

**Önleyici Yapısal Sağlık İzleme Metodları, Araç ve Stratejilerinin Araştırılması, Geliştirilmesi ve Uygulanması**

**Proje No: 104I108**

Doç.Dr. Ahmet TÜRER

ŞUBAT 2011  
ANKARA

## Önsöz

TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu (MAG) tarafından desteklenen 1041108 nolu ve “Önleyici Yapısal Sağlık İzleme Metodları, Araç ve Stratejilerinin Araştırılması, Geliştirilmesi ve Uygulanması” başlıklı proje, ülkemizde ve tüm dünyada bulunan ve yaşlanmakta olan mevcut (köprü, baraj, bina vb) yapıların, ayrıca tarihi öneme sahip önemli yapıların, yapısal sağlığının ölçüme dayalı olarak izlenmesi, hasar oluşmadan önleyici önlemlerin alınabilmesi, araç ve stratejilerinin araştırılması üzerine kurulmuştur. Proje kapsamında, izleme sistemini oluşturan farklı tip ve özellikte ölçüm cihazları ve bu cihazlardan gelen elektronik verilerin dijital ortama dönüştürülerek saklanması, uzaktan bağlantı kurularak veri toplanması, alarm sistemi oluşturulması gibi aşamalar başarıyla tamamlanmıştır. Pilot uygulama alanı olarak birçok modern ve tarihi yapılar seçilerek uygulama teknikleri geliştirilmiş, uygulama sırasında karşılaşılan zorluklar ve problemlerin çözülmesi yönünde araştırma geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

## İçindekiler

1	Giriş.....	11
2	Genel Bilgiler.....	13
2.1	Tanımlar.....	13
2.2	YSİ'nin Uygulanma Amaçları.....	14
2.3	Yapısal Sağlık İzlemesi Uygulanan Alanlar ve Yapı Çeşitleri.....	15
2.4	YSİ'nin Avantajları.....	16
2.5	YSİ'nin Yapısı.....	17
2.6	Test Teknolojileri.....	18
2.6.1	Statik Saha Testleri.....	19
2.6.1.1	Davranış Testi.....	20
2.6.1.2	Tanı Testi.....	20
2.6.1.3	Dayanıklılık Testi.....	20
2.6.2	Dinamik Saha Testleri.....	20
2.6.2.1	Gerilme Geçmiş Testi.....	20
2.6.2.2	Çevresel Titreşim Testi.....	21
2.6.2.3	Kuvvete Dayalı Titreşim Testi.....	21
2.7	Analitik Teknolojiler.....	21
2.7.1	CAD (Bilgisayar Destekli Çizim).....	21
2.7.2	Makroskopik, Eleman seviyesinde ya da Mikroskopik yaklaşım.....	22
2.7.3	Lineer (Doğrusal) Analiz.....	22
2.7.4	NonLineer (Doğrusal Olmayan) Analiz.....	22
2.8	Enformasyon Teknolojileri.....	22
2.8.1	Verilerin Toplanması.....	23
2.8.2	Verilerle Bağlantı.....	25
2.8.3	Verilerin Ayrıştırılması ve İşlenmesi.....	25
2.8.4	İşlenen Verilerin Depolanması.....	26
2.8.5	Tanı.....	26
2.9	Sensörler.....	27
2.9.1	Sensör Seçme Kriterleri.....	27
2.9.1.1	Hassasiyet.....	28
2.9.1.2	Çözünürlük.....	29
2.9.1.3	Ölçüm Aralığı.....	29
2.9.1.4	Doğrusallık.....	29
2.9.1.5	Histerez.....	29
2.9.1.6	Doğruluk.....	29
2.9.1.7	Tekrarlanabilirlik.....	29
2.9.1.8	Kararlılık (Stabilite).....	30
2.9.1.9	Tepki süresi.....	30
2.9.1.10	Frekans Tepkisi.....	30
2.9.1.11	Gürültü (Noise).....	30
2.9.1.12	Sıcaklık Aralığı.....	30
2.9.1.13	Nem Aralığı.....	30
2.9.1.14	Boyut.....	30
2.9.1.15	Muhafaza.....	31
2.9.1.16	İzolasyon.....	31
2.9.1.17	Sıcaklık Etkileri.....	31
2.9.1.18	Fiyat.....	31
2.9.1.19	Elverişlilik.....	31
2.9.1.20	Güvenirlilik.....	32
2.9.1.21	Kurulum Kolaylığı.....	32
2.9.1.22	Veri Toplama Sistemi ile Uyum.....	32

2.9.2	Sensör Çeşitleri:.....	32
2.9.2.1	İvme Ölçer (Accelerometer) .....	32
2.9.2.2	Deplasman Ölçer (Displacement Transducer).....	33
2.9.2.3	Şekil Değişim Ölçer (Strainage) .....	34
2.9.2.4	Eğim Ölçer (Tiltmetre).....	35
2.9.2.5	Çatlak Ölçer .....	35
2.9.2.6	Sıcaklık Ölçer .....	36
2.9.2.7	Nem Ölçer.....	36
2.9.2.8	Rüzgar Hızı Ölçer (Anemometre).....	37
2.10	Yapısal Sağlık İzleminde Kullanılan Başlıca Sensör Çeşit ve Tipleri.....	37
3	Gereç ve Yöntem .....	39
4	Bulgular.....	44
4.1	Pilot uygulamalar:.....	44
4.1.1	ODTÜ yapı mekaniği lab döşemesinin dinamik testinin yapılması .....	44
4.1.2	Veri toplama sistemi ve çoklayıcının programlanması .....	47
4.1.3	Tarihi yapıların yapısal sağlık izleme yapılması.....	49
4.1.3.1	Nemrut.....	50
4.1.3.2	Hasankeyf, Zeynel Bey Türbesi YSİ çalışmaları .....	82
4.1.4	Modern yapıların YSİ çalışmaları .....	88
4.1.4.1	Ankara, Hazine müsteşarlığı A Blok binası:.....	88
4.1.4.2	Ankara Esenboğa yeni binası döşeme titreşim problemi. ....	91
4.1.4.3	Esenboğa yolu yaya köprüleri ölçüm ve değerlendirme çalışmaları.....	93
4.1.4.4	Köprü döşeme titreşim problemi.....	101
4.1.4.5	Tren yolu köprüsü (tek açıklıklı, kiriş) .....	103
4.1.4.6	Tren yolu köprüsü (üç açıklıklı, makas) .....	105
4.1.4.7	Ultrasonik ölçüm çalışmaları.....	107
4.1.4.8	KAM fabrika kolon içi boşluk hesaplaması.....	108
4.1.4.9	Bolu Viyadüğü izleme çalışmaları.....	110
4.1.4.10	Adana Andırap Köprüsü yapısal sağlık izleme çalışmaları .....	144
4.2	Sensör çalışmaları .....	159
4.2.1	Hareket halinde dingil yükü ölçer (WIMS) çalışmaları.....	159
4.2.2	Yüksek mesafeli deplasman ölçer .....	161
4.2.3	Omega ( $\Omega$ ) tipi birim deformasyon (strain) ölçer geliştirme çalışmaları .....	163
5	Tartışma ve Sonuçlar .....	164
5.1	Tartışmalar .....	164
5.2	Sonuçlar.....	166
5.3	Proje genel değerlendirmesi.....	168
5.4	Öneriler .....	172
6	Referanslar.....	173
7	Ekler.....	177
8	Proje Özet Bilgi Formu .....	183

## Şekiller Listesi

Şekil 1 – Problem tipleri ve sınıflandırılması .....	15
Şekil 2 – YSI ve Yapısal Belirleme alt bileşenleri şeması.....	18
Şekil 3 – İzleme çeşitlerinin sınıflandırılması .....	19
Şekil 4 – Test çeşitlerinin sınıflandırılması .....	19
Şekil 5 – Enformasyon Döngüsü .....	23
Şekil 6 – Veri İşlem Döngüsü.....	25
Şekil 7 – Veri İşlem Döngüsü.....	33
Şekil 8 – Deplasman Ölçerler Tiplerinin Sınıflandırılması .....	34
Şekil 9 – Tarihi ve Modern Yapılar İçin Ölçüm ve Analiz Sistemi .....	40
Şekil 10 – Test alanı genel görünüm ve kullanılan cihazlar .....	45
Şekil 11 – İvme ölçerlerin döşeme üzerinde yerleşimi .....	45
Şekil 12 – Frekans uzayı, döşeme için elde edilen transfer fonksiyonu.....	46
Şekil 13 – Tümülüsün yukarıdan görünüşü ve doğu terası (Uluslararası Nemrud Vakfı fotoğraflarından alınmıştır - <a href="http://www.nemrud.nl">http://www.nemrud.nl</a> ) .....	50
Şekil 14 – Sırasıyla batı ve doğu teraslarından birer baş heykeli (Uluslararası Nemrud Vakfı fotoğraflarından alınmıştır - <a href="http://www.nemrud.nl">http://www.nemrud.nl</a> ) .....	51
Şekil 15 – Nemrut anıtlarına ait 3D sonlu elemanlar ön modeli. Anıtların içinde bulunan boşluk da oluşturulan modele yansıtılmıştır. ....	52
Şekil 16 - Boruların monte edilmesi .....	57
Şekil 17 – İki adet sıcaklık – nem ölçer ile güneş paneli genel görünüm. ....	57
Şekil 18 – Bekçi kulübesi içine takılan veri toplama cihazının genel görünümü. ....	58
Şekil 19 – Rüzgar hız ve yön sensörü montajı ve programlaması.....	59
Şekil 20 – Kendi ağırlığı altında yapıda oluşan en yüksek çekme gerilimi dağılımları .....	60
Şekil 21 – İlk dört moda ait deformasyon şekilleri .....	61
Şekil 22 – İlk dört mod durumunda ortaya çıkan en yüksek çekme gerilimi dağılımları .....	61
Şekil 23 – Nemrut anıtlar bölgesi, doğu teras .....	62
Şekil 24 – G-Link kablosuz ivmeölçer .....	62
Şekil 25 – Dinamik ölçümler sırasında kullanılan ivmeölçer .....	63
Şekil 26 – Dinamik ölçümler sırasında kullanılan ivmeölçerlerin yerleştirilmesi .....	63
Şekil 27 – Tekrarlanan dinamik ölçümler .....	64
Şekil 28 – x yönü için elde edilen 21 ve 45 Hz'lük üst üste binmiş iki mod .....	64
Şekil 29 – x yönü için elde edilen 21 Hz'lük mod .....	65
Şekil 30 – x yönü için elde edilen 18 Hz'lük mod .....	65
Şekil 31 – x yönü için elde edilen 78 Hz'lük mod .....	66
Şekil 32 – x yönü için elde edilen 80 Hz'lük mod .....	66
Şekil 33 – x yönü için elde edilen 85 Hz'lük mod .....	67
Şekil 34 – x yönü için elde edilen 455 Hz'lük mod .....	67
Şekil 35 – y yönü için elde edilen 43 Hz'lük mod .....	68
Şekil 36 – z yönü için elde edilen 25 Hz'lük mod .....	68
Şekil 37 – Alınan dinamik ölçümler neticesinde elde edilen frekans grafiği (MEMS, 0 – 120 Hz.) .....	69
Şekil 38 – Alınan dinamik ölçümlerden elde edilen frekans grafiği (0 – 2500 Hz.).....	69
Şekil 39 – Alınan dinamik ölçümlerden elde edilen frekans grafiği (0 – 250 Hz.) .....	70
Şekil 40 – Alınan dinamik ölçümlerden elde edilen frekans grafiği (0 – 50 Hz.) .....	70
Şekil 41 – Tamir edilen rüzgar yön sensörünün yeni kuyruğu. ....	71
Şekil 42 – 12 Mayıs 2007 – 24 Şubat 2010 tarihleri arası rüzgar yön ve hız grafiği .....	72
Şekil 43 – 28 Nisan 2007 – 24 Şubat 2010 tarihleri arası batarya voltajı, nem ve sıcaklık grafiği .....	73

Şekil 44 – 19 Ağustos 2006 - 24 Şubat 2010 tarihleri arası gözlemlenen sıcaklık - nem grafikleri .....	74
Şekil 45 – 16-17 ve 22 Ekim 2008 tarihlerinde gözlemlenen garip veriler. ....	75
Şekil 46 – 19 Ağustos 2006 – 24 Şubat 2010 tarihleri arası, sıcaklık ve nem ilişkisi grafiği...76	76
Şekil 47 – 16 Ekim 2007 – 3 Şubat 2008 tarihleri arası (kısmi) rüzgar hız ve yönü grafiği ....76	76
Şekil 48 – Odanın iç ve dışı arasındaki sıcaklık farkı grafiği .....	77
Şekil 49 – Veri toplama sistemi ile bekçi kulübesi duvarı arasında değiştirildiğinde yanan 220V ampül. ....	79
Şekil 50 – 220V AC elektriğe maruz kalarak yanan (yeni) rüzgar yön sensörü. ....	79
Şekil 51 – 03/09/2009 tarihinde doğu terasındaki anıttan alınan ivme okumaları .....	81
Şekil 52 – 03/09/2009 tarihli dinamik verilerin frekans uzayındaki dağılımı. ....	81
Şekil 53 – Zeynelbey Türbesi, kubbede oluşan aşırı çatlaklar.....	83
Şekil 54 – Zeynelbey türbesi, dış kubbe analitik ön model çalışması, a) enine b) boyuna yönde gerilmeler (Pa) .....	83
Şekil 55 – Zeynelbey Türbesi, çatlak ölçerlerin yerleri ve kanal numaraları. ....	84
Şekil 56 – Zeynelbey Türbesi, çatlak değişim ve sıcaklık ölçümleri (ilk 4 ay) .....	85
Şekil 57 – Zeynelbey Türbesi, 4 aylık ölçüm sonucunda çatlak genişliği değişim hızı grafiği. ....	85
Şekil 58 – Zeynelbey Türbesi, kubbede oluşan aşırı çatlaklar.....	86
Şekil 59 – Zeynelbey Türbesi, çatlak değişim ve sıcaklık ölçümleri (ilk 9 ay). ....	87
Şekil 60 – Zeynelbey Türbesi, 9 aylık ölçüm sonucunda çatlak genişliği değişim hızı grafiği. ....	87
Şekil 61 – Çatlak metre okumaları ve sıcaklığın zamana göre değişimi. ....	89
Şekil 62 – Çatlak metre okumaları ve sıcaklık değişiminin ilişkilendirilmesi.....	90
Şekil 63 – Çatlak metre mV voltaj ve sıcaklık okumalarının zamana göre değişimi.....	91
Şekil 64 – Esenboğa havalimanı döşemesinde yapılan dinamik ölçümler.....	92
Şekil 65 – Esenboğa havalimanı döşemesinin frekans tepki fonksiyonu (FRF).....	93
Şekil 66 – Kablo titreşim ve birim deformasyon (şekil değiştirme) ölçümleri yapılması.....	95
Şekil 67 – Kablo statik gergi ölçüm cihazı, ölçüm deneme çalışmaları.....	95
Şekil 68 – Deneysel rijitlik matrisi oluşturma tabloları. ....	96
Şekil 69 – Geliştirilen Excel yazılımı .....	97
Şekil 70 – Deneysel olarak eşitlenen kablo gergi miktarları .....	97
Şekil 71 – Deneysel olarak eşitlenen kablo gergi miktarları .....	98
Şekil 72 – Tahmin edilen ve ölçülen kablo kuvvetleri arasındaki ilişki (x: ton ; y:ton).....	98
Şekil 73 – Döşemelerden alınan kot okumaları ve gergi miktarları.....	99
Şekil 74 – Döşeme deplasmanlarının germe çalışmaları sırasındaki üç boyutlu görüntüsü ..99	99
Şekil 75 – Pin deplasmanlarının germe çalışmaları sırasındaki üç boyutlu görüntüsü .....	100
Şekil 76 – Köprüden alınan hassas ivme okumalarının frekans uzayındaki dağılımları ve sönüm oranları (düşey yön).....	100
Şekil 77 – Köprüden alınan hassas ivme okumalarının frekans uzayındaki dağılımları ve sönüm oranları (yanal yön).....	101
Şekil 78 – Jenerik köprü modeli ve ayarlı kütle sönümleyicinin frekans uzayında etkisi. ....	102
Şekil 79 – Kurtuluş çelik tren köprüsü.....	103
Şekil 80 – Kablosuz ivme ölçerler ile okuma alınması.....	103
Şekil 81 – Kurtuluş köprüsünden okunan ivme değerlerinden hız ve deplasman hesaplama çalışmaları.....	104
Şekil 82 – Üç açıklıklı makas tren yolu köprüsü, dinamik ölçüm çalışmaları. ....	105
Şekil 83 – Üç açıklıklı makas tren yolu köprüsü, izleme ve ölçüm çalışmaları.....	106
Şekil 84 – Üç açıklıklı makas tren yolu köprüsü, izleme ve ölçüm çalışmaları.....	106
Şekil 85 – Ultrasonik okuma ile çatlak derinliğinin ölçülmesi. ....	107
Şekil 86 – Ultrasonik okuma derinliğinin ölçülmesi, pilot uygulamalar. ....	108
Şekil 87 – Betonarme içi boş kolon, optimizasyon öncesi kabul edilen durum (kesit grafiği) .....	109
Şekil 88 – Betonarme içi boş kolon, optimizasyon sonrası elde edilen durum (kesit grafiği)110	110

Şekil 89 – Bolu Viyadüğüne takılan izleme sisteminin şematik gösterimi. ....	111
Şekil 90 – Bolu Viyadüğü YSİ sistemi kurulum aşamaları genel fotoğraflar.....	113
Şekil 91 – Bolu Viyadüğü YSİ sistemi kurulum aşamaları genel fotoğraflar.....	114
Şekil 92 – Bolu Viyadüğü YSİ sistemi için geliştirilen sismik izolatör ölçüm sensörü. ....	115
Şekil 93 – Bolu Viyadüğü YSİ sistemi birim deformasyon ölçerler. ....	116
Şekil 94 – Bolu Viyadüğüne takılan izleme sistemi bağlantılarının şematik gösterimi. ....	118
Şekil 95 – Bolu Viyadüğü YSİ - batarya şarj durumu grafiği.....	120
Şekil 96 – 50 nolu derz açıklığı değişimi, 48 nolu ayak hareketi ve VWG birim deformasyon değişim grafiği . ....	121
Şekil 97 – 50 nolu derz açıklığı ve sıcaklık değişimi grafiği. ....	121
Şekil 98 – Rüzgar hızı ve rüzgar açısı grafiği (zaman ekseninde).....	122
Şekil 99 – Rüzgar hızı (km/saat) ve rüzgar yönü değişim grafiği (planda).....	122
Şekil 100 – Köprü sıcaklık ve nem değişimi grafiği (zaman ekseninde). ....	123
Şekil 101 – Sıcaklık ve nem oranı ilişkisi grafiği.....	123
Şekil 102 – Genleşme derzi ve çevre sıcaklığı arasındaki ilişki grafiği. ....	124
Şekil 103 – Bolu Viyadüğünde farklı sensörlerden toplanan sıcaklık verileri grafiği.....	124
Şekil 104 – Bolu Viyadüğüne takılan birim deformasyon ölçerlerin yerleşim planı. ....	125
Şekil 105 – 7inci kanala takılan 4nolu sensör (birim deformasyon) değişim ve sıcaklık grafiği. .....	125
Şekil 106 – 8inci kanala takılan 5nolu sensör birim deformasyon değişim grafiği.....	126
Şekil 107 – 9uncu kanala takılan 6nolu sensör (birim deformasyon) değişim ve sıcaklık grafiği. ....	126
Şekil 108 – Aynı noktaya takılan VWG ve 8nci kanala bağlı omega sensör verilerinin karşılaştırılması. ....	127
Şekil 109 – Tüm sensör okumalarının karşılaştırılması (bozuk olan 7nci kanala bağlı 4 nolu sensör). ....	127
Şekil 110 – 8 ve 9uncu kanallara bağlı sensörlerin farkları ve ortalamalarının karşılaştırılması. ....	128
Şekil 111 – Bolu Viyadüğü sıcaklık değişim grafiği. ....	131
Şekil 112: Birim Deformasyon Ölçerlerin Viyadük Üzerinde Takıldığı Yerleri Gösteren Kroki. .....	135
Şekil 113 – Bataryadaki voltaj ve ortam sıcaklığı ölçüm değerleri.....	136
Şekil 114 – Birim Deformasyon Ölçerlerden Okunan Değerler. ....	136
Şekil 115 – Düzenli okuma alınabilen birim deformasyon ve ortam sıcaklığı ölçümleri. ....	137
Şekil 116 – Lineer değişken deplasman ölçerlerden okunan değerler. ....	137
Şekil 117 – Takılan ivme ölçerler.....	138
Şekil 118 – Dinamik test verisi.....	138
Şekil 119 – Açıklık boşken okunan ivme değerlerinin fourier spektrumu.....	139
Şekil 120 – Açıklıktan Hafif araç geçerken okunan ivme değerlerinin fourier spektrumu.....	139
Şekil 121 – Hafif araçlar açıklığı terk ettikten sonra okunan ivme değerlerinin fourier spektrumu. ....	140
Şekil 122 – Açıklıktan ağır araç geçerken okunan ivmelerin fourier spektrumu.....	140
Şekil 123 – Ağır araçlar açıklığı terk ettikten sonra okunan ivmelerin fourier spektrumu. ....	141
Şekil 124 – Ani darbe etkisi sonucu okunan ivmelerin fourier spektrumu.....	141
Şekil 125 – Fourier analizlerinden elde edilen birinci modların dağılımı. ....	142
Şekil 126 – Fourier analizlerinden elde edilen ikinci modların dağılımı. ....	142
Şekil 127 – Fourier analizlerinden elde edilen ikinci modların dağılımı. ....	143
Şekil 128 – Köprü üstüne yerleştirilen ivme ölçerler ve kepçe ile vurularak dinamik test yapılması.....	144
Şekil 129 – Köprü dinamik test sonuçları – modal frekanslar ve sönüm oranları. ....	145
Şekil 130 – Köprü dinamik test sonuçları – mod şekilleri. ....	146
Şekil 131 – Yaklaşım açıklığı dinamik frekanslar ve mod şekilleri.....	147
Şekil 132 – Kontrollü kamyon ve vinç yükü geçişleri sırasında alınan okumalar. ....	148
Şekil 133 – Sensörlerin bulunduğu noktalardaki sıcaklık değişimi verileri. ....	149

Şekil 134 – Sensörlerin bulunduğu noktalardaki sıcaklık değişimi verileri. ....	149
Şekil 135 – Sensörlerin bulunduğu noktalardaki sıcaklık değişimi verileri. ....	150
Şekil 136 – Kamyonların farklı hızlarda köprüden geçişlerinde alınan statik okumalar. ....	151
Şekil 137 – Kamyonların farklı hızlarda köprüden geçişlerinde alınan dinamik okumalar. ...	152
Şekil 138 – Andırap Köprüsü sürekli olarak 15 dakikada bir alınan okumalar. ....	153
Şekil 139 – Andırap Köprüsü sürekli birim deformasyon ve sıcaklık grafiği. ....	153
Şekil 140 – Andırap Köprüsü batarya voltajı ve sıcaklık değişim grafiği. ....	154
Şekil 141 – Andırap Köprüsü batarya voltaj değişim grafiği. ....	155
Şekil 142 – Andırap Köprüsü yatay ve dikey deplasman (LVDT) ve sıcaklık değişim grafiği. ....	156
Şekil 143 – Andırap Köprüsü birim deformasyon değişimi grafiği. ....	156
Şekil 144 – Birim deformasyon verilerine yerleştirilen eğrinin eğimi grafiği. ....	157
Şekil 145 – Birim deformasyon ve ortalama sıcaklık ilişkisi grafiği. ....	157
Şekil 146 – Birim deformasyon ve sıcaklık korelasyon indeksi grafiği. ....	158
Şekil 147 – Andırap Köprüsü sıfırdan başlayan birim deformasyon değişimi grafiği. ....	158
Şekil 148 – ASTM uyarınca WIM sistemi sınıflandırması. ....	159
Şekil 149 – SAP2000 WIMS / HDYÖ analitik modeli. ....	161
Şekil 150 – Oynar küre mesnet. ....	162
Şekil 151 – ASTM uyarınca WIM sistemi sınıflandırması. ....	162
Şekil 152 – SAP2000 omega birim deformasyon ölçer analitik modeli. ....	163
Şekil 153 – Pilot çalışmaların grafiksel dökümü. ....	169



## Özet

İnsanların sağlık problemleri yaşadıkları zamanlarda taşıdıkları ölçüm cihazları (örneğin kalp ritminin 1 gün süre ile ölçülmesi gibi) inşaat mühendisliği yapılarına da izleme aygıtları takılabilmektedir. Ekonomik yada stratejik önemi büyük yapıların, yapısal sağlıkları da artık gelişmiş ülkelerde sıklıkla izlenmektedir. California'da 10 yıl içinde izlenmeye alınmamış bina kalmayacağı konferanslarda dile getirilmektedir. "Yapısal Sağlık İzlemesi" ölçüm aletlerinin ve veri toplama sistemlerinin gelişmesi ve ucuzlaması ile parasal olarak güç yeter ve uygulanabilir bir hal almıştır. Ülkemizde de yapıların (su ve kara köprüleri, barajlar, geniş çatılar, stadyumlar, tüneller, yüksek ve özel yapılar vb) bazı yapısal sorunlarına ve önlemsel olarak yapısal sağlık izlemesi yapılması ihtiyacı gösteren çok sayıda yapı bulunmaktadır. Dizayn sırasında öngörülmeyen ya da inşaat sırasında ters giden bir olay olduğunda ya da yaşlanma ve eskimenin etkileriyle bir felaket oluşmadan önce önlem alınması ve felaketlerin önlenmesini amaçlayan bu çalışmaya uygun çok sayıda yapı bulunmaktadır. Bunlara en güncel ve ilk akla gelen örnekler arasında stratejik öneme sahip ulaşım yapıları (Boğaziçi Köprüsü, diğer boğaz tüp geçit ve köprüleri, bolu tüneli, viyadükler, tren yolu köprüleri), yıkıldığında şiddetli baskınlara yol açabilecek barajlar, tarihi yapılar (örneğin Sivas Divriği Ulu Cami, Hasankeyf Zeynelbey Türbesi, Ani harabeleri, Efes Antik kenti), büyük şehirlerimizdeki özel ve yüksek yapılar (Anıtkabir, Atakule), kötü zemine oturan yapılar, pahalı – önemli birimlerin üzerini örten çatılar (uçak ve helikopter hangarları, stadyum ve spor salonları), deprem geçirmiş – hasar görmüş yapılar, dizayn yükünün üzerinde çalıştırılan yapılar sayılabilir.

Projenin özgün değeri, üstyapımızı ve medeniyetimizi oluşturan yapıların sağlık durumlarının izlenmesi ve olası felaketlerin önlenmesidir. Ülkemize yaygın etkisi ise stratejik ve ekonomik önemi olan yapıların yapısal sağlıklarının gerçek zamanlı ve sürekli olarak izlenmesidir. Böylelikle olası yapısal hasarlar önceden tahmin edilebilecek, olası hasar sırasında oluşacak can ve mal kayıpları ile hasar sonrasında oluşacak iş kayıpları önlenecektir (örneğin boğaz köprüsünün yıkılması). Doğal afetler sonrasında yapının yapısal durum değerlendirmesi de ölçüme bağlı olarak hızlı şekilde yapılabilmektedir. Bu tip önlemeye ve önemli yapıların yapısal sağlığının izlenmesi ulusal alanda tüm illerimizi ve bütün vatandaşlarımızın kullandığı önemli yapıları kapsamaktadır.

Proje sonucunda uygulama yapılan pilot yapılardan elde edilen veriler ve karşılaşıp çözülen problemler, uygulamaya yönelik pratik çözümleri de içerecektir. Bu bağlamda geliştirilen pratik çözümler ve sensörler ile ilgili patent başvurusu da yapılmaktadır. Projenin eğitimsel hedefleri arasında 5 yıl kadar süren proje süresince projede çalışan araştırmacı ve öğrencileri yetiştirmek de bulunmaktadır.

(368 kelime < 400)

**Anahtar kelimeler:** yapısal sağlık izleme, tarihi yapılar, modern yapılar, sıcaklık, çatlak, deplasman, tren, köprü, viyadük.

## **Abstract**

Instrumented monitoring of civil engineering structures is also possible similar to “Halter monitor” based human heart rate monitoring on a daily cycle. Structures with high economic or strategic importance are frequently being monitored in the modern countries. California is frequently referred in the conferences that all of the existing buildings will be continuously monitored by the end of the next decade. Structural Health Monitoring based instruments and data acquisition system are now well affordable due to recent developments in the monitoring industry. There are numerous structures in our country that requires special attention of monitoring, such as bridges, dams, long span roofs, stadiums, tunnels, tall and special structures. There are a large number of suitable structures for monitoring studies, which might have some troubles during construction, weaknesses due to aging, and catastrophic collapses should be prevented before they occur. Most contemporary examples to such structures can be named as strategic transportation structures (Bosporus bridge, other bridges on the Istanbul straight and tunnels, Bolu tunnel, viaducts, railway bridges), dams which will cause severe flooding, historical structures such as Sivas Divrigi Ulu Mosque, Hasankeyf Zeynelbey Mausoleum, Ani remains, Efes Antique city), tall and special structures in our major cities (Anitkabir, Atakule), structures built on poor soil conditions, roofs that cover expensive – important items (airplane and helicopter aerodromes, stadiums and sport centers), structures that has experienced structural damage such as after earthquakes, and structures that are loaded beyond their design loads.

The unique value of the project can be said to prevent possible catastrophic failures while monitoring structural health of structures. The wide distributed effect of the project for our country is the continuous monitoring of critical infrastructure and prevention of failure. In this way, possible failure would be detected before it happens and property and life losses may be prevented. Post failure losses is also important to prevent such as in the case of Bosporus bridge collapse. Condition evaluation after a major natural event such as earthquakes can be quickly and objectively conducted based on SHM. These structures are among the most strategic structures which are nationwide used.

Some practical solutions to various difficulties faced during pilot application studies are reported. Those practical solutions and sensor development will be concluded with patent applications. Educational objectives of the project has been fulfilled by conducting master thesis for a number of graduate students during the 5 year execution period of the project.

(398 words < 400)

**Keywords:** structural health monitoring, historical structures, modern structures, temperature, crack, displacement, train, bridge, viaduct.

# 1 Giriş

Yapısal Sağlık İzlemesi (YSİ) halihazırda mevcut bulunan ve yeni yapılmakta olan yapılarda, yapısal durum ve performansının (örneğin rijitlik, periyod, sönüm oranı vb yapısal özelliklerin ölçüme dayalı olarak öğrenilmesi, kapasite tahmini, depremde davranış ya da köprüden geçirilecek yüksek tonajlı kamyon yük sınırı vb) belirlenmesi, yapısal bütünlüğünün ve güvenliğinin belirlenmesi, yapılarda oluşabilecek problemlerin, hasarların ya da bozulmaların tespit edilmesi, korumaya yönelik olarak oluşabilecek problemlerin önceden tahmin edilmesi, yapısal müdahale (restorasyon, güçlendirme vb) ve onarım-bakım gibi çalışmaların sıklık ve kapsamının tespiti, yeni denenen yapı tekniklerinin ve uygulanan yeni malzemelerin performansının izlenmesi ve optimizasyonu, yeni malzeme ve yapı tekniklerinin izlenmesi sonucu kod ve şartnamelerin geliştirilmesi gibi aşamalarda ölçüme dayalı bilgi sağlayan genel bir yöntemdir. Yapısal performansın gerçek yapılarda denemesi ve ölçülmesi ile şartname ve dizayn kodlarında yenilik ve iyileştirmeler yapılması muhtemeldir.

Akıllı-zeki yapıların entegre bir parçası olan YSİ sayesinde, yapılar değişen çevre şartlarına uyum sağlama özelliği kazandırılabilen (örneğin köprü kullanıcıları yapıyla ilgili buzlanma vb konularda gerçek zamanlı bilgilendirmekte), ve bazı önceden tanımlanan durumların oluşması durumunda önceden tanımlanmış bazı önlemleri kendiliğinden alabilmektedir (örneğin köprünün deprem ya da kamyon çarpması sebebiyle bir bölümünün yıkılması durumunda girişinin otomatik olarak kapatılması, barajda fazla doluluk olması durumunda kapakların otomatik açılması, tünelde yaşanan kazanın ya da yangının tünel girişinde önceden haber verilmesi gibi).

YSİ'nin temelini teşkil etmekte olan yapılardan alınan çeşitli ölçümler, doğrudan kullanılabilen gibi yapı için oluşturulan analitik model ile birleştirilerek, yapıların performansı hakkında gelişmiş ve güvenilir bilgi edinilmesini de sağlar (Structural Identification – Yapısal Belirleme). YSİ'nin sensör teknolojisine bağlı olması ve sürekli gelişen teknoloji ve rekabet sonucu ucuzlayan sektör sebebiyle YSİ'nin dünya çapında yaygınlaşmakta olduğu bilinmektedir. Bilişim teknolojilerinin gelişmesi ile havacılık, denizcilik, otomotiv endüstrisi ve nükleer santrallerden sonra barajlar, köprüler ve yapılara kadar uzanan yapısal izleme ve durum tespiti çalışmaları, dünyada giderek daha çok üzerinde çalışılan ve kabul gören bu yöntem olmaktadır. Özellikle stratejik açıdan çok önemli (örneğin Boğaziçi köprüsü), tarihi ve/veya manevi değeri bulunan (örneğin pizza kulesi), ve yapısal hasar ya da yapı-zemin etkileşimi (örneğin zemin oturması, aşırı paslanma, malzeme-kesit kaybı, alkali-silika reaksiyonu, gözle görülemeyen ya da yapısal etkisinin tam olarak tahmin edilemediği ve benzeri durumlarda) problem yaşayan yapıların izlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Yapısal sağlık izleme uygulamaları, bu konuda göreceli olarak çok ilerde bulunan medikal-tıp sektöründen örnekler ile de açıklanabilir. Hekimlik uygulamaları iki farklı yaklaşım altında özetlenebilir:

a) sağlığını değişik sebeplerle yitirmiş kişilerin bazı ölçüm ve tetkikler yolu (örneğin röntgen, kan testleri, vb) ile hastalık ve durumlarının tespit edilmesi ve iyileştirme yöntemlerinin belirlenerek uygulanması ya da

b) sağlığı çok önemli olan kişiler (örneğin ülke liderleri, parti başkanları, meşhur sanatçılar, profesyonel sporcular vb) için yapılacak önleyici sağlık uygulamaları.

Bu iki yaklaşım a) “tetkik/tespit – diyagnosis” → “tahmin – prognoz” → “tedavi – treatment” ve b) “önleyici sağlık çalışmaları” olarak da tanımlanabilir. Her iki durumda da tetkik (röntgen, kan testi), muayene (hekim tarafından), ve izleme (cihaz takılarak ya da belirli zaman aralıkları ile MRI, CT, kemik sintigrafisi vb testlerin yapılması) çalışmalarının benzerlerini yapılar uyarlayarak yapının halihazırda bulunan problemlerini tespit, bu problemlerin nasıl gelişeceğini tahmin ve muhtelif iyileştirme-onarım-güçlendirme işlerini kapsayan tedavi süreci ve uygulamaları, inşaat mühendisliğinin 21.inci yüzyıldaki yeni çehresini oluşturacaktır.

Çok sayıda bulunan fakat diğer yapılardan ayırıcı belirgin özellikleri bulunmayan sıradan yapılarda (konutlar ya da kısa orta uzunluktaki standart karayolu köprüleri vb) bazı sorunlar görülmeye başlandığında (örneğin çatlaklar vb) YSİ çalışmaları bireysel olarak sadece sorunlu yapılarda uygulanabileceği gibi, toplam nüfusun davranışını tanımlayacak istatistiksel bir alt küme üzerinde de uygulanabilir. Teker teker ele aldığımızda çok önemli görünmeyen “sıradan” yapıların sayısı çok fazla olduğu için, tüm popülasyonun davranışını bilmek önemlidir. Örneğin orta açıklıklı karayolu köprülerinin farklı iklim ve trafik yoğunluğu koşulları altında tanımlayıcı sayıda seçilecek kümeler üzerinde yapılacak yapısal sağlık izleme çalışmaları, bu tür yapıların tanımlanan iklim ve trafik yoğunluğu şartları altında nasıl davranacağı, ne kadar hızlı yaşlanacağı, hangi aralıklarla bakım onarım çalışmasına ihtiyaç duyacakları hakkında genel bilgiler verir. Bu bilgiler, ileriye yönelik altyapı çalışmalarının bütçesinin oluşturulmasında ve elde bulunan kaynakların en iyi şekilde harcanmasına olanak sağlar. Örneğin, hangi yapılara onarım-bakım çalışmalarında öncelik verileceği ve onarım-bakım çalışmalarının uygulama zaman aralığı optimizasyonu gibi alanlarda yararlar sağlanabilmektedir. Bunlara ilaveten, çok sayıda olan yapılarda (örneğin karayolu köprüleri) ucuz fakat çok sayıda ya da tekrarlanır kullanımlı YSİ sistemleri ile kısıtlı kaynaklar daha akıllıca harcanabilir.

Öte yandan, önemli yüksek ya da özel yapılarda (örneğin Boğaziçi köprüsü, gökdelenler, kuleler, büyük barajlar vb) YSİ izlemeleri sayesinde yapının hasar görmesinin

getirebileceği muhtemel stratejik, ekonomik, çevre ve insan kayıpları öngörülerek, hasar görmesine izin verilmeyecek şekilde önleyici YSI çalışmaları yapılabilir. Etkili, güvenilir ve faydalı olan YSI'nin ülkemizde de yoğunluklu olarak uygulanması şüphesiz teknolojik, ekonomik, stratejik, can-mal güvenliği açılarından büyük faydalar sağlayacaktır.

Bu araştırma, yapısal sağlık izlemesinin genel kurallarını, uygulama alanlarını, uygulama teknik ve teknolojilerini araştırmak, pilot uygulamalar ile uygulama aşamalarında karşılaşılan güçlükleri öğrenmek, uygulama kabiliyetini edinmek, metod araç ve stratejileri araştırmayı, geliştirmeyi ve uygulamayı amaçlamaktadır. Dolayısıyla, YSI'nin bilinçsiz ve eksik kullanımı en aza indirmek ve konunun kapsamlı bir araştırmasını yaparak uygulama metodlarının tanımlanmasını, örnek uygulamaları da kapsayacak şekilde yapılmasını amaçlamaktadır.

Araştırma projesinin sonuçları, ortaya koyacağı yöntemler, uygulama sahaları ve uygulama cihazlarının sınıflandırılması sayesinde ülkemizde YSI metodlarının daha bilinçli ve yaygın olarak kullanılmasını, tanınması ve öğrenilmesi sağlayacaktır. Ülkemize özel şartlar altında inşa edilmiş yapıların performanslarının değerlendirilmesi, ilerisi için dizayn ve uygulama aşamalarının iyileştirilmesini sağlayacaktır. Bu amaçla, proje kapsamında YSI hakkında tanıtım ve genel uygulama kılavuzu oluşturulması uygun görülmüştür. Hazırlanan raporlarda, konu ile ilgili tanımlar, YSI'nin kullanıldığı alanlar, kullanım çeşitleri, sağlık izlemesinde uygulanan yöntemler, ölçüm aletleri ve veri toplama sistemleri, YSI'nin uygulanmasına yönelik adımlar detaylı ve geniş bir biçimde irdelenecektir. Bu amaçla hazırlanacak YSI klavuzunun, projenin tüm birikimlerinin değerlendirilebilmesi için projenin son döneminde yapılması planlanmıştır.

## 2 Genel Bilgiler

### 2.1 Tanımlar

**Sensör:** Fiziksel bir büyüklüğü ya da değişimi (çoğunlukla elektriksel voltaj haline dönüştürerek) ölçen araç.

**Veri Toplama Sistemi:** Sensörlerden gelen sinyallerin toplanmasına, analog verilerin sayısal verilere dönüştürülmesini, verilerin geçici hafızaya kaydedilmesini ve çoğunlukla kablo ya da dijital kayıt medyası kullanarak diğer ortamlara (örneğin bilgisayara) aktarılmasını sağlayan, donanım ve yazılımı kapsayan sistemin bütünü.

Performans: Yapıların öngörülen yükler altındaki yapısal davranışı.

Yapısal Bütünlük: Bir yapının bütünü oluşturucu taşıyıcı elemanların dizayn prensiplerine uygun olarak bir bütün halinde çalışmaları durumu.

Yapısal Sağlık: Bir yapının dizayn aşamasında öngörülen yükleme (kuvvet, deplasman, ivme vb) taleplerine karşı yeterli emniyetli kapasiteye sahip olması ve kendisinden beklenen performans ile yapısal bütünlüğü sağlaması durumudur.

Yapı Güvenliği: Yapıların maruz kaldıkları yükler altında yıkılmadan ayakta durabilmesidir.

Yapı Güvenilirliği: Yapıların hizmet süresi içinde, dizayn kriterlerine uygun olarak kullanıldığı sürece, beklenen performansını hangi oranda sergileyebileceğinin sorgulanmasıdır.

