırtına kabarmasından kaynaklı baskın alanlarının karakterleri ve dalgaların kıyı yapıları üzerine etkileri de NAMI DANCE yazılımıyla analiz edilmiştir.

İklim değışikliğinin, özellikle deniz seviyesi yükselmesinin ve Karadeniz sularındaki diğer periyodik hareketlerin (basen rezonansı, gel-git, vd.) baskın alanlarındaki ve yapısal hasarlar üzerindeki etkileri deterministik senaryolar yardımıyla değerlendirilmiştir.

Ortak kurumlar arasındaki işbirliği, ağ kurma ve bilgi değışimi, proje için güçlü bir odak olarak yer almıştır. Türk ve Rus araştırma ekiplerinin her ikisi de tsunami modelleme ve beraber çalışma konusunda diğer araştırma projelerinden gelen tecrübeyi paylaşmaktadır. Bu tecrübenin getirdiği avantajlar, benzeri bir takım çalışmasıyla fırtına kabarması modeli geliştirilmesi konusunda etkili olmuştur. Rus ekibinin Sahalin ve Kuril adalarındaki denize ilişkin afetler konusundaki deneyimleri, Türk ekibinin doğal afetlerle ilgili etki azaltıcı önlem ve mücadele ölçütlerinin geliştirilmesi ve bu önerilerin, kıyı alanları yönetimi sistemleri modellerine uygulanmasına yönelik tecrübeler de elde edilmiştir. Proje kapsamında Atmosfer basıncı ile dalga oluşumu için NAMI DANCE-P yeni model isimli oluşturulmuştur. Bundan başka SWAN, ADCISC ve NAMI DANCE modelleri kullanılarak Giresun'da etkili olan Eylül 2014 ve Şubat 1999 fırtınalarına uygulanmış, sonuçlar gözlemlerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fırtına kabarması, NAMI DANCE, Karadeniz, iklim değışikliği, basen rezonansı, risk

ABSTRACT

Although Black Sea is a closed basin, extreme storms and storm surges, tsunami, freak waves and waterspout have been observed periodically and there is an increase in the frequency of extreme storms in the recent years. Moreover, loss of life is possible under different natural hazard conditions and the impact of climate change is expected to exacerbate the situation in the long run. The overall aim of the project is to model and simulate long waves and their impacts associated with natural hazards (tsunami, storms and freak waves) along the coasts of Black Sea basin by developing new modelling tools and numerical analysis techniques. The theoretical information is available for both storm surge and tsunami modelling. However, site specific application is very important in order to develop mitigation measures that can be implemented locally. Since propagation and transformation of waves influences the impact on coastal area, site specific modelling tools produce reliable results. Although NAMI DANCE program that models and simulates tsunami characteristics have been applied to Russian coasts by the authors of this project, Black Sea coasts of Turkey still have very few studies on the subject. On the other hand, study on storm surge along Black sea coasts of Turkey and Russia is almost non-existent although the frequency of extreme storms is much higher. Additionally, there is no national modelling tool to asses and analyse the impacts of storm surges that can be used to develop the mitigation measures that are urgently needed.

The project covers the investigation of characteristics (time, location, wave height, duration, period, water levels etc.) of historical events including extreme storms, tsunami, seiche and freak waves using available information such as newspapers, reports, measurements, and local observations. A numerical model solving nonlinear shallow equations with the atmospheric pressure term is developed and applied to specific cases.

Comparison of storm surge inundation and tsunami inundation is expected to provide efficient mitigation measures that can be applied for both natural hazards. Impact of climate change (especially sea level rise) and other periodic movements of Black Sea water level (basin resonance, tide, etc.) on inundation area and structural damage has been assessed using deterministic scenarios.

A strong focus is put on cooperation between partners, networking and exchange of knowledge in order to complement the experience of individual partners. Turkish and Russian team are both experienced in tsunami modelling and have been working together in several research projects. Using the advantage of this experience, similar team work is utilized to develop a new model (NAMI DANCE-P) considering pressure disturbances and wave

generation. Furthermore September 2014 and February 1999 storms affected Giresun city have been analyzed using SWAN, ADCIRC and NAMI DANCE Models. The results are compared with the observations and discussed.

Keywords: Storm surge, NAMI DANCE, Black Sea, freak wave, climate change, basin resonance, hazard

1. GİRİŞ

Tsunami kelimesi “liman dalgası” anlamına gelmekte olup, 1896 Meiji Sanriku deprem ve tsunamisinden sonra dilimizin bir parçası haline gelmiştir. Aslında Yunan tarihçi Thucydides (M.Ö. 426), Maliakos körfezinde tsunami benzeri bir olay tanımlamış ancak özel bir kelime ile isimlendirmemiştir. Thucydides (alıntılanan Antonopoulos, 1992) deprem olduktan sonra denizin yıkıcı bir etkiyle geri çekildiğini ve daha sonra tekrar ileri giderek su baskınlarına sebep olabileceğinden bahsetmiştir. Ancak o sadece depremle ilişkili tsunami benzeri olaylar için bu açıklamada bulunmuştur. Fakat günümüzde tsunami oluşumunun farklı üretim mekanizmalarına sahip olduğu bilinmektedir.

Tsunamiler yıkıcı uzun periyotlu dalgalar ve hem okyanus altındaki bir kaynaktan (ör, depremler, deniz tabanında heyelan ve/veya volkanik patlamalar), hem de okyanus üzerindeki bir kaynaktan (ör, meteorolojik olaylar, asteroit etkiler) dolayı meydana gelebilirler. Ayrıca, uzun dalgaların oluşumu ve yayılması ve kıyı-liman bölgeleri üzerindeki etkileri, kıyı ve deniz mühendisliği ve bilim için önemli konulardır. Çeşitli etkiler sebebiyle, seri halindeki birçok dalga oluşur ve kıyıya doğru ilerler. Tsunamilerin en önemli özellikleri çok büyük dalga yüksekliklerine ve hızlarına sahip olmalarıdır. Dalgaların kıyıya yaklaşması sırasında, dalga yükseklikleri okyanus derinliğindeki azalma nedeniyle artmaktadır. Ayrıca, derin denizde dalgaların ilerleme hızı bir uçağın hızına eş değerdir, kıyıya doğru yaklaştıkça dalgaların hızı da azalır.

Genellikle, tsunami 40 km'den 200 km'ye varan dalga uzunluğuna, 3.5 dakikadan saatlere ulaşabilen dalga periyoduna sahiptir (Wu, 1981). Ancak, bu özellikler dalganın oluşum mekanizmasına bağlıdır.

Deprem ve heyelan kaynaklı tsunamiler birçok araştırmacı tarafından çalışılan bir konuyken, meteorolojik kaynaklı tsunamiler hakkında yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle bu konu ile ilgili Türkiye kıyılarında hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Bu projenin bir kısmında meteorolojik kaynaklı tsunamilerin yapısı ve neden olabileceği sonuçlar incelenmiştir.

Meteotsunamiler, atmosferik basınç bozukluklarının neden olduğu su kütlesi yer değişimidir. Meteotsunamiler, dünyadaki tüm okyanuslarda gözlemlenebilir ve bulunduğu bölgeye göre farklı şekillerde isimlendirilebilirler. Örneğin, “rissaga” (Baleric Adası), “marubbio” (Sicilya), “milghuba” (Malta), “abiki” (Nagasaki Körfezi) ve “Seebar” (Baltık Denizi) bu isimlendirmelerdendir (Monserrat ve Rabinovich, 2006). Meteotsunamiler hakkındaki çalışmada amaç, mekânsal ve zamansal basınç dağılımları nedeniyle oluşan bu olayların etkili parametreleri dikkate alarak (ör, batimetri, basınç hızı) olası etkilerini araştırmak ve sayısal bir model geliştirmektir.

Proje çalışmalarının bir diğer bölümü de Karadeniz'de oluşan önemli iki fırtınanın (1999,

2014) ayrı ayrı modelleme yapılarak incelenmesidir. Türkiye’de, coğrafi konum nedeni ile kıyı alanlarında sele neden olabilecek yeterli yükseklikteki kabarma ve dalgaları üretebilen fırtınalar sıklıkla görülmektedir. Bu tür fırtına kaynaklı tehlikeler kıyı koruma yapılarında, limanlarda, gemilerde hasara yol açıp insan hayatını tehlikeye atmaktadır. Bu fırtınaların biri 23-25 Eylül 2014 tarihinde Karadeniz’de meydana gelmiş ve Giresun ili büyük ölçüde etkilenmiştir. Bu çalışmada, Eylül 2014’te ve ayrıca Şubat 1999’da gerçekleşen fırtınalar sebebiyle oluşan fırtına kabarması ve kıyı su baskını sayısal modelleme yardımı ile incelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

TÜBİTAK-213M534 projesi kapsamında tüm dünya genelinde gözlemlenen meteotsunamiler araştırılmıştır. Ayrıca, Türkiye’nin kuzey, güney ve batı kıyılarında meydana gelen deniz çekilmelerinin nedenlerinin atmosferik basınç farklılıkları olabileceği ön görülmüştür. Bunların yanında, meteotsunami çalışmalarında kullanılan sayısal modeller ve risk analiz yöntemleri konularında literatür araştırması yapılmıştır.

2.1 Son Zamanlarda Gözlemlenen Olaylar

Meteorolojik kökenli dalga olaylarının görüldüğü belirli bölgeler literatürde şu şekilde verilmiştir: Doğu Kıyısı (Churchill ve arkadaşları, 1995; Sallenger ve arkadaşları, 1995; Pasquet ve Vilibić, 2013; Lipa ve arkadaşları, 2013), Meksika Körfezi (Paxton ve Sobien, 1998), Büyük Göller (Ewing ve arkadaşları, 1954; Donn, 1959; Bechle ve Wu, 2014), Atlantik Okyanusu (Mercer, 2002; Candella, 2009; Dragani ve arkadaşları, 2009), Adriyatik Denizi (Vučetić ve arkadaşları, 2009; Šepić ve arkadaşları, 2012), Akdeniz (Airy, 1878; Monserrat ve arkadaşları, 1991; Rabinovich ve Monserrat, 1996; Vilibić ve arkadaşları, 2008), Ege Denizi (Papadopoulos, 1993), Karadeniz (Vilibić, 2010), Doğu Çin Denizi (Hibiya ve Kajiura, 1982; Tanaka, 2010), Japon Denizi (Park ve arkadaşları, 1986), Sarıdeniz (Wang ve arkadaşları, 1987; Cho ve arkadaşları, 2013). Bunun yanında, Pattiaratchi ve Wijeratne (2015), maksimum dalga yüksekliklerine göre gözlemlenen bütün meteotsunamileri listelemişlerdir. Şekil 2.1 ve Tablo 2.1’de bu olaylar gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Literatürde meteotsunami olayları (Pattiaratchi ve Wijeratne, 2015 'den uyarlanmıştır.)

Tablo 2.1. Literatürdeki meteotsunamiler ve maksimum dalga yükseklikleri

No	Location	Max. Wave Height (m)
1	British Columbia and Washington State	0.17
2	San Diego, CA	0.05
3	Chicago, Great Lakes (USA)	3.0
4	Newfoundland, Canada	1.0
5	Boothbay, ME	4.0
6	NE Atlantic coast of USA	0.5
7	Daytona Beach, FL	3.0
8	Eastern Gulf of Mexico	>3.0
9	Arraial do Cabo, Brazil	0.60
10	Buenos Aires coast, Argentina	0.62
11	Portugal/France	0.20
12	west coast, UK	0.40
13	Ireland	>1.0
14	Scotland, UK	0.20
15	Southern North Sea	0.80
16	Baltic Sea	2.0
17	Finland, Baltic Sea	2.0
18	Balearic Islands	5.0
19	Sicily, Italy	~1.5
20	Malta	~1.0
21	Crotia	6.0
22	Greece	0.80
23	Black Sea	3.2
24	Odessa, Black Sea	2.0
25	Dwarskersbos, South Africa	2.9
26	West coast of India	0.40
27	Sri Lanka	0.20
28	Longkou Harbour, China	2.9
29	South Korea	1.6
30	Nagasaki Bay, Japan	4.8
31	Kural Islands	0.37
32	Taiwan	0.5
33	West Australia	1.1
34	Burnie, Tasmania	0.6
35	New Zealand	1.0

Karadeniz kıyılarında gözlemlenen tsunami benzeri olaylara örnek olarak 7 Mayıs 2007'de Bulgaristan kıyılarındaki 3 metrelik nedeni kesin belirlenemeyen olay verilebilir. Aynı sırada, Bulgaristan kıyısına yakın bölgelerde de su seviyesinde anormallikler gözlemlenmiştir. Bu olayla ilgili olarak literatürde iki tane çalışma vardır. Birincisi, Ranguelov ve arkadaşları (2008) tarafından yapılmış ve deniz dalgalanmalarının deniz tabanında gerçekleşen heyelan kaynaklı olduğunu söylemişlerdir. Olay sırasında deprem olmadığı Bulgaristan sismik ağ merkezi (NOTSSI-Telemetri Sismik Bilgi Sistemi Ulusal Gözlem) tarafından doğrulanmıştır. Ancak, bu çalışmada ortaya sürülen kaynak her ne kadar heyelan olsa da, meteorolojik bir

kaynağın da bu olaya sebebiyet verebileceği konusunda şüphe duyulmaktadır. Çünkü belirtilen tarihte, barografik kayıtlara göre atmosferik basınç verilerinde ani bir değişim kaydedilmiştir. Ancak yazarlara göre meteorolojik kökenli olaylar, kısa zaman aralıklarında (en fazla 1 yıl) belirli bölgelerde tekrar eden olaylar olduğundan ve Bulgaristan kıyılarında uzun süredir böyle olaylar kaydedilmediği için bu çalışmada heyelan etkisi üzerinde durulmuştur. Çalışmanın sonucunda, olayın heyelan kaynaklı olduğu düşünüldüğünde, hesaplanan dalgaların frekans ve genliklerinin uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir taraftan Vilibić ve arkadaşları (2010), aynı olayın meteorolojik kökenli olduğunu savunup, benzetim çalışmaları yapmışlardır. Veri çözünürlük ve kalite eksikliğinden dolayı, kaba bir hesaplama yapılmış ancak olayı atmosferik kökenli olarak sınıflandırmak için bu yeterli olmuştur.

23-27 Haziran 2014 tarihleri arasında Akdeniz ve Karadeniz'de birbiri ardına gözlemlenen olaylar İspanya'dan Ukrayna'ya birçok bölgeyi etkilemiştir. Šepić ve arkadaşları (2015), bu zincirleme olayların sebebinin atmosferik basınç düzensizliği olduğunu ifade etmişlerdir. İlk yıkıcı dalga 23 Haziran'da Ciutadella Körfezinde 1 metrelik dalga olarak görülmüştür. Yaklaşık 2 gün sonra, Adriyatik Denzinde 3 metre yüksekliğinde benzer bir dalga ve Mazara Del Vallo Körfezinde 1.5 metrelik su dalgalanması gözlemlenmiştir. Son olarak, 27 Haziran'da sakin ve güneşli bir günde 1-2 metrelik dalgalar Odesa kıyısına çarpmıştır.

Genel olarak, Akdeniz ve Karadeniz'de deprem kaynaklı tsunami olayları gözlenirken, atmosferik basınç düzensizliklerinden dolayı da tsunami benzeri olaylar gözlemlenebilir. Adriyatik ve Akdeniz için literatürde birçok çalışma yer almasına rağmen, Karadeniz'de geçmişte kaynağı belirlenemeyen birçok olay bulunmaktadır ve bunların nedenleri araştırılmamıştır.

Türkiye'nin batı ve güney kıyılarında da belirli zaman aralıklarında belirli bölgelerde deniz çekilmeleri gözlemlenmektedir. Bunun nedeninin de atmosferik değişimler olabileceği düşünülmektedir. Son 11 yıla ait olaylar aşağıdaki Şekil 2.2 ve Tablo 2.2 ile gösterilmiştir. Örneğin, 2008 yılında aynı günde farklı bölgelerde (Gümüşlük ve Şarköy) deniz birden 40 m geri çekilmiştir.



Şekil 2.2. Türkiye'nin batı ve güney kıyılarında deniz çekilmelerini gösteren harita (2005-2016)

Tablo 2.2. Türkiye'nin batı ve güney kıyılarındaki olayların listesi

Çanakkale	13.Oca.05
Marmaris&Gökova	14.Oca.05
Marmara/Yalova	24. Oca.06
Marmara/Tekirdağ	29. Oca.06
Marmara/Tekirdağ-Şarköy	30.Ara.06
Bodrum/Gümüşlük	4. Oca.07
Marmara/Tekirdağ	8. Oca.07
Bodrum/Gümüşlük	22.Şub.08
Marmara/Yenice-Şarköy	22.Şub.08
Çanakkale	25.Eki.08
Balıkesir/Erdek	10. Oca.09
Marmaris/Uzunyalı	12. Oca.09
Marmara/Tekirdağ-Çorlu	30. Oca.09
Balıkesir/Erdek	9.Şub.11
Marmaris/Uzunyalı	13.Mar.11
Çanakkale	15.Mar.11
Bodrum/Gümüşlük	15.Mar.11
Marmara/Yeniköy	25.May.11
Balıkesir/Erdek	24.Kas.11
Marmaris/Uzunyalı	13.Ara.11
Fethiye	10.Haz.12
Antalya/Damlataş	21.Eki.13
Marmaris/Uzunyalı	11.Ara.13
Çanakkale	15.Mar.14
Balıkesir/Erdek	16.Mar.14
Çanakkale	20.Şub.15
Akyarlar-Muğla	19.Nis.15
Akyaka-Muğla	25.Ara.15
Akyaka-Muğla	26.Ara.15
Marmaris/Uzunyalı	4. Oca.16

2.2 Literatürde Yer Alan Atmosferik Basınç Etkisi ile Dalga Oluşumu Konusundaki Sayısal Modeller

Hibiya ve Kajiura (1982) su yüzeyi yüksekliğini (η) ve derinlik entegre taşıma bileşenlerini (Q_x and Q_y) sonlu farklar methodu kullanarak hesaplayan, sayısal model kullanmıştır. Model, ideal akışkan için doğrusallaştırılmış sığ su denklemine göre geliştirilmiştir. Coriolis kuvveti, tüm sürtünme kuvvetleri ve rüzgâr stres terimi ihmal edilmektedir. Modelde kullanılan sığ su hareketi ve süreklilik denklemleri aşağıda bulunmaktadır.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -gh \frac{\partial}{\partial x} (\eta - \eta^*) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} = -gh \frac{\partial}{\partial y} (\eta - \eta^*) \quad (2.2)$$

Daha sonra $\eta^* = -p/(\rho g)$ terimini yerine koyarak (burada p atmosferik basınç bozukluğu, ρ ortalama deniz suyu yoğunluğu, g yerçekimi ivmesi) ve denklem 2.1 ve 2.2 beraber çözümlenerek, aşağıdaki denklem elde edilir (Denklem 2.3).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

Modelde ızgara aralıkları büyük bölge için 4 km ve iç içe bölge için 2 km olarak belirlenip, uygulanmıştır. Zaman aralığı (Δt) 3 saniye olarak belirlenmiştir. Basınç dalgası tepeye doğru $\Delta p = 3$ mb ile doğrusal olarak artmaktadır ve daha sonra aynı şekilde azalma görülmektedir. Basınç dalgasının toplam genişliği 241 km'dir ve 31.33 m/s hızla 5.6 derecelik kuzeydoğu açısıyla ilerlemektedir. Çalışmanın sonunda, hesaplanan sonuçların ve gözlemlerin genel özellikleri uyum içindedir.

Šepić ve arkadaşları (2009), 2007 yılında gözlemlenen Ist meteotsunamisini modellemiştir. Veri analizi yapıldığında, atmosferik basınç hareketlerinin başlamasıyla birlikte yıkıcı dalgaların bir çift rezonans mekanizması tarafından tetiklendiği açıktır. Atmosferik basınç rahatsızlığının hız ve yönü iki yöntem ile elde edilmiştir: Eş zaman analiz yöntemi ve çapraz korelasyon fonksiyonu analiz metodu. Veri analizi sonrasında, iki olasılık arasındaki basınç salınımlarının nedenini belirlemek için, olay WRF (Hava Araştırma ve Tahmini) Sayısal model ile simüle edilmiştir. Sayısal model 3-D, Euler olmayan hidrostatik ve tam kompresif temel denklem modelidir ve atmosferik süreçleri modeller (Skamarock ve ark., 2005). Basınç hızı, veri analizi ve atmosferik sayısal modelleme ile 21-24 m / s olarak belirlenir. Bundan sonra, rüzgâr hızı 22 m / s olarak hesaplanmıştır. Son olarak, simülasyonlar sonucunda, atmosferik basınç düzensizliğinin bir kanallı yerçekimi dalgası olduğu kabul edilmiştir.

Bir başka model, 15 Haziran 2006'da Balerik Adalarında gözlemlenen meteotsunami olayını modellemek için geliştirilmiştir (Vilibić ve ark., 2008). Model, atmosferik basınç terimini içeren momentum denklemlerini ve süreklilik denklemini kullanarak geliştirilmiştir. İlgili denklemler aşağıda verilmiştir (Denklem 2.4-2.6).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g u (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{C^2 (h + \zeta)} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f u = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g v (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{C^2 (h + \zeta)} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(h + \zeta)v] = 0, \quad (2.6)$$

Burada ζ su yüksekliği, h durgun su derinliği, f Coriolis parametresi, t zaman, u ve v x ve y yönlerindeki ortalama hızlar, ρ su yoğunluğu, P atmosferik basınç ve C Chezy sürtünme katsayısıdır.

Atmosferik basınç belirtilen bir yönde sabit bir hızla, girdi olarak programa verilmiştir. Ayrıca, verilere her grid noktasında doğrusal interpolasyon uygulandı. Son olarak, model aynı parametreleri kullanarak Haziran 2006 tarihinde görülen olay ile geçmiş meteotsunami olaylarını çözerek karşılaştırılıp doğrulanmıştır.

Marcos ve diğ. (2003) meteotsunamilerin basınç hızı ve platform özelliklerinin kıyı amplifikasyonuna etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, Cantabria Üniversitesi tarafından geliştirilen 2-D sonlu farklar sayısal modelini kullanmışlardır. Bu modelde, momentum denklemi hava basıncı terimini içerir. Ayrıca, sayısal model, sonlu farklar yöntemi kullanarak süreklilik, momentum ve difüzyon denklemlerini çözer. İlgili kütle korunumu denklemi (2.7), momentum denklemleri (2.8 ve 2.9) ve difüzyon denklemi (2.10) Kartezyen formda olup aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial(U^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(UVH)}{\partial y} = fVH - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{2\rho_0} H^2 \frac{\partial \rho_0}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_{-h}^{\eta} \left[\frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\eta} \rho' dz \right] dz + \tau_{xz(\eta)} - \\ \tau_{xz(-h)} + H \varepsilon_h \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] + 2H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right], \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial(V^2H)}{\partial y} + \frac{\partial(UVH)}{\partial x} = -fUH - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{2\rho_0} H^2 \frac{\partial \rho_0}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_{-h}^{\eta} \left[\frac{\partial}{\partial y} \int_z^{\eta} \rho' dz \right] dz + \tau_{yz(\eta)} - \\ \tau_{yz(-h)} + H \varepsilon_h \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] + 2H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right], \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (2.10)$$

Burada U ve V derinlik ortalamalı hız, H toplam derinlik, η serbest yüzey yüksekliği, h su derinliği, ε_h ve ε_z yatay ve dikey girdap vizkozite, P_a atmosferik basınç, f Coriolis değişkeni, D_x ve D_y yatay yayılma sabitleri ve C bir sabit Mellor (1991)'e göre hesaplanan. Denklemler, doğrusal olmayan terimler hariç, örtülü sonlu fark tekniği ile çözülmüştür. Simülasyonlar hem gerçek (Ciutadella Körfezindeki meteotsunami, 1997) ve idealize batimetriler boyunca yürütülmüştür. Bu simülasyonların sonucunda, atmosferik basınç bozuklukları periyotları batimetri koşulları tarafından kontrol edilen dalgalar oluşmuştur ve enerjileri basınç dalga hızına bağlıdır. Faz hızı 25 m / s iken optimum enerji transferi görülmüştür. Ayrıca, bu olay için, sayısal model sonuçları ile gözlemler uyumludur.

2.3 Okyanus Dalga Hareketi ve Atmosferik Basınç Kuvvetinin Eşleşmesiyle Rezonans Oluşumu

Tamamen sınırlı ya da kısmen sınırlı havzada duran su seviyesi değişimleri “çalkantı” olarak adlandırılır. Havzanın ajitasyonu havza geometrisi ve su derinliğine bağlıdır ve bu dalgalanmalar havzanın öz dönemlerinde (doğal rezonans dönemlerinde) meydana gelir. Kıyıdaki dalgalanmalar genellikle frekans veya üretim mekanizmalarına göre sınıflandırılır. Aslında, bu iki parametre birbirleri ile ilişkili olduğundan, üretim mekanizmaları dalgaların frekans aralığını belirler. Aynı üretim mekanizmaları farklı frekanslarda dalgalanmalar yaratacağı gibi, aynı zamanda farklı üretim mekanizmaları da aynı frekanslar ile çalkantılara neden olabilir. Ayrıca, atmosfer basınç kuvveti geniş bir frekans aralığında su seviyesini etkileyebilir. Çalkantıların doğal periyotları birkaç dakikadan birkaç saate kadar değişebilir. Rüzgâr dalgaları ve atmosferik bozukluklar arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler çalkantıları tetikleyen en önemli faktördür (Rabinovich, 2009).

Çalkantı oluşturan atmosferik yerçekimi dalgaları, basınç yükselmesi, frontal geçişler, kasırga ve fırtına gibi özel enerji kaynakları, çalkantıların genliklerinin etkilerler. Üretim mekanizması ne olursa olsun, atmosferde görünen sadece birkaç hPa basınç değişikliği, deniz seviyesinde sadece birkaç cm değişime neden olur. Metin vd. (2015) hava basıncının zamanla giderek azalmasıyla deniz bölgesinde yükselme gözlemleneceğini, hava basıncının zamanla artmasıyla deniz bölgesinde alçalma gözlemleneceğini belirtmişlerdir (ters barotropik etki). Hava basıncında 1 hPa düşüş olduğunda, deniz seviyesinin 1 cm yükselmesi anlamına gelir. Bu yüzden, okyanus dalgası hareketi ve atmosferik basınç kuvveti arasında rezonans oluşur ve yüksek su seviyeleri görülebilir. Kian vd. (2015) havzadaki baskın çalkantı frekanslarının serbest salınım frekanslarından birisiyle çakışmasıyla, rezonans ve amplifikasyonun oluşacağını ve bunun da kıyı yapıları ve kullanım yönetimi için sorunlara neden olabileceğini belirtmişlerdir. En önemli üç dışsal rezonans mekanizması (i) Proudman rezonansı (ii) Greenspan rezonansı ve (iii) şelf rezonansıdır. (Monserràt ve ark., 2006). Genellikle, rezonans etkileri ile atmosferden denize enerji transferi, güçlü dalgaların

oluşmasında önemli bir faktördür. Aşağıda, üç rezonans etkisi kısaca gözden geçirilmiştir.

- Proudman rezonans: Pattiaratchi ve Wijeratne (2015), Proudman rezonansın tüm dünyada olan meteotsunamilerin ana nedeni olarak tahmin edildiğini belirtmiştir. Atmosferik basınç hareket hızı, V , okyanus dalgası hızı, c , ile denk olduğunda Proudman rezonans oluşur ($V = c$).
- Greenspan rezonans: Proudman rezonansa benzerlik gösteren Greenspan rezonansa kıyı boyunca atmosferik basınç hızı (V_l), kenar dalgaların j . modunun ilerleme faz hızı (c_j) birbirine çok yakındır.
- Şelf rezonans: Atmosferik kaynaklı okyanus dalgalarının dalga boyları veya periyotları ile şelf bölgesinin rezonansları eşitlik gösterdiğinde, şelf rezonansı gözlemlenir.

2.4 Fırtına Kabarması Konusundaki Çalışmalar

Fırtına kabarması su kütlesi üzerinde rüzgâr ve basınç alanları tarafından tetiklenen su seviyesindeki artıştır. Rüzgâr etkisiyle kabarma, dalga etkisiyle kabarma ve ters barometre etkisi ile oluşur. Su kütlesi üzerindeki atmosfer basıncı düştüğü zaman kütle üzerine uygulanan düşey kuvvette de azalma olur. Bu barometrik değişime uyum sağlamak için su yüzeyinde yükselme meydana gelir ve buna da ters barometre etkisi denir. Atmosfer basıncındaki 1 mb'lık düşüş su seviyesinde 1 cm'lik artışa neden olur. Su seviyesindeki bu ayarlama suyun alçak basınç alanına doğru ilerlemesinde bir kısıtlama olmadığı durumlarda meydana gelir. Bu yüzden su derinliğinin bir önem taşımadığı açık okyanuslarda görülür (Schwartz, 2005).

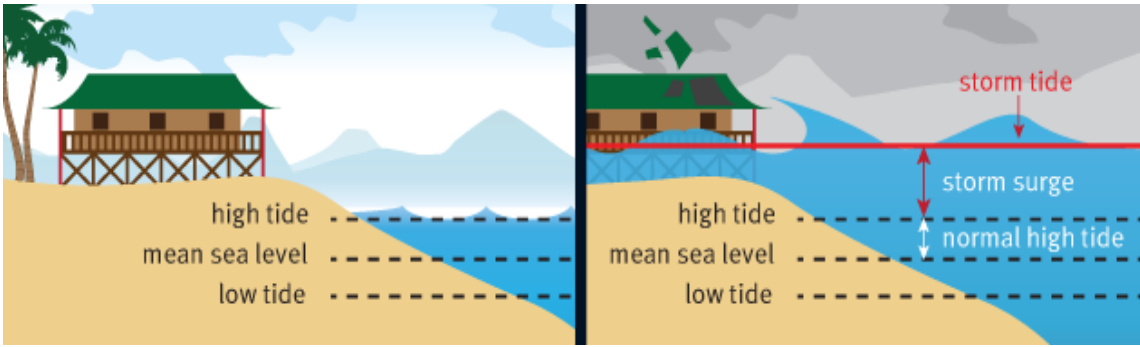
Atmosferdeki basınç farklılıkları rüzgârların oluşmasını sağladığından bu barometrik etki tümüyle doğada nadiren görülmektedir. Fırtına kabarması oluşumundaki bir diğer itici güç ise su ve üzerinde esen rüzgârın etkileşimi sonucu su yüzeyinde oluşan kesme gerilmesidir. Bu etkileşim rüzgârdan suya enerji aktarılmasına neden olup bunun sonucu olarak da su yüzeyinde rüzgâr yönündeki alanda bir artışa (rüzgâr kabarması) neden olur (Schwartz, 2005). Rüzgârın etkisi rüzgâr hızına, su derinliğine ve rüzgârın yönüne bağlıdır. Rüzgâr ne kadar güçlüyse su yüzeyinde oluşan kesme gerilmesi de o kadar büyük olur. Bu da su seviyesinde daha yüksek bir artış gözlemlenmesine yol açar. Rüzgâr etkisi su derinliği ile ters orantılı olarak da artar. Buna ek olarak rüzgâr yönü de oldukça önemli bir faktördür. Kıyı şeridinde doğru esen kuvvetli bir rüzgâr kıyıya paralel olarak esen rüzgârlardan daha yüksek bir kabarma yaratmaya eğilimlidir.

Barometrik etki ve rüzgâr kabarmasına ek olarak dalga kabarması da yakın kıyıdaki

ortalama su seviyesi üzerinde yüksek etkisi olan fırtına kabarmasını oluşturan önemli bir süreçtir. Dalgalar derin denizden kıyıya doğru ilerlerken kırılma noktalarına kadar dikleşirler ve sığ sudaki taban etkisi nedeni ile enerjilerini kaybederler. Enerjideki bu kayıp gerilme akısında (dalgaların bulunmasından ötürü oluşan aşırı momentum akımı) da azalmaya yol açar (Longuett-Higgins and Stewart, 1964). Gerilme akısındaki değişim su kolonu üzerinde kıyıya doğru pozitif bir kuvvet yaratır. Böylece ortalama su seviyesinde artış meydana gelir.

Buna ek olarak fırtına oluşumunun zamanlaması da su seviyesinin yükselmesinde hayati bir öneme sahiptir. Eğer fırtına gelgit kabarmasıyla eş zamanlı meydana gelirse sonuçlar çok daha fazla yıkıcı olabilir.

Meteorolojik süreçlerin yanında fırtına sırasındaki kabarma davranışını etkileyen batimetri ve kıyı özellikleri gibi başka faktörler de vardır. Alçak eğime sahip bir kıta sahanlığı dik eğimli bir deniz tabanından daha yüksek bir kabarma seviyesine neden olur. Kıyı özellikleri ve dalgakıranlar gibi doğal olmayan yapılar da su akışını etkiler.



Şekil 2.3. Fırtına ile Deniz Kabarması ve Çekilmesi

2.5 Fırtına ile oluşan Çevrim Modelleri

Karmaşık fiziksel işlemler fırtına kabarmasını çalışmak için etkili bir nümerik model kullanmayı ihtiyaç haline getirmiştir. Bu amaçla kamu kuruluşları ya da akademisyenler tarafından değişik nümerik modeller kullanılmaktadır. Bu modellerin çoğu kütle ve momentum korunum denklemlerini çözerek fırtına kabarmalarından oluşan ilgili çevrimi çözümler. Bu modellerden en bilineni ABD'nin Ulusal Hava Servisi tarafından kasırgaların ana karaya ulaşmadan önce yarattıkları kabarma yüksekliklerinin öngörülmesi ve risk altındaki bölgelerde yaşayan insanların güvenli bölgelere tahliyelerinin gerçekleştirilmesi için geliştirilen SLOSH - Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes- modelidir (Jelesnianski et al., 1992). Model aşma ve taşkına izin vermekte fakat rüzgâr dalgalarını içermemektedir.

Princeton Üniversitesi'nden Blumberg ve Mellor (1980) tarafından geliştirilen Princeton

Ocean Model -POM- ise üç boyutlu ilkel bir nümerik okyanus modelidir. Bu model gelgitlerden, yüzey rüzgâr gerilmelerinden, çıkan-giren akışlardan, ısı/tuz akışlarından ve giren akış sınırlarındaki yüzey su seviyesinden tetiklenebilir.

İslenme ve kuruma şemaları Xie vd. (2004) tarafından POM'a eklendi. Böylece program 2 ve 3. Kategoriler altında varsayılan kasırga olaylarının etkisindeki Kuzey Carolina'nın doğusunda bulunan Croatane-Albemarle-Pamlico ırmak ağzı sisteminde gerçekleşen fırtına kabarması ve sel basmasını (Peng, Xie & Pietrafesa, 2006) ve Güney Carolina'da bulunan Charleston Limanında'ki Hugo Kasırgası'nı modellemek (Peng, 2006) amacıyla kullanıldı.

CH3D -Curvilinear Hydrodynamics in 3D- sonlu hacim metodunu kullanarak limitlere oturtulmuş eğrisel gridler yardımı ile su hareketinin üç boyutlu hidrostatik denklemlerini çözer. Bu model Sheng (1986, 1990) tarafından geliştirilmiş ve ıslenme ve kuruma hesaplamaları sonradan eklenmiştir (Sheng vd., 2002).

FVCOM - The Unstructured Grid Finite Volume Community Ocean Model- ise sonlu hacim modeli olup yapılandırılmamış gridler üzerinde çalışarak ilkel denklemleri çözer. Kıyı çevrimi ve ırmak ağzı ıslenme-kuruma prosesleri için ortak bir çaba sonucu UMASSD-WHOI tarafından geliştirilmiştir. Bu modelin uygulanış örnekleri Charley Kasırgası kapsamında incelenen Kuzey Captiva Adası çalışmasında (Weisberg ve Zheng, 2005) ve Tampa Koyu'ndaki varsayımsal kasırgalar üzerine hazırlanan çalışmada (Weisberg ve Zheng, 2006) mevcuttur.

ADCIRC -Advanced Circulation Model for oceanic, coastal and estuarine waters- (Luettich vd., 1992) sirkülasyon ve kabarma problemlerini modellemede 20 yıldan fazla bir süredir kullanılan, yapılandırılmamış gridler üzerinde akışkan hareketi denklemlerini çözen bir modeldir. Larva taşınım çalışmaları, tarama analizleri ve yakın kıyı deniz operasyonları gibi alanlarda da kullanılabilir. Modelin hem 2 hem de 3 boyutlu sürümleri mevcuttur. 2 boyutlu olan sürümünde derinlik katkılı sığ su denklemlerini çözülebilmektedir. ADCIRC hakkında detaylı bilgi Bölüm 3'te verilmiştir.

2.6 Birleştirilmiş Modeller

Fırtına kabarmaları enerji spektrumunda rüzgârla oluşan ve periyotları en fazla 25 saniye olan dalgalardan ayrılmış olsa da, birbirleri ile etkileşimde bulunabilirler. Su seviyeleri dalga transformasyonu yüzünden oluşan gerilme akısı eğiminden etkilenirler. Zemin sürtünmesi ise sığ sudaki dalga hareketinden etkilenir. Bunun yanı sıra dalgalar deniz yüzeyi pürüzlülüğünü değiştirir ve buna karşılık olarak kabarma oluşumu etkilenir. Kabarma ve dalgaların bu etkileşimi yüzünden kıyı taşkın çalışmalarında bu iki olayın da göz önünde bulundurulması gerekir.

Liu vd. (2006) okyanus dalgalarının fırtına kabarması ve kıyı sel baskınları üzerindeki etkisini POM ve SWAN modellerini kullanarak incelemişlerdir. Yazarlar 1980 yılında Charleston Limanı'nı etkileyen Hugo Kasırgası'nı farklı birleştirilmiş mekanizmalar ve karşılaştırılmış sonuçlarla 5 durum için modellemişlerdir. Durumlar şu şekildedir: Durum 1 hiçbir dalga etkisi içermemektedir, Durum 2 sadece dalga kaynaklı yüzey gerilmesi içermektedir, Durum 3 sadece dalga kaynaklı taban gerilmesi içermektedir, Durum 4 sadece gerilme akısı gözetmektedir ve son olarak Durum 5 yukarıda bahsedilen bütün etkileri içermektedir. Sonuçların karşılaştırılması neticesinde 3 dalga etkisi arasından, dalga kaynaklı gerilme, gerilme akısı tarafından takip edilen sel basması üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Bunun yanı sıra, bu etki bütün alan içerisinde aynı değildir. Yüzey gerilmesi yüzünden yönleri değiştirilen yüzey akıntıları bazı yerlerde artmış bazı yerlerde ise azalmıştır.

Sun vd. (2013) 1991 yılında gerçekleşen Bob Kasırgası'nda tecrübe edilen fırtına kabarmasını incelemek amacıyla FVCOM ve SWAVE birleştirilmiş modelleri kullanılmıştır. Akıntı dalga etkileşiminin maksimum su seviyesi üzerindeki etkisinin mekânsal ve geçici olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca daha küçük alanlar için çalışılan modeller göstermiştir ki birleştirilmiş etkiler net maksimum akışı %14 oranında arttırmaktadır.

Sheng vd. (2010) birleştirilmiş CH3D ve SWAN modelinin çalıştırdığı lokal simülasyonlar için sınır koşulları sağlayan bölgesel simülasyonlar için ADCIRC ve Wavewatch III birleştirilmiş modellerini kullanarak bir modelleme sistemi geliştirmişlerdir. Hiçbir dalga etkisinin dâhil edilmediği simülasyonlarla karşılaştırıldığında, dalga etkisinin dâhil edildiği simülasyonlarda kabarma yüksekliğinin en büyük değerinin %20 oranda artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca maksimum su basma alanının çok daha geniş olacağına karar verilmiştir. Yazarlar ayrıca 2D ve 3D simülasyonların sonuçlarını karşılaştırmışlar ve hesaplanan en yüksek kabarma yükseklikleri arasındaki farkın %15'ten az olduğunu, 3D simülasyonlardan nispeten daha yüksek kabarma yüksekliği elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

1997 yılında Kore'nin batı kıyısında, Winnie Tayfun'u sırasında sadece fırtına kabarmasına atfedilemeyecek olağandışı bir kıyı taşkını meydana gelmiştir. Bu olay POM ve Wavewatch II arasında iki yönlü birleştirilmiş bir sistem kullanılarak Moon vd. (2003) tarafından incelenmiştir. Yazarlar tarafından varılan sonuca göre bu beklenmedik kıyı taşkınının ana nedenleri arasında fırtına kabarmasından ziyade artan gel-git zorlaması, Sarı Deniz'e taşınan su kütlesi ve denizin rezonans bağlaşımı ve gel-git olayları yer almaktadır.

Niedoroda vd. (2010) farklı modeller kullanarak farklı prosesleri yakalamak için Mississippi kıyılarındaki fırtına kabarmasını çalışmışlardır. Yazarlar derin deniz için WAM -Wave Action Model- modelini, dalgalar için kıyı sularında ince aralıklı ağ ile birlikte SWAN modelini ve fırtına kabarması simülasyonu için ADCIRC modelini uygulamışlardır. Çalışma 2 aşamada yürütülmüştür. Öncelikle ADCIRC modeli daha büyük aralıklarla oluşturulmuş ağ kullanılarak ve dalga etkisi olmadan çalıştırılmıştır ve sonuçta oluşan su yükseklikleri WAM için tedarik

edilmiştir. WAM simülasyonlarıyla dalga davranışı ve gerilme akısı eğimleri elde edilmiş ve bunlar sonradan SWAN işletimi için lazım olan sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, SWAN simülasyonundan tahmini elde edilen gerilme akıları daha yüksek çözünürlükte gride sahip olan ADCIRC yürütümü için kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların yanında ADCIRC ve SWAN modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiş daha başka birçok birleştirilmiş çalışmalar mevcuttur. İlerleyen bölümde bu çalışmalardan bazıları tanıtılmıştır.

Bender vd. (2010) Güney Karolina Kabarma Çalışması (SCSS) projesinin bir parçası olan Hugo Kasırgası (1989) ve Ophelia (2005) için su seviyesi yükseklikleri ve dalga boyu çalışmasında ADCIRC+SWAN birleştirilmiş modelini uygulamıştır. Takım önceden tanımlanmış Komen parametreleri ve SWAN için üçüncü nesil mod kullanarak birleştirilmiş modeli çalıştırmışlardır. Denizin köpüklenmesi Komen formülasyonu kullanılarak hesaplanmış, önceden tanımlanmış parametreler kırılma sürecini göz önünde bulundurarak kullanılmış ve duyarlılık analizi süresince dalga boyu üzerinde büyük bir etkisi olmayan üçlü dalga etkileşimleri hesaplamalar boyunca kapatılmıştır. Birleştirilmiş modelin her iki kasırga için de ölçülen verilerle doğrulanmasından sonra takım tarafından farklı oluşma olasılıkları ile birlikte durgun su seviyesi hesaplamaları için model uygulanmıştır. Sonuçlar FEMA tarafından Güney Karolina için hazırlanan Sel ve Su Baskını Sigorta Oranı Haritaları'nda kullanılmıştır.

Kerr vd. (2013) hazırladıkları model üzerinde Meksika Körfezi'ndeki Ike Kasırgası (2008) simülasyonu sırasında ağ çözünürlüğü ve sürtünme etkilerini çalışmışlardır. Yazarlar iki yapılandırılmamış ağ, 826,866 adet üçgen elemanlar içeren ve 'ULLR' şeklinde adlandırılan daha büyükçe bir ağ ve 18,300,169 elemandan oluşan (SL18TX33) daha küçük aralıklara sahip bir ağ kullanmışlardır. Bu çalışma ortaya çıkarmıştır ki derin deniz su seviyeleri her iki ağ için de benzerdir. Fakat denizden uzak iç kısımlara doğru olan yerlerde daha ince aralıklara sahip olan SL18TX33 ağı kabarma yayılımını yakalamada daha başarılıdır. Buna rağmen uzun ve devamlı rüzgârların etkisi altında su seviyeleri incelendiğinde ağ boyutu fazla bir fark yaratmamıştır.

Sebastian vd. (2014) Galveston Körfezi'ndeki Ike Kasırgası (2008) için fırtına kabarmasını araştıran bir modelleme yapmışlar ve modelin doğrulanmasından sonra fırtına kabarmasını yapay fırtınalar için analiz etmişlerdir. Çalışmaları boyunca yazarlar Galveston Körfezi'nin içinde ve çevresinde oluşan rüzgâr hızlarındaki %15 artış oranının su seviyesinde %23'lük bir artışa neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kennedy vd. (2012) Hawaii Adaları Oahu ve Kauai için varsayımsal kasırga senaryolarından oluşacak su basma riskini çalışmışlardır. ADCIRC+SWAN simülasyonlarından sonra yazarlar dalga tırmanması sürecini saptamak için BOUSS1D modelini uygulamışlardır. Çalışmanın sonuçları göstermiştir ki kıta sahanlığı yokluğu ve

volkanik adaların dik yamaçlarının bulunuşu fırtına kabarma yüksekliğinde düşüşe neden olmuştur. Bununla birlikte bu tip batimetri yakın kıyıda daha yüksek dalga boylarına sebep olmuş, dalga tırmanması ve dalga etkisinde oluşan su kabarması kıyı su basmasında ana faktörler haline gelmiştir.

Bashkaran vd. (2014) Bengal Körfezi'ndeki Thane Kasırgası'nın (2011) yarattığı kıyı su basmasını incelemiş ve belirlenen 40 lokasyon için gözlemler ile hesaplanan sonuçları karşılaştırmıştır. Model sonuçlarının gözlem sonuçlarıyla iyi bir uyum yakaladığı görülmüştür. Düz kumsala sahip bazı yerler için hesaplanan su basma sonuçlarının azımsanması yazarlar tarafından GEBCO batimetrik verisinin yakın kıyı bölgelerindeki kalitesine atfedilmiştir. Sonuçlar ayrıca göstermiştir ki su basma mesafesi kumsal eğimi arttıkça azalmaktadır.

2.7 Karadeniz ile İlgili Çalışmalar

Bu kısımda Karadeniz bölgesi üzerinde yapılan çalışmalar tanıtılacaktır. İlk olarak Vledder ve Akpınar Karadeniz'de rüzgâr verisi kaynağıyla SWAN modelinin hassasiyetini çalışmışlardır. NASA MERRA, NCEP CSFR, JRA-25, ECMWF Operational, ECMWF ERA-Interim ve ECMWF ERA40'tan alınan veriler kullanılmıştır. NATO TU-WAVES projesinden elde edilen dalga verisi ile SWAN ile hesaplanan dalgaları karşılaştırılmıştır. Sonuçları karşılaştırırken yazarlar JRA-25 girdilerinin SWAN dalga tahmini için en kötü performansı gösterdiği ve CSFR verilerinin ise bütün karşılaştırılan rüzgâr girdileri içerisinde en iyi değerleri verdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Kuznetsov vd. 1996 ve 2003 yılları arasında şamandıra tipi ölçümlerden kaydedilen rüzgâr verilerine dayanarak Karadeniz'in Gelendzhik alanında (kuzeybatı kısmı) uç değerli dalgaları ve bunların oluşumlarını incelemişlerdir. Yazarlar 2003'teki en büyük dalgaların maksimum ortalamasının 11 metre yüksekliğe sahip olduğu fırtınalar için bir frekans spektrumu derlemişlerdir. Spektrum asıl maksimumun yanında 2 adet yatay uca sahiptir. Bunlar dalgalar derin denizde ise lineer olmayan kararsızlığa atfedilmiştir. Farklı frekanslardaki dalgacıkların incelenmesi sonucunda yazarlar uç değerli dalgaların bu farklı frekanslardaki dalgacıkların maksimumlarının kesişmesiyle ortaya çıktıkları sonucuna varmıştır.

Son olarak, Rusu ve Butunoiu Karadeniz'de Danube deltası yanında bulunan Sacalin Adası çevresindeki dalga ilerlemesini Danube Nehri'nden akan su miktarını da içeren SWAN dalga modeli kullanarak çalışmışlardır. Alanda iki modelin etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Birinci ve baskın olan yapıcı süreç olarak tanımlanmıştır. Bu süreçte kuzeydoğudan %50 oranında gelen dalgayı temsil etmektedir. Bu model nehir girdisi ile birleşmektedir ve sediment taşınımı Sacalin Adası'nın güneydoğu kısmındaki genişlemeyi kontrol etmektedir. Yıkıcı süreç olarak adlandırılan ikinci modelde dalgalar güneydoğu yönünden gelmektedir. Bu modelin daha az görülmesine rağmen, güneydoğudan gelen dalgaların daha güçlü olduğu ve yıkıcı sediment

birikimi riski taşıdığı görülmektedir.