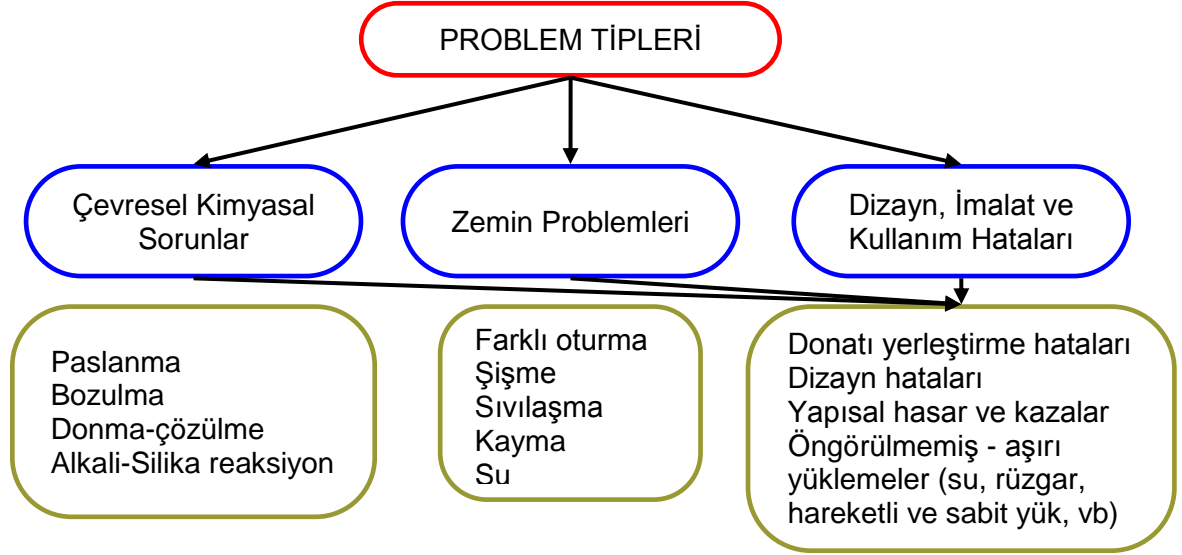
## **2.2 YSİ'nin Uygulanma Amaçları**

Yapısal sağlık izlemesi projeleri çoğunlukla iki ana başlık altında gruplanmaktadır; birinci grup problemsiz ancak önemli yapılardır (örneğin Fatih Sultan Mehmet Köprüsü). Bu tip yapıların hasar görmesi büyük ekonomik ya da stratejik problemler doğuracaktır. Bu sebeple, problemlerin daha oluşmadan önce, ilk aşamasında tespit edilmesi gerekir. İkinci grup yapılar ise önemli yapısal problemlerin gözlemlendiği yapılardır. Bu tür yapılarda uygulama alanı bulunan YSİ, genellikle yapısal problemin kaynağını ve yapısal hasarın miktarını ölçüme dayalı tespit ve izleme amacıyla kullanılır. Problemin giderilmesinde önemli rol teşkil eder. Problemin giderildiğini ölçüme dayalı olarak tespit eder.

YSİ'nin genel kapsamıyla yapısal uygulama sebepleri aşağıdaki başlıklar halinde özetlenebilir:

- Potansiyel ve mevcut yapısal problemlerin izlenmesi
- Yapısal durumun belirlenmesi (örneğin yaşlanma ya da aşırı yüklemelerden sonra)
- Yapısal performansın izlenmesi
- Yapısal güvenliğin belirlenmesi
- Yapıların yönetimine yönelik stratejilerin oluşturulması
- Dizayn iyileştirme ve optimizasyon çalışmaları

İnşaat mühendisliği yapılarında (bina, köprü, baraj, tünel, liman, açık-sahil (off-shore) yapıları vb) karşılaşılabilecek problemler ana başlıklarıyla Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1 – Problem tipleri ve sınıflandırılması

### 2.3 Yapısal Sağlık İzlemesi Uygulanan Alanlar ve Yapı Çeşitleri

Yapısal sağlık izlemesi, birçok mühendislik yapılarında kullanılmasının yanı sıra, tarihi yapılarda ve alt yapı sistemlerinde de (örneğin doğalgaz, su, petrol hatları) uygulanmaktadır.

Yapısal sağlık izlemesinin kullanıldığı öncelikli alanlar aşağıda listelenmektedir:

- Savunma-Güvenlik
- Tarihi yapılar
- Önemli yapıların sürdürülebilirliği
- Kritik alt yapı sistemleri
- Zemin

Kritik yapılar başlıca aşağıdaki başlıkları içermektedir:

- Ulaşım (köprüler, tüneller, ulaşım istasyon ve terminalleri)
- Barajlar
- Haberleşme tesisleri
- Enerji üretim ve dağıtım tesisleri
- Nükleer santraller
- Önemli ve özel binalar (acil durum, hastane, itfaiye gökdelenler, iş merkezleri, vb)

- Devlet binaları ve okullar
- Su, elektrik, atık su, petrol doğalgaz hatları
- Tarihi öneme sahip yapılar
- Geniş açıklıklı çatılar ve insanların yoğun sayılarda kullandığı yapılar (örneğin stadyumlar)

Yapısal sağlık izleme sistemleri inşaat mühendisliği alanlarından önce, havacılık, uzay ve makine mühendislikleri alanlarında kullanılmış ve halen kapsamlı olarak kullanılmaya devam edilmektedir. YSI'nin yoğunlukla kullanıldığı araçlara aşağıdaki örnekler verilebilir:

- Uçak - helikopter
- Gemi
- Denizaltı
- Roket
- Robot
- Motor
- Araba
- Ölçüme dayalı parçalar ve göstergeler içeren tüm aletler

## ***2.4 YSI'nin Avantajları***

Yapısal sağlık izlemesinin çabukluğu, sürekliliği, ölçüm hassasiyeti, uzaktan algılamaya imkan sağlaması, akıllı yapılar kapsamında yenilikçi tasarımlara olanak sağlamakla beraber, yapılarda oluşan hasarların erken tespit edilebilmesi sayesinde ciddi problemlerin önlenmesini, restorasyon güçlendirme alanlarının ve dolayısıyla kaynakların etkili bir şekilde yönlendirilmesini, tamir süresinin optimizasyonunu ve maliyetlerin azaltılmasını mümkün kılar. YSI'nin faydaları aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir:

- Gerçek zamanlı izleme ve rapor verme
- Tamir süresinin optimizasyonu
- Bakım masraflarının azaltılması
- Güvenliğin ve güvenilirliğin artırılması
- Yapının kullanım ömrünün uzatılması
- Yapısal davranışının öğrenilmesi ile gelecek dizaynların iyileştirilmesi



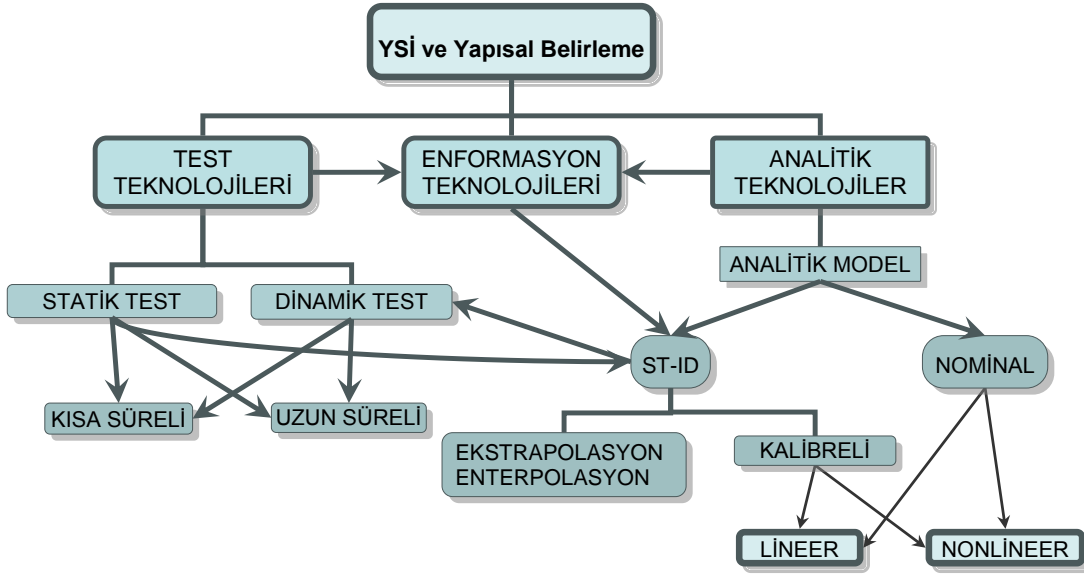
## 2.5 YSİ'nin Yapısı

İdeal bir YSİ sistemi, yapı hakkında ihtiyaç duyulan bilgileri (sıcaklık, yük, basınç, deplasman, ivme, vb) toplamalı ve yapıda meydana gelebilecek yapısal değişimleri ölçüme dayalı olarak tespit edebilmelidir. Yapıya kurulacak sensörlerin sayısı, çeşitleri, özellikleri ve yerleri, bu amaca en iyi hizmet edecek şekilde seçilmelidir. Yapıların sağlığı ve durumu ile ilgili bilgiler, sensör ağından gelen bilgileri toplayan veri toplama sisteminden sağlanmaktadır. Veri toplama sisteminden alınan veriler, doğrudan kablolu bağlantı, yerel ağ bağlantısı, uzaktan telefonla ya da kablosuz haberleşme gibi çeşitli yöntemlerle başka ortamlara aktarılmakta ve verilerin analiz edilmesi ve işlenmesi gerçekleştirilmektedir. Bunun ardından oluşturulan analitik model ölçümlerle birleştirilerek yapının durumu ve performansı belirlenebilmektedir. Gelişmiş YSİ sistemlerinde, veri toplama sistemine entegre edilmiş işlemciler ve uygun programlama sayesinde, YSİ sistemi veriyi kendisi işleyip kritik bir gelişme ya da hasar durumunda önceden tanımlanan telefonları arayabilmektedir. Akıllı YSİ sistemlerinin eksper sistemler ile entegre edilmesi sonucunda, kritik olayları haber vermenin yanı sıra bazı önlemleri de otomatikman alabilmektedir (örneğin doğalgaz hattının kapatılması, elektriklerin kesilmesi, köprünün trafiğe kapatılması vb). Bu nedenlerden dolayı, ideal bir YSİ sisteminin kurulması için, yapı davranışı, malzeme bilimi, hasar belirleme metotları, sensörler, veri toplama sistemi, bilgi işlem, bilgisayar ve haberleşme gibi bir çok alanda uzmanlık gerektirmektedir.

YSİ'nin üç ana bileşeni vardır. Bunlar:

- Test Teknolojileri
- Analitik Teknolojiler
- Enformasyon Teknolojileri

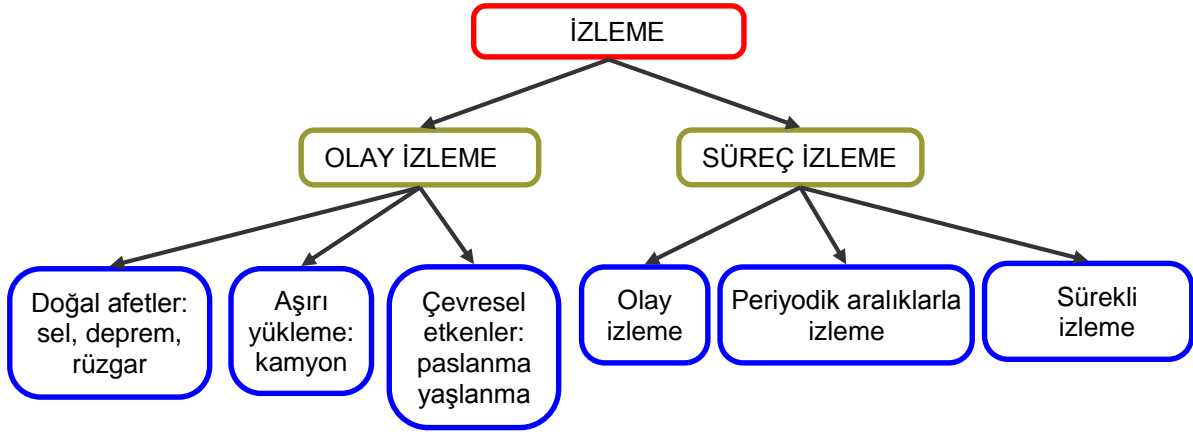
YSİ'nin alt bileşenleri şema olarak Şekil 2'de verilmektedir. Her alt bileşen detaylı olarak aşağıda açıklanmaktadır



Şekil 2 – YSİ ve Yapısal Belirleme alt bileşenleri şeması

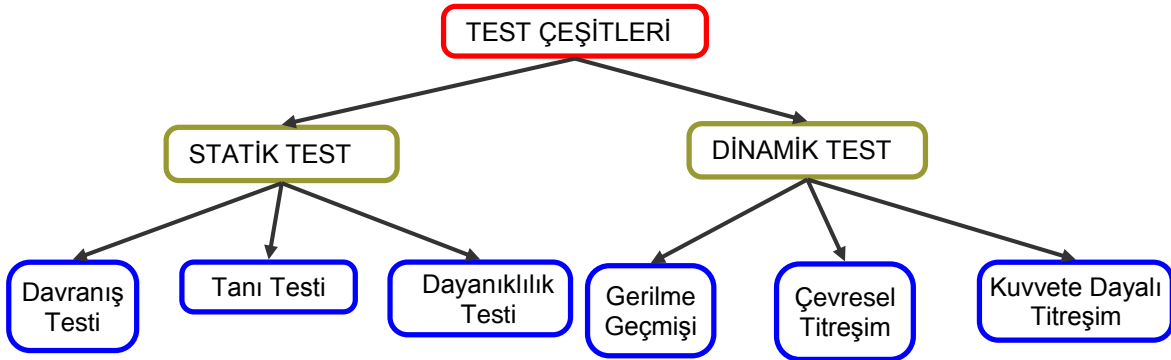
## 2.6 Test Teknolojileri

Test teknolojileri test tiplerine göre statik ve dinamik test olarak sınıflandırılmaktadır. Statik ve dinamik testlerin her biri, uzun ve kısa süreli olarak yapılabilir. Kısa süreli testler çoğunlukla *olay izleme* için kullanılır. Kısa süreli testlerin periyodik olarak yapılması (örneğin her 3 ayda bir) ya da sürekli olarak izleme yapılması *süreç izleme* olarak sınıflandırılır. Olay izleme yapıya gelecek önemli yüklerin etkisini (örneğin sel, deprem, kuvvetli rüzgar vb) ve yapı üzerinde kalıcı hasar bırakıp bırakmadığını ya da yapısal parametrelerin (rijitlik, doğal salınım periyodları vb) ölçülmesi için kullanılır. Süreç izleme ise yapının zaman içindeki davranışını ya da değişimini ölçmek ve anlamak için kullanılır. İzleme çeşitlerinin dağılım şeması Şekil 3'de görülmektedir. İzleme süresi, saatler, günler, haftalar, aylar olabileceği gibi yıllar ölçeğinde olması muhtemeldir.



Şekil 3 – İzleme çeşitlerinin sınıflandırılması

İzleme için yapılacak tipi ve süresi belirli her işlem test olarak tanımlanabilir. Test genellikle kısa süreli izlemeler için kullanılmakla birlikte testlerin uzun süre içinde tekrarlanması ya da sürekli yapılması da muhtemeldir. Test çeşitleri ana hatlarıyla Şekil 4’de özet olarak verilmekte ve detaylı olarak aşağıda başlıklar halinde açıklanmaktadır.



Şekil 4 – Test çeşitlerinin sınıflandırılması

### 2.6.1 Statik Saha Testleri

Statik saha testlerinde, yüklerin yapıya çok yavaş bir şekilde yüklenmesi ve yapıya herhangi bir dinamik etki oluşturmaması amaçlanır. Statik saha testi, davranış testi, tanı testi ve dayanıklılık testi olarak gruplandırılır.

### 2.6.1.1 Davranış Testi

Davranış testi, yapıların değerlendirilmesine yönelik güvenilir bir analitik metodun belirlenmesi ve veri sağlanması amacıyla uygulanır. Bu testlerde yükler, izin verilen maksimum yüklerden daha az etki ettirilir. Davranış testi, yüklerin yapının bileşenleri arasında dağılımı, yapının rijitliği ve sınır-mesnet şartları hakkında bilgi verir. Bu testler, yapıların kalıcı yükler altında kapasitesi hakkında doğrudan bilgi veremez.

### 2.6.1.2 Tanı Testi

Yapı bileşenleri, diğer bileşenlerle etkileşim içindedirler. Bu etkileşimin avantajları ve dezavantajları olabilir. Tanı testi, yapı bileşenlerinin yük taşıma oranlarının artışın ya da bileşenlere ait oluşan hasarların belirlenmesine yardım eder.

### 2.6.1.3 Dayanıklılık Testi

Dayanıklılık testinde, yapıların güvenli yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amaçlanır. Dayanıklılık testinde yapılar, (dizaynda öngörülen) büyük statik yükler altında yüklenirler. Burada amaçlanan, yapının bu yükler altında gösterdiği tepkinin incelenmesidir. İyi planlanan bir dayanıklılık testinde, yükler kademeli olarak arttırılmalı ve yapı lineer elastik davranışın ötesine geçerse test durdurulmalıdır. Dayanıklılık testinde elde edilen yük-deplasman ilişkisi, göreceli olarak büyük deplasmanlara dayandığı için daha sağlıklı bilgi elde edilmektedir.

## 2.6.2 Dinamik Saha Testleri

Dinamik saha testleri, yapıların dinamik tepkisini canlandıracak yükler etki ettirilerek ya da etkileyen dış dinamik yükleri izleyerek gerçekleştirilir. Dinamik saha testleri, gerilme geçmişi testi, çevresel titreşim testi ve kuvvete dayalı testler olarak sınıflandırılırlar.

### 2.6.2.1 Gerilme Geçmişi Testi

Gerilme testi, yapı bileşenlerinin yorulmaya (fatigue) meyilli bölgelerindeki gerilme eşik değerleri aşılma sayısının elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilir. Bu testlerde, yapıya yerleştirilen sensörlerden alınan veriler, yapı elemanlarının yorulma ömrünün belirlenmesinde kullanılır. Ölçülen şekil değiştirmeler, önceden belirlenen şekil değiştirme aralığına düştüğünde ölçüm alınan elemanın bu aralığa ait yorulma sayısı bir artırır. Böylece elemanlarının yorulma ömrü tahmin edilebilmektedir.

### 2.6.2.2 Çevresel Titreşim Testi

Çevresel titreşim testi yapıların titreşim özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır. Yapılar, rüzgar, trafik, küçük depremler, ya da insan hareketleri ile titreşebilmektedirler. Yapıların titreşimleri, yerleştirilen ivme ölçerler yardımı ile ölçülmektedir. Zaman uzayında alınan ölçümler işlem den geçirildikten sonra frekans uzayına çevrilerek yapıların doğal titreşim frekansları, periyodları ve sönüm oranları hesaplanabilmektedir. Bu test sayesinde, yapı için oluşturulan analitik model ile yapı arasındaki farklar belirlenerek analitik model kalibre edilebilir; yapısal belirleme ve simülasyon çalışmalarına destek sağlanabilir.

### 2.6.2.3 Kuvvete Dayalı Titreşim Testi

Kuvvete dayalı titreşim testi, çevresel titreşim testinin yetersiz kaldığı durumlarda kullanılır. Genellikle, kuvvete dayalı titreşim testinde çevresel titreşim testine oranla daha sağlıklı veri elde edilir. Bu test, yapının uygun yerlerinde (hidrolik, havalı, yada döner kütle sistemli) sarsma makinesi ya da darbe çekici kullanılarak yapılabilmektedir. Kuvvete dayalı titreşim testinin benzeri, zemine ankrajlanan kablolarla yanal yada düşey yönlerde çekilerek ön-deplasman verilmesiyle yapılabilir. Kablodaki yükün aniden bırakılması yapının (köprü yada binalar) serbest titreşim yapmasını sağlar. Bu testte amaç, yapıların doğal titreşim frekanslarını ve sönüm oranlarını belirlemektir. Yüksek hızda ölçüm alabilen ivme, hız yada deplasman ölçerler kullanılabilir.

## **2.7 Analitik Teknolojiler**

Yapıların sağlık izlemesinde kullanılan analitik teknolojiler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. CAD (Bilgisayar Destekli Çizim)
2. Makroskopik→eleman seviyesinde→mikroskopik ya da bunların karışımı bir yaklaşım
3. Doğrusal (Lineer) analiz
4. Doğrusal olmayan analiz

### **2.7.1 CAD (Bilgisayar Destekli Çizim)**

Yapıların analitik modellemesinde ve yapısal belirlemede, en çok önerilen ilk adım bir bilgisayar destekli çizim (CAD) paketi kullanılarak yapının çiziminin oluşturulmasıdır. İki boyutlu hazırlanan planlardaki eksiklikler, uyumsuzluklar ancak üç boyutlu bir CAD modelinin oluşturulmasıyla mümkündür. Daha da önemlisi, üç boyutlu CAD yapı davranışının

kavranmasını kolaylaştırmaktadır. Üç boyutlu hazırlanan CAD modeli, yapıya bilgisayar ortamında görsellik kazandırarak yapısal özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. CAD'in bu özelliği büyük, karmaşık yapılarda önemini daha çok göstermektedir.

### **2.7.2 Makroskopik, Eleman seviyesinde ya da Mikroskopik yaklaşım**

Analitik modelleme yapının bütünü ya da parçaları için yapılabilmektedir. Yapının tümü global davranışı tanımlamak için modellenebileceği gibi, detaylı modelleme gerektiren yapısal elemanların detaylı olarak modellenmesi de mümkündür. Modelleme mikroskopik ölçeğe de indirgenerek (örneğin donatı aderans kaybı, mikro çatlaklar vb) malzeme düzeyinde analitik çalışmalar da yapılabilir.

### **2.7.3 Lineer (Doğrusal) Analiz**

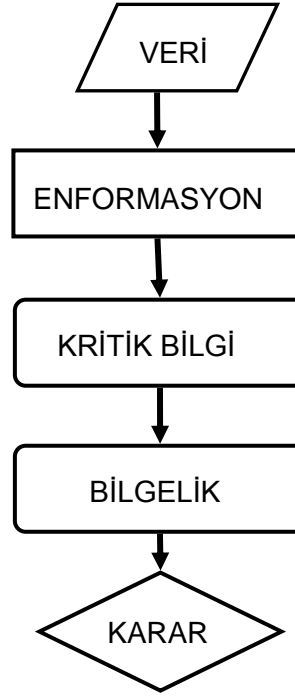
Çoğu program paketleri özdeğer (eigen value) analizi, statik yükler altında analiz, statik ve hareket eden dinamik yükler altında doğrusal analiz yapabilmektedirler. Doğrusal analiz, deplasman ve yüklemenin doğru orantılı olduğu, malzeme özelliklerinin ve geometrinin doğrusal kaldığı varsayımına dayanılarak yapılan analiz tipidir. Doğrusal olmayan analize göre daha kolaydır, ancak analiz sonuçlarının yorumlanması da bilgi ve uzmanlık ister. Lineer analizler yapılarak elde edilen sonuçlar, malzemenin doğrusallığını yitirdiği sınır değerlerini aşmadığı kontrol edilir. Analitik modelin doğruluğu ve yapının davranışı, analitik analiz sonuçları (yine doğrusal sınırlar içinde kalan) ölçümlerle karşılaştırılarak belirlenir.

### **2.7.4 NonLineer (Doğrusal Olmayan) Analiz**

Doğrusal olmayan analizde, malzeme davranışının ve geometrinin doğrusal olmadığı iki durum göz önünde bulundurulur. Doğrusal olmayan analiz, doğrusal analize göre oldukça zordur; genellikle iterasyon ve optimizasyon içeren çözüm yollarını içerir. Bu nedenle, pratik uygulamalar için uygun değildir. Doğrusal olmayan analiz yapabilen programlar arasında NASTRAN, ABACUS, ANSYS, DYNA paket programlar sayılabilir. Nonlinear-SAP ya da SEISAB gibi programlar ise itme analizinin yapılabileceği programlardır.

## **2.8 Enformasyon Teknolojileri**

Enformasyon teknolojilerinin amacı, toplanan verilerden karar verilmesine sağlayacak kritik bilgilerin elde edilmesidir. Enformasyon teknolojilerinde izlenen sıra Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5 – Enformasyon Döngüsü

Enformasyon teknolojilerini oluşturan alt sistemler şöyle sıralanabilmektedir:

- Verilerin Toplanması
- Verilerle bağlantı kurulması ve işlem yapılacak ortama aktarımı
- Verilerden bilgiye geçiş için gerekli işlemlerden geçirilmesi
- İşlenen bilgilerin depolanması
- Kritik bilgilerin çıkartılması

### 2.8.1 Verilerin Toplanması

Enformasyon teknolojilerinin ilk adımı veri toplanmasıdır. Bu aşamada ilk olarak yapıya takılacak sensörlerin seçimi ve kurulumu yapılmalıdır. Fiziksel büyüklüklerin ölçülmesini sağlayan sensörler, kendi içlerinde de oldukça değişik tiplere ve özelliklere sahiptirler. Bu nedenle, izleme sisteminde kullanılacak sensörler, yapının durumu ve sağlığı hakkında gereken bilgilerin elde edilmesine yönelik ve ayrıca izleme metoduna uygun olarak dikkatlice seçilmelidir. YSI’de sıkça izlenen parametreler aşağıda verilmektedir.

- Şekil Değiştirme
- Deplasman
- Sıcaklık

- Eğim-Açı
- İvme
- Rüzgar Hızı
- Nem
- Kuvvet
- Basınç

Sensörlerin yapıya yerleştirilmesinden sonraki adım, sensörlerden gelen verilerin toplanmasıdır. Verilerin toplanmasında veri toplama sistemleri kullanılmaktadır. Veri toplama sistemi ile sensörlerin uyumlu çalışması için özelliklerinin dikkat edilerek belirlenmesi, çeşitli ve çok sayıda sensörden belirli aralıklarla gelen verilerin dikkatlice işlenmesi ve içinden kritik bilgilerin çıkartılması önem ve uzmanlık isteyen bir konudur. Ayrıca verilerin toplanma sıklığı da izleme amacına yönelik olarak seçilmeli, gerekli bilgilerin gözden kaçırılması engellenmelidir. Verilerin toplanmasında iki yöntem kullanılmaktadır: Bunlardan birincisi sensörlerden gelen tüm verilerin belirtilen aralıklarla sürekli olarak kaydedilmesidir. İkincisinde ise sensörler belirtilen aralıklarla ölçüm yapmakta ancak veri toplama sistemi sensörlerden gelen verileri önceden belirtilen eşik değerlerin aşılması durumunda kaydetmektedir. Bu yöntem sayesinde gereksiz verilerin kaydedilmemesi ve işlenecek veri dosyasının küçültülmesi sağlanmaktadır. Veri toplama tekniği, kaydedilen bilgilerin büyüklüğünü ve kritik bilgilerin elde edilmesini etkilememesi sebepleriyle YSİ'nin en önemli bileşenlerinden biridir.

Sensörlerden elde edilen veriler veri toplama sistemine genellikle kablolarla iletilir. Sensörle veri toplama sistemi arasındaki mesafenin uzaması kullanılan kablonun uzamasına bu nedenle de gerçek verilere karışan gürültü seviyesini artırmaktadır. Bu nedenle sensörlerin veri toplama sistemiyle arasındaki mesafenin sensörler için önerilen sınırlar dahilinde kalması gerekmektedir. YSİ sistemi yakınlarında radyo istasyonu bulunması da kaydedilen verilerin bozulmasına neden olabilir. 50 Hz elektrik gürültüsü sıkça karşılaşılan bir problemdir. Bu nedenlerle, veri toplama sistemi ve sensörlerin yerlerinin optimize edilmesi ve kabloların manyetik kalkanlı ve topraklanmış olması gerekmektedir. Bu sorunların aşılması için belli mesafeler için kablosuz haberleşme kullanılabilir.

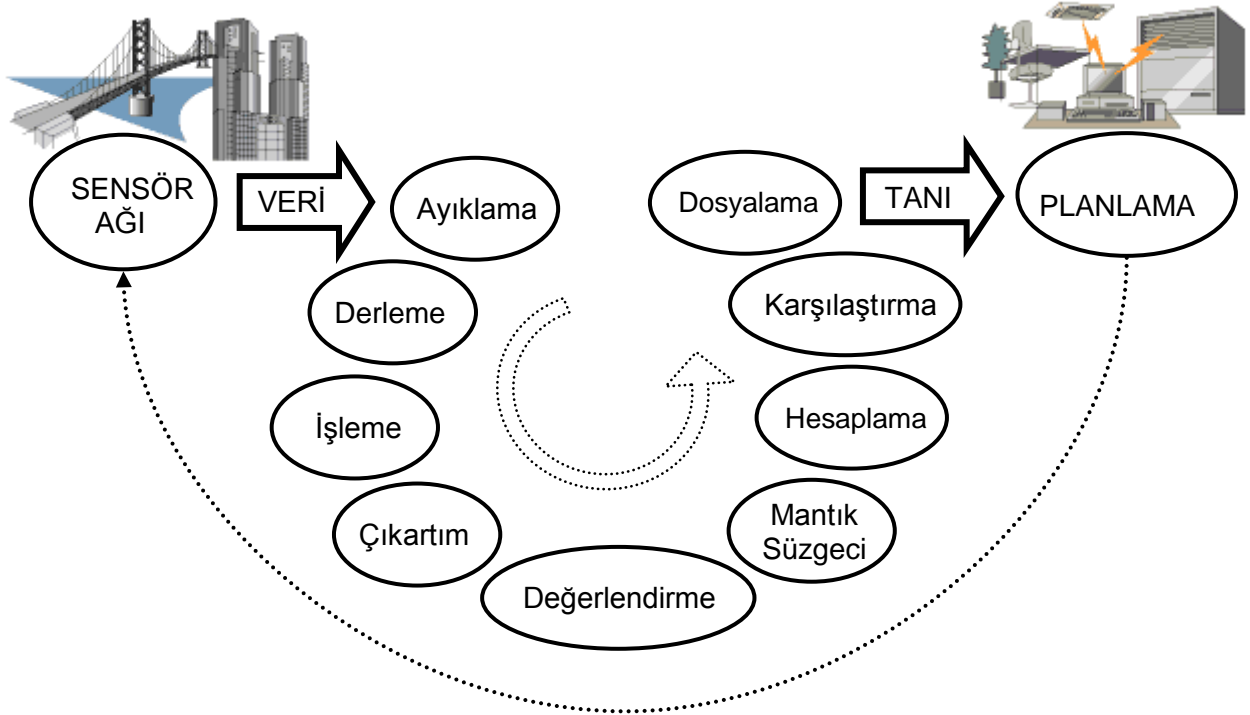


## 2.8.2 Verilerle Bağlantı

Veri toplama sistemine sensörlerden gelen bilgilerin diğer ortamlara (örneğin işlenmek üzere başka bilgisayara) aktarılması işlemidir. Statik saha testinde verilerle bağlantının, en basit formu toplanan verilerden basılı kopya alınmasıdır. Daha gelişmiş bir haberleşme yöntemi ise, veri toplama sistemi ile bilgisayar arasında seri yolu ya da USB yolu kullanarak bağlantı kurulmasıdır. Toplanan veriler bu sayede veri toplama sisteminin bilgisayara kurulacak yazılımı ile bilgisayara kaydedilebilmektedir. Daha gelişmiş haberleşme yöntemleri ise günümüzde sıkça kullanılan kablosuz iletişim (internet protokolü, cep telefonları-GPRS WAP vb) ve kablolu telefon hattı ile iletişimidir. Uygun haberleşme sisteminin seçilmesi YSI'nin bir diğer önemli parçasıdır.

## 2.8.3 Verilerin Ayrıştırılması ve İşlenmesi

Verilerin toplanmasının ardından, verilerin bir dizi işlemden geçirilmesi gerekmektedir. Bu işlem sonunda, sensörlerin yeri ve adedi konularında planlama yapılmakta ve gerekli görüldüğü durumlarda sensörlerin yeri, adedi ve çeşidi değiştirilebilmektedir. Verilerin işleme süresinde izlenen yol Şekil 6'de görülmektedir.



Şekil 6 – Veri İşlem Döngüsü

Verilerin ayıklanması sırasında, toplanan veriler içerdikleri gürültüden arındırılırlar. Veri toplama sistemi tarafından kaydedilen veriler, ölçülen değerler dışında gürültü de içermektedir ve gürültünün tespit edilip arındırılması her zaman mümkün olmamaktadır. Gürültüden, filtreleme yöntemi ile ya da gürültünün veri ile olan oranı azaltarak kurtulmak mümkündür. Toplanan verilerin bu gürültülerden arındırılması, yapılar için yapılacak yorumların daha çabuk, kolay ve doğru olmasını sağlamaktadır.

Veri toplanmasında dikkat edilecek bir diğer husus, sıcaklık faktörüdür. Sıcaklık değişimlerinde sensörlerin ölçümleri etkilendiği için alınan verilerde sıcaklık düzeltmesi yapılmalıdır. Bazı sensörler kendi içlerinde sıcaklık düzeltmelerini yapabildikleri gibi bazılarında sıcaklık düzeltmesi kullanıcı tarafından yapılmaktadır. Bu nedenle elde edilen verilerde sıcaklık etkisinin göz önüne alınıp alınmadığına dikkat edilmelidir.

#### **2.8.4 İşlenen Verilerin Depolanması**

Toplanan verilerin içinden gerekli bilgilerin ayrıştırılmasının ardından, kritik bilginin depolanması gerekir. Verilerin depolanmasında kullanılan ortam, iyi yapılandırılmalı ve yıllar sonra bile bilgilere ulaşılmasına olanak vermelidir. Ayrıca, depolanan verilerin hangi büyüklüğe karşılık geldiği (birimi), bağlı olduğu kanalı ve ölçüm alınan yeri ayrıntılı ve eksiksiz bir şekilde ifade edilmelidir.

#### **2.8.5 Tanı**

YSİ sisteminin bir diğer önemli bileşeni tanı, yani toplanan ve işlenen bilgilerin yorumlanmasıdır. Bu aşamada elde edilen veriler sınır değerleri ile ya da direk olarak yapının davranışı ile ilgili büyüklere dönüştürülür. Örnek olarak, şekil değiştirmeler gerilmelere ya da sıcaklık değişimleri şekil değiştirmelere dönüştürülür. Bu dönüştürmeler genellikle basit kabullere dayanmaktadır. Elde edilen verilerin yorumlanması daha çok mühendislik yargısına ve tecrübeye dayalıdır; otomatik ve gelişmiş bir prosedür bulunmamaktadır.

YSİ'de hasar belirleme tanının bir parçasıdır ve hasar belirleme becerisi, 4 seviye altında incelenebilir. Birinci seviyede, YSİ sadece yapıda hasar bulunduğunu tespit edebilir. İkinci seviyede ise sistem hasarın yerini belirleyebilmektedir. Üçüncü seviyede, hasarın büyüklüğü

ve önemi hesaplanabilmektedir. Dördüncü ve en ileri seviyede bunlara ek olarak yapının güvenliğinin tespit edilmesi mümkündür. Hasar belirleme aşamalarının başarısı ve güvenilirliği genellikle kullanılan sensör sayısı, çeşitliliği, ve hassasiyeti ile orantılıdır.

## **2.9 Sensörler**

YSİ'de sıkça izlenen parametreler ve bu parametrelerin ölçülmesini sağlayan sensör çeşitleri aşağıda verilmektedir.

- Birim şekil değiştirme – Straingage
- Deplasman – Deplasman ölçer
- Sıcaklık – Sıcaklık Ölçer (Temperature gage)
- Eğim – Eğim ölçer (tiltmetre, inclinometre)
- İvme – İvme ölçer (accelerometre)
- Rüzgar hızı – Anemometre
- Nem – Nem Ölçer
- Kuvvet – Yük hücresi (load cell)
- Basınç – Basınç ölçer

### **2.9.1 Sensör Seçme Kriterleri**

Sensör seçiminde öncelikle, yapılacak ölçümlerin ve sensörün takılacağı yerdeki çevresel özellikler belirlenmelidir. Sensör seçimi için uygulanacak adımlar:

1. Ölçülecek parametrenin seçilmesi (örneğin sıcaklık, nem, deplasman vb)
2. Alınacak ölçümlerin beklenen aralığının tespit edilmesi (örneğin -20 / +50 C° aralığı)
3. Sensörlerin yapı üzerinde yer değiştirmeye müsait olması durumunda, kullanılması muhtemel diğer bölgelerdeki ölçüm aralıklarının belirlenmesi.
4. Sensörün sahip olması gereken hassasiyeti, gürültü seviyesi ve aynı okumayı tekrarlayabilme özelliğinin belirlenmesi
5. Çevresel etkilerin ölçüm aletlerine ve alınacak ölçümlerin doğruluğuna etkisi. (Yüksek nem ve sıcaklık, toz, titreşim, elektomanyetik alan, radyo frekansı etkileşimi, su, vandalizm vs.)
6. İzleme okuma hızının belirlenmesi

7. Sensörün bağlantı tipinin belirlenmesi (örneğin vidalama, kaynaklama, epoksi yapıştırma vb).
8. Sensörün çıktı özellikleri (voltaj, akım, ışık, frekans vb)
9. Sensörün birim fiyatı ve sayısına bağlı olarak sensörün çeşit ya da tipinin seçiminin değerlendirilmesi (ekonomik kıstaslar).
10. Sensöre özel diğer konular (tek-çift eksenli olması, analog-dijital çevrimin sensörde yapılması, kablosuz sensör, pilli sensör, vb).

Bu adımların izlenmesinin ardından, izlemede kullanılabilecek sensörler belirlenebilir. Son kararın verilmesi için ise daha detaylı bir inceleme gerektirir. Bu incelemede, sensör özellikleri, çevresel etkenler ve ekonomik etkenler incelenir. Tablo 1.'de sensör seçimi için irdelenmesi gerekenlerin ayrıntılı listesi verilmektedir.

Tablo 1 – Sensör seçimini etkileyen faktörler

SENSÖR ÖZELLİKLERİ	ÇEVRESEL ETKENLER	EKONOMİK ETKENLER
Hassasiyet	Sıcaklık aralığı	Fiyat
Çözünürlük	Nem aralığı	Elverişlilik - bulunabilirlik
Ölçüm aralığı	Boyut ve dış görünüş	Güvenilirlik
Doğrusallık	Muhafaza	Kurulum kolaylığı
Histerez	İzolasyon	Veri toplama sistemi ile uyumu
Doğruluk	Sıcaklık etkileri	
Tekrarnabilirlik		
Duyarlılık		
Kararlılık (Stabilite)		
Tepki süresi		
Frekans tepkisi		
Gürültü (Noise)		
Çıkış özellikleri ve aralığı		

### 2.9.1.1 Hassasiyet

Hassasiyet, sensörün çıktısındaki değişimin girdisindeki değişimine oranıdır. Hassasiyet genellikle, sensörün ölçüm yapabildiği aralık için tanımlanır ve sensörün yaptığı ölçümlerdeki değişiklikleri yakalayabilme becerisi olarak da ifade edilir. Örnek olarak, bir ivme ölçer,  $\pm 2g$

aralığında ölçüm yapabilmekte ve tüm ölçüm aralığı için  $\pm 2000\text{mV}$  çıktı verirse bu sensörün hassasiyeti  $1000\text{mV/g}$  olarak hesaplanır.

#### **2.9.1.2 Çözünürlük**

Çözünürlük, sensör çıktısında fark edilebilir değişim yaratacak en küçük girdi değişimidir. Çözünürlük, bir statik performans özelliği olmakla beraber sensörün toplam aralığının değişik bölgelerinde değişik değerlere sahip olabilmektedir.

#### **2.9.1.3 Ölçüm Aralığı**

Sensör çıktısının maksimum ve minimum değerleri arasındaki farktır. Bu özellik, sensörün statik performans özelliği olmakla beraber sensörün doğal sınırlarını göstermektedir. Buna benzeyen dinamik performans özelliği ise frekans tepkisidir.

#### **2.9.1.4 Doğrusallık**

Doğrusal bir sensörün çıktısı, ölçülen değerle doğru orantılıdır. Doğrusallık, bir sensörün kalibrasyon eğrisinin düz bir çizgiye yakın olması durumudur. Kalibrasyon eğrisinin, düz çizgiden uzaklaşması nonlineerlik (doğrusal olmama) hatası olarak nitelendirilir. Doğrusallık bir sensörün statik performans özelliğidir ve genellikle sensörün tam aralık çıktısının maksimum pozitif ya da negatif yüzdesi olarak verilir.

#### **2.9.1.5 Histerez**

Histerez, ölçüm yapılan belli bir nokta için sıfırdan başlayıp artarken alınan ölçüm ile sıfıra doğru azalırken alınan ölçümler arasındaki maksimum okuma farkı olarak nitelendirilir. Bu noktalar aynı döngü içinde alınmaktadır. Histerez, statik sensör özelliğidir ve sensörün ölçüm aralığı için yüzde olarak tarif edilir.

#### **2.9.1.6 Doğruluk**

Alınan ölçümler ile gerçek değer arasındaki yakınlık olarak tanımlanır. Doğruluk nonlineerite, tekrarlanabilirlik ve histerezin neden olduğu hataların toplamıyla ilgilidir. Doğruluk genellikle, sensörün ölçüm aralığında maksimum pozitif ya da negatif yüzde doğruluk olarak verilir. Örnek olarak bir sensörün doğruluğu sensörün ölçüm aralığında ( $\pm$ ) 1% ve bu sensörün ölçüm aralığı 0-100 mm verilmiş ise, gerçek değerın alınan ölçümden  $\pm 1\text{mm}$  farklı olması beklenir.

#### **2.9.1.7 Tekrarlanabilirlik**

Özdeş ölçüm durumu altında sensörden alınan farklı ölçüm sonuçlarının birbirlerine olan yakınlıkları olarak tanımlanır. Genellikle statik sensör performans özelliği olarak kabul edilir ve ölçüm aralığında maksimum pozitif ya da negatif yüzde olarak verilir.

#### **2.9.1.8 Kararlılık (Stabilite)**

Sensörün, kalibrasyon değerini zaman içinde sabit tutabilme özelliğidir. Bir başka deyişle sensörün aynı girdi değeri için aynı çıktı değerini verebilmesinin ölçüsüdür. Statik performans özelliği olan stabilite, sıcaklık, nem korozyon gibi çevresel etkilerden etkilenir.

#### **2.9.1.9 Tepki süresi**

Sensör çıktı değerinin kararlı (sabit) bir değere ulaşabilmesi için gereken süredir. Dinamik performans özelliği olan tepki süresi, sensörün ölçülen büyüklükteki değişimlere cevap verme ve sonuç değere ulaşma süresi olarak tanımlanabilir.

#### **2.9.1.10 Frekans Tepkisi**

Dinamik ölçümlerde oldukça önemli olan bu özellik, girdi ve çıktılar arasında iki tür ilişkiyi tanımlamaktadır. Birincisi, ölçüm frekans aralığı içinde ölçülen frekansın dalga büyüklüğündeki frekansa bağlı değişimdir. İkincisi ise, ölçülen dinamik verinin frekansa bağlı faz farkıdır. Dalga büyüklüğünde cihazın okumasının frekansa bağlı olarak değişimi genellikle dB olarak belirtilir.

#### **2.9.1.11 Gürültü (Noise)**

Gürültü, elektrikli cihazlar, istasyonlar, kablolar, vb kaynakların yarattığı elektromanyetik dalgalar ve veri toplama sisteminin kendinden yada elektrik hattından sisteme karışarak verilerin üzerine eklenen istenmeyen sinyallerdir. Gürültü seviyesinin ölçülmek istenen sinyale oranla yüksek olması, ölçümleri ve ölçümlere dayalı yapılan yorumlarının doğruluğunu olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle, yüksek seviyedeki gürültünün azaltılması için topraklama, filtreleme gibi önlemler alınmalıdır.

#### **2.9.1.12 Sıcaklık Aralığı**

Sensörün, performansının olumsuz şekilde etkilenmeden çalışabileceği sıcaklık aralığını tanımlar.

#### **2.9.1.13 Nem Aralığı**

Sensörün sorunsuz çalışabileceği nem aralığını tanımlar. Nem birçok sensörde korozyon, kararlılık kaybı gibi düzeltilemez sorunlara neden olur. Ortalama nem seviyesi, coğrafi bölgeye ve ölçüm alanının koşullarına göre değişim göstermektedir; bu nedenle bu koşulların iyice belirlenmesi ve koşullara uygun sensör seçilmesi gereklidir.

#### **2.9.1.14 Boyut**

Sensörlerin boyutları, seçim yapılırken dikkat edilecek önemli unsurlardan biridir. Ölçüm yapılacak yer, sensörün boyutlarını kısıtlayabilir. Öte yandan, sensör boyutları, sensörün kullanım kolaylığını ve özelliklerini etkiler. Örneğin boyutları büyük olan sensörler genellikle

kolay monte edilirler ve dış şartlara daha dayanıklı olurlar. Ayrıca sensörlerin boyutları, hassasiyetlerini ve doğruluklarını etkiler. Sensörün dış görünüşü ve monte edileceği bölgeye uygun renklerde olması, daha az ilgi çekeceği ve görüntüyü bozmayacağı için tercih edilir. Sensörler yerleştirilirken görünmeyecek ve daha az dikkat çekecek bölgelere konulması cihazlara zarar vermek isteyebilecek kişilerin fark etmemesine yardımcı olur.

#### **2.9.1.15 Muhafaza**

Sensörün muhafazası, performansını ve kullanım ömrünü etkileyen bir diğer unsurdur. Sensörün neme, suya, güneşe ya da diğer faktörlere maruz kalması sensörün bozulmasına, ölçümlerin doğruluğunun azalmasına ve ömrünün azalmasına neden olur. Bu nedenle genellikle sensörlerin muhafazalarının nem, su, toz ya da diğer kimyasalları geçirmeyecek şekilde sıkıca kapatılmış olması tercih edilir.

#### **2.9.1.16 İzolasyon**

Sensörlerin, çevrede olabilecek elektromanyetik alan, radyo frekansının karışması, statik elektrik, yıldırım, ışık ya da titreşim gibi etkenlere karşı izole edilmesi ve/ya topraklanması da önemli bir unsurdur. Sensörün bu etkenlere karşı izole edilmesi, yapılacak ölçümlerin doğruluğunu ve sensörün ömrünü artırır.

#### **2.9.1.17 Sıcaklık Etkileri**

Sensörler, genellikle sıcaklık değişimlerine tepki verirler. Bu nedenle sensörden alınan ölçümler, ölçülen büyüklüğün ve sıcaklık değişiminin sensörde yarattığı etkinin toplamı olur. Bazı sensörlerde sıcaklık etkisi kendi içlerinde elimine edilmektedir. Ancak bazı sensörlerde ise sıcaklık düzeltme katsayısı ile yapılan ölçülerin elle düzeltilmesi gerekmektedir.

#### **2.9.1.18 Fiyat**

Sensörlerin fiyatı birincil etken olmamakla beraber, sensör seçiminde göz ardı edilemeyecek bir unsurdur. Sensörün maliyeti, sensörün tedarik, yapıya kurulum ve muhafaza masraflarının toplamıdır. Tedarik masrafı, sensörün satın alınması ve ulaşım masraflarının toplamıdır. Kurulum masrafı ise sensörün takılması, besleme, kablolama masraflarının toplamıdır. Muhafaza masrafına ise sensörün düzgün çalışabilmesi için alınacak önlemler ve bakım masrafları girmektedir.

#### **2.9.1.19 Elverişlilik**

Alınacak sensörlerin, mevcut olması da önemli bir etkidir. Sensör üreticileri genellikle, en çok satılan sensörleri ellerinde çokça bulundururlar. Elleri bulunmayan sensörlerin üretimi ve sevkiyatı izleme projesinin aksamasına sebep olabilir. Ayrıca sensör üreticisinin alıcının isteklerine cevap verebilmesi de projenin belirlenen takvimde ilerlemesine olanak sağlar.

Örneğin bozulan ya da hatalı bir sensörün üreticiye geri yollanması tamir ve bakım süresi, tekrar alıcıya sevk edilmesinde geçen süre projeyi olumsuz yönde etkiler.

#### **2.9.1.20 Güvenirlilik**

Seçilen sensörün güvenilir olması şüphesiz yapısal sağlık izleme projesinin birincil şartlarındandır. Güvenilir bir sensör, hizmet süresi boyunca performansında düşüş göstermeden, fazla tamir ve bakım masrafına ihtiyaç duymadan çalışabilmelidir. Bir sensörün güvenilir olması, önceki benzer projelerde gösterdiği performansla belirlenebilir.

#### **2.9.1.21 Kurulum Kolaylığı**

Kurulum kolaylığı, sensörün kurulumu için gereken uzmanlık ve zamanın ölçüsüdür. Kurulumu uzmanlık isteyen bir sensörün satın alınması, hem zaman hem de ekonomik açıdan projeyi olumsuz etkileyebilir.

#### **2.9.1.22 Veri Toplama Sistemi ile Uyum**

Sensör seçiminde en önemli etkenlerden biri de veri toplama sistemi ile uyumlu çalışabilmesidir. Özellikleri iyi, maliyeti düşük bir sensörün veri toplama sistemi ile uyumlu çalışmaması durumunda sistemin sağlıklı çalışması mümkün değildir. Örneğin, voltaj okuyan bir veri toplama sistemi ile akım çıktısı veren bir sensör uyumlu çalışamaz. Bu nedenle seçilecek sensörler ile birlikte kullanılacak veri toplama sisteminin özellikleri de dikkatlice belirlenmeli ve uyumlu seçim yapılmalıdır.

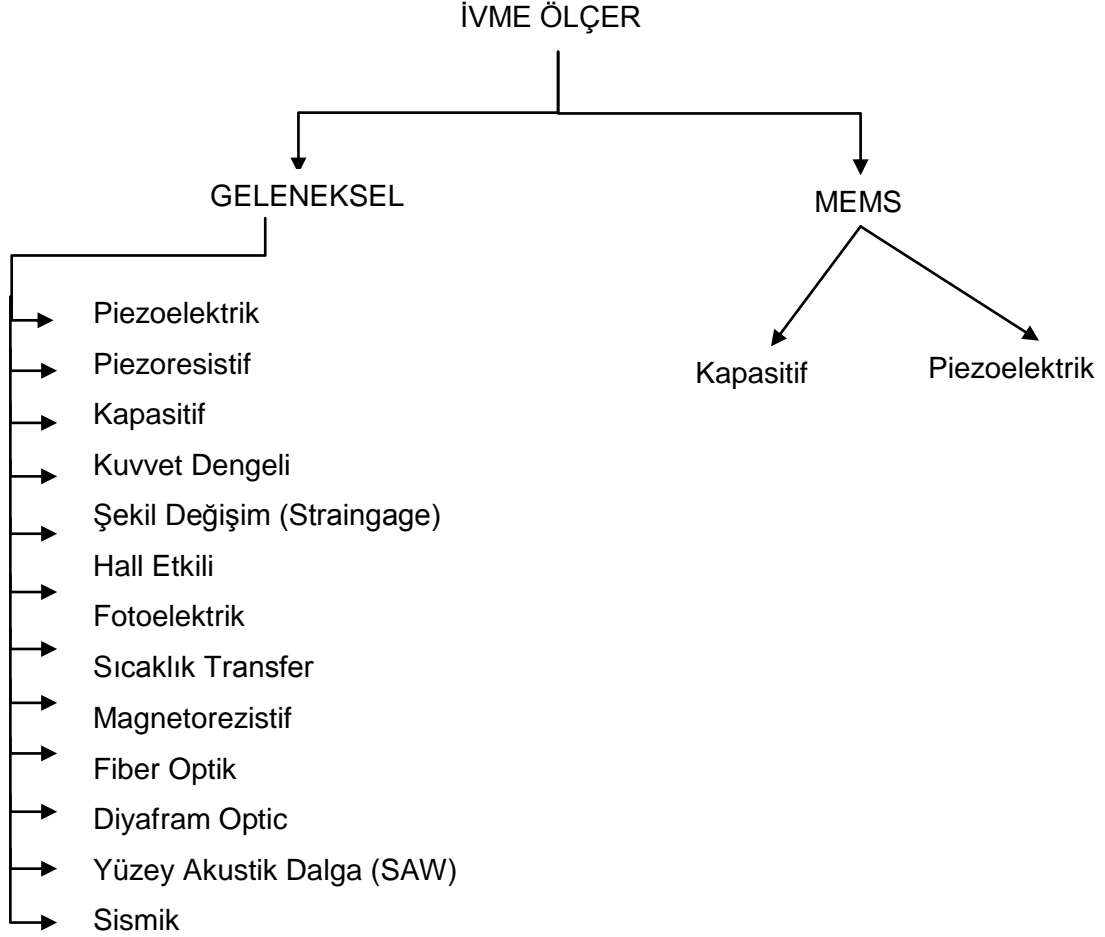
### **2.9.2 Sensör Çeşitleri:**

#### **2.9.2.1 İvme Ölçer (Accelerometer)**

İvme ölçerler, hızdaki birim zamanda oluşan değişimi ölçen ve referans noktası gerektirmeyen ve genellikle dinamik ölçümler için kullanılan sensörlerdir. İvme ölçerler, birçok farklı özellikte üretilebilirler. Veri toplama sistemine bağlanarak çalışacak bir ölçüm aleti olarak ya da veri toplama sistemi, analiz modülü ve ekran içeren paket sistemler olarak da üretilebilirler. İvme ölçerlerin, tek yönde, iki yönde ve birbirine dik üç yönde ölçüm yapabilen çeşitleri mevcuttur. İvme ölçer seçiminde, başlıca üç unsur dikkate alınmalıdır. Bunlar, ölçüm aralığı, frekans aralığı ve çevresel etkiler altında özellikleridir. Ölçüm aralığı yer çekimi ivmesinin (g) katı olarak ölçülür; frekans aralığının birimi ise Hertz (Hz)'dir. Çevresel etkilerde, sensörün çalışabildiği sıcaklık ve nem aralığına, karşı koyabildiği maksimum şok ve titreşim ivme büyüklüklerine dikkat edilmelidir. İvme ölçerlerin analog çıktısı voltaj, akım ya da frekans olabilmektedir. Bu nedenle bu sensörler ile kullanılan veri toplama sisteminin girdi özellikleri de sensörün çıktı özellikleriyle uyum içinde olmalıdır.



İvme ölçerler teknolojilerine göre geleneksel ve MEMS (mikroelektromekanik) ivme ölçerler olarak iki ana gruba ayrılırlar. MEMS ivme ölçerler, geleneksel ivme ölçerlere benzerlik göstermekle birlikte onlara göre çok küçük boyutlarında üretilmiş olanlarıdır. İvme ölçer çeşitleri Şekil 7’de özetlenmektedir.



Şekil 7 – Veri İşlem Döngüsü

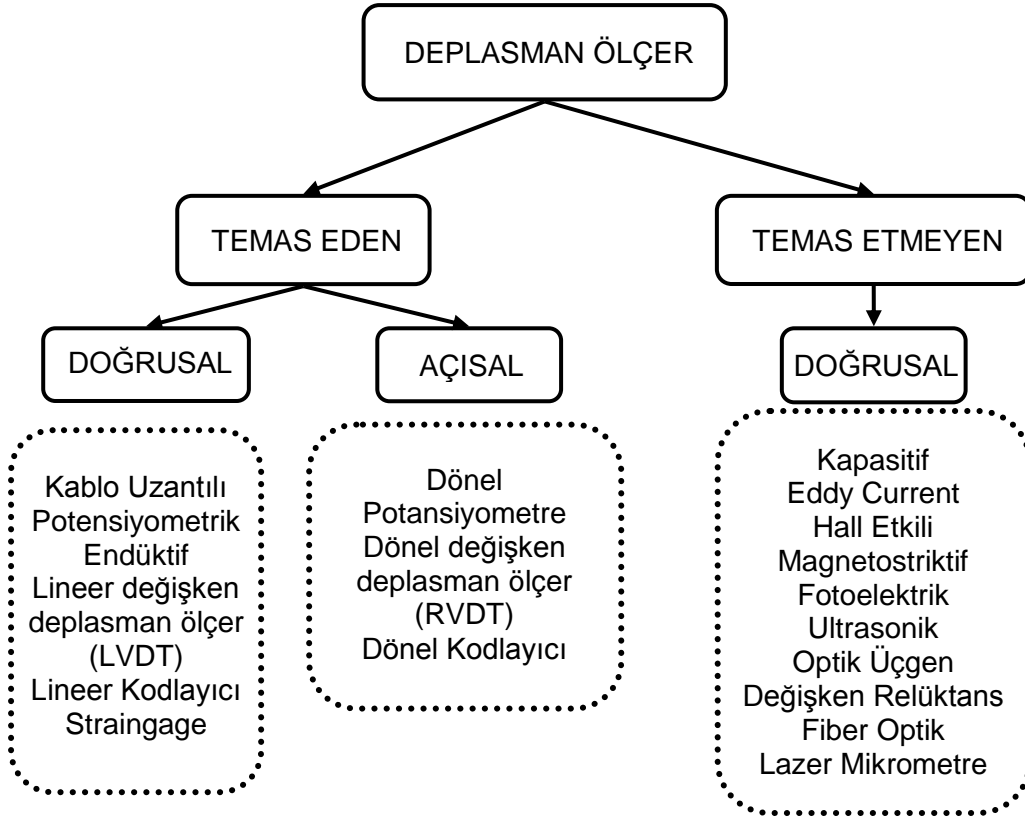
Sıklıkla kullanılan ivme ölçerler, piezoelektrik, kapasitif, straingage, kuvvet dengeli – sismik tipi ivme ölçerlerdir.

### 2.9.2.2 Deplasman Ölçer (Displacement Transducer)

Deplasman ölçer, yer değiştirmenin ölçümünde ve bir cismin başka bir cisme göre pozisyonun belirlenmesinde kullanılır. Deplasman ölçerler, temas eden ve temas etmeyen tip olmak üzere iki ana grup altında toplanır. Temas eden deplasman ölçerlerin çalışma mekanizması, sensör ile ölçüm yapılacak cisim arasında mekanik bir temas olmasına

dayanır. Temas etmeyen sensörler ise, kısa mesafelerde endüktif, elektromanyetik ya da kapasitif bağlantı kurularak, uzun mesafelerde ise elektromanyetik, ultrasonik dalgalarla ya da lazer ile ölçüm yaparlar. Sıkça kullanılan deplasman ölçerler: şekil değişim yay bazlı (LVDT), direnç-potansiyometrik (kablo uzatmalı - dial gage), endüktif, kapasitif, eddy current, hall etkili tip deplasman ölçerlerdir.

Deplasman ölçerlerin bir diğer sınıflandırması, ölçülen deplasmanın lineer ya da açısal olmasıyla yapılır. Bu sınıflandırma temas eden ve etmeyen deplasman ölçerlerin içinde alt sınıflandırma olarak yapılacaktır. Şekil 8'de deplasman ölçerler tiplerinin sınıflandırılması verilmektedir.



Şekil 8 – Deplasman Ölçerler Tiplerinin Sınıflandırılması

### 2.9.2.3 Şekil Değişim Ölçer (Straingage)

Straingage, şekil değiştirme (ve dolaylı olarak) basınç, kuvvet, deplasman gibi büyüklüklerin ölçülmesinde kullanılırlar. Mekanik büyüklüklerin elektriksel ölçümlerinde dünyada en çok kullanılan aletlerdir.

Şekil değişim ölçerlerin büyük bir kısmı, birim şekil değiştirmenin direnç üzerinde oluşmasına neden olduğu doğrusal değişimi kullanarak yaparlar. Şekil değişim ölçerlerin, piezoresistif, titreşen telli (vibrating wire - VW), fiber bragg grating (FBG), karbon dirençli, folyo ölçer (foil gage), metalik tel, elektromanyetik, akustik ve kapasitif türleri vardır.

Şekil değişim ölçer (strain gage) seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken başlıca 3 önemli husus vardır. Bunlar, sensörün çalışacağı ortamın sıcaklığı ve sıcaklık aralığı, sensörden beklenen hassasiyet, ve ölçülecek şekil değişiminin tahmini sınırlarıdır. Çalışma sıcaklığı, sensörün performansında değişiklikler göstermeyecek sınırlar içinde olmalıdır. Ölçüm yapılan bölgedeki sıcaklık değişiminin ölçüm üzerinde etkisinin olup olmadığı ve varsa etkileşim fonksiyonunun bilinmesi gerekir. Yapılacak ölçümlerde istenen hassasiyete göre sensör seçimi yapılmalıdır. Ayrıca, sensörün ölçme kapasitesi, oluşacak şekil değişimlerini ölçebilir genişlikte olmalıdır.

#### **2.9.2.4 Eğim Ölçer (Tiltmetre)**

Eğim ölçer, bir test elemanın bir referans noktasına göre, ki bu genelde yerçekimi vektörüdür, dönme değerini ölçer. Tiltmetreler, köprü izleme ve zemin izleme uygulamalarında sıkça kullanılan sensörlerdir. Eğim ölçerler, kuvvet dengeli-servo, kapasitif, civa, sarkaç, elektromagnetik straingage, magnetorezistif, vibrating wire, elektrolitik olmak üzere değişik teknolojilerde üretilirler. İvme ölçerlerin de tiltmetre olarak kullanıldığı durumlar bulunmaktadır.

#### **2.9.2.5 Çatlak Ölçer**

Çatlak ölçerler, oluşan çatlakların genişliklerinin izlemesinde kullanılmaktadırlar. Mekanik ve mekanik olmayan çeşitleri vardır. Genel olarak çatlak ölçerler, vibrating wire (VW), potansiyometrik, mekanik, kablolu, tell-tails tiplerinde üretilirler. Çatlak ölçerler ayrıca, izleme tiplerine göre de sınıflandırılmaktadırlar. Paralel çatlak ölçerler, birbirlerine paralel iki yüzey arasındaki uzaklığı ölçerken, ortogonal çatlak ölçerler ise birbirlerine dik iki yüzey arasındaki mesafeyi ölçerler. Bu nedenle bir kaç çatlak ölçerlerin kombinasyonu sayesinde, üç boyutlu hareketleri izlemek de mümkündür.

### 2.9.2.6 Sıcaklık Ölçer

Sıcaklık, hemen hemen tüm izleme ve test uygulamalarında ölçülmektedir. Fiziksel bir eleman ya da parçanın sıcaklığı ve ortamın sıcaklığı olmak üzere tipik olarak iki çeşit sıcaklık ölçümü uygulanmaktadır. Sıcaklık gerilme ve deformasyonlara sebep olacağından genel olarak fiziksel elemanların iç ve yüzey sıcaklıkları ölçülmektedir. Fiziksel elemanlar, farklı ısınma ve soğuma etkileri nedeniyle büyük sıcaklık değişimleri göstermekte ve bu değişimlerin doğru olarak gözlemlenebilmesi için sıcaklık sensörlerinin elemanın içinde ve/veya yüzeyinde dengeli olarak dağıtılması gerekmektedir. Ayrıca, sıcaklık hassasiyeti olan bazı sensörlerin de sıcaklık sensörleri aracılığı ile sıcaklığı ölçülüp, bu sensörlerden okunan değerlerin düzeltilmesi gerekebilir. Bazı durumlarda, güneş ışınları, kaloriferler, klima gibi termodinamik etkilerden dolayı, bir yapının sıcaklığı kendi içinde değişkenlik gösterebilir ya da içerisinde bulunduğu ortamın sıcaklığından farklı olabilir. Yapının farklı noktalarından sıcaklık ölçümü ve çevresel sıcaklığın ölçümü bu sebeple önemlidir.

Sıcaklık ölçümü için birçok sensör çeşidi mevcuttur ve bunlar genel olarak termocouple, termistör, direnç bazlı sıcaklık ölçer (RTD), fiber optik, kızılötesi, optik sıcaklık ölçerler olarak sınıflandırılırlar. Bu sensörlerin avantajları ve dezavantajları çeşitlerine bağlı olarak değişmektedir. Çalışma sırasındaki sıcaklık aralıkları çok geniş olduğu için bu sensörlerin seçiminde doğruluk, güvenilirlik, hassasiyet, sinyal düzenleme gerekleri ön plana çıkmaktadır. Titreşen telli (vibrating wire) ve fiber optik sıcaklık sensörleri, diğer sensörlerle karşılaştırıldığında daha pahalıdır.

### 2.9.2.7 Nem Ölçer

Nem, havadaki ya da gazlardaki su buharı miktarıdır. Nem ölçümleri, çeşitli terimlerde ve birimlerde yapılmaktadır. Nem ölçümlerinde sıklıkla kullanılan üç terim mevcuttur. Bunlar, mutlak nem, çiy noktası ve bağıl nem (RH)'dir.

Mutlak Nem : Mutlak nem, su buharı kütlesinin hava ya da gazın toplam hacmine oranıdır. Bu terim genellikle gram / metre<sup>3</sup> olarak belirtilir. Mutlak nem, bağıl nemden ya da sıcaklıktan hesaplanabileceği gibi direkt olarak da ölçülebilir.

Çiy Noktası : Çiy noktası, gazların sıvıya dönüştüğü sıcaklık ve basınçtır. Derece (°C) ya da Fahrenheit (°F) cinsinden hesaplanır.

**Bağıl Nem (RH):** Bağıl nem, havadaki nem içeriğinin aynı sıcaklık ve basınç altında havadaki doymuş nem seviyesine oranı olarak hesaplanır. Bağıl nem iki değer in oranı olduğu için birimi yoktur ve yüzde (%) olarak verilir.

Nem ölçerler, üç değişik teknolojide üretilmektedirler. Bunlar kapasitif, rezistif ve ısı ileten nem ölçerlerdir. Nem ölçerlerin seçilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar: doğruluğu, tekrarlanabilirliği, uzun süreli kararlılık, buğulaşmadan etkilenmemesi, büyüklüğü ve muhafazasıdır.

### **2.9.2.8 Rüzgar Hızı Ölçer (Anemometre)**

Rüzgar hızı ölçümü, genellikle kaseli rüzgar hızı ölçerlerle yapılmaktadır. Kaplı anemometreler, düşey bir eksene ve bu eksene bağlı üç adet kaseye sahiptirler. Rüzgar hızı ile bu kaselerin dönüş sayısı elektronik olarak kaydedilmektedir. Diğer rüzgar hızı ölçer çeşitleri ise, ultrasonik, sıcak kablo, lazer dopler, akustik dopler, optoelektrik, sabit eksenli pervane rüzgar hızı ölçerlerdir.

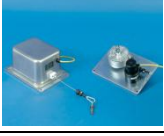
Mekanik olmayan rüzgar hızı ölçerlerin en büyük avantajı mekanik anemometrelere kıyasla, buzlanmadan fazla etkilenmemeleridir. Buna rağmen mekanik rüzgar hızı ölçerlerden biri olan kaseli rüzgar hızı ölçerler yaygınca kullanılmaktadırlar. Buzlanmaya karşı önlem olarak da şaftlar elektrik enerjisi ile ısıtılmaktadırlar. Ortalama rüzgar hızının doğru bir şekilde kesin olarak hesaplanması kolay olmamakla beraber oldukça külfetli bir iştir. Rüzgar hızı, ölçüm alınan bölgedeki topolojik yapıyla oldukça etkilenir. Örneğin, çevredeki ağaçlar ya da diğer binaların rüzgar hızını etkileyebileceği gibi bölgenin pürüzlü ve engebeli olması rüzgar hızını etkiler.

## **2.10 Yapısal Sağlık İzleminde Kullanılan Başlıca Sensör Çeşit ve Tipleri**

Bu bölümde, şimdiye kadar yapılan piyasa araştırması ve ölçüm cihazı çeşitleri için en çok kullanılan ve özellikler bakımından uygun olduğu düşünülen sensörler tablo halinde verilmektedir.

Tablo 2 - Yapısal Sağlık İzlemede Kullanılan Başlıca Sensör Çeşitleri ve Tipleri

Çeşit	Tip	Sıkça Kullanılan Model	Görünümü	Yaklaşık Fiyat
<b>Accelerometre (İvme Ölçer)</b>	Piezoelektrik, Değişken Kapasitans (VC), Kuvvet Dengeli-Servo, Straingage, Piezorezistif, Magnetik Endüksiyon-Hall Etkili, Fotoelektrik, Isı transferi-Termal, Magnetorezistif, Fiber Optik, Diafram Optik, Yüzey akustik dalgası (SAW), Mikroelektromekanik (MEMS), Sismik	<b>PCB Piezoelectric Accelerometer Model No: 393B12</b>		\$1295
<b>Tiltmeter/ Inclinometer (Eğim Sensörü)</b>	Elektrolitik, Kuvvet dengeli-Servo, Kapasitif, Civa, Sarkaç, Elektromanyetik	<b>Spectron Sensors Ltd.</b>		\$ 720
<b>Displacement Transducer (Deplasman Ölçer)</b>	Kablo uzantılı, Kapasitif, Eddy Current-Manyetik Endüksiyon, Fiber Optik, Hall Etkili, Endüktif, Lazer Mikrometre, Lineer kodlayıcı, Magnetostriktif, Optik Üçgen, Fotoelektrik, Potensiyometrik, Straingage, Ultrasonik, Değişken Reluktans, Dönel Potansiyometre, RVDT, Dönel Kodlayıcı	<b>Honeywell MLV7 LVDT</b>		\$900
<b>Straingage (Birim Şekil Değiştirme Ölçer)</b>	Vibrating Wire (VW), Fiber Bragg Grating, Piezoresistif, Karbon Rezistif, Foil Gage, Pnömatik Strain Gage, Elektromanyetik, Acoustik, Kapasitör	<b>Geokon VW Model 4050</b>		\$ 245
<b>Temperature Gage (Sıcaklık Ölçer)</b>	RTD( Rezistans Sıcaklık ölçer), Fiber Optik, Thermocouple, Termistor, Optik Pyrometre, Kızılötesi	<b>Pico Technology SE004 Type K Thermocouple</b>		\$ 36
<b>Anemometer (Rüzgar Hızı Ölçer)</b>	Ultrasonik, Kase, Sıcak Tel, Fotoelektrik, Lazer Doppler, Akustik Doppler, Optoelektronik, Sabit eksenli pervane	<b>Winspeed Limited (Vector Instruments)</b>		\$1250
<b>Humidity Probe (Nem Ölçer)</b>	Kapasitif, Rezistif, Isı İletken	<b>Campbell HMP45C Humidity Probe</b>		\$700

Çeşit	Tip	Sıkça Kullanılan Model	Görünümü	Yaklaşık Fiyat
Crackmeter (Çatlak Ölçer)	Vibrating Wire (VW), Potansiyometrik, Manuel, Tell Tail	Sisgeo Wire Crackmeter Model:0D241A2 000		€1,320

### 3 Gereç ve Yöntem

Yapıların yapısal sağlığının izlenmesi ile ilgili olarak yürütülen bu proje kapsamında öncelikli olarak ölçüm sistemleri araştırılmıştır. Ölçme cihazları (sensörler), kablolar ve veri toplama cihazı olarak tanımlanan ana sistemin üzerine ilave edilen batarya, güneş paneli, haberleşme için modem, GSM data hattı, muhafaza kutusu, iletişim anteni gibi parçalardan oluşan veri toplama sistemini oluşturan öğeler araştırılıp alternatifler oluşturulmuş, en optimum konfigrasyon oluşturularak parçalar satın alınmış ve bir araya getirilmiştir. Birleştirilen fakat aslında bir arada çalışmaları için dizayn edilmemiş bu parçaların bir arada çalışmaları sağlanmış, veri toplama sistemi üzerine yazılması gereken programlama geliştirilmiştir.

Geliştirilen ölçme sistemi önce laboratuarda sonra da gerçek yapılar üzerinde denenmiştir. Gerçek yapılarda deneme işlemi, uygulama safhasında karşılaşılan problemleri görmek, çözüm yöntemleri geliştirmek ve yöntemin teorik ya da lab uygulaması ile sınırlı kalmaması açısından önem içermektedir. Uygulama sırasında olabildiğince farklı ve çok sayıda yapılar üzerinde deneme yapılması, böylelikle uygulamanın farklı yönlerinin görülmesi ve öğrenilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada uygulama yapıları olarak hem tarihi hem de modern yapılar seçilmiştir. Bu yapılar uzun süreli yapısal izleme ya da kısa süreli yapısal tanımlama için testlere tabi tutulmuştur. Tarihi yapılar arasında Nemrut (Commagene) anıtları, Hasankeyf Zeynelbey türbesi, modern yapılar arasında ise Bolu Viyadüğü, Adana Andırap köprüsü, Esenboğa havalimanı döşemesi, Esenboğa yolu üzerindeki yaya köprüsü, iki farklı tren yolu köprüsü (kiriş ve makas tipi), ve Hazine binası çatlak ölçümü, uygulama alanları olarak seçilmiştir.

Tarihi yapılara uygulanacak ölçüm ve analiz sistemi geliştirmek için bir ön çalışma yapılmıştır. Şekil 9'da ana hatlarıyla verilmekte olan bir şema hazırlanmıştır. Buna şemaya göre, tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilmesi gereken ölçüm ve analiz sistemi dört ana başlık altında toplanmıştır: (a) gözle muayene, (b) analitik modelleme ve sonlu elemanlar analizi, (c) kısa vadeli test ve ölçümler, ve (d) uzun vadeli yapısal izleme.

Şekil 9 – Tarihi ve Modern Yapılar İçin Ölçüm ve Analiz Sistemi

**TARİHİ BELGELER**

- İnşasından sonra yapıda gerçekleştirilmiş değişiklikler
- Geçmiş tamir ve restorasyon çalışmaları
- Geçmiş zamanda meydana gelmiş depremler
- Yapının işlev geçmişi
- vb.

**1) Gözle Muayene**

**2) Sonlu Elemanlar Analizi**

**3) Kısa Vadeli Ölçümler**

**4) Uzun Vadeli İzleme**

- Yapısal anomaliler
- Yapı/duvar tipolojisinin belirlenmesi
- Çatlakların yapı içindeki dağılımı, çatlak yön ve genişlikleri.
- Malzeme bozunmaları (nem, biyobozunma – küf, yosun, bitki, ağaç vb, açığa çıkmış çözünebilir tuzlar vb.)

<b>1a. Sonlu Elemanlar ile Analitik Modelleme ve Simülasyon</b>	<b>1b. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonda Kullanılacak Aletler</b>
Yapının geometrisinin simülasyonda kullanılacak yazılıma aktarılması	Bu amaca yönelik yazılımlar, örn. ANSYS, DIANA, ABAQUS, UDEC, MARC, SAP2000 vb.
Gerekli eleman sıklığının belirlenmesi	
Yapının malzeme dağılımının oluşturulan modelde tanımlanması	
Yapı malzeme özelliklerinin oluşturulan modelde tanımlanması	
Yapısal elemanların birbirleriyle bağlantılarının tanımlanması	
Sınır koşullarının tanımlanması	
Yük koşullarının tanımlanması	
Yapının dinamik özelliklerinin tanımlanması	
Statik – dinamik simülasyonun yapılması	
Deprem simülasyonunun yapılması (doğrusal ve doğrusal olmayan biçimlerde)	

St-Id

<b>2a. Kısa Vadeli Ölçüm ve Testler</b>	<b>2b. Kısa Vadeli Test Ölçüm Yöntem ve Aletleri</b>
Yapının geometrik özelliklerinin ve çatlak düzeninin belirlenmesi	Fotogrametrik yöntemler, lazer tarama, manuel ölçümler, ultrasonik/lazermesafe ölçerler
Yapı morfolojisinin (malzeme ve yapısal açıdan) belirlenmesi	Yerinde uygulanacak uygun yöntemler (georadar, (ultra)sonik testler, boroskopi, endoskopi, kızılötesi termal kameralar, akustik emisyon, elektriksel direnç, manyetik yöntemler, flat-jack vb.), (mümkünse) çevresel kaynakların (madenler) ve çevredeki başka benzer anıt/ yapılarla tarihi kaynakların incelenmesi
Yapı elemanlarının birbirleriyle bağlantılarının belirlenmesi	Georadar, sonik testler, kızıl ötesi termal kameralar, manyetik yöntemler, flat-jack vb.
Yapı malzemelerinin fiziksel, mekanik, kimyasal ve minerolojik özelliklerinin belirlenmesi	Yerinde uygulanan yöntemler (ultrasonik hız, flat-jack, ahşap yapı elemanları için delgi rezistansı testi vb.), örnekleme yoluyla gerçekleştirilen laboratuvar analizleri
Yapı malzemelerinin bozunmuşluk düzeyinin belirlenmesi	Görsel yöntemler, ultrasonik hız ölçümü, delgi rezistansı testi, laboratuvar analizleri
Dinamik testler (frekans, mod, sönüm vb. özellikleri)	İvme ölçerler, titreşim ölçerler
Mukavemet testleri (elastisite modülü, mukavemet vb. özellikleri)	Ultrasonik hız ölçümü gibi tahribatsız yöntemler veya örnekleme yoluyla gerçekleştirilen laboratuvar analizleri
Statik testler	Deplasman ölçerler, çatlak ölçerler
Çatlak boyutlarının ölçümü	Yerinde uygulanacak uygun tahribatsız yöntemler (georadar, sonik yöntemler, kızılötesi termografi), çatlak ölçerler

	<b>3a. Uzun Vadeli İzleme Gerektiren Parametreler</b>	<b>3c. Uzun Vadeli İzleme Yöntem ve Aletleri</b>
S T A T İ K	Sıcaklık	Kablosuz uzaktan kontrollü sıcaklık sensörleri
	Nem miktar ve dağılımı	Kablosuz uzaktan kontrollü nem ölçerler, kızılötesi termal kameralar
	Rüzgar hızı ve yönü	Rüzgar sensörleri (anemometer) kap, doppler, pervane, basınç tüpü, sıcak kablo, sonik
	Kar yüksekliği	Manuel yöntemler, ultrasonik ve lazer tabanlı mesafe ölçerler
D İ N A M İ K	Çatlak genişliğindeki değişim	Manuel yöntemler, çatlakmetre, deformasyon ölçer, akustik emisyon
	Eğim	Electrolit, yer çekimi ivmesi, pendulum, vb,
	Titreşim	İvme ölçer, lazer vibrometer, hız ölçer
	Hareketli yük	Gözleme dayalı veriler ve istatistikî yöntemler (örneğin köprüler için, WIMS); dingil ağırlığı ve sürat ölçümü.



Ölçüm ve analiz sisteminin üzerine kurulu olduğu bu 4 temel adım aşağıdaki gibi özetlenebilir:

a) **Gözle muayene:** Gözle muayene yapı hakkında en doğrudan ve en ucuz şekilde genel fikir edinilen adımdır. Gözle muayene yoluyla aşağıda sıralanan konulara ilişkin niteliksel bilgi edinilebilir:

(1) Yapının içinde bulunduğu yapısal durum (görülebilir yapısal çatlakların dağılımı, eğilmiş duvarlar ve kolonlar, sarkmış döşemeler gibi, incelenmesi yükün yapı içerisinde nasıl dağıldığı ve olası temel problemleri hakkında fikir verecek olan yapısal anomaliler),

(2) Yapının malzemesel anlamda içinde bulunduğu durum (Bozunma mekanizmaları, yapı malzemelerinin bozunma oranı ve yapı içindeki dağılımları vb. örneğin paslanma, tuzlanma, renk değişimleri, küflenme, nem.),

(3) Kullanılan yapı malzemeleri ve inşa teknikleri gibi yapı teknolojisine ilişkin temel noktalar (yapı/duvar tipolojisinin belirlenmesi gibi),

(4) Yapı üzerinde, inşasından bu yana gerçekleştirilmiş, fark edilebilir değişiklik ve adaptasyonlar ile geçmiş tamir ve restorasyonların izleri.

Bu yöntem nicelik vermediği, görme kapasitesi ile sınırlı olduğu ve yüzeysel olup saklı hasarları saptayamadığı için tek başına yetersiz kalmakta, ancak doğru kullanıldığında kısa ve uzun vadeli ölçüm ve izleme safhalarında da diğer inceleme yöntemlerine destek olarak sık sık başvurulan önemli araçlardan biri olmayı sürdürmektedir. Görsel muayene, gerektiği durumlarda, su kaynakları, eğimler, olası yapı malzemesi kaynakları ve yapısal ya da malzemesel açıdan veya aynı koşullara maruz kalan benzer yapıların incelenmesi için bir yakın çevre araştırmasında da kullanılabilir. Gözle muayene, fotoğraf, video vb. çekilerek, iki ve üç boyutlu çizimler – animasyonlar ile tamamlanmalı ve böylece yapı/anıt/sitenin zaman içinde belgelenmesine de katkıda bulunulmalıdır.

b) **Sonlu elemanlar analizi:** Sonlu elemanlar analizi, uygun bir bilgisayar programı kullanılarak, yapının gerçek davranışını en iyi biçimde simülasyonunu yapacak bir analitik modelinin oluşturulmasını ve incelenen yapıya ait kritik durumların analizlerin yapılmasını içerir. Kullanılacak bilgisayar programının, tarihi bir malzemeyi ve tarihi bir yapının yapısal davranışını temsil edebilecek yeterli doğrusal olmayan modelleme ve analiz kapasitesine sahip olması beklenir. Bu amaçla ilk olarak, yaklaşık boyutlar

ve tahmini malzeme özellikleri kullanılarak orijinal model oluşturulur. Oluşturulan bu model daha sonra, kısa vadeli ölçüm ve uzun vadeli izleme aşamalarından elde edilecek bilgiler kullanılarak, analitik modelde tanımlanan malzeme özellikleri, yapısal bağlantılar, yük koşulları vb. değişkenleri güncellenerek yapılan ölçümlere yakın değerler elde edilmesi hedeflenir; böylece kalibreli model elde edilir. Analitik model kalibrasyonu tamamlandığında, yapısal tanımlama (St-Id) da gerçekleştirilmiş olacaktır. Ancak kalibrasyon bile yapılsa, yığma yapıları temsil için oluşturulmuş her model bir dizi varsayımı içermektedir. Tarihi bir yapının yapı taşlarını oluşturan mermer, kireç taşı, harç, moloz taş, ve benzeri malzemenin laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalardan geçirilse dahi, analitik modelleme ile yapının tam olarak davranışı tahmin edilemez. Ancak, yapının davranışı hakkında yaklaşık bir fikir sahibi olunabilir. Elde edilecek sonuçların, yüzyıllar içinde yeniden üretilemeyecek ve çoğu bilinmeyen değişik şartlara maruz kalmış bir tarihi yapının davranışını ne ölçüde temsil edeceği cevaplanması gereken bir sorudur. Tarihi yapıların yapısal tanımlama ve analitik simülasyon sonuçlarına, bilinmeyenler ve varsayımlar göz önünde bulundurularak ihtiyatla yaklaşılması gerekir.