Sonuç olarak çeşitli çalışmalar yapılmasına rağmen Karadeniz'deki fırtına olayları süresince karşılaşılan kıyı taşkını ile ilişkili olarak yapılmış fazla araştırma bulunmamaktadır. Bu konuda kapsamlı bir çalışmaya ihtiyaç olması bu çalışma için önemli bir motive kaynağı olmuştur.

2.8 Proje İçinde Fırtına Kabarması Konusunda Kullanılan Sayısal Modeller

Bu bölümde, kullanılan bütün sayısal modellerin deniz seviyesi yüksekliğine etki eden faktörler hakkında temel bilgiler eşliğinde teorik temeli tanımlanmıştır. İlk önce ADCIRC için formülasyon tanıtılmış, ardından SWAN modeline geçilmiştir. Daha sonra bu iki modelin birleştirilmiş hali tanıtılmış ve son olarak da NAMI-DANCE modelinin teorik temeli sunulmuştur.

2.8.1 ADCIRC

ADCIRC hesaplamaları aşağıda gösterilen (Denklemler 2.11-12&13) ilkel süreklilik denklemi ve korunumlu olmayan momentum denklemleri ile yönetilmektedir.

ilkel süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UZ}{\partial x} + \frac{\partial VZ}{\partial y} = 0 \quad (2.11)$$

korunumlu olmayan momentum denklemleri:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = \quad (2.12)$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \Upsilon) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 Z} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 Z} + D_x - B_x$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU = \quad (2.13)$$

$$- \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \Upsilon) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 Z} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 Z} + D_y - B_y$$

ADCIRC'ün iki boyutlu derinlik katkılı (2DDI) versiyonu Genel Dalga Süreklilik Denklemi'ni (GWCE) momentum denklemleriyle (Denklem 2.12 ve 2.13) birlikte çözmektedir. GWCE denklemi ilkel süreklilik denkleminin zaman türevinin alınması ve yine bu denklemin τ_0 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. GWCE denkleminin biçimi aşağıda gösterilmiştir (Denklem 2.14).

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} - UZ \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VZ \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

Yukarıdaki denklemde τ_0 , GWCE içerisindeki süreklilik denkleminin dalga biçimlerine karşı ilkel denklemin katsayısı olarak kullanılan mekânsal olarak değişen sayısal bir parametredir. Bu değer 0'a yaklaştıkça denklem salt dalga denklemine dönüşür ve sonsuza gittikçe de denklem ilkel süreklilik denklemi haline gelir.

A_x ve A_y aşağıdaki gibidir (Denklem 2.15):

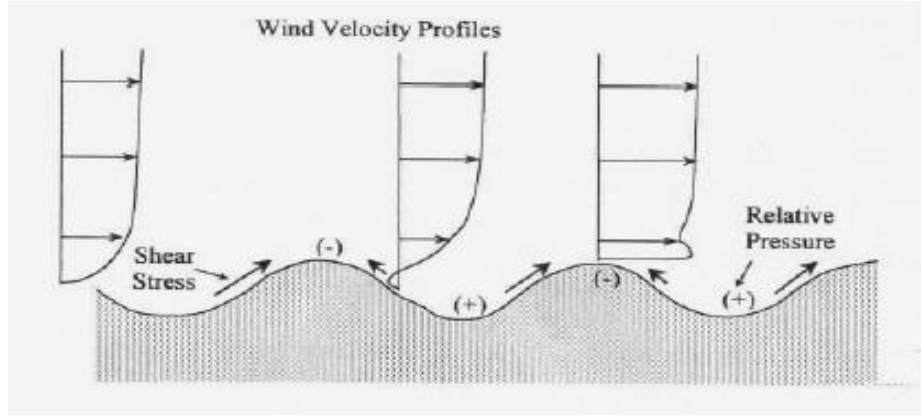
$$A_x \equiv \frac{\partial UZ}{\partial t} + \tau_0 UZ$$

$$A_y \equiv \frac{\partial VZ}{\partial t} + \tau_0 VZ \quad (2.15)$$

2.8.1.1 Yüzey Gerilmesi

Rüzgâr su üzerinden estiği zaman, su yüzeyinde karışıklık yaratır ve en sonunda dalga oluşumuna sebep olur. Rüzgârdan suya transfer olan enerji sonucu oluşan kesme gerilmesi suyun dalga tepesine doğru ilerlemesine neden olur. Dalga formu tepe noktasında negatif etkili basıncın oluşmasına yol açar ve bu da tepe noktasının yükselmesine neden olur. Aynı

şekilde dalga çukurunda ise pozitif etkili basınç oluşur ve bu da çukurun daha fazla aşağı itilmesini sağlar.



Şekil 2.4. Rüzgâr enerji transferi (Kamphuis, 2000)

Rüzgârdan suya transfer olan momentum aşağıda belirtildiği üzere etkileşim yüzeyinde oluşan gerilme ile tanımlanır (Denklem 2.16):

$$\tau = \rho C_d U_{10}^2 \quad (2.16)$$

Yukarıdaki denklemde U_{10} , 10 metre yükseklikteki rüzgâr hızını ve C_d de rüzgâr sürüklenme katsayısını temsil etmektedir. Rüzgâr sürüklenme katsayısının deneysel saptaması amacıyla aşağıda Garrat (1977) tarafından önerilen ilişki ADCIRC hesaplamalarına dâhil edilmiştir (Denklem 2.17).

$$C_d = (0.75 + 0.067U_{10}) \times 10^{-3} \quad (2.17)$$

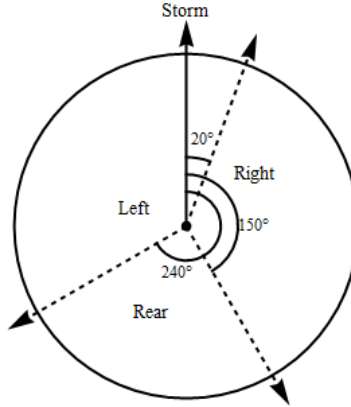
Wu (1982) tarafından önerilen ilişki ise aşağıda Denklem 2.18'de gösterilmiştir.

$$C_d = (0.8 + 0.065U_{10}) \times 10^{-3} \quad (2.18)$$

Garrat ve Wu'nun önerdiği formüller birbirine çok yakındır. Bu formüller göstermiştir ki sürüklenme katsayısı ve dolayısıyla dalgaların varlığından kaynaklanan yüzey gerilmesi de artan rüzgâr hızı ile birlikte artmaktadır.

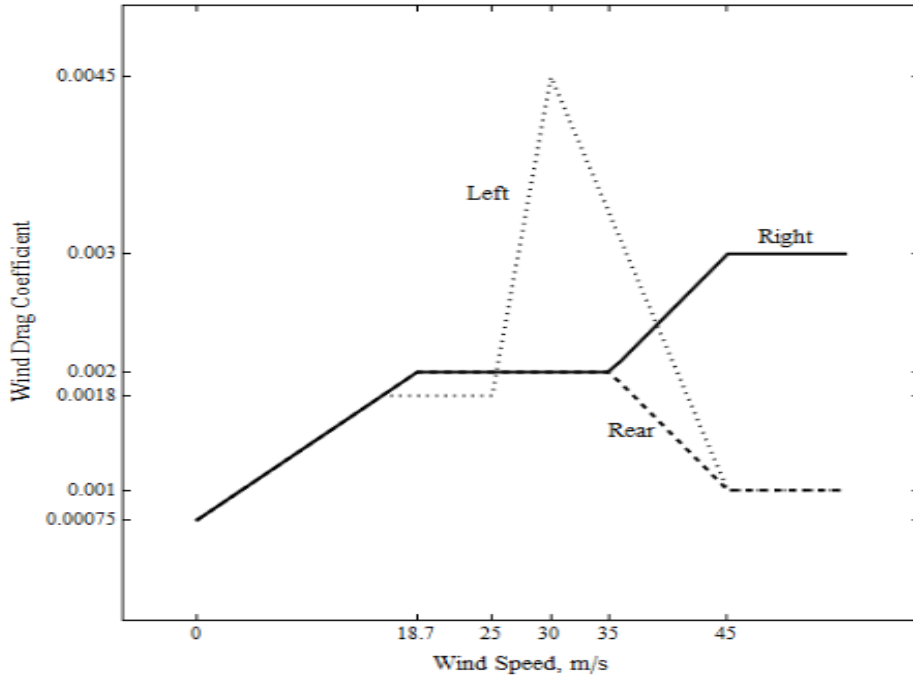
Doğada rüzgâr ve dalga yönleri her zaman aynı olmadığından rüzgâr hızının yanında dalga yönü de rüzgâr sürüklemesini etkiler. Black vd. (2007) dalga yönü ve rüzgâr sürüklemesi

arasındaki bu ilişkiyi dalga karakteristiklerini gözeterek fırtınayı 3 bölüme ayırmış ve incelemişlerdir: sağ ve arka bölümler dalganın rüzgârla hareket ettiğini içermekte. sağ bölümde daha uzun dalga boyları gözlemlenirken arka bölümdeki dalga boyları daha kısa olmakta. Fakat en uzun dalga boylarının var olduğu sol bölümde dalgalar rüzgâr yönüne karşı hareket etmektedir.



Şekil 2.5. Arka bölüm (fırtına hareketi vektörüne göre 151-240 derece) 2) Sağ bölüm (21-150 derece) , ve 3) Sol ön bölüm (241- 020 derece)

Önerilen ilişkide görülmektedir ki arka ve sağ bölümler için olan C_d değerleri rüzgâr hızının 35 m/s'nin altında olduğu durumlarda neredeyse aynıdır. Daha yüksek rüzgârlarda sağ bölümdeki sürükleme katsayısının yükseldiği gözlemlenirken hem sol hem de arka bölümler için sürükleme katsayısı düşmektedir.



Şekil 2.6. Rüzgâr sürüklenme katsayıları

2.8.1.2 Taban Gerilmesi

ADCIRC'ün 2DDI versiyonunda taban gerilmesi aşağıdaki gibi birleştirilmiştir (Luettich ve Westerink, 2004).

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_0} = K_{slip} U \quad (2.19)$$

Bu model taban gerilmesinin değerlendirilmesi için 3 farklı yaklaşım sunmaktadır: i) doğrusal ii) ikinci dereceden ve iii) ortalaması alınmış su hızı derinlik karma fonksiyonları.

Doğrusal yaklaşımda sürüklenme katsayısı K_{slip} kullanıcı tarafından belirlenmekte olan zamanla değişmeyen ama çalışılan alan içinde değişiklik gösterebilen ve model girdisi olarak okunan bir değerdir. İkinci dereceden olan yaklaşım ise çoğu kıyasal uygulamada önerilen K_{slip} değerinin hız büyüklüğü ve sürüklenme katsayısına bağlı olan ve önerilen C_d değerinin 0,0025 olduğu bir yaklaşımdır.

$$K_{slip} = C_d \sqrt{U^2 + V^2} \quad (2.20)$$

Üçüncü olarak karma taban sürtünme yaklaşımı kullanıcının kırılma derinliği $-H_{break}$ -, f_{min} , θ ve γ değerlerini girmesini gerektirmekte ve su derinliğine bağlı olarak sürüklenme

katsayısını hesaplamaktadır.

$$C_d = C_{fmin} \left[1 + \left(\frac{Z_{break}}{Z} \right)^\alpha \right]^{\gamma/\alpha} \quad (2.21)$$

Üstel α terimi derinlik arttıkça veya azaldıkça C_d değerinin ne kadar hızlı bir şekilde limitlerine ulaştığını belirler. Üstel γ terimi ise derinlik arttıkça sürtünme katsayısının nasıl arttığını ölçeklendirir. Su kütlesinin kalınlığının kırılma derinliğinden daha büyük olduğu derin denizde ($Z \gg Z_{break}$), C_d değeri kullanıcının belirlediği C_{fmin} değerine yaklaşır.

Önerilen değerler şu şekildedir:

$$\begin{aligned} C_{fmin} &= 0.0025 & Z_{break} &= 1.0m \\ \alpha &= 10 & \gamma &= 1/3 \end{aligned}$$

2.8.2 Simulating WAVes Nearshore (SWAN)

Simulating WAVes Nearshore (SWAN) dalga tahmin çalışmalarında 3. nesil dalga modeli olan sayısal modeli olarak kullanılmaktadır. Söz konusu program Delft Teknoloji Üniversitesi tarafından geliştirilmiş rüzgâr kaynaklı dalgaların oluşumunun ve kıyıya taşınımının modellenmesi için kullanılan ve tüm dünyada geçerliliğe sahip bir yazılımdır.

Başka bir deyişle, SWAN dalga modeli rüzgâr vasıtası ile oluşan dalgaların yakın kıyıda dalgalar ve akıntı parametrelerinin tahmininde kullanılan yazılımdır. Dalga parametreleri yüksek çözünürlüklü grid kullanarak hesaplanmaktadır. SWAN modellemesi her bir grid noktasında dalga istatistiği bilgileri kullanarak enerji yoğunluklu spektrumu hesaplamaktadır. Taban topoğrafyası, rüzgâr ve akıntı koşulları kullanıcı tarafından SWAN modeline girdi olarak verilmektedir. Simülasyonlar kartezyen veya küresel koordinat sistemlerini kullanarak yapılmaktadır.

2.8.2.1 SWAN programında kullanılan genel denklemler

Düzensiz deniz durumu enerji yoğunluğu $E(\sigma, \theta)$ ile temsil edilebilir. Enerji yoğunluğu $E(\sigma, \theta)$ frekans (σ) ve yönsel (θ) parametreler ile gösterilir. Ancak, dalga enerjisi korunmamakla birlikte dalga ilerlemesi devam etmektedir. Bu nedenle, spektral dalga modelleri birim frekandaki enerji yoğunluğu $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta)$ mekân \vec{x} ve zaman t üzerinde belirlenerek $N=E/\sigma$ denklemi ile gösterilmektedir. SWAN kıyı bölgesinde dalga denge denklemlerini çözerek kısa periyoda sahip düzensiz rüzgâr dalgalarını hesaplamaktadır (Denklem 2.22).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2.22)$$

Denklem 2.22’de ilk terim birim frekanstaki enerji yoğunluğunun zamansal değişimini göstermektedir. İkinci ve üçüncü terim x ve y koordinatları boyunca dalganın ilerleme hızlarını göstermektedir. Dördüncü terim derinliğin ve akıntının değişmesi ile frekanstaki değişmeyi göstermektedir. Beşinci terim ise dalga sapmasını temsil etmektedir. Stot kayıpların ve kaynakların toplamını ifade etmektedir. Aynı zamanda bu terim enerji kaybı veya dalga enerjisinin yeniden dağılımını göstermektedir. Rüzgâr tarafından üretilen dalgalar, üçlü ve dördü dalgâ etkileşimi, taban sürtünmesi ve derinlik kısıtlamasından dolayı dalga kırılması SWAN programın da kaynak ve kayıplar ile ifade edilmektedir (Denklem 2.23).

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (2.23)$$

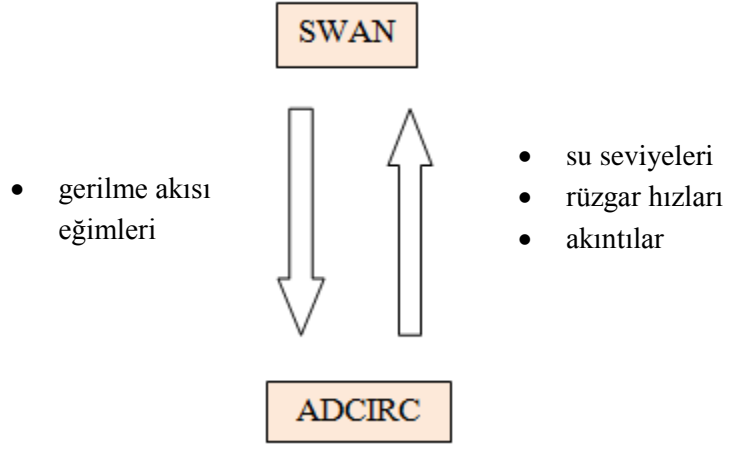
Özet olarak, SWAN dalga modeli sığlaşma, dalga sapması, dalga kırınımı, dalga kırılması, doğrusal olmayan dalga-dalga ve dalga-akıntı etkileşimleri, dalga köpüklenmesi gibi olayları hareket-denge denklemi ile iteratif olarak aynı anda çözmektedir. SWAN modeli kullanıcı tarafından katsayıları belirlenen spektrumları kullanarak belirgin dalga yüksekliği, pik dalga periyodu gibi istatistiksel dalga parametrelerini çıktı olarak verebilmektedir.

2.8.3 ADCIRC – SWAN Birleşim Modeli

Derin denizde toplam su seviyesi hem periyotları 0.5s-25s arasında değişen ya da daha uzun olan rüzgâr dalgaları ve salınım dalgaları gibi kısa dalgalar hem de tsunami dalgaları, periyotları dakikalardan haftalara değişebilen salınım veya gel-git dalgaları gibi uzun dalgalar tarafından belirlenir. Farklı periyottaki dalgaların enerji spektrumunda ayrılmaları onları modellerken farklı yaklaşımlar kullanmayı zorunlu kılmıştır. Bu ayrılmaya rağmen kısa dalgalar ve uzun dalgalar birbirleri ile etkileşimde bulunabilirler. Bu nedenle ADCIRC geliştiricileri aynı yapılandırılmamış ağ üzerinde SWAN modeliyle sıkı sıkıya bağlı bir birleşik modeli etkin hale getirmişlerdir

Simülasyonun ADCIRC kısmı tamamlandığında akıntı birleşim aralığının başlangıç ve bitişi için su seviyeleri, akıntılar ve rüzgâr hızlarına SWAN tarafından erişim sağlanır ve sonrasında bunların ortalaması alınmış halleri gerilme akısı eğimlerini bulmak için kullanılmıştır.

Daha sonra SWAN önceki birleşim aralığı için başlangıç ve bitişteki gerilme akısı eğimlerini ADCIRC’e sağlar. Bunlar sürmekte olan mevcut birleşim aralığı içindeki ADCIRC’ün kendi zaman aralığına karşılık gelen eğimleri tahmin etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2.7. Birleşim mekanizması

3. BASINÇ DEĞİŞİMLERİ İLE OLUŞAN DALGALARIN MODELLEMESİ

213M534 projesi kapsamında atmosferik basınç kaynaklı dalgaların modellenmesinde sayısal model geliştirilmiş ve bu modelin doğruluğu analitik çözümlerle karşılaştırılarak belirlenmiştir. Daha sonra kıyılarda gözlemlenen atmosferik kökenli dalgaların büyüme nedenleri farklı tabanlı batimetrlere farklı basınç hızları kullanılarak test edilip araştırılmıştır.

3.1 Analitik Çözüm

Hidrodinamik bir model, su hareketini tanımlamak için kullanılır ve birçok denklem içerir. Atmosferik basınç bozuklukları tarafından oluşan uzun periyotlu dalgalar ideal bir akışkan için Euler denklemlerine dayanarak modellenebilir. Aşağıdaki denklemlerde, Euler denklemleri okyanus tabanı ve yüzeyindeki ilgili sınır koşulları için verilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u\nabla)u + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \nabla p = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + (u\nabla)w + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad (3.2)$$

$$\nabla u + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

Burada, u ve w hızın yatay ve dikey bileşenleri, ρ suyun yoğunluğu, p basınç, g yer çekimi ivmesi, $h(x,y)$ okyanus derinliğinin değişimi. Ayrıca, x ve y koordinatları yatay düzlemde, z koordinatı yukarı dik olarak uzanmaktadır. Katı deniz tabanında ($z=-h(x,y)$),

$$w - (u\nabla)h = 0. \quad (3.4)$$

Serbest yüzeyde ($z=\eta(x,y,t)$), (burada $\eta(x,y,t)$ su seviyesi) kinematik durum,

$$w = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + (u\nabla)\eta \quad (3.5)$$

Ve dinamik durum,

$$p = p_{atm}(x, y, t). \quad (3.6)$$

Sığ su teorisinde, birincil varsayım dikey hız ve ivme yatay olanlar ile karşılaştırıldığında küçük olmasıdır. Bu nedenle, denklem (3.2)'de, dikey ivme terimi ($\frac{\partial w}{\partial t}$) ihmal edilebilir ve denklem (3.2) ve (3.6) entegre edilerek, hidrostatik basınç elde edilir.

$$p = p_{atm} + \rho g(\eta - z). \quad (3.7)$$

Daha sonra, denklem (3.1) ve (3.7)'yi beraber çözerek ve dikey ivme terimini bir kez daha yok sayarsak, ilk sığ su denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (u \nabla)u + \rho \nabla \eta = -\frac{\nabla p_{atm}}{\rho} \quad (3.8)$$

Denklem (3.3)'ün sert tabandan serbest yüzeye entegre edilmesi bize ikinci sığ su denklemini verir,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla[(h + \eta)u] = 0. \quad (3.9)$$

Denklemler (3.8 ve 3.9) doğrusal ve homojen değildir. Bu denklemlerin doğrusal hali aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \nabla \eta = -\frac{\nabla p_{atm}}{\rho} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla[hu] = 0 \quad (3.11)$$

Bu denklemlerden hız (u) terimini attığımızda su seviyesini hesaplayan denklem (3.12)'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \nabla(c^2 \nabla \eta) = \nabla \left(\frac{h \nabla p_{atm}}{\rho} \right), \quad (3.12)$$

Burada uzun periyotlu dalganın ilerleme hızı şu şekildedir:

$$c(x, y) = \sqrt{gh(x, y)}. \quad (3.13)$$

Denklem (3.12) atmosferik basınç bozuklukları nedeniyle oluşan uzun periyotlu dalgaların doğrusal hidrodinamik modelini temsil etmektedir. Sabit derinlik için, denklem tipik dalga denklemine indirgenir.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \eta = \frac{h \nabla^2 p_{atm}}{\rho}. \quad (3.14)$$

Daha sonra aşağıdaki terimleri kullanarak (3.15),

$$\eta = \zeta - \zeta_a, \quad \zeta_a = \frac{h p_{atm}}{\rho c^2} \quad (3.15)$$

Denklem (3.14) farklı bir formatta yazılır,

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \zeta = \frac{\partial^2 \zeta_a}{\partial t^2}. \quad (3.16)$$

Atmosferik basınç bozunumları sırasında denklem (3.16)'nın çözümü çok önemli olmamakla beraber, su seviyesi şu şekilde ifade edilir,

$$\eta = -\zeta_a = -\frac{h p_{atm}}{\rho c^2}. \quad (3.17)$$

Bu ilişki (denklem (3.17)) ters barometrik etki olarak da isimlendirilir. Yani, düşük atmosfer

basıncı ortalama deniz seviyesindeki yükselmeye, yüksek atmosferik basınç deniz seviyesinde düşüşe neden olabilir. Eğer basınç hareket ediyorsa, basınç hızı ve dalga hızı arasında rezonans görülebilir. Sabit bir hızla x yönünde ilerleyen tek boyutlu bir basınç modeli düşünersek, denklem (3.14)'ün çözümü şu şekilde olur,

$$\eta(x, t) = \frac{c^2}{V^2 - c^2} \zeta_a(x - Vt) - \frac{c}{2(V+c)} \zeta_a(x - ct) + \frac{c}{2(V+c)} \zeta_a(x + ct). \quad (3.18)$$

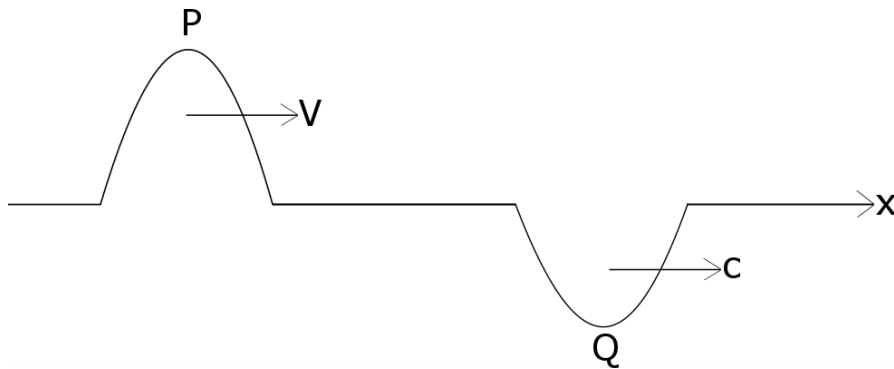
Denklem (3.18), denklem (3.19)'da gösterilen başlangıç koşullarını sağlar.

$$\eta = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (3.19)$$

Denklem (3.18)'in çözümü, bir sınırlı ve iki serbest dalganın üst üste gelmesidir. Sınırlı dalga basınçla birlikte hareket ederken, iki serbest dalga bağımsız hareket eder. Büyük hızın olduğu koşulda ($V \rightarrow \infty$), su seviyesi düşüktür ($\eta \approx c^2 \zeta_a / V^2$) ve eğer basınç hızı yeterince düşükse ($V \rightarrow 0$), su seviyesi neredeyse durgundur. Diğer taraftan, basınç hızı ve dalga hızı eşitliği halinde, orada özel durum (rezonans) oluşur ve en yüksek dalga yüksekliği görülmektedir. Ve denklem (3.18) basitleştirilirse, analitik sonuç denklem (3.20) ile ifade edilir.

$$\frac{Q}{P} = \frac{V^2 - c^2}{2(V-c)c} = \frac{V+c}{2c}. \quad (3.20)$$

Arka dalga (P) ve ön dalga genlikleri (Q) oranlanarak sayısal model doğrulanabilir. Daha açıklayıcı olmak için problem geometrisi Şekil 3.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Hareketli sabit atmosferik basınç tarafından oluşturulan uzun periyotlu dalganın yayılmasının genel kesit görünümü

3.2 Sayısal Modelleme

NAMI DANCE, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deniz Mühendisliği Araştırma Merkezi ve Rusya Bilim Akademisi Uygulamalı Fizik Enstitüsü ortak çalışması ile Profesörler Andrey Zaytsev, Ahmet Yalçiner, Anton Chernov, Efim Pelinovsky and Andrey Kurkin tarafından tsunami modellemeleri için geliştirilmiş bir programdır. Tsunami oluşum ve yayılmasının anlaşılması, değerlendirilmesi ve gözlemi için kullanıcıya doğrudan tsunami benzetimi ve etkili animasyonlar yapma olanağı sağlar. C++ programlama dili kullanılarak Leap-frog sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak geliştirilmiştir (Shuto, Goto ve Imamura, 1990) ve tüm gereksinimler için geliştirme modülleri bulunmaktadır. Gerekli tsunami parametrelerine ek olarak, NAMI DANCE seçilen zaman aralıkları için akıntı hızlarını ve yönlerini, çekme ve itme kuvvetlerine göre göreceli hasar düzeylerini hesaplar. Ayrıca, seçilen zaman aralıkları için su düzeyinin değişik kamera ve ışık pozisyonlarında üç boyutlu çizimlerini hazırlayabilir ve tsunami oluşum ve yayılmasının kaynaktan hedefe kadar animasyonunu yapabilir. Bu model tsunami benzetimi esnasında, ilk dalgayı değişik kaynaklardan yaratarak belirli zaman aralıklarındaki su düzeyini oluşturur. NAMI DANCE, tsunamilerin dalga verisi ve akıntı durumları altında herhangi bir batimetride benzetimini ve animasyonunu yapar ve oluşum, yayılma, kıyıda büyüme ve baskın evrelerini görüntüleyebilir. Bu model, araştırma ve kullanım için test edilmiş ve onaylanmıştır. NAMI DANCE, 7 ülkeden fazla yerde çeşitli kuruluşlarda kullanılmaktadır. Daha önce, Hint Okyanusu, Tanzanya, Andaman Denizi, Güney Çin Denizi, Malaka Boğazı, Malezya, Java- Endonezya, Singapur, Sumatra – Endonezya, Akdeniz, Maldivler, Ege Denizi, Marmara Denizi, Karadeniz, Makran, Madagaskar, Fethiye ve Pylos senaryoları, Kenya ve Karayipler için kullanılmıştır.

NAMI DANCE ile yapılan tsunami sayısal modellemeleri, ilk durum ve sınır koşullarına göre, doğrusal olmayan uzun dalga denklemlerinin çözümüne dayanmaktadır. Tsunami uzun dalga denklemlerinin birkaç sayısal çözümü vardır. Genel olarak, makul hesaplama zamanı ve bilgisayar hafızası kullandığı için doğrusal olmayan sığ su denklemlerinin belirli sayısal çözümü kullanılır. Ayrıca sonuçlarındaki hata seviyesi kabul edilebilir düzeydedir. Tsunami modellemesinde en önemli gelişme Prof. Shuto ve Prof. Imamura tarafından TUNAMI-N2'nin geliştirilmesi ve UNESCO çatısı altında tsunami çalışmaları yapan uzmanlara açılması olmuştur (Imamura, 1989; Shuto, Goto, Imamura, 1990; Goto and Ogawa; 1991). TUNAMI-N2 deprem kırılma özelliklerini kullanarak tsunami kaynak özelliklerini belirler. Program tsunamilerin etkilerini daha iyi anlayabilmek için, tsunami dalgalarının sığ sudaki ve baskın alanındaki davranışının gerekli parametrelerini, batimetrik ve topografik duruma göre hesaplar. NAMI DANCE Profesörler Zaytsev, Chernov, Yalçiner, Pelinovsky ve Kurkin tarafından TNUMAI-N2 ile özdeş hesaplama yöntemlerini kullanarak geliştirilmiştir. Tsunami parametrelerinin dışında NAMI DANCE şunları hesaplar: i) Kırılma özellikleri ya da önceden belirlenen dalga durumuna göre tsunami kaynağı, ii) yayılma, iii) varış zamanı, iv) kıyıdaki

büyüme, v) baskın durumu (grid aralıklarının hassasiyetine göre), vi) akım hızları ve yönlerinin seçilen zaman aralıklarındaki dağılımları, vii) su düzeyinin seçilen zaman aralıklarındaki dağılımları, viii) itme ve çekme kuvvetlerine göre göreceli hasar düzeyleri, ix) su yüzeyi dalgalanmalarının zamana göre dağılımları, x) su düzeyinin seçilen zaman aralıklarındaki durumunun istenen kamera ve ışık açılarına göre 3 boyutlu çizimleri, xi) kaynak ve hedef bölgeleri arasındaki tsunami yayılmasının animasyonu (Yalciner et. al., 2006b, 2007b).

Projenin iş paketi 1 kapsamında yapılan çalışmalardan birisi olan, NAMI DANCE sayısal modelinin yeni modüllerle geliştirilmesi, kıstas problemler ile doğrulanması ve çeşitli olaylar için uygulanması, projenin birinci yılının sonunda NAMI DANCE sayısal modeline atmosfer basıncına bağlı olarak su düzeyi değişimlerini çözen bir modül eklenmiştir. Aslında NAMI DANCE tsunami benzetim modellemesi için sıg su denklemlerini çözmektedir. Aslında bu denklemlerin tam biçimi dispersiyon terimi de dâhil olan denklemlerdir. Bu denklemlere Atmosfer basıncı terimi de eklenerek aşağıdaki denklem seti kurulmuştur.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{D}{\rho} \frac{\partial P_{atm}}{\partial x} = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{D}{\rho} \frac{\partial P_{atm}}{\partial y} = 0 \quad (3.23)$$

Burada η su düzeyi, u ve v akım hızları, M ve N, akım hacimleri olup, M ve N aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır.

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(D + \eta) = uD, \quad N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(D + \eta) = vD \quad (3.24)$$

Diğer parametreler, d su derinliği, g yer çekimi ivmesi, ρ suyun yoğunluğu, τ_x ve τ_y ise x ve y yönündeki taban yüzey gerilmesi, D ise ($D=d+\eta$) toplam derinliktir. Taban yüzey gerilmeleri sürtünme kuvveti ile ilişkili olup aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{fn^2}{(\eta+D)^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3.29)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{fn^2}{(\eta+D)^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3.30)$$

Burada f sürtünme katsayısıdır ve Manning katsayısı, n, denklem (3.31) ile hesaplanır.

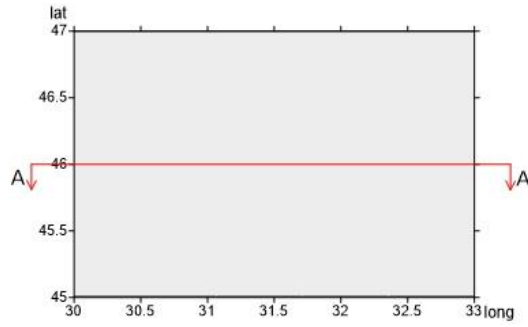
$$n = \sqrt{\frac{f(\eta+D)^{1/3}}{2g}} \quad (3.31)$$

Sayısal modelde, belirtilen batimetri ve ilk deniz seviyesinde, belirli zaman aralıklarında (mevcut verilere göre, tercihen bir saat zaman aralığında) barometrik basınç girdi olarak verilmiştir. Ardından, NAMI DANCE önceki saat ve sonraki saatte girilen basınçlar arasında ilgili basınç değerlerini enterpole ederek her zaman adımında basınç dağılımını hesaplar.

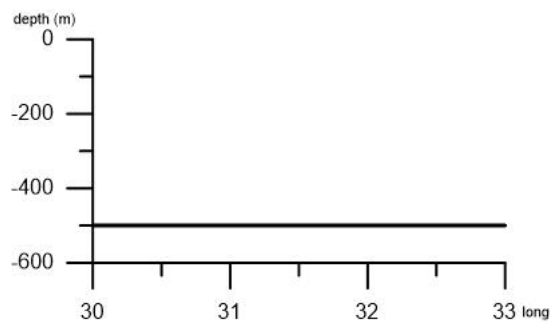
Buna göre, çıktı olarak, NAMI DANCE, daha önce kullanıcı tanımlı zaman aralıkları ve aynı simülasyon süresini kullanarak belirtilen koordinatlar için minimum ve maksimum su seviyelerini, akıntı hızları ve yönlerini, momentum akımlarını ve bunların yön ve su derinliklerini hesaplar.

3.3 Sayısal Modelin Doğrulaması

Sayısal modeli doğrulamak için atmosferik basınç bozukluklarından dolayı su seviyesindeki değişimler hesaplanıp ve düzenli şekilli düz batimetri üzerinde dikdörtgen şekilli yüksek basınç bandının sabit bir hızla hareketi düşünülerek benzetimler yapılmıştır. Sayısal çözümlerin doğruluğunu ve performansını doğrulamak için 500 metre, Kuzey ve Güneyden sınırlandırılmış sabit derinlikte düz batimetri üzerinde test çalışmaları yürütülmüştür (Şekil 3.2-3.3). Böyle bir batimetri seçilmesindeki neden, analitik çözümlerin sabit derinlikli batimetri için yapılabilmesidir.

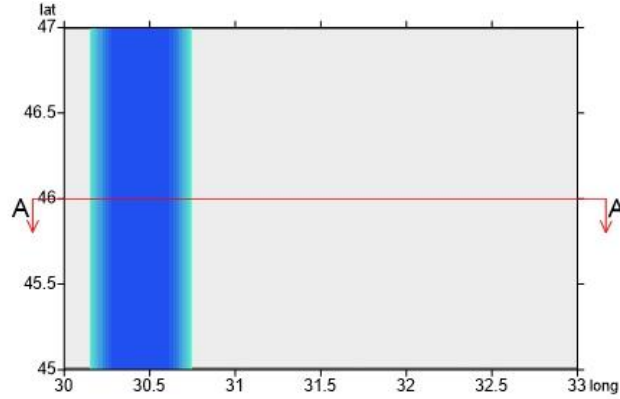


Şekil 3.2. Düz Batimetrinin Üstten görünümü

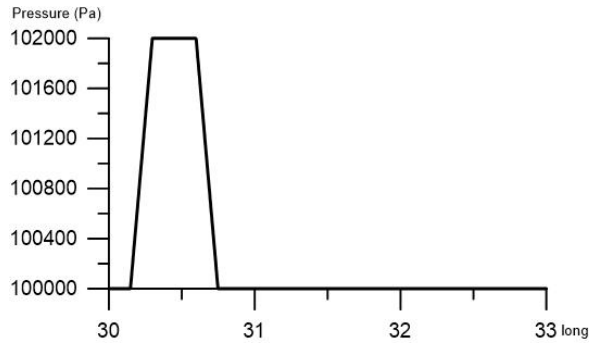


Şekil 3.3. Düz Batimetrinin A-A Kesitinden Görünümü

Daha açık bir sonuç elde edebilmek için, test çalışmalarında sabit basınç hızı (V) ve sabit dalga hızı (c) kullanılmıştır. Düz batimetri üzerinde üç farklı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların farkı dalga hızları 70 m/s ile sabit iken, basınç hızlarının her çalışmada farklı bir değer olarak kullanılmasıdır. Bu basınç hızları, dalga hızından büyük, eşit ve küçük olarak belirlenmiştir. Diğer bir taraftan, programa tanımlanan basınç bandı 46.6 km genişliğinde ve 102000 Pascal yüksek basınçla batıdan doğuya doğru hareket etmektedir. Basınç bandının üstten ve kesit görünümü Şekil 3.4 ve 3.5 ile gösterilmiştir.



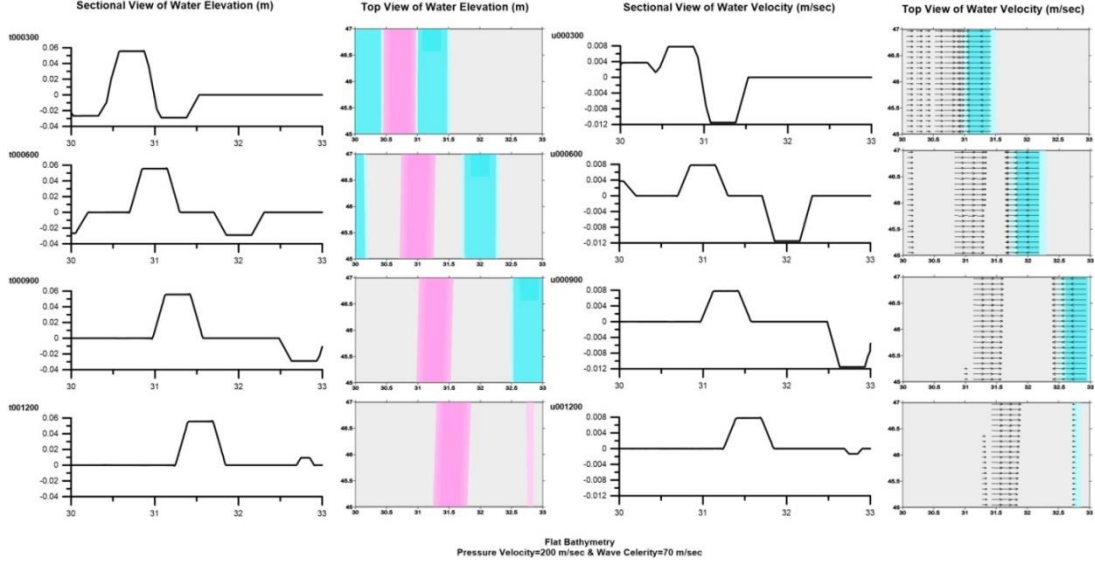
Şekil 3.4. Düz Batimetri üzerinde Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü



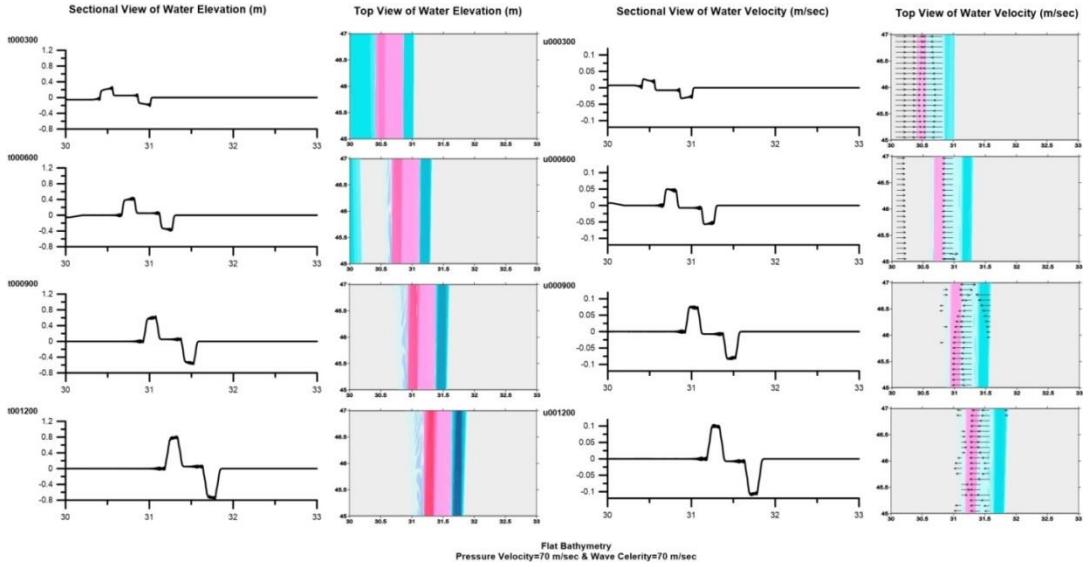
Şekil 3.5. Düz Batimetri üzerinde Yüksek Basınç Bandının A-A Kesitinden Görünümü

Batimetri ve basınç verileri, sayısal olarak 200 m geometrik mesafelerle yapılandırılmıştır. Simülasyon başlangıcında, basınç verileri, bir saatlik bir zaman aralığı ile bir girdi olarak programa verilmiştir. Sonra, 3 farklı test, 1 saniyelik zaman aralıklarında, 20 dakika süreli simülasyonlar halinde çalışılmıştır. Simülasyonlarda, basınç hızı (V), sırasıyla, 200 m/s, 70 m/s ve 40 m/s olarak seçilir. Dalga hızı tüm modellerde aynıdır ve 70 m/s'dir. Simülasyonların sonunda, her ızgara noktası için su yüzeyi yükselmesi ve akıntı hızları her 60 saniyede bir belirlenmiştir. Hesaplanan su yüzeyi yükseklikleri ve dalga hızlarının sonuçları üç farklı simülasyon için her 300 saniyelik aralıklarla (Şekil 3.6-3.8) sunulmuştur.

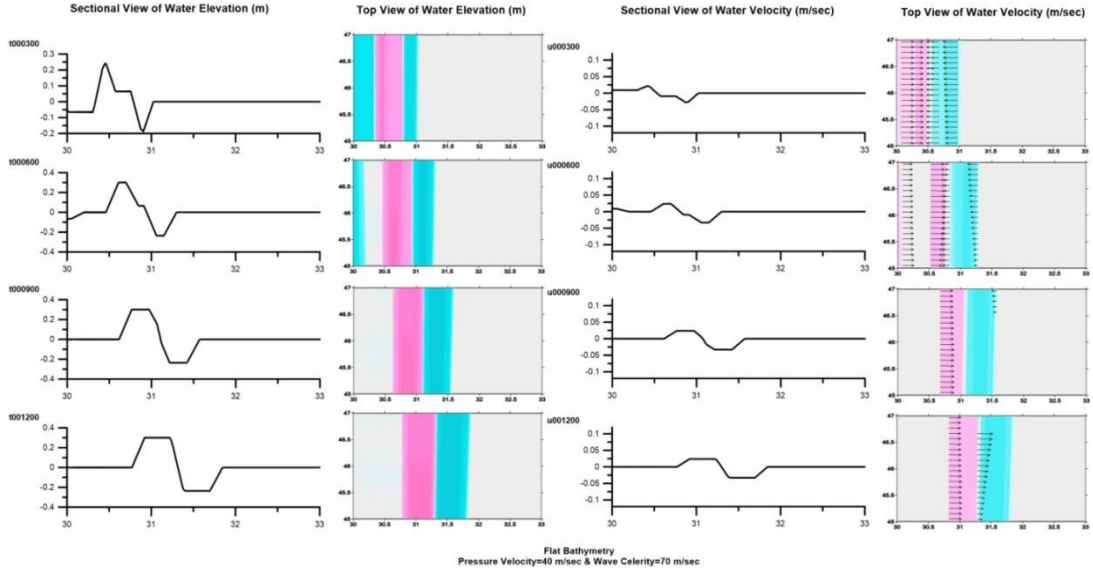
- Test 1: Basınç hızı dalga hızından daha büyük ($V > c$),
 Test 2: Basınç hızı dalga hızına eşittir ($V = c$),
 Test 3: Basınç hızı dalga hızından daha küçüktür ($V < c$).



Şekil 3.6. Düz Batimetri için $V=200$ m/s ve $c=70$ m/s Olduğundaki Sonuçlar (Test 1)



Şekil 3.7. Düz Batimetri için $V=70$ m/s ve $c=70$ m/s Olduğundaki Sonuçlar (Test 2)



Şekil 3.8. Düz Batimetri için $V=40$ m/s ve $c=70$ m/s Olduğundaki Sonuçlar (Test 3)

Sayısal model sonuçlarının doğruluğunu onaylamak için sayısal sonuçlar, Denklem (3.20)'den elde edilen analitik sonuçlarla 20.dakika için karşılaştırılmıştır (Tablo 3.1). Test 1 için, 20.dakikadaki dalga hızından kaynaklanan öndeki dalga yüksekliğinin (Q), basınç kaynaklı oluşan dalga yüksekliğine (P) oranı analitik 1.92 olarak hesaplanmıştır. Aynı oranlama sayısal model sonuçlarına göre yapıldığında 1.96 olarak hesaplanmıştır. Hata yüzdesi 2.1 olan bu karşılaştırma, oldukça tutarlı gözükmemektedir. Aynı şekilde, basınç hızının dalga hızına eşit olduğu durumda bu oranla 1 olarak bulunur. Basınç hızının dalga hızından küçük olduğu durumda ise Q/P analitik olarak 0.79, sayısal olarak 0.77 bulunmuştur. Test 3 için hata yüzdesi 2.5'tur ve bu hata kabul edilebilir orandadır. Bütün sayısal ve analitik oranlamalar karşılaştırıldığında, sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülürken, sayısal modelin doğru çalıştığı söylenebilir.

Tablo 3.1. Sayısal ve Analitik Q/P oranlarının 20. Dakikadaki Karşılaştırmaları

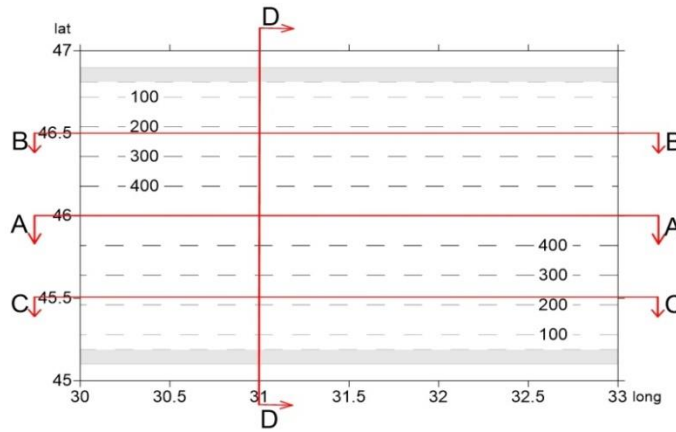
	Q/P t=20 dakika		
	Test 1 ($V>c$)	Test 2 ($V=c$)	Test 3 ($V<c$)
Sayısal Çözüm	1.96	1	0.77
Analitik Çözüm	1.92	1	0.79
% Hata	2.1	~ 0	2.5

3.4 Farklı Tipte Basenler için Sayısal Çalışmalar

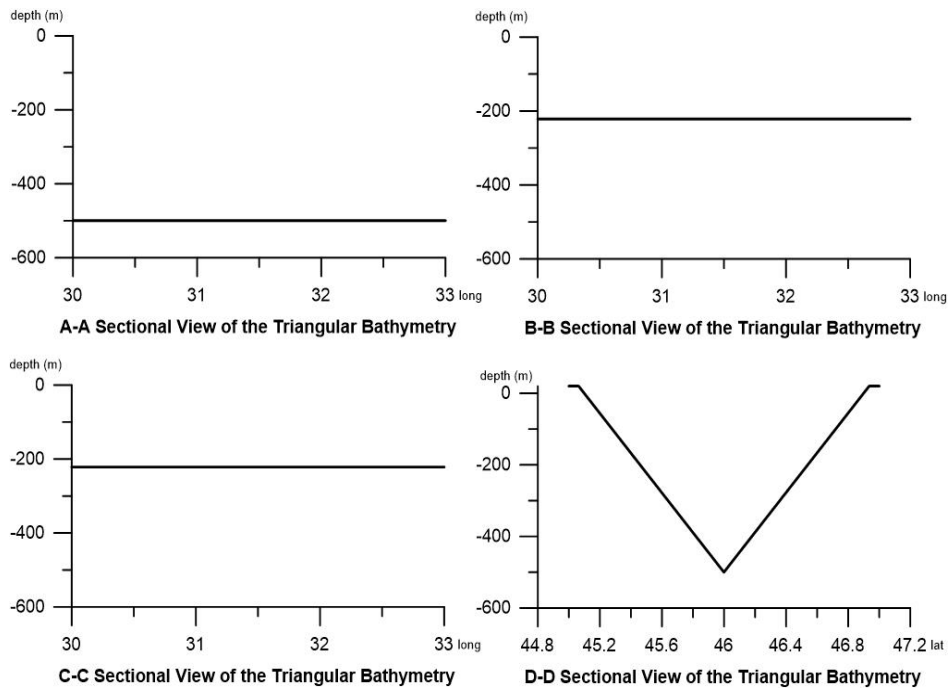
Bu çalışmalar, atmosferik basınç farklılıklarından dolayı oluşan uzun periyotlu dalgaların yükselmesinde basen şeklinin etkisini araştırmak için, farklı şekilde basenler üretilerek yapılan benzeşimleri içermektedir. 3 ana şekilde basen kullanılmıştır: Üçgen tabanlı basen, basamaklı şelf basen ve artan eğimli ve azalan eğimli basenler.