- c) **Kısa vadeli ölçümler:** Kısa vadeli ölçümler arasında, malzeme ve yükler ile ilgili olarak numune alınarak ya da yerinde yapılan ölçümler, geometrik boyutların ölçümü, ve yükleme ya da dinamik testler sayılabilir. Yapısal ve malzemesel morfolojiyi tanımlayan, yapının özelliklerine ilişkin parametrelerin zaman içinde belirli bir noktada bir kerelik ölçümü amaçlanmaktadır. Yapının geometrisinin fotogrametrik yöntemler aracılığıyla detaylı olarak elde edilmesi, görünen ve görünmeyen çatlakların belirlenip (örneğin termal kameralar ile) belgelenmesi, yapının kesit bilgisinin kayıt altına alınması; karot veya parça alınarak laboratuvarında basınç – birim deformasyon ilişkisi, dayanım, elastisite modülü, özgül ağırlık, kimyasal kompozisyon (XRF), porosite tayini; flat-jack ile yapının seçilen bölgelerinde halihazırda basınç yönünde etki eden gerilme değerlerinin ölçülmesi; ultrasonik hız tespiti ile elastisite modülü ve dolaylı olarak dayanım tahmini yapılması; tercihen tahribatsız yöntemlerle (x-ray, GPR gibi) kesit içinde bulunan ve göze görünmeyen farklı malzemelerin, boşlukların ve bunların yapı içindeki dağılımının belirlenmesi; malzeme bozunmuşluk düzeyinin niceliksel olarak ifade edilmesi; yapının statik ve dinamik özelliklerinin test edilmesi vb. sayılabilir. Tüm bu parametreler değerlendirilmeli ve orijinal bilgisayar modelinin güncellenmesi için kullanılmalıdır.

**d) Uzun vadeli izleme:** Uzun vadeli izleme, çoğunlukla zaman içinde yapı ile ilgili değişiklik gösterebilecek parametrelerin ve yapıya doğrudan etkisi bulunan çevresel faktörlerin (sıcaklık, rüzgar, hareketli yükler, kar vb) sürekli ya da zaman içinde tekrarlanır kısa süreli ölçülmesidir. Yapı ile ilgili değişiklik gösterebilecek parametreler, kısa vadeli ölçümler başlığı altında listelenen parametrelerden birçoğunu içerebilir. İzlemeye alınacak yapısal parametreler, yapının durumu ile ilgili olarak değişiklik gösterecek parametrelerden seçilmelidir; ya da yapısal önemi olan fakat ölçülemeyen bazı parametrelerin değişmesi durumunda bundan etkilenecek parametreler izlenmelidir. Seçilecek bir yapısal parametrenin (deplasman, eğim, çatlak genişliği, birim deformasyon vb) zaman içindeki değişimi sürekli olarak belirli aralıklarla (örneğin her yarım saatte bir) izlenebileceği gibi, ölçülmesi daha zor olan bazı parametrelerin (örneğin statik yükleme deneyi ile rijitlik tespiti gibi) izlenmesi, örneğin her 3 ayda bir düzenli aralıklı tekrarlanacak testlerle yapılması da mümkündür. Uzun süreli ölçümler statik ve dinamik olarak ayrılabilir. Uzun süreli statik ölçümler sıcaklık, nem, çatlak genişliğindeki değişim gibi parametrelerin belirli aralıklarda ölçülmesi olarak düşünülebilir. Oysa, titreşimler gibi dinamik verilerin ölçülmesi çok daha hızlı (örneğin saniyede 200 ölçüm) olarak yapılmalıdır ve uzun süreli ölçüm yapılması, toplanacak verinin büyüklüğü açısından, uygun değildir. Dinamik verilerin uzun süreli ölçümü, toplanacak dinamik verinin sürekli olarak işlenmesi ve okunan verinin doğrudan kaydedilmesi yerine sadece veri içinde bulunan ve yapısal özellikleri tanımlayıcı (örneğin doğal titreşim periyotları, sonüm oranları, vb) bilgilerin analiz edilerek dinamik veriden ayrılması ve sadece bu verinin belirli aralıklarla saklanması şeklinde açıklanabilir. Toplanan bu işlenmiş – süzülmüş dinamik veriler üzerinde bazı istatistiki çalışmalar (örneğin köprü üzerinden geçen taşıtların hız ve ağırlık histogramı gibi) ya da çapraz korelasyonlar (örneğin doğal titreşim frekansı ile sıcaklık arasındaki ilişkinin belirlenmesi gibi) yapılabilir. Dinamik izlemede ölçüm hızlı bir biçimde yapılır, tüm veri sürekli olarak kaydedilmez, bunun yerine veri içindeki önemli bilgiler ya da istatistiki veriler tutulur.

Görüldüğü gibi, yukarıda kısaca açıklanan dört adım birbiri ile ilişkili bir yapıdadır. Yapıların ölçüm ve analiz ve sonrasında değerlendirme işleminde, oluşturulan tabloda bahsedilen aşamalar ile bir genellemeye varılmaya çalışılmıştır. Şekil 9'da verilen şemada tanımlanan ölçümleri yaparken kullanılabilecek ölçüm cihazlarına da değinilmiştir. Burada verilen örnekler çok genel olmakla beraber, cihaz seçiminde her durum tek başına değerlendirilmeli ve tahribatsız yöntemler mümkün olduğunca tercih edilmelidir. Özellikle tarihi yapılar durumunda, bir sonuca ulaşmak için tek bir yöntem kullanmak yerine, birbirini bütünleyici

tahribatsız yöntemlerin bir arada kullanılmasının daha doğru yargılara ulaşılmasını sağlayacağı öngörülmektedir (örneğin, GPR, sonik ve flat-jack testlerinin bir arada kullanımı gizli çatlak konumlarını ve boşlukları, farklı ihtivalar gibi kesit içindeki diğer anomalileri ortaya çıkarmakta çok iyi sonuç vermektedir). Yapı ile ilgili olarak ihtiyaç duyulan bilgi düzeyi ve bütçe imkanları cihaz ve yöntem seçiminde önemli rol oynamakta, bu da yürütülecek ölçüm ve izleme çalışmasının iyi tasarlanması gerektiğini göstermektedir.

Tarih yapıların izlenmesi ile ilgili olarak yapılabilecek ölçme ve test çalışmalarına ek olarak, varolmaları halinde tarihi kaynaklardan da faydalanılabilir. Bu tarihi belgeler yapının ait olduğu döneme göre, yazıtlar, görsel ve yazılı arşiv belgeleri, seyahatnameler vs. olabilir. Bu belgeler aracılığıyla yapı-anıtta gerçekleştirilmiş değişiklikler ve adaptasyonlar (örneğin, bir duvarla ikiye bölünmüş bir oda), ekleme-çıkarmalar (örneğin, eklemiş bir çan kulesi, iptal edilmiş bir balkon), yapıya uygulanmış tamir ve restorasyon çalışmaları, yapının sismik tarihi ve işlevsel geçmişi (örneğin kilise→cami→müze ya da tiyatro→kervansaray→depo) gibi yukarıda açıklanan adımlardan elde edilen veriler değerlendirilirken son derece önem taşıyacak bir takım bilgilere ulaşılabilir.

## **4 Bulgular**

### ***4.1 Pilot uygulamalar:***

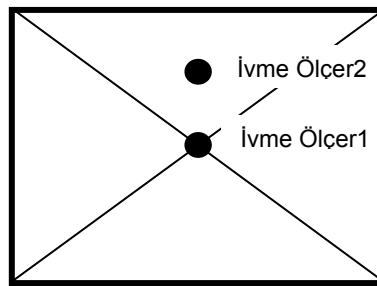
#### **4.1.1 ODTÜ yapı mekaniği lab döşemesinin dinamik testinin yapılması**

16 Aralık 2005 tarihinde İnşaat Mühendisliği Bölümü K2 binasının ikinci katındaki döşemede dinamik çekiç testi yapılmıştır. Yapılan test sonucunda döşemenin doğal salınım frekanslarının bulunması ve proje dahilinde satın alınan ivme ölçerlerin kontrol edilmesi planlanmıştır. Testlerde, 2 adet 57.2 mm x 54.9 mm ebatlarında, 1 V/g hassasiyete sahip PCB Piezotronics marka 393C model ivme ölçerler (accelerometre), bir adet PCB marka 086C42 model darbe çekici (impact hammer), bir adet Superlogics marka 4 kanallı dinamik veri toplama sistemi ve bir adet taşınabilir bilgisayar kullanılmıştır. Yapılan testte kullanılan araçlar Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10 – Test alanı genel görünüm ve kullanılan cihazlar

Darbe çekici, döşemeye düşey yönde belirlenen noktalara vurulduğunda, yapının düşey yönde bulunan ve vurma noktası ölü hareket noktası olmayan tüm modellerinin titreşmesi ve bu sayede yapının doğal titreşim frekanslarında tahrik edilerek serbest salınım yapmasına olanak sağlar. İvme ölçerler, darbe çekicinin vurulması sonucunda yapı üzerinde oluşan titreşimlerin alınmasına ve veri toplama sistemine gönderilmesini sağlamaktadırlar. İvme ölçerlerden alınan verilerin sağlıklı olabilmesi için bu cihazların, döşemenin mod şekilleri göz önüne alınarak uygun yerlere yerleştirilmesi gerekmektedir. Yapılan testte döşemenin ilk frekanslarının ayırt edilebilmesi amacıyla ivme ölçerlerden biri döşemenin tam ortasına (ilk modu yakalayacak, ikinci modu kaçırarak şekilde), diğeri ise döşemenin uzun yönünde ortasına diğere yönünde de kenardan 1/4 uzaklıkta yerleştirilmiştir (Şekil 11).

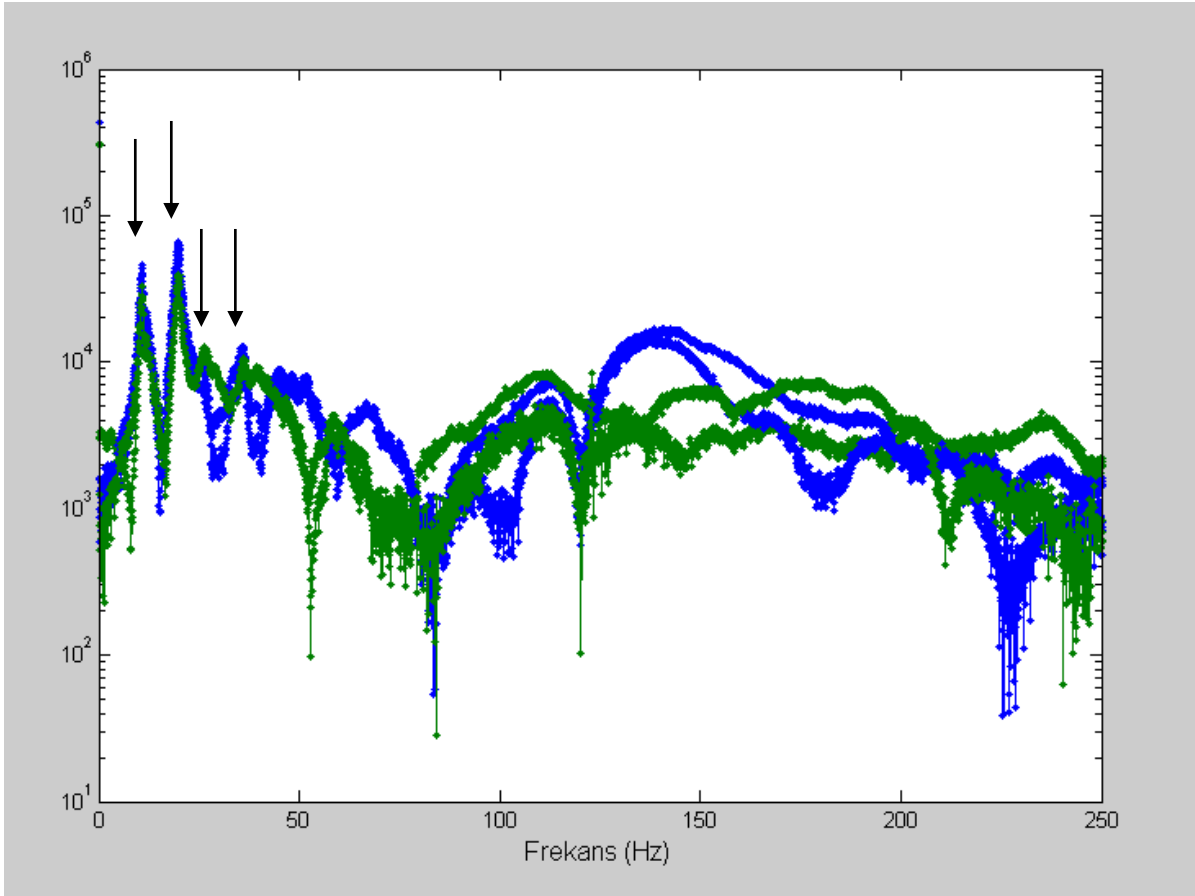


Şekil 11 – İvme ölçerlerin döşeme üzerinde yerleşimi

İvme ölçerlerden ve darbe çekiciden alınan veriler, veri toplama sisteminden geçirildikten sonra uygun bir program kullanılarak bilgisayarda toplanmaktadır. Dinamik veri toplama sistemi, yapılan testte darbe çekiciden ve ivme ölçerlerden gelen verilerin eşzamanlı olarak depolanmasına olanak sağlanmaktadır. Bu sayede döşemeye çekiçle uygulanan kuvvet ve döşemenin değişik yerlerinden gelen titreşimler arasında zaman farkı kalmamaktadır.

Yapılan testte, hazırlanan bilgisayar programının veri toplama sisteminden saniyede 500 adet (500 Hz) veri toplayabilecek şekilde ayarlanmıştır. Bu nedenle ivme kayıtları en fazla Nyquist frekansı olan 250Hz'e kadar frekansları ölçebilmektedir.

Toplanan veriler, testin ardından analiz edilerek, döşemenin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Öncelikle elde edilen ivme ve kuvvet kayıtları, Fast Fourier Transformation (FFT) uygulanarak frekans uzayına çevrilmiştir. Karmaşık sayı halinde frekans uzayında bulunan ivme değerleri, yük çekici tarafından ölçülen veriye frekans uzayında bölünerek her frekansta yapının transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Normalize edilen ivme kayıtlarının sivri şekilde büyüdüğü frekans değerleri döşemenin doğal salınım frekanslarını, her doğal salınım frekansı bölgesinin yayvanlığı ise döşemenin sönüm oranına işaret eder. Yarım güç band genişliği (half power bandwidth) metodu kullanılarak sönüm oranını elde etmek de mümkündür. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen frekanslar Tablo 3 ve bunlara karşılık gelen doğal titreşim periyodları Tablo 4'te verilmektedir.



Şekil 12 – Frekans uzayı, döşeme için elde edilen transfer fonksiyonu

Tablo 3 – Döşeme Doğal Frekansları

İvme Ölçer No	Elde Edilen Doğal Frekanslar (Hz)				
1	10.75	11.97	19.9	26.5	36.16
2	10.73	11.97	19.86	25.7	35.86

Tablo 4 – Döşeme Doğal Titreşim Periyodları

İvme Ölçer No	Elde Edilen Doğal Titreşim Periyodları (s)				
1	0.093	0.0835	0.05	0.038	0.028
2	0.093	0.0835	0.05	0.039	0.028

Elde edilen verilerin birbirleri ile uyuşması sonucunda döşemenin, doğal titreşim periyodlarının yaklaşık olarak Tablo 4'te verilen değerler olduğuna karar verilmiştir.

#### 4.1.2 Veri toplama sistemi ve çoklayıcının programlanması

Alınan cihazların çalıştırılması işlemi başarıyla tamamlanmıştır. CR1000 veri toplama sistemine bağlanan veri kanalı çoklayıcıları, veri toplama sisteminde bulunan tek kanalı 16 kanala kadar çoklamaya yaramaktadır. Sensör okumaları çoklayıcı (mux) üzerinden yapıldığında cihazın beraberinde temin edilen yazılım programı kullanılarak makinenin kendine özel komutları kullanılarak yapılmaktadır. Titreşen telli şekil değişim ölçer (VSM4000) P87, P86, P22, P4, P55, ve P28 komutları kullanılarak okunmaktadır. Birden fazla sensörü sıra ile okumak için “do loop” komutu olan P87 ve P95 komutları arasında, ana hatlarıyla P4 sıcaklık okuması, P28 şekil değişim uygulaması için kullanılmaktadır. P4 ile okunan voltajın sıcaklık birimine çevrilebilmesi için dördüncü derece bir polinom denklem kullanılmaktadır. Denklemi  $T = -104,78 \cdot x^0 + 378,11 \cdot x^1 - 611,59 \cdot x^2 + 544,27 \cdot x^3 - 240,91 \cdot x^4 + 43,089 \cdot x^5$  olarak tanımlanan bu ilişki P55 komutu kullanılarak hesaplanmaktadır. Hazırlanan örnek program aşağıda verilmektedir.

; Measure channel #1 through channel #7 on the multiplexer

12: Beginning of Loop (P87)

1: 0 Delay

2: 7 Loop Count

; Moves from block to block to measure the sensors

13: Do (P86)  
1: 78 Pulse Port 8

14: Excitation with Delay (P22)  
1: 1 Ex Channel  
2: 0 Delay W/Ex (units = 0.01 sec)  
3: 1 Delay After Ex (units = 0.01 sec)  
4: 0 mV Excitation

; Measure the temperature side of the sensor

15: Excite-Delay (SE) (P4)  
1: 1 Reps  
2: 15 2500 mV Fast Range  
3: 1 SE Channel  
4: 1 Excite all reps w/Exchan 1  
5: 1 Delay (units 0.01 sec)  
6: 2500 mV Excitation  
7: 5 Loc [ tt ];  
8: 0.001 Mult  
9: 0.0 Offset

16: Polynomial (P55)  
1: 1 Reps  
2: 5 X Loc [ tt ]  
3: 6 -- F(X) Loc [ tempC\_1 ]  
4: -104.78 C0  
5: 378.11 C1  
6: -611.59 C2  
7: 544.27 C3  
8: -240.91 C4  
9: 43.089 C5

; Measure the Coil side of the sensor

17: Vibrating Wire (SE) (P28)  
1: 1 Reps  
2: 2 SE Channel  
3: 1 Excite all reps w/Exchan 1  
4: 4 Starting Freq. (units = 100 Hz)  
5: 10 End Freq. (units = 100 Hz)  
6: 300 No. of Cycles  
7: 0 Rep Delay (units = 0.01 sec)  
8: 38 -- Loc [ f2\_1 ]  
9: 4062 Mult  
10: 0.0 Offset

18: End (P95)



### 4.1.3 Tarihi yapıların yapısal sağlık izleme yapılması

Tarihi yapılar, bir ulusun geçmişini sembolize eden, benzersiz ve değiştirilemez semboller olabileceği gibi bölgenin tarihinde yaşayan diğer uygarlıkların zamanına, kültürüne ışık utan paha biçilemez eserler de olabilir. Tarihi yapılar, normal yapılardan beklenen servis ömrünün çok üzerinde süreler ayakta kalmak durumunda olduklarından yapısal birçok problem yaşayabilmektedirler. Her biri benzersiz ve yeri doldurulamayacak birer kültür hazinesi olan tarihi yapılar, bu özelliklerinden dolayı, yapısal bir problem olması durumunda problemin kapsamı ve önemini belirleme, problemin bertaraf edilmesi için uygulanacak güçlendirme – iyileştirme çalışmaları için metotları belirleme, ya da yapısal bir problem yaşanması ihtimale karşı izlemeye alınarak problem oluşmadan ilk aşamalarında tespit etmek üzere korunmalıdırlar. Tarihi yapılar, ayrıca, inşa edildikleri dönemin yapısal teknolojik özelliklerini en iyi anlayabileceğimiz kaynaklar olmaları bakımından önem taşımaktadırlar. Bu sebeplerle, yapısal sağlık izleme, tarihi yapıların incelenmesinde de, devam eden servis performansının sürekli ya da düzenli olarak izlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Bu amaçla, ihtiyaç duyulan bilginin boyutu, bütçe ve insan kaynaklarına bağlı olarak değişecek biçimde, sağlık durumu hakkında doğrudan ya da dolaylı şekilde fikir verecek bir takım parametrelerin ölçülmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir.

Ancak tarihi yapılar durumunda, modern yapılarda yaşanmayan fazladan bir takım zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bunlardan en önemlileri şöyle sıralanabilir: (1) Tarihi yapılar için uygulanabilecek standartlar mevcut değildir, (2) Yapı genellikle düzensiz geometrik sistemler bulunmaktadır ve boyutsal veri genelde ya yoktur ya da eksiktir, (3) Yapı malzemelerinin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi zor, pahalı ve bazen de tarihi yapılar durumunda göze alınamayacak şekilde tahribatkardır, (4) Malzeme özellikleri yapı içerisinde düzensiz dağılmış durumdadır, dolayısıyla istatistiki olarak açıklayıcı değerler elde etmeyi mümkün kılacak şekilde numune almak zor, zaman alıcı ve pahalı hale gelmektedir, (5) Yapı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesi için alınması gerekli olan numuneler, tarihi yapılar durumunda genellikle standart test ölçü ve şekillerine sahip değildirler, (6) Tarihi yapının dış ve iç yüzeyleri çoğunlukla sıva vb. ile kapatılmış durumdadır. Bu da yüzeylerin görülmesini ve tarihi yapıların çok büyük bir kısmını oluşturan yığma yapılarda önemli parametrelerden olan blok/tuğla büyüklüğü, derz dağılımı vb.nin görülmesini imkansız kılmaktadır, (7) Tarihi yapılarda genel olarak duvar kesitleri de heterojen bir yapıdadır; duvarın dış yüzeyi ile iç-orta bölgesi farklılıklar gösterebilmektedir, (8) Yapının incelenmesi sırasında kullanılacak tahribatsız yöntemlerin

kalibrasyonu için gerekli deneysel veri çok azdır; tarihi yapılar arasında cihaz okumalarının standardize edilmesi güçtür, (9) Yapının şu ana kadar maruz kaldığı çevresel ve diğer koşulların tür ve süresini, bu koşulların ne kadar yapısal hasar ve malzeme bozunmasına sebep olduğunu tespit etmek güçtür, (10) Tarihi yapı/anıtların ilk inşalarından bu yana geçirmiş oldukları yapısal değişiklikler ve müdahaleler konusunda bizi bilgilendirecek kaynaklar genellikle çok kısıtlıdır.

#### 4.1.3.1 Nemrut

İ.Ö. dokuzuncu ve birinci yüzyıllar arasında yazılı kaynaklarda adı geçen Kommagene Krallık'ının son dönemlerinde kral Antiochos I tarafından inşa ettirilmiş anıtlar, Nemrut Dağı'nın (2150 m) tepesine yaklaşık 290000 m<sup>3</sup> taşla yapılmış büyük tümülüsün doğu ve batı terası olarak adlandırılan iki tarafında yer almaktadır. Her iki terasta da bir dizi heykel ve kabartma bulunmaktadır. Buna ek olarak, her iki tarafta da birer sunak bulunması bu alanın krallık döneminde ne kadar büyük bir dini değere sahip olduğunu gösterir. Anıtta bulunan heykeller, hem Roma hem de Pers mitolojisinin tanrılarına karşılık gelmektedir. Bunun yanı sıra, Antiochos I'in kendisini temsil eden bir heykel de bulunmaktadır. 10 metreye yakın boylara, 100 tonun üstünde ağırlıklara sahip bu eşsiz anıtların baş kısımları gövdelerin üstünden (büyük ihtimalle bir deprem sonucu) düşmüş ve 1835'de keşfedildiklerinde bu şekilde bulunmuşlardır. (Ref: Cimok, F.; Commagene NEMRUT; A Turizm Yayınları; İstanbul; 1995).



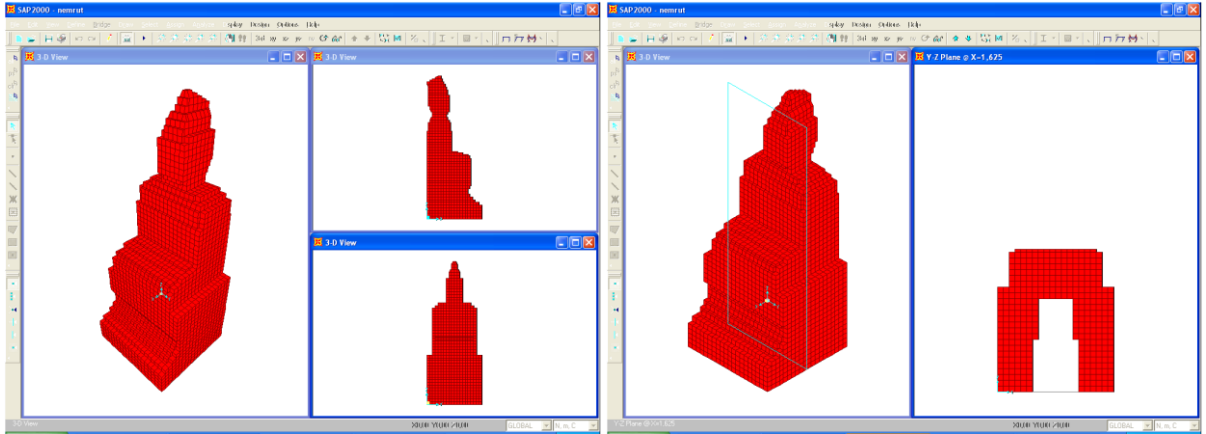
Şekil 13 – Tümülüsün yukarıdan görünüşü ve doğu terası (Uluslararası Nemrud Vakfı fotoğraflarından alınmıştır - <http://www.nemrud.nl>)



Şekil 14 – Sırasıyla batı ve doğu teraslarından birer baş heykeli (Uluslararası Nemrud Vakfı fotoğraflarından alınmıştır - <http://www.nemrud.nl>)

- a. Görsel izleme: Anıtların görsel olarak uzun süreli izlenmesi için belirli aralıklarla fotoğraf çekecek basit bir düzenek üzerinde ön çalışma yapılmıştır. Bu izleme sistemi, belli ölçümlerin (örneğin, kar yüksekliği, yağmur şiddeti) görsel şekilde de kayıt altına alınmasını sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda sitenin nasıl korunduğu, ziyaretçilerin tutumu gibi, site koruması ve gelecekte yürütülmesi düşünülen restorasyon çalışmaları için önem taşıyan konular da daha iyi şekilde kavranmış olacaktır. Ancak, kameralara dair yapılmış olan araştırma ortaya koymuştur ki Nemrut Dağı'nın tepesinde kış koşulları altında oluşabilecek sıcaklıkta çalışabilecek kamera bulmak neredeyse imkansızdır. Karşılaşılan firmalardan yalnız biri  $-40^{\circ}\text{C}$ 'a kadar işleyen bir gözlem kamerası sunabilmiştir, fakat kış aylarında bölgede elektrik bulunmamaktadır ve güneş paneli kameranın ısıtıcı sistemini destekleyecek kapasitede değildir.
- b. 3D modelin oluşturulması ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi: Anıtların üç boyutlu birer analitik modelinin oluşturulması, çalışmanın birçok safhası için önem taşımaktadır. Analitik modeli oluşturmanın amacı, anıtların doğal titreşim frekanslarının hangi mertebede olduğunu araştırmak ve daha sonraki aşamalarda yapılması planlanan dinamik test ölçümleri için uygun veri toplama ve ivme ölçer sistemini oluşturma aşamasında tahmini ön bilgi sağlamaktır. Nemrut anıtları için oluşturulan ön model için Kommagene Krallığı hakkında yazılmış kaynaklarda bulunan ölçekli anıt çizimlerinden faydalanılmıştır. Modelleme SAP2000 yapısal analiz programı ile yapılmıştır (Şekil 15) ve

beklenen frekanslara ilişkin ilk veriler alınmıştır. İleriki aşamalarda LSDYNA isimli doğrusal olmayan analiz yapabilen çok amaçlı sonlu elemanlar analiz programı ile anıtı oluşturan taş blokları teker teker tanımlanmış, taş bloklar arasındaki temas ve sürtünme durumları modellenmiş ve yapılan doğrusal olmayan deprem analizi sonuçlarının doğrusal SAP2000 analizine göre çok farklı olduğu görülmüştür. Anıtların gerçek geometrisini elde etmek için kullanılan üç boyutlu lazer tarayıcıların marka ve fiyatları araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan araştırmalar 3D lazer tarayıcıların çok pahalı olduğunu ortaya koymuştur (>100,000€). Bu sebeple, üç boyutlu bir nesnenin iki boyutlu fotoğraflarını ortak referans noktalar aracılığıyla birleştirerek 3D modellemesini yapan ve CAD formatı ile iletişim kuran paket programları araştırılmıştır. Bunların içinde proje uygulamasına en uygun olanı PhotoModeler ile çalışmalar yapılmış fakat anıtların tüm yüzlerini uzaktan gösteren fotoğrafların (anıtların birbirine yakın durmaları sebebiyle) çekilememiş ve geometri fotoğraflardan hassas olarak elde edilememiştir. Anıtlardan çıkartılan rölelerdeki boyutlar kullanılarak modelleme çalışmaları tamamlanmıştır.



Şekil 15 – Nemrut anıtlarına ait 3D sonlu elemanlar ön modeli. Anıtların içinde bulunan boşluk da oluşturulan modele yansıtılmıştır.

- c. Sıcaklık ve nem değerlerinin izlenmesi: Sıcaklık ve nem bilgileri malzeme analizleri için önemli çevresel faktörlerdendir ve bozunma mekanizmaları hakkında fikir verir. Sıcaklık ve nem ölçmek amacıyla Nemrut Dağı anıtları bölgesine 19-20 Eylül 2006 tarihinde nem ve sıcaklık ölçme sensörleri yerleştirilmiştir. Veri toplama sistemi ile kablosuz olarak GSM hattı üzerinden bağlantı sağlanmıştır. Başarıyla gerçekleştirilen 2-3 bağlantı ile 2 aylık veri başarıyla indirilmiş fakat 17 Kasım 2006 tarihinden sonra veri toplama sistemi ile temas yitirilmiştir. Bağlantı kurulamaması hakkında düşünülen olası senaryolar şu şekildedir:

- 1) Nemrut dağının doruk noktası çok çetin hava şartlarına maruz kalmaktadır. Çok kuvvetli rüzgar, 4-5 metre kar, şiddetli yağmur bunlar arasındadır. Olasılıklardan birisi, sıcaklık ve nem sensörleri ile güneş panelinin bağlanmış olduğu 4m boyunda çelik borunun paratoner vazifesi görerek yıldırım çekmiş olabileceğidir. Yere 15-20 cm derinliğe gömülmüş olmasına rağmen, yıldırım veri toplama sistemine ve ilgili cihazlara hasar vermiş olması muhtemeldir.
- 2) Bölgeye 3 metreden fazla kar yağması durumunda güneş paneli ve GSM anteni karlar altında kalacağı için veri toplama sisteminin elektrik beslemesi yapılamadığı ve anten iletişim görevini yerine getiremediği için bağlantı kurulamıyor olabilir.
- 3) GSM veri bağlantısı, bölgede cep telefonlarının sağlıklı olarak sinyal alamadığı için, güçlkle yapılmakta idi. Yoğun kar yağışı ya da rüzgar sonucu GSM anteninin mıknatıs ile sabitlendiği çatı sacı üzerinden kayarak yere düşmüş olması ve zaten zayıf olan GSM çekme alanının tümüyle yitirilmiş olması muhtemeldir.
- 4) Ölçme sistemi, çevrede bulunabilecek kötü niyetli kişilerin ilgisini çekmiş ve kabloları almak ya da tümüyle kötü niyetle veri toplama sistemi, cihazlar ve güneş panelinin bir ya da birkaçı tahrip edilmiş olabilir.

Daha sonraları yeniden bağlantı kurulmuş ve cihazın elektrik yüklemesi sebebiyle çalışamaz duruma geldiği anlaşılmıştır. Program yeniden yüklenerek çalışır hale getirilen veri toplama sistemi ölçüm almaya devam etmiştir.

- d. Rüzgar hızı ve yönünün izlenmesi: Rüzgar hızı ve yönünü ölçmek için kap tipi anometre satın alınmış fakat hava şartlarının uygun olmaması sebebiyle araziye takılamamıştır. Bahar aylarında rüzgar ölçüm aletinin anıt bölgesine montajı tamamlanmış ve rüzgar hızı okumaları alınmaya başlanmıştır. Bölgeden ölçülecek rüzgar hız ve yönünün, anıtların maruz kaldığı rüzgar yükünün, kar birikintilerinin taşınma yönünün, anıtların kuruma ve malzeme bozulma mekanizmalarının araştırılmasına ışık tutacaktır. Rüzgar yön ve şiddet ölçümü bilgileri anıtlara etkileyen rüzgar yükü hesabında kullanılmıştır. Alanda 3,5 yıl içinde ölçülen en yüksek rüzgar hızı 114 km/saattir.
- e. Kar yüksekliğinin izlenmesi: Nemrut Dağı'nın anıtların bulunduğu üst kısmının çok zor kış koşullarına sahip olduğu ve kışın tamamen kar altında kaldığı bilinmektedir. Yapılacak olan malzeme çalışmalarında kullanılmak üzere, anıtların ne kadarlık

kısının karın içinde kaldığı öğrenilmek istenmektedir. Bu amaçla lazer ve ultrasonik mesafe ölçerler araştırılmıştır. Fakat uygulama alanının kablolama ve direk tikilmesine müsait olmaması sebebiyle kar yüksekliği ölçümü yapılmamış, bölgedeki kar yüksekli ve dağılımı durumu zaman zaman askeri helikopterle ya da yerden kayaçlar tarafından çekilen bölge fotoğrafları kullanılarak yapılmıştır.

- f. Çatlak genişliği ölçümü: Halihazırda bulunan çatlakların açılıp açılmadığının yaygın olarak uygulanan kontrolü, çatlağın iki tarafına epoksi ile sabitlenecek ince bir cam bağlamaktır. Çatlak açıldığı ya da kapandığı zaman cam kırılacak ve çatlağın genişlediği anlaşılacaktır. Fakat bu yöntem ancak çok basit fikir vermek için kullanılabilir ve sağladığı bilgi çok kısıtlıdır. Çatlak genişliği manuel yöntemlerle de ölçülebilir fakat bu ölçümler sürekli olamayacağı, (örneğin birkaç ay aralıklarla) ve ölçümlerde çevre koşulları değişimi tam olarak göz önüne alınamayacağı için yine kısıtlı veri sağlayacaktır. Elektronik cihazlar ile düzenli aralıklarla (örneğin saatte bir) çatlak genişliği ölçümü ve buna ek olarak her çatlak ölçümü alındığında çevre sıcaklığının da okunması, gün içindeki ve mevsimsel değişimleri ve sıcaklığa bağlı çatlak genişliği ilişkisini de ortaya çıkartacaktır. Haftalar aylar içinde gözlemlenen değişimler, çatlak genişliğinin belirli bir sabit değer etrafında ya da devamlı olarak azalan-artan değişimler gösterdiğini ortaya çıkartacaktır. Uzun süreli izlemeler için okumalarda stabilite ve hassasiyet için titreşen telli çatlakmetrelerin daha uygun olabileceği değerlendirilmektedir.
- g. Yapı tekniğinin belirlenmesi: Tahribatsız yöntemlerin önemi her geçen gün daha da takdir edilmekte ve kullanım alanları gittikçe genişlemektedir. Bunlardan biri olan georadar (ground penetrating radar – GPR) da son yıllarda arkeoloji ve koruma çalışmalarında çok yönlü şekilde yaygınca kullanılan bir araçtır. İnşaat mühendisliğinde daha çok zemin durumu ve yeri belli olmayan gömülü boru yeri tespiti gibi işlerde kullanılmaktadır. Georadar'ın, Nemrut'ta anıtların gövdelerini teşkil eden taş blokların aralarında metal kenet bulunup bulunmadığına cevap vermek için kullanılması düşünülmüş, fakat gözlemsel olarak tespit edilebildiği için uygulanmamıştır. Ancak, GPR verilerinin analiz edilmesi uzmanlık gerektiren karmaşıklıkta olduğu için, georadar cihazı satın alımı yerine ölçüm hizmeti veren firmalardan hizmet alımı yapmak daha uygun görünmektedir.

- h. Yapı malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi: Bir yapıyı/anıtı oluşturan malzemenin elastik modülü, basınç dayanımı gibi belli mekanik özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle belirlenmesi mümkündür. Ultrasonik ölçüm bu konuda çok yaygın bir kullanım alanı bulmuş olan tahribatsız yöntemlerden biridir. Buna göre, uzunluğu belli olan bir kesitin, belli bir hıza sahip olan dalga tarafından ne kadar zamanda kat edildiği ölçülerek, buna bağlı bir dönüşüm formülü aracılığıyla malzemenin elastisite modülü hesaplanabilir (Daha sonra, belli varsayımlarla basınç dayanımı tahmin edilebilir). Malzemenin bozunmamış orijinal halinin de elde bulunması halinde, esneklik modülündeki düşme değeri ile malzemenin bozunmuşluk oranı hakkında da fikir sahibi olunabilir.

Yapısal sağlık izleme, kısaca, yapıların devam eden servis performansının devamlı ya da düzenli olarak izlenmesidir. Bu amaçla, ihtiyaç duyulan bilgi, bütçe ve insan kaynaklarına bağlı şekilde değişecek biçimde, sağlık durumu hakkında doğrudan ya da dolaylı şekilde fikir verecek bazı parametrelerin ölçülmesi gerekmektedir.

Önceden satın alımı ve birleştirilerek çalıştırılması işlemi başarıyla tamamlana CR1000 veri toplama sistemi ve sıcaklık-nem sensörü Adıyaman ili sınırları içinde bulunan Nemrut anıtları bölgesine kurulmuştur. Cihazlar, ODTÜ Mimarlık bölümü öğretim üyeleri tarafından yürütülen Nemrut Projesi, müzeler ve anıtlar kurulu ile Adıyaman müzeler müdürlüğünden izin alınarak 2150 m yükseklikte bulunan, telefon ve elektrik bulunmayan anıtlar bölgesine bekçi kulübesine kurulmuştur. Kış boyunca okuma alması beklenen okuma sistemine takılan GSM modülü sayesinde uzaktan iletişim imkanı elde edilmiştir. Veri toplamak için kış aylarında çıkılması mümkün olmayan, diğer zamanlarda ulaşımın çok güç olduğu bölge ile kablosuz iletişim kurulması, daha sonra veri toplama cihazlarının takılması muhtemel uzak, elektrik ve telefon bulunmayan (örneğin köprü ve tarihi anıtlar gibi) yerlere aynı sistemin kurulabilecek olması memnuniyet vericidir.

Nemrut Tümülüs bölgesinde bulunan iklim şartlarının bilinmesi, anıtların yapısal ve malzeme durumlarının zaman içinde değişiminin anıt bölgesinde iklimsel değişimler ile ilişkilendirilmesi bakımında önem taşımaktadır. Nem ve sıcaklık bilgilerinin sürekli okunabilmesi için genişleyerek ek ölçüm aletlerinin takılmasına müsait bir veri toplama sisteminin araziye takılma işlemi 18 - 20 Eylül 2006 tarihleri arasında Yard. Doç. Dr. Ahmet Türer tarafından yapılmıştır. Veri toplama sistemine takılan 2 adet nem ve sıcaklık ölçer cihazları 10'ar dakika ara ile veri toplamaktadırlar. Aynı veri toplama sistemine 2007 yılı

ilkbahar aylarında ikinci bir ziyarette bulunarak rüzgar şiddeti ve yönünü ölçer cihazı eklenmiştir.