3.4.1 Üçgen Tabanlı Basen için Benzeşim Çalışması

İki yana doğru 1/200 eğimle oluşturulan üçgen tabanlı basenin derinliği 500 m'den zemin seviyesine değişir. Üçgen basenin üstten ve kesitten görünüşleri Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'de verilmiştir.

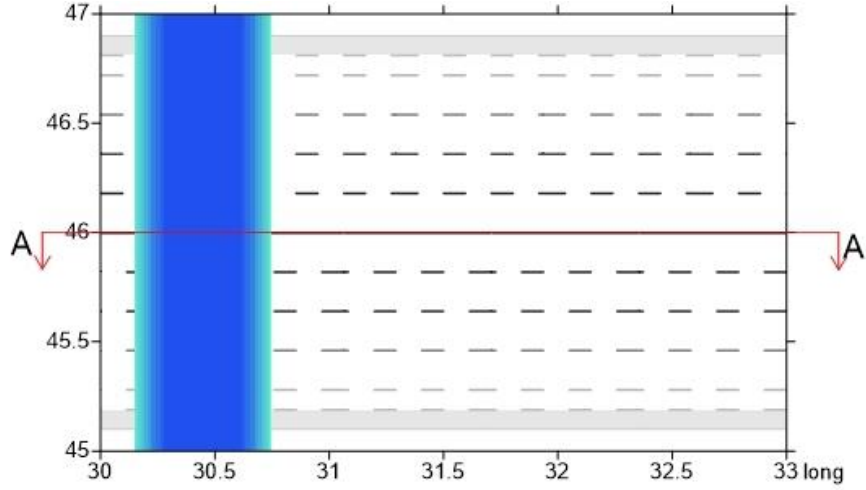


Şekil 3.9. Üçgen Batimetrisinin Üstten görünümü

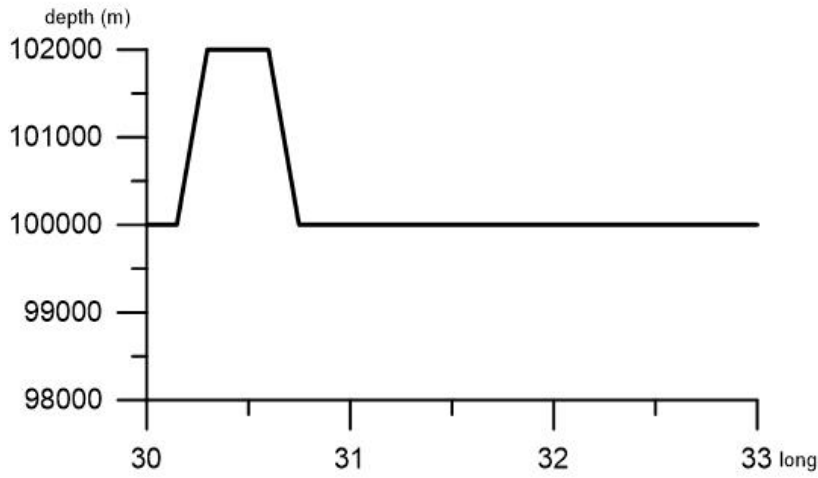


Şekil 3.10. Üçgen Batimetrisinin A-A&B-B&C-C&D-D Kesitinden Görünüşleri

Üçgen basen 200 m ızgara aralıklarıyla oluşturulmuştur. Aynı grid aralıklarıyla 46.6 km genişliğinde 102000 Pascal yüksek basınç verisi de üretilmiştir. Bu basınç bandı batıdan doğuya sabit bir hızla hareket eder. Üçgen basen için de üç farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Basınç bandının üstten ve kesitten görünümü Şekil 3.11 ve 3.12 ile gösterilmiştir.

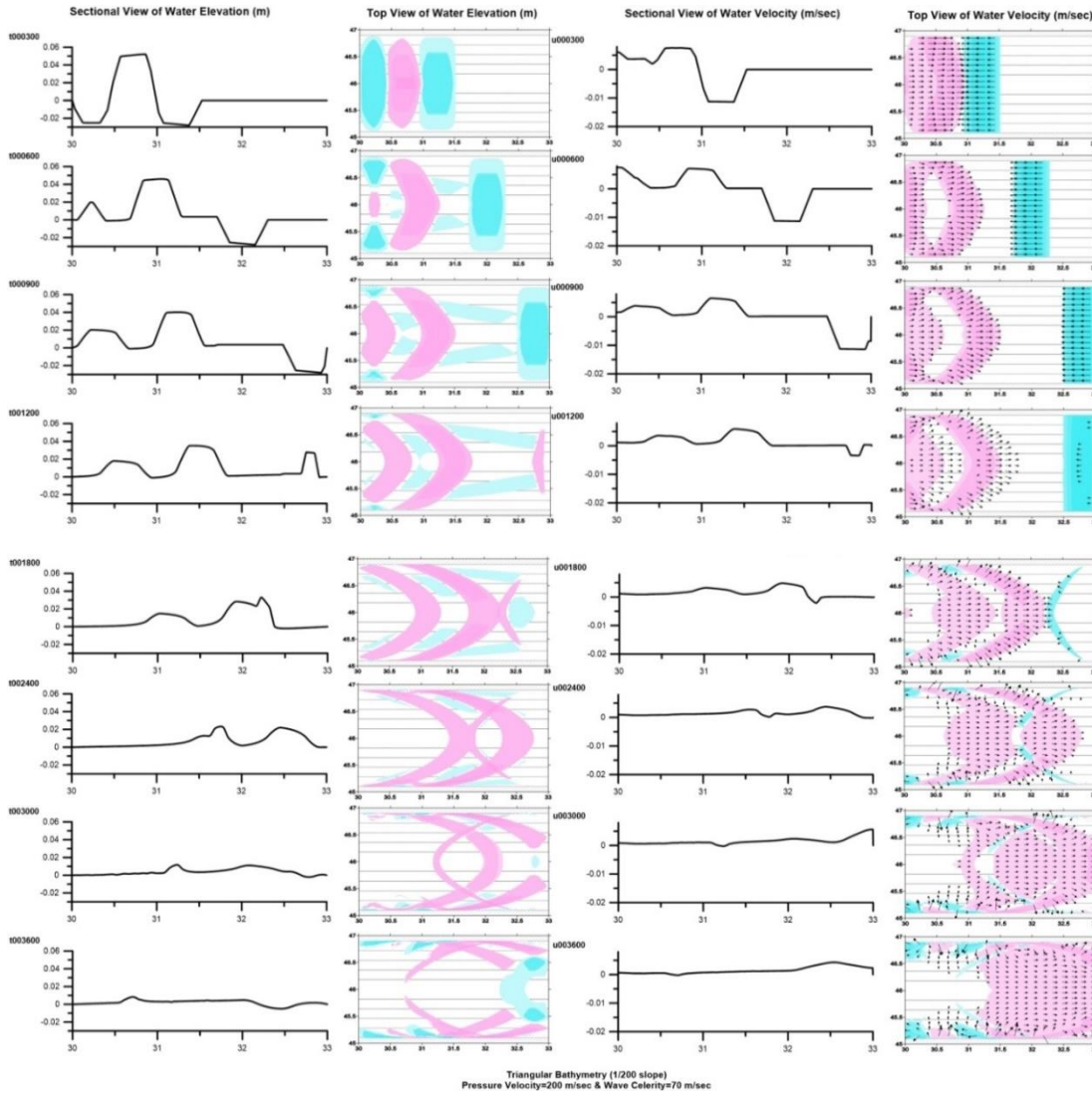


Şekil 3.11. Üçgen Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü



Şekil 3.12. Üçgen Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının A-A Kesitinden Görünümü

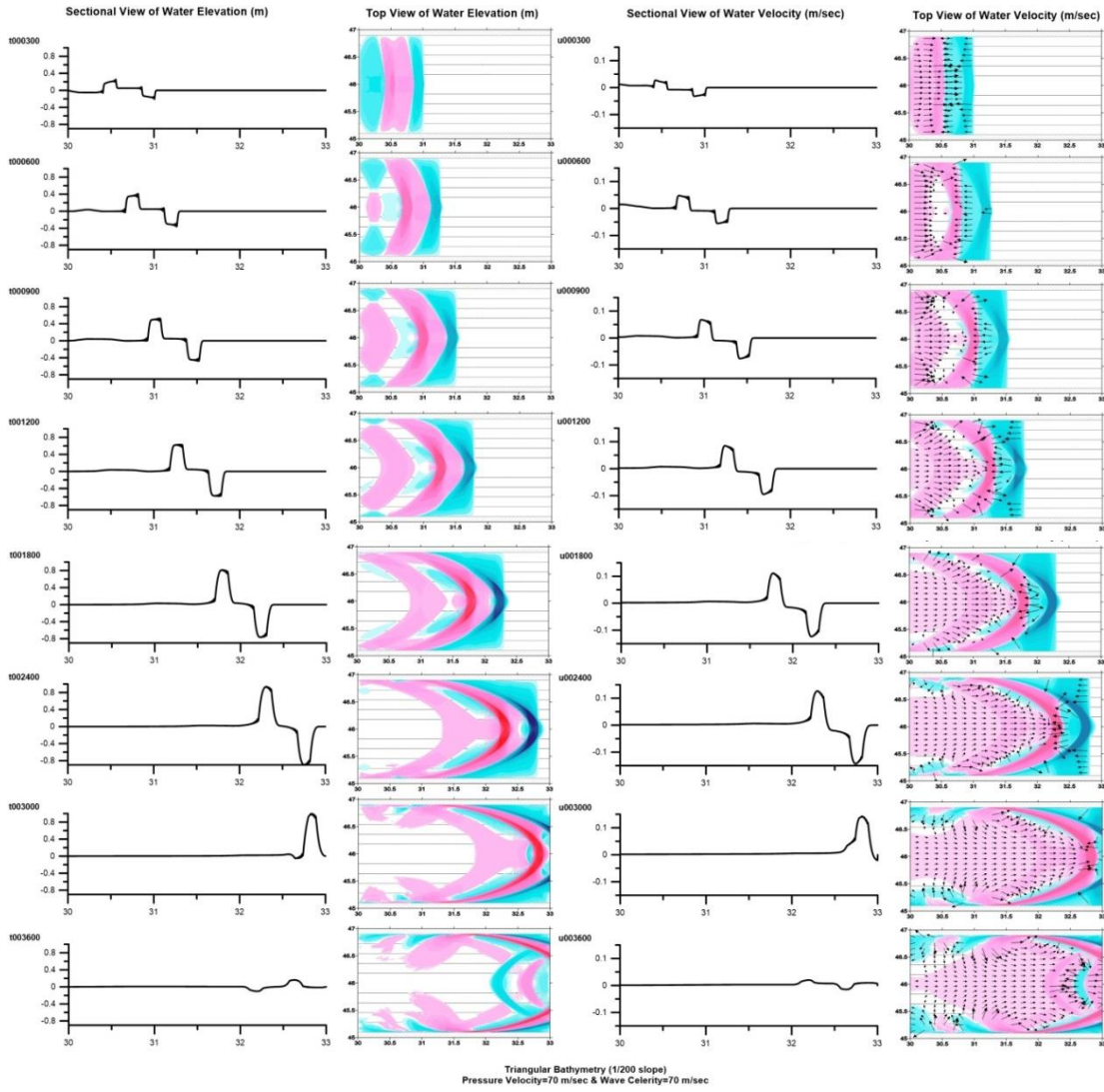
Basınç sabit bir hızla sağa doğru yayılır iken, sayısal programı 1 saniye zaman aralığı ve 60 dakika simülasyon süresi kullanılarak belirtilen koordinatlarda su yüksekliklerini, mevcut hızları ve yönleri hesaplar. Durum 1'de, V 200 m/s ve c 70 m/s olarak belirlenmiştir. Su yükseklikler ve mevcut hızlar için sonuçlar Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13.Üçgen Batimetri için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1)

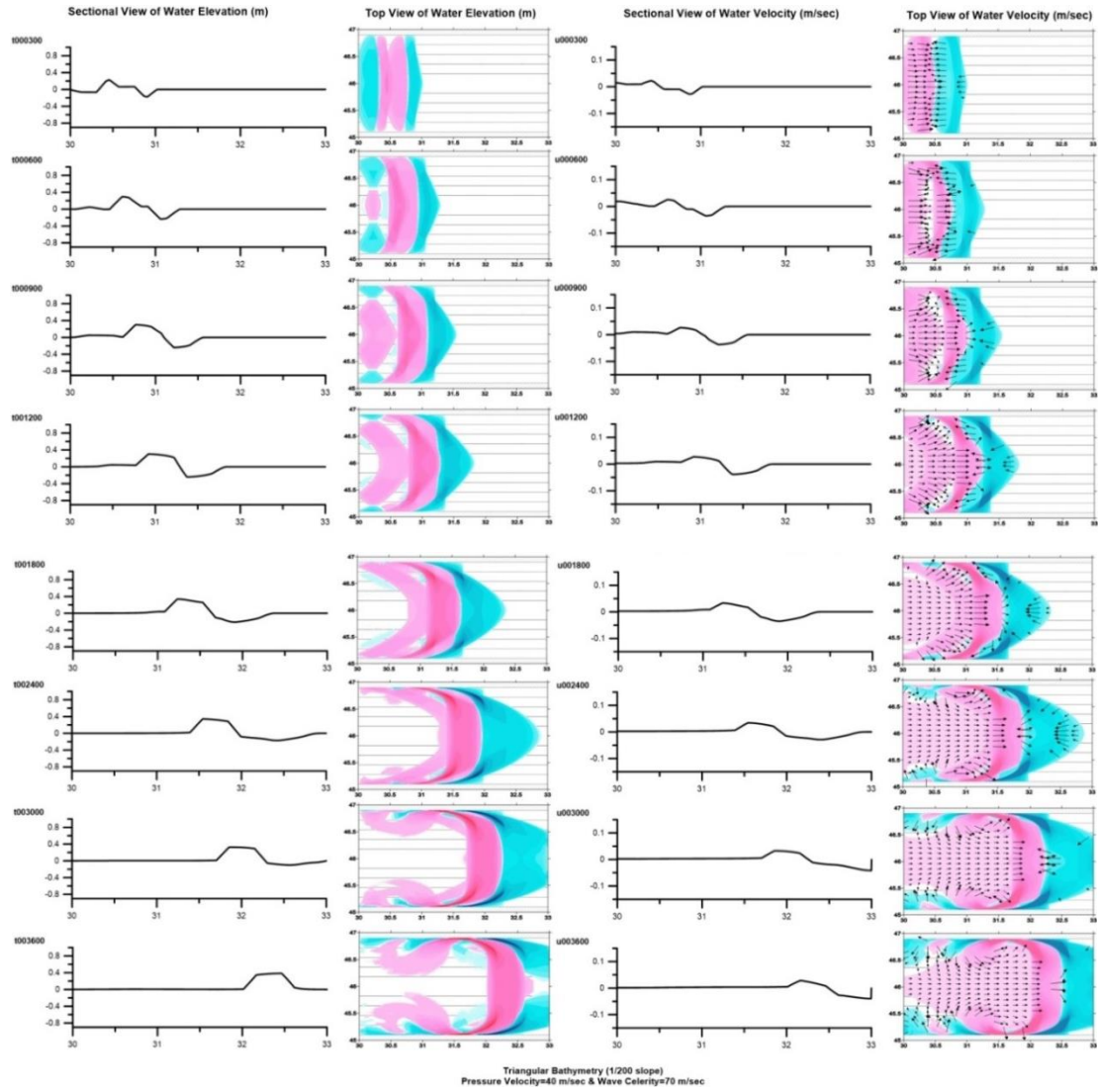
Dalganın 500 m su derinliğinde daha hızlı hareket edilmesi beklenen bir durumdur ve sonuçlar analiz edildiğinde beklentiyi karşıladığı görülmüştür. Farklı koordinatlarda dalga hızında değişiklikler vardır, bu nedenle su yüksekliğinin kararsızlık gösterdiği ifade edilebilir. Benzetim çalışmasının 5. dakikasında su seviyesi 5 cm civarlarındayken, 1 saatlik simülasyon sonucunda neredeyse durgun su gözlemlenmektedir. Benzer şekilde su hızı benzetim sonuna doğru azalır.

İkinci durumda ($V= c_{max}$), en yüksek su seviyesi gözlemlenir ve sonuçlar Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Üçgen Batimetri için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2)

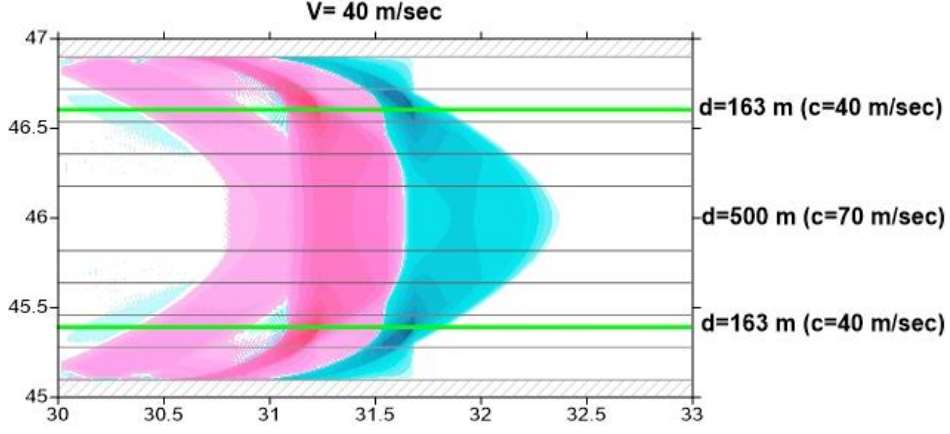
Dalgalar basınç hareketinin başından itibaren, sürekli dalga yüksekliğini artırarak ilerler. Başlangıçta, su seviyesi 20 cm civarlarındayken, 50.dakikada neredeyse 1 metreye ulaşmıştır. Maksimum su hızı 15 cm/s civarlarındadır. Diğer bir çalışma olarak, Durum 3'te basınç hızı 40 m/s ile dalga hızının arkasından ilerler. Aşağıda Şekil 3.15'te Durum 3 için sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Üçgen Batimetri için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3)

Simülasyonun başlangıcında 22 cm olarak görülen dalga, basenin merkezi boyunca bakıldığında, maksimum 38 cm yüksekliğe ulaşmıştır. Benzetim boyunca üst ve alt sınırlardan dalga yansımaları gözlemlenmiştir. Su hızı her zaman adımında neredeyse aynı değerlerdedir. Ancak bu Durum çalışmasında farklı olarak, basenin kuzey ve güney sınırlarına doğru yaklaştıkça basınç hızı ve dalga hızı eşitlik yakayabildiği için, en yüksek dalgalar bu bölgelerde gözlemlenmiştir ve değeri 80 cm'dir. Bu durum Şekil 3.16 ile görselleştirilmiştir. Bu şekilde yeşil çizgi üzerinde, bu eşitlik durumu yakalandığı için daha yüksek dalgalar gözlenir.

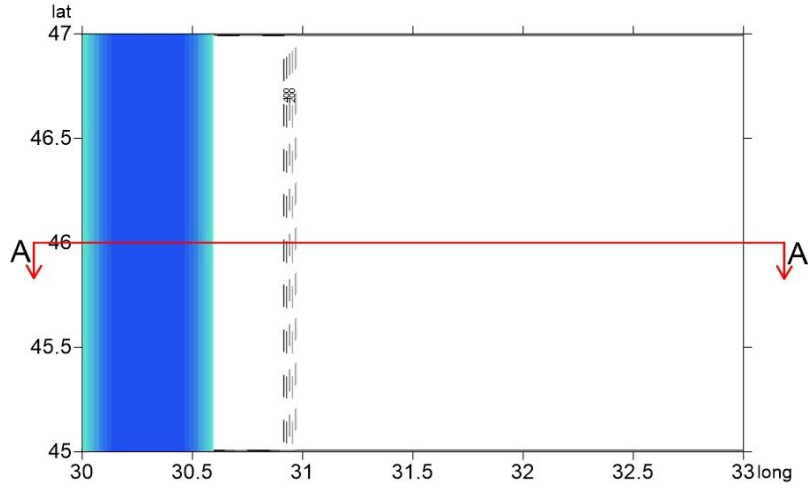
Genel olarak, üç farklı durum karşılaştırıldığında, basenin merkezinde en yüksek dalgalar Durum 1 için 5.2 cm, Durum 2 için 1 m ve Durum 3 için 38.5 cm'dir. Maksimum su seviyesinin görülmesi için baskın karakter basınç periyodu ile dalga periyodunun çakışmasıdır. Durum 1'de basınç hızla hareket edip baseni terk ettiği için dalga amplifikasyonu gözlenmemektedir.



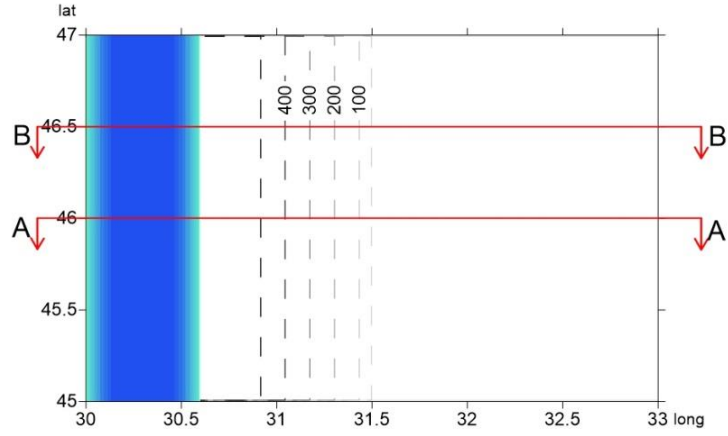
Şekil 3.16. Üçgen Batimetri için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s olduğunda Maksimum Su Yüksekliği

3.4.2 Basamaklı Şelf Basen için Benzeşim Çalışması

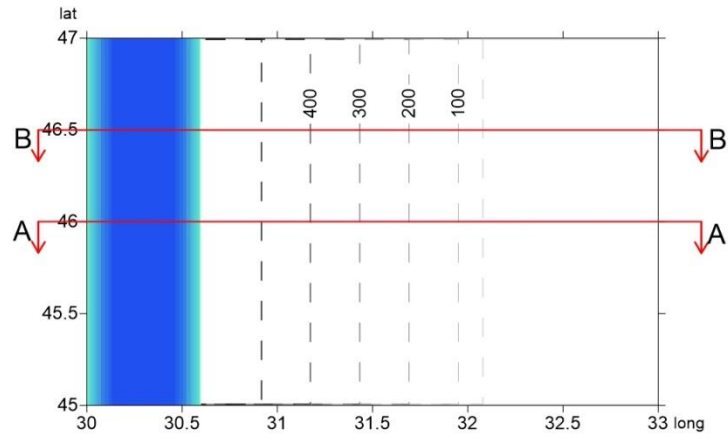
Şelf basenin etkisini daha net görebilmek için üç farklı eğimde batimetri üretilmiş ve üç farklı basınç hızına göre çözümlenmiştir. Üretilen üç farklı şelf basen için 102000 Pascal 46.6 km genişliğinde batıdan doğuya hareket eden yüksek basınç bandı girdi olarak verilmiştir. Şekil 3.17, 3.18, 3.19, 3.20'da bu batimetri için kullanılan eş yüksek basınçlar gösterilmiştir.



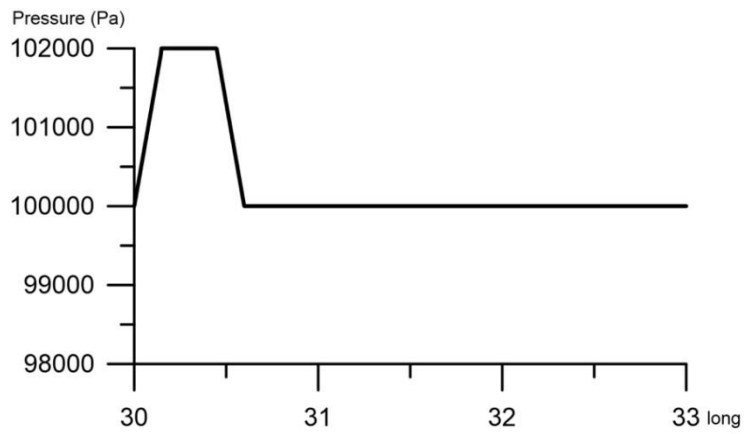
Şekil 3.17. 1/10 Eğimli Şelf Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü



Şekil 3.18. 1/100 Eğimli Şelf Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü



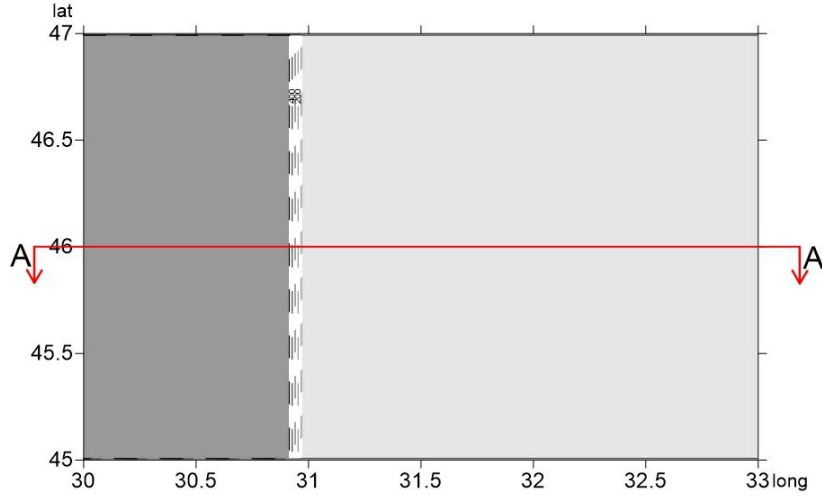
Şekil 3.19. 1/200 Eğimli Şelf Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü



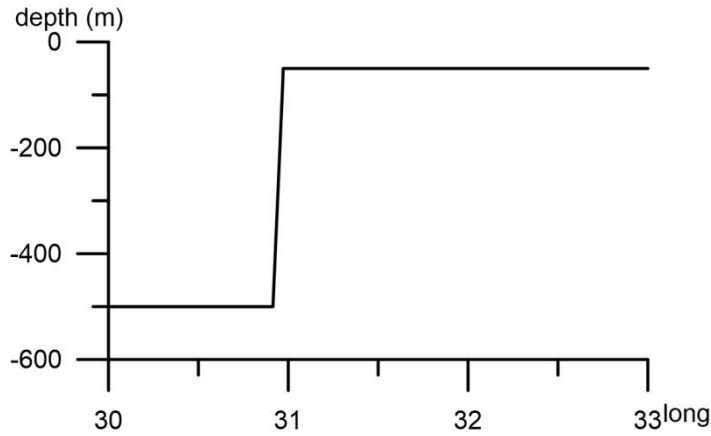
Şekil 3.20. Bütün Şelf Batimetri Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının A-A Kesit Görünümü

a) 1/10 Eğimli Şelf Basen

1/10 eğimli şelf basen üç farklı bölümden oluşur: 500 m derinlikte düztaban, 500 m'den 1/10 eğimle 50 m'ye artan eğimli taban, 50 m derinlikli düztaban. Basen kuzey ve güneyden sınırlandırılmış ve üstten ve kesitten görünümü Şekil 3.21 ve 3.22 ile gösterilmiştir.

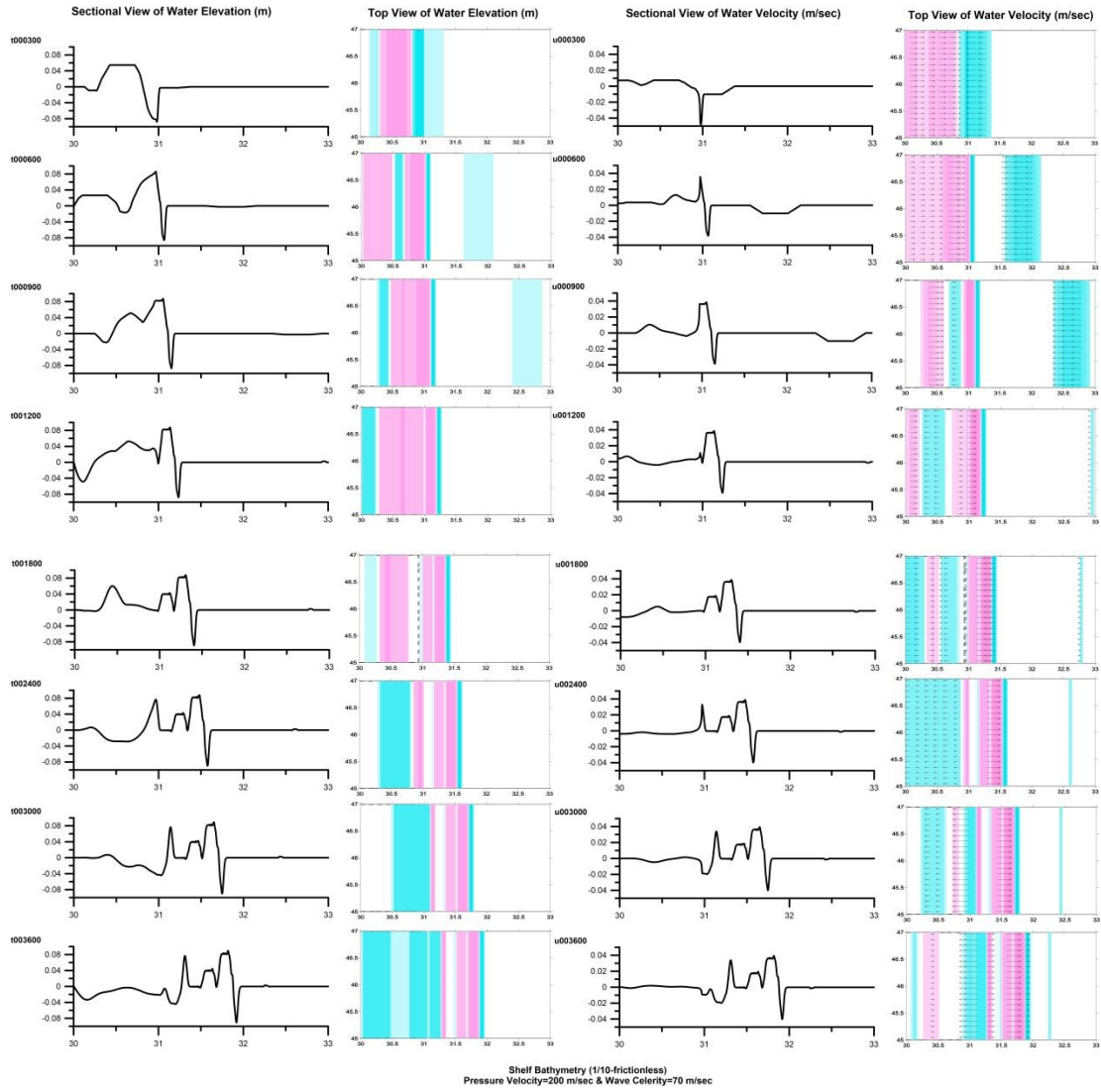


Şekil 3.21. 1/10 Eğimli Şelf Batimetrisinin Üstten Görünümü



Şekil 3.22. 1/10 Eğimli Şelf Batimetrisinin A-A Kesitinden Görünümü

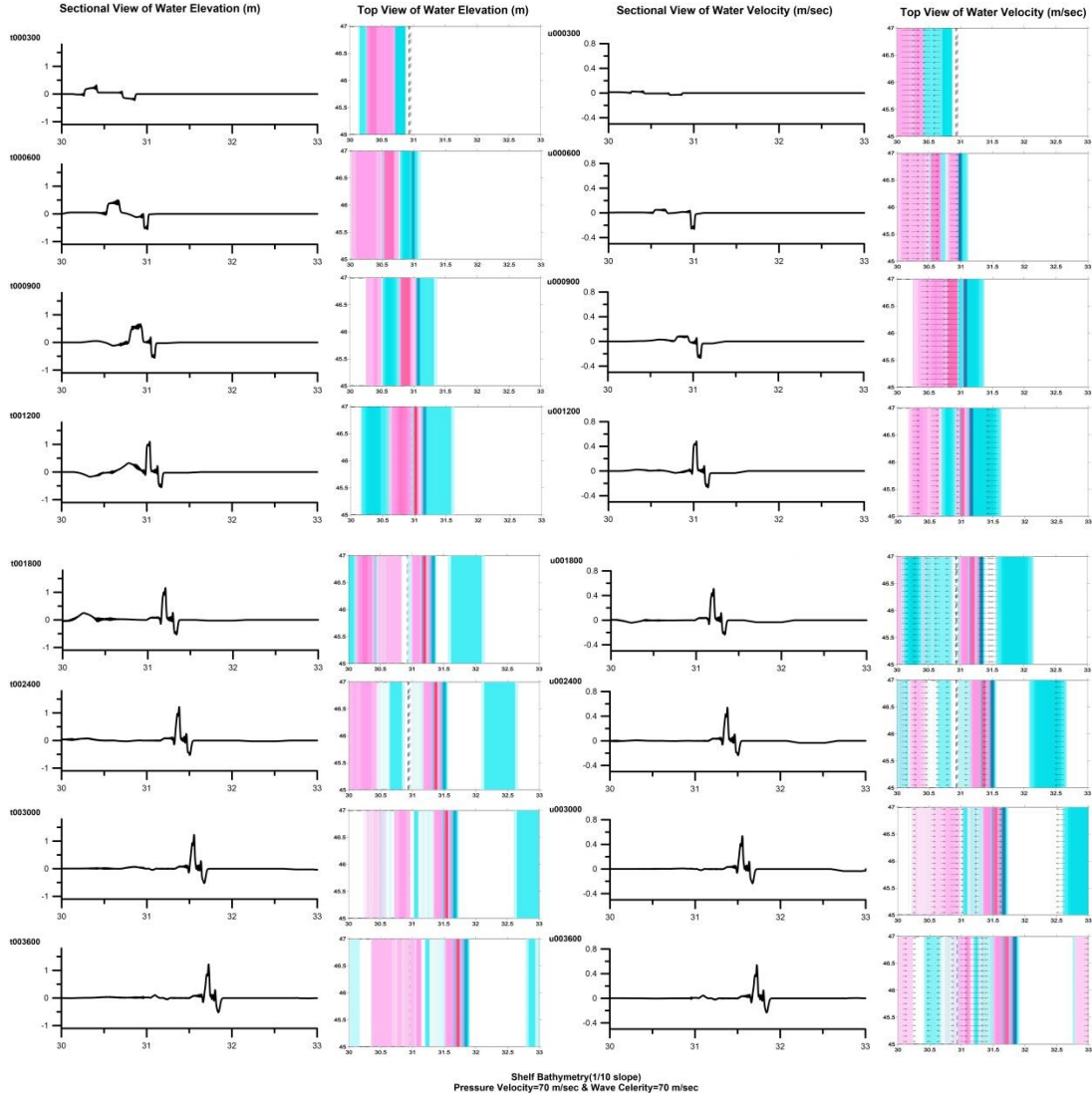
1/10 eğimli aşamalı şelf basen üç farklı durum için modellenmiştir: basınç hızı dalga hızından büyük, eşit ve küçük. Deniz seviyesindeki değişim $t=300, 600, 900, 1200, 1800, 2400, 3000$ ve 3600 saniyede hesaplanır. Bunun yanında bu zaman adımlarında su hızları da hesaplanmıştır. Durum 1 ($V=200$ m/s ve $c=70$ m/s) için sonuçlar Şekil 3.23 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.23. 1/10 Eğimli Şelf Basen için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1)

Sonuçlar incelendiğinde, 5. dakikada ilk gözlenen dalga 5.5 cm civarlarındadır. 10. dakikada dalga yüksekliği 8.6 cm olmuştur. Simülasyon boyunca dalga yüksekliğinde herhangi önemli bir değişim gözlenmemiştir. Maksimum su seviyesi Durum 1 için 8.95 cm'dir.

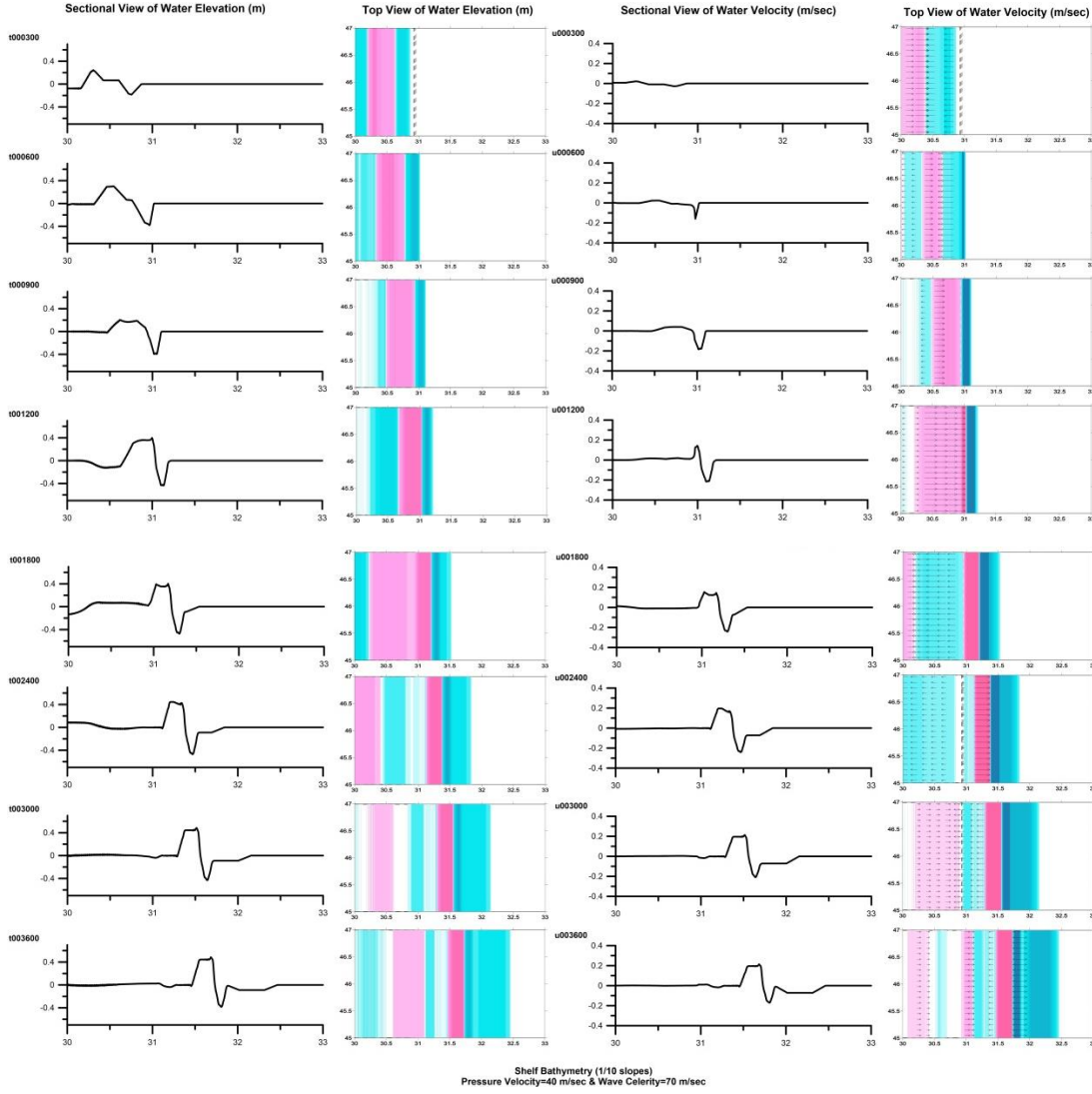
İkinci benzetimde, basınç hızı ile dalga hızının eşit olduğu durum incelenmiştir. Zamana bağlı su seviyesi değişimleri ve su hızları Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. 1/10 Eğimli Şelf Basen için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2)

Durum 2'de Proudman rezonans olayı gözleendiğinden su yükseklikleri maksimum değerlerini almaktadırlar. Benzetimin 5.dakikasında ilk gözlenen dalga yüksekliği 31.5 cm civarlarındadır. 10.dakikada 49.5 cm'dir. 15. dakikada dalga şelfin üzerinde ilerler ve 66 cm yüksekliğe ulaşır. Daha sonra da benzetimin sonuna kadar yavaş yavaş dalga yüksekliği artmaya devam eder. 60. dakikada maksimum dalga yüksekliği 1.22 m'dir.

Durum 3'te basınç hızı 40 m/s ve dalga hızından küçüktür ve bu durumun sonuçları Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



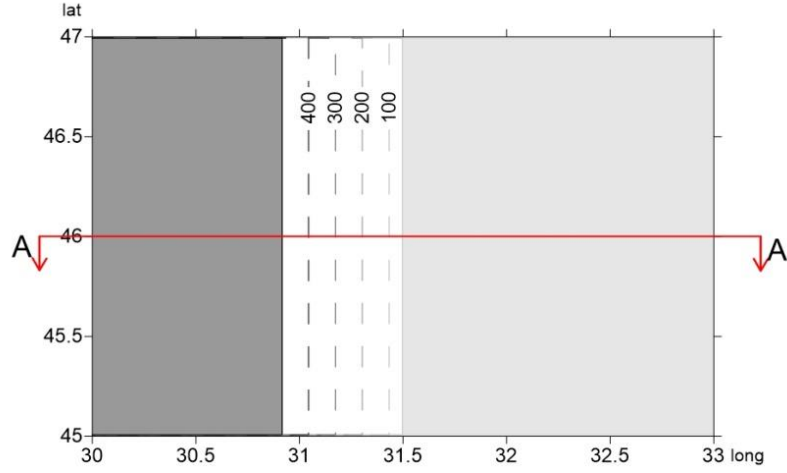
Şekil 3.25. 1/10 Eğimli Şelf Basen için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3)

Durum 3'te 5. Dakikada 24 cm civarında 2.2 cm/s hızla ilerleyen dalga oluşmuştur. 10. dakikada bu dalganın yüksekliği 30 cm'dir. 15.dakikada, şelf önünde dalga yüksekliği neredeyse 20 cm'dir. 20.dakikada dalga eğimle karşılaşır ve yüksekliği birden 40 cm olur. Bu durum için maksimum dalga yüksekliği 50 cm olarak hesaplanmıştır.

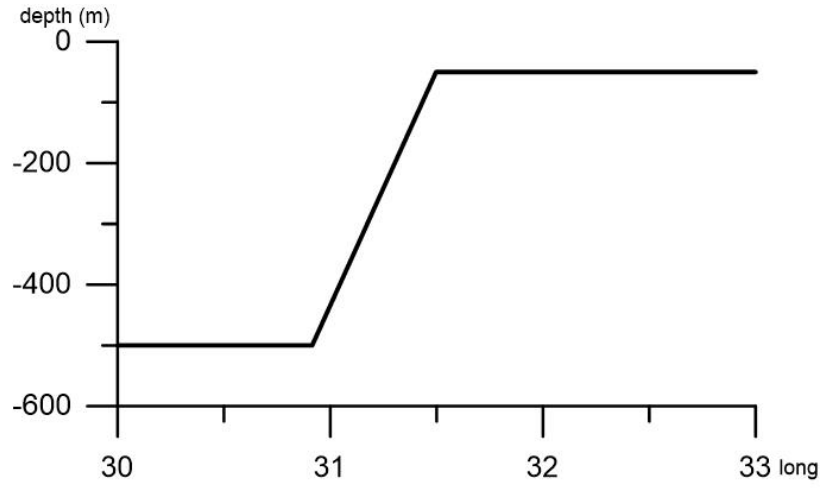
Bu üç durum beraber düşünüldüğünde, eğimli basenin başladığı yerde dalga yüksekliğinin birden arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek dalga yüksekliği basınç hızı ve maksimum dalga hızı eşit olduğu durumda hesaplanmıştır. Su seviyesindeki en az değişiklik Durum 1'de gözlemlenmiştir.

b) 1/100 Eğimli Şelf Basen

1/100 eğimli şelf basen de benzer şekilde üç farklı bölümden oluşur: 500 m derinlikte düztaban, 500 m'den 1/100 eğimle 50 m'ye artan eğimli taban, 50 m derinlikli düztaban. Basen kuzey ve güneyden sınırlandırılmış ve üstten ve kesitten görünümü Şekil 3.26 ve 3.27 ile gösterilmiştir.

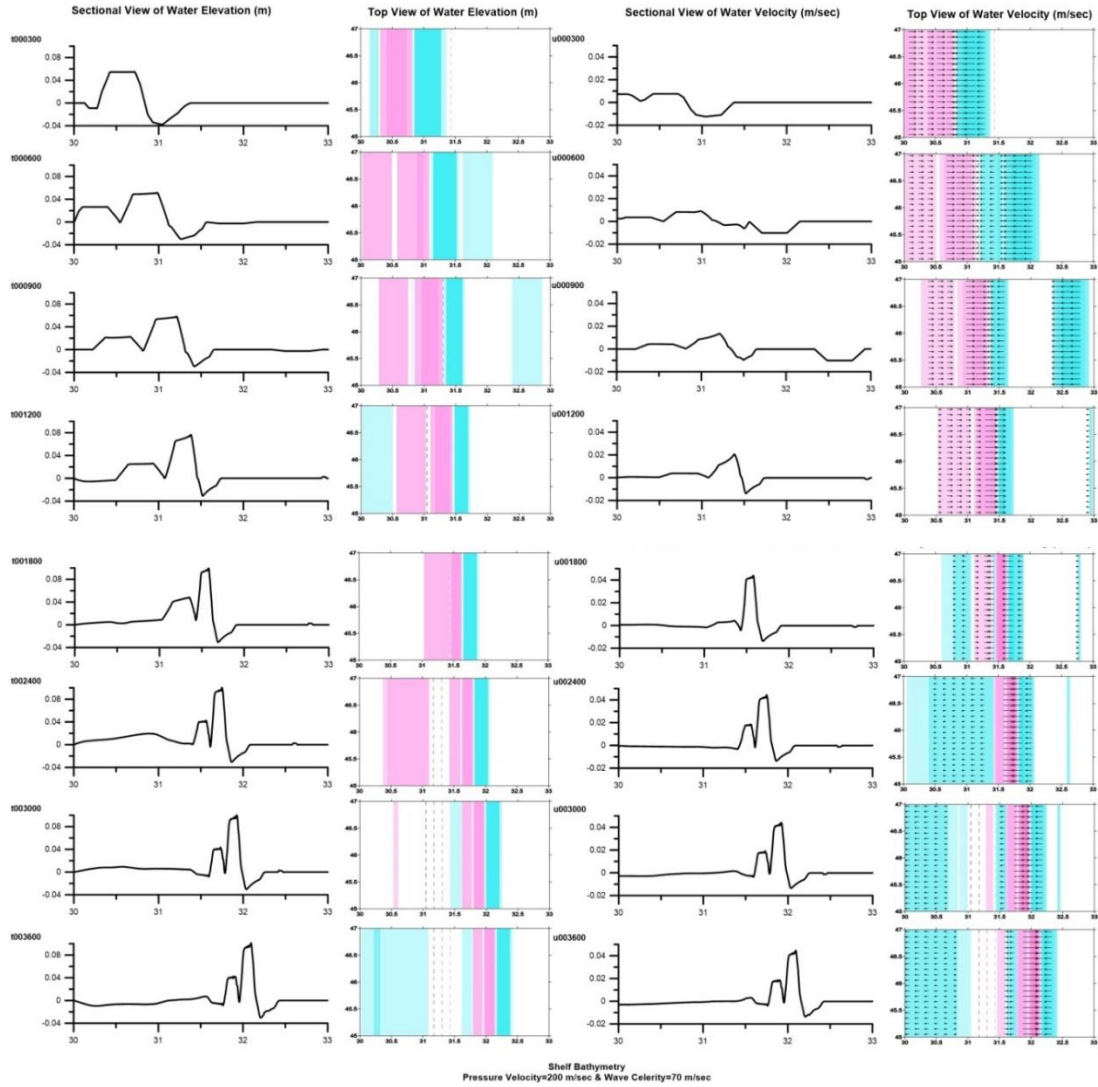


Şekil 3.26. 1/100 Eğimli Şelf Batimetrisinin Üstten Görünümü



Şekil 3.27. 1/100 Eğimli Şelf Batimetrisinin A-A Kesit Görünümü

Diğer basenlerde olduğu gibi bu basende de üç farklı hız durumu incelenmiştir. Durum 1’de, basınç hızı 200 m/s ve dalga hızından büyüktür. Bu basen için gerçekleştirilmiş 1 saatlik benzetim sonuçları Şekil 3.28 ile gösterilmiştir.

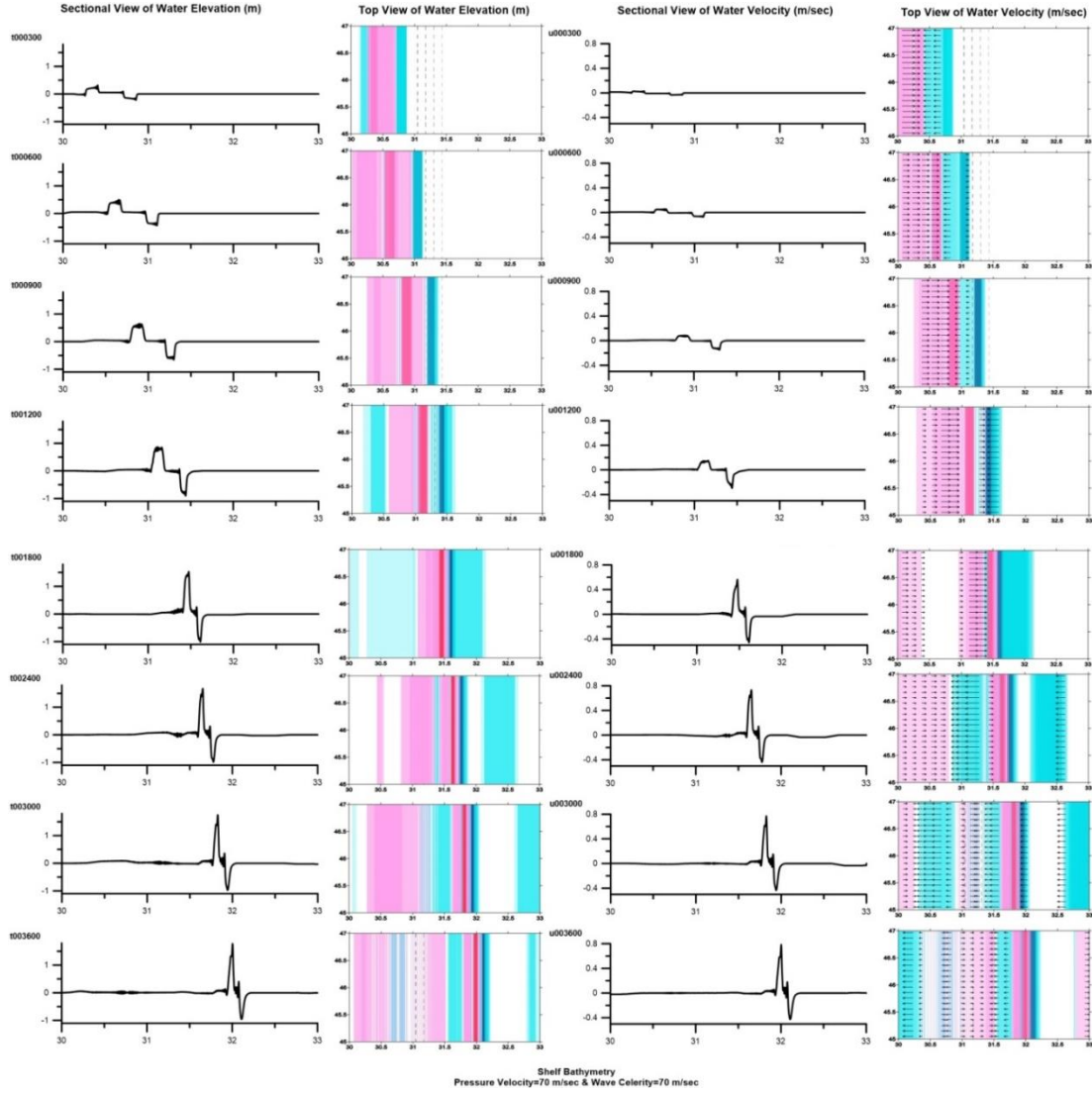


Şekil 3.28. 1/100 Eğimli Şelf Basen için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1)

Simülasyonun 5.dakikasında 500 m derinlikte düztabanda 5.5 cm su yüksekliği gözlemlenmiştir. 10. dakikada ilk oluşan dalganın arkasında 2.6 cm yüksekliğinde başka bir dalga daha oluşmuştur. 15.dakikada dalga eğimli taban bölgesine ulaşır ve 5.82 cm su seviyelerinde ilerlemeye devam eder. 20. Dakikada dalga yüksekliği 7.66 cm olarak hesaplanmıştır. 30.dakika ve daha sonrası için dalga yüksekliği 10 cm ile sabit ilerler. Diğer bir yandan, simülasyon boyunca eğim sebebiyle ilk ve izleyen dalga uzunlukları ilerledikçe azalmıştır.

Durum 2 de $V=c_{max}$ olduğu koşulda simülasyonlar yapılmış ve sonuçlar Şekil 3.29’da

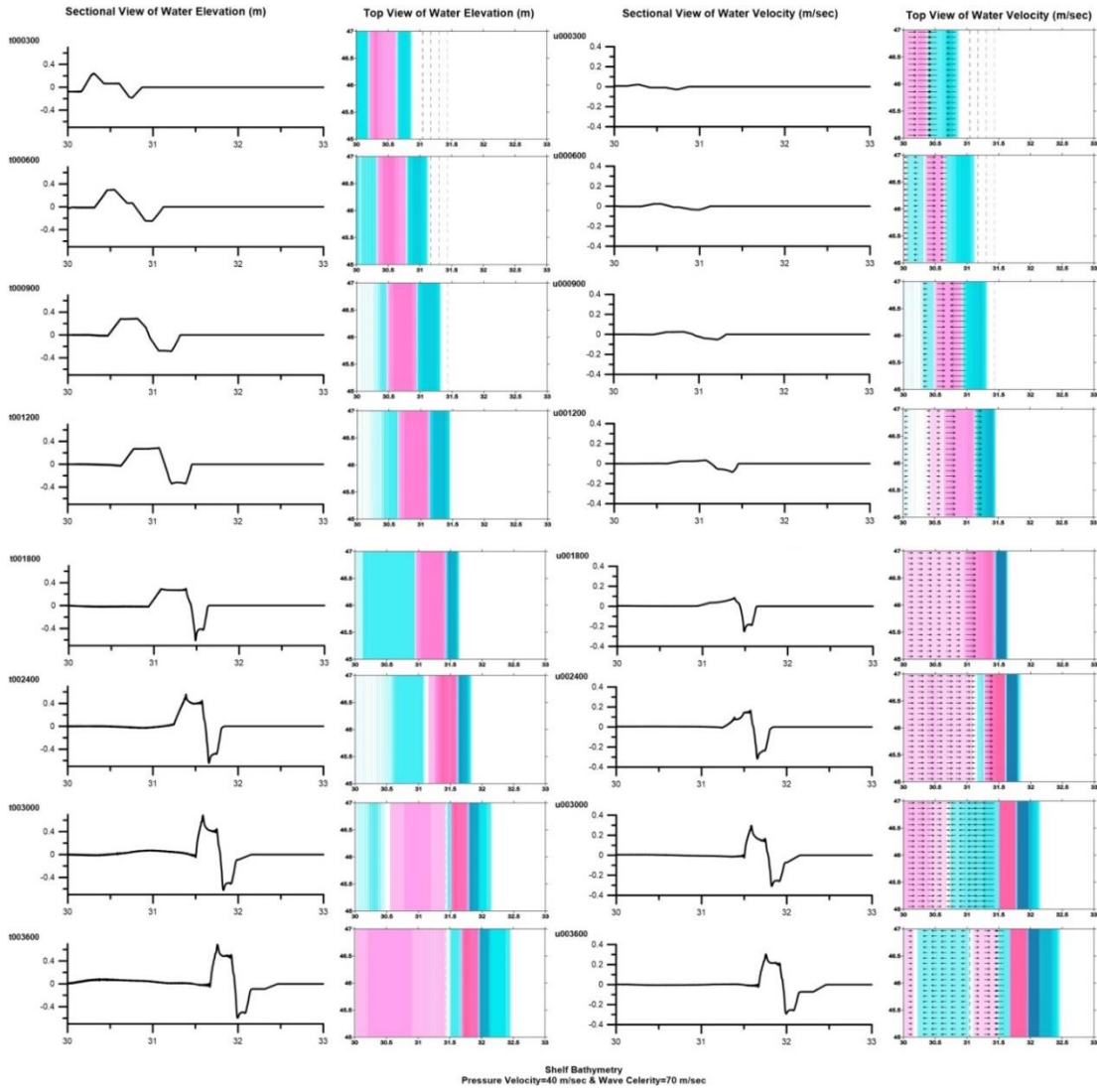
verilmiştir.



Şekil 3.29. 1/100 Eğimli Şelf Basen için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2)

Durum 2'de Proudman rezonans olayı gözlemlendiğinden su yükseklikleri maksimum değerlerini almaktadır. Benzetimin 5.dakikasında ilk gözlenen dalga yüksekliği 31.5 cm civarlarındadır. 10.dakikada 49.5 cm'dir. 15. dakikada dalga şelfin üzerinde ilerler ve neredeyse 66 cm yüksekliğe ulaşır. 20. dakikada dalga eğimli bölgeyle karşılaşır ve 86.5 cm yüksekliğe ulaşır. 60. dakikada maksimum dalga yüksekliği 1.77 m'dir.

Durum 3'te basınç hızı 40 m/s ve dalga hızından küçüktür ve bu durumun sonuçları Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



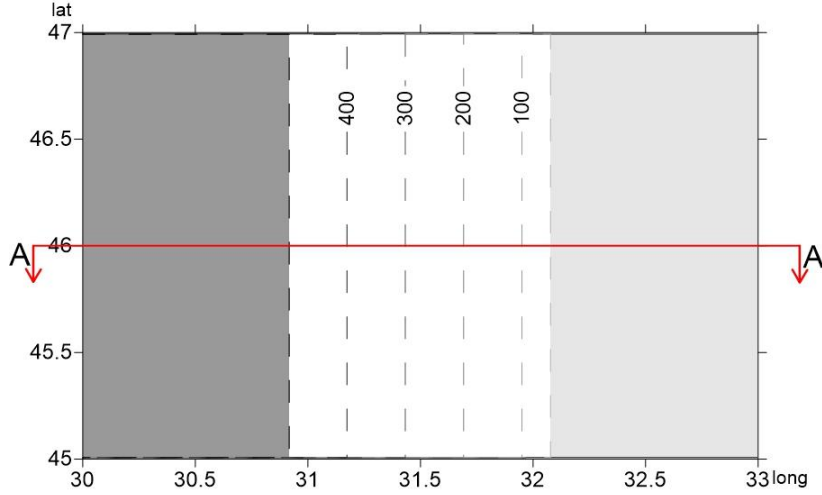
Şekil 3.30. 1/100 Eğimli Şelf Basen için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3)

Durum 3'te 5. dakikada 24 cm civarında dalga oluşmuştur. 30.dakikada su seviyesi 30 cm olarak hesaplanmıştır. 40.dakikada dalga eğimli bölgeyle karşılaşır ve yüksekliği 55.8 cm olur. Bu durum için maksimum dalga yüksekliği 70 cm olarak hesaplanmıştır.

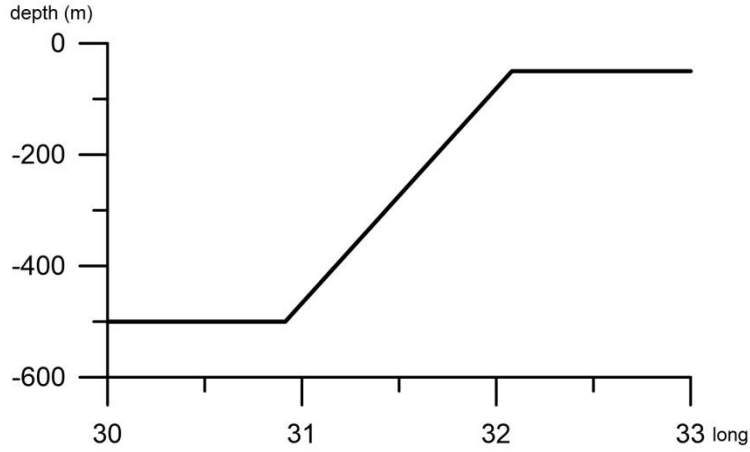
Bu üç durum beraber düşünüldüğünde, eğimli basenin başladığı yerde dalga yüksekliğinin birden arttığı gözlemlenmiştir. Dalga yüksekliği simülasyon sonuna kadar sürekli bir artış göstermektedir. En yüksek dalga yüksekliği basınç hızı ve maksimum dalga hızı eşit olduğu durumda (Durum 2) hesaplanmıştır. Su seviyesindeki en az değişiklik Durum 1'de gözlemlenmiştir.

c) 1/200 Eğimli Şelf Basen

1/200 eğimli şelf basen üç farklı bölümden oluşur: 500 m derinlikte düztaban, 500 m'den 1/200 eğimle 50 m'ye artan eğimli taban, 50 m derinlikli düztaban. Basen kuzey ve güneyden sınırlandırılmış ve üstten ve kesitten görünümü Şekil 3.31 ve 3.32 ile gösterilmiştir.

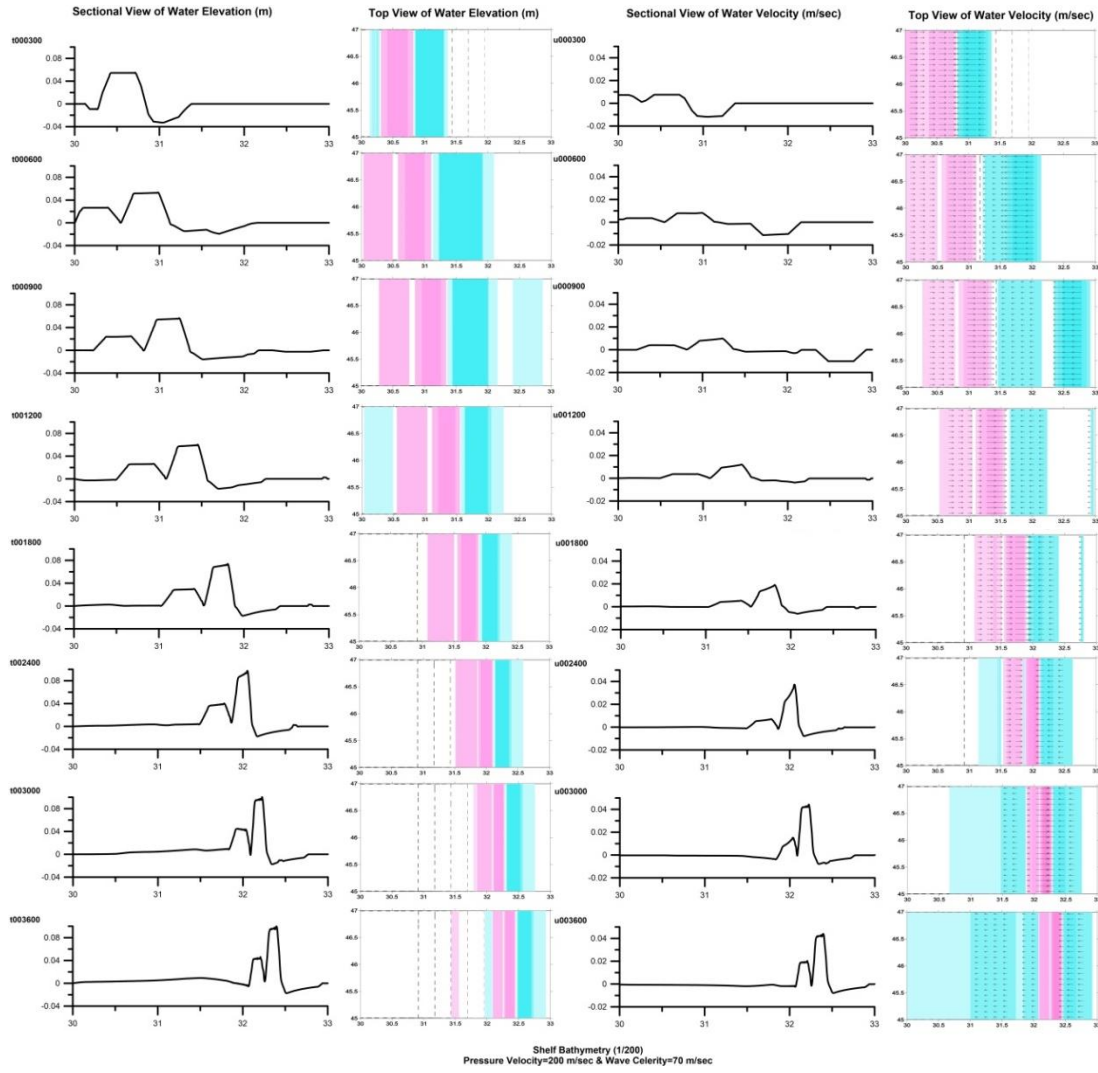


Şekil 3.31. 1/200 Eğimli Şelf Batimetrimin Üstten Görünümü



Şekil 3.32. 1/200 Eğimli Şelf Batimetrimin A-A Kesit Görünümü

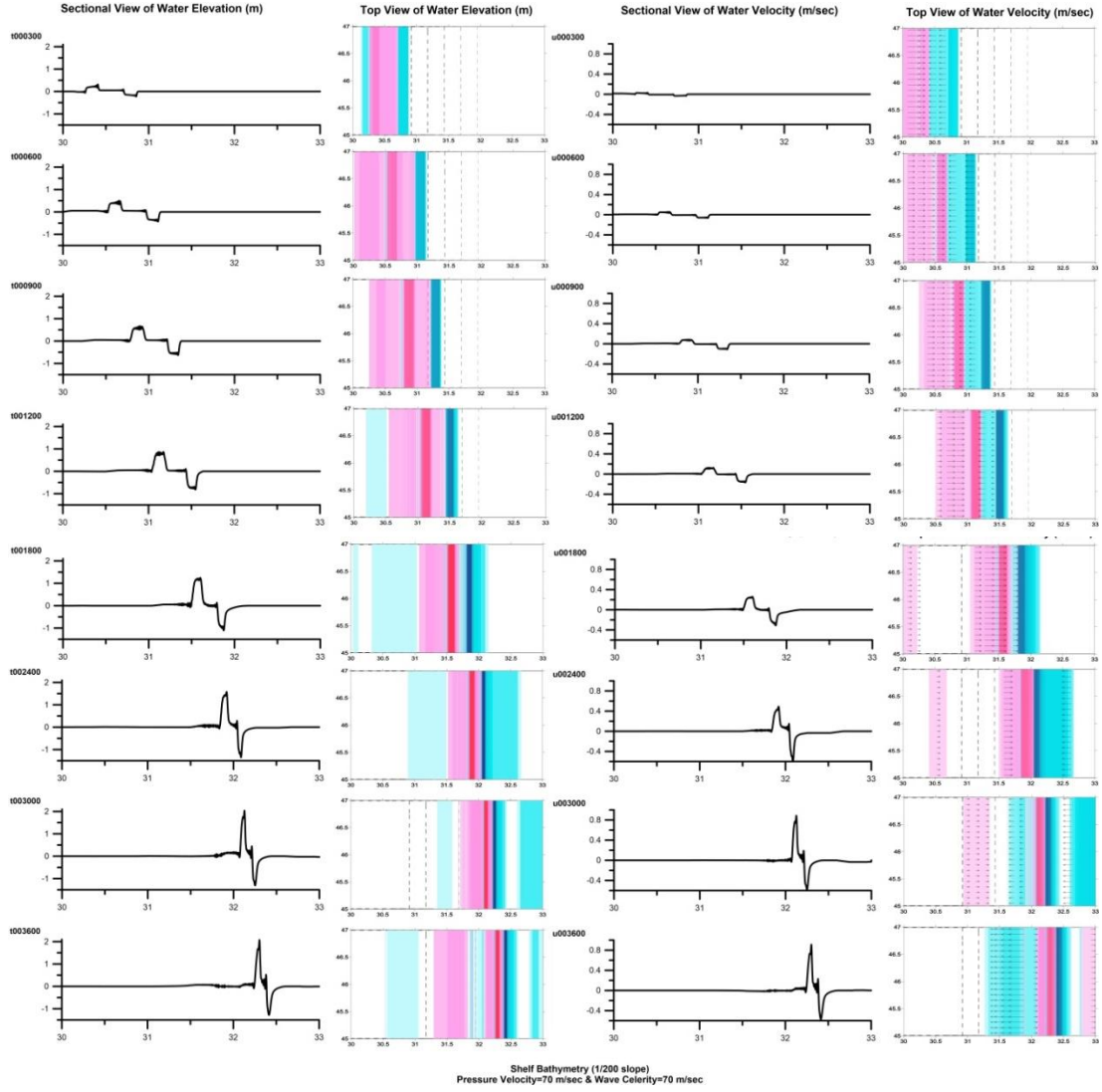
Diğer basenlerde olduğu gibi bu basende de üç farklı hız durumu incelenmiştir. Durum 1'de, basınç hızı 200 m/s ve dalga hızından büyüktür. Bu basen için gerçekleştirilmiş 1 saatlik benzetim sonuçları Şekil 3.33 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.33. 1/200 Eğimli Şelf Basen için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1)

Simülasyonun 5.dakikasında 500 m derinlikte düztabanda 5.5 cm su yüksekliği gözlemlenmiştir ve 500 m düztaban üzerinde ilerlemiştir. 10. dakikada ilk oluşan dalganın arkasında yarı yüksekliğinde başka bir dalga daha oluşmuştur. 15.dakikada dalga eğimli taban bölgesine ulaşır ve 5.6 cm su seviyelerinde ilerlemeye devam eder. 20. Dakikada dalga yüksekliği 6 cm olarak hesaplanmıştır. Simülasyon sonunda maksimum dalga yüksekliği 10 cm olarak hesaplanmıştır. Durum 1 için, basınç hızlı ilerlediği için şelf etkisi net gözlenmemektedir.

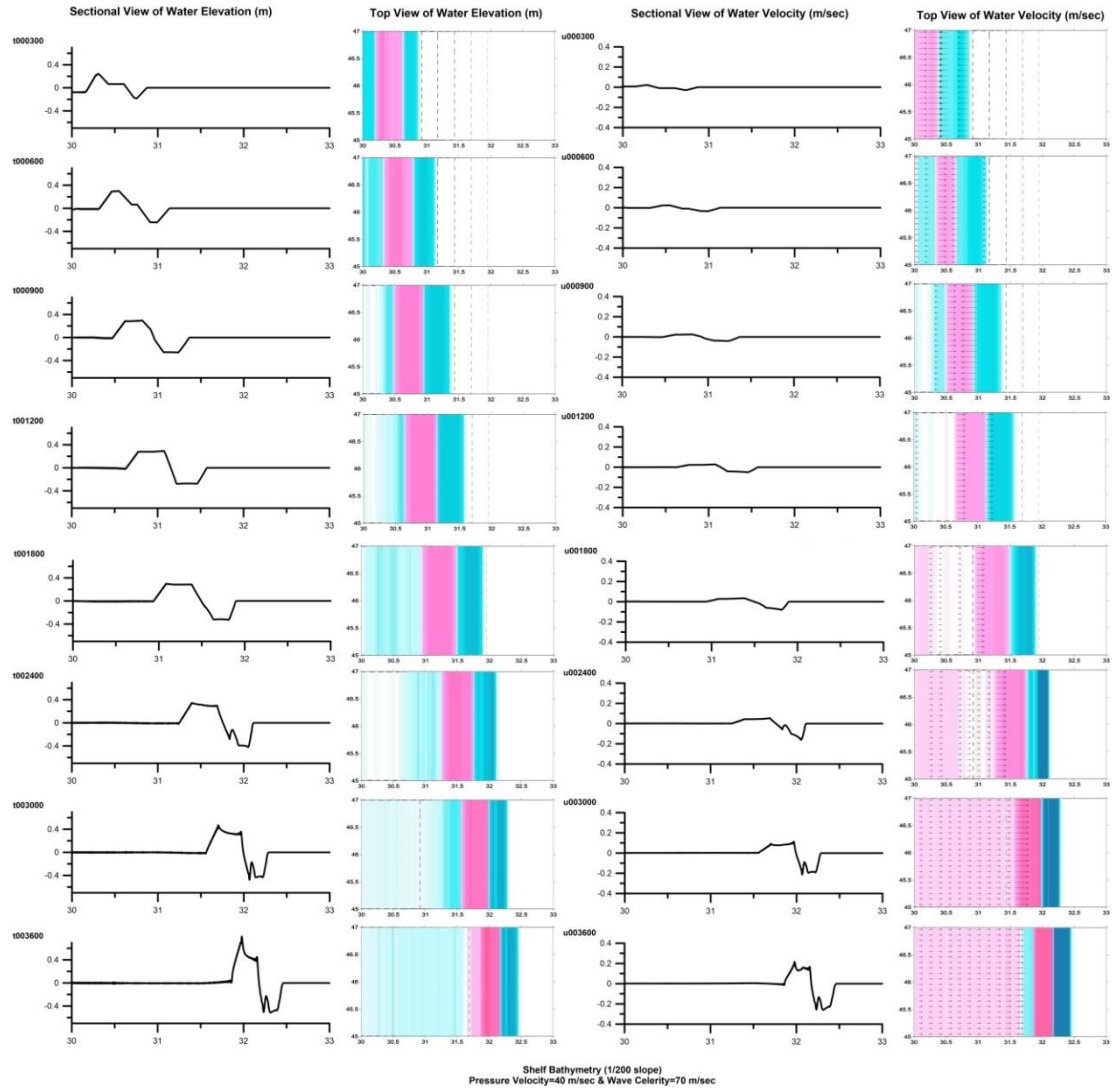
Durum 2 de $V=c_{max}$ olduğu koşulda simülasyonlar yapılmış ve sonuçlar Şekil 3.34'te verilmiştir.



Şekil 3.34. 1/200 Eğimli Şelf Basen için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2)

Durum 2'de rezonans olayı gözlemlendiğinden su yükseklikleri maksimum değerlerini almaktadır. Benzetimin 5.dakikasında ilk gözlenen dalga yüksekliği 31.5 cm civarlarındadır. 10.dakikada 50 cm'lik dalga 6 cm/s hızla doğruya doğru hareket etmektedir. 15. dakikada dalga neredeyse 65 cm yüksekliğe ulaşır. 20. dakikada dalga eğimli bölgeyle karşılaşır. 30.dakikada dalga yüksekliği 1.25 m'ye ulaşır. 60. dakikada maksimum dalga yüksekliği 2.1 m'dir.

Durum 3'te basınç hızı 40 m/s ve dalga hızından küçüktür ve bu durumun sonuçları Şekil 3.35'da gösterilmiştir.



Şekil 3.35. 1/200 Eğimli Şelf Basen için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3)

Durum 3'te hesaplanan dalga yükseklikleri Durum 1'de hesaplanan yüksekliklerden büyüktür. 5. dakikada 24 cm civarında dalga oluşmuştur. 10.dakikada su seviyesi 30 cm olarak hesaplanmıştır. Benzetim çalışmasının sonunda maksimum dalga gözlemlenir ve 80 cm olarak hesaplanmıştır.

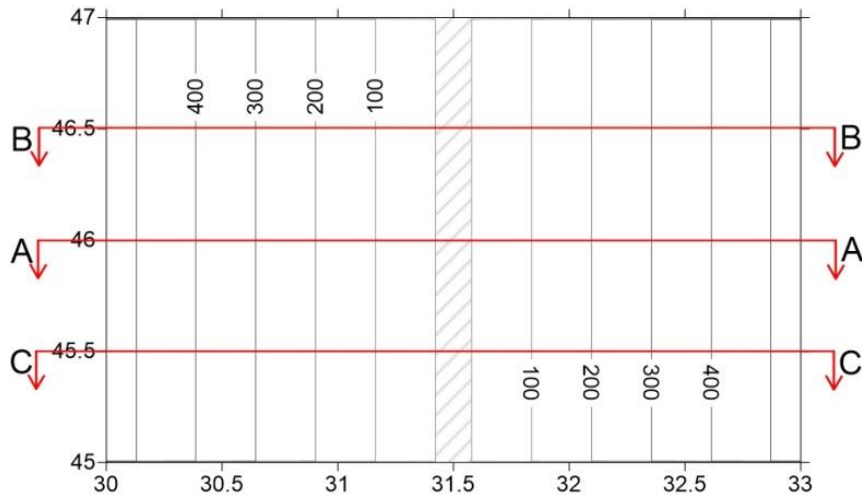
Kısaca bu benzetim çalışmalarında farklı taban eğimlerinin su seviyesindeki etkileri gözlemlenmiştir. 1/100 ve 1/200 eğimli basen çalışmalarının ilk 20 dakikasında su seviyesinde önemli bir değişim yoktur. Durum 1 için 1/100 eğimin ve 1/200 eğimin etkileri neredeyse aynıdır. Durum 2 için, 30. dakikada 1/100 eğimli taban üzerinde gözlenen dalga yüksekliği 1/200 eğimde gözlenenden büyüktür. Ancak tam tersine, 60. dakikada maksimum dalga yüksekliği 1/200 eğimli basende 2.1 m olarak gözlenirken, 1/100 eğimli basende 1.7 m olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, Durum 3 için de aynı sonuca varılmıştır. Diğer bir taraftan, en dik eğimli basende (1/10 eğim) en düşük dalga yükseklikleri gözlenmiştir. Bu çalışmadan

varılan sonuç, hafif meyilli basende dalga büyümesinin daha çok olduğudur.

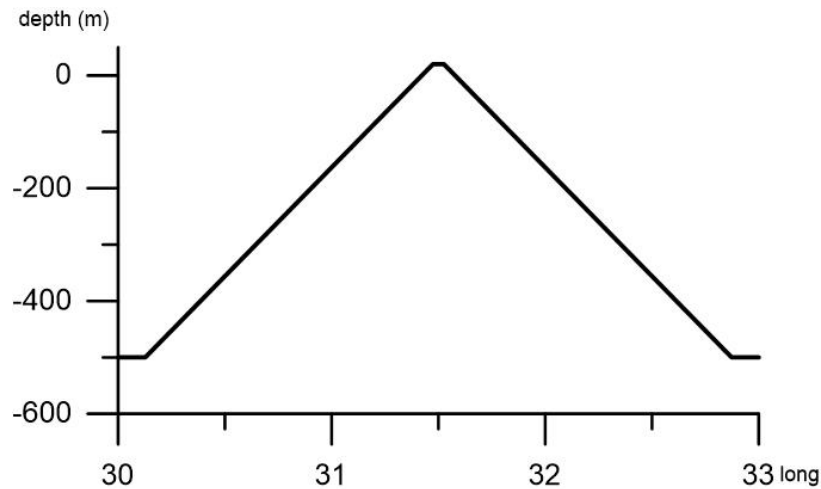
3.4.3 Kıyıya ve Açık Denize Doğru İlerleyen Basınç Hareketleri için Benzeşim Çalışması

Basınç farklılıklarından meydana gelen uzun periyotlu dalgaların oluşumu ve davranışı, (i) kıyıya doğru artan eğimli basen ve (ii) kıyından denize azalan eğimli basen üzerinde incelenmiştir. İki farklı ihtimal, tek batimetri üzerinde birleştirilmiş ve tek simülasyonla iki farklı durum için hesaplamalar yapılmıştır.

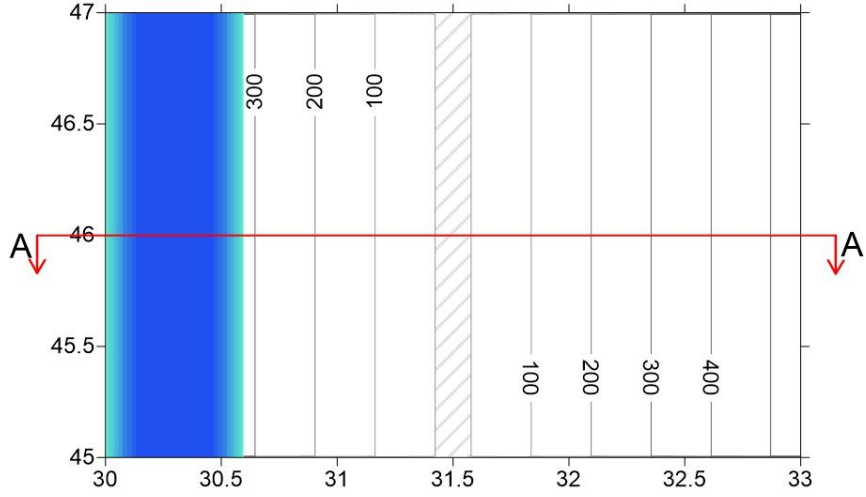
Üretilen basen, ortada bir kara ve bu karadan doğuya ve batıya doğru giderken artan derinliktir. Ortadaki kara 12 km genişliğe sahiptir. Derinlik değişimi 1/200 eğimle gerçekleşmektedir. Basen simetrik ve Şekil 3.36 ve 3.37 ile aşağıda gösterilmektedir. Basınç bandı daha önceki basenlerle aynı kullanılmıştır ve Şekil 3.38 ve 3.39 ile verilmiştir.



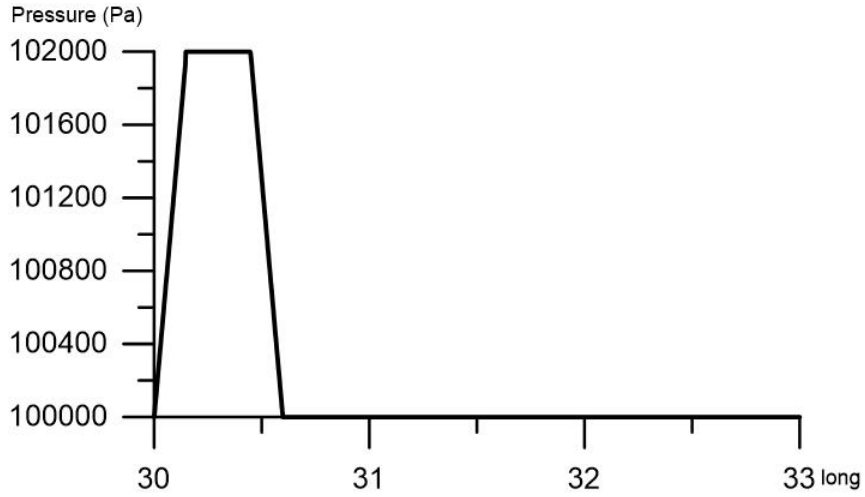
Şekil 3.36. Artan ve Azalan Eğimli Batimetrimin Üstten Görünümü



Şekil 3.37. Artan ve Azalan Eğimli Batimetrimin A-A&B-B ve C-C Kesit Görünümü

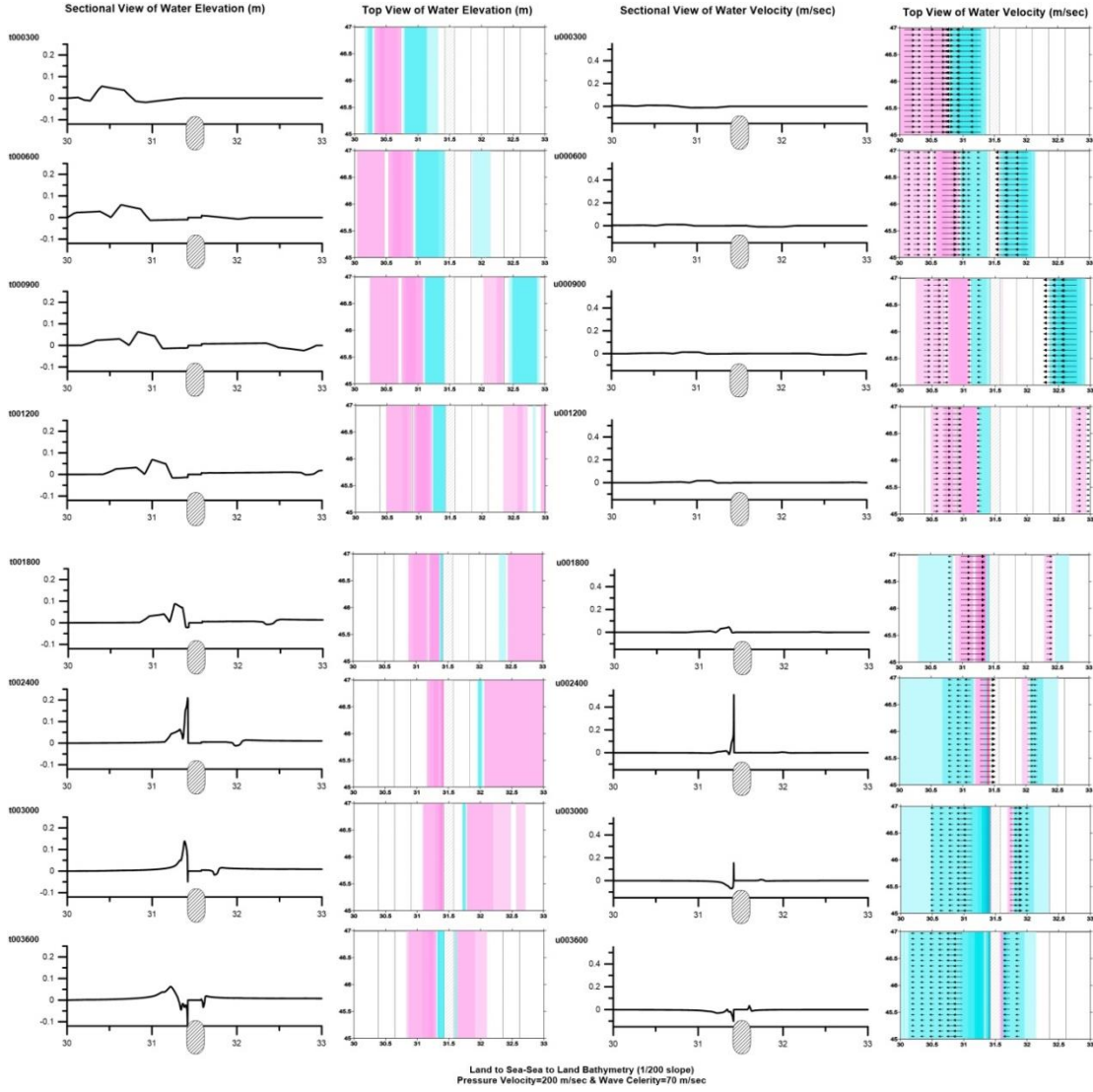


Şekil 3.38. Artan ve Azalan Eğimli Batimetrimin Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının Üstten Görünümü



Şekil 3.39. Artan ve Azalan Eğimli Batimetrimin Üzerindeki Yüksek Basınç Bandının A-A Kesit Görünümü

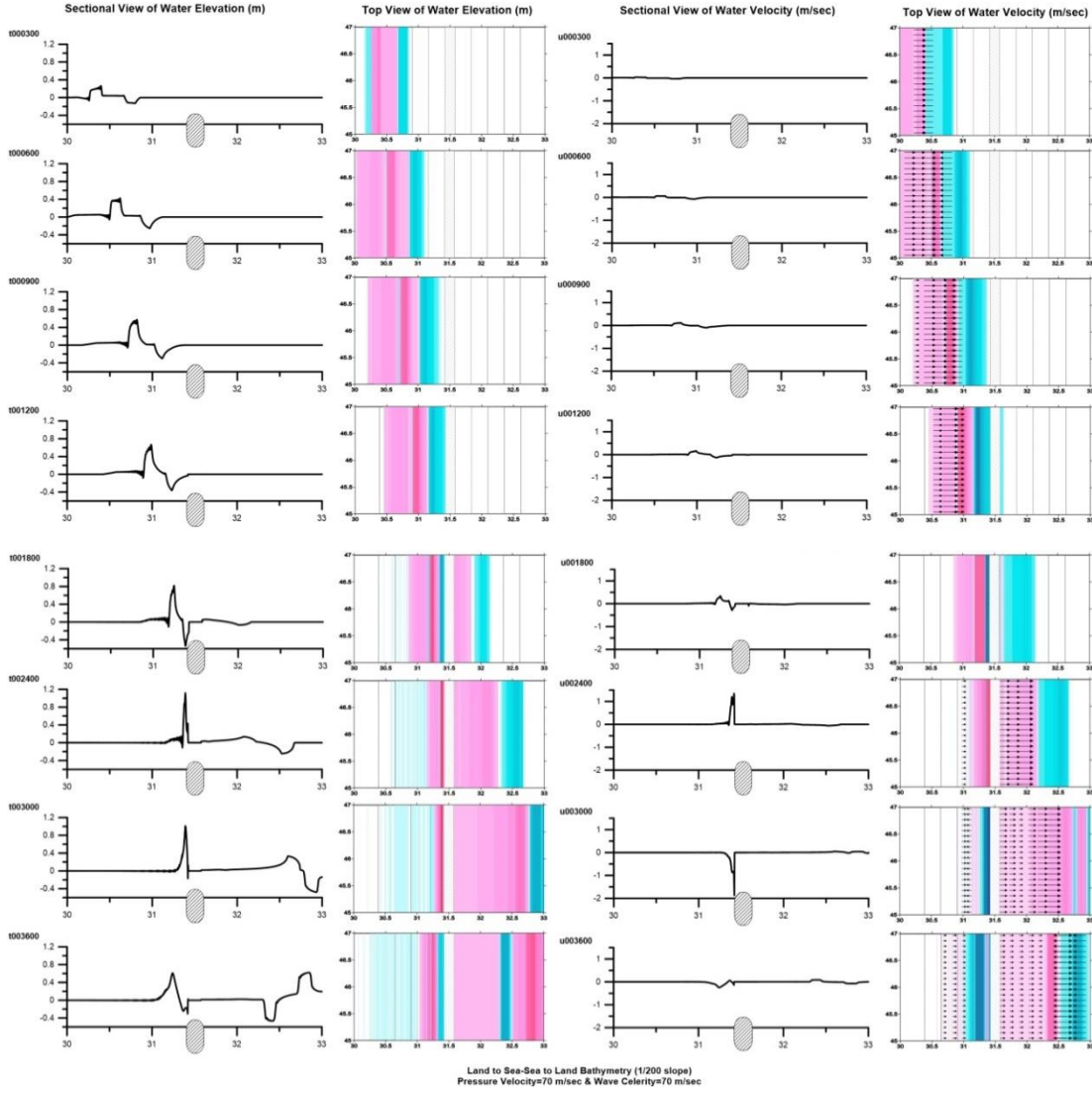
Bu basenler için de üç farklı hız koşulu düşünülerek benzetim yapılmıştır. Bütün koşullarda maksimum dalga hızı 70 m/s'dir. Durum 1 için basınç hızı 200 m/s olarak verilmiş ve dalga yüksekliği ve hızı için sonuçlar elde edilip Şekil 3.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Artan ve Azalan Eğimli Basen için $V=200$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 1)

Simülasyonun başlangıcında, 5.dakikada 5.5 cm dalga yüksekliği görülür. Simülasyonun 40.dakikasına kadar su seviyesindeki değişim çok azdır. 40. dakikada ise basenin sol kısmında su seviyesinde yükselme gözlenir. Dalga yüksekliği 21 cm olarak hesaplanmıştır. Daha sonra dalga kıyıdan yansıyarak ters istikamette ilerleme gösterir. Ayrıca, basenin sağ tarafında herhangi önemli bir değişim gözlenmez. Maksimum dalga yüksekliği basenin sol bölgesinde görülmüştür.

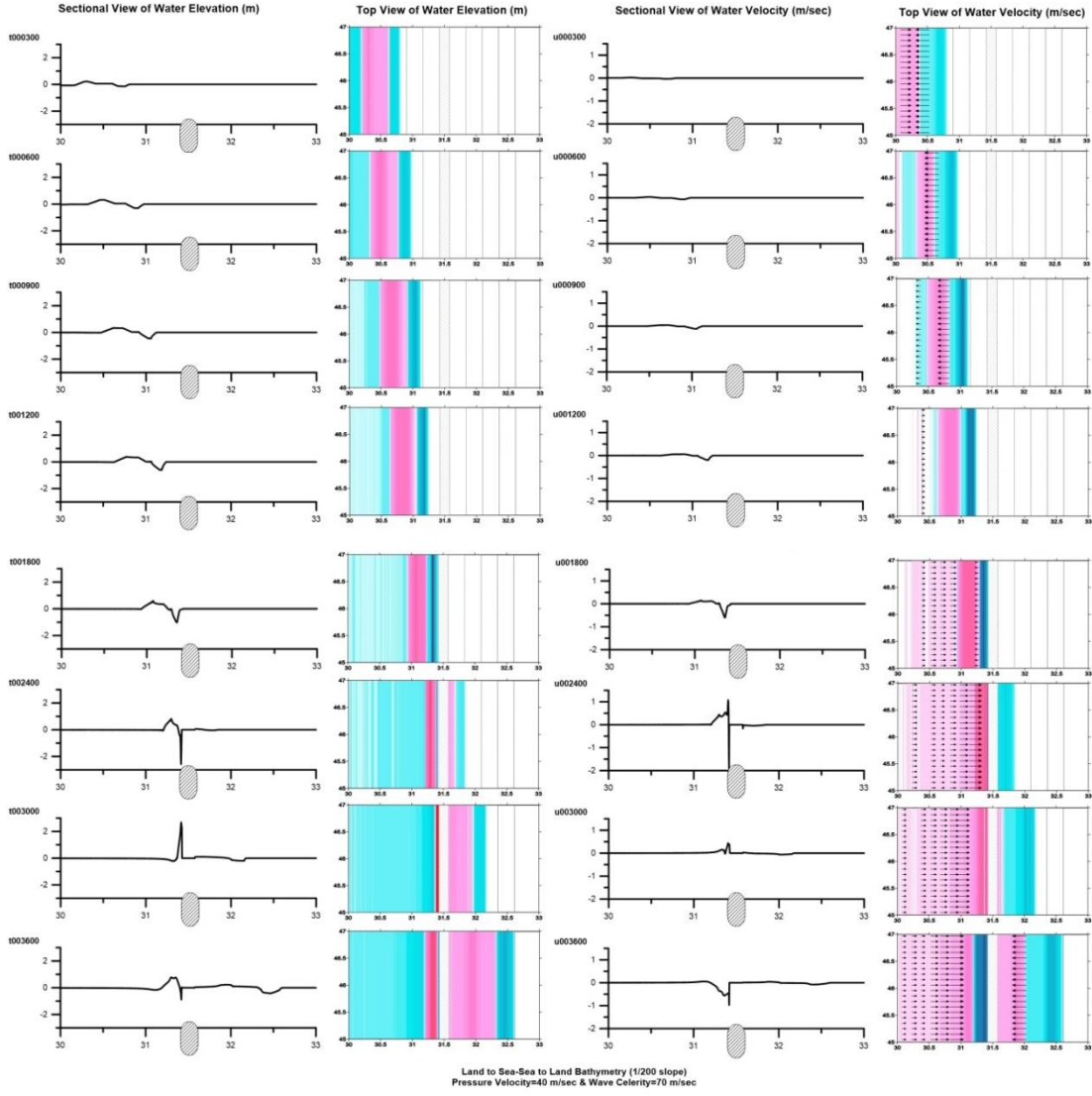
Durum 2'de basınç hızı 70 m/s sabit hızla soldan sağa doğru hareket eder. Benzetim çalışmasının sonuçları Şekil 3.41 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.41. Artan ve Azalan Eğimli Basen için $V=70$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 2)

İlk hesaplanan dalga yüksekliği 26.5 cm'dir. Dalga kıyıla karşılaşana kadar, yüksekliği sürekli artar. Simülasyonun 40.dakikasında maksimum dalga yüksekliği 1.12 m olarak hesaplanmıştır. Tam bu zaman adımında, dalga karayla karşılaşmıştır. Daha sonra dalga karadan yansiyarak ters yönde hareketine devam eder ve bu yansıma anında en yüksek dalga boyuna ulaşır. Durum 2 için basenin sol tarafında 1.35 m'lik en yüksek dalga hesaplanmıştır. Bir başka taraftan, basınç bandı 30 dakikada karaya ulaşır. 30 dakikadan sonra yüksek basınç bandı sebebiyle alçalan eğimin olduğu tarafta su yüzeyinde çökmeler gözlemlenmiştir.