18 - 20 Eylül 2006 tarihleri arasında tümülüsün Kuzey-Doğu istikametinde bulunan bekçi kulübesinin Kuzey-Doğu köşesine 4 metre uzunluğunda bir çelik boru monte edilmiş ve boru üzerine 2'şer adet sıcaklık ve nem ölçer monte edilmiştir. Cihazların kabloları karavanın içine konumlandırılan veri toplama sistemine bağlanmıştır. Aynı boru üzerine kaynatılan köşebent bir eleman üzerine sistemi besleyen bir güneş paneli monte edilmiştir; böylelikle sahada bulunan fakat aralıklarla ve kış aylarında tümüyle kesilen elektrik sisteminden bağımsız, gündüzleri veri toplama sistemine bağlı aküyü şarj eden ve güneş battıktan sonra aküden elektrik sağlayan, kendine yeter bir veri toplama sistemi kurulmuştur. Veri toplama sistemine eklenen GSM kablosuz modem ve data hattı ile ODTÜ'den bağlantı kurulması ve veriyi uzaktan toplama özelliği sağlanmıştır. Veri toplama sisteminin cihazları okuması ve verileri kaydetmesi için programlama işlemi tamamlanmıştır. Veri toplama sisteminin tümünü oluşturan parçalar aşağıda özetlenmektedir:

1. CR1000 veri toplama sistemi
2. güneş paneli
3. güneş paneli şarj adaptör ünitesi
4. 12 V kuru akü
5. veri toplama sistemi için GSM data modem ve anteni
6. Türkcell data hattı çipi
7. ölçme sistemi muhafaza kutusu
8. 2 adet sıcaklık ve nem ölçme sensörü
9. sıcaklık ve nem sensörleri için dış şartlar koruma parçaları
10. 70 m ölçüm cihazı özel uzatma kablosu

Yukarıda listelenen cihazların montajı esnasında sahada hazır bulunan ve çalışmaları izleyen müzeler mensubu saha görevlisi Osman bey'e, cihazların koruması ve sorumluluğu Müzeler Genel Müdürlüğünde olacak şekilde, imzalı tutanak ile teslim edilmiştir. İleriki aşamalarda, deprem titreşimlerini ölçen cihaz takılması ve anıt üzerinde görülen yapısal çatlakların genişliklerindeki değişimlerin izlenmesi gibi eklemeler yapılması da bütçe sınırları içinde çözülemeyeceği için vazgeçilmiştir.

Yapılan incelemeler sırasında çekilen bazı tanımlayıcı fotoğraflar aşağıda verilmektedir:





Şekil 16 - Boruların monte edilmesi



Şekil 17 – İki adet sıcaklık – nem ölçer ile güneş paneli genel görünüm.



Şekil 18 – Bekçi kulübesi içine takılan veri toplama cihazının genel görünümü.

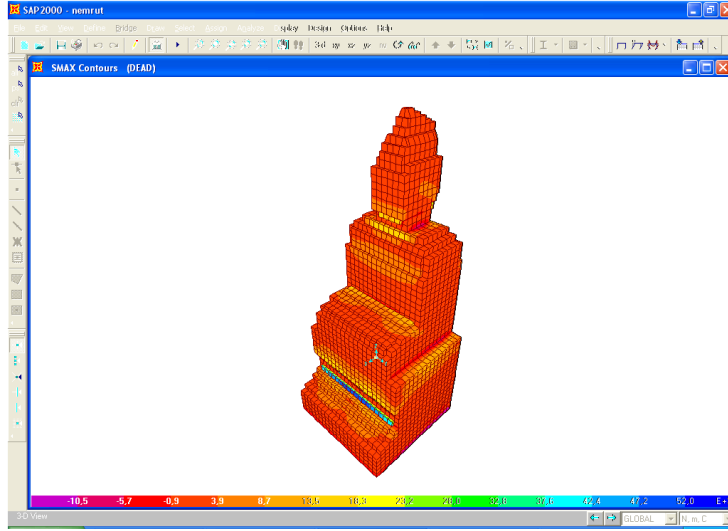
Doğu ve batı terası arasında oluşması muhtemel kar birikimlerinin değerlendirilmesinin yapılabilmesi için monte edilen direğe takılan rüzgar yön ve hız sensörü Şekil 19'de görülmektedir.



Şekil 19 – Rüzgar hız ve yön sensörü montajı ve programlaması

Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar modellemesi ve analizinin yapılması aşamasında (daha sonra kalibreli modele güncellenmek üzere) oluşturulan orijinal model, yaklaşık geometrik boyutlar ve tahmini malzeme özellikleri üzerine kurulmuştur. Bahsi geçen orijinal modelin oluşturulması için kaynaklar arasında bulunan “NEMRUT DAG 2002 PILOT PROJECT AND MOBILIZATION” raporunda verilen tipik Nemrut anıt geometrisi kullanılmıştır. Bu geometri SAP2000 yapısal analiz programında ‘solid’ elemanlar kullanılarak modellenmiştir ve yaklaşık 34000 serbestlik derecesine sahip toplam 9204 solid elemandan oluşan bir model oluşturulmuştur.

Anıtları oluşturan malzemenin kireçtaşı olduğu bilinmektedir. Kireçtaşının malzeme özellikleri üzerine yapılan taramada bulunan değerler Elastisite Modülü 30 GPa ve yoğunluk  $2200\text{kg/m}^3$ , Nemrut anıtlarının binlerce yıldır maruz kaldığı koşullar göz önüne alınarak ve analitik modelde tanımlanmayan derzler göz önünde bulundurularak küçültülmüştür. Buna göre, orijinal modelinde kullanılan değerler  $E$  (Elastisite Modülü) = 20 GPa,  $\gamma$  (Poisson Oranı) = 0.2,  $\rho$  (Yoğunluk) =  $1900\text{ kg/m}^3$  olarak kabul edilmiştir.

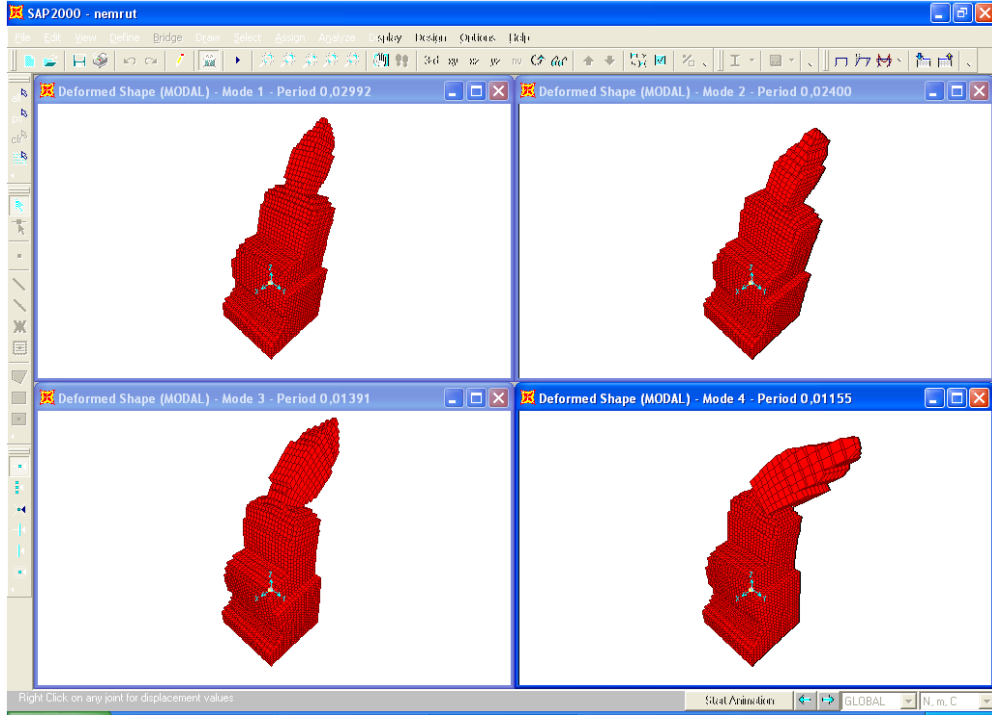


Şekil 20 – Kendi ağırlığı altında yapıda oluşan en yüksek çekme gerilimi dağılımları

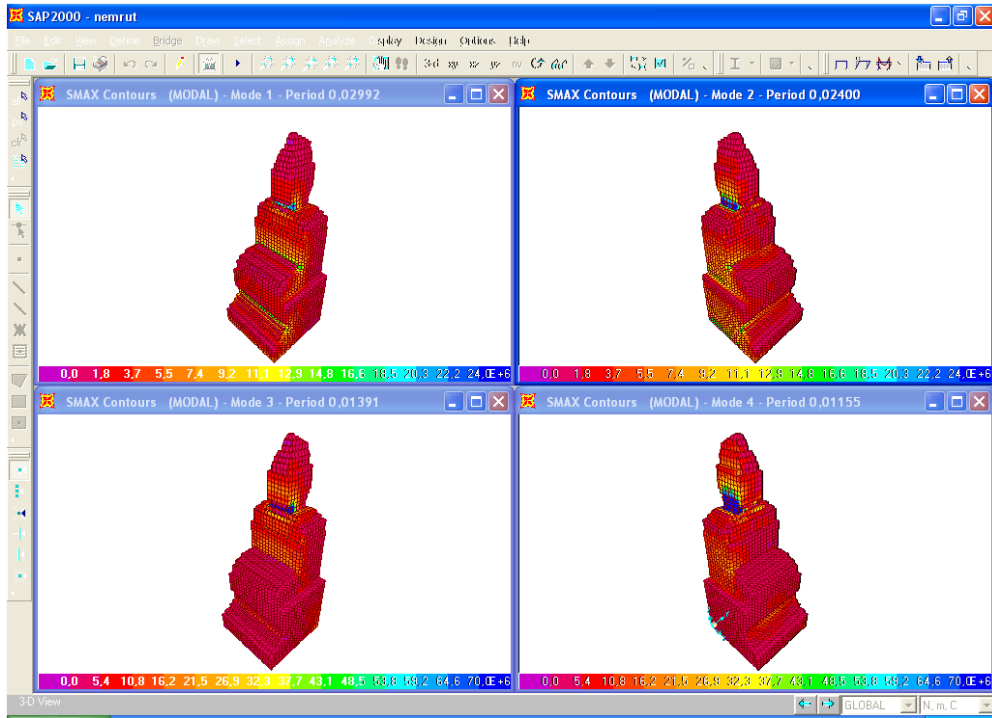
Tablo 5 – Yapılan modal analizin ardından elde edilen 30 moda ait periyot ve frekans değerleri

Modal Periyot ve Frekanslar					
Mod	Periyot	Frekans	Mod	Periyot	Frekans
	sn	devir/sn		sn	devir/sn
1	0,02992	33,42246	16	0,00284	352,11268
2	0,02400	41,66667	17	0,00274	364,96350
3	0,01391	71,89073	18	0,00245	408,16327
4	0,01155	86,58009	19	0,00233	429,18455
5	0,00921	108,57763	20	0,00218	458,71560
6	0,00713	140,25245	21	0,00205	487,80488
7	0,00708	141,24294	22	0,00186	537,63441
8	0,00671	149,03130	23	0,00167	598,80240
9	0,00541	184,84288	24	0,00150	666,66667
10	0,00433	230,94688	25	0,00133	751,87970
11	0,00419	238,66348	26	0,00108	925,92593
12	0,00360	277,77778	27	0,0009017	1109,01630
13	0,00344	290,69767	28	0,0007017	1425,11045
14	0,00300	333,33333	29	0,0004960	2016,12903
15	0,00299	334,44816	30	0,0003257	3070,31010

Modelleme ve malzeme tanımlamasının ardından, modal analiz yapılmış ve ilk 30 moda karşılık gelen periyotlar ve frekans değerleri yukarıda Tablo 5’de gösterildiği gibi bulunmuştur. Aşağıda aynı oranda büyütülmüş ilk dört mod şekli ve ilk dört mod şekline ait göreceli çekme gerilimi dağılımları aşağıda görülmektedir. Her iki grafikte de mod şekilleri ve çekme gerilmelerinin en hareketli ve yüksek olduğu bölgeler kafa-boyun bölgesinde olduğu için Nemrut anıtlarının kafalarının bir depremle gövdelerinden düştüğü yönündeki varsayım güçlenmektedir.



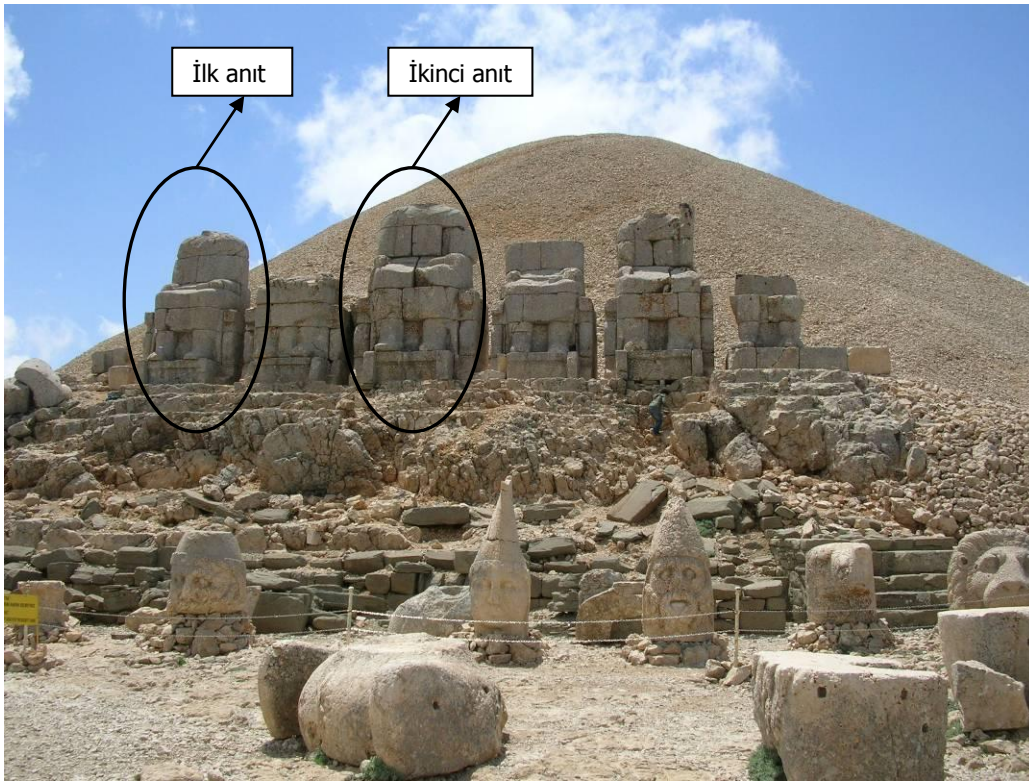
Şekil 21 – İlk dört moda ait deformasyon şekilleri



Şekil 22 – İlk dört mod durumunda ortaya çıkan en yüksek çekme gerilimi dağılımları

SAP2000 modeli ile yapılan ön modelleme çalışması, Nemrut anıtlarının yaklaşık salınım periyod ve frekansları ile mod şekillerini tahmin etmek ve ileride yapılacak dinamik ölçümler ve detaylı modelleme için hazırlık aşamasını oluşturmaktadır.

19 - 21 Mayıs 2007 tarihleri arasında Nemrut anıtlar bölgesine yapılan ziyarette, daha önce oluşturulmuş analitik modelin kalibrasyonunda kullanılmak üzere iki anıtta bir takım dinamik ölçümler alınmıştır. Bu dinamik ölçümlerde MicroStrain'in  $\pm 2g$ 'lik aralığa sahip, üç eksenli G-Link kablosuz ivmeölçerleri kullanılmıştır (Şekil 23, Şekil 24).



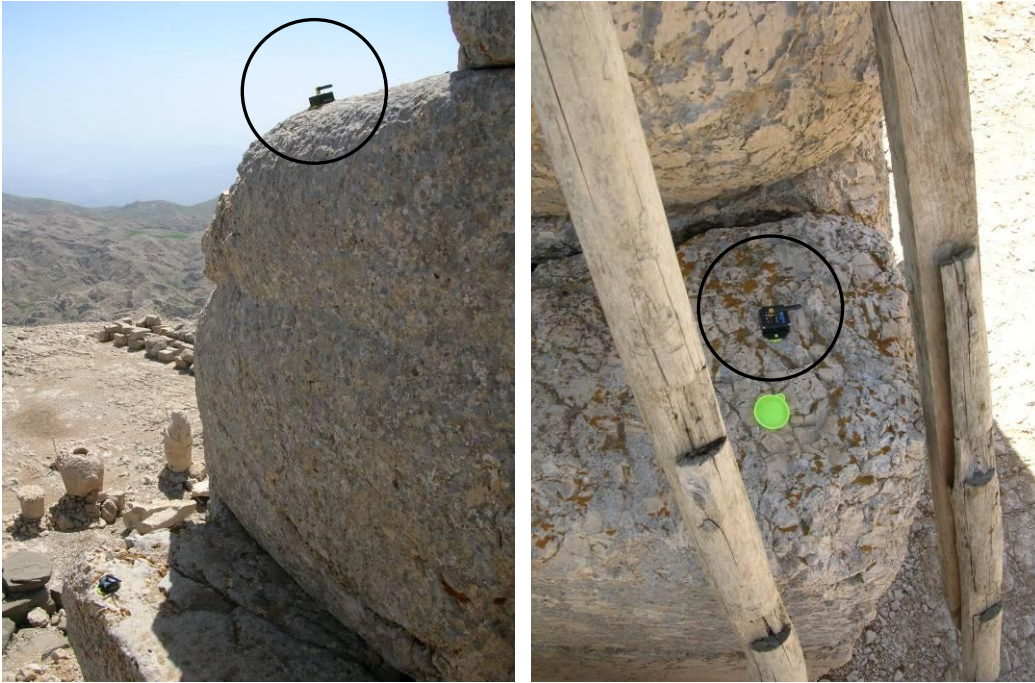
Şekil 23 – Nemrut anıtlar bölgesi, doğu teras



Şekil 24 – G-Link kablosuz ivmeölçer



Şekil 25 – Dinamik ölçümler sırasında kullanılan ivmeölçer



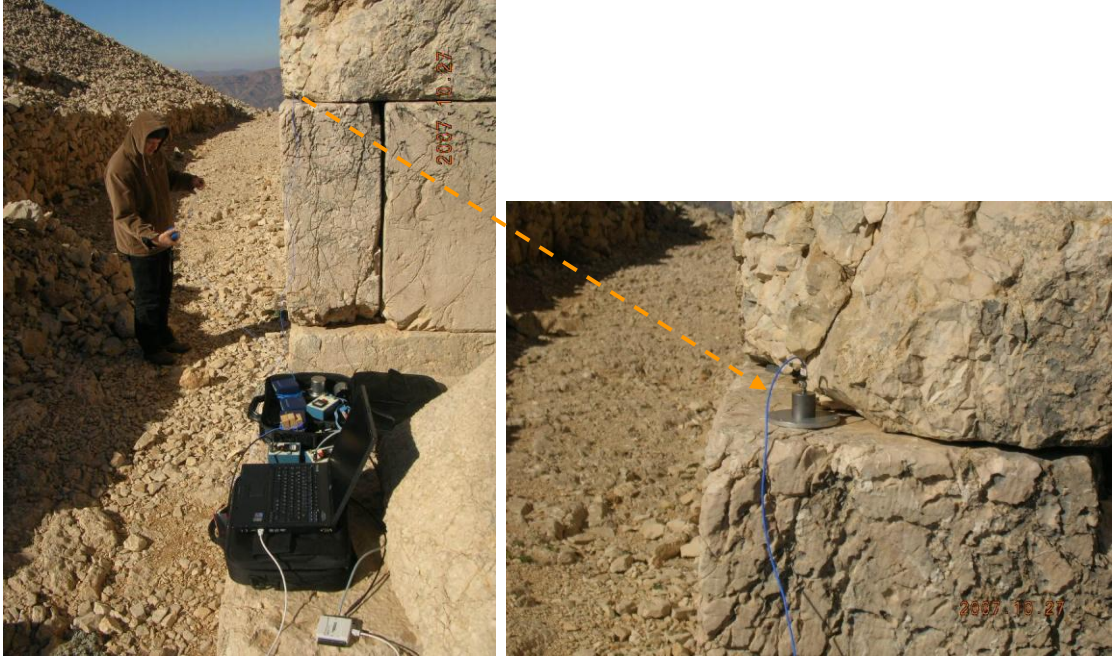
Şekil 26 – Dinamik ölçümler sırasında kullanılan ivmeölçerlerin yerleştirilmesi

Toplanan dinamik verilerin değerlendirilmesi, sensörlerin yüksek gürültü ve düşük çözünürlük problemi sebebiyle yapılamamıştır.

#### Anıtlardan alınan ikinci set dinamik ölçümler

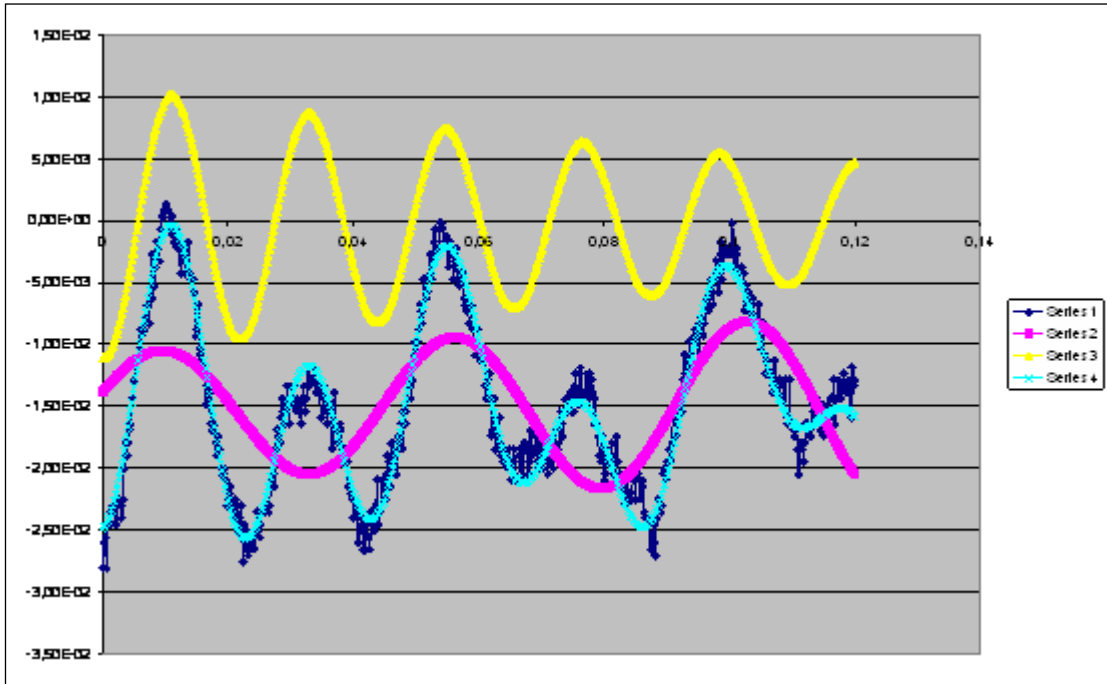
- 2007 yılı ilkbaharında, üç eksenli MEMS tipi ivme ölçerler kullanılarak yapılan dinamik veri okumaları, 2007 yılı sonbaharında farklı tip ivme ölçer sensörler kullanılarak

tekrarlanmıştır. İkinci çalışmada daha az sayıda ve piezoelektrik tip sensör (2 kanal) kullanılarak daha hassas ivme ölçümleri alınmıştır (Şekil 27).



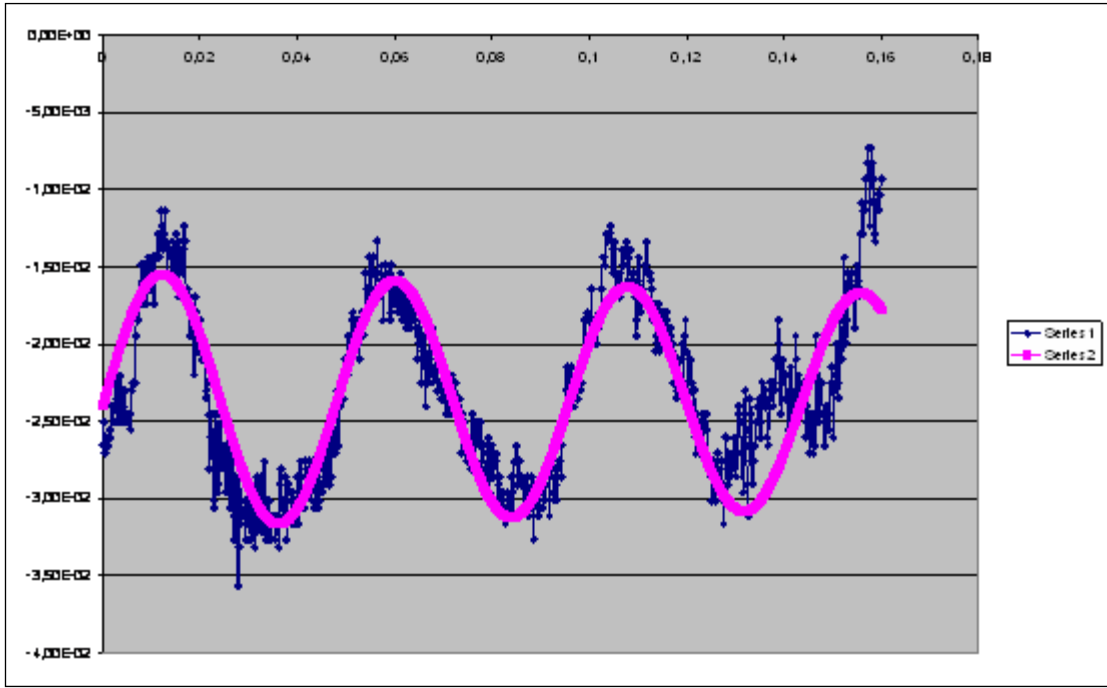
Şekil 27 – Tekrarlanan dinamik ölçümler

- Alınan veriler ARTEMIS yazılımı kullanılarak işlendiğinde, hem düşük hem de yüksek frekanslarda, birbiriyle çelişen doğal salınımlar olduğu tespit edilmiştir (Şekil 28 – Şekil 40).

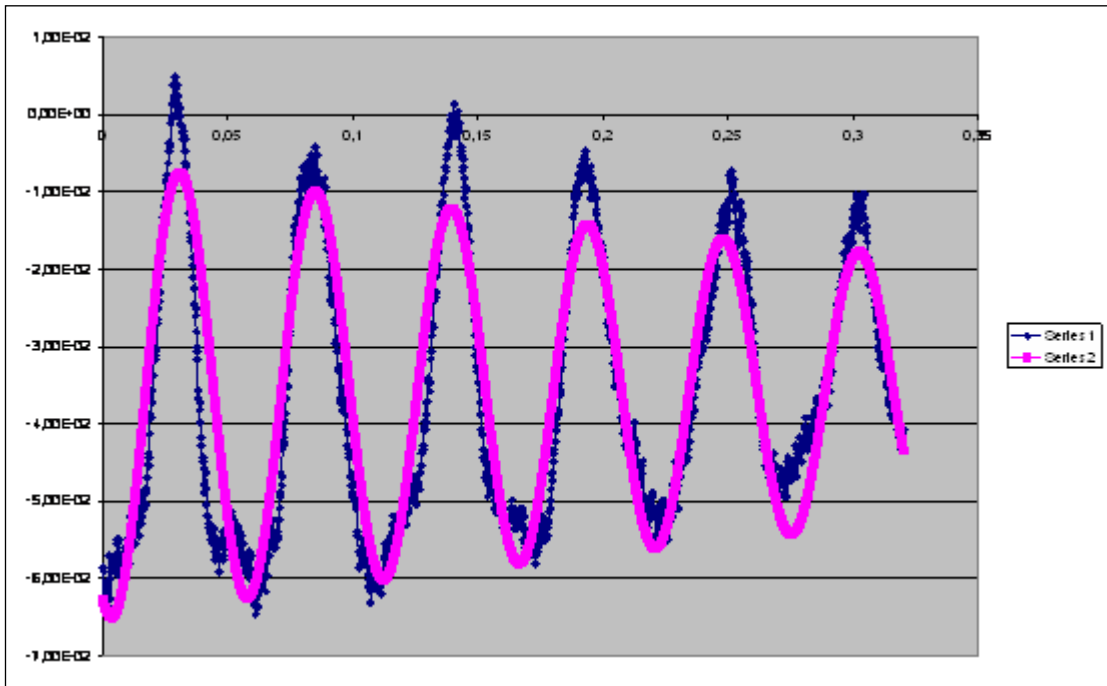


Şekil 28 – x yönü için elde edilen 21 ve 45 Hz'lük üst üste binmiş iki mod

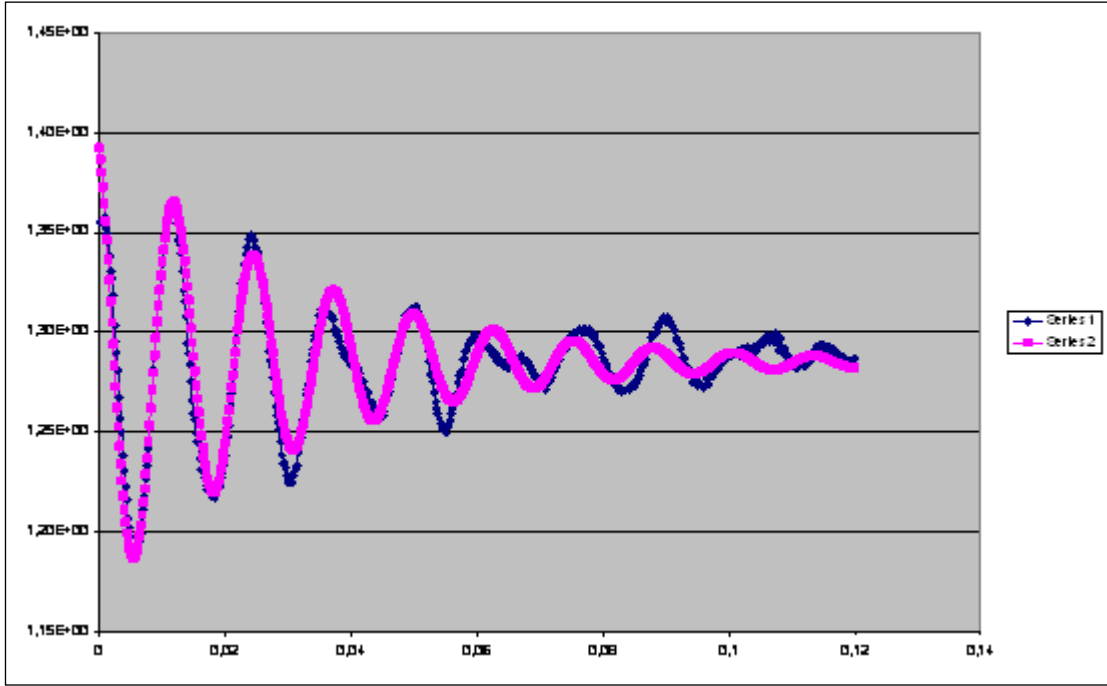




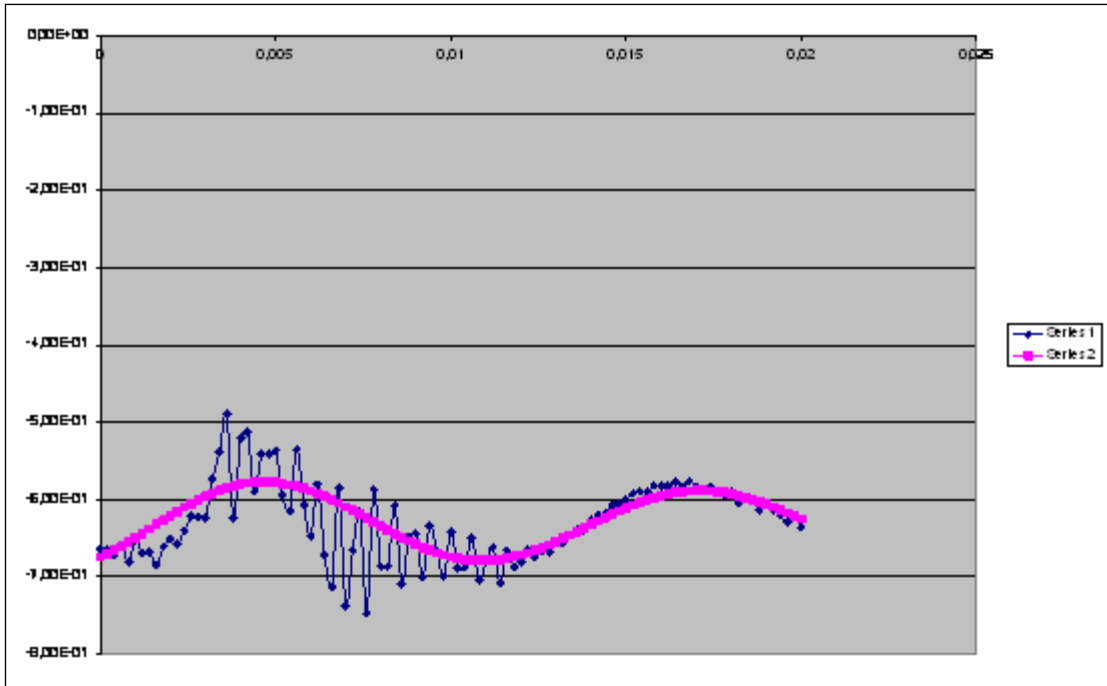
Şekil 29 – x yönü için elde edilen 21 Hz'lük mod



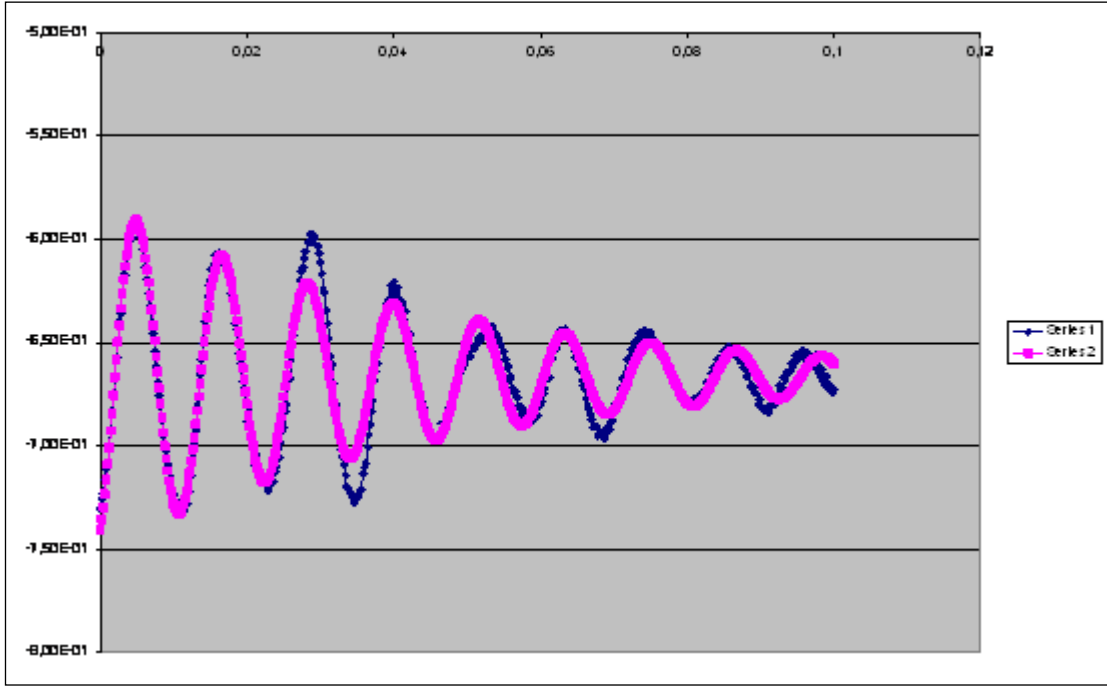
Şekil 30 – x yönü için elde edilen 18 Hz'lük mod



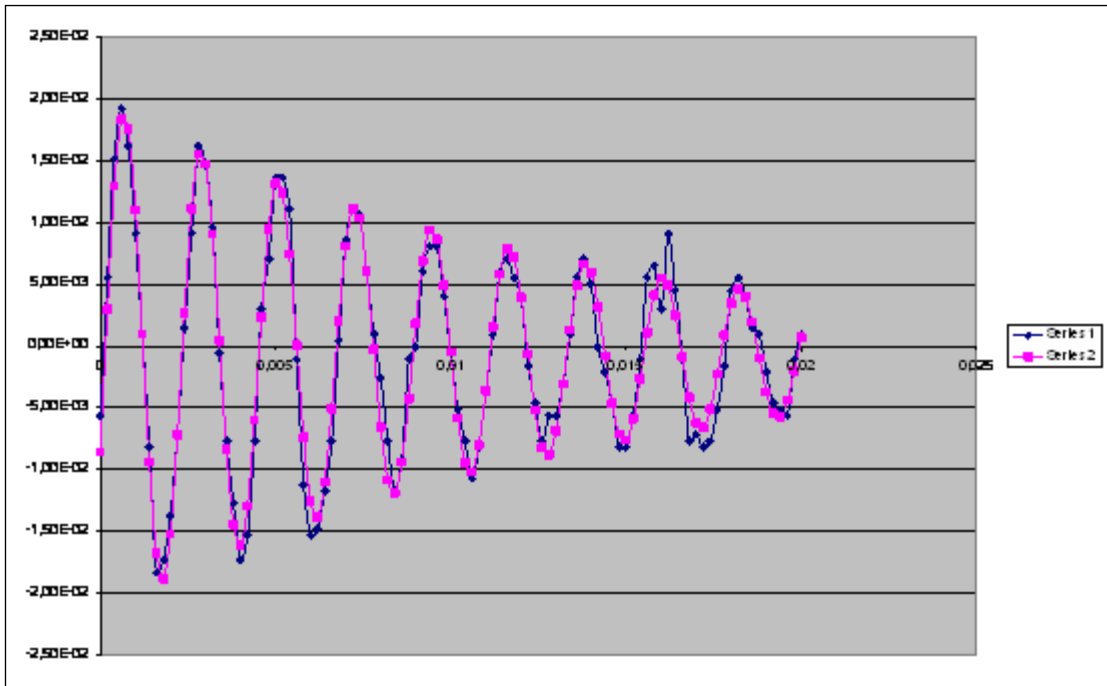
Şekil 31 – x yönü için elde edilen 78 Hz'lük mod



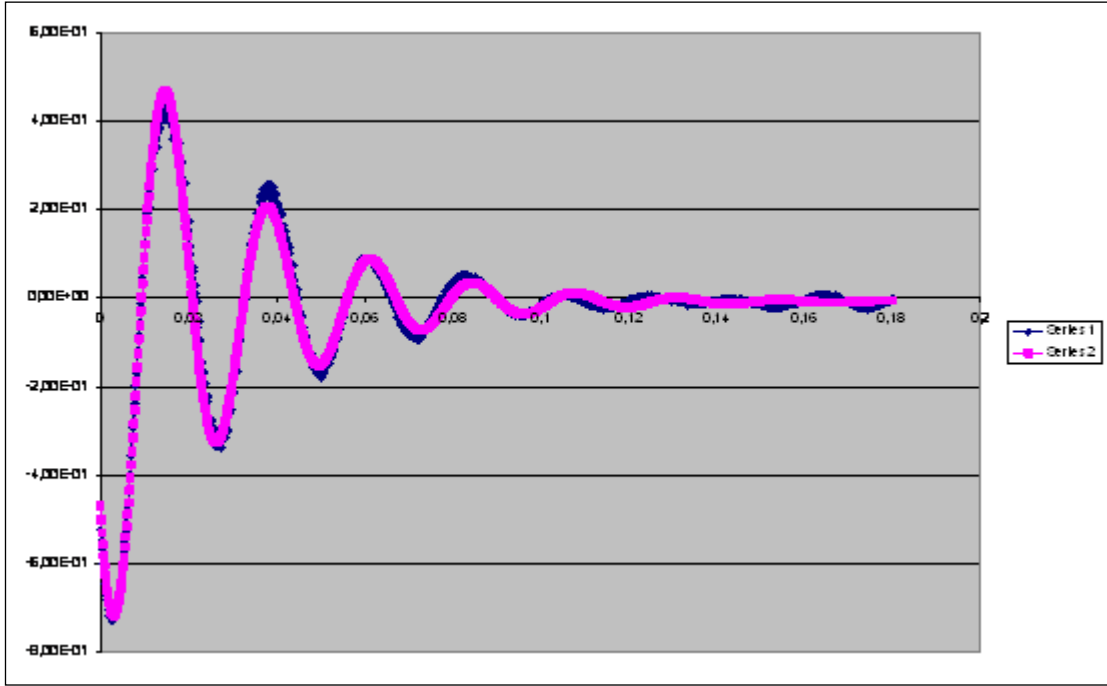
Şekil 32 – x yönü için elde edilen 80 Hz'lük mod