Durum 3 için elde edilen sonuçlar Şekil 3.42 de gösterilmiştir.



Şekil 3.42. Artan ve Azalan Eğimli Basen için $V=40$ m/s, $c_{max}=70$ m/s Olduğunda Sonuçlar (Durum 3)

Durum 3'te 5. dakikada görülen dalga yüksekliği 22.7 cm'dir. 40. dakikada 21.8 cm'lik dalga karaya çarpıp yansımış ve 10 dakika sonra 2.68 m'lik en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Ancak, yansımadan sonra dalganın hızı yavaşlamıştır. Aynı zamanda, basenin sağ tarafında fazla önemli aralıklarda olmayan çalkantılar gözlemlenmiştir.

Bütün üç durum birlikte düşünüldüğünde, şu sonuçlara varılır: İlk olarak artan eğimdeki batimetride rezonans sebebiyle Durum 2 içinde yüksek su seviyesi gözlemlenmiştir. Ancak, yansımadan dolayı en yüksek dalga yüksekliği Durum 3'te hesaplanmıştır. Daha sonra, su seviyesinde düşüş sırasıyla 10.dakikada, 30.dakikada ve 50. dakikada; Durum 1, Durum 2 ve Durum 3'te görülmüştür. Genellikle, dalga soldan sağa doğru ilerlerken, amplifikasyon, karaya doğru azalan derinlik üzerinde gözlemlenmiştir. Tam tersi, sağ taraftaki basende Durum 2

dışında amplifikasyon görülmemiştir.

Bütün basenler için genel sonuç olarak bütün maksimum su seviyeleri tabloda verilmiştir (Tablo 3.2).

Tablo 3.2. Bütün Basen Şekilleri ve Durumlar İçin Maksimum Su Seviyeleri

Batimetriler	DURUM 1	DURUM 2	DURUM 3
Düz Taban	6 cm	80 cm	30 cm
Üçgen Taban	5.2 cm	100 cm	80 cm
1/10 Eğimli Şelf	8.9 cm	122 cm	48.4 cm
1/100 Eğimli Şelf	10 cm	177 cm	70 cm
1/200 Eğimli Şelf	10 cm	210 cm	80 cm
Artan ve Azalan Eğimli	21 cm	112 cm	268 cm

3.5 Sonuçlar

Anormal tsunami benzeri dalgalar gibi ekonomik kayıp, yaralanma ve ölüme neden olan uzun periyotlu dalgalar düzenli aralıklarda tüm dünyada belirli yerlerde görülmektedir. Bunlar fiziksel özellikleri açısından olağan tsunami (örneğin dalga periyodu, yükseklik) ve yıkıcı sonuçları ile benzerlik gösterebilirler. Bununla birlikte, üretim mekanizmaları birbirinden farklıdır. Bu çalışmanın ilk aşamasında, bu tür su yüzeyi dalgalanmaları ve dalga yükselmelerindeki son gözlemler gözden geçirilmiştir. Olayların temel nedeninin meteorolojik parametreler ve yerel morfolojik koşullar ile ilgili olduğu görülmektedir.

Olası deniz su seviyesi anormallikleri ve (fırtına olmayan sakin deprem bölgesinde) kıyı yükseltilerindeki atmosferik basınç hareketi etkilerini araştırmak amacıyla, farklı testler yapıp sonuçları karşılaştırılıp ve tartışılmıştır. Deniz seviyesi farklarının en muhtemel nedeni atmosferik basınç bozuklukları olduğundan bu testlerde yüksek atmosferik basınç hareketi girdi olarak kullanılır. Ayrıca, testlerde, atmosferik basınç farklı şekil batimetriler üzerinde batıdan doğuya belirli bir sabit hızla ilerler. Ayrıca, atmosferik basıncın yayılma hızı (V) ve dalga hızının (c) çakışmasının yanında, batimetrik şekiller de dalga yükselmelerinde önemli

bir role sahiptir. Kıyıya yakın yerlerde ani derinlik değişiklikleri amplifikasyonlara neden olabilir.

Genel olarak atmosfer basınç değerleri bilindiğinde, meteotsunamiler kolayca iki boyutlu dalga denklemleri ile modellenebilir. Test çalışmalarında, kartezyen koordinatlarda atmosferik basınç şartları ile 2 boyutlu doğrusal olmayan sığ su denklem setlerini çözen sayısal model NAMI DANCE-P su yüzeyi yükselmelerini, yön ve su hızları ve momentum akıları büyüklüğünü hesaplamak için kullanılır. Tsunami simülasyonu ve görselleştirme kodu NAMI DANCE-P, NAMI DANCE'ın yeni bir versiyonu olarak geliştirilmiştir. Yeni modeli doğrulamak için, sayısal testler normal şekildeki (500m derin, düz dipli) batimetri ve farklı hızlardaki yüksek basınç hareketleri kullanılarak yapılmaktadır. Sonuçlar atmosferik basınç terimini içeren dönüşü ihmal edilen Dünya'da ideal bir akışkan için Euler denklemleri setlerinin ilgili analitik çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Sayısal modelin iyi sonuç vermesiyle birlikte, sayısal ve analitik hesaplamaların sonuçlarının birbirleriyle kabul edilebilir tutarlılıkta olduğu görülür.

Yapılan doğrulamalardan sonra birçok sayıda benzeşim 6 farklı batimetrik şekil için yapılmıştır: (i) üçgen batimetri, (ii) 1:10 eğimli şelf basen, (iii) 1:100 eğimli şelf basen, (iv) 1:200 eğimli şelf basen, (v) yukarı doğru eğimli (karaya doğru) ve (vi) aşığı doğru eğimli (açık denize doğru) batimetri. Her batimetri için üç farklı hava basıncı hızı (200 m/s, 70 m/s ve 40 m/s) tespit edilir ve simülasyonlar için girdi olarak verilmiştir. Sayısal modelden elde edilen sonuçlara ilişkin, maksimum dalga yükseklikleri basınç hızının dalga hızına oranının (V / c) 1'e eşit olduğu bölgelerde görülmüştür. Bu eşitlik dalga sayısı ve basınç kuvveti periyodunun okyanustaki yüzey dalga periyoduna eşit olduğu anlamına gelmektedir (Proudman, 1929, Proudman rezonans durumu). Öte yandan, havza şekillerinin dalga yüksekliklerini nasıl etkilediği sayısal sonuçlara göre de tartışılmıştır.

Bu bölümde elde edilen ana sonuçlar aşığıda verilmiştir.

- Denizdeki salınımların oluşma nedenlerinden biri atmosferik basıncın hareketi ile oluşan dalğanın hızı arasındaki ilişkidir. Basınç hızı dalga hızından yüksek ise dalga oluşur ve sabit genlikler ilerler. Bu durumda hızlı giden basınç yeterli büyüklükte dalga oluşturamaz. Diğer taraftan ise, basınç hızı dalga hızından yavaş ise bu kez de oluşan dalga ilerler ve basınç arkadan yavaş gelerek dalga üretmeye devam eder. Eğer basınç hızı ile dalga hızı aynı ise, o zaman dalga basınç ile beraber oluşup hareket eder ve genliği de yükselir.
- Dalğanın büyümesine etki eden diğer önemli faktör ise deniz taban topoğrafyası (batimetri) ve kıyı morfolojisidir. Üçgen kesitli basende incelenen dalga oluşum ve

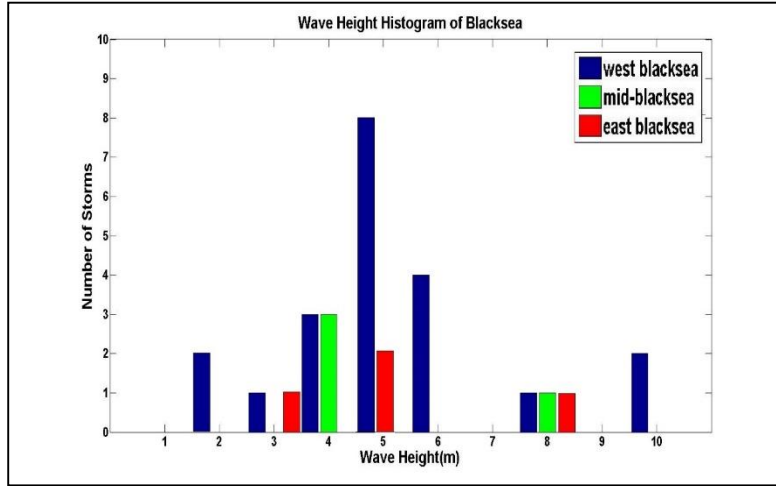
hareketi sayısal deneylerinde dalganın 1 metreye yakın (93.8 cm) genliğe ulaştığı görülmüştür. Bu genlik basınç ve dalga hızının aynı olduğu derinlikte gözlenmiştir. Üçgen genlikli basenlerde derin olan orta kısımda dalga hızlı ilerlemekte ancak yeterince büyümemektedir. Kuzey ve Güney sınırlarında derinlik azalması nedeniyle dalganın bu bölgeye yönelmesi gözlenmiştir.

- İkinci önemli gözlem ise şelf basenlerde dalganın 1.53 m genliğe ulaşmasıdır.
- Üçüncü gözlem ise kıyıya doğru sığlaşan ya da kıyıdan uzağa derinleşen taban eğimi durumlarında basıncın kıyıya doğru ya da kıyıdan uzağa hareketi ile oluşan dalgaların farklı davranışlar göstermesidir. Öyle ki eğer basınç kıyıya doğru ilerlerse oluşan dalga büyümektedir. Tersine ise, eğer basınç kıyıdan derine giderse dalga büyümemektedir. Bu durumda deniz taban topoğrafyasının dalga oluşumu ve büyümesine etkisi olduğu ortaya çıkmaktadır. Basıncın karaya doğru ilerlemesi durumunda oluşan dalganın genliği 2.68 m'ye ulaşabilmektedir. Bu durumda kıyıdan yansıyan dalga ile birleşme nedeniyle büyüme yüksek olmaktadır.
- Dördüncü önemli çıktı, şelf basenlerin eğimlerinin dalga büyümesine etkisi olarak belirtilebilir. Dalga şelf topuğundan yukarı tırmanırken büyümektedir. 1/10, 1/100 ve 1/200 olarak seçilen şelf eğimleri için aynı basınç değerinin aynı hızla ilerlemesini karşılaştırmak üzere yapılan sayısal deneylerde dalga genliği yatık eğimlerde daha da büyümektedir.
- Bu bölümdeki çalışmalardan elde edilen bir başka sonuç ise, proje kapsamında yeni bir modül ile atmosfer basıncı hareketini de hesaplamaya NAMI DANCE-P sürümünün basınç hareketleri ile oluşan uzun dönemli dalgaları başarı ile modellemesidir.

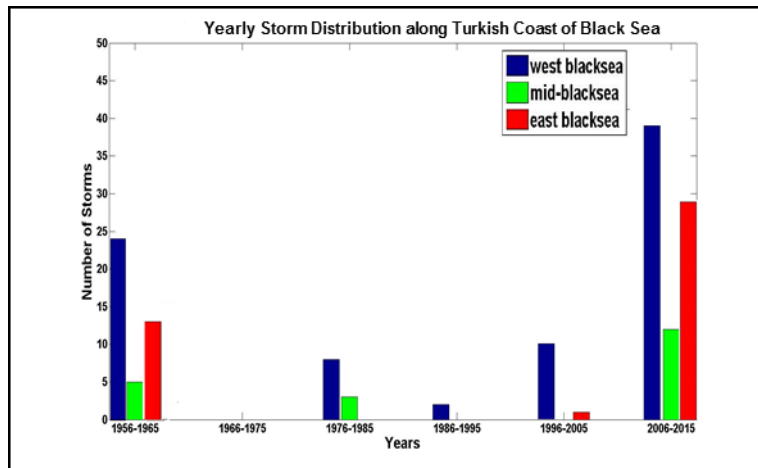
4. KARADENİZDEKİ FIRTINALARIN ANALİZİ

Karadeniz'de yaşanan ve yaşanabilecek deniz afetlerinin modellenmesi ve modellerin güvenilir olması olarak belirlenmiştir. Tsunami, fırtınalar, iklim değişimi, ender dalgalar ve

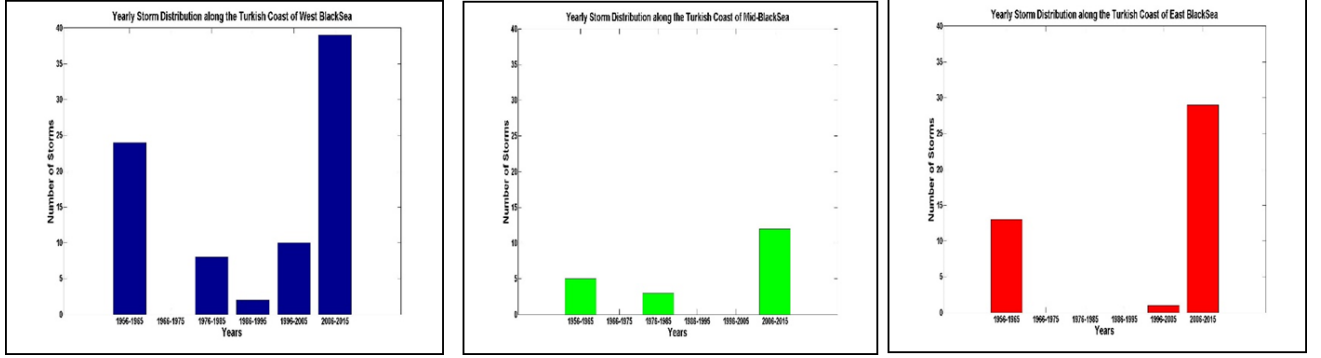
rezonans etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. İlk olarak yakın tarihte meydana gelen fırtına olayları özellikle yerel ve ulusal medya kaynakları (gazete, dergi, internet gibi) kullanılarak araştırılmıştır. Bu araştırma sonunda son 70 yılda Türkiye'nin Karadeniz kıyılarında 146 şiddetli fırtına olayı olduğu belirlenmiş ve bu fırtınalar rüzgar hızları, lokasyon ve tarihlerine göre kategorilerde incelenmiştir. Fırtınalar ile ilgili genel bilgiler elde edilebilse de, dalga ölçümü bu bölgede çok azdır. Yapılan literatür taramasında da sadece 29 fırtına için dalga hakkında bilgiye erişilmiştir.



Şekil 4.1. Dalga yüksekliği ve bölgeler (mavi – Batı Karadeniz, yeşil – Orta Karadeniz, kırmızı – Doğu Karadeniz)



Şekil 4.2. Yıllara göre fırtına sayısı dağılımı ve bölgeler (mavi – Batı Karadeniz, yeşil – Orta Karadeniz, kırmızı – Doğu Karadeniz)

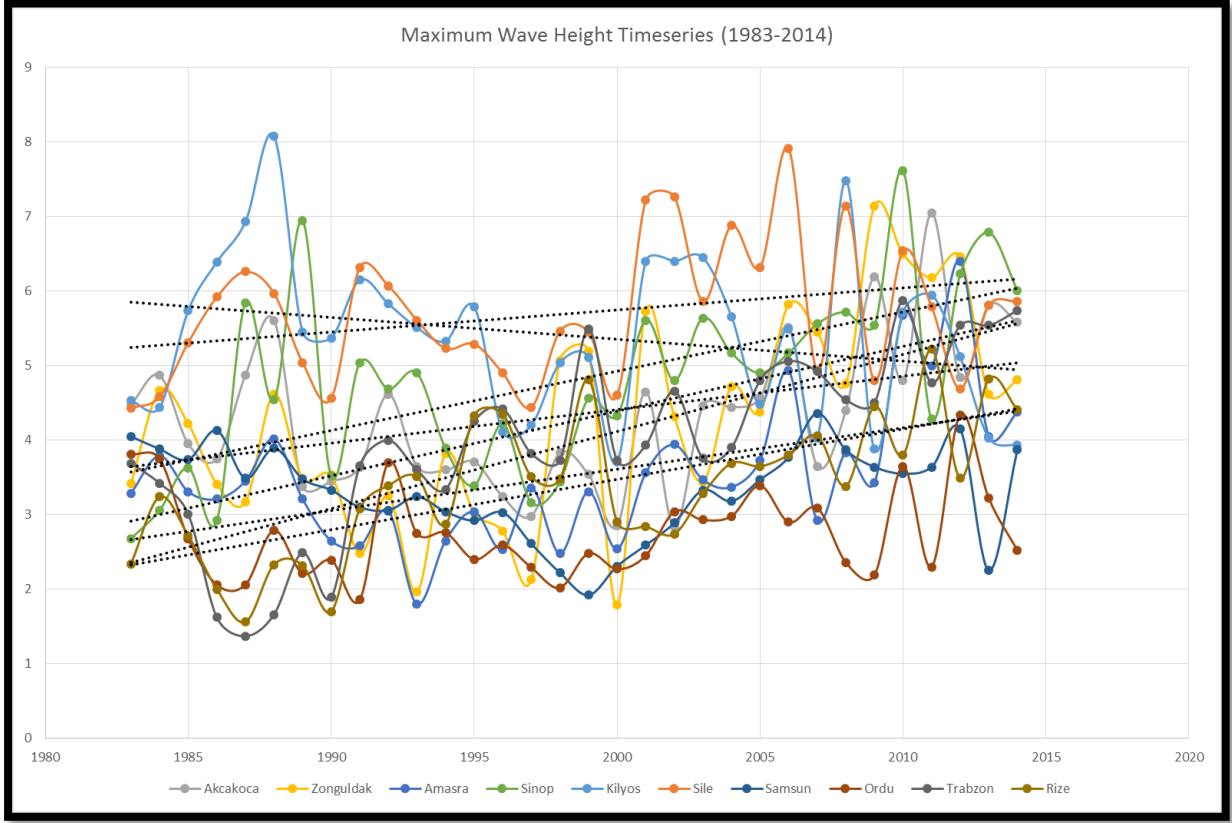


Şekil 4.3. Yıllara göre fırtına sayıları – bölgeler için ayrıntılı gösterim (mavi – Batı Karadeniz, yeşil – Orta Karadeniz, kırmızı – Doğu Karadeniz)

Şekil 4.1-4.3'de de görüldüğü üzere son 10 yılda gözlenen fırtına sayısında tüm bölge için bir artış yaşanmıştır. Ayrıca 1985-1995 yılları arasında da tam tersi bir durum olmuş ve fırtına sayısı neredeyse sıfıra yaklaşmıştır. Bir başka ortaya çıkan sonuç, Batı Karadeniz bölgesinde hem sayıca hem de şiddet olarak çok daha fazla fırtına olduğudur. Dalga yüksekliği dağılımına baktığımızda dalgaların ortalama 5 metre olarak gözlemlendiği, ancak zaman zaman 8-10 metre aralığında da oldukça yüksek dalgaların kıyıya geldiği anlaşılmaktadır.

Son yıllarda gözlenen fırtına sayısındaki artışın nedeni kesin olarak söylenememektedir. Ancak kıyıdaki yapılaşmanın ve dolayısıyla tehdit altında kalan veya hasar gören yapıların sayısının ve maliyetinin artması, bu olayların çok daha fazla medyada yer almasına sebep olmuş olabilir. Bu durumda dolaylı olarak çok daha fazla gözlemin yazılı olarak kaydedilmesini sağlamış ve artış olduğu izlenimini vermiş olabilmektedir.

Fırtınalarda ve bağlı olarak dalga yüksekliklerindeki artışın bir trend olup olmadığını anlayabilmek amacıyla ECMWF operasyonel veri seti kullanılarak Karadeniz kıyıları için dalga modeli çalışması yapılmıştır. Bu amaçla 1983-2014 yılları arasındaki rüzgar verileri kullanılmış ve Kıyı ve Deniz Mühendisliği laboratuvarında geliştirilen ve yıllardır kullanılan JONSWAP spektrumu ile analiz yapan Derin Deniz Dalga Modeli çalıştırılmıştır. Bu çalışma sonunda Karadeniz kıyılarındaki belirli alanlarda elde edilen yıllık en yüksek dalga değerleri zamansal olarak grafiklerle gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Modellenen yıllık en yüksek dalgalar ve trend çizgileri

Şekil 4.4'den görüleceği üzere Karadeniz kıyılarında son 30 yılda bir artış vardır. Ancak bu genel trendin daha kısa süreli olarak veriler incelendiğinde özellikle 1985-1995 yılları için geçerli olmadığı görülmektedir. Ancak bu grafik literatür taramasından elde edilen veriler ile örtüşmektedir. Aynı şekilde Batı Karadeniz bölgesinde modellenen dalgaların çok daha yüksek olduğu, Orta Karadeniz'de ise çok daha düşük dalga yükseklikleri modellendiği gözlenmektedir. Bu durum da literatür çalışması ile uyum sağlamaktadır. Her ne kadar genel trend artış olduğunu gösterse de bu artışın doğrudan iklim değişikliği ile ilgili olduğunu ortaya koyabilmek mümkün değildir. Özellikle on yıllık dönemsel bir değişim izlenimini vermesi, bu tarz bir çalışmanın çok daha uzun veri setleri ile yapılması gerekliliğini göstermiştir. Ancak Türkiye kıyıları için çok az noktada daha uzun rüzgar veri seti bulunmakta ve bu veriler karada alınan ölçümler olması dolayısı ile geniş bantta belirsizlik içermektedir. Ancak Karadeniz kıyılarımızın genel olarak dalga ve fırtına iklimlerinin belirlenmesi açısından bu çalışma önemli sonuçlar vermektedir.

Bu sonuçlardan en önemlisi Karadeniz kıyılarımızda dalga modeli için kullanılan rüzgar veri setinin sonuçlar üzerinde çok etkili bulgudur. Proje kapsamında yapılan başka bir çalışmada OMGİ verileri ile ECMWF verileri karşılaştırılmış ve her iki veri seti kullanılarak dalga modeli çalışması yapılmıştır. Bu çalışma sonunda elde edilen bazı bilgiler aşağıdaki tablolarda verilmektedir.

Tablo 4.1. Kilyos Dalga Modeli - Uç Değer İstatistiği Çalışması

	MET		BEST DIST	ECM		BEST DIST	H ₅₀ DIFF (%)	H ₁₀₀ DIFF (%)
	H ₅₀	H ₁₀₀		H ₅₀	H ₁₀₀			
ALL DIRECTIONS	8.75	9.28	Weibull(k4=2.0)	8.12	8.52	Weibull(k4=2.0)	-7.26%	-8.19%
NNE	6.72	7.26	Weibull(k4=2.0)	8.83	9.51	Weibull(k4=2.0)	31.38%	31.02%
NNW	8.27	8.72	LogNormal	6.34	7.59	LogNormal	-23.38%	-13.00%
N	7.31	7.92	Weibull(k4=2.0)	6.54	6.99	Weibull(k4=2.0)	-10.51%	-11.70%

Tablo 4.2. Akçakoca Dalga Modeli - Uç Değer İstatistiği Çalışması

	MET		BEST DIST	ECM		BEST DIST	H ₅₀ DIFF (%)	H ₁₀₀ DIFF (%)
	H ₅₀	H ₁₀₀		H ₅₀	H ₁₀₀			
ALL DIRECTIONS	3.78	4.18	Gumbel	6.33	7.07	Gumbel	67.47%	68.95%
NNE	2.68	2.92	Weibull(k3=1.4)	4.63	4.98	Weibull(k4=2.0)	72.69%	70.59%
N	3.3	3.63	Weibull(k3=1.4)	4.15	4.47	Weibull(k4=2.0)	25.67%	23.20%

Tablo 4.3. Amasra Dalga Modeli - Uç Değer İstatistiği Çalışması

	MET		BEST DIST	ECM		BEST DIST	H ₅₀ DIFF (%)	H ₁₀₀ DIFF (%)
	H ₅₀	H ₁₀₀		H ₅₀	H ₁₀₀			
ALL DIRECTIONS	12.8	13.54	LogNormal	4.73	6.15	FT 2(k1=2.5)	-63.08%	-54.27%
NE	10.53	11.97	FT 2(k4=10.0)	6.99	9.31	FT 2(k1=2.5)	-33.67%	-22.21%

Tablo 4.4. Sinop Dalga Modeli - Uç Değer İstatistiği Çalışması

	MET		BEST DIST	ECM		BEST DIST	H ₅₀ DIFF (%)	H ₁₀₀ DIFF (%)
	H ₅₀	H ₁₀₀		H ₅₀	H ₁₀₀			
ALL DIRECTIONS	7.15	7.46	LogNormal	7.19	7.70	LogNormal	0.63%	3.14%
WNW	7.34	7.69	Weibull(k4=2.0)	7.62	8.23	Weibull(k4=2.0)	3.90%	6.96%
NW	6.60	7.03	LogNormal	5.63	6.20	LogNormal	-14.76%	-11.83%
NNW	6.02	6.39	Weibull(k4=2.0)	5.18	5.57	Weibull(k4=2.0)	-14.00%	-12.92%
N	5.48	5.91	Weibull(k4=2.0)	4.64	5.03	Weibull(k4=2.0)	-15.24%	-14.88%

Tablolar incelendiğinde ortaya çıkan sonuç çok önemlidir. Veri setlerine bağlı olarak yapılan model çalışma sonuçları birbirinden çok farklı olabilmektedir. Bu farklılık kimi noktalarda %50 ve üzerine çıkmaktadır. Hangi veri setinin bölgeyi daha iyi tanımladığı ise her nokta için ayrıntılı çalışma yapılarak ortaya konmalıdır. Çünkü iki veri seti arasındaki farklılık noktadan noktaya değişmekte ve belirli bir trend görülmemektedir. Bazı yerlerde ise (Sinop) oldukça iyi şekilde örtüşmektedir. Bu sonuç sadece istatistiksel bir sonuç değildir. Özellikle kıyı yapıları tasarımında kullanılan bir veri olması nedeniyle bu farklılıklar proje tasarım ve inşaat açısından çok önem kazanmaktadır. Tasarım dalgası verisindeki %10'luk bir oynama, kullanılan taş ağırlığını %30-40 oranında etkilemekte, bu durumda kıyı yapılarının fırtına karşısındaki dayanımını ciddi olarak etkilemektedir. Aynı şekilde maliyetler de benzer şekilde etkilenmektedir. Bu nedenle, Karadeniz kıyıları için fırtına modellemesi sırasında birden fazla ve yeni veri setleri ile de çalışılması gerektiğine karar verilmiştir.

Bu çalışmalar kapsamında çıkan bir başka sonuç da aynı fırtına altında kıyılarda yaşanan ve gözlenen dalgaların bazı noktalarda çok daha şiddetli olduğudur. Bu noktalara örnek Giresun olarak verilebilir. Orta Karadeniz Bölgesinde olması nedeniyle genel trende göre çok

daha az etkilenmesi beklenen Giresun kıyıları her geçen sene çok daha şiddetli dalgalara maruz kalmakta ve kıyı alanları çok daha fazla hasar görmektedir. Hem bu ilginç durumu analiz edebilmek, hem de Karadeniz genelinde fırtına ve fırtına kabarması modeli çalışmaları için bir temel sağlamak adına Giresun'da hasar yaratan Şubat 1999 ve Eylül 2014 fırtınalarının modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Bu model çalışmaları için hem farklı veri setleri hem de farklı sayısal modeller kullanılarak, aynı zamanda Karadeniz kıyıları için en optimum dalga modeli ve parametre değerleri elde edilmeye çalışılmaktadır. Proje kapsamında karşılaştırma için de kullanılacak olan bu model çalışmalarında veri seti olarak ECMWF operasyonel veri seti ile CFSR veri setleri kullanılmıştır ve özellikleri aşağıda verilmektedir.

ECMWF operasyonel veri seti:

- Rüzgar hızları deniz seviyesinden 10 m yüksekte (u and v)
- 6 saatte bir
- 0.1°*0.1° uzamsal çözünürlük

CFSR veri seti (NCEP):

- Rüzgar hızları deniz seviyesinden 10 m yüksekte (u and v)
- Saatlik
- 0.312°*0.312° ve 0.205°*0.205° uzamsal çözünürlük

Bu iki veri seti dışında ayrıca iki farklı sayısal model ile çalışılmıştır. Bu modeller SWAN ile WAVEWATCH III olup, her iki modelde derin deniz dalgası modelleyip, kıyıya taşınım parametreleri ile sığ-derin deniz arasında da dalgayı tanımlamaktadır. Ülkemiz kıyılarında SWAN modeli başka çalışmalar için kullanılmış olsa da bu iki modelin karşılaştırılması ilk defa yapılmaktadır. Öncelikle Karadeniz baseni bütünüyle modellenmiş sonra Giresun kıyıları için daha ayrıntılı batimetre ile çalışma devam etmiştir. Kurulan sanal istasyonlar ile çeşitli noktalarda dalga yükseklikleri zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Ne yazık ki her iki fırtına için de ölçüm bulunmamaktadır. Ancak çok çeşitli video ve fotoğraflar literatür taraması ile elde edilmiştir. Bu fotoğraflar kullanılarak elde edilen sonuçlar her iki fırtınada da dalgaların 6 metre ve üzerinde yüksekliğe sahip olduğu, dalga periyodunun ise 18 sn olduğunu göstermektedir. Ayrıca 1999 yılındaki fırtınada Giresun Limanı ana mendireği yıkılmış olup, konuyla ilgili bilirkişi raporları incelendiğinde kabul edilen dalga yüksekliğinin benzer mertebe alındığı görülmektedir.

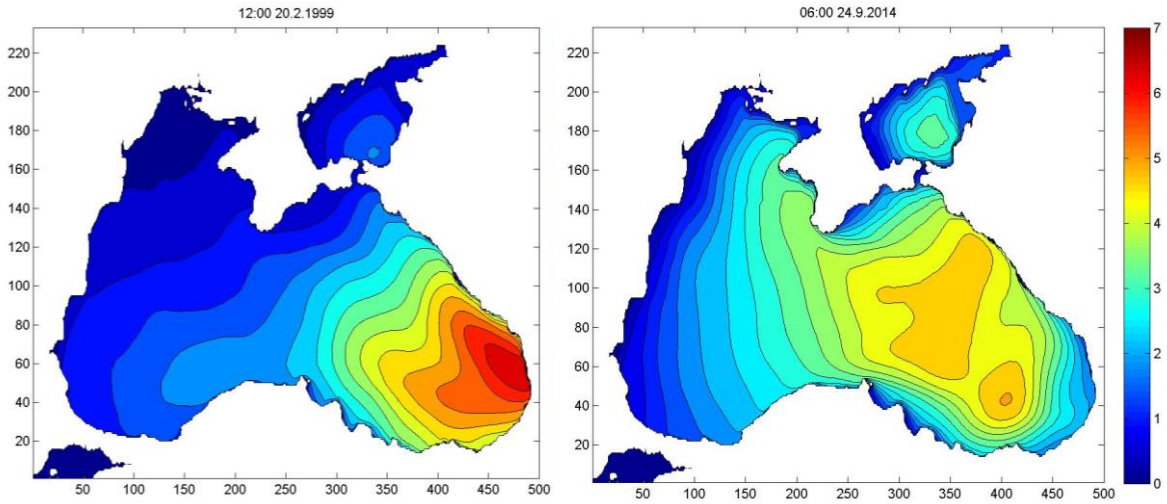


Şekil 4.5. 1999 fırtınası sırasında Giresun Limanı ana mendireğinin yıkılış görüntüleri

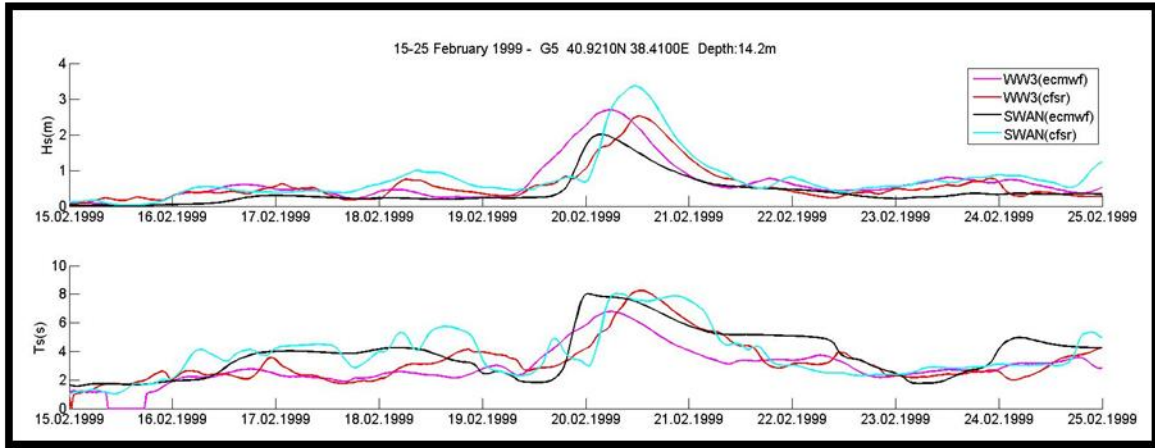
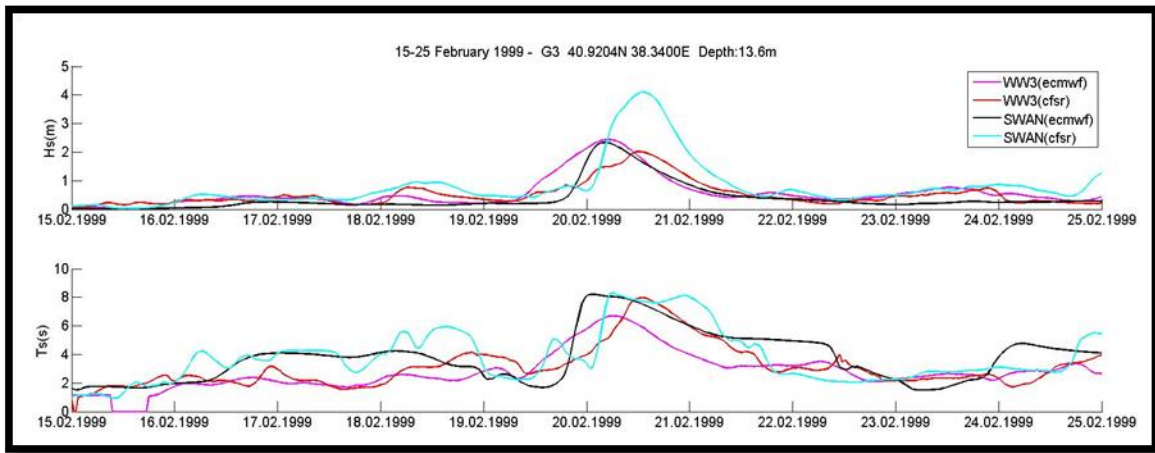
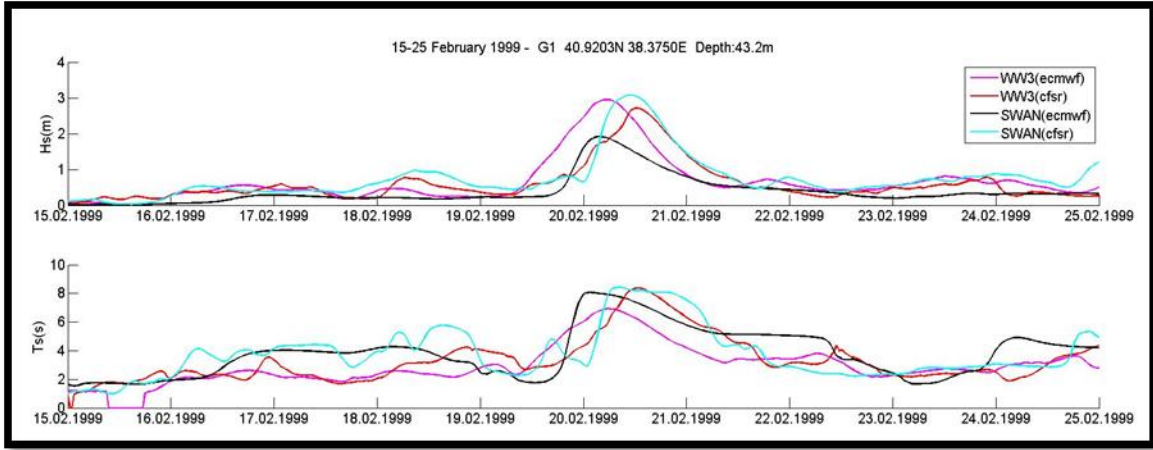
Bu proje raporunda sunulan sonuçlar elde edilen ilk sonuçlar ve karşılaştırmalar olup, ikinci yıl süresince özellikle Sinop, Hopa ve Rus ortaklardan elde edilen dalga ölçümleri kullanılarak en optimum veri seti – dalga modeli ikilisi ortaya konacaktır. Böylece önümüzdeki süreçte ön görülebilecek fırtına riskleri daha doğru olarak modellenecektir. İlk sonuçlar aşağıda verilmektedir:



Şekil 4.6. Sanal istasyonlar – 1. Çalışma



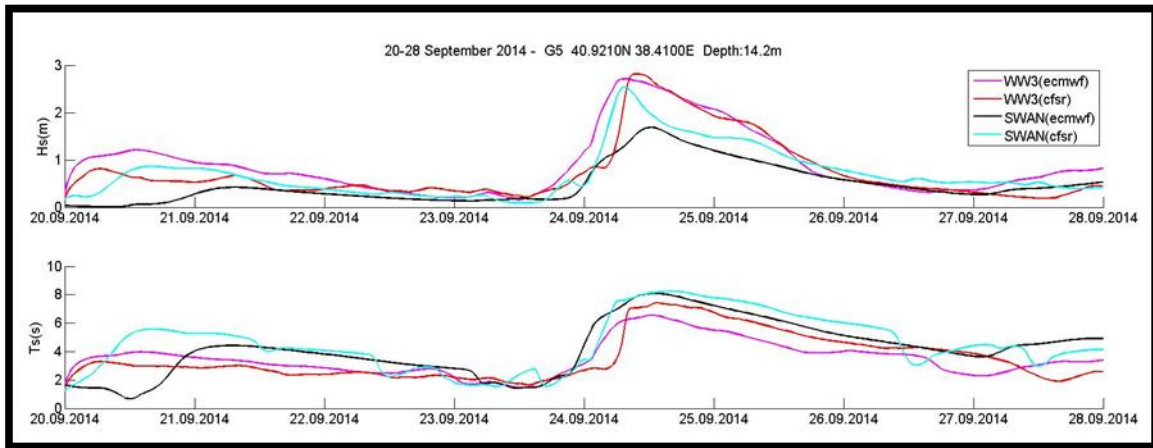
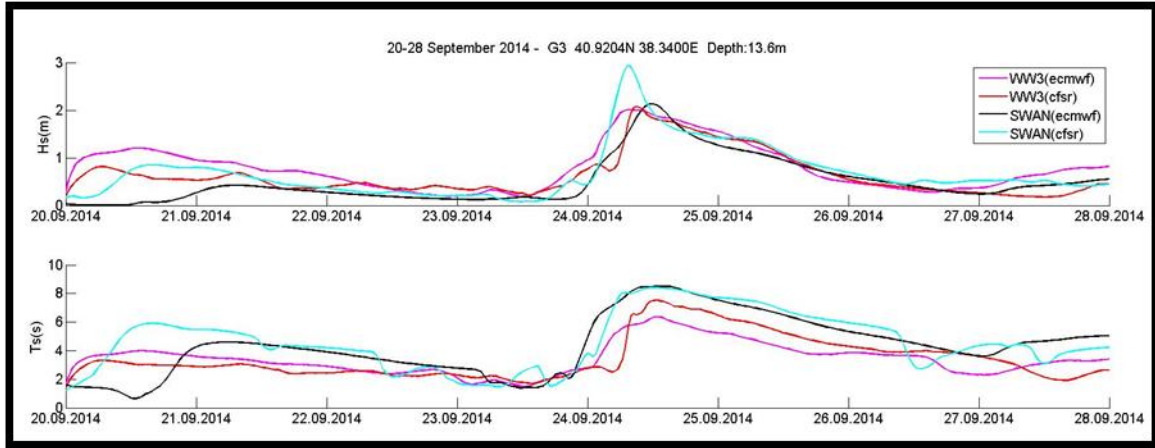
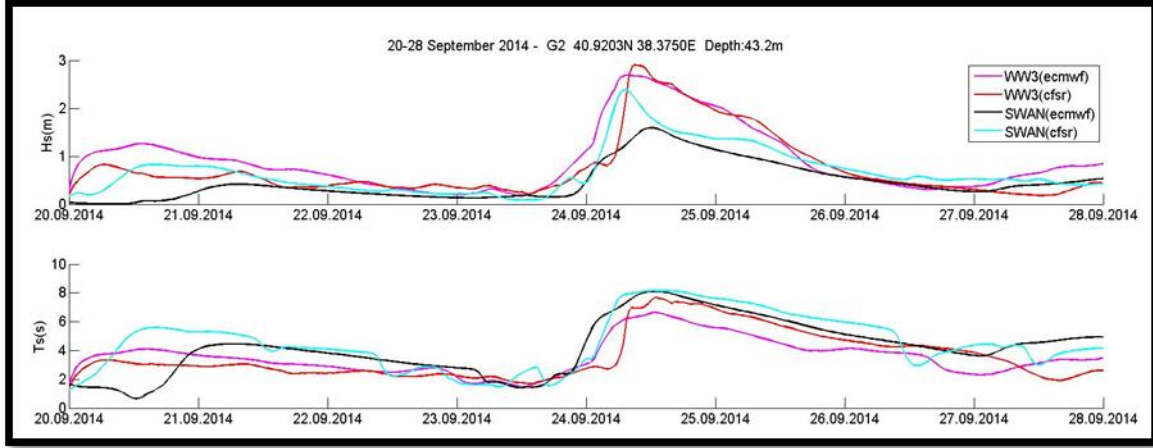
Şekil 4.7. 1999 ve 2014 Fırtınalarının Karadeniz’de yarattığı dalga yükseklikleri



Şekil 4.8. 1999 fırtınası model sonuçları: G1, G3 ve G5 istasyonları için verilmektedir.

Şekil 4.8’de her iki veri seti ile iki sayısal model eşleştirilerek aynı fırtına için dört adet modelleme çalışmasının sonuçları verilmektedir. Karşılaştırma yaptığımız değerler 6 metre ve üzeri dalga yüksekliği olduğu göz önüne alınca en iyi sonucu SWAN sayısal modeli ile CFSR veri seti ikilisinin verdiği görülmektedir. Diğer sonuçlar incelendiğinde WAVEWATCHIII modelinin genel olarak her iki veri seti ile benzer sonuçlar verdiği ancak SWAN modelinde veri

setinin etkisinin çok daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca düzenli olarak en düşük sonucu SWAN ile ECMWF veri seti ikilisi vermektedir ki bu ikili Türkiye kıyıları için en çok kullanılan çalışma ikilisidir. Dalgı yüksekliklerinde belirgin farklılıklar görölmesine rağmen, periyot için aynı durum geçerli değildir. Bu da üzerine araştırılması gereken bir başka konu olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.9. 2014 Fırtınası model sonuçları : G1, G3 ve G5 istasyonları için verilmektedir.

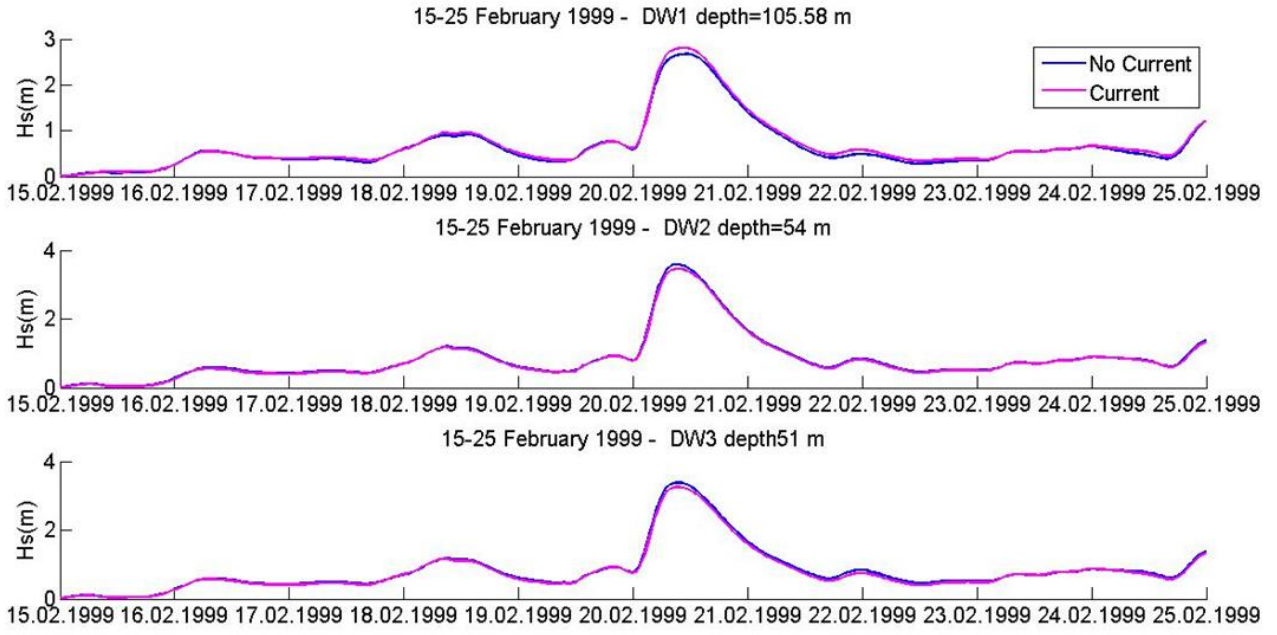
Şekil 4.9'da bu sefer benzer çalışma 2014 yılındaki bir fırtına için yapılmıştır. Bu sonuçlarda ise WAVEWATCHIII modelinin özellikle derin deniz alanında biraz daha yüksek dalgalar modellediği görülmektedir. Ancak veri setleri arasında daha iyi sonuç veren yine CFSR veri setidir. Periyotlar için de benzer durum geçerlidir.

Hem Şekil 4.8 hem de Şekil 4.9 beraber incelendiğinde özellikle G3 noktasında dalga yüksekliğinin SWAN-CFSR ikilisi tarafından çok daha yüksek bulunduğu görülmektedir. Bu durum bu noktanın kırılma bölgesi içinde kalması sonucunu çıkarmaktadır. Ama benzer derinliğe sahip G5 noktasında farklı sonuç görülmektedir. Bu da G3 ile G5 noktasının derinlikten çok lokasyonu ile bağlı bir nedenden olması olasılığını akla getirmektedir. Bu nedenle hem daha ayrıntılı batimetre çalışılmalı hem de limanın bulunduğu burunun etkileri düşünülmelidir. Bu sonuç da daha fazla modelleme gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmalar şu anda devam etmektedir.