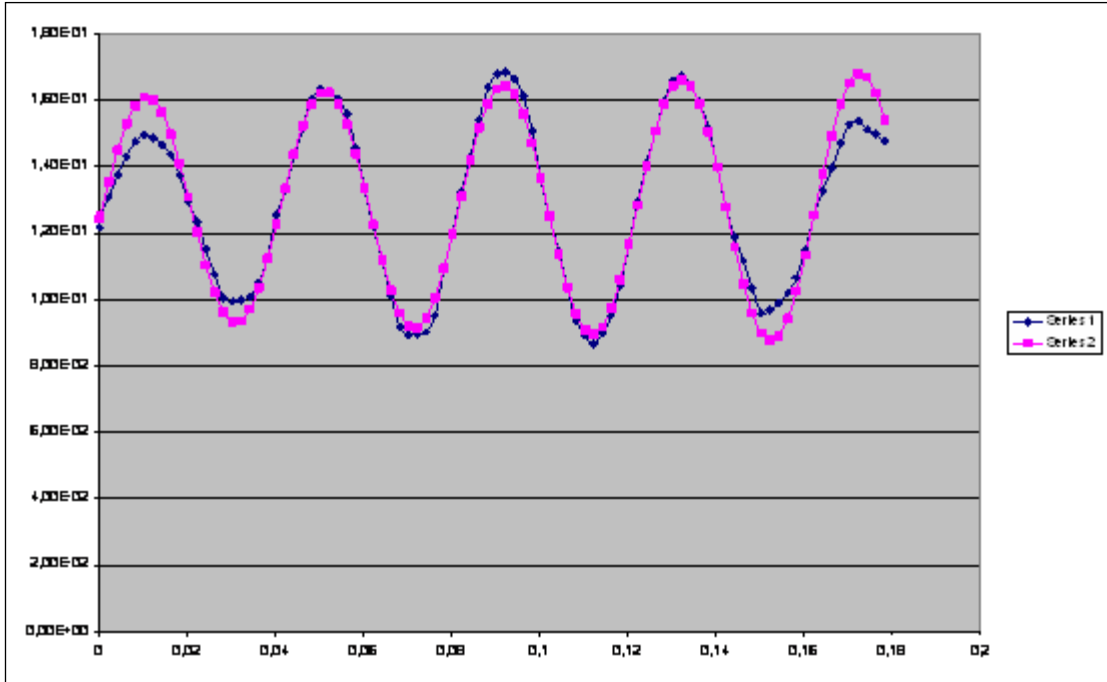
Şekil 33 – x yönü için elde edilen 85 Hz'lük mod



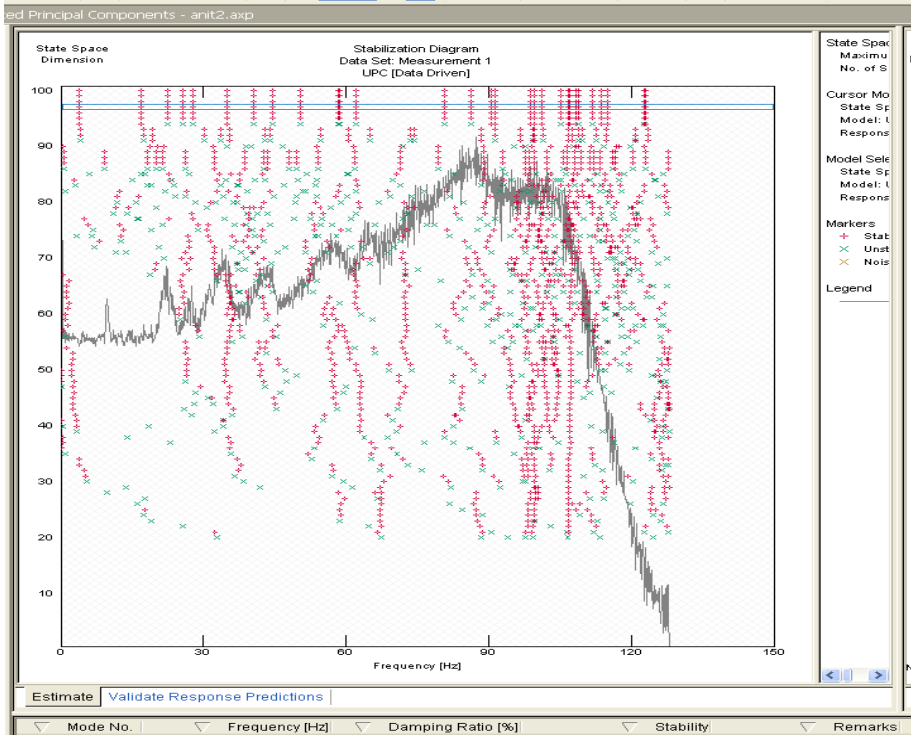
Şekil 34 – x yönü için elde edilen 455 Hz'lük mod



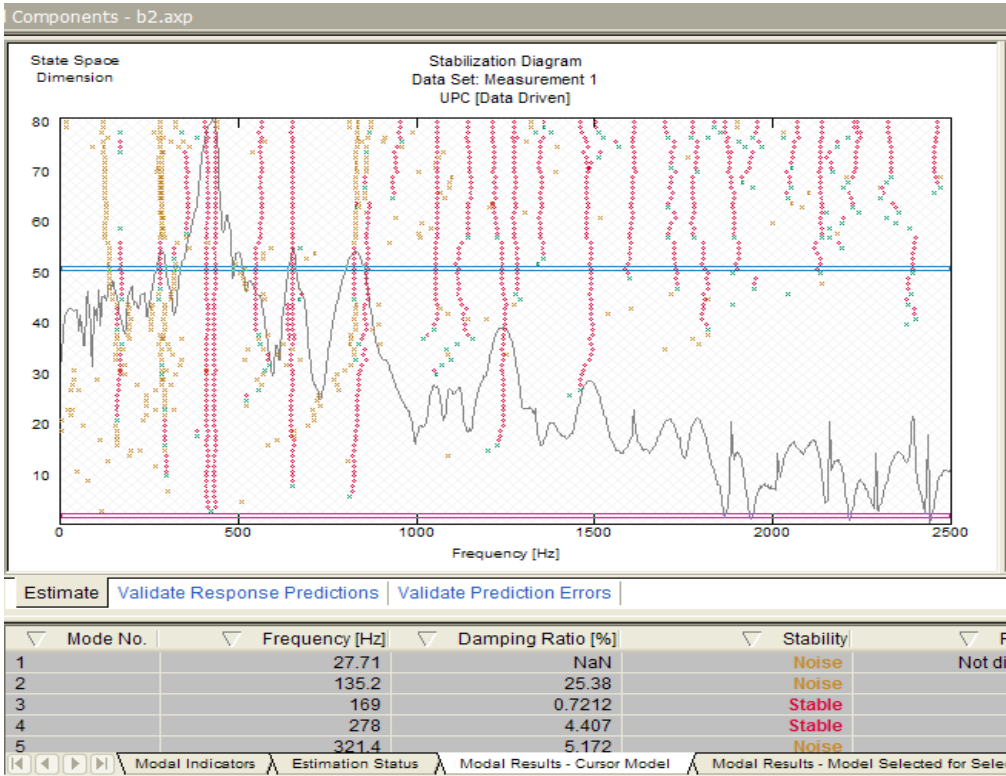
Şekil 35 – y yönü için elde edilen 43 Hz'lük mod



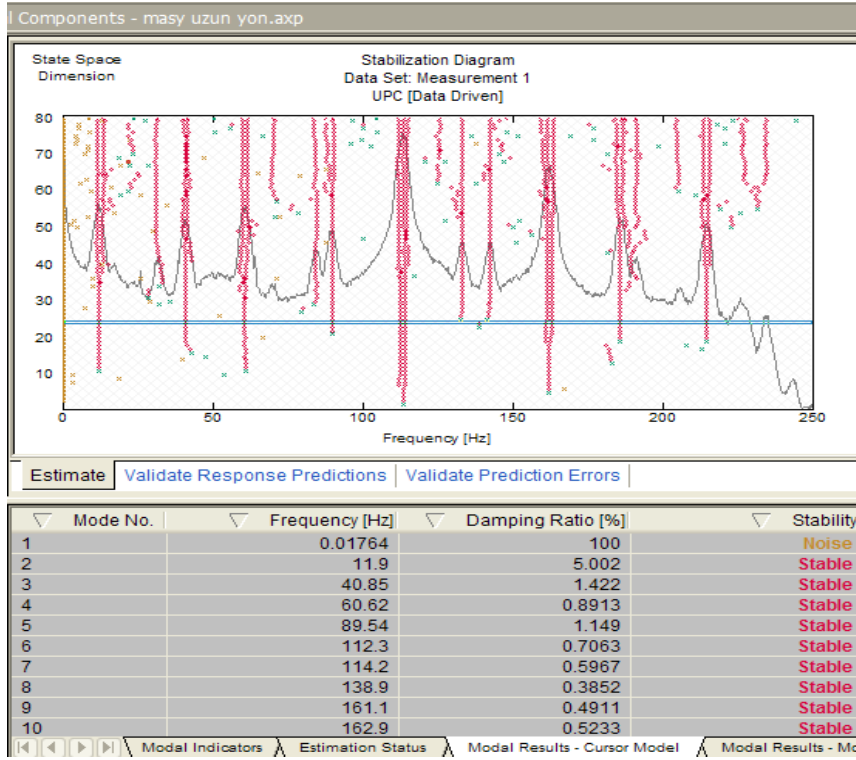
Şekil 36 – z yönü için elde edilen 25 Hz'lük mod



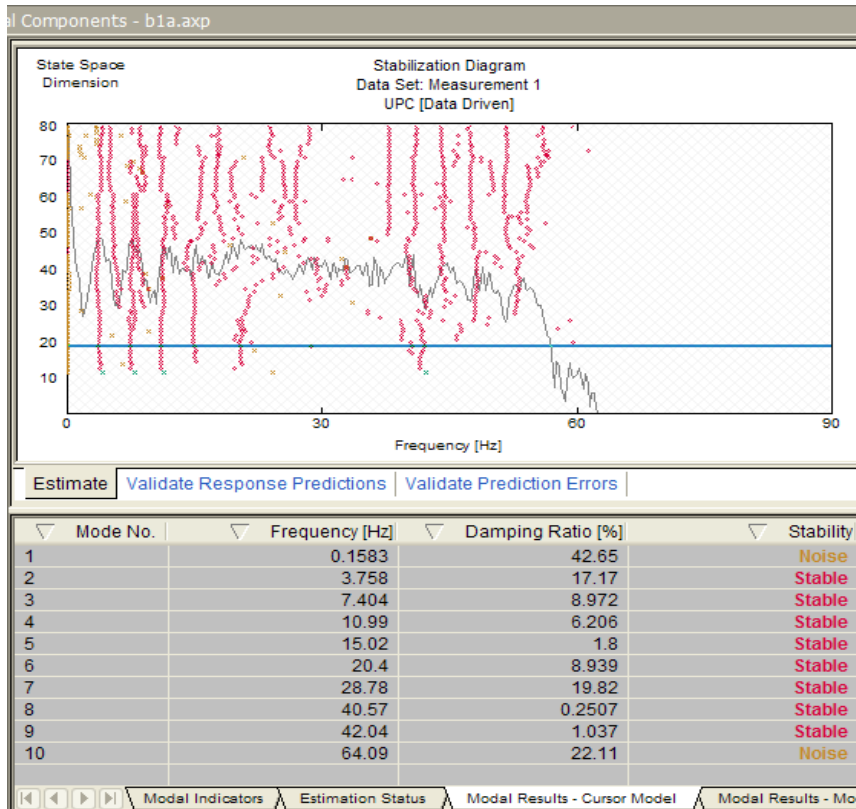
Şekil 37 – Alınan dinamik ölçümler neticesinde elde edilen frekans grafiği (MEMS, 0 – 120 Hz.)



Şekil 38 – Alınan dinamik ölçümlerden elde edilen frekans grafiği (0 – 2500 Hz.)



Şekil 39 – Alınan dinamik ölçümlerden elde edilen frekans grafiği (0 – 250 Hz.)



Şekil 40 – Alınan dinamik ölçümlerden elde edilen frekans grafiği (0 – 50 Hz.)

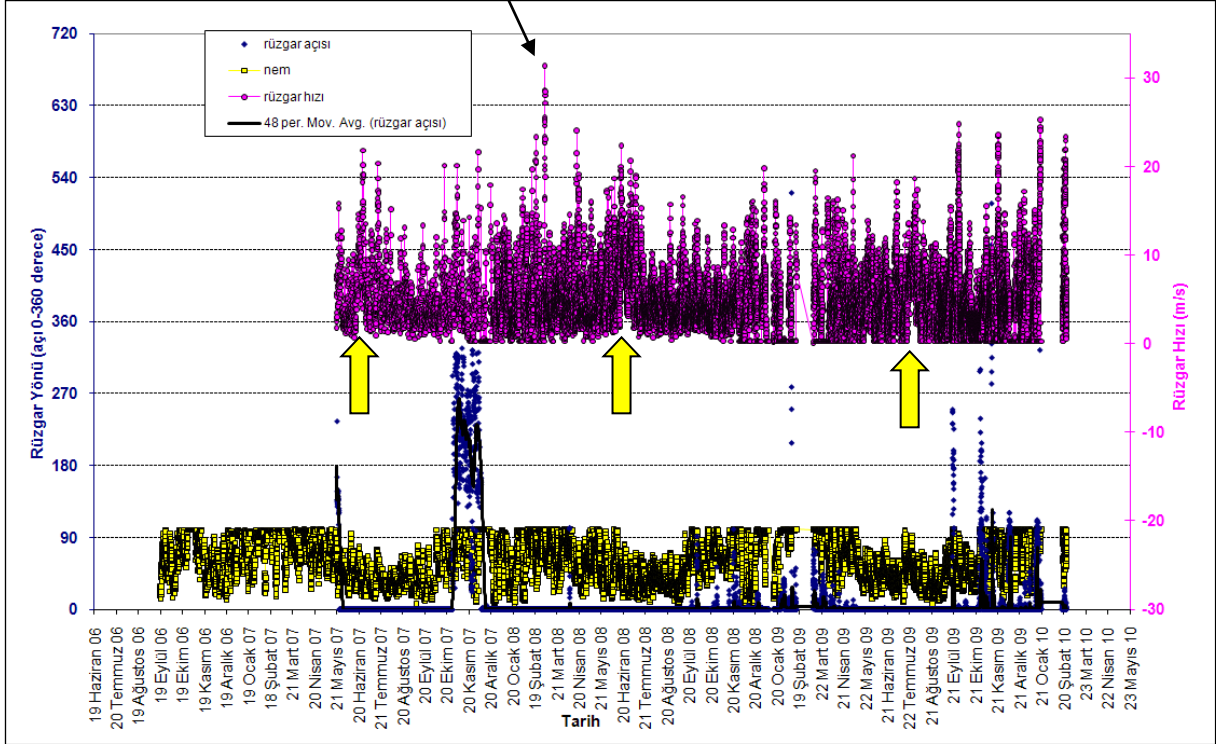
Anıtlar bölgesinde yapılan çevresel sıcaklık, nem ve rüzgar izleme ölçümleri:

Rüzgar hızının hız ve yön sensörü (Şekil 41) kullanılarak izlendiği yaklaşık 3 sene boyunca en fazla rüzgar hızı 31.6 m/s (114 km/s) ile 04/03/2008 tarihinde kaydedilmiştir. Kaydedilen hızlar, her 10 saniyede bir alınan verilerin 10 dakika boyunca ortalamasının alınarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, 114 km/saat hızla esen rüzgar tek veri olmayıp 60 adet verinin ortalaması olduğundan ve tümülüse göre daha alçakta olan sensör sebebiyle, zaman zaman rüzgarın daha hızlı esmiş olması muhtemeldir. Üç yıllık izleme verilerine bakılarak özellikle Haziran – Temmuz aylarında alanın genel olarak rüzgarlı olduğu görülmektedir (Şekil 42).



Şekil 41 – Tamir edilen rüzgar yön sensörünün yeni kuyruğu.

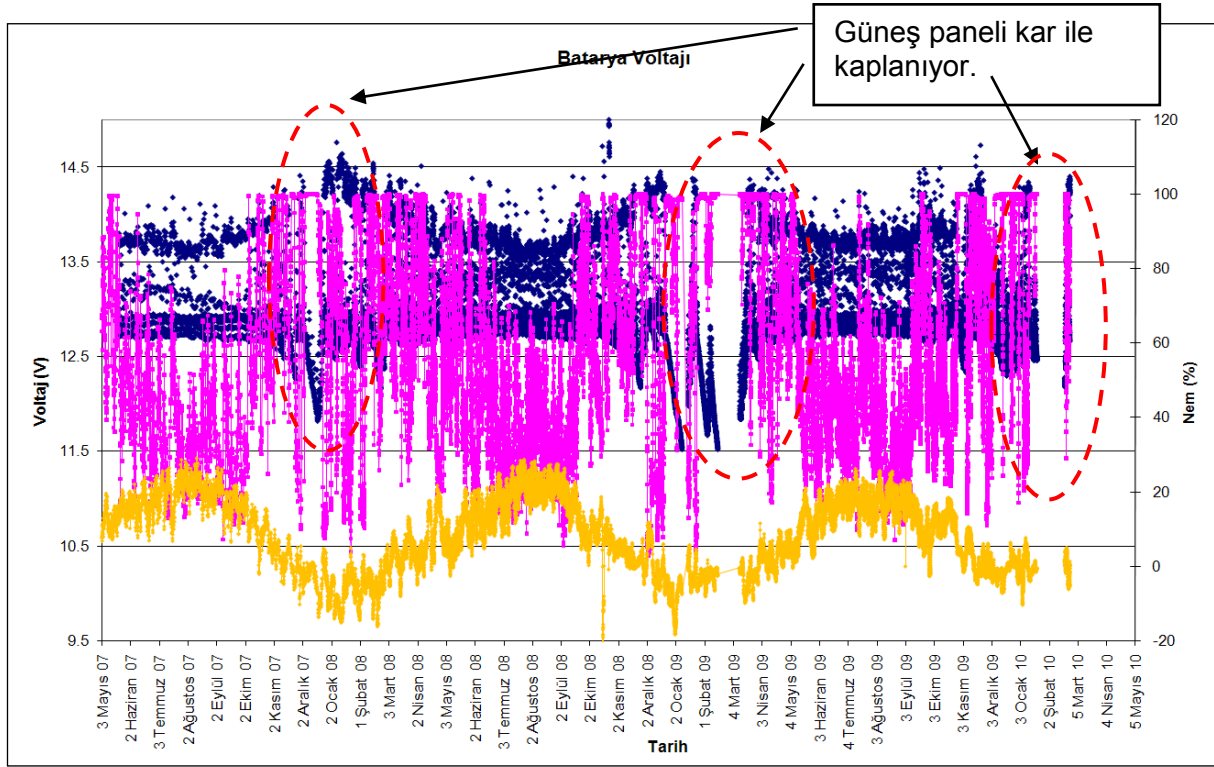
04/03/2008, 31.6 m/s = 114 km/saat



Şekil 42 – 12 Mayıs 2007 – 24 Şubat 2010 tarihleri arası rüzgar yön ve hız grafiği

Veri toplama cihazına bağlı olan batarya gece güneş ışığının olmadığı zamanlarda veri toplama sistemini ve sensörleri besleyerek sistemin çalışmasını sağlamaktadır. Gündüzleri ise güneş paneli sayesinde akü şarj edilmektedir. Şekil 43'de Nisan 2007'den itibaren toplanan akü voltajı görülmektedir. Akü voltajının düştüğü zamanlarda nem oranının da yüksek olması, güneş panelinin bulutlu, yağışlı, karlı havalarda yeterince aküyü şarj edemediğini düşündürmektedir.





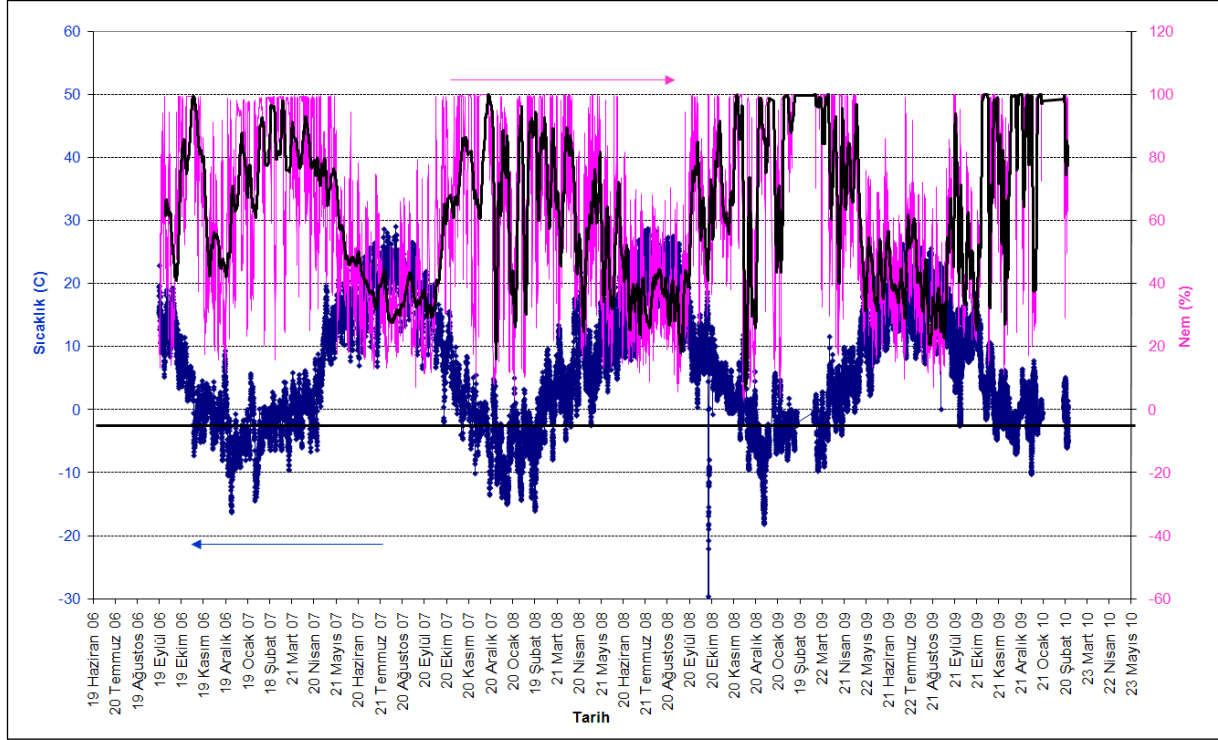
Şekil 43 – 28 Nisan 2007 – 24 Şubat 2010 tarihleri arası batarya voltajı, nem ve sıcaklık grafiği

Aynı grafikte görülen ani voltaj iniş ve çıkışları, günlük şarj ve gece tüketim döngüleri sebebiyledir. Oysa, çevre sıcaklığının sıfır dereceye yaklaştığı Kasım ayı ortalarından itibaren, özellikle Aralık ayı içinde günlük şarj döngüsünde problem yaşandığı görülmektedir. 2009 yılı Ocak – Mart ayları arasında önemli bir süre batarya şarj edilememiştir. Şekil 44'de kırmızı tonla gösterilen nem oranı, bu süre zarfında %100 seviyelerinde kalmakta ve yoğun kar yağışı aldığını düşündürmektedir. Aralık ayının başından üçüncü çeyreğin (haftanın) sonuna kadar akü voltajındaki sürekli düşüş, güneş panelinin ön yüzünün kar ile kaplandığını ya da çatıda biriken kar altında kaldığını düşündürmektedir.

Bununla birlikte, kış aylarında akünün şarj olamadığı süre dışında, gündüzleri şarj voltajının (yaz ayları normal olan 13,5 – 14 Volt bandının dışına çıkarak) 14 - 14,5 Volt aralığında seyretmesinin, etrafın beyaz kar ile kaplı olması nedeniyle güneş ışınlarının yansımakta ve çok parlak-kuvvetli olarak güneş paneline vurması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Kar örtüsünün olmadığı aylarında, gündüz akü voltajının 13,5 – 14 V aralığında seyrettiği görülmektedir.

Anıtlar bölgesine monte edilmiş olan sıcaklık ve nem sensörleri üzerinden sürekli izleme yapılmasına devam edilmiştir (Şekil 44). 2006 yılı sonbaharından itibaren her yılın Nisan ve Kasım ayları arasında nem oranının genellikle %70 oranının altında olduğu, Kasım ayından bir

sonraki Nisan ayına kadar geçen dönemde ise nem oranının genellikle %70'den daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sebeple yılın 6 ayı (Kasım – Nisan arası) anıtlar bölgesinin sürekli nemli ve yağışlı olduğu düşünülmektedir. Yazın özellikle Haziran – Eylül ayları arasında, havadaki nem oranının %40 seviyesinde devam ettiği ve oldukça kuru olduğu görülmektedir.



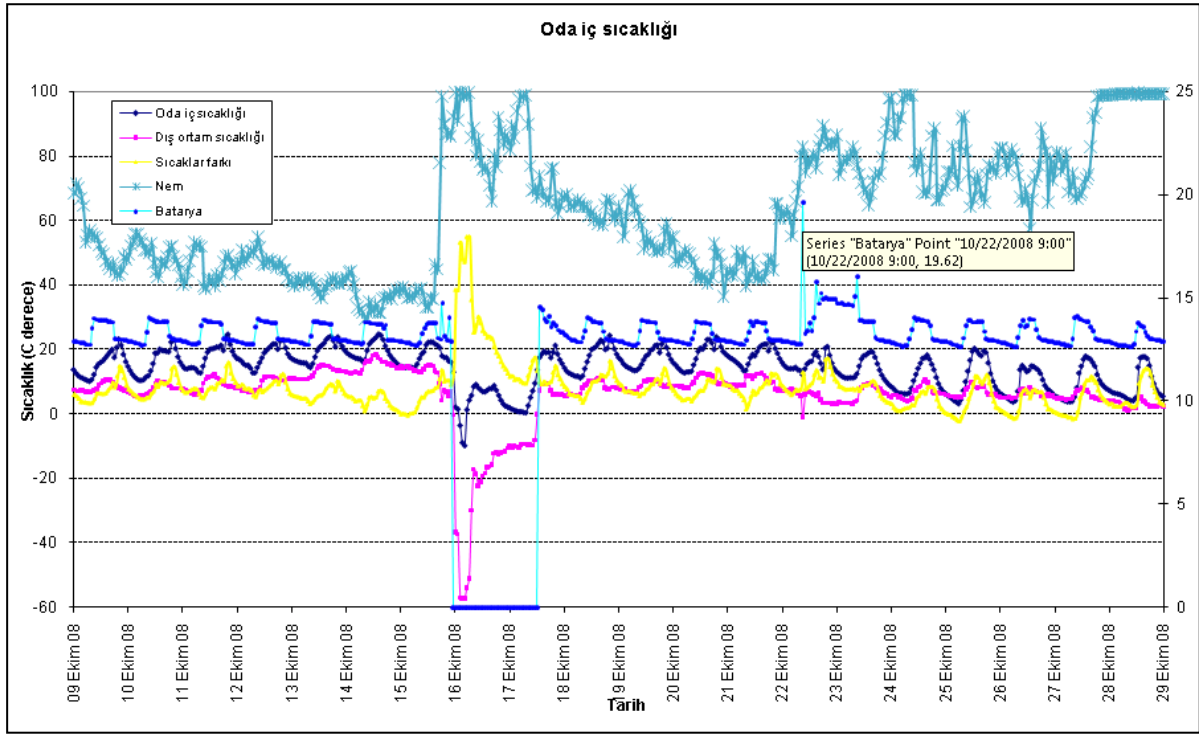
Şekil 44 – 19 Ağustos 2006 - 24 Şubat 2010 tarihleri arası gözlemlenen sıcaklık - nem grafikleri

Nemrut anıtlar bölgesinde sıcaklığın hep  $-10\text{ C}^{\circ}$  ile  $30\text{ C}^{\circ}$  aralığında olduğu ve seyrek aralıklarla  $-15\text{C}^{\circ}$  seviyesine indiği görülmektedir.

Veri toplama sistemi tarafından 16 – 17 Ekim 2008 tarihleri arasında tespit edilen garip olay sırasında (Şekil 45), hava sıcaklığının 1 günden fazla süre ile  $-55\text{ C}^{\circ}$  civarında ve çok düşük olduğu görülmektedir. Sadece dış ortam sıcaklığı değil, aynı zamanda kulübe içinde ve kapalı kutu ile muhafazalı bulunan veri toplama sisteminin içindeki sıcaklık sensörü de birkaç gün öncesi ve sonrasında  $10\text{ C}^{\circ}$ 'nin altına düşmezken bu iki gün süresince  $-10\text{ C}^{\circ}$ 'ye kadar indiği görülmektedir. Bu garip olayın fiziksel hava şartları değişimi ile açıklanamayacağı için, kulübede bulunan elektrik kaçağı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Yeni rüzgar yön sensörü takılma çalışmaları sırasında yürütücü Dr. Ahmet Türer'i elektrik çarpması sonrasında veri toplama sisteminin kısa süreli olarak  $-20\text{ C}^{\circ}$  civarında okumalar aldığı görülmüştür. Bu okumaların olduğu esnada, batarya voltajının okunamadığı da görülmektedir. Batarya voltajının tekrar sınırlar içine girerek okunur olduğu zaman ise çok yüksek ve 15 Volt civarında olduğu görülmektedir. Benzer fakat çok kısa bir olayın 22 Ekim

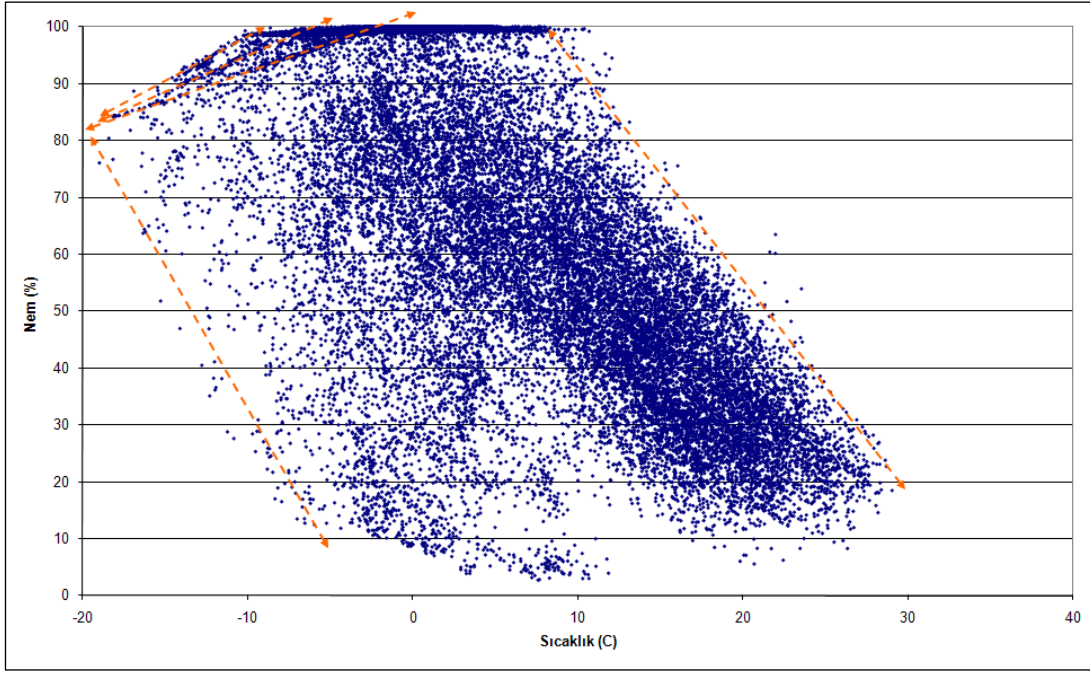
2008’de olduğu, batarya voltajının 13V seviyesinden aniden 20V’a yükseldiği sıcaklığın 5 C° kadar aniden düştüğü, her iki olayda da nem oranında yükselme olduğu görülmektedir.

2-3 Eylül 2009’da sahaya yapılacak ziyaret sırasında, kulübenin metal aksamında bulunan elektrik kaçağı, çarpılma ve sensörün yanması sonucu tespit edilmiştir. Bekçiler ile yapılan söyleşide, kulübe içinde mavi renkli ışıklar oluştuğu, muhtemelen yıldırım düşmesi olaylarının da gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Hem 220V elektrik kaçağı hem de yıldırım düşmesinin ortak neticesi sonucu okumalarda bazı kaymalar oluştuğu tahmin edilmekte, veri toplama sisteminin bu zor şartlar altında çok iyi performans gösterdiği düşünülmektedir.



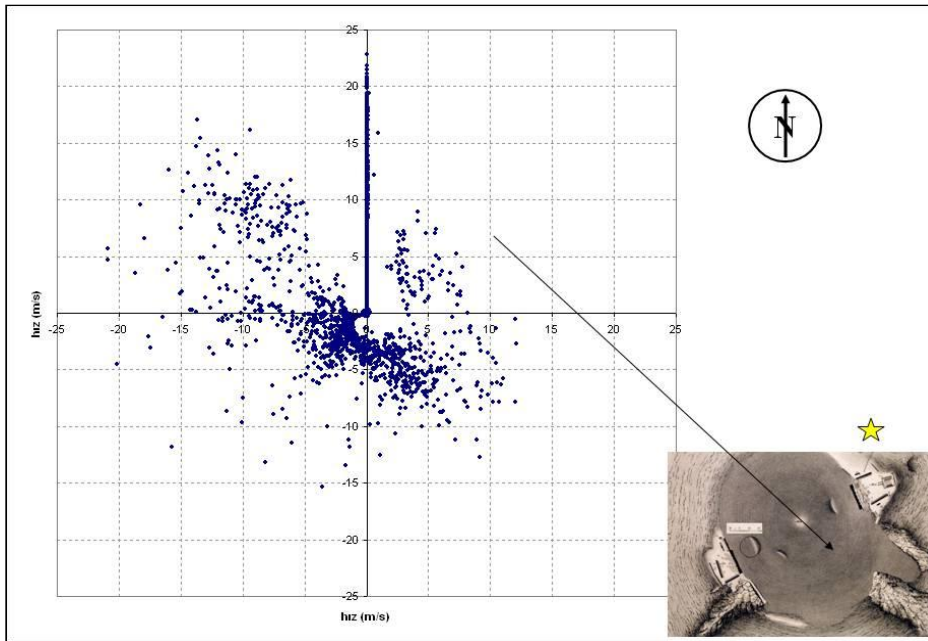
Şekil 45 – 16-17 ve 22 Ekim 2008 tarihlerinde gözlemlenen garip veriler.

Havadaki nem oranı ile ortam sıcaklığının ters ilişkili olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 46); nem yükseldiğinde sıcaklık düşmektedir. Yaklaşık -8C°’den daha soğuk ortam sıcaklığında, havada bulunabilecek en yüksek nem oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 46).



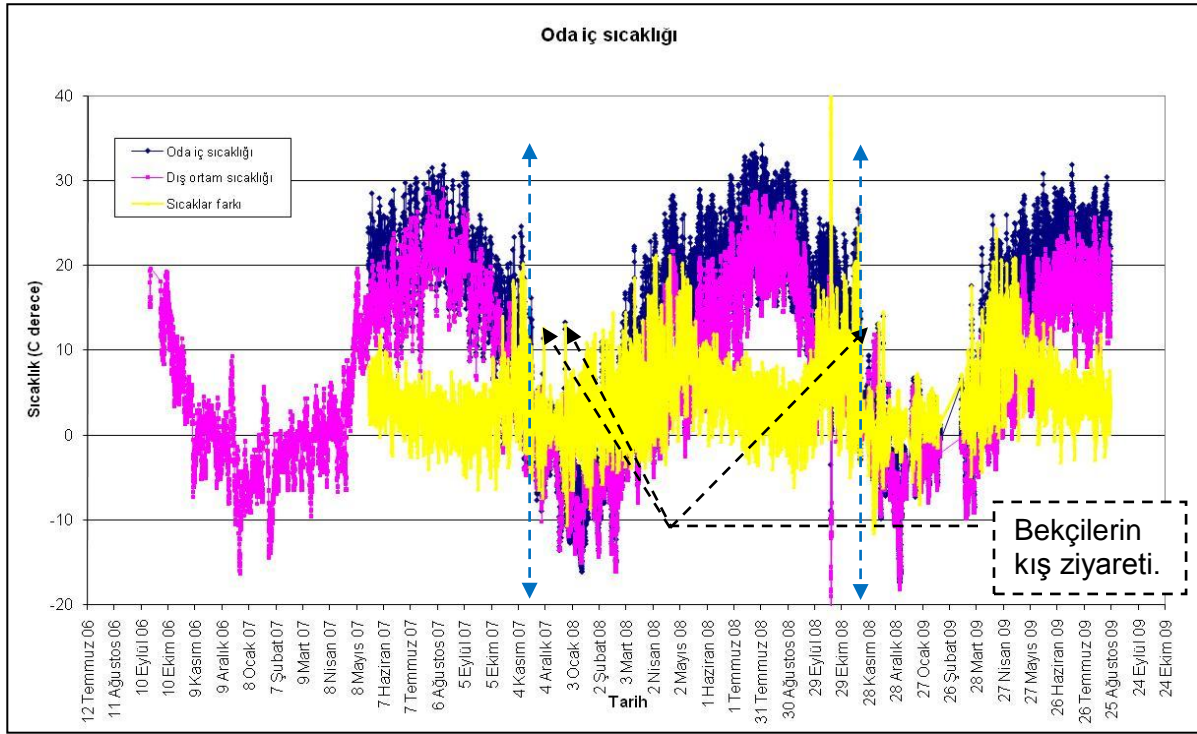
Şekil 46 – 19 Ağustos 2006 – 24 Şubat 2010 tarihleri arası, sıcaklık ve nem ilişkisi grafiği

Rüzgar yön sensörü sürekli arıza yaptığı için yön bilgisi hakkında yeni bilgiler elde edilememiştir. İzleme yapılabildiği üç hafta gibi kısıtlı bir süre zarfında, rüzgarın çoğunlukla Kuzey Batıdan Güney Doğu yönünde estiği görülmüştür (Şekil 47). Alana bir sonraki yapılacak gezi sırasında yeni yön sensörü takılacaktır. Çalışmayan GSM bağlantısı TÜRKCELL ile temasa geçilerek bölgenin kapsama gücünün artırılması sağlanmış ve kablosuz bağlantı yeniden çalışır hale getirilmiştir.



Şekil 47 – 16 Ekim 2007 – 3 Şubat 2008 tarihleri arası (kısmi) rüzgar hız ve yönü grafiği

Nemrut anıtlar bölgesindeki bekçi kulübesine yerleştirilmiş veri toplama sistemi üzerinde sıcaklık sensörü bulunduğu için kulübenin iç ortam sıcaklığı da ölçülebilmektedir. Dış ve iç ortam sıcaklığı grafiği incelenerek kış aylarında bekçilerin kulübeyi ziyaret ettiği günler tahmin edilebilir. Toplanmaya devam edilen sıcaklık verilerinin farklılık gösterdiği zamanlar Şekil 48'de görülmektedir. Kulübenin iç ortam sıcaklığının, mevsim farklılığı gözetmeksizin, dış ortam sıcaklığından yaklaşık 10 derecelik bir sıcaklık bantı içinde değişim gösterdiği görülmektedir. Bu farklılık, sonbahardan kış aylarına geçiş ve kış aylarından ilkbahara geçiş sırasında 20 C°'lik farklar halini almaktadır. İç ve dış ortam arasında artan sıcaklık farkının sebebi, kulübe içinde yakılan elektrik sobası olduğu düşünülmektedir.



Şekil 48 – Odanın iç ve dış arasındaki sıcaklık farkı grafiği

Nemrut anıtlarına 2006 yılı Eylül ayında kurulan nem ve sıcaklık ölçerlerden alınan okumaların kablosuz bağlantı ile toplanması işlemi, kablosuz modem anteninin arızalanması sebebiyle kesintiye uğramıştır. 19-21 Mayıs 2007 tarihleri arasında bölgeye yapılan teknik gezi ve sonrasında kesik bağlantı onarılmış ve cihazın kış boyunca okuyarak hafızasında tutmayı başardığı tüm bilgiler bilgisayara yüklenmiştir. Rüzgar sensörünün, Mayıs 2007'de monte edilmesinden 1 hafta sonra yön sensörünün kuyruğu kopmuştur. Anıtların bulunduğu bölgede cep telefonlarının çekme alanı sınırında kalması, bölgede şiddetli rüzgar, yıldırım, kar vb zor doğa şartlarının bulunması gibi sebeplerle 2007 yılı içinde GSM data hattı bağlantısı da yeniden yitirilmiştir. 25-27 Ekim 2007 tarihlerinde alana yeniden ulaşılmış, yön

kuyruğu kopan rüzgar sensörüne orijinaline benzer şekle sahip metalden yeni bir kuyruk yapılmış ve yerine monte edilmiştir. Böylelikle, Kasım 2007 ayı başında tekrar çalışmaya başlamış olan rüzgar yön sensörü, aradan yaklaşık bir ay geçtikten sonra, Aralık 2007'nin ilk haftasında tekrar bozulmuştur. Rüzgar yön sensörünün çalışmayı bıraktığı günlerde nem oranının sabit olarak %100 olduğu göz önünde bulundurulursa, (muhtemelen karla karışık) yağmur sırasında metal kuyruğa yıldırım düşmüş ve devreleri bozmuş olma ihtimali üzerinde durulmuştur. 12 Nisan 2008 tarihinde bölgeye gidilerek yapılan incelemede, rüzgar yön sensörünün kuyruğunun yerinde olduğu fakat içinde bulunan bağlantı milinin kırıldığı gözlemlenmiştir. GSM antenin yeri değiştirilerek yeniden kurulan bağlantı yaklaşık 1 ay sonra, 16 Mayıs 2008 tarihinde yapılan son uzaktan bağlantının ardından yine yitirilmiştir. Nemrut bölgesine Eylül 2008 sonunda tekrar gidilmiş ve rüzgar yön sensörü kuyruğunun kırılmış mili tamir edilmeye çalışılmıştır. Tamir edilemeyen yön sensörü çıkartılıp iptal edilmiş ve sadece hız sensöründen okumalar alınmaya devam edilmiştir. Veri toplama sistemi üzerinde bulunan veriler kurtarılmış ve GSM bağlantısı kısmen tekrar kurulmuştur.

Anıtlardan dinamik veriler toplanmıştır fakat birbiri üzerine konulmuş halde taş bloklardan oluşan anıtın dinamik karakteristiği doğrusal olmadığı için net olarak elde edilememiştir. Yeni rüzgar yön sensörü satın alımı işlemi, üretici firmanın göndermekte gecikmesi sebebiyle zamanında takılamamıştır. 2009 yılı içinde yeni rüzgar yön sensörü satın alınmış ve 2009 yılı 2-3 Eylül tarihleri arasında bölgeye tekrar ziyaret yapılarak yeni rüzgar yön sensörü kurulma çalışmaları yapılmıştır. Sensör yerine takıldıktan sonra 5V ile besleme yapılmış fakat sensörün çalışmadığı görülerek tekrar bekçi kulübesinin çatısına çıkılmıştır. Sensörün etrafından dumanlar çıkmakta olduğu görülüp müdahale etmeye çalışılırken, Dr. Ahmet Türer elektrik ile çarpılarak elektrik şoku ve kulübe çatısından düşme tehlikesi atlatmıştır. Daha sonra yapılan ölçümlerde, rüzgar yön sensörüne 220V AC akım geldiği görülmüştür (Şekil 49). Halbuki veri toplama sistemini besleyen güneş paneli 12V DC akım üretmektedir. Konu daha etraflıca araştırılınca, kulübenin metalden yapılmış olduğu ve kulübeye bağlı metal boruya sensörün takılmış olduğu, bekçi kulübesinin elektrik tesisatının eski olması sebebiyle kaçak yaptığı, tüm bekçi kulübesinin duvarlarında 220V elektrik olduğu anlaşılmıştır. Veri toplama sisteminin topraklaması ile elektrik kaçağı arasında devre tamamlanmakta olduğu ve sensörün yanarak tahrip olmasına sebep olduğu anlaşılmıştır. Rüzgar yönünün ölçümü yanan sensör sebebiyle gerçekleştirilememiş (Şekil 50) ve rüzgarın karı doğu cepheden batı cepheye doğru taşıyarak yığıldığı, batı cephedeki yıkımın kısmen kar yükü sebebiyle olduğu ancak fotoğraflara dayanarak değerlendirilebimiştir.



Şekil 49 – Veri toplama sistemi ile bekçi kulübesi duvarı arasında değdirildiğinde yanan 220V ampül.



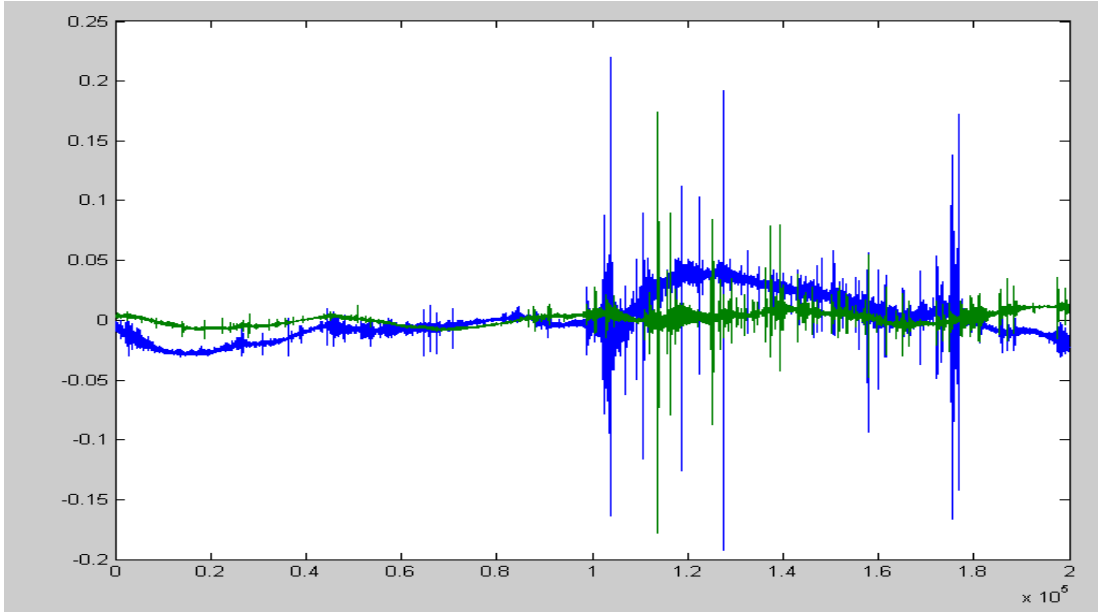
Şekil 50 – 220V AC elektriğe maruz kalarak yanan (yeni) rüzgar yön sensörü.

Tablo 6 – 16/10/2008 tarihi anormal sıcaklık okumaları detaylı veri tablosu

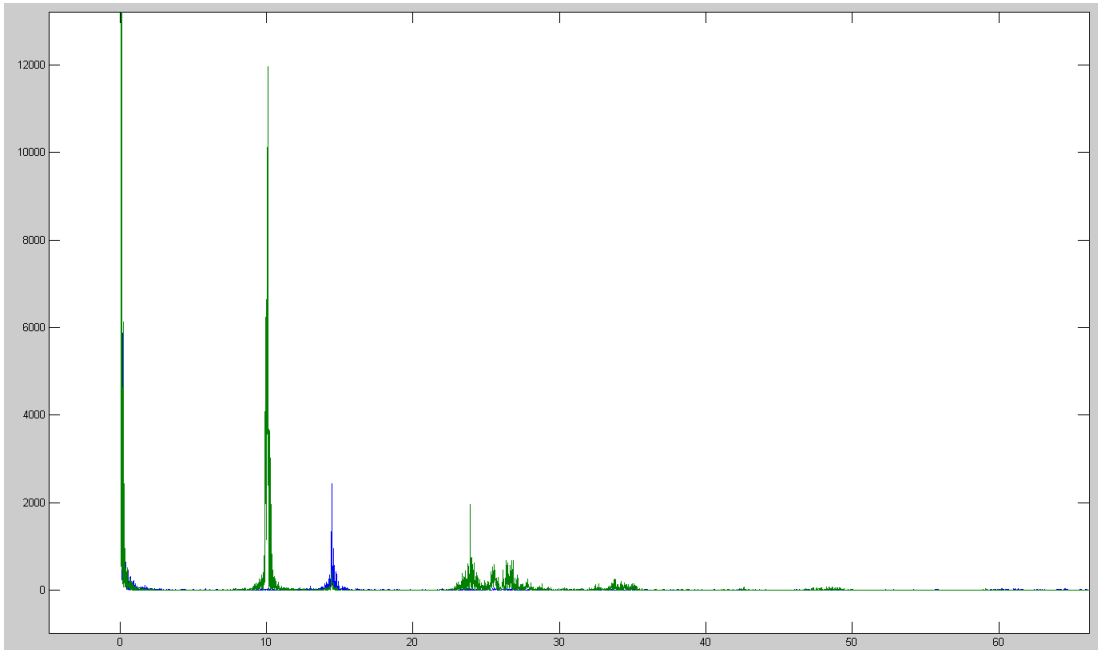
TIMESTAMP	RECORD	SICAKLIK	SICAKLIK	NEM_1_A	NEM_2_A	WndS_Avg	WndD_Avg	PANEL_T	BATARYA
TS	RN	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg
10/15/2008 12:00	1098	15.24		33.05		8.43	0.79	22.37	13.76
10/15/2008 13:00	1100	15.33		36.04		6.389	0.717	22.45	13.76
10/15/2008 14:00	1102	15.12		35.72		6.167	0.717	22.42	13.76
10/15/2008 15:00	1104	13.68		46.37		4.465	0.749	21.78	13.76
10/15/2008 16:00	1106	12.99		44.91		2.916	0.717	21.41	13.05
10/15/2008 17:00	1108	9.6		78.13		5.649	NAN	20.68	12.98
10/15/2008 18:00	1110	4.414		98.7		7.255	-9.15	18.13	14.72
10/15/2008 19:00	1112	7.417		90.3		2.382	-1.116	17.62	13.12
10/15/2008 20:00	1114	7.092		87		2.641	-0.041	17.56	12.95
10/15/2008 21:00	1116	5.927		87.1		3.781	-7.619	16.49	14.03
10/15/2008 22:00	1118	6.988		86.4		4.268	0.081	16.16	12.91
10/15/2008 23:00	1120	-0.053		92.4		6.59	NAN	13.09	NAN
10/16/2008 0:00	1122	-36.56		99.9		6.76	NAN	2.183	NAN
10/16/2008 1:00	1124	-37.08		91.3		6.313	NAN	1.561	NAN
10/16/2008 2:00	1126	-56.89		100		6.295	NAN	-3.485	NAN
10/16/2008 3:00	1128	-57.16		100		6.665	NAN	-8.88	NAN
10/16/2008 4:00	1130	-57.2		98.8		6.071	NAN	-9.78	NAN
10/16/2008 5:00	1132	-53.86		99.1		4.087	NAN	1.384	NAN
10/16/2008 6:00	1134	-50.91		99.9		3.975	NAN	4.364	NAN
10/16/2008 7:00	1136	-29.7		85.9		3.614	NAN	5.827	NAN
10/16/2008 8:00	1138	-16.93		88.7		3.86	NAN	8.55	NAN
10/16/2008 9:00	1140	-18.44		80.4		5.79	NAN	9.24	NAN
10/16/2008 10:00	1142	-22.14		85		6.013	NAN	8.23	NAN
10/16/2008 11:00	1144	-20.83		78.65		5.721	NAN	7.601	NAN
10/16/2008 12:00	1146	-19.01		76.07		5.33	NAN	6.998	NAN
10/16/2008 13:00	1148	-18.19		76.69		4.383	NAN	6.955	NAN
10/16/2008 14:00	1150	-16.46		75.47		3.393	NAN	7.451	NAN
10/16/2008 15:00	1152	-16.2		71		3.452	NAN	7.993	NAN
10/16/2008 16:00	1154	-15.52		66.13		4.96	NAN	7.964	NAN
10/16/2008 17:00	1156	-12.13		80.5		3.887	NAN	8.88	NAN
10/16/2008 18:00	1158	-11.66		76.99		3.67	NAN	7.469	NAN
10/16/2008 19:00	1160	-12.21		92.3		4.391	NAN	5.849	NAN
10/16/2008 20:00	1162	-11.89		88.2		5.802	NAN	4.368	NAN
10/16/2008 21:00	1164	-11.69		83.7		10.62	NAN	3.21	NAN
10/16/2008 22:00	1166	-11.49		86.8		9.24	NAN	2.541	NAN
10/16/2008 23:00	1168	-10.39		85.6		7.821	NAN	2.242	NAN
10/17/2008 0:00	1170	-9.76		82.2		7.325	NAN	1.908	NAN
10/17/2008 1:00	1172	-10.47		89.9		7.794	NAN	1.479	NAN
10/17/2008 2:00	1174	-9.54		86		6.711	NAN	1.231	NAN
10/17/2008 3:00	1176	-10.01		94.1		5.754	NAN	0.965	NAN
10/17/2008 4:00	1178	-10.11		97.8		6	NAN	0.763	NAN
10/17/2008 5:00	1180	-9.3		98.8		5.218	NAN	0.777	NAN
10/17/2008 6:00	1182	-9.08		98.8		4.843	NAN	0.575	NAN
10/17/2008 7:00	1184	-9.13		99		4.682	NAN	0.44	NAN
10/17/2008 8:00	1186	-9.36		90		3.985	NAN	2.655	NAN
10/17/2008 9:00	1188	-9.45		77.11		2.706	NAN	5.171	NAN
10/17/2008 10:00	1190	-9.59		69.55		2.939	NAN	7.25	NAN
10/17/2008 11:00	1192	-8.01		69.93		3.115	NAN	9.64	NAN
10/17/2008 12:00	1194	0.135		67.44		2.863	NAN	13.76	NAN
10/17/2008 13:00	1196	7.578		74.21		2.483	NAN	17.58	14.56
10/17/2008 14:00	1198	9.25		68.88		1.821	NAN	18.61	14.4
10/17/2008 15:00	1200	9.37		68.48		1.779	NAN	19.56	13.97
10/17/2008 16:00	1202	9.75		66.03		1.545	NAN	19.12	13.87
10/17/2008 17:00	1204	9.56		66.33		1.664	NAN	19.25	14.11
10/17/2008 18:00	1206	7.394		76		1.931	NAN	17.53	13.59
10/17/2008 19:00	1208	6.187		76.41		2.392	NAN	19.24	13.77
10/17/2008 20:00	1210	6.348		65.76		1.498	NAN	21.38	13.66
10/17/2008 21:00	1212	6.49		62.56		1.794	NAN	18.69	13.43
10/17/2008 22:00	1214	5.994		64.83		2.427	NAN	16.94	13.35
10/17/2008 23:00	1216	6.261		67.31		2.1	NAN	15.72	13.31
10/18/2008 0:00	1218	5.822		67.61		1.486	NAN	14.42	13.23
10/18/2008 1:00	1220	5.617		68.32		1.955	NAN	13.39	13.16
10/18/2008 2:00	1222	6.473		65.58		2.369	NAN	12.77	13.04
10/18/2008 3:00	1224	6.344		64.63		1.493	NAN	12.43	12.97
10/18/2008 4:00	1226	6.125		64.5		1.427	NAN	12.07	12.93
10/18/2008 5:00	1228	6.058		65.5		1.356	NAN	11.76	12.88
10/18/2008 6:00	1230	6.053		66.81		2.744	NAN	11.81	12.86



Nemrut anıtları üzerinden dinamik ölçüm verileri, PCB B05 ivme ölçerler ve NI 9234 veri toplam sistemi kullanılarak toplanmıştır (Şekil 51). Elde edilen titreşim verileri fast fourier transform kullanılarak frekans uzayına aktarılmış, kompleks konjuge ikizleri ile çarpılarak yoğunlaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, anıtın doğal salınım frekanslarının 10,1Hz, 14,47 Hz, 23,94Hz ve 25,5Hz de olduğu görülmektedir (Şekil 52). Tarihi anıta dinamik etki uygulamak mümkün olmadığı için çevresel titreşimler kullanılmıştır. Titreşim değerlerinin 0,01g seviyesinde olması sebebiyle, ölçülen bu frekanslar deprem durumunda geçerliliğini yitirecektir. Fakat yapısal tanımlama (St-Id) açısından önem içermektedir.



Şekil 51 – 03/09/2009 tarihinde doğu terasındaki anıttan alınan ivme okumaları



Şekil 52 – 03/09/2009 tarihli dinamik verilerin frekans uzayındaki dağılımı.

#### 4.1.3.2 Hasankeyf, Zeynel Bey Türbesi YSİ çalışmaları

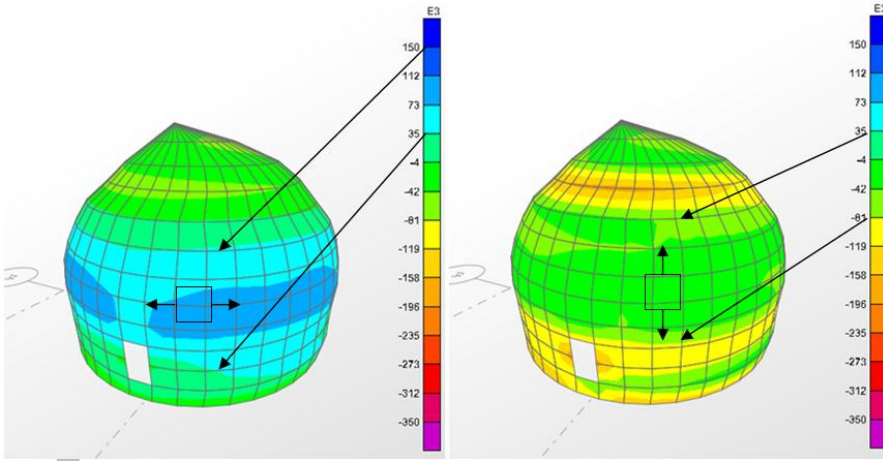
Ilisu barajı havzasında bulunan Hasankeyf tarihi yerleşim bölgesinde bulunan Zeynelbey Türbesi ve Ulu Cami ile ilgili bazı yapısal problemler bulunmaktadır. Yapıların hem yaşları, hem de onarım-bakım hizmetlerinden yoksun kalmaları sebebiyle kısmen yıkıldıkları, çok önemli derecede yapısal çatlaklar ve kısmi göçmeler yaşadıkları bilinmektedir. Akkoyunlu hükümdarı Uzun Hasan'ın oğlu Zeynel Bey için 15'inci yüzyılda yaptırıldığı bilinen yapı, 18'inci yüzyıl sonuna kadar kullanılmaya devam edilmiştir. Zeminden 9,60m kotuna kadar silindirik bir yapıyla devam eden türbe, iç içe yerleşmiş iki kubbeye sahiptir ve dış kubbenin en üst noktası zeminden 16,5 metre yüksekliktedir. 18.yy sonundan günümüze değin kullanılmadığı 2 asır sonunda yapının kubbesinde ciddi yapısal sorunlar oluşmuştur (Şekil 53).

Kubbede görülen çatlakların oluşma mekanizmasını anlayabilmek için basit bir analitik model oluşturularak kendi ağırlığı altında analiz yapılmıştır. Kubbenin soğan şekilli dışa bombeli geometrisi sebebiyle, orta bölümlerde enine yönlü çekme alanlarının oluştuğu görülmüştür (Şekil 54). Çekme gerilmeleri 0,15 MPa civarında hesaplanmış olup, yağmur ve kar suları ile zayıflayan kesitin çekme kapasitesini geçen bir seviye olduğu değerlendirilmiştir.

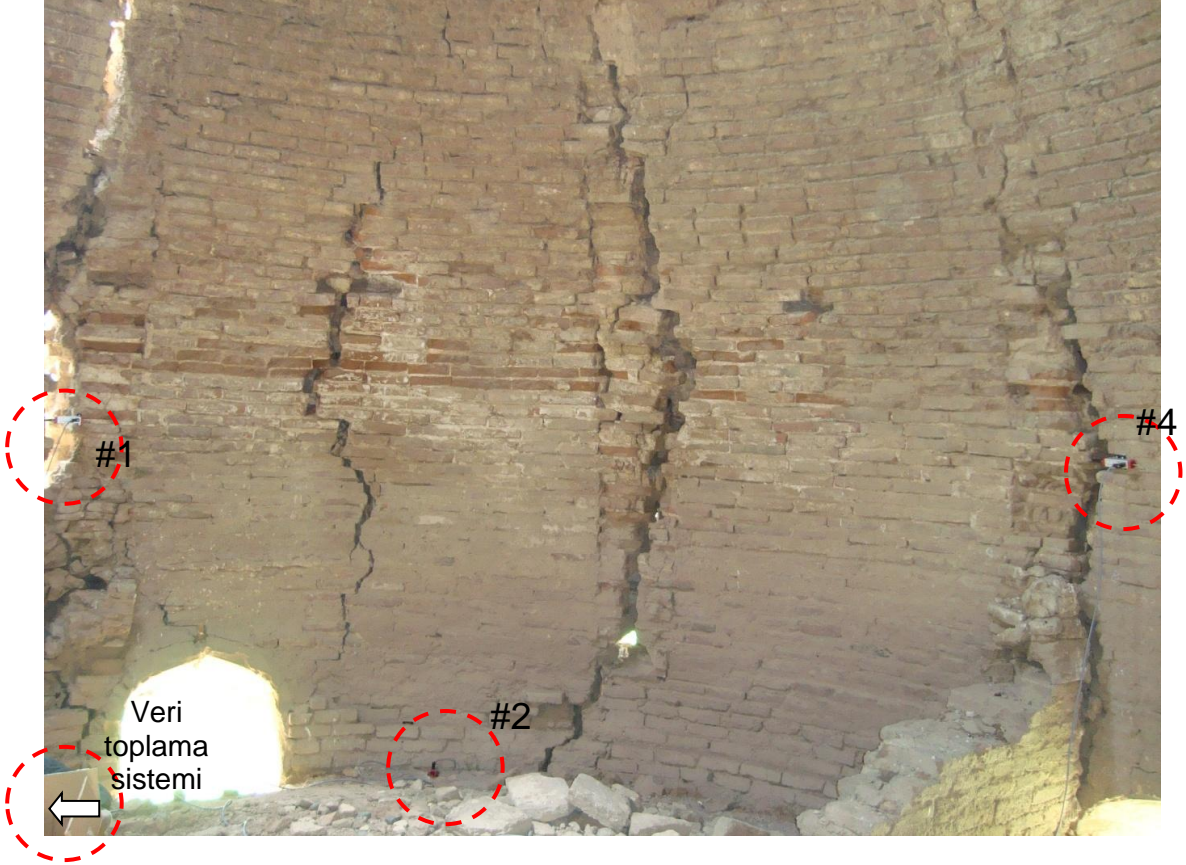
Kubbede bulunan çatlakların genişleyip genişlemediğinin anlaşılması ve eğer genişliyor ise ne kadar hızla genişlediğinin tespit edilmesi, koruma ve güçlendirme çalışmalarının kapsamı ve zamanlaması açısından önemlidir. Buna ilaveten, güçlendirme çalışmaları yapılırken ve çalışmalar tamamlandıktan sonra da güçlendirmenin etkisini görebilmek amacıyla izleme çalışmalarının devam etmesi gerekir. Bu sebeple, kubbede bulunan çatlaklardan 4 tanesine çatlak genişliği değişimi ölçer yerleştirilmiştir. Ayrıca, ortamdaki sıcaklık değişikliklerini takip edebilmek amacıyla sıcaklık ölçer cihazı kubbe içine yerleştirilmiştir (Şekil 55).



Şekil 53 – Zeynelbey Türbesi, kubbede oluşan aşırı çatlaklar.

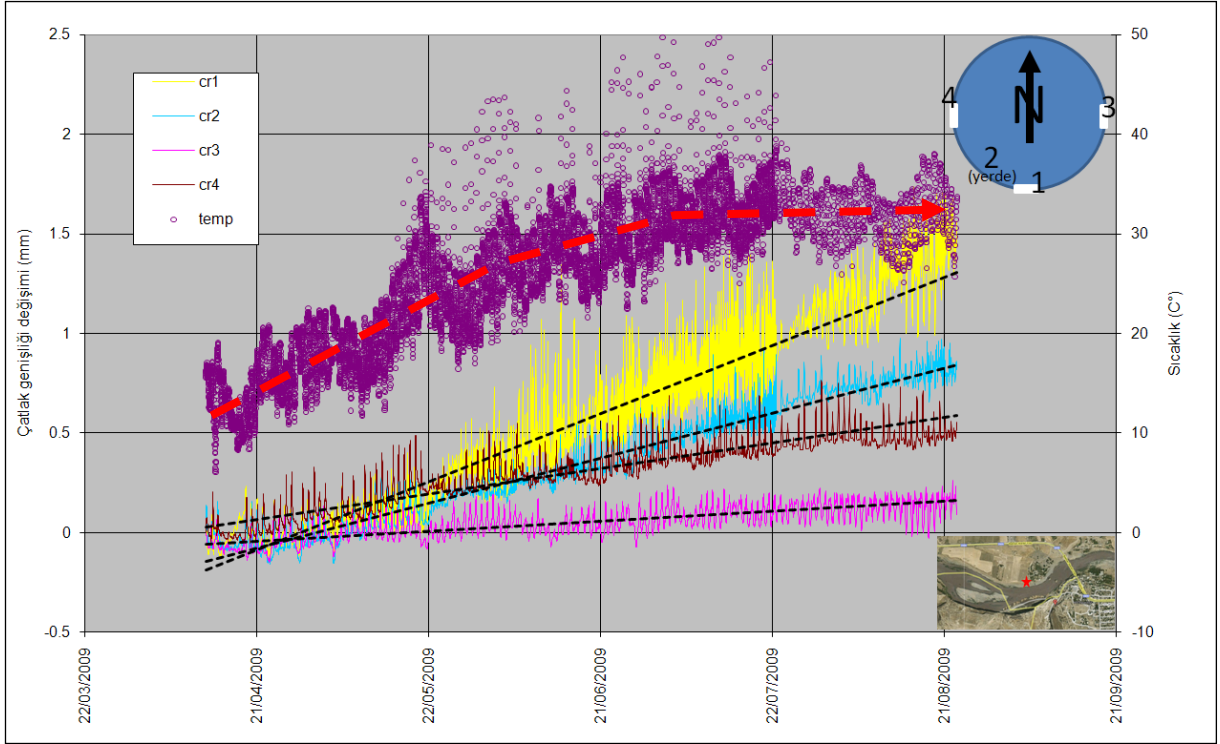


Şekil 54 – Zeynelbey türbesi, dış kubbe analitik ön model çalışması, a) enine b) boyuna yönde gerilmeler (Pa)

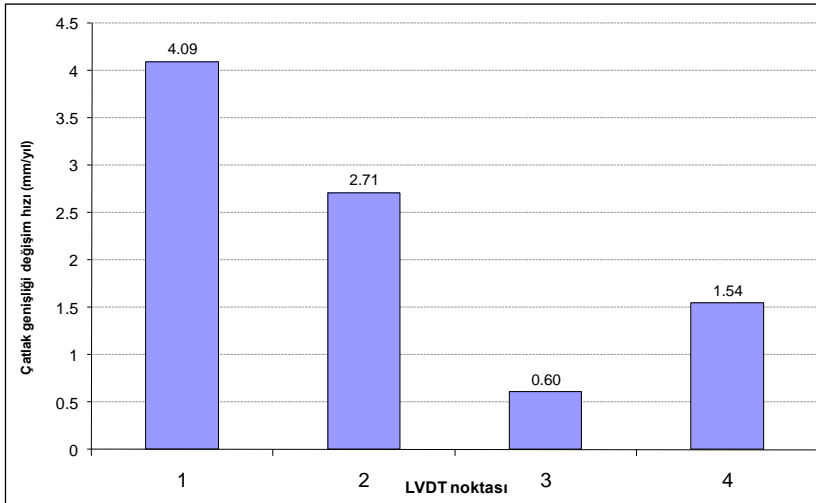


Şekil 55 – Zeynelbey Türbesi, çatlak ölçerlerin yerleri ve kanal numaraları.

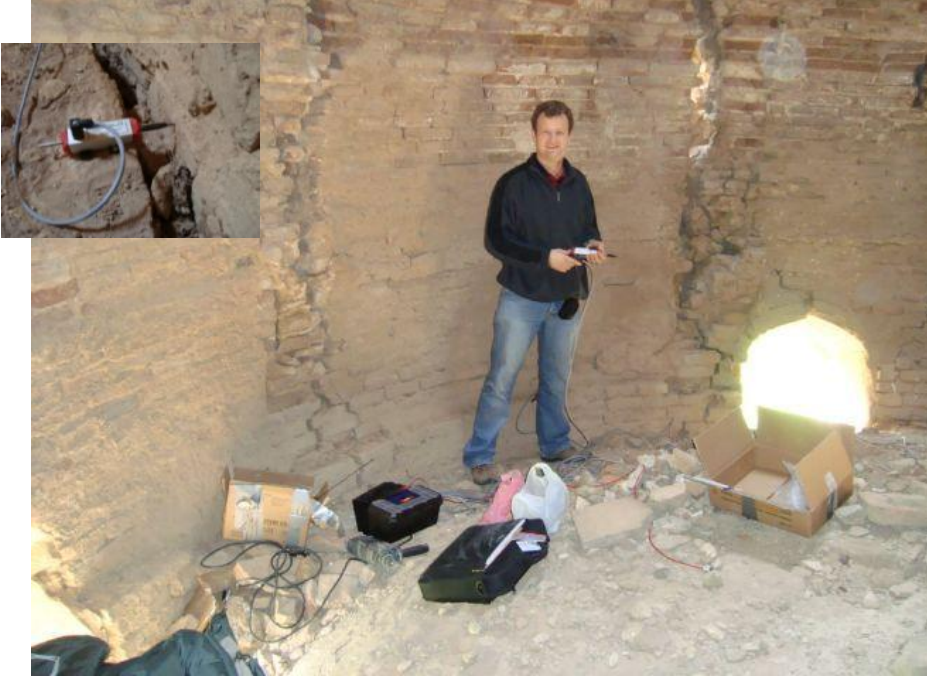
Ölçüm cihazlarından Nisan 2009 tarihinden itibaren toplanan veriler Şekil 56'da verilmektedir. İzleme yapılan aylar süresince çatlak genişliklerinde 1mm civarında artış gözlemlenmiştir. Ortam sıcaklığı da yaz mevsimi dolayısıyla artış gösteriyor olması ve çatlak genişliklerinin sıcaklık değişiminden etkileniyor olması ihtimaline karşın, sıcaklığın Temmuz ayı başı itibariyle sabitlendiği fakat çatlak genişliklerindeki artışın devam ettiği görülmektedir. Dolayısıyla çatlak açılmalarının, sıcaklık azalsa dahi artarak devam edeceği tahmin edilmektedir. Çatlak genişliği değişimlerine yerleştirilen doğrusal çizgi eğimleri Şekil 57'de karşılaştırılmaktadır. En hızlı açılan çatlağın 4 mm/yıl hız ile açılmakta olduğu toplanan kısıtlı veri ile tespit edilmiştir.



Şekil 56 – Zeynelbey Türbesi, çatlak değişim ve sıcaklık ölçümleri (ilk 4 ay)

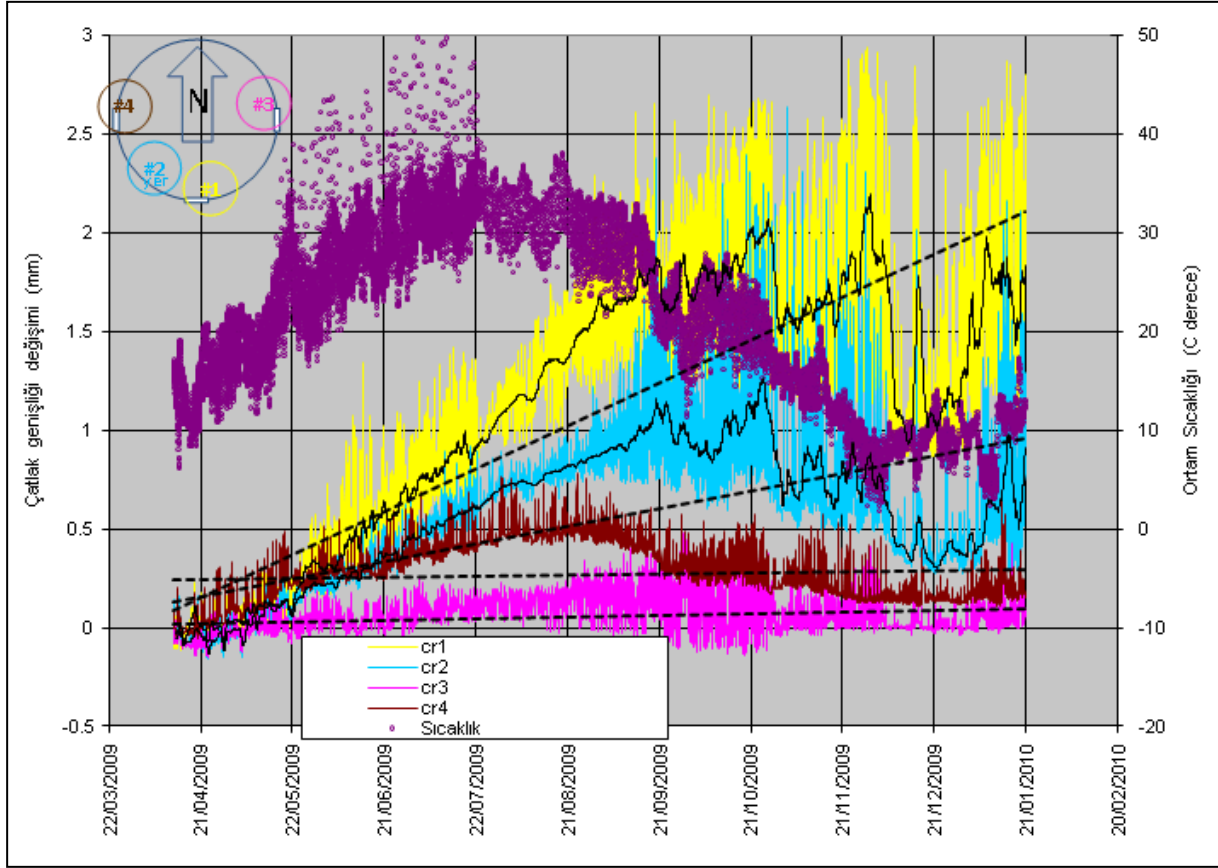


Şekil 57 – Zeynelbey Türbesi, 4 aylık ölçüm sonucunda çatlak genişliği değişim hızı grafiği.

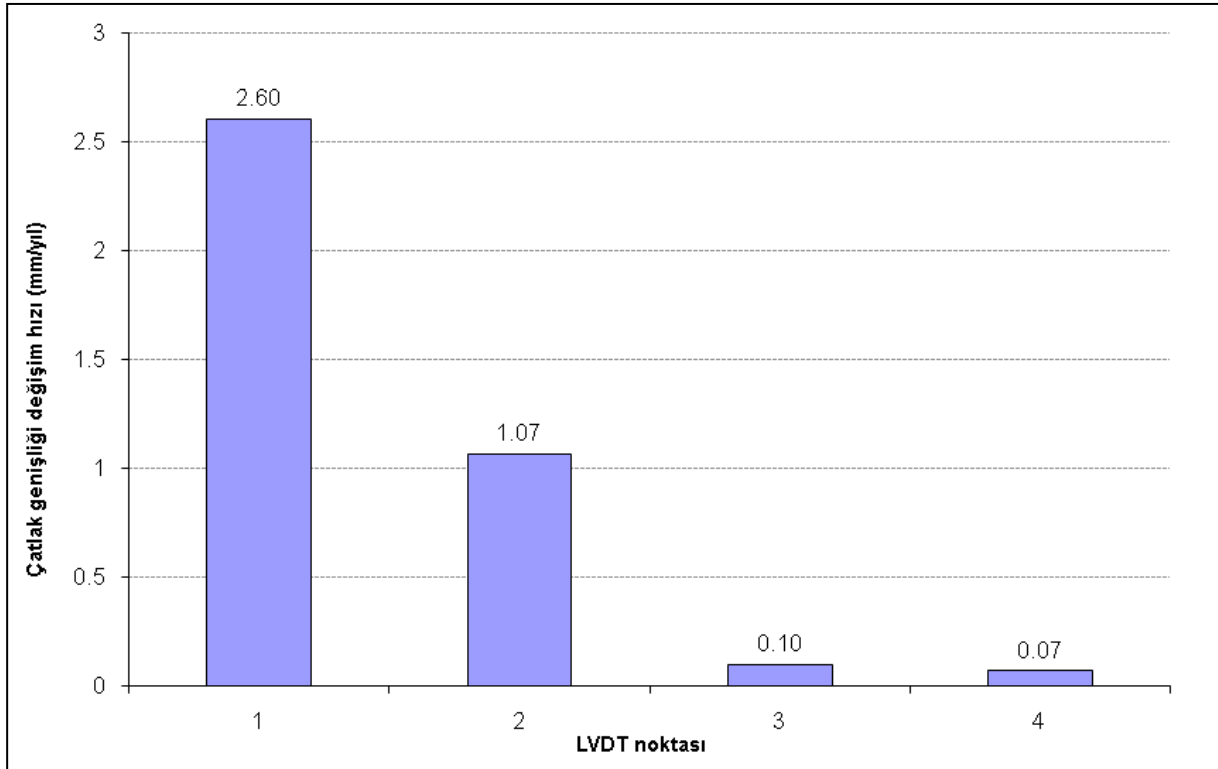


Şekil 58 – Zeynelbey Türbesi, kubbede oluşan aşırı çatlaklar.

Ölçüm verilerine kısa sürede bakılarak karar verilmesinin sağlıksız olduğu bilindiğinden, ölçümlerin alınmasına devam edilmiştir. Cihazlarından Nisan 2009 tarihinden itibaren toplanan veriler Şekil 59’da verilmektedir. İzleme yapılan aylar süresince çatlak genişliklerinde 1mm civarında artış gözlemlenmiştir. Ortam sıcaklığı da yaz mevsimi dolayısıyla artış gösteriyor olması ve çatlak genişliklerinin sıcaklık değişiminden etkileniyor olması ihtimaline karşın, sıcaklığın Temmuz ayı başı itibariyle sabitlendiği fakat çatlak genişliklerindeki artışın devam ettiği görülmektedir. Dolayısıyla çatlak açılmalarının, sıcaklık azalsa dahi artarak devam edeceği tahmin edilmiştir. Çatlak genişliği okumalarının davranışı elde edilmiştir (Şekil 60). Ortam sıcaklığının 20-25 derece civarında düşmüş olmasına rağmen, çatlak genişliklerinde geçici azalma sonra yeniden artan ve kalıcı artma olduğu görülmektedir. Dolayısıyla çatlakların durdurulması için acil önlem alınması gerektiği ölçüme bağlı olarak anlaşılmaktadır.



Şekil 59 – Zeynelbey Türbesi, çatlak değişim ve sıcaklık ölçümleri (ilk 9 ay).



Şekil 60 – Zeynelbey Türbesi, 9 aylık ölçüm sonucunda çatlak genişliği değişim hızı grafiği.

#### 4.1.4 Modern yapıların YSİ çalışmaları

Modern inşaat mühendisliği yapılarının YSİ çalışmaları çoğunlukla şu ana sebepler dolayısıyla yapılmaktadır:

a) yapının mesnetlerinde yaşanan problemler, örneğin zemin oturması, yan parselde derin kazı yapılması, köprü ayağında oyulma vb.,

b) yapının taşıyıcı sisteminde yaşanan bazı problemler: dizayn hatası sebebiyle oluşan endişe verici boyutta problemler, malzeme ve işçilik hataları, yapısal malzeme bozulmaları (alkali-silika, paslanma-tuzlanma), yapının geçirmiş olduğu kazalar (köprü ayağına-kirişine yüklü kamyon çarpması),

c) yapının çok önemli olması, stratejik-ekonomik-hayati önem (ana arter üzerindeki köprüler, büyük iş merkezi, nükleer santral, vb.),

d) yapının potansiyel hasara yatkın olması (çok yüksek yapı, yangın tehlikesi, deprem tehlikesi),

e) daha önce denenmemiş inşaat tekniklerinin performansının izlenmesi,

f) şartname ve kodların yenilenmesi için izleme - gözlemlenme,

g) onarım ve bakım için maliyet optimizasyonu.