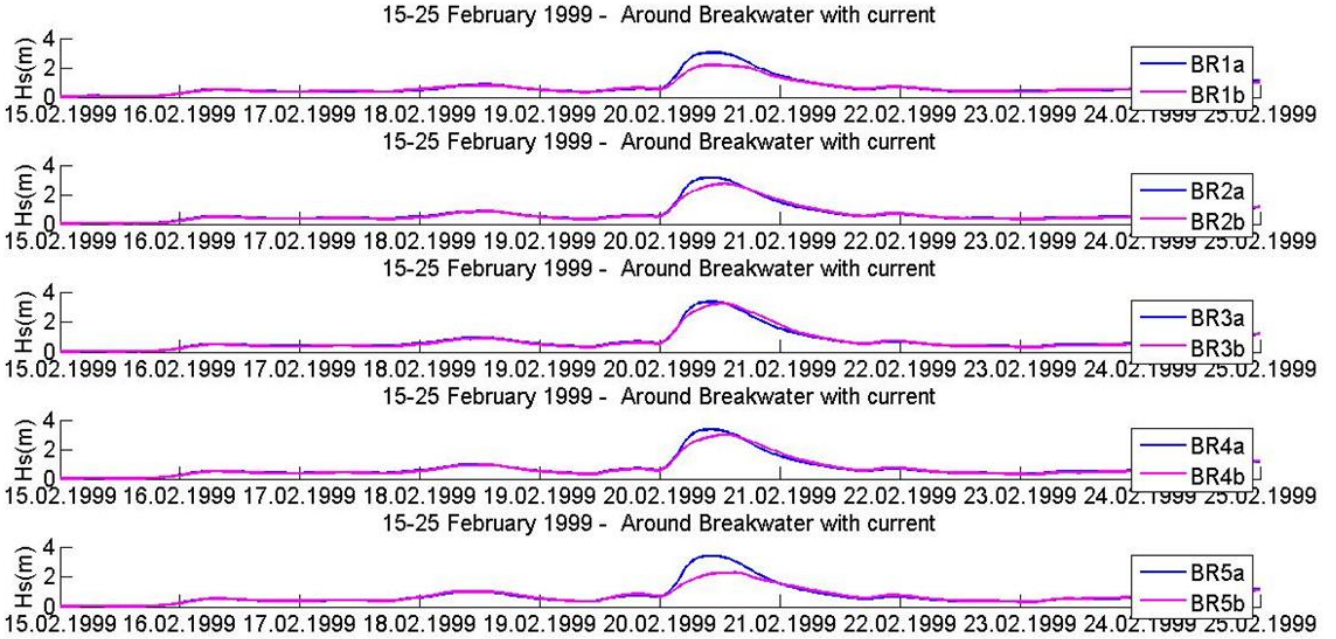
Ancak her iki fırtınada da 6 metrelik dalga modellenememiştir. Bu durum hem modellerin daha çok kalibrasyona ihtiyaç duyduğunu hem de oşinografik koşulların daha ayrıntılı olarak modele aktarılması gerektiğini göstermiştir. Bu nedenle daha da ayrıntılı bir batimetre SHOD'dan elde edilmiş, ayrıca Karadeniz'de etkili olan akıntı sistemleri modele dahil edilmeye çalışılmıştır. Elimizde fırtına sırasındaki akıntılara dair bir ölçüm olmadığı için Giresun kıyılarında Şubat aylarında gözlenebilecek genel akıntı düzeni modele entegre edilmiştir. Çeşitli çalışmalarda Rim akıntı sisteminin bu aylarda 20cm/s olarak gözleendiği gösterilmektedir. Ve bu değer, 1999 fırtınası için en iyi sonuç veren SWAN-CFSR ikilisinde kullanılarak bir ön çalışma yapılmıştır. Sonuçlar aşağıda verilmektedir.



Şekil 4.10. Çalışma alanı ve sanal istasyonlar



Şekil 4.11. 1999 fırtınası derin deniz noktaları akıntı çalışması



Şekil 4.12. 1999 fırtınası batimetre etkisi karşılaştırması

Bu ön çalışmada elde edilen sonuçlar kullanılan sabit akıntı hız ve yönünün dalga yüksekliği üzerinden belirgin olmadığını göstermektedir. Ancak ayrıntılı batimetrenin ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Çok kısa bir mesafede dalgakıran üzerindeki derinlik değişimi model tarafından yansıtılmış ve özellikle lokasyonun da etkili olduğu görülmektedir. Dalga enerjisinin burun gibi oluşumlar çevresinde daha yoğunlaştığı, koyların içlerine doğru ise

azaldığı bilinmektedir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de bu durum görülebilmektedir. Ancak hala gözlenen dalga yükseklikleri modellenememiştir. Bu nedenle projenin geri kalanında öncelikle fırtına koşulları altındaki akıntı durumu modellenecek, sonra bu model ile birlikte yeni kalibrasyonu yapılan sayısal modeller çalıştırılacaktır. Bu çalışmaların sonuçlarının bir sonraki gelişme raporunda sunulması hedeflenmektedir.

İş Paketi içerisinde yer alan bir başka konu Karadeniz ve Kuril adalarına doğru ilerleyen uzun dönemli dalga dönüşümlerinin boğazlar boyunca yaşadıkları enerji kaybına dair sayısal hesaplamalardır. Bu konudaki çalışma Rus partner öncülüğünde gerçekleştirilmiştir. Kuril adalarının olduğu batimetre ile Kuril adaları çıkarılmış olan örnek batimetre kullanılarak Mart 11,2011 Japon tsunamisinin ilerleyişi NAMIDANCE programı ile modellenmiştir. Gerçek batimetre (Kuril adaları varken) ile yapılan model sonuçları, tsunami sırasında elde edilen su düzey ölçümleri ile tutarlılık göstermektedir. Böylece NAMIDANCE programının bu batimetre ile güvenilir sonuçlar verdiği ortaya konmakta, örnek batimetre ile elde edilecek sonuçların da bu kapsamda tutarlı olacağı kabul edilebilmektedir. Yapılan karşılaştırmalı çalışmada tsunaminin Kuril adalarının olmadığı batimetrede çok daha hızlı ilerlediği (40 dakika içinde ulaşmıştır) ve çok daha yüksek bir dalga olarak kıyıya vardığı (2-3 kat) hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuçları Rus ekibi tarafından EGU2015'de sunulmuştur. Ayrıca bu konuyla ilgili bir makale de her iki ekip tarafından hazırlanmaktadır.

Fırtınalar dışında Karadeniz'de gözlenen bir başka afet tsunamilerdir. 2011 tarihli G. A. Papadopoulos et al.: Tsunamis in the Black Sea yayında Karadeniz baseninde 26 adet tarihsel tsunami olduğu ve bu tsunamilerden üçünün Türkiye kıyılarını etkilediği belirtilmektedir. En yakın tarihlisi 1968 Amasra olan bu tsunamiler ve benzer olayların yaratabileceği sorunlar üzerine Araştırma Merkezimiz çeşitli kurumlar ile de ortak çalışmalar yapmaya devam etmektedir. Rus partnerlerimiz ise böyle bir çalışmayı Bulgaristan kıyıları için bu proje dahilinde gerçekleştirmişler ve tsunami riskinin az olmakla beraber, özellikle doğal gaz ve petrol boru hatları açısından önemli etkileri olabileceğini ortaya koymuşlardır.

5. KARADENİZDEKİ DENİZ AFETLERİNİN MODELLEMESİ VE REZONANS ANALİZLERİ

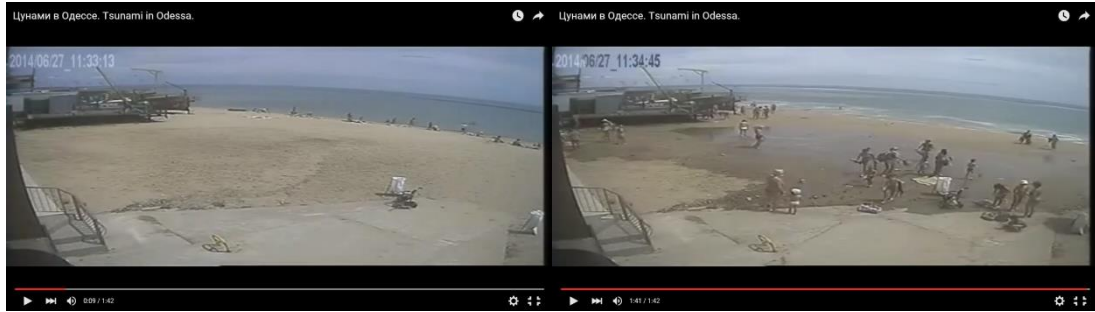
Karadeniz'de yaşanan ve yaşanabilecek deniz afetlerinin modellenmesi ve modellerin güvenilir olması olarak belirlenmiştir. Tsunami, fırtınalar, iklim değişimi, ender dalgalar ve rezonans etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir.

Yapılan uygulamalar aşağıda anlatılmaktadır. Uygulamaların seçildiği olay 23-27 Haziran tarihleri arasında Akdeniz ve Karadeniz'de birbiri ardına devam eden olağandışı dalga olaylarıdır. Gözlemlere göre, Akdeniz'de Ciutadella, Mazara Del Vallo ve Vela Luka'da (Şekil 5.1) ve sonrasında, 27 Haziran sabah saatlerinde Ukrayna'nın Odessa kentinde de yaklaşık

110 saniye periyotlu ardışık iki dalga gözlenmiştir (Şekil 5.2). Bu dalgaların, 1 metreden daha yüksek genlikli olarak gözlemlendiği belirtilmektedir. Olayların nedenleri arasında, atmosferik basınç değişimi, kıyı yapısı ve morfolojik etkilerle dalga büyümesi, kıta sahanlığı, rezonans (tınlaşım), denizaltı toprak kayması ve deprem olabileceği öngörülmüştür. Ancak, kayıtlara göre bölgede deprem ve toprak kayması olmamıştır. Proje kapsamında bu olayların atmosferik basınç değişimleri ile ilişkisi araştırılmıştır.



Şekil 5.1. 23-27 Haziran tarihleri arasında Akdeniz ve Karadeniz'de birbiri ardına devam eden olağan dışı dalga olaylarının gerçekleştiği yerler.



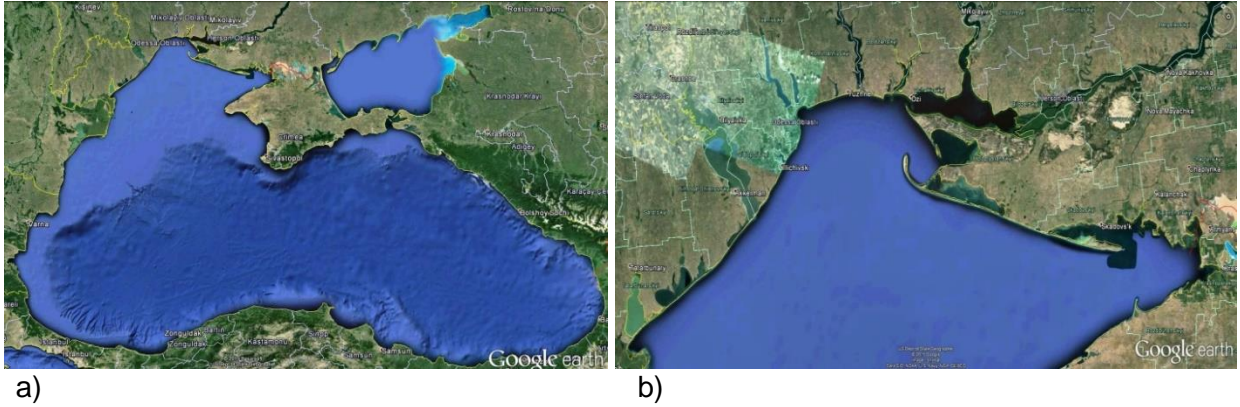
Birinci dalga 11:33:13 (Odessa Time) İkinci Dalga 11:34:45 (Odessa time)

Şekil 5.2. Odessa kıyısında 27 Haziran 2014 tarihinde gözlenen olağandışı dalgalar

Olay tarihinden 12 saat öncesinden itibaren bir saat aralıklarla hazır bulunan atmosferik basınç verileri, Çevresel Tahmin Ulusal Merkezi (NCEP)'den alınmıştır. Sayısal araç olarak NAMI-DANCE kullanılmıştır. Modelleme için batimetrik veri tabanı GEBCO web sitesinden, topografya veri tabanı ise USGS web sitesinden elde edilmiştir. Ayrıca, saatlik basınç verileri ağırlıklı ortalama kullanılarak anlık su seviyesine çevrilmiştir. Basınç verileri 20 km'lik çözünürlüktedir. Büyük çalışma alanı için gridleme aralığı 900 metre ve benzetim zaman aralığı 3 saniyedir. Küçük çalışma alanı için gridleme aralığı 180 metre ve zaman farkı 4 saniyedir. Sayısal modellemede, saatlik anlık su seviyesi, benzetim sırasında her zaman

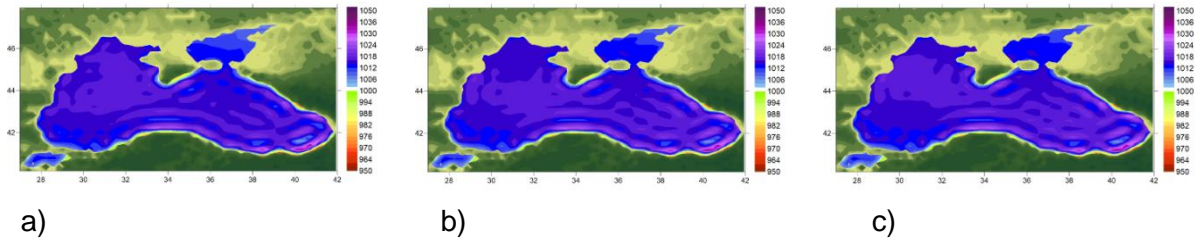
aralığında program tarafından lineer interpolasyon yapılarak hesaplamaya dahil edilmiş ve her zaman aralığında her grid noktasında hem su düzeyi değerleri hem de oluşan akıntı hızları hesaplanmıştır.

Benzetimlerde iki çalışma alanı seçilmiştir. Bunlar a) Geniş alan (Karadeniz) ve b) Dar alan (Odessa) olarak Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Basınç verileri 1 saat zaman aralığında 20.5 km alansal çözünürlüktedir. Benzetim alanındaki çözünürlük ise geniş alanda 900m ve dar alanda ise 180m. dir. Benzetim zaman aralığı ise geniş alanda 4sn ve dar alanda ise 3sn.dir.

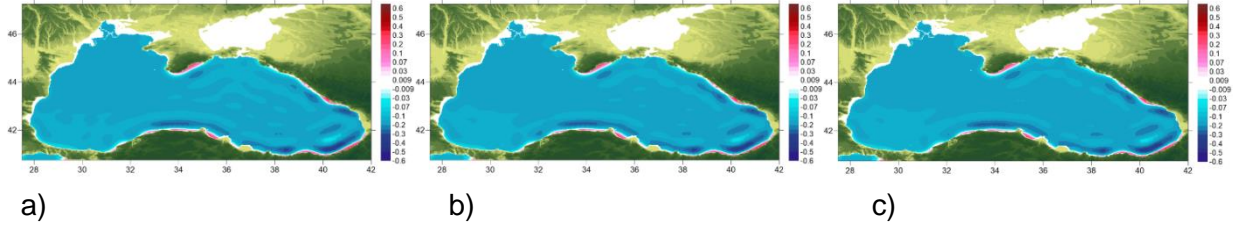


Şekil 5.3. Benzetimlerde kullanılan çalışma alanları a) Geniş alan (Karadeniz) b) Dar alan (Odessa)

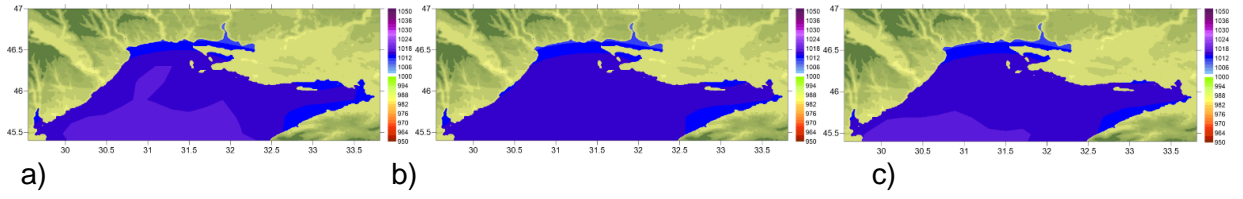
Benzetim girdi verileri olarak kullanılan basınç haritaları geniş alan için Şekil 5.4-5.5, ve dar alan için Şekil 5.6-5.7'de verilmektedir.



Şekil 5.4. Geniş Alan Basınç haritaları (27 Haziran 2014), a) Saat 08:00 (UTC) b) saat 09:00 (UTC) c) saat 10:00 (UTC)



Şekil 5.5. Geniş Alanda Basınca bağlı su düzeyi haritaları (27 Haziran 2014), a) Saat 08:00 (UTC) b) saat 09:00 (UTC) c) saat 10:00 (UTC)

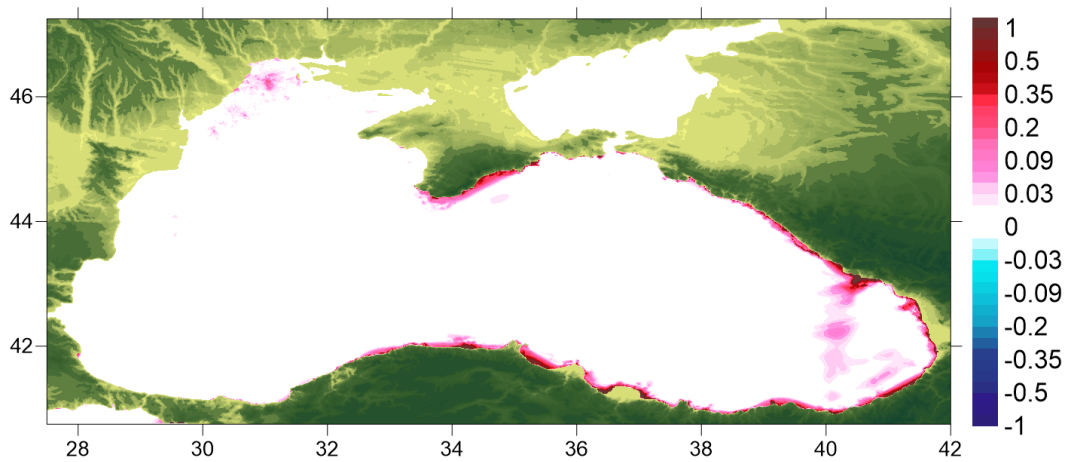


Şekil 5.6. Dar Alan Basınç haritaları (27 Haziran 2014), a) Saat 08:00 (UTC) b) saat 09:00 (UTC) c) saat 10:00 (UTC)

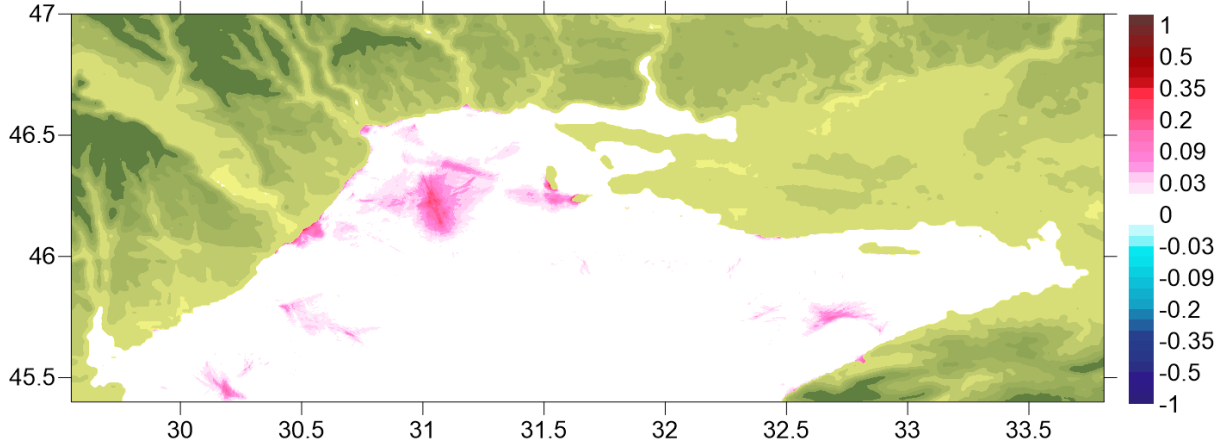


Şekil 5.7. Dar Alanda Basınca bağlı su düzeyi haritaları (27 Haziran 2014), a) Saat 08:00 (UTC) b) saat 09:00 (UTC) c) saat 10:00 (UTC)

Benzetimler sonucunda elde edilen en yüksek su düzeyi değerleri geniş alan için Şekil 5.8 ve dar alan için ise Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.8. Benzetimler sonucunda elde edilen en yüksek su düzeyi değerleri (geniş alan)



Şekil 5.9. Benzetimler sonucunda elde edilen en yüksek su düzeyi değerleri (dar alan)

Benzetimler sonucunda Odessa yakınlarında 0.5 m'den küçük genlikler hesaplanmıştır. Odessa'da gözlemlenen dalgalar 1 metrenin üzerinde olduğu için hesaplanan değer bu seviyeyi yakalayamamıştır. Ancak bu değer, hem rezonans (tınlaşım), hem morfolojik etkiler hem de kıta sahanlığı etkilerini içermediğinden kabul edilebilir durumdadır. Gözlenen dalganın diğer etkilere bağlı olarak yüksek değerde olması olasıdır.

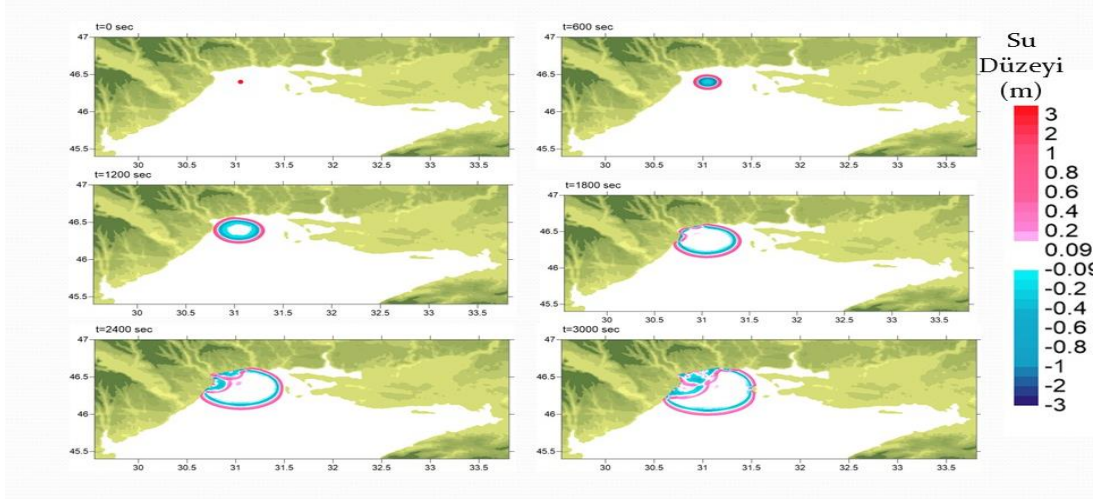
5.1 Rezonans (Tınlaşım) Etkilerinin Araştırılması

Dalgalar, kapalı bir basene ya da limana girdiklerinde çalkantıya yol açarlar. Oluşan çalkantının karakteristik özellikleri gelen dalgalara ve basenin ya da limanın sınır koşullarına bağlıdır. Her elastik sistemde olduğu gibi, basenlerin de belirli salınım dönemleri bulunmaktadır. Gelen dalgaların periyotlarının ya da basende oluşan dalgaların periyotlarının, basenin serbest salınım dönemleri ile çakışması durumunda basen içinde çok daha büyük salınımlar oluşur. Bunun sonucu olarak körfezler gibi yarı kapalı basenlerde, uzun dönemli dalgalar tehlikeli salınımlara yol açabilirler. Deprem kaynaklı dalgalar bu özelliktedir ve aşağıda sunulan çalışmada Yalciner ve Pelinovsky (2007), kestirme yöntem kullanılarak Karadeniz'de Odessa körfezinin serbest salınım periyotları bulunmuştur.

Bu yöntemde, basen içine tek bir başlangıç dalgası etki ettirilerek çalkantı yaratılmıştır. Bu etki sonucunda, farklı yerlerde oluşan su düzeyinin zamansal değişimleri bulunmuş, bu değişimler, Fourier Transform Tekniği (FFT) kullanılarak incelenmiş, enerji spektrum eğrileri elde edilmiştir. Serbest salınım dönemleri, spektrum eğrisindeki tepe noktaları seçilerek belirlenmiştir. Yöntemin verdiği sonuçların doğruluğu, dikdörtgen biçimli basen için, yatay ve eğik deniz tabanı kesitleri için uygulanarak Çakıroğlu (1997), Yalciner ve Pelinovsky (2007) doğrulanmıştır.

Odesa Körfezi için yapılan tınlaşım analizi ve uygulama sonuçları aşağıda yer almaktadır. Benzetim girdisi olarak Odesa Körfezinde yaratılan dairesel etkinin yayılması Şekil 10 da gösterilmiştir. Dar alan olarak benzetimleri yapılan Odesa körfez bölgesi için hesaplanan

tınlaşım periyotları Tablo 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Tınlaşım Analizi için Odesa Körfezinde yaratılan dairesel etkinin yayılması

Tablo 5.1. Dar alan olarak benzetimleri yapılan Odesa körfez bölgesi için hesaplanan tınlaşım periyotları

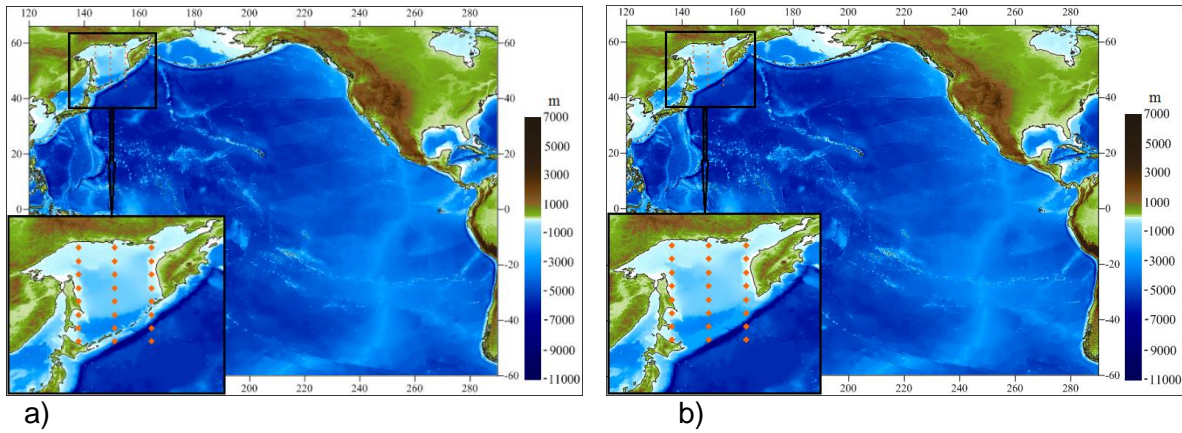
Mod No	Tınlaşım Periyodu (sn)
1	1380
2	760
3	410
4	218
5	109
6	72

27 Haziran 2014 tarihinde Odesa'da gözlenen iki dalga arasındaki sürenin, video görüntülerinin incelenmesi sonrasında 100 sn'den büyük olduğu bulunmuştur. Video görüntüsünün yeterince uzun olmaması nedeni ile gözlenen dalganın periyodu 100 sn'den az ve uzun olarak bulunmuştur. Bu periyot, Tablo 5.1'de yer alan 109 sn tınlaşım periyoduna yakın değerdedir. Bu nedenle tınlaşım etkisi de basınca bağlı hesaplanmış dalganın genliğini artırmış olabilir.

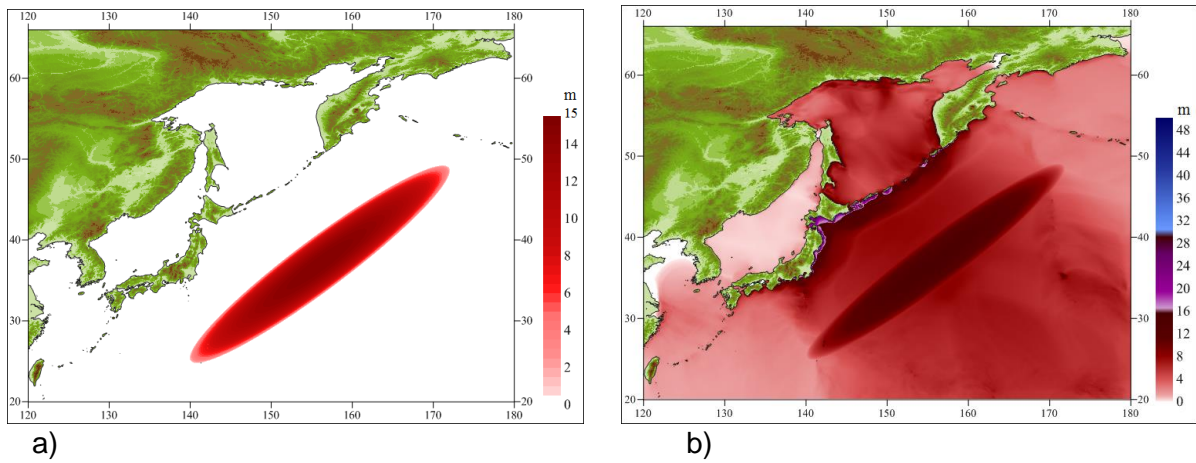
5.2 Uzun Dönemli Dalgaların Kuril Adalarında İlerlemesi ve Adalar Arası Boğazlardan Geçişleri

Bu çalışmada, tsunami dalgasının ilerleyişinde Büyük Okyanus ile Ohotsk Denizi'ni birbirinden ayıran 56 adadan oluşan Kuril adalarının etkisi incelenmiştir. Bunun için iki farklı çalışma alanı tanımlanmıştır. Şekil 5.11-a Kuril adalarının dahil edildiği alanı ve Şekil 5.11-b

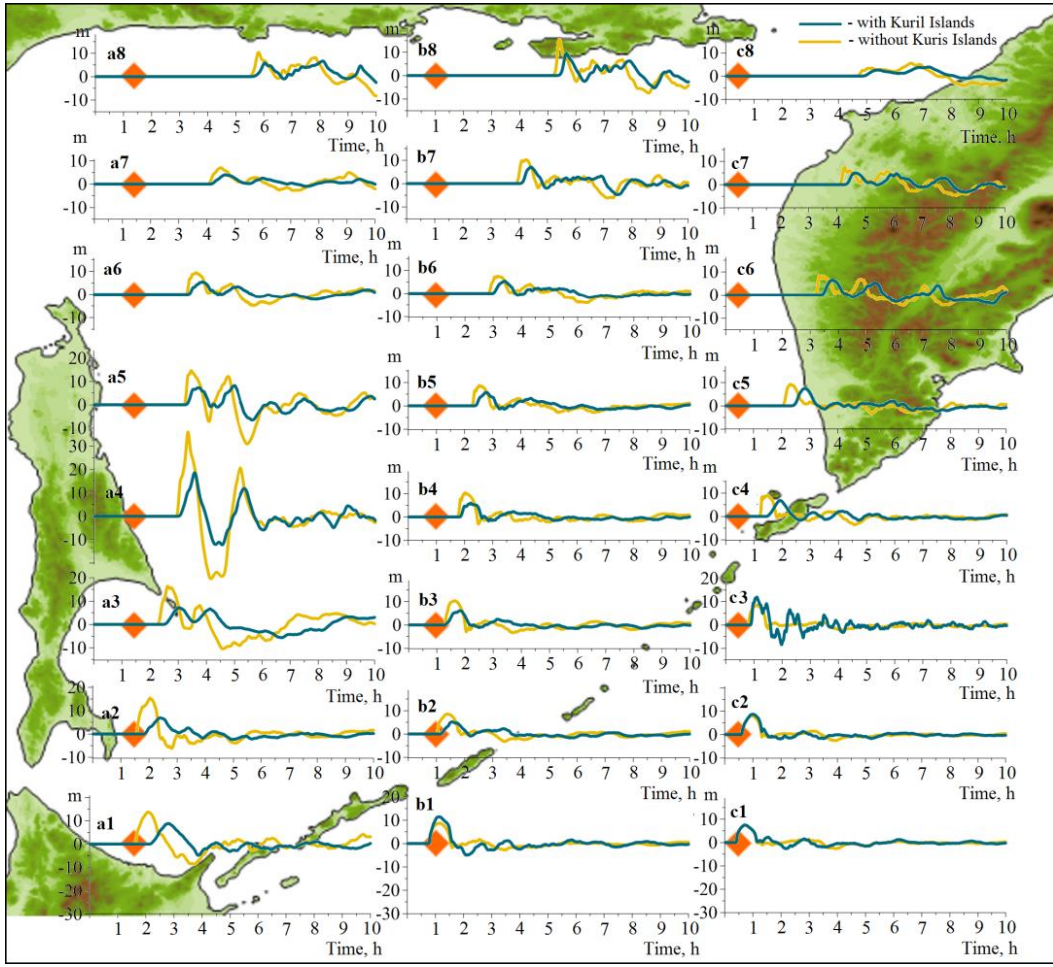
bu adaların dahil edilmediği alanı temsil etmektedir. Adaların dahil edildiği ve edilmediği alanlarda tsunami dalgasının ilerleyişini anlamak için Şekil 5.12-a'da gösterildiği gibi bir kaynak tanımlanmıştır. Şekil 5.12-b'de ise bu kaynaktan dolayı oluşabilecek tsunami benzetimi sonucu çalışma alanındaki tsunami enerjisinin dağılımı gösterilmiştir. Kaynaktan dolayı oluşan tsunami enerjisinin büyük bir bölümü Kuzeybatı ve Güneydoğu yönünde dağılmıştır. Kuril adalarının yer aldığı batimetri için, Ohotsk Denizi yakınlarında maksimum genlikli tsunami dalgası, Kuril adalarının Pasifik Okyanusu yönünde gözlemlenmiştir. Ohotsk Denizi tarafında ise tsunami dalgasının genliği daha küçük olmaktadır. Bunun yanında, üç bölgede tsunami yoğun olarak görülmüştür: Sakhalin Adası'nın güney ve doğu kıyısı, Ohotsk Denizi'nin kuzey kıyısı ve Kamçatka Yarımadası'nın batı kıyısı. Kuril adalarının yer almadığı batimetri için, bahsedilen bu üç bölge için tsunami daha yoğun gözlemlenmiş ve Ohotsk Denizi'nde tsunami dalgasının genliği daha yüksek kaydedilmiştir. Şekil 5.13'te iki farklı batimetri için dalga genliklerinin karşılaştırılması grafiklerle ifade edilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere Kuril adaları, tsunami dalgalarının geçişini geciktirmekte olup etkilerini de belli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 5.11. Çalışma alanları a) Kuril adalarının dahil olduğu b) Kuril adalarının dahil olmadığı



Şekil 5.12. a)Tsunami kaynağı b) Benzetim sonucu çalışma alanındaki tsunami enerjisinin dağılımı



Şekil 5.13. İki farklı çalışma alanı için dalga genliklerinin karşılaştırılması

6. GİRESUN'U ETKİLEYEN FIRTINALARIN MODELLEMESİ

6.1 Çalışma Alanı ve Seçilen Fırtına (Eylül, 2014)

Giresun yaklaşık 430,000 kişilik nüfusuyla Türkiye'nin Karadeniz kıyısının doğu kısmında yer almakta. Karadeniz'de 23-25 Eylül 2014 tarihleri arasında 2 gün süreyle etkili olan fırtına sırasında en çok etkilenen şehirlerden birisi Giresun olmuştur Türkiye'de. Şehir merkezi 2 gün boyunca dalgaların şiddetli saldırısına maruz kalmıştır. En yüksek dalgaların bazı noktalarda 5m yüksekliğe kadar tırmandığı gözlemlenmiştir. Bu dalgalar liman yapılarında, kıyı koruma yapılarında, limandaki gemilerde ve Karadeniz Sahil Yolu üzerindeki araçlarda zarara neden olmuştur. Şekil 6.1'de ADCIRC-SWAN ve NAMI-DANCE simülasyonları için seçilen çalışma alanları gösterilmiştir. Şekil 6.2'de fırtına sırasında çekilen fotoğraflar sunulmuştur.



Şekil 6.1. Çalışma alanı, üst resimdeki kırmızı kutu ADCIRC+SWAN model sınırlarını kapsarken alt resimdeki kırmızı kutu NAMI DANCE model sınırlarını kapsamaktadır

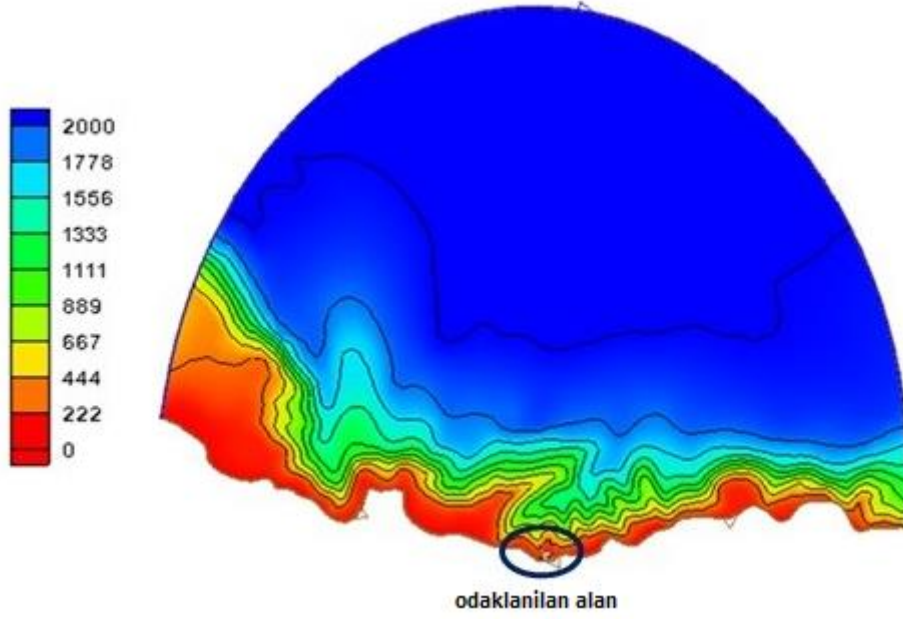


Şekil 6.2. Giresun'daki fırtına sırasında çekilen fotoğraflar (<http://www.habername.com/>)

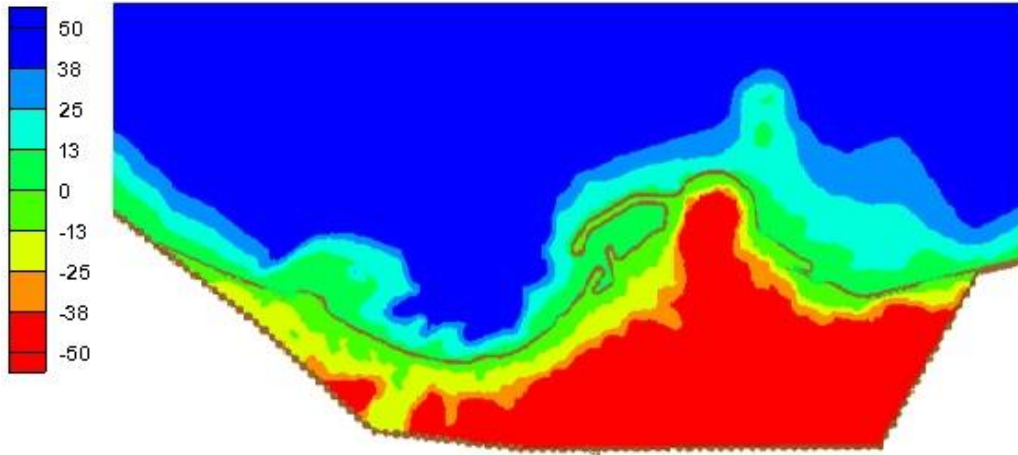
6.2 Girdi Verilerinin Seçimi

Derin deniz batimetri datası İngiliz Oşinografi Veri Merkezi tarafından hazırlanan 1 yay-dakika çözünürlüklü Okyanus ve Denizler için Genel Batimetrik Harita'sından (GEBCO) elde edilmiştir. Ek olarak kıyıya yakın derinlik bilgileri ise Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi (SHOD) tarafından hazırlanan haritanın dijitize edilmesiyle elde edilmiştir.

Kara yükseklikleri için ASTER GDEM ve Google DEM dataları karşılaştırılmıştır. Google DEM datası daha güncel olduğu için kıyıya yakın kara noktalarında bu data kullanılmıştır. Google DEM datasını elde etmek için internet üzerinden ücretsiz Terrain Zonum isimli program kullanılmıştır (<http://www.zonums.com/gmaps/terrain.php>). Daha iç kısımlardaki kara noktaları içinse 1 yay saniye çözünürlüklü ASTER GDEM datası kullanılmıştır (ASTER GDEM V2, 2011).

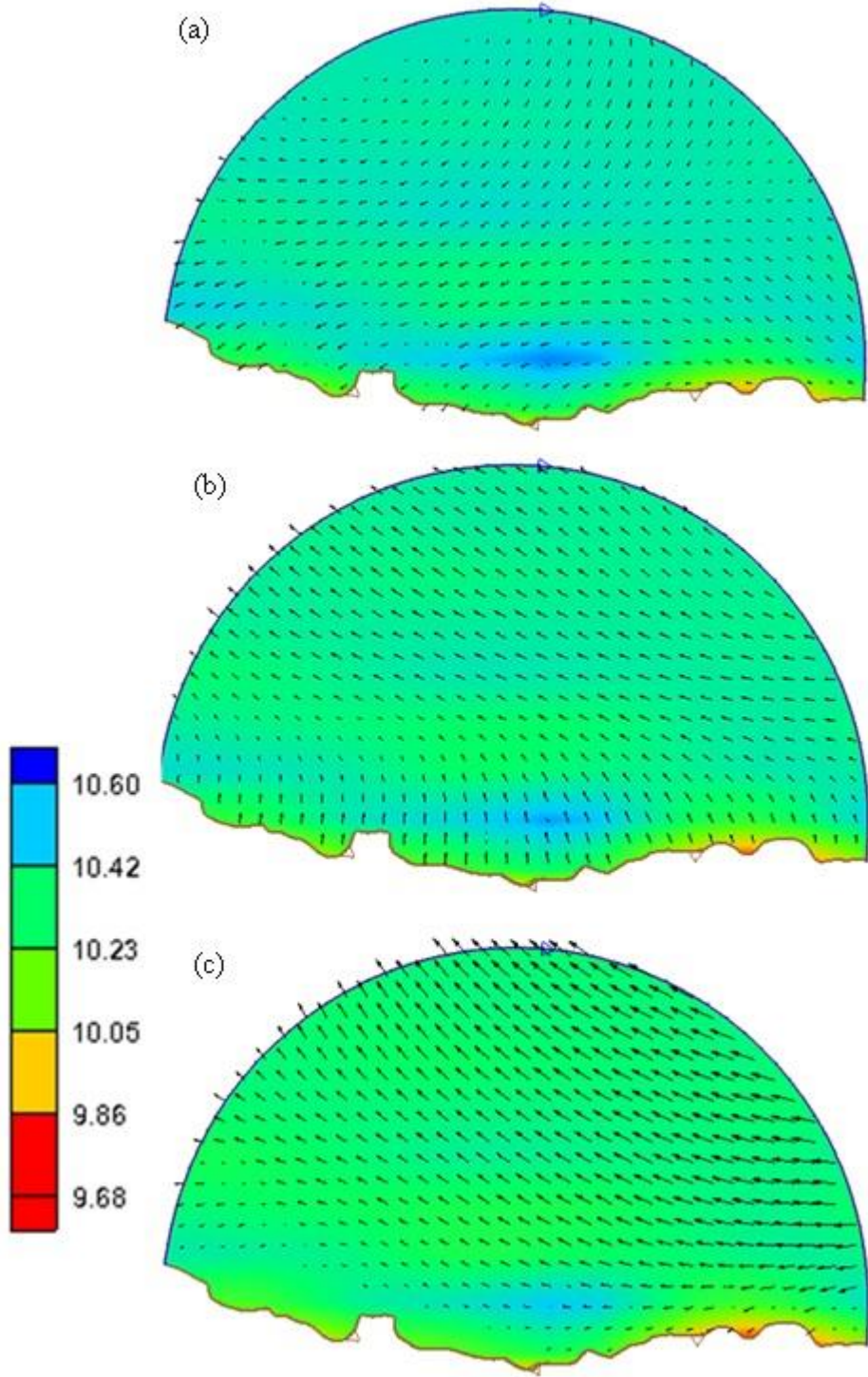


Şekil 6.3. Tüm çalışma alanı için batimetri seviyeleri, kontürler m cinsinde

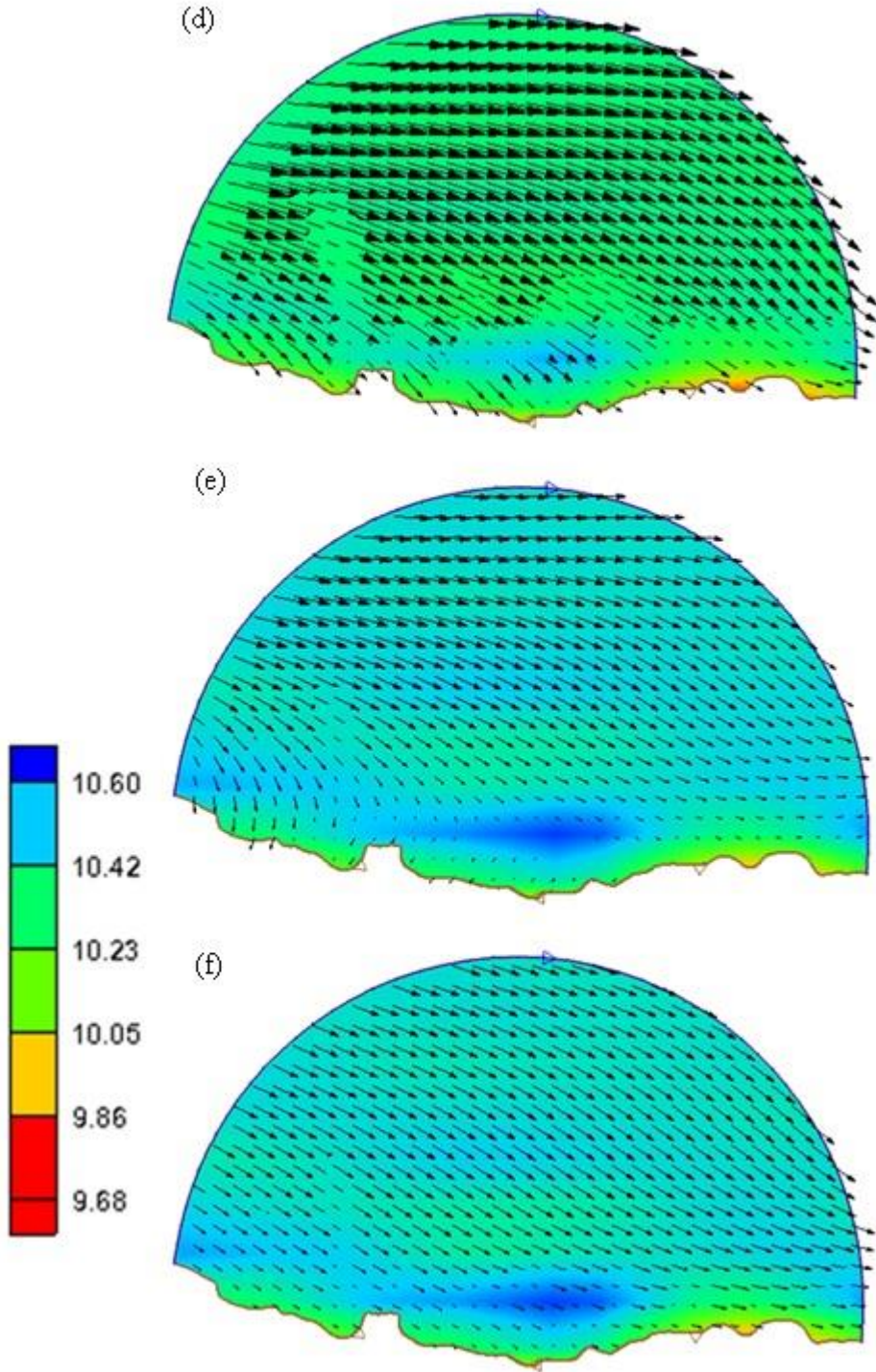


Şekil 6.4. Odaklanılan alan için batimetri seviyeleri, kontürler m cinsinde

Meteorolojik veri için, Karadeniz'de daha önce yapılan SWAN ve WaveWatch III modelleme çalışmaları CFSR rüzgar verilerinin ECMWF datalarına göre ölçülen data ile daha iyi uyduğunu göstermiştir (Tarakcioglu vd.,2015). Bu sebeple bu çalışmada rüzgâr ve atmosferik basınç verileri için küresel koordinat sisteminde 0.205 çözünürlüklü CFSv2 verisi kullanılmıştır.



Şekil 6.5. Rüzgar vektörleri ile metre olarak su yüksekliği cinsinden atmosferik basınç kontürleri
a) 22 Eylül 2014 öğlen saat 12:00 b)23 Eylül 2014 00:00 c) 23 Eylül 2014 12:00



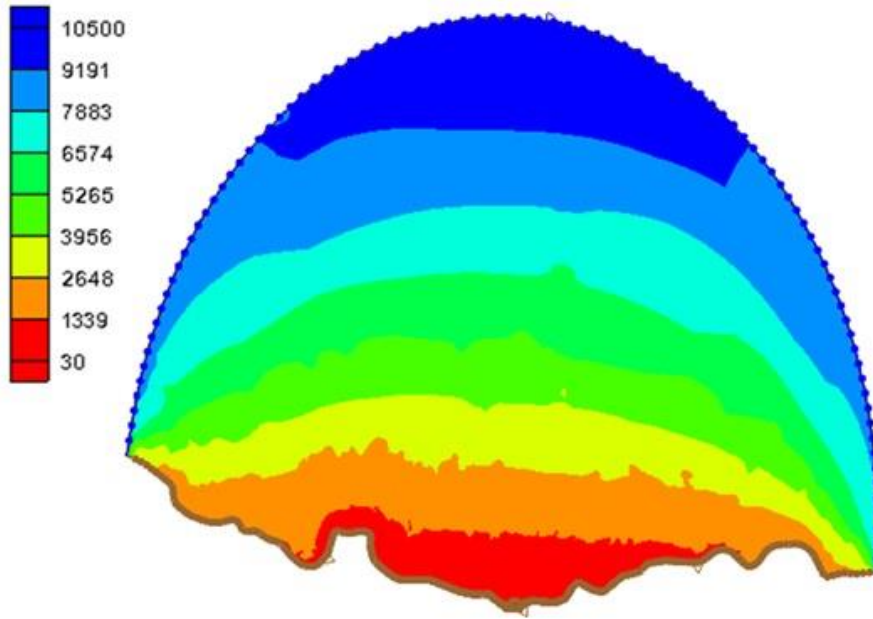
Şekil 6.5 devamı. d)24 Eylül 2014 00:00 e)24 Eylül 2014 12:00 f)25 Eylül 2014 00:00

22 Eylül 2014 saat 12:00'de rüzgâr 5m/s hızla kuzeydoğudan esmekte. 12 saat sonra rüzgâr yönü aynı hızla kuzeydoğuya dönmüştür. 23 Eylül geceyarısı 00:00'da rüzgâr kıyıya yakın bölgelerde 3m/s hızla, çalışma alanının kuzey-kuzeydoğu bölgesinde ise 10 m/s'ye varan hızlarla kuzeybatıya doğru esmekte. Yaklaşık 2 saat sonra Karadeniz'in batısında 20 m/s'ye varan rüzgâr hızıyla fırtına oluşmaya başlamıştır ancak henüz çalışma alanına varmamıştır. 24 Eylül 2014

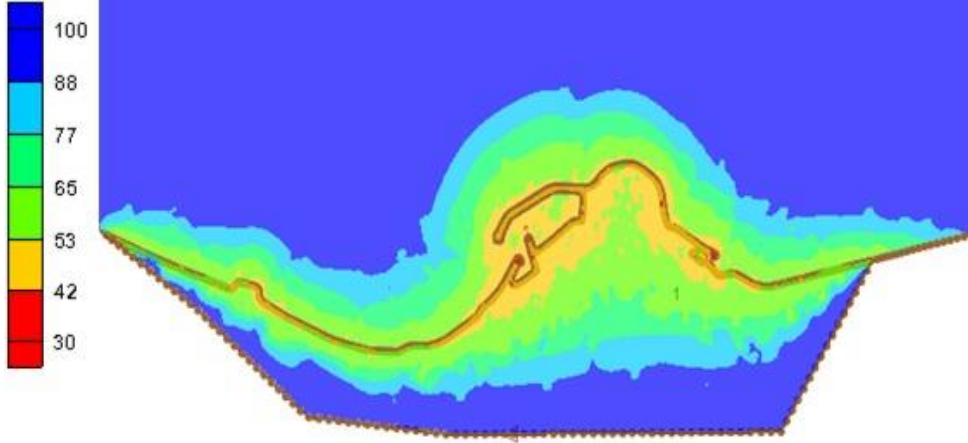
saat 12:00'de fırtına doğu Karadeniz'e ulaşmıştır ve 24 m/s'ye varan hızlarla gúneydođu yönüne esen rúzgâr çalışma alanına girmeye başlamıştır. Bu sırada çalışma alanının genelinde atmosferik basınç 100500 Pa'dır. 24 Eylül sabahı saat 05:00 civarında fırtına çalışma alanının gúneydođu bölgesinden çıkmaya başlamıştır. Bu noktada kıyı bölgelerinde rúzgâr hızları 10 m/s civarı iken daha derinlerde 18m/s civarındadır. Maksimum basınç kıyıya yakın bölgelerde 103000 Pa'a çıkmıştır. Daha sonrasında simúlasyon süresinin sonuna kadar (25 Eylül 2014 00:00) rúzgar hızları giderek dúřmeye devam etmiştir.

6.3 Sonlu Elemanlar Ağ Modeli

ADCIRC+SWAN simúlasyonları için Aquaveo tarafından úretilen SMS programı kullanılmıştır. Minimum grid aralığı kıyı çizgisinde 30m olarak alınmış olup kıyının her iki tarafına doğru artacak şekilde dúzenlenmiřtir. Maksimum grid aralığı deniz sınırında 10500 m'dir. şekil 6.6'da tüm çalışma alanı için, şekil 6.7'de ise odaklanılan alan için grid aralık değerleri çizilmiştir. Ağ modelinde deniz alanı 35,630 km'lik bir alanı kapsarken kara alanı 8.5 km'lik alanı kapsamaktadır. Çalışma alanı ile deniz sınırına maksimum mesafe yaklaşık 195 km'dir.

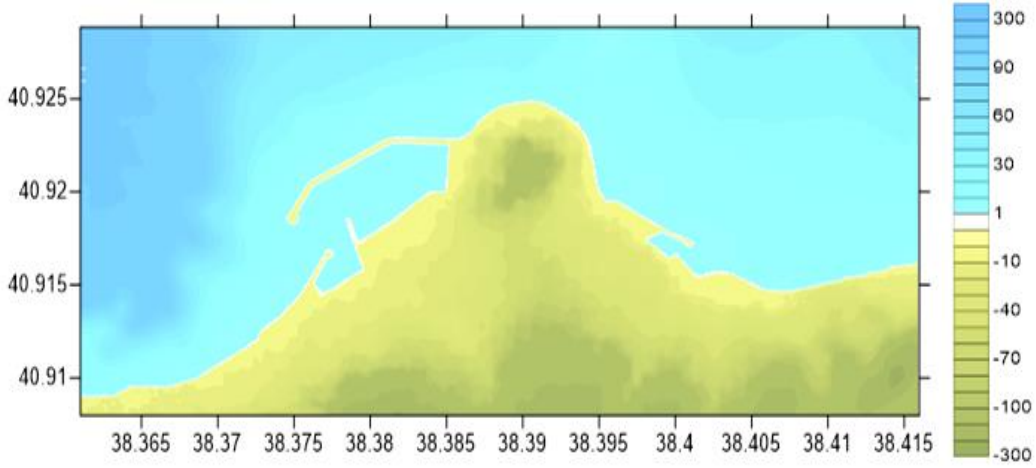


Şekil 6.6. Tüm alışma alanı için grid aralık kontúrleri (m)



Şekil 6.7. Odaklanılan alan için grid aralık kontürleri (m)

NAMI-DANCE simülasyonları için Surfer programı yardımıyla yaklaşık 5.5 m'lik grid aralıklarıyla yüksek çözünürlüklü ağ modeli oluşturulmuştur. Şekil 6.8'de NAMI-DANCE çalışma alanı sunulmuştur.



Şekil 6.8. NAMI DANCE simülasyonları için oluşturulan ağ modeli alanı ve yükseklikler (m)

6.4 Eylül 2014 Fırtınası Simülasyon Sonuçları

Fırtına modellemesi 6 farklı durum için yapılmıştır. İlk durumda tamamen bileşik iki yönlü ADCIRC+SWAN modeli uygulanmıştır. Bu simülasyondan elde edilen dalga verileri daha sonra su basması çalışmasında kullanılan girdi verilerinin üretiminde kullanılmıştır. 2, 4, 5 ve 6. durumlarda ADCIRC ve SWAN arasında paylaşılan verilerinin model sonuçlarına olan etkileri araştırılmıştır. 3. durumda sonlu genlik terimleri ile ıslanma kuruma mekanizmasının etkileri ADCIRC üzerinde bu terimler kapatılarak araştırılmıştır. Çalışılan durum senaryoları Tablo 6.1'de özetlenmiştir.

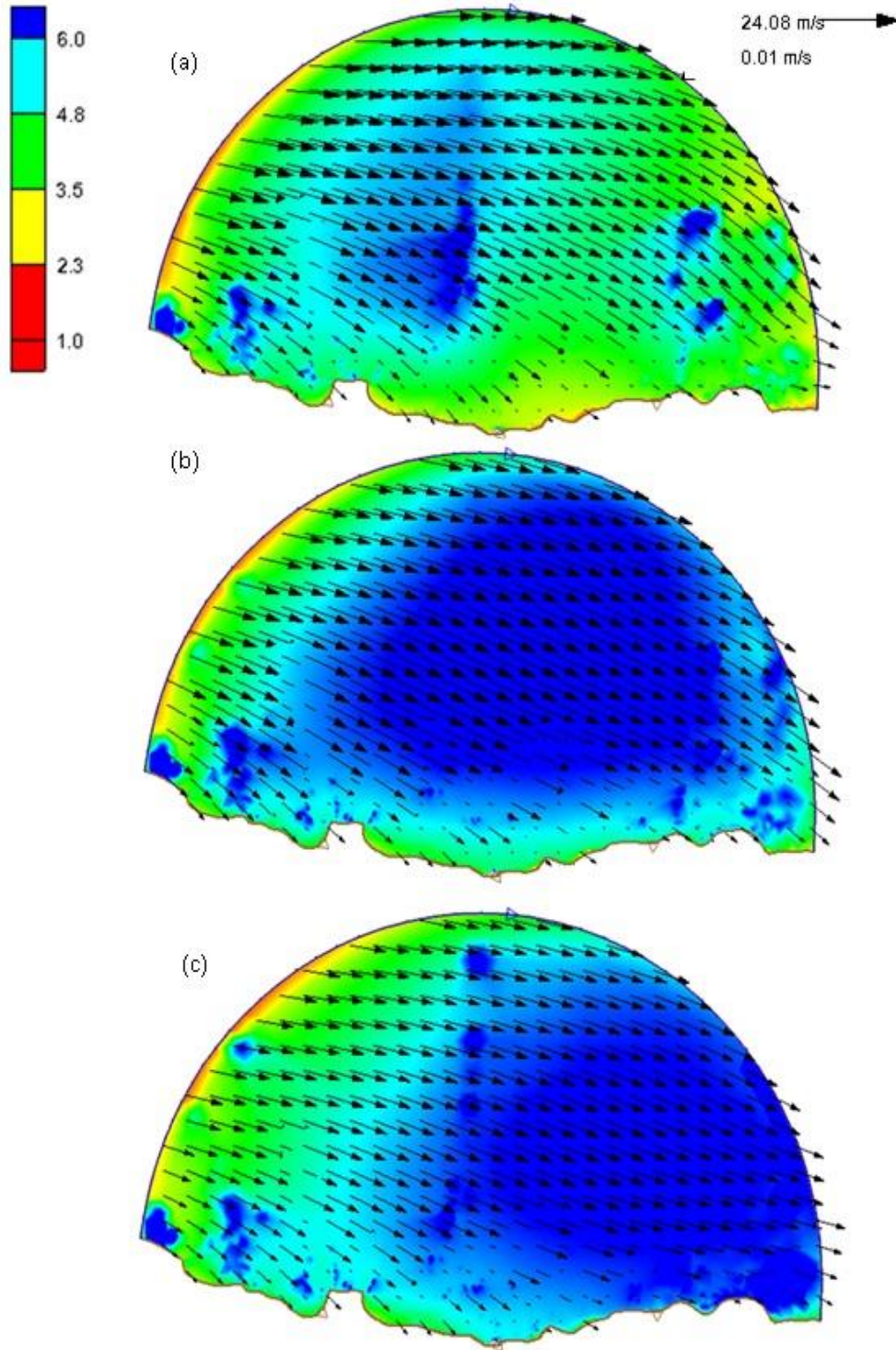
Tablo 6.1. Durum koşulları

Durum	SWAN → ADCIRC	ADCIRC → SWAN		ADCIRC içindeki sonlu genlik terimleri ve ıslatma kuruma
	Gergi akıntısı	Su yüksekliği	Akıntı	
1	✓	✓	✓	✓
2	✓	x	x	✓
3	✓	✓	✓	x
4	x	x	x	✓
5	✓	x	✓	✓
6	✓	✓	x	✓

4. durum hariç tüm durumların maksimum dalga yüksekliklerinin ve periyotlarının mekânsal dağılımı sonuçları aşağıda gösterilmiştir. 4. durumda dalga etkileri dikkate alınmadığı için herhangi bir dalga verisi hesaplanmamıştır. Bu durumun maksimum su yükseklikleri sonucu 1. durumla karşılaştırılarak dalgaların su yükseklikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

6.4.1 1. Durum Sonuçları

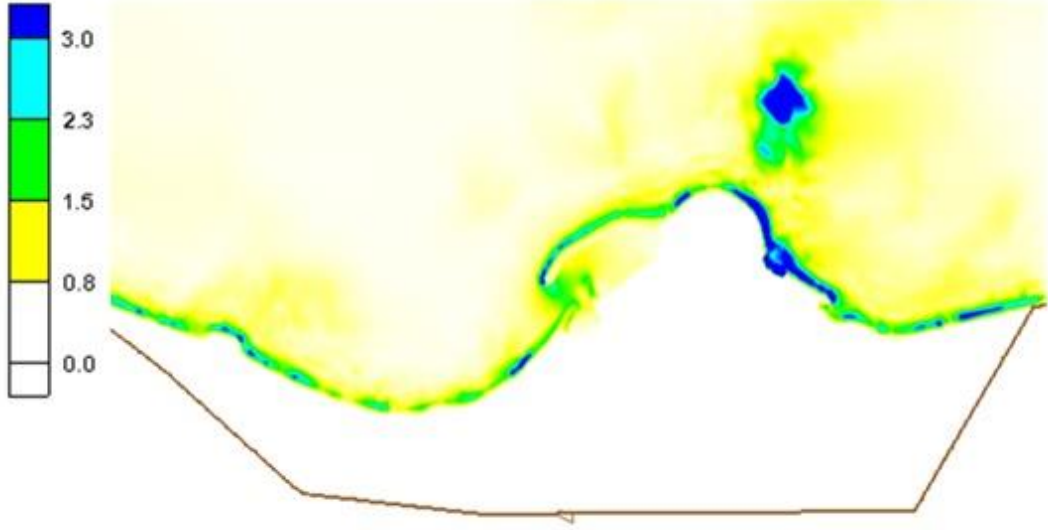
Hesaplanan dalga yüksekliklerinin rüzgâr hızlarıyla beraber incelenmesi çalışma alanı içindeki maksimum rüzgâr hızları ile maksimum dalga yüksekliklerinin oluşu zamansal olarak uygunluk göstermektedir. En yüksek rüzgâr hızları 24 Eylül saat 00:15 civarı 24m/s hızla gözlemlenmiştir. 6 m'den yüksek en yüksek temsili dalgalar da bu sırada oluşmaya başlamıştır. 24 Eylül sabah saat 4:00'e kadar 20m/s 'den yüksek hızlarla güneydoğu tarafına doğru rüzgâr esmeye devam etmiştir. Bu zaman aralığında giderek daha geniş bir alanda dalga yükseklikleri artmış ve rüzgâr yönüyle hareket ederek güneydoğuya doğru kaymıştır. Şekil 6.9'da maksimum rüzgâr hızlarının çalışma alanı içinde etkili olmaya başladığı an ile çalışma alanını terk etmeye başladığı an bu zamanlarda hesaplanan maksimum temsili dalga yükseklikleri kontürleri ile sunulmuştur.



Şekil 6.9. Temsili dalga yükseklik kontürleri (m) ile rüzgâr hız vektörleri a) 24 Eylül 2014 saat 00:15am b) 24 Eylül 2014 saat 02:45am c) 24 Eylül 2014 saat 06:30am

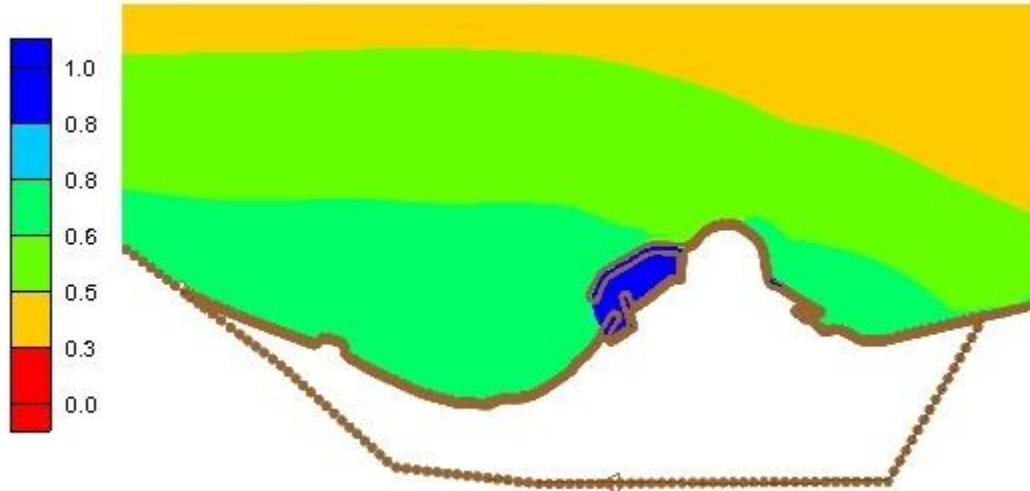
Şekil 6.10'da maksimum akıntı hızlarının dağılımı gösterilmiştir. Şekilden de görülebildiği üzere kıyı boyu akıntı hızları burnun batı tarafında yaklaşık 1.5 m/s hızında ve dalgakıranın iç kısmında da 2.5m/s hızına ulaştığı gözlemlenmiştir. Burnun doğu tarafında ise akıntı hızları 3m/s' den biraz yukarıda gözlemlenmiştir. Burnun kuzeydoğu tarafında deniz derinliğinde sınırlı bir

alanda ani azalma mevcuttur. Bu alanda beklenildiği üzere akıntı hızlarında ani bir artış görülmüştür.



Şekil 6.10: m/s cinsinden akıntı hız kontürleri

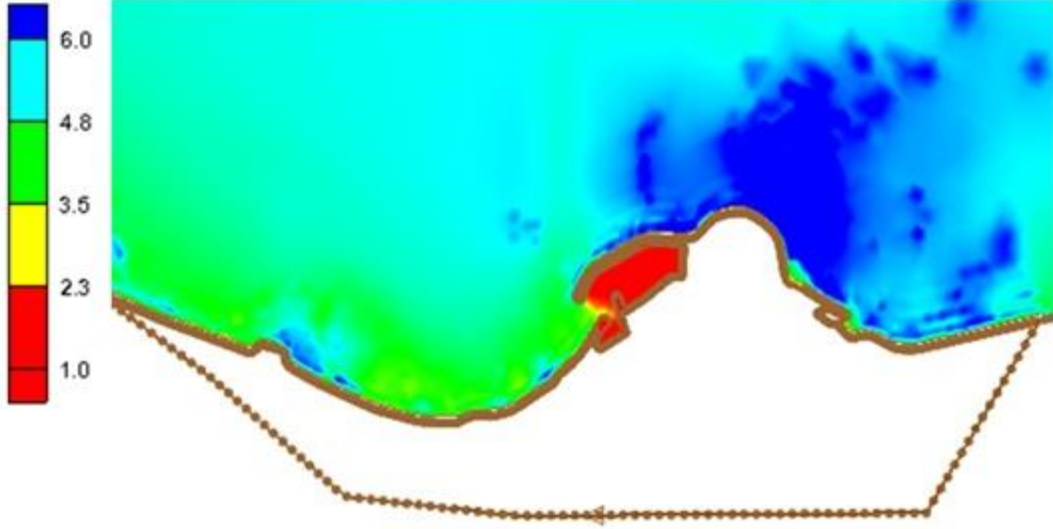
Şekil 6.11'de hesaplanan maksimum su yükseklikleri sunulmuştur. Dalgakıranın iç tarafında su yükseklikleri 1m'yi biraz aşmışken kıyı boyunca 0.7m civarındadır. Kıyıdan uzaklaştıkça su yükseklikleri giderek azalmıştır.



Şekil 6.11. m cinsinden maksimum su yükseklikleri

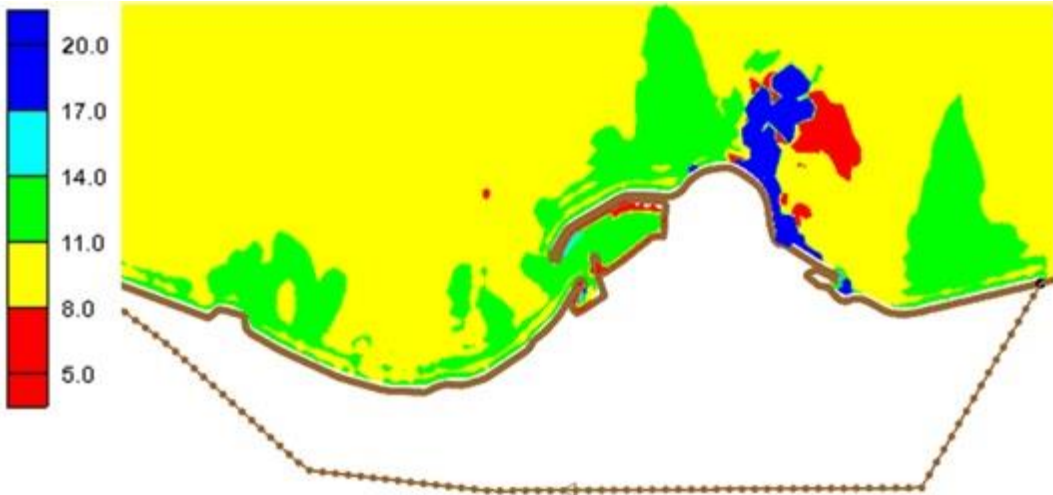
Maksimum temsili dalga yükseklikleri ile pik periyotlarının dağılımı sırasıyla Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'de sunulmuştur. Şekil 6.12'de görüldüğü üzere 7.0m'yi aşan maksimum dalga yükseklikleri Giresun burnunun kuzeydoğu tarafında oluşmuştur. Burası aynı zamanda derinlikte

ani azalmanın yaşandığı noktayla aynı bölgededir. En az dalga yükseklikleri dalgakıranın iç tarafında meydana gelirken burnun batı tarafında kıyıdaki dalga yükseklikleri 3.0m ile 4.0m arasında değişmektedir. Burnun doğu tarafındaki kıyısında ise maksimum dalga yükseklikleri 5.0m'den başlayıp noktasal olarak 7.0m'ye kadar varmaktadır.



Şekil 6.12. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m)

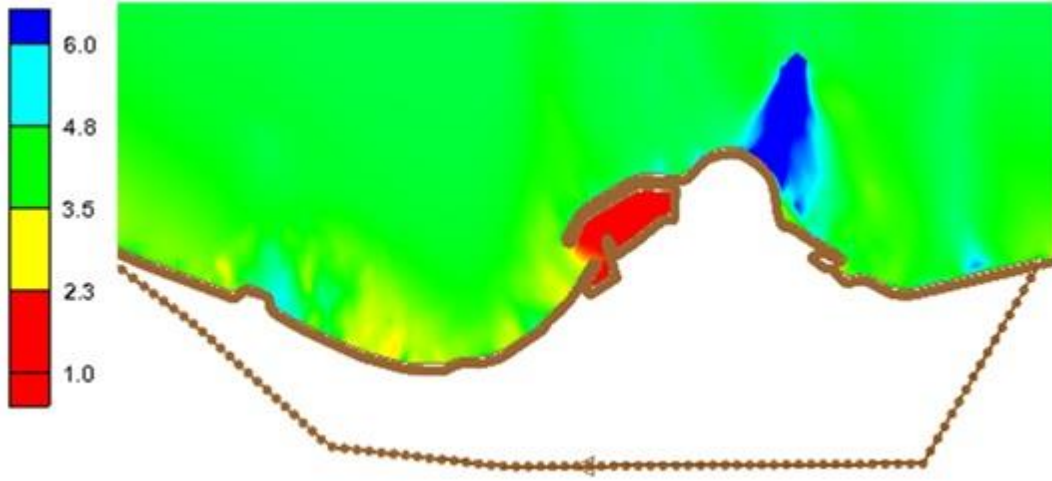
Kıyı boyunca hesaplanan maksimum pik periyot değerleri 10s ile 12s arasında değişmektedir. Maksimum pik periyot değerlerinin Giresun burnunun kuzeydoğu noktasında 20s'yi aştığı ve doğu kısmında 8s-11s arasında değiştiği görülmüştür.



Şekil 6.13. Maksimum pik periyod dağılımı (s)

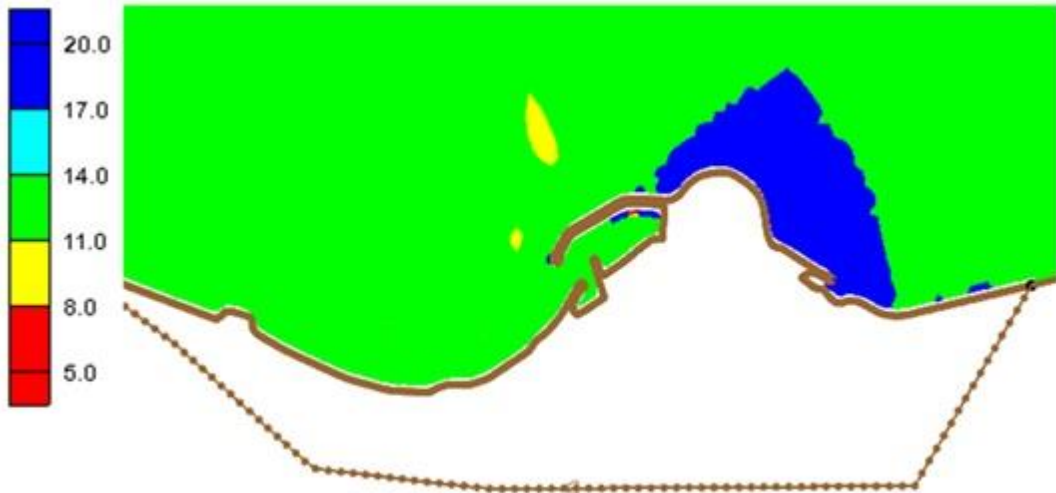
6.4.2 2. Durum Sonuçları

Maksimum temsili dalga yükseklikleri ile pik periyotlarının dağılımı sırasıyla Şekil 6.14 ve Şekil 6.15' de sunulmuştur. Şekil 6.5.6'de görüldüğü üzere 7.0m'yi aşan maksimum dalga yükseklikleri 1. durumdaki gibi ancak daha sınırlı bir alanda Giresun burnunun kuzeydoğu tarafında oluşmuştur. En az dalga yükseklikleri dalgakıranın iç tarafında meydana gelirken, burnun batı tarafında kıyıdaki dalga yükseklikleri 2.6m civarı olup yer yer 4.0m'ye kadar ulaşmıştır. Burnun doğu tarafındaki kıyısında ise maksimum dalga yükseklikleri 3.5m civarındadır.



Şekil 6.14. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m)

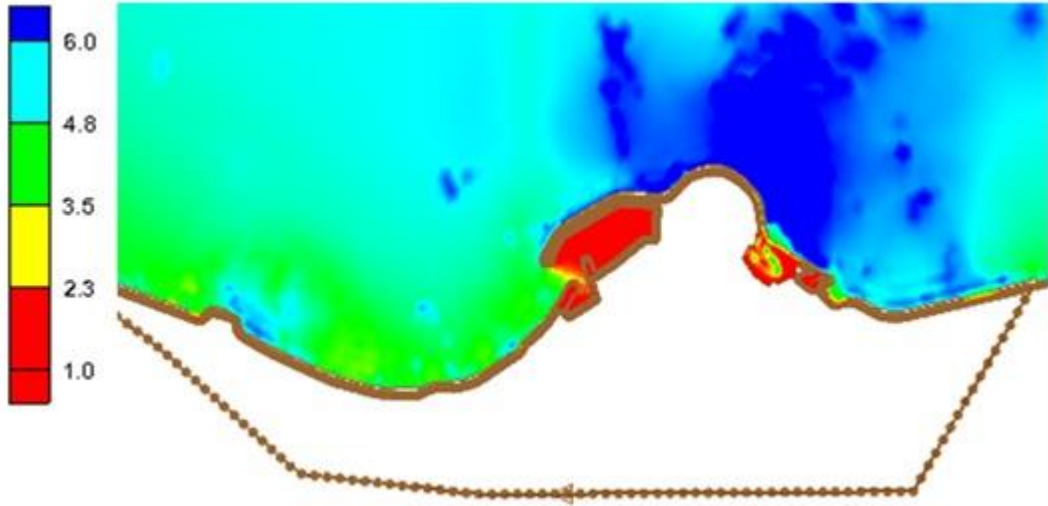
Şekil 6.15 incelendiğinde 1.duruma kıyasla dalga pik periyotlarında genel bir artış olduğu söylenebilir.



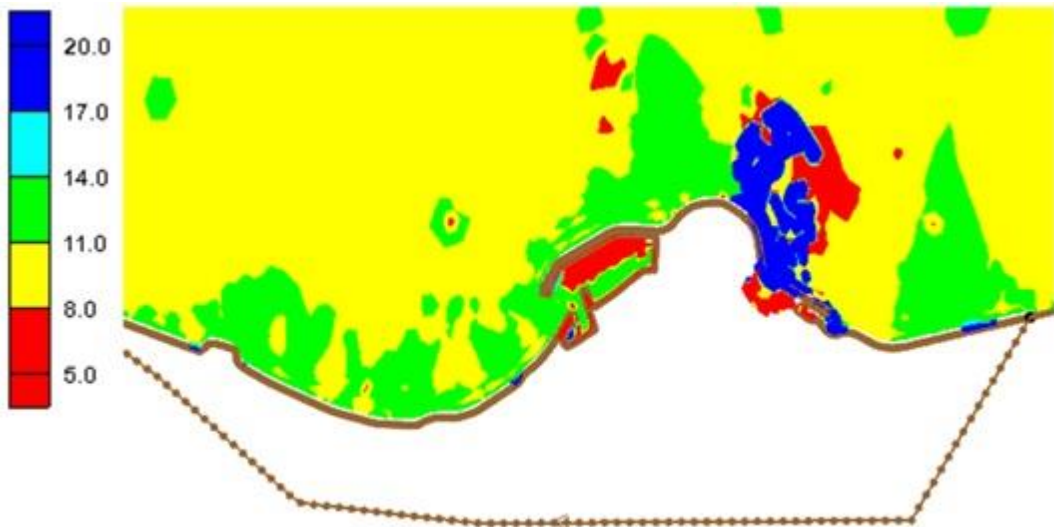
Şekil 6.15. Maksimum pik periyod dağılımı (s)

6.4.3 3. Durum Sonuçları

Maksimum temsili dalga yükseklikleri ile pik periyotlarının dağılımı sırasıyla Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de sunulmuştur. Şekil 6.16'da görüldüğü üzere 7.0m'yi aşan maksimum dalga yükseklikleri Giresun burnunun kuzeydoğu tarafında oluşmuştur 1.durumdaki gibi. En az dalga yükseklikleri dalgakıranın iç tarafında meydana gelirken burnun batı tarafında kıyıdaki dalga yükseklikleri 1.duruma göre artmış olup 3.3m ile 4.5m arasında değişmektedir. Burnun doğu tarafındaki kıyısında ise maksimum dalga yükseklikleri 5.0m'nin üzerindedir. ADCIRC üzerinden ıslatma kuruma mekanizması kapatılsa da artan su yükseklikleri nedeniyle SWAN tarafından Giresun burnunun doğusunda ıslatma hesaplandığı görülmüştür.



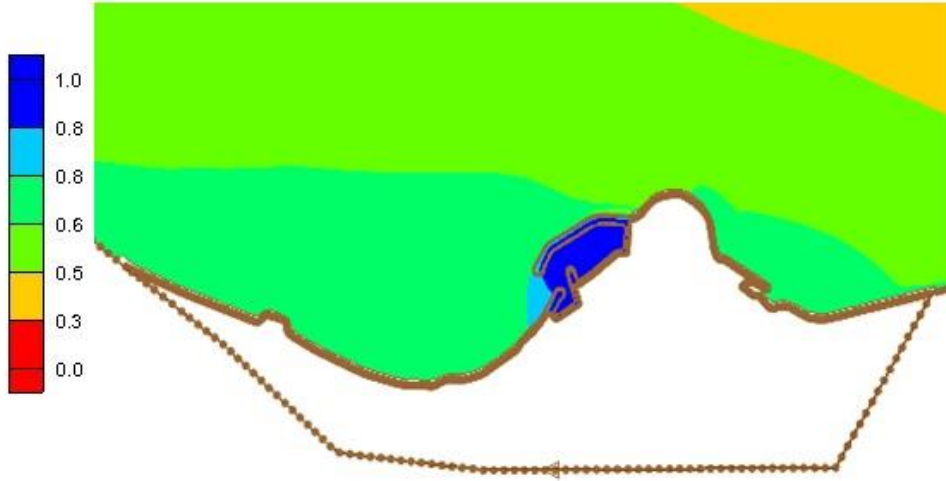
Şekil 6.16. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m)



Şekil 6.17. Maksimum pik periyod dağılımı (s)

6.4.4 4. Durum Sonuçları

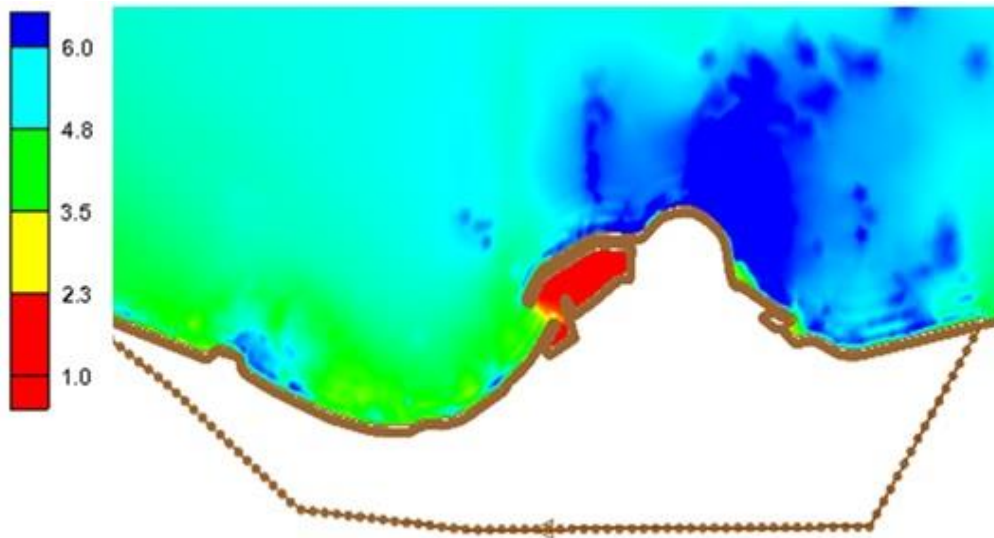
Yalnız ADCIRC simülasyonu yapılarak dalga etkilerinin göz ardı edildiği 4.durum için hesaplanan maksimum su yükseklikleri Şekil 6.18'de sunulmuştur. Sonuçlarda 1.durumda hesaplanan maksimum su yükseklikleri ile karşılaştırıldığında belirgin bir değişim fark edilememiştir.



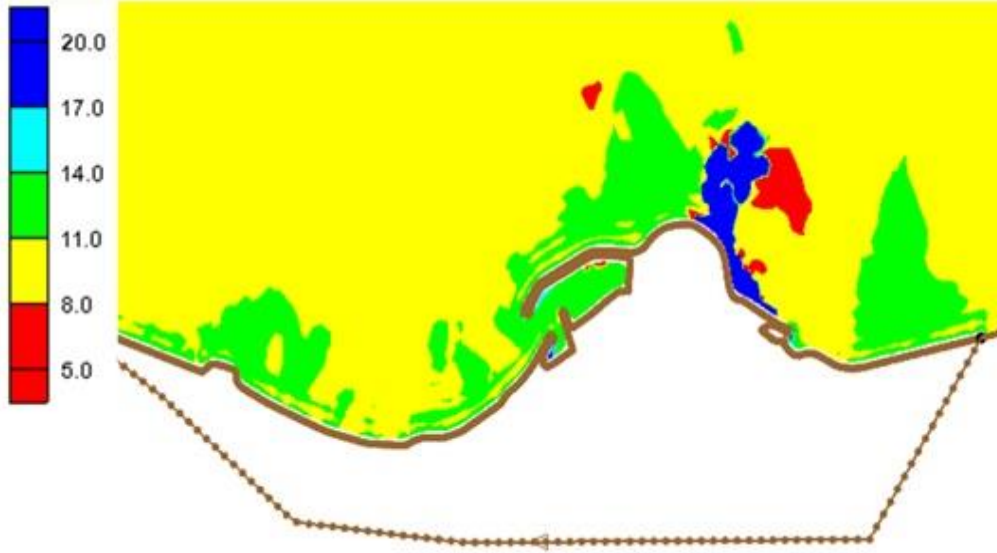
Şekil 6.18. Maksimum su yükseklikleri (m)

6.4.5 5. Durum Sonuçları

5. durum için hesaplanan maksimum temsili dalga yükseklikleri ile pik periyotlarının dağılımı sırasıyla Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de sunulmuştur. Sonuçlar 1.durum sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir.



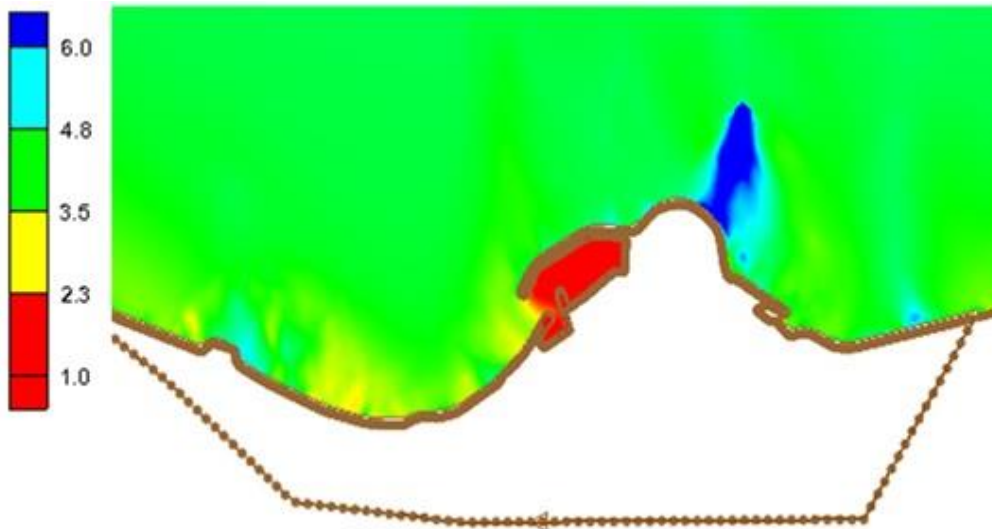
Şekil 6.19. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m)



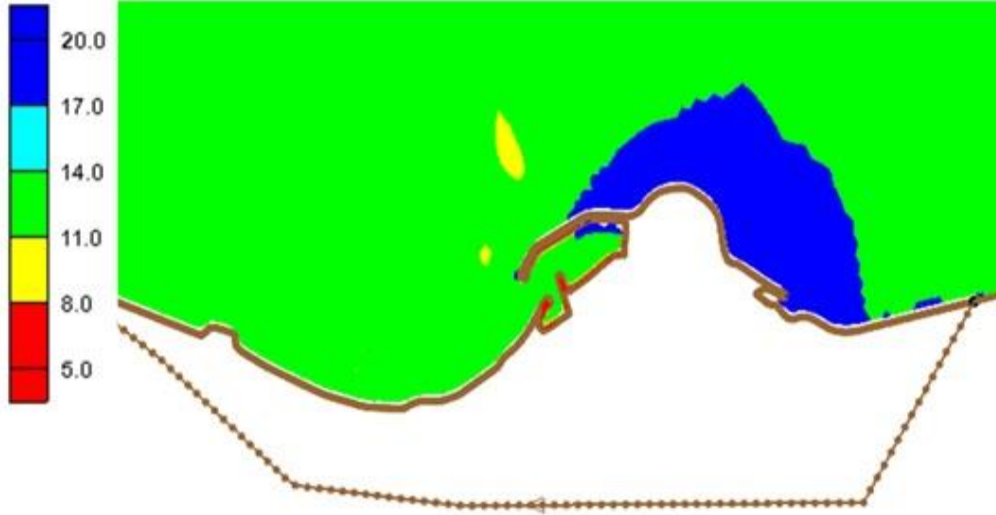
Şekil 6.20. Maksimum pik periyod dağılımı (s)

6.4.6 6. Durum Sonuçları

Maksimum temsili dalga yükseklikleri ile pik periyotlarının dağılımı sırasıyla Şekil 6.21 ve Şekil 6.22'de sunulmuştur. Çizimlerden dalga yüksekliklerinde belirgin bir azalma gözlenirken pik periyot değerleri artmıştır.



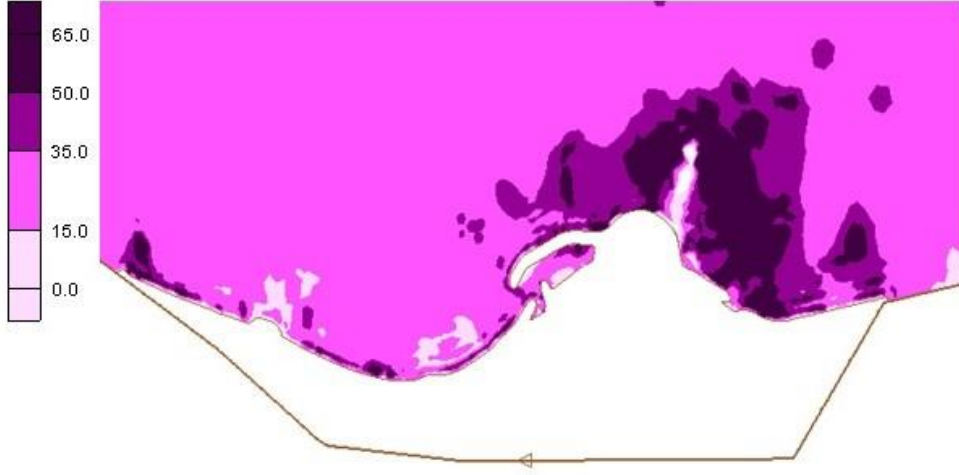
Şekil 6.21. Maksimum temsili dalga yükseklikleri (m)



Şekil 6.22. Maksimum pik periyod dağılımı (s)

6.5 Eylül 2014 Fırtınası Simülasyon Sonuçlarının Analizi

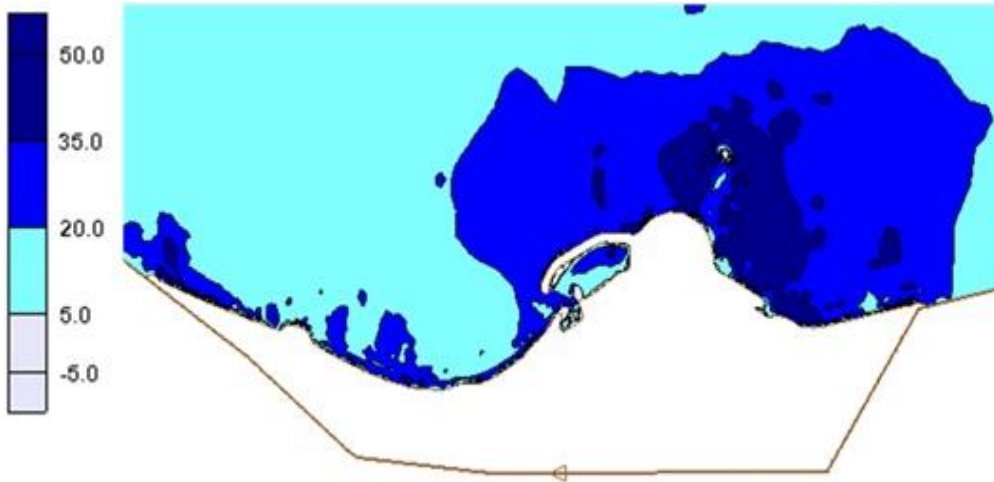
1. durum ile 2. durum sonuçları karşılaştırıldığında akıntı ve su yüksekliği bilgilerinin ADCIRC'den SWAN'a geçişini önlemenin (2. durum) derin denizdeki dalga yüksekliklerinde fazlaca bir etkisi olmadığı ancak azalan su derinliğiyle birlikte etkinin arttığı görülmüştür. Genel olarak 1. durum sonuçlarından daha yüksek temsili dalga yükseklikleri elde edilmiştir. Şekil 6.23'de 1.durum ile 2.durum sonuçları arasındaki farkların dağılımı yüzdesel olarak ifade edilmiştir. Kıyı etrafında dalga yükseklikleri 1. durumda 2. duruma göre %40 civarında daha yüksek olup aradaki fark dalgakıranın iç tarafında azalmıştır. Kıyı çizgisinin yakınlarındaki maksimum temsili dalga yükseklikleri farkının gözlemlendiği noktalar gerilme akılarının farklarının maksimum olduğu noktalar ile örtüşmektedir.



Şekil 6.23. 1. durum ile 2. durum arasındaki maksimum temsili dalga yükseklikleri farkları % olarak

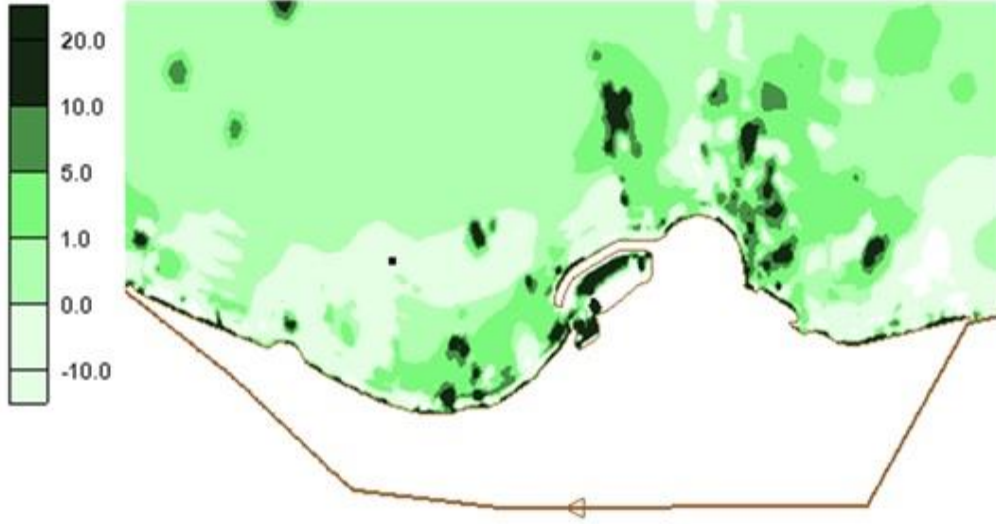
Maksimum yükseklikleri 2 durumun sonuçlarında karşılaştırıldı, bunlar iki yönlü tamamen bileşik simülasyon (1.durum) ile dalga etkilerinin dikkate alınmadığı yalnızca ADCIRC simülasyonu (4.durum). Bu karşılaştırmadan gerilme akılarının su yükseklikleri üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu sonucu çıktı. Düşük rüzgâr hızları ve buna karşılık gelen düşük gerilme akıları b sonucun sebepleri olarak gösterilebilir. Ancak Katrina Kasırgası çalışmalarında gerilme akıları su yüksekliklerinde %40'a varan bir artışa neden olmuştur (Dietrich,2010).

6. durum sonuçları incelendiğinde akıntı bilgilerinin ADCIRC'den SWAN'a geçişini engellemenin çalışma alanının neredeyse tamamında dalga yüksekliklerinde düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum temsili dalga yükseklikleri arasındaki 1.duruma göre olan fark derin deniz taraflarında %5'den azken kıyıya doğru giderek artmıştır. Burnun batı tarafında %20'nin üzerinde olan farklar doğu tarafında %40'a kadar çıkmıştır (Şekil 6.24).