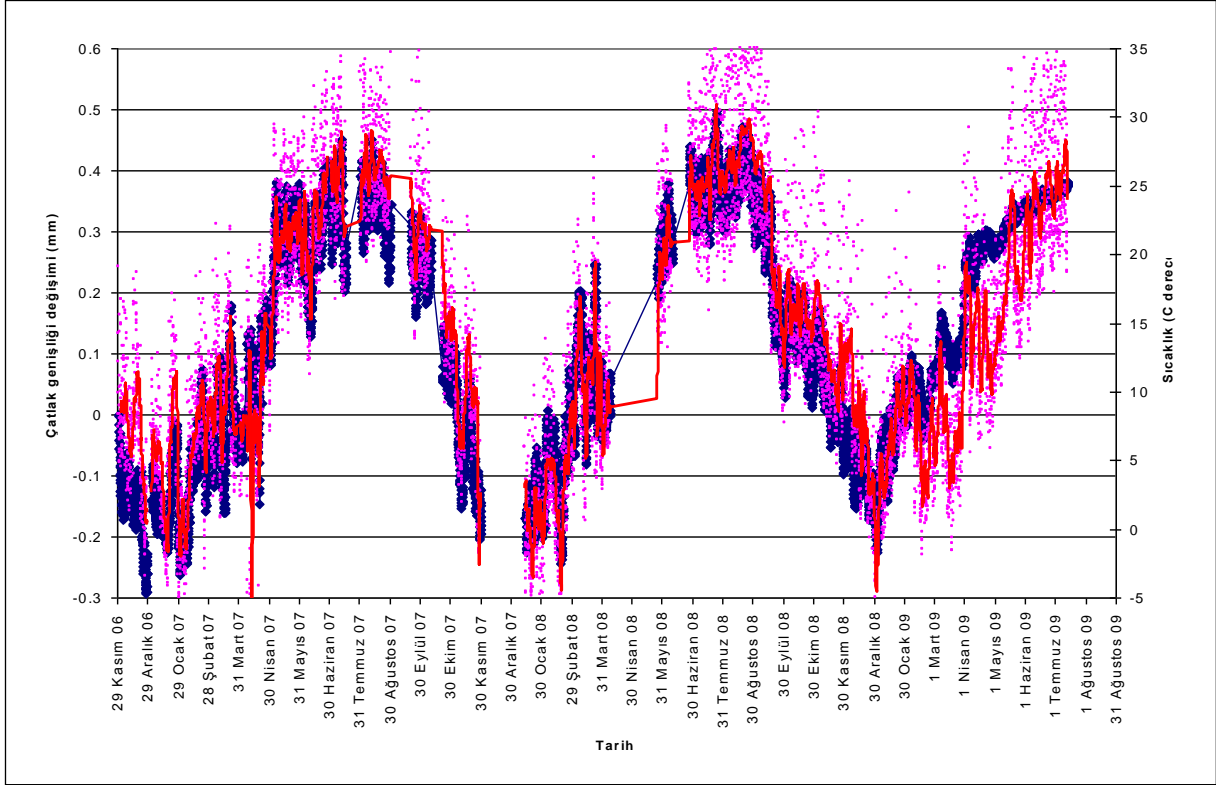
Benzer problemler içeren bazı yapıların izlenmesi için çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar özet olarak aşağıda verilmektedir:

##### 4.1.4.1 Ankara, Hazine müsteşarlığı A Blok binası:

Hazine Müsteşarlığı binası çatı katına yakın bölgede tespit edilen bir çatlağın endişe uyandırması sebebiyle çatlak üzerine takılan çatlak metreden yaklaşık 2,5 yıl süre ile alınan çatlak genişlik değişimi ve sıcaklık okumaları (Şekil 61) incelendiğinde, sıcaklık ve çatlak genişliği değişimi arasında belirgin benzerlik görülmekte ve izleme süresince düzenli olarak devam etmektedir. Yaz ve kış ayları arasında çatlak genişliğindeki değişim için okunan en büyük değer 0,7mm kadar olmuştur. Bu bölgede ölçülen en fazla sıcaklık değişimi 50 C° derece dolayındadır; fakat genel trend izlendiğinde sıcaklığın yaklaşık 27 derecelik bir aralıkta değiştiği görülmektedir.  $\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta t$  ilişkisinde, 0,7mm değişim için  $10 \cdot 10^{-6} \mu\epsilon/C^\circ$  sıcaklık genişleme katsayısına sahip ve 27 C° sıcaklık değişimi için uzunluk (L) 2592mm olarak hesaplanır. Buradan çatlak genişliğindeki değişimin lineer elastik olduğu ve yaklaşık 2,5 metre uzunluğunda bir bölümün sıcaklık değişimi etkisi ile oluştuğu sonucuna varılmıştır.



Çatlak genişliğindeki değişimin sabit sınırlar içinde değişiyor olması, çatlak genişliğinde artış olmadığını düşündüğünden yapısal açıdan endişe vermeyen bir durum oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Çatlak genişliğinde sürekli artan bir değişim olmamasına rağmen, gözlemlenen çatlağın zift ya da silikon gibi esnek malzeme ile doldurulması önerilmektedir. Böylece çatlaktan gelecek nem ve yağmur suyunun yapısal hasara yol açma riski azaltılacaktır.

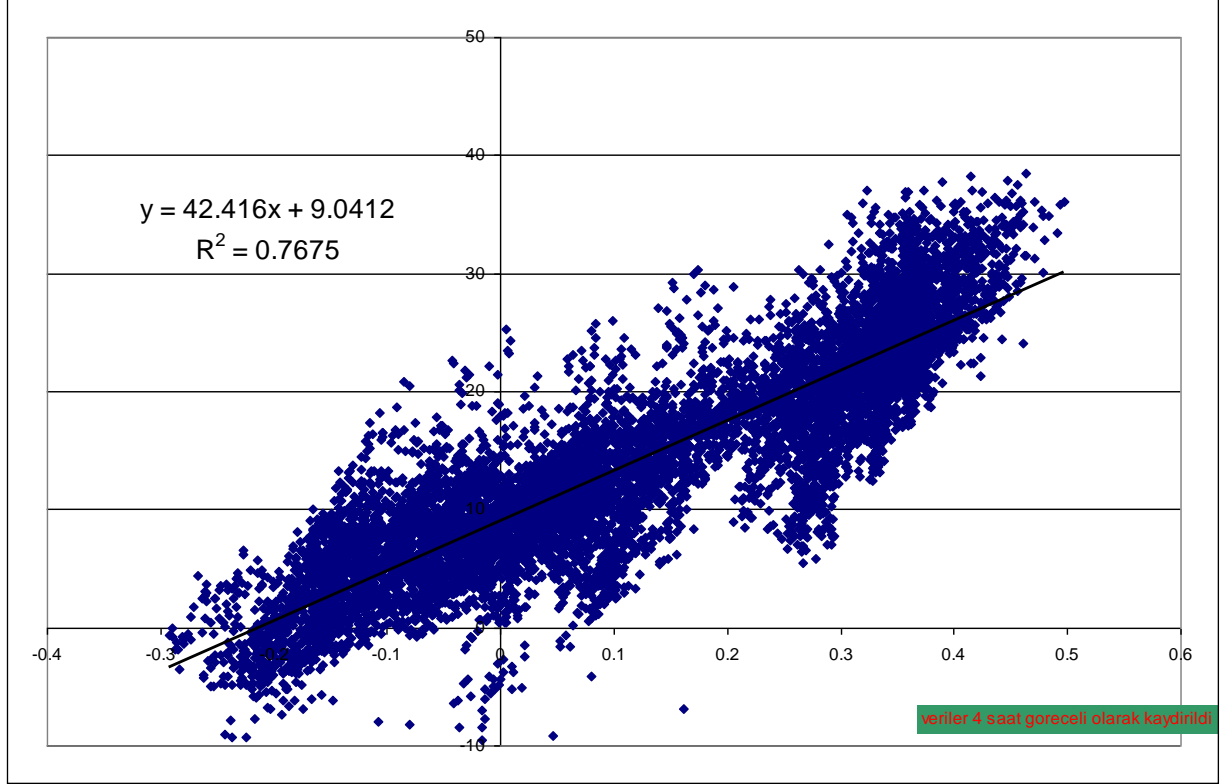


Şekil 61 – Çatlak metre okumaları ve sıcaklığın zamana göre değişimi.

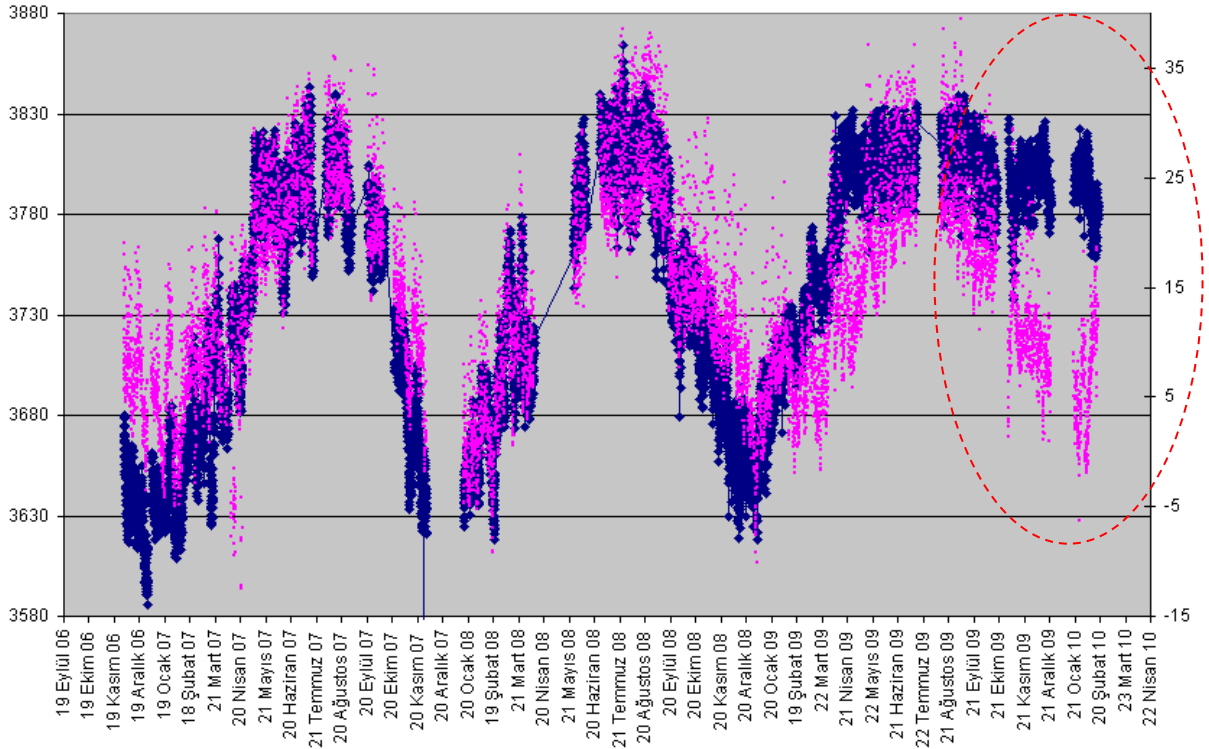
Sıcaklık değişiminin çatlak genişliğine olan etkisi, sıcaklık ve çatlak genişliği verileri aynı grafikte bastırılarak incelenmiştir (Şekil 62).  $R^2$  korelasyon indeksi, sıcaklık ve çatlak genişliği verileri zaman içinde birbirine göreceli olarak kaydırılarak  $R^2$  değerinin en büyük olduğu durum araştırılmıştır. İki veri birbirine göreceli olarak zaman içinde 4 saat kaydırıldığında, korelasyon katsayısının en büyük olduğu görülmüştür. Bunun sonucu olarak sıcaklığa bağlı çatlak genişliği değişiminin 4 saat gecikmeli olarak gerçekleştiği anlaşılmıştır. Ölçülen hava sıcaklığı değişimi binanın ısınma ve soğumasına olan etkisinin yaklaşık 4 saat sürdüğü anlaşılmaktadır.

Öte yandan, 2009 yılı yaz aylarında hazine binasına yapılan dış ısı yalıtımı sonrasında, çatlakmetreden okunan voltaj verilerinde bu kış belirgin bir farklılık oluşmuştur. Yapıya

yapılan müdahalenin çatlağın davranışına olan etkisinin belirgin bir şekilde yakalanması çok etkileyicidir (Şekil 63). Çatlak oluşumunun ve genişlik değişiminin sıcaklığa bağımlı olarak gerçekleştiği zaten bilinmekteydi. Yapılan ölçümlerde ısı yalıtımının etkisi çok etkin ve ölçülebilir şekilde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 62 – Çatlak metre okumaları ve sıcaklık değişiminin ilişkilendirilmesi.

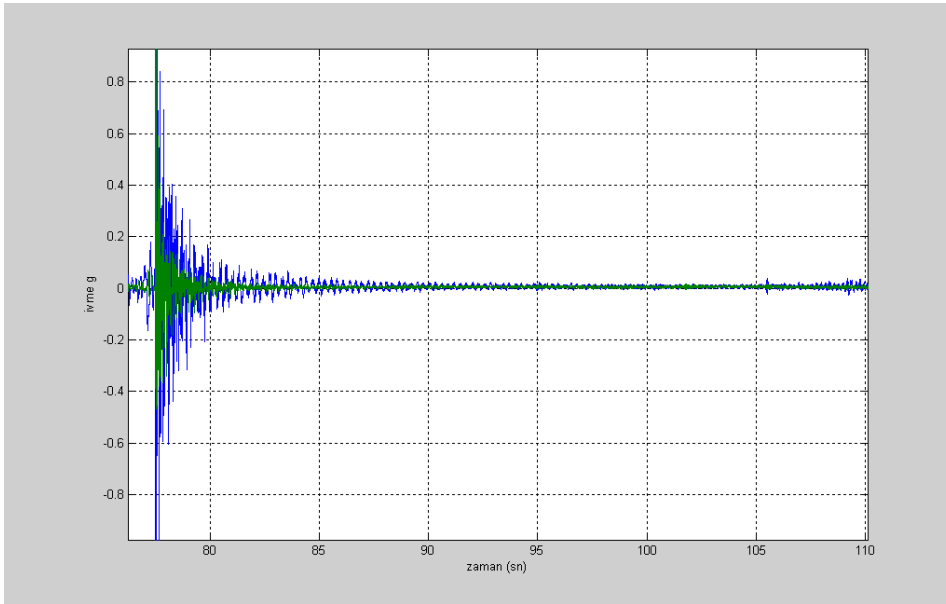
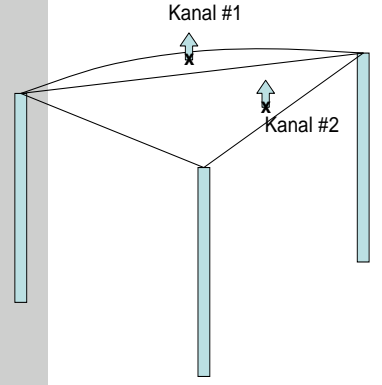
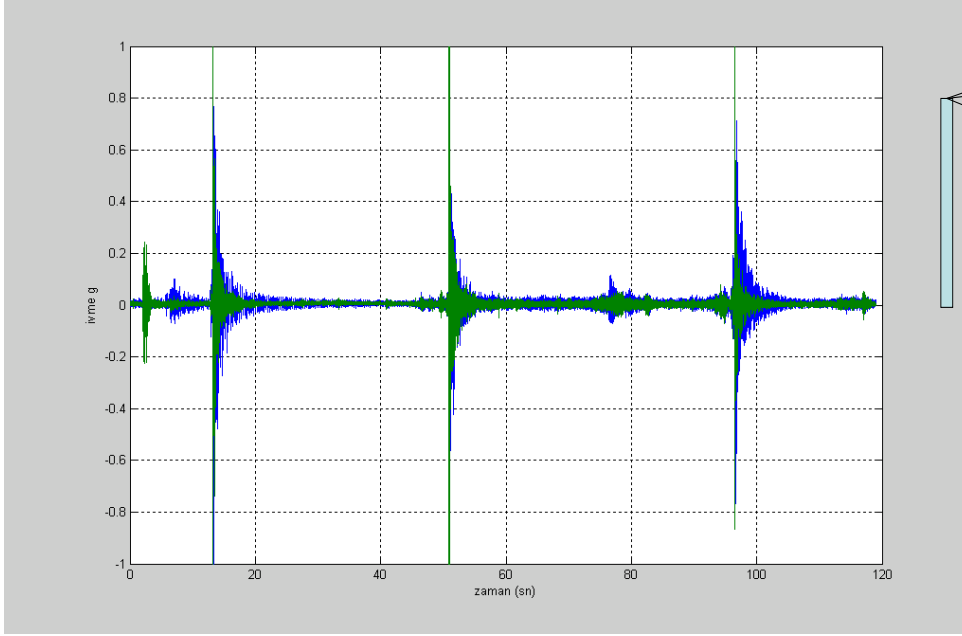


Şekil 63 – Çatlak metre mV voltaj ve sıcaklık okumalarının zamana göre değişimi.

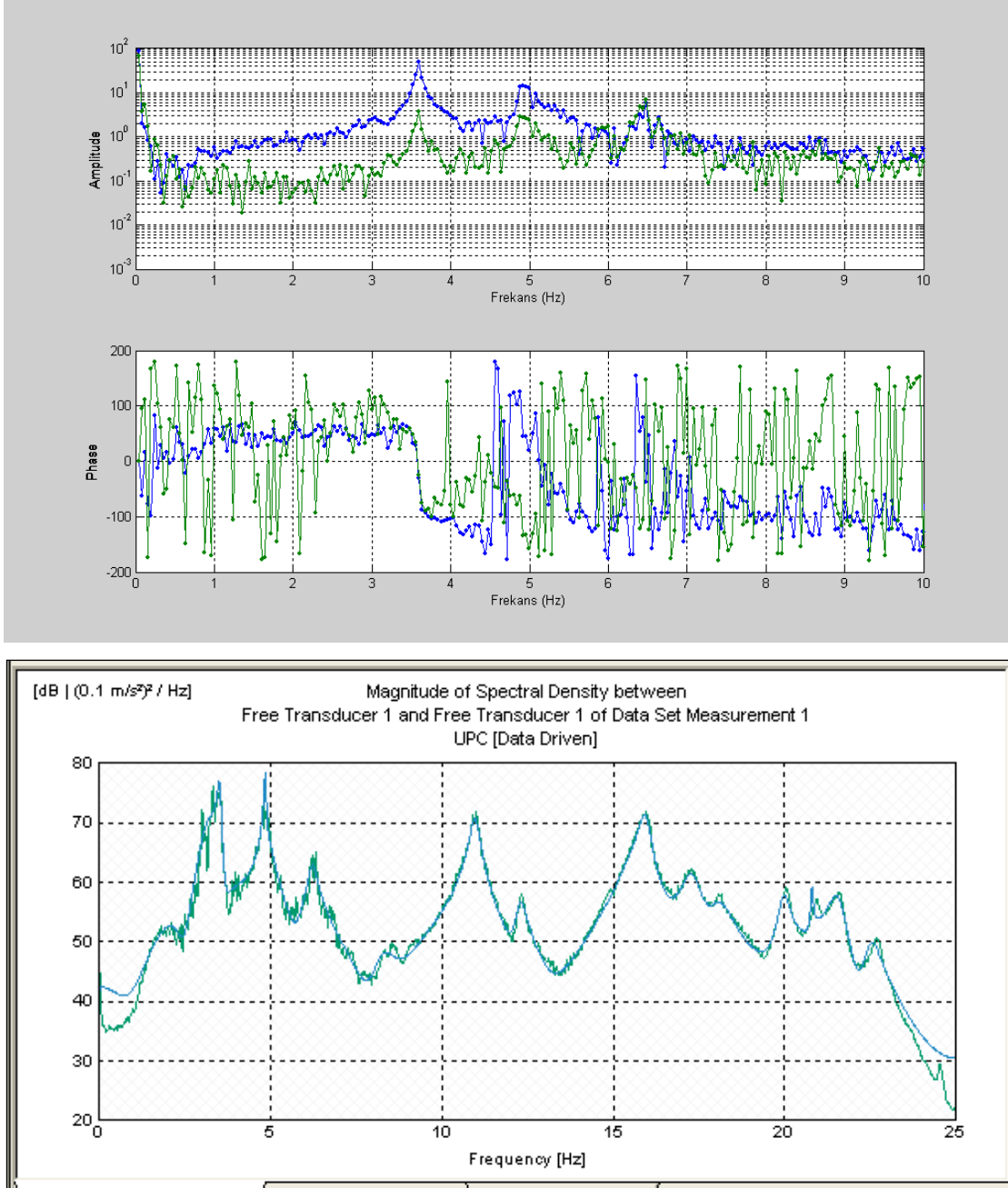
#### 4.1.4.2 Ankara Esenboğa yeni binası döşeme titreşim problemi.

Esenboğa havalimanı yeni binası inşaatında, döşemeden dilatasyon ile ayrılmış bir parçada titreşim problemi yaşanmıştır. Karşılaşılan titreşim probleminin şartları sebebiyle uzun süreli yapısal sağlık izleme çalışmasına uygun olmadığı fakat dinamik ölçüm sistemleri kullanılarak kısa süreli testler uygulanması ve problemin tespitine yönelik çalışmalar yapılması mümkün olmuştur.

Titreşim frekansları ve ivme değerlerinin ölçülmesi, PCB 393C ivme ölçer ve National Instruments dinamik veri toplama sistemi kullanılarak yapılmış ve döşeme frekanslarının 3.5 Hz ve 4.9 Hz civarında olduğu ve her iki modun da düşük sönümlenme oranlarına (%1.5'dan küçük) sahip olduğu bulunmuştur. Döşemenin modlarının, insan yürüyüş frekansı olarak kabul edilen 2 Hz'e yakın olması, alt sınır kabul edilen 3.5 Hz'de mode bulunması, ölçülen en büyük ivme değerlerinin 0.2g mertebesinde bulunması, ve sönüm oranının oldukça düşük seviyelerde, 0.5% ila 1.5% arasında olması sebepleriyle döşemenin titreşimlerinin konfor sınırları dışında olduğu doğrulanmıştır. Döşeme kaplaması yapıldığında problemlerde iyileşme olacağı ve konfor sınırları içinde kalacağı düşünülmektedir. Sönüm oranının da artacağı ve bu durumun problemi azaltacak yönde etki edeceği beklenmektedir. Bu basit ve ölçüme dayalı hızlı çalışma ile titreşim problemi niceliksel olarak değerlendirilmiş, problemin kapsamı ve çözümü hakkında fikir sahibi olunmuştur.



Şekil 64 – Esenboğa havalimanı döşemesinde yapılan dinamik ölçümler.



Şekil 65 – Esenboğa havalimanı döşemesinin frekans tepki fonksiyonu (FRF).

#### 4.1.4.3 Esenboğa yolu yaya köprüleri ölçüm ve değerlendirme çalışmaları

Pratik ve kısa süreli ölçümler alınarak karayolu ve yaya köprülerinde halat kullanımı ülkemizde giderek yaygınlaşmaktadır. En bilinen örneklerinden Boğaziçi ve Fatih Sultan Mehmet köprüleri, Ankara özelinde ise ODTÜ önünde Eskişehir yolu üzerinde bulunan Köy Hizmetleri, ODTÜ kablolu yaya köprüleri sayılabilir. Kabloarda bulunan gerji miktarları, analiz ve dizayn aşamalarında hesaplanan değerlerden değişik sebeplerle farklılıklar

gösterebilir. Özellikle çoklu dereceli belirsiz (hiperstatik) yapılarda kablo gergileri, kablo boyları, yapısal elemanların göreceli rijitliği, sıcaklık değişimleri, yapısal elemanların hasarları, vb birçok parametreye bağlıdır. Köprü halatlarında bulunan gergi kuvvetlerinin ölçümü için tekniklerin araştırılması çalışmalarının arazi uygulaması, Esenboğa yolunda yeni yapılan kablolu yaya köprüleri kullanılarak yapılmıştır. Kablo gergi kuvvetlerinin ölçülmesi için yeni ölçüm aleti geliştirilmene çalışılmıştır. Ayarlı ağırlık sönümleyici (tuned mass damper) hakkında araştırma ve ön çalışmalar yapılmıştır.

İncelemeler sırasında yapı emniyetini etkilememekle birlikte konfor limitlerini aşan titreşimlerle karşılaşmıştır. Bu titreşimlerin gergisi yapılmamış olan halatlardaki bolluk sebebiyle olabileceği düşünülmüş ve Pursaklar köprüsü üzerinde halat germe çalışmaları yapılmıştır. Köprünün iki tarafında bulunan halatlarda gergi kuvvetlerinin simetrik olmasına ve köprüyü dengeli olarak taşımasına özen gösterilmiştir. Ayrıca köprünün orta bölgesinin ayakların bulunduğu seviyeden yüksekte olacak şekilde ayarlama çalışması yapılmış ve köprü üzerinde kar ve yağmur sularının birikmemesi için halatlar gerilerek yaklaşık 3-4cm (1/1000) eğim verilmiştir.

Köprü gergilerinin, köprü titreşim frekansları üzerine etkileri bilgisayarlı modelleme çalışmaları yapılarak incelenmiştir. Hem analitik çalışmalar hem de gergi uygulaması sonrası köprüden ölçülen titreşimler, köprü hakim titreşim frekansının 1.6 Hz civarında ve uluslararası şartnamelerde öngörülen 3.0 Hz'in altında olması sebebiyle titreşim probleminin olduğu anlaşılmıştır. Yayaların yürüme frekansları ile köprü frekansının örtüşmesi sonucu ortaya çıkan bu durum köprünün emniyetini etkilememekte fakat kullanım sırasında hissedilen bir konfor problemi yaratmaktadır. Köprünün uzunluğu göz alındığında doğal salınım frekansının düşük olması normaldir. Amerikan şartnamesi (ASSHTO SRCH I-GSDPB-ENGL 1997, bölüm 1.3.2 Vibrations'a) göre köprü frekansının 3 Hz altında olmaması gerektiği belirtilmektedir. Fakat 3 Hz altında kalmasının kaçınılmaz olduğu durumlarda, köprü ağırlığı  $f \geq 2.86 \cdot \ln(180/W)$  formülüyle kullanılarak, söz konusu köprü için izin verilen frekansın ( $W=50$  ton, 110 kips için) 1.41 Hz olduğu hesaplanmaktadır. Fakat EN 1990 Avrupa kodunda kalabalık yürüyüşlerde titreşim ivmelerinin  $0.4 \text{ m/s}^2 - 0.7 \text{ m/s}^2$  değerinden yüksek olmaması gerektiği vurgulanmaktadır. Köprünün 1.6 Hz olarak ölçülen ilk modu, şartnameden hesaplanan 1.44 Hz'den büyük olmakla beraber ölçülen ivmelerin  $0.4 \text{ m/s}^2$  değerine yakın bulunması sebebiyle ayarlı ağırlık sönümleyiciler kullanılarak titreşim probleminin azaltılması, kullanıcı konforu açısından tercih edilebilir.

Kablo kuvvetlerini, titreşim yerine oluşturulan bir statik gergi kuvveti ölçüm aleti yoluyla ölçebilmek için ön çalışmalar yapılmıştır. Fakat, geliştirilme çalışmaları süren basit uygulanabilir gergi ölçüm cihazı üzerinde bulunan el kantarının hassaslığı, kablo eksenel

kuvvet ölçümleri için yeterli olmadığından ve kablo yüzeyinin girintili ve çıkıntılı olması sebepleriyle cihaz geliştirilmesi çalışmalarında istenilen hassasiyet sağlanamamış ve 200'e yakın kez yapılan tüm kablo ölçümleri, kablo titreşim frekansları ölçülerek yapılmıştır.



Şekil 66 – Kablo titreşim ve birim deformasyon (şekil değiştirme) ölçümleri yapılması.

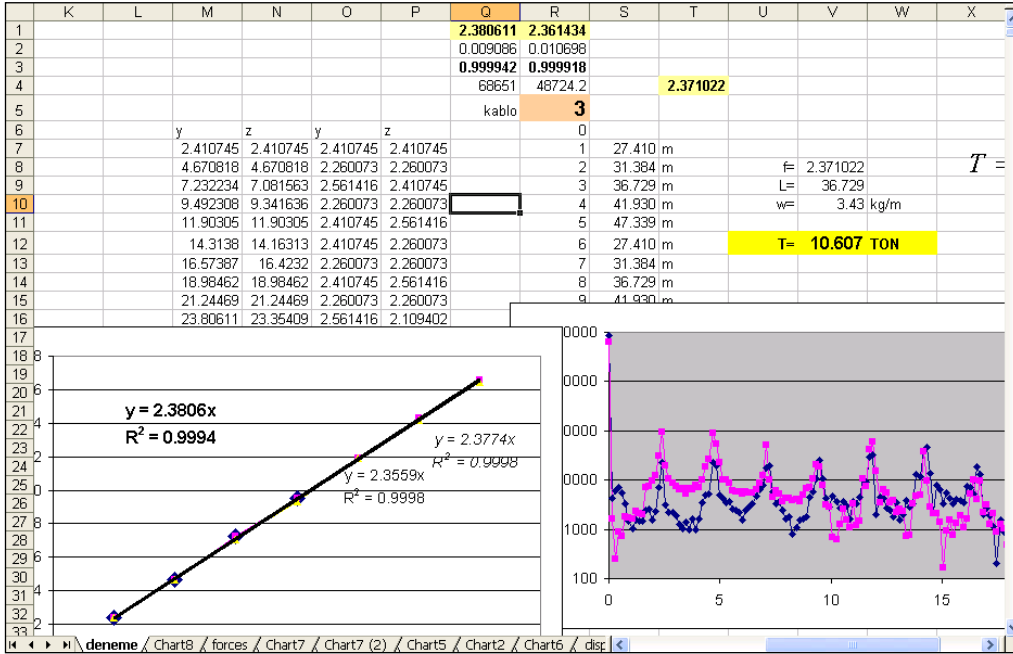


Şekil 67 – Kablo statik gergi ölçüm cihazı, ölçüm deneme çalışmaları.

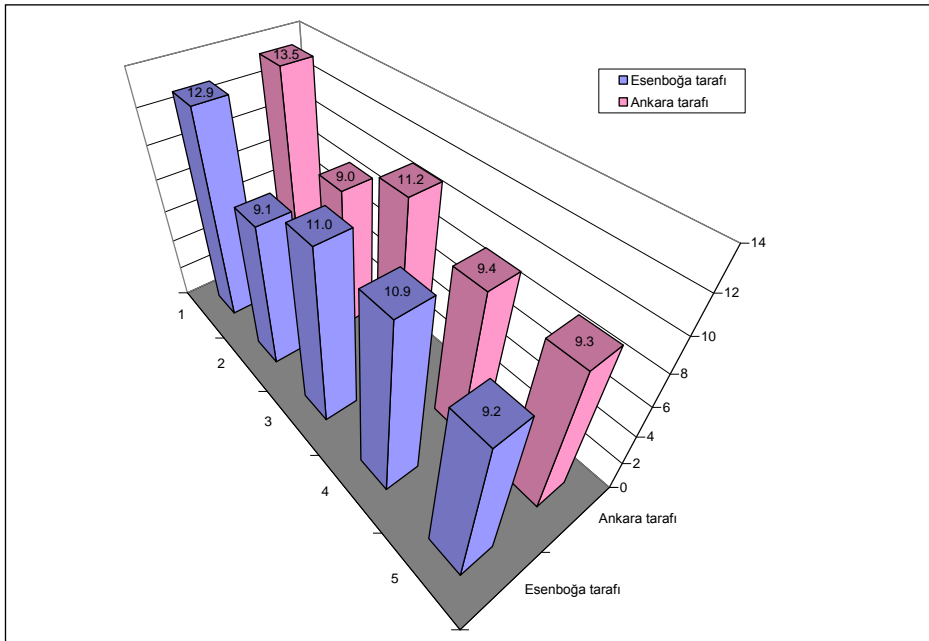




Her gergi işleminin sonrasında değişen kablo kuvvetleri, Excel ortamında yazılan bir program sayesinde anında ölçülebilmiş ve kaydedilebilmiştir. Kablo titreşim kuvvetleri kabloya dik olan iki eksen yönünde okunmuş ve eksenel kuvvetler her iki ivme kaydı kullanılarak hesaplanmıştır. Kablonun birden fazla titreşim modu ölçülmüş ve ölçülen ilk 7 frekans değerleri kullanılarak en iyi eksenel yük ölçümü yapılmıştır.

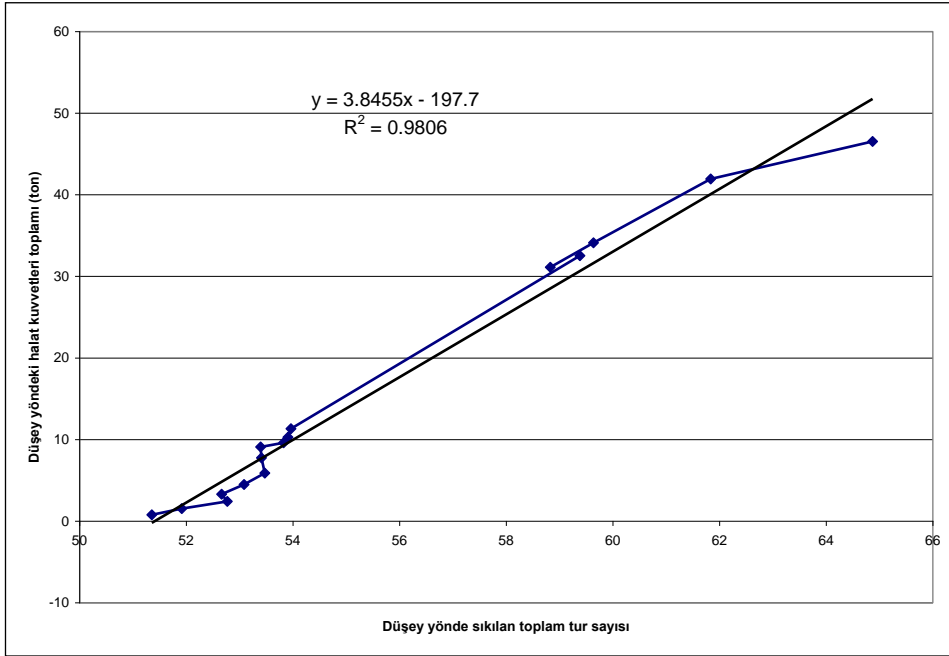


Şekil 69 – Geliştirilen Excel yazılımı

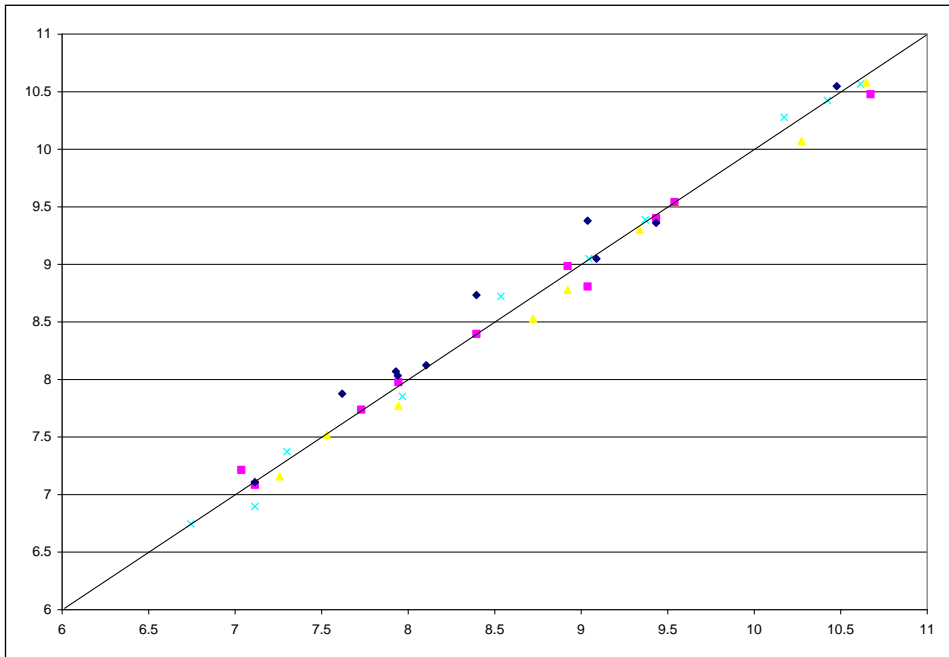


Şekil 70 – Deneysel olarak eşitlenen kablo gergi miktarları

Halatların gergi işlemleri sırasında, köprü halatlarından okunan tüm gergi kuvvetlerinin düşey bileşenleri toplamı ile köprü halatlarına uygulanan toplam germe tur sayısı arasındaki ilişki grafiksel olarak elde edilmiştir. Köprüye halatlar tarafında düşey yönde uygulanan toplam kuvvetin, toplam germe tur sayıları ile doğru orantılı olduğu ve köprünün doğrusal davrandığı görülmüştür.

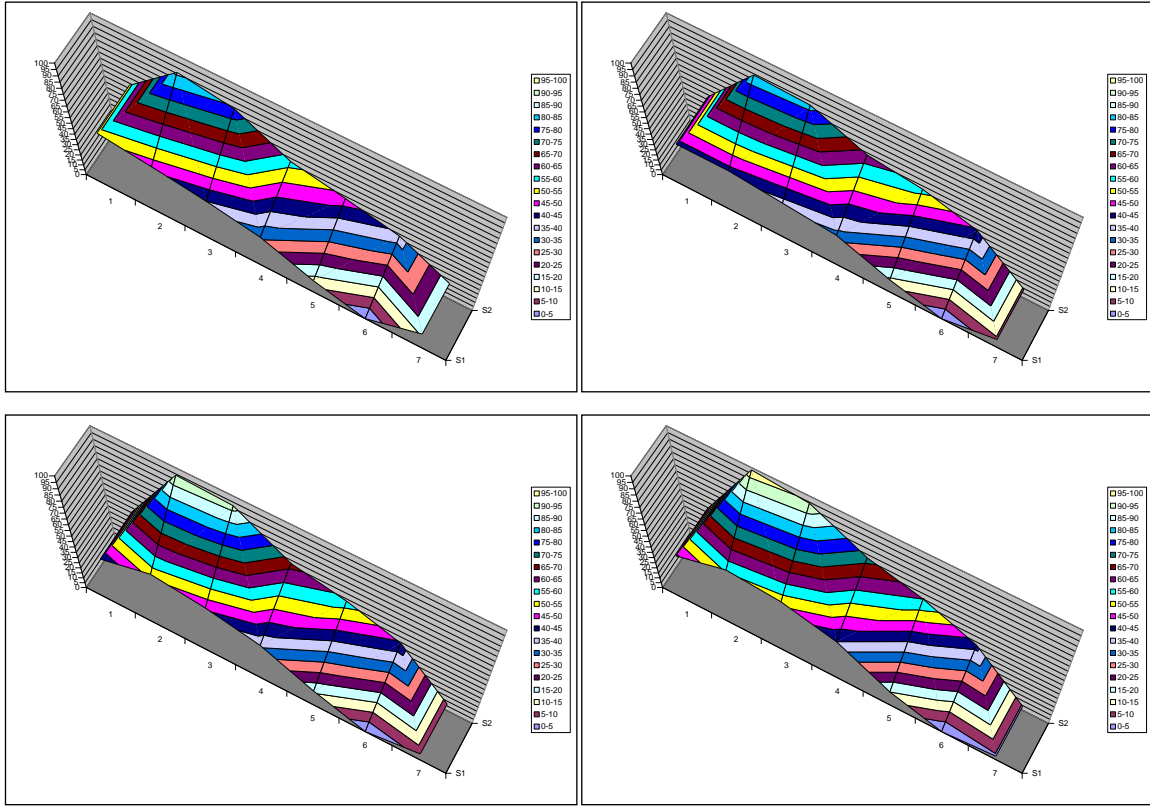


Şekil 71 – Deneysel olarak eşitlenen kablo gergi miktarları

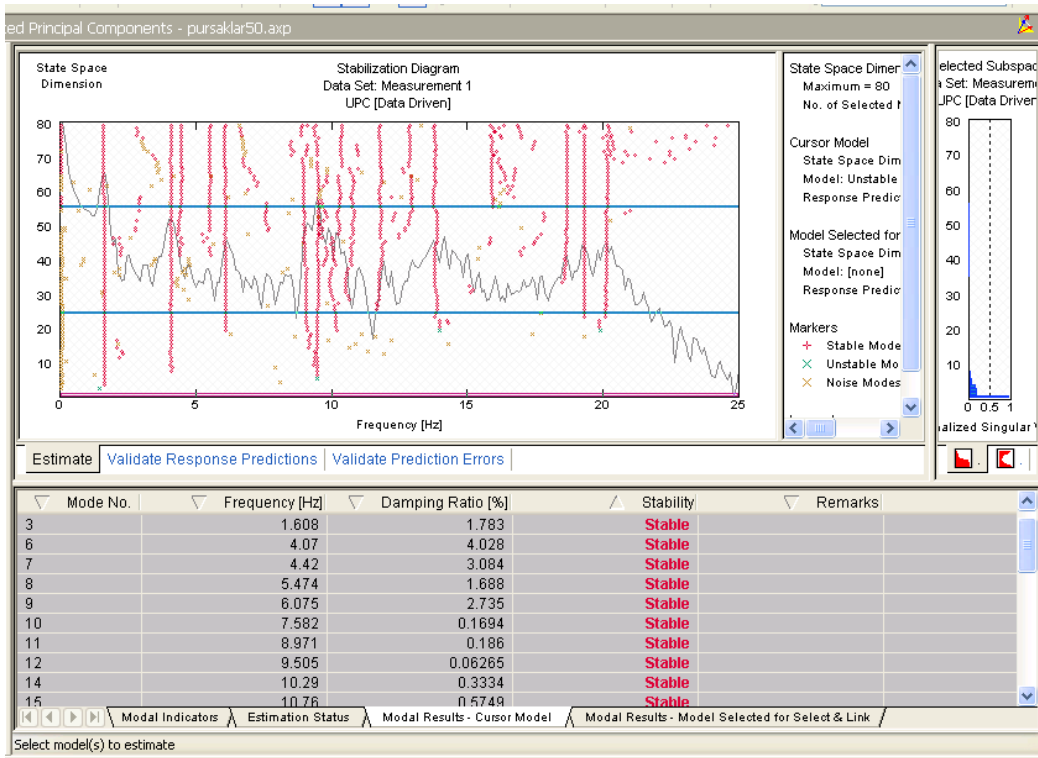


Şekil 72 – Tahmin edilen ve ölçülen kablo kuvvetleri arasındaki ilişki (x: ton ; y:ton)