Şekil 6.24. 1. durum ile 6. durum arasındaki maksimum temsili dalga yükseklikleri farkları % olarak

1. durum ile 3. durum sonuçları karşılaştırıldığında ADCIRC üzerinde sonlu genlik terimi ile ıslatma kuruma mekanizmasının kapatılmasının dalga yüksekliklerinde artışa neden olduğu görülmüştür (Şekil 6.25). Çalışma alanının geneli için bu artış %1 civarı iken kıyı çizgisi boyunca fark daha fazladır. Islama kuruma mekanizmasının kapatılması kıyı boyunca daha fazla miktarda suyun birikmesine neden olmaktadır. Sonuçların incelenmesiyle kıyı boyunca %20-40 arasında bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 6.25. 1. durum ile 3. durum arasındaki maksimum temsili dalga yükseklikleri farkları % olarak

6.6 ADCIRC-SWAN Birleşik Modellemesi ile Hesaplanan Su Basması Sonuçları

Su basması çalışmaları farklı senaryolar göz önünde bulundurulmuştur. ADCIRC SWAN simülasyonlarında Giresun burnunun önünde hesaplanan dalga parametreleri NAMI-DANCE kullanılarak yapılan simülasyonlar için girdi verisi oluşturulmasında kullanılmıştır. Temsili dalga yüksekliği ve periyod bilgileri kullanılarak JONSWAP spektrum yaklaşımı ile 15 dakikalık düzensiz dalga genlik verileri elde edilmiştir.

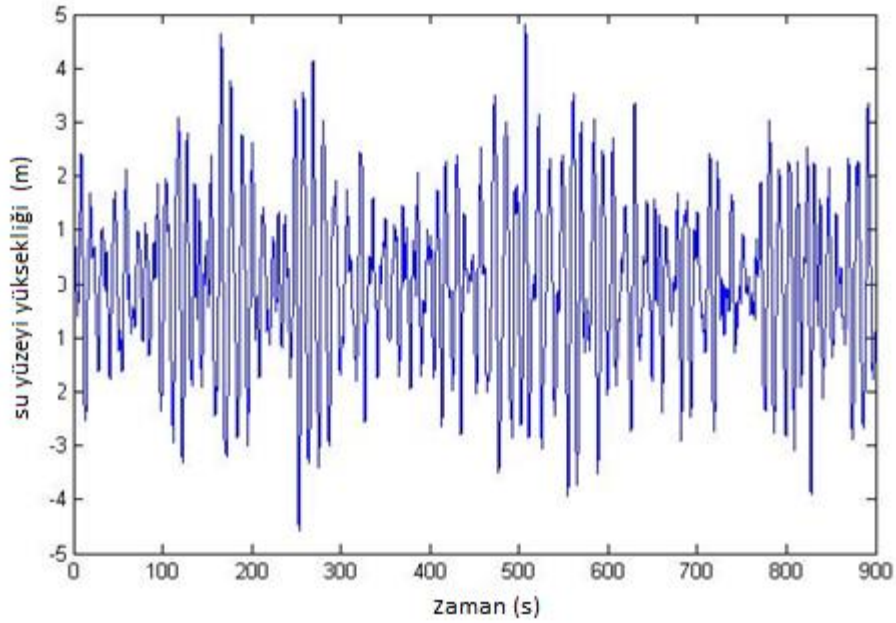
Fırtına sırasında çekilen video görüntülerinin incelenmesi ile dalga periyodunun yaklaşık 10.5s olduğu görülmüştür kayıt sırasında. ADCIRC+ SWAN modellemesi ile hesaplanan temsili dalga yükseklikleri de 7.5 m ile 4.5 arasındadır. Bu sebeple 3 farklı durum için düzensiz dalga genlik verileri oluşturulmuştur. Tablo 6.2'de bu 3 durum için seçilen dalga değerleri sunulmuştur.

Tablo 6.2. Farklı durumlar için dalga koşulları

Durum	Hs (m)	Ts (s)
A	6	11
B	5.5	12
C	4.5	10

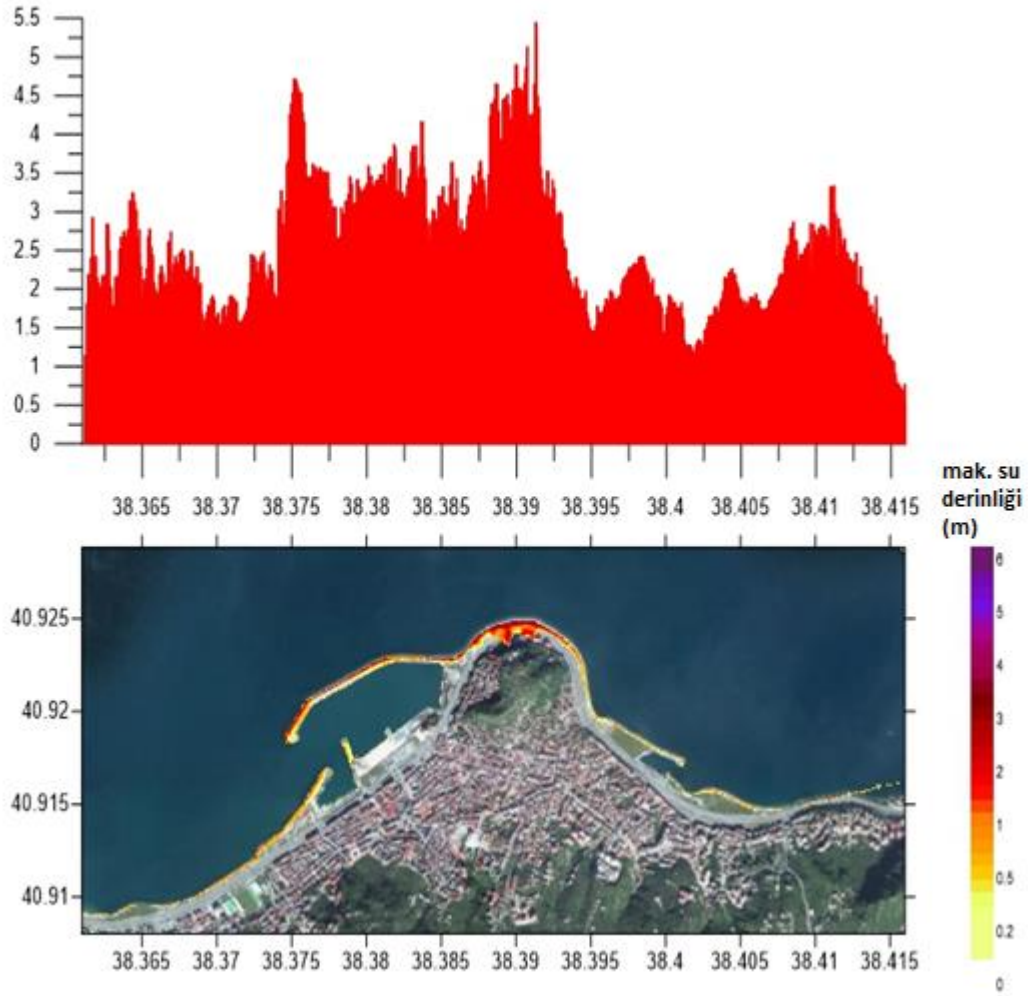
6.6.1 Durum A Sonuçları

Giresun burnunun önünden girdi olarak verilen düzensiz dalga genliklerinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.26'de sunulmuştur.



Şekil 6.26. Giresun açıklarında girdi olarak verilen ($H_s= 6m$ $T_s=11s$) için düzensiz dalga zaman grafiği

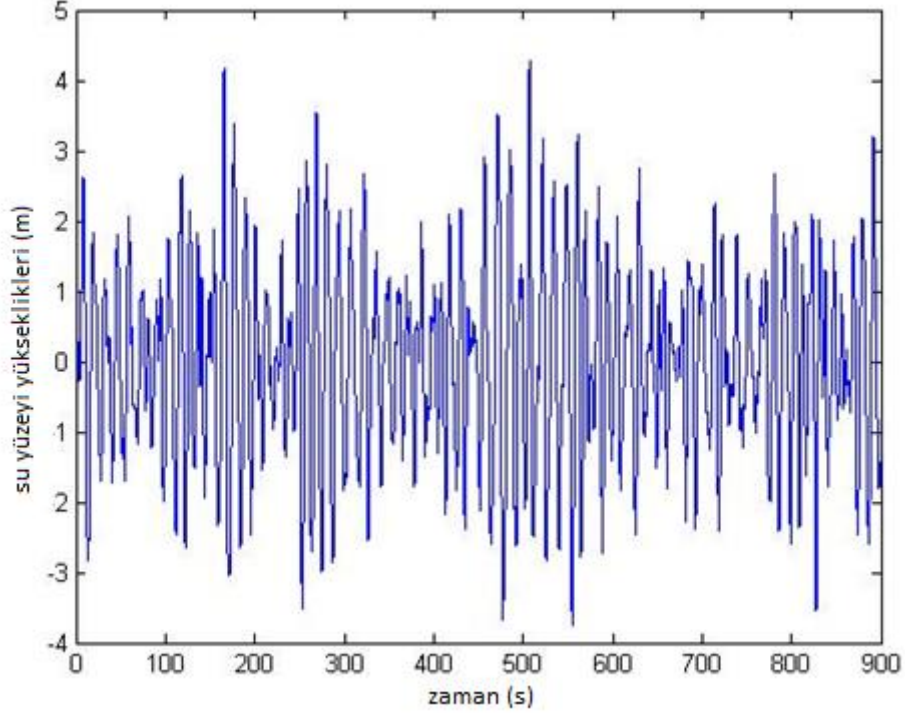
Kıyı boyunca hesaplanan maksimum su yükseklikleri Şekil 6.27'de üst kısımda bar grafiği olarak, su altında kalan alanlar da alt kısımda sunulmuştur. Maksimum su derinlikleri Giresun burnunun uç kısmında yaklaşık 3.3m değerlerinde gözlenmiştir. Burası aynı zamanda 5.5m'ye varan yükseklikler ile kıyıda en yüksek dalgaların görüldüğü alandır. Dalgakıranın uç kısmında 2.8m'ye varan su derinlikleri gözlenirken kıyı boyunca 1.0m civarında derinlikler hesaplanmıştır.



Şekil 6.27. Simülasyon sırasında hesaplanan kıyı boyunca maksimum su yükseklikleri (üst kısım) ve su altında kaldığı hesaplanan alanlar (alt kısım)

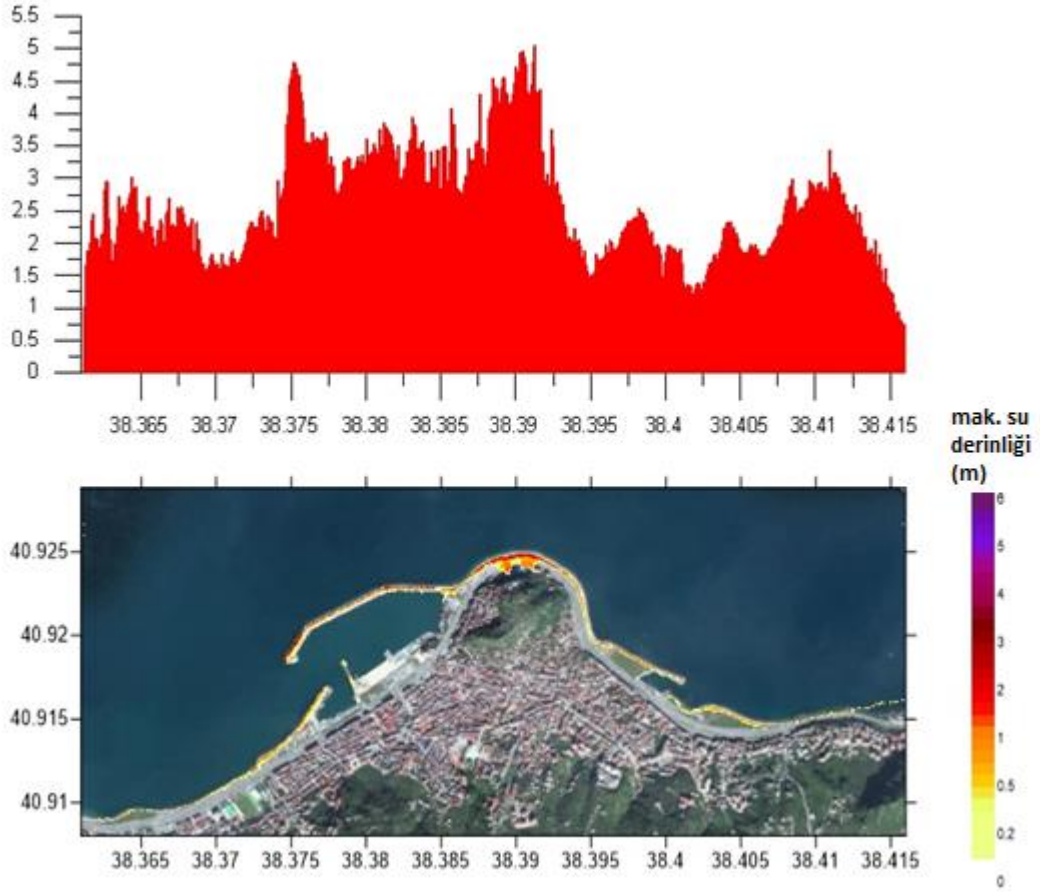
6.6.2 Durum B Sonuçları

Giresun burnunun önünden girdi olarak verilen düzensiz dalga genliklerinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.28'de sunulmuştur.



Şekil 6.28. Giresun açıklarında girdi olarak verilen ($H_s = 5.5\text{m}$ $T_s = 12\text{s}$) için düzensiz dalga zaman grafiği

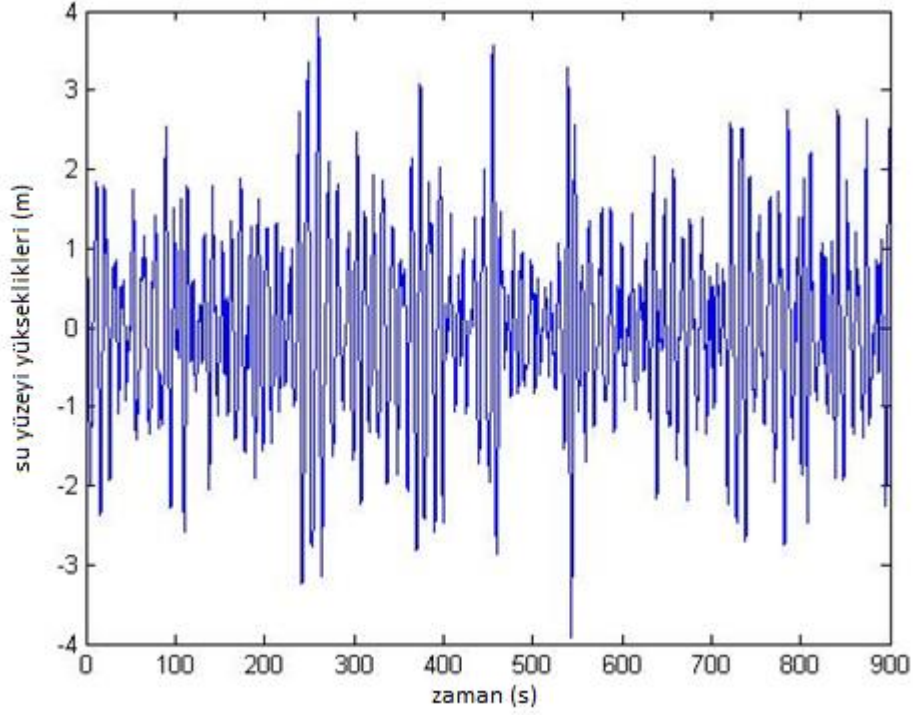
Kıyı boyunca hesaplanan maksimum su yükseklikleri Şekil 6.29'da üst kısımda bar grafiği olarak, su altında kalan alanlar da alt kısımda sunulmuştur. Maksimum su derinlikleri Giresun burnunun uç kısmında 2.5m-3.0m değerlerinde gözlenmiştir. Dalgakıranın uç kısmında 2.8m'ye varan su derinlikleri gözlenirken kıyı boyunca 1.0m civarında derinlikler hesaplanmıştır.



Şekil 6.29. Simülasyon sırasında hesaplanan kıyı boyunca maksimum su yükseklikleri (üst kısım) ve su altında kaldığı hesaplanan alanlar (alt kısım)

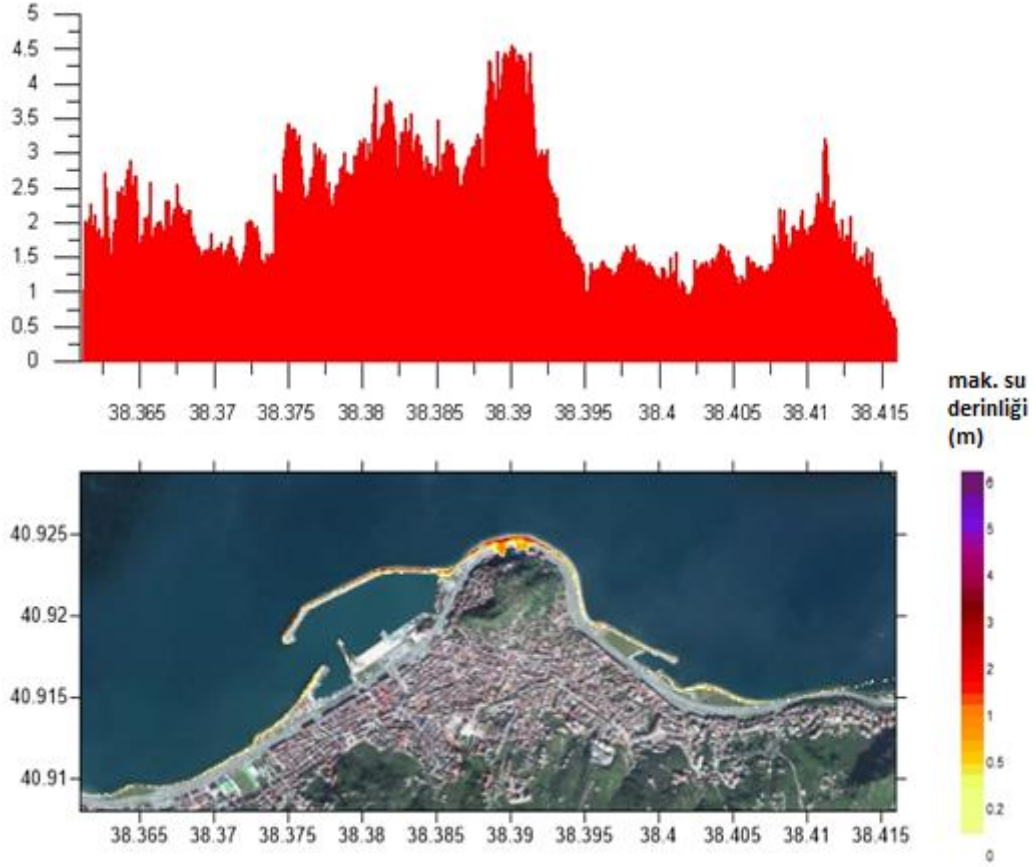
6.6.3 Durum C Sonuçları

Giresun burnunun önünden girdi olarak verilen düzensiz dalga genliklerinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.30'da sunulmuştur.



Şekil 6.30. Giresun açıklarında girdi olarak verilen ($H_s = 4.5\text{m}$ $T_s = 10\text{s}$) için düzensiz dalga zaman grafiği

Kıyı boyunca hesaplanan maksimum su yükseklikleri Şekil 6.31'de üst kısımda bar grafiği olarak, su altında kalan alanlar da alt kısımda sunulmuştur. Maksimum su derinlikleri Giresun burnunun uç kısmında 2.5m civarında gözlenmiştir. Dalgakıran üzerindeki su basan alan oldukça azalmış olup su derinlikleri yer yer 1.0m'ye varmıştır. Kıyı boyunca yine su basması oldukça dar bir alanda meydana gelip yer yer 1.0m'ye varan su derinlikleri hesaplanmıştır.



Şekil 6.31. Simülasyon sırasında hesaplanan kıyı boyunca maksimum su yükseklikleri (üst kısım) ve su altında kaldığı hesaplanan alanlar (alt kısım)

6.7 Eylül 2014 Fırtınası Su basması Çalışmalarının Sonuçlarının Analizi

Saha gözlemleri tanıklarla yapılan görüşmelerden ve haberlerden derlendiğinde Karadeniz Sahil Yolu'nun fırtına sebebiyle denizden su bastığı ve zarara gördüğü gözlemlenmiştir. NAMI-DANCE ile yürütülen nümerik modelleme çalışmaları her 3 durum için de su basması ile sonuçlanmıştır. Giresun burnunun uç noktasının su basmasına karşı en yatkın konum olduğu görülmüştür, karadaki maksimum su derinlikleri de bu noktada meydana gelmiştir. Görgü tanıkları ile haberler de bunu doğrulamaktadır. Her durum için su basmasının görüldüğü toplam alan da hesaplanmış olup Tablo 6.3'de sunulmuştur. Tablo 6.3'den görüldüğü üzere su basmasının en geniş alanda meydana geldiği durum temsili dalga yüksekliğinin en fazla olduğu durum A'dır.

Tablo 6.3. 3 durum için hesaplanan su altında kalan toplam alan miktarları

Durum	Su altında kalan toplam alan (km ²)	Hs	Ts
A	0.094815	6	11
B	0.092927	5.5	12
C	0.070782	4.5	10

Ölçüm değerleri eksikliğinden ötürü simülasyon sonuçlarının gerçek değerlerle niceliksel karşılaştırmasını yapmak mümkün değil. Ancak niteliksel olarak Hs= 6m Ts=11s girdi değerleriyle yürütülen simülasyon sonuçlarının gözlemlerle uygunluk sağladığı söylenebilir. İleriki çalışmalarda niteliksel analiz için yapı bilgilerini içeren detaylı topoğraf verisinin kullanılması önerilir.

6.8 Eylül 2014 Fırtınasının Modelleme Sonuçları

Bu çalışmada 23-25 Eylül 2014 tarihleri arasındaki fırtına sırasında Giresun'da meydana gelen su basması olayı çalışılmıştır. Fırtına sırasında meydana gelen dalgalara ait parametreler iki yönlü tamamen bileşik ADCIRC-SWAN modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu parametreler daha sonra NAMI-DANCE ile su basması çalışmalarında girdi verisi olarak kullanılmıştır. Ayrıca fırtına çalışmaları sırasında ADCIRC ve SWAN arasında paylaşılan verilerin dalga sonuçları üzerindeki etkilerinin incelenmesi için farklı durumlar çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

Rüzgâr hızlarının maksimum 24m.s olduğu durumda dalgaların maksimum su yükseklikleri üzerindeki etkisi ihmal edilebilir seviyede kalmıştır.

Bileşik ADCIRC-SWAN simülasyonu su yüksekliği bilgisinden ziyade akıntı bilgisine karşı daha hassastır.

Dalga etkilerinin göz ardı edilmesi (ADCIRC modelinin SWAN ile birleşmesini önleyerek) dalga yüksekliklerinde özellikle kıyı etrafında belirgin bir düşüşe neden olmuştur.

Hs=6m ve Ts=11s için hazırlanan zamana bağlı düzensiz dalga genlikleri girdisi ile elde edilen su basması sonucu gazete haberleri ve medya raporları ile uygunluk göstermektedir.

İleriki çalışmalar için aşağıdaki tavsiyelerde bulunulmakta:

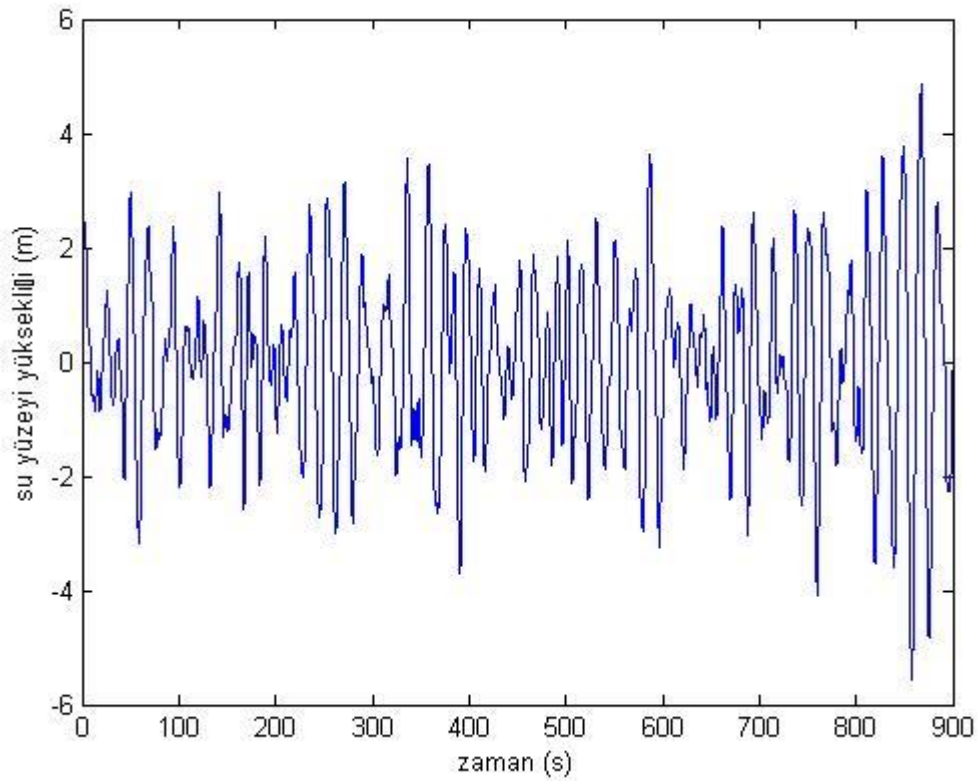
Su basmasının eksiksiz belirlenebilmesi için detaylı saha çalışmasına ihtiyaç var.

Olabildiğince detaylı batimetri ve yapı bilgilerinin yer aldığı topoğrafya verileri daha kesin sonuçlar elde etmeye yardımcı olur.

Bu madde

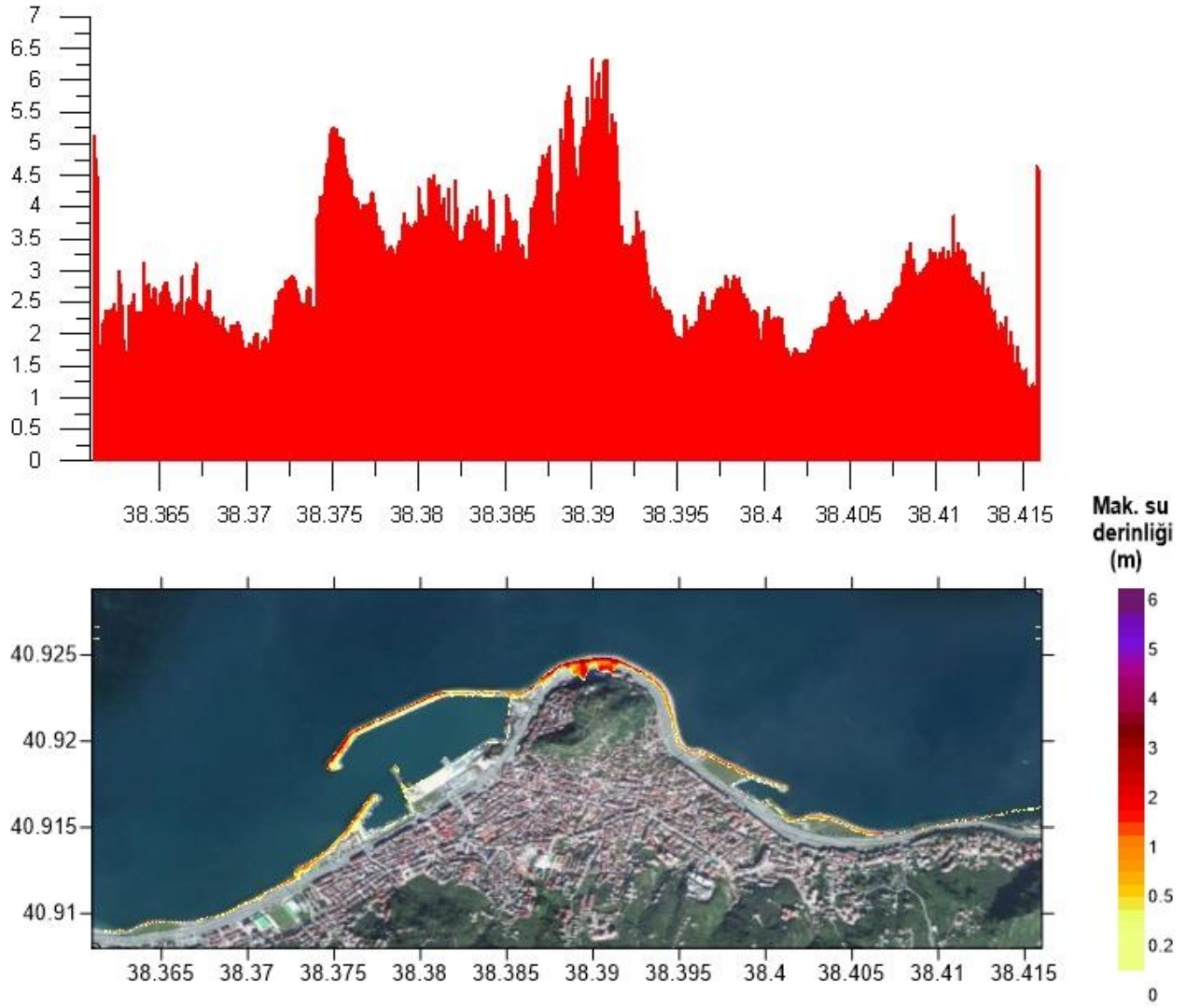
6.9 Şubat 1999 Fırtınası Su Basması Modelleme Çalışmaları

Yapılan dalga analizlerinde bu fırtına sırasındaki maksimum temsili dalga yüksekliği 6.0m, temsili dalga periyodunun ise yaklaşık 18s olduğu hesaplanmıştır. NAMI-DANCE ile su basması çalışması için bu dalga parametreleri kullanılarak JONSWAP spektrum yöntemi ile düzensiz dalga genlikleri oluşturulup Giresun burnunun önünden girdi verisi olarak verilmiştir. Şekil 7.1'de girdi olarak verilen düzensiz dalga genliklerinin zamana bağlı değişimi sunulmuştur.



Şekil 6.10.1. Giresun açıklarında girdi olarak verilen ($H_s= 6m$ $T_s =18s$) için düzensiz dalga zaman grafiği

Kıyı boyunca hesaplanan maksimum su yükseklikleri Şekil 7.2'de üst kısımda bar grafiği olarak, su altında kalan alanlar da alt kısımda sunulmuştur. Maksimum su derinlikleri Giresun burnunun uç kısmında 4.5m'yi aşan değerlerde gözlenmiştir. Burası aynı zamanda 6.3m'ye varan yükseklikler ile kıyıda en yüksek dalgaların görüldüğü alandır. Dalgakıranın uç kısmında 3m'ye varan su derinlikleri gözlenirken kıyı boyunca yer yer 1.5m'ye varan derinlikler hesaplanmıştır. Su altında kalan toplam alan 0.12 km² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.10.2. Simülasyon sırasında hesaplanan kıyı boyunca maksimum su yükseklikleri (üst kısım) ve su altında kaldığı hesaplanan alanlar (alt kısım)

Sonuç olarak Şubat 1999 fırtınasının karaya su basma bölgeler gözlemlerle uyumlu bulunmuştur.

KAYNAKLAR

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER), Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2) (2011). Retrieved 20 June 2015, from <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>.

Airy, G. B. (1878). On the tides at Malta. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 169, 123-138.

Antonopoulos, J. (1992). The tsunami of 426 BC in the Maliakos gulf, eastern Greece. *Natural hazards*, 5(1), 83-93.

Bechle, A. J., & Wu, C. H. (2014). The Lake Michigan meteotsunamis of 1954 revisited. *Natural hazards*, 74(1), 155-177.

Bender, C., Miller, W., Naimaster, A., & Mahoney, T. (2012). WAVE MODELING WITH SWAN+ADCIRC FOR THE SOUTH CAROLINA COASTAL STORM SURGE STUDY. *Int. Conf. Coastal. Eng.*, 1(33). <http://dx.doi.org/10.9753/icce.v33.waves.48>

Black, P. G., D'Asaro, E. A., Drennan, W. M., & French, J. R. (2007). AIR-SEA EXCHANGE IN HURRICANESL: Synthesis of Observations from the Coupled Boundary Layer Air-Sea Transfer Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(3), 357.
doi:10.1175/BAMS-88-3-357

Candella, R. N. (2009). Meteorologically induced strong seiches observed at Arraial do Cabo, RJ, Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(17), 989-997.

Churchill, D. D., Houston, S. H., & Bond, N. A. (1995). The Daytona Beach Wave of 3-4 July 1992: a shallow-water gravity wave forced by a propagating squall line. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(1), 21-32.

Cicin-Sain, B., Knecht, R. W., & Foster, N. (1999). Trends and future challenges for US national ocean and coastal policy. *National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland, USA*. Retrieved from http://oceanservice.noaa.gov/websites/retiredsites/natdia_pdf/ctrends_proceed.pdf

Collet, I., & Engelbert, A. (2013). Coastal regions: people living along the coastline, integration of NUTS 2010 and latest population grid. *Statistics in focus*, 30, 2013.

Dietrich, J. C. (2011). *Development and application of coupled hurricane wave and surge models for southern Louisiana*. University of Notre Dame.

Donn, W. L. (1959). The Great Lakes storm surge of May 5, 1952. *Journal of Geophysical Research*, 64(2), 191-198.

Dragani, W. C., D'Onofrio, E. E., Grismeyer, W., Fiore, M. M., & Campos, M. I. (2009). Atmospherically-induced water oscillations detected in the Port of Quequén, Buenos Aires, Argentina. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(17), 998-1008.

Ewing, M., Press, F., & Donn, W. L. (1954). An explanation of the Lake Michigan wave of 26 June 1954. *Science*, 120(3122), 684-686.

Fallis, A. . (2013). SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Garratt, J. R. (1977). Review of Drag Coefficients over Oceans and Continents. *Monthly Weather Review*. doi:10.1175/1520-0493(1977)105<0915:RODCOO>2.0.CO;2

General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO_08 Grid (Version 20100927) (2010). Retrieved 20 June 2015, from <http://www.gebco.net>.

Greenspan, H. P. (1956). The generation of edge waves by moving pressure distributions. *Journal of Fluid Mechanics*, 1(06), 574-592.

Hibiya, T., & Kajiura, K. (1982). Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 38(3), 172-182.

Holthuijsen, L. H. (2015). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press (Vol. 1). doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Jelesnianski, C., Chen, J., & Shaffer, W. (1992). SLOSH: Sea, lake, and overland surges from hurricanes. *NOAA Tech. Rep. NWS 48, NOAA AOML Library, Miami, Fla.* (Vol. 48).

Retrieved from

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:SLOSH:+Sea,+Lake,+and+Overland+Surges+from+Hurricanes#0>

Kamphuis, J. W. (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management. *Advanced Series on Ocean Engineering* (Vol. 16). doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2

Kennedy, A. B., Westerink, J. J., Smith, J. M., Hope, M. E., Hartman, M., Taflanidis, A. a., ... Dawson, C. (2012). Tropical cyclone inundation potential on the Hawaiian Islands of Oahu and Kauai. *Ocean Modelling*. doi:10.1016/j.ocemod.2012.04.009

Kerr, P. C., Martyr, R. C., Donahue, A. S., Hope, M. E., Westerink, J. J., Jr, R. A. L., ... Westerink, H. J. (2013). U . S . IOOS coastal and ocean modeling testbed : Evaluation of tide , wave , and hurricane surge response sensitivities to mesh resolution and friction in the Gulf of Mexico, *118*, 4633–4661. doi:10.1002/jgrc.20305

Kerr, P., Martyr, R., Donahue, A., Hope, M., Westerink, J., & Luettich, R. et al. (2013). U.S. IOOS coastal and ocean modeling testbed: Evaluation of tide, wave, and hurricane surge response sensitivities to mesh resolution and friction in the Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res. Oceans*, *118*(9), 4633-4661. <http://dx.doi.org/10.1002/jgrc.20305>

Kian, R., Yalciner, A.C., Zaytsev, A., & Aytore, B. (2015, April). Tsunami Induced Resonance in Enclosed Basins; Case Study of Haydarpasa Port In Istanbul. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 17, p. 154).

Lipa, B., Parikh, H., Barrick, D., Roarty, H., & Glenn, S. (2014). High-frequency radar observations of the June 2013 US East Coast meteotsunami. *Natural hazards*, *74*(1), 109-122.

Liu, H., Xie, L., Pietrafesa, L. J., & Peng, M. (2006). Effect of ocean surface waves on storm surge and coastal flooding. *27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 24–28.

Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. w. (1964). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, *11*(4), 529–562. doi:10.1016/0011-7471(64)90001-4

Marcos, M., Monserrat, S., Medina, R., & Vidal, C. (2003). Influence of the atmospheric wave velocity in the coastal amplification of meteotsunamis. In *Submarine Landslides and Tsunamis* (pp. 243-249). Springer Netherlands.

Mellor, G. L. (1991). An equation of state for numerical models of oceans and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *8*(4), 609-611.

Mercer, D., Sheng, J., Greatbatch, R. J., & Bobanović, J. (2002). Barotropic waves generated by storms moving rapidly over shallow water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *107*(C10).

Metin, A.D., Yalciner, A.C., Ozyurt Tarakcioglu, G., & Zaytsev, A. (2015). Generation and Propagation of Long Waves due to Spatial and Temporal Pressure Distributions. In *2015 AGU Fall Meeting*. Agu.

Monserrat, S., & Rabinovich, A. B. (2006). Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(6), 1035-1051.

Monserrat, S., Ibbetson, A., & Thorpe, A. J. (1991). Atmospheric gravity waves and the 'rissaga' phenomenon. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 117(499), 553-570.

Monserrat, S., Vilibić, I., Rabinovich, A. B. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band: *Natural Hazards and Earth System Science*, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2006, 6 (6), pp.1035- 1051. <hal-00299394>

Moon, I. J., Oh, I. S., Murty, T., & Youn, Y. H. (2003). Causes of the unusual coastal flooding generated by Typhoon Winnie on the West Coast of Korea. *Natural Hazards*, 29(3), 485–500. doi:10.1023/A:1024798718572

NAMI DANCE Manual (2010). Developed by Zaytsev, C., Yalciner, Pelinovsky, Kurkin. Tsunami Simulation/Visualization Code NAMI DANCE versions 4.9. <http://www.namidance.ce.metu.edu.tr>

Niedoroda, A. W., Resio, D. T., Toro, G. R., Divoky, D., Das, H. S., & Reed, C. W. (2010). Analysis of the coastal Mississippi storm surge hazard. *Ocean Engineering*, 37(1), 82–90. doi:10.1016/j.oceaneng.2009.08.019

NOAA. (2013). National Coastal Population Report. *NOAA's State of the Coast*.

Papadopoulos, G. A. (1993). On some exceptional seismic (?) sea-waves in the Greek archipelago. *Science of Tsunami Hazards*, 11, 25-34.

Park, Y. H. (1986). Water characteristics and movements of the Yellow Sea Warm Current in summer. *Progress in Oceanography*, 17(3), 243-254.

Pasquet, S., & Vilibić, I. (2013). Shelf edge reflection of atmospherically generated long ocean

waves along the central US East Coast. *Continental Shelf Research*, 66, 1-8.

Pattiaratchi, C. B., & Wijeratne, E. M. S. (2015). Are meteotsunamis an underrated hazard?. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373(2053), 20140377.

Paxton, C. H., & Sobien, D. A. (1998). Resonant interaction between an atmospheric gravity wave and shallow water wave along Florida's west coast. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(12), 2727-2732.

Peng, M., Xie, L., & Pietrafesa, L. J. (2004). A numerical study of storm surge and inundation in the Croatan–Albemarle–Pamlico Estuary System. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(1), 121–137. doi:10.1016/j.ecss.2003.07.010

Ph, G., Vledder, V., & Akpınar, A. (2015). Wave model predictions in the Black Sea : Sensitivity to wind fields. *Physics Procedia*, 53, 161–178. doi:10.1016/j.apor.2015.08.006

Powell, M. D., & Ginis, I. (2006). Drag coefficient distribution and wind speed dependence in tropical cyclones. *Final Report to the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Joint Hurricane Testbed (JHT) Program*.

Proudman, J. (1929). The Effects on the Sea of Changes in Atmospheric Pressure. *Geophysical Journal International*, 2(s4), 197-209.

Rabinovich, A. B. (2009). Seiches and harbor oscillations. *Handbook of coastal and ocean engineering*, 193-236.

Rabinovich, A. B., & Monserrat, S. (1996). Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: descriptive and statistical analysis. *Natural Hazards*, 13(1), 55-90.

Sallenger Jr, A. H., List, J. H., Gelfenbaum, G., Stumpf, R. P., & Hansen, M. (1995). Large wave at Daytona Beach, Florida, explained as a squall-line surge. *Journal of Coastal Research*, 1383-1388.

Salmon, J. (2011). Re-scaling the Battjes-Janssen model for depth- induced wave-breaking, (November). doi:10.13140/2.1.2525.9842

Sebastian, A., Proft, J., Dietrich, J. C., Du, W., Bedient, P. B., & Dawson, C. N. (2014). Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN+ADCIRC model. *Coastal Engineering*, 88, 171–181. doi:10.1016/j.coastaleng.2014.03.002

Šepić, J., Vilibić, I., & Belušić, D. (2009). Source of the 2007 1st meteotsunami (Adriatic Sea). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C3).

Šepić, J., Vilibić, I., & Strelec Mahović, N. (2012). Northern Adriatic meteorological tsunamis: observations, link to the atmosphere, and predictability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C2).

Šepić, J., Vilibić, I., Rabinovich, A. B., & Monserrat, S. (2015). Widespread tsunami-like waves of 23-27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-altitude atmospheric forcing. *Scientific reports*, 5.

Sheng, Y. P., Zhang, Y., & Paramygin, V. a. (2010). Simulation of storm surge, wave, and coastal inundation in the Northeastern Gulf of Mexico region during Hurricane Ivan in 2004. *Ocean Modelling*, 35(4), 314–331. doi:10.1016/j.ocemod.2010.09.004

Shuto, N., Goto, C., & Imamura, F. (1990). Numerical simulation as a means of warning for near field tsunamis. *Coastal Engineering in Japan*, 33(2), 173-193. Imamura, F., Yalciner, A. C., & Ozyurt, G. (2006). Tsunami modelling manual. *UNESCO IOC international training course on Tsunami Numerical Modelling*.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). *A description of the advanced research WRF version 2* (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.

Sun, Y., Chen, C., Beardsley, R. C., Xu, Q., Qi, J., & Lin, H. (2013). Impact of current-wave interaction on storm surge simulation: A case study for Hurricane Bob. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5), 2685–2701. doi:10.1002/jgrc.20207

Tanaka, K. (2010). Atmospheric pressure-wave bands around a cold front resulted in a meteotsunami in the East China Sea in February 2009. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 10, 2599-2610.

Tarakcioglu, G.O., Yalciner, A.C., Kirezci, C., Guler G., Baykal C., Erol, O., ..., Kurkin A. (2015). Recent Extreme Marine Events at Southern Coast of Black Sea. Poster session presented at European Geosciences Union General Assembly 2015, Vienna, Austria.

Unit, N. H. C. S. S. (2008). *Introduction to What is Storm Surge ?*

Vilibić, I., Monserrat, S., Rabinovich, A., & Mihanović, H. (2008). Numerical modelling of the destructive meteotsunami of 15 June, 2006 on the coast of the Balearic Islands. *Pure and Applied geophysics*, 165(11-12), 2169-2195.

Vilibić, I., Šepić, J., Rangelov, B., Mahović, N. S., & Tinti, S. (2010). Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C7).

Vučetić, T., Vilibić, I., Tinti, S., & Maramai, A. (2009). The Great Adriatic flood of 21 June 1978 revisited: An overview of the reports. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(17), 894-903.

Wang, X., Li, K., Yu, Z., & Wu, J. (1987). Statistical characteristics of seiches in Longkou Harbour. *Journal of physical oceanography*, 17(7), 1063-1065.

Waters, E. (2000). A (PARALLEL) ADVANCED CIRCULATION MODEL FOR OCEANIC , COASTAL AND ESTUARINE WATERS, 1994–2000.

Weisberg, R. H., & Zheng, L. (2006). A simulation of the Hurricane Charley storm surge and its breach of North Captiva Island. *Florida Scientist*, (January), 1–26.

Weisberg, R., & Zheng, L. (2006). Hurricane Storm Surge Simulations for Tampa Bay. *Estuaries and Coasts*, 29(6), 899–913. doi:10.1007/BF02798649

Wu, T. Y. (1981). Long waves in ocean and coastal waters. *Journal of Engineering Mechanics*, 107(EM3), 501-522.

Xie et al. (2004). Incorporation of a Mass-Conserving Inundation Scheme into a Three Dimensional Storm Surge Model.pdf.

Yalciner, A. C., & Pelinovsky, E. N. (2007). A short cut numerical method for determination of periods of free oscillations for basins with irregular geometry and bathymetry. *Ocean engineering*, 34(5), 747-757.

Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. V., & Grashorn, S. (2016). Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102, 64-81.

Zijlema, M., Van Vledder, G. P., & Holthuijsen, L. H. (2012). Bottom friction and wind drag for wave models. *Coastal Engineering*, 65, 19–26. doi:10.1016/j.coastaleng.2012.03.002

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. AHMET CEVDET YALÇINER
Proje No:	213M534
Proje Başlığı:	Karadeniz Kıyılarında Deniz Kaynaklı Doğal Afetlerin Modellenmesi için Yeni Araçlar ve Risk Değerlendirmesi
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	GÜLİZAR ÖZYURT TARAKCIOĞLU
Danışmanlar:	AYŞEN ERGİN, IŞIKHAN GÜLER
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B. DENİZ MÜHENDİSLİĞİ ARŞ. MRK.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/07/2014 - 01/07/2016
Onaylanan Bütçe:	408180.0
Harcanan Bütçe:	158042.93
Öz:	<p>Karadeniz'de, kapalı bir havza olmasına rağmen, aşırı şiddetli fırtınalar ve fırtına kabarmaları, tsunami, ender dalgalar ve hortumlar periyodik olarak görülmektedir. Ekstrem fırtınaların frekansında son yıllarda artış olduğu düşünülmektedir. Projenin genel amacı, doğal afetlerle (tsunami, fırtınalar ve ender dalgalar) ilişkili olan uzun dönemli dalgaları modellemek ve kıyıda yarattıkları etkileri yeni araçlar ve sayısal analiz teknikleri ile çalışılmış ve yeni yazılım ve araçlar üretilmiştir. Fırtına kabarmasının etkilerinin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi ile ilgili ulusal bir modelleme aracı yoktur. Projede, tarihteki ekstrem fırtına, tsunami, seyş ve ender dalga afetlerinin yazılı basında, raporlarda, ölçümlerde ve yerel gözlemlerde bulunan bilgiler kullanılarak incelenmiştir. Fırtına kabarmasının dinamikleri ve parametrelerini analiz etmek için sayısal model geliştirilecek ve bu model bir modül olarak NAMI DANCE yazılımına entegre edilmiştir. Böylece, fırtına kabarmasından kaynaklı baskın alanlarının karakterleri ve dalgaların kıyı yapıları üzerine etkileri de NAMI DANCE yazılımıyla analiz edilmiştir.</p> <p>İklim değişikliğinin, özellikle deniz seviyesi yükselmesinin ve Karadeniz sularındaki diğer periyodik hareketlerin (basen rezonansı, gel-git, vd.) baskın alanlarındaki ve yapısal hasarlar üzerindeki etkileri deterministik senaryolar yardımıyla değerlendirilmiştir.</p> <p>Ortak kurumlar arasındaki işbirliği, ağ kurma ve bilgi değişimi, proje için güçlü bir odak olarak yer almıştır. Türk ve Rus araştırma ekiplerinin her ikisi de tsunami modelleme ve beraber çalışma konusunda diğer araştırma projelerinden gelen tecrübeyi paylaşmaktadır. Bu tecrübenin getirdiği avantajlar, benzeri bir takım çalışmasıyla fırtına kabarması modeli geliştirilmesi konusunda etkili olmuştur. Rus ekibinin Sahalin ve Kuril adalarındaki denize ilişkin afetler konusundaki deneyimleri, Türk ekibinin doğal afetlerle ilgili etki azaltıcı önlem ve mücadele ölçütlerinin geliştirilmesi ve bu önerilerin, kıyı alanları yönetimi sistemleri modellerine uygulanmasına yönelik tecrübeler de elde edilmiştir. Proje kapsamında Atmosfer basıncı ile dalga oluşumu için NAMI DANCE-P yeni model isimli oluşturulmuştur. Bundan başka SWAN, ADCISC ve NAMI DANCE modelleri kullanılarak Giresun'da etkili olan Eylül 2014 ve Şubat 1999 fırtınalarına uygulanmış, sonuçlar gözlemlerle karşılaştırılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Fırtına kabarması, NAMI DANCE, Karadeniz, iklim değişikliği, basen rezonansı, risk
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır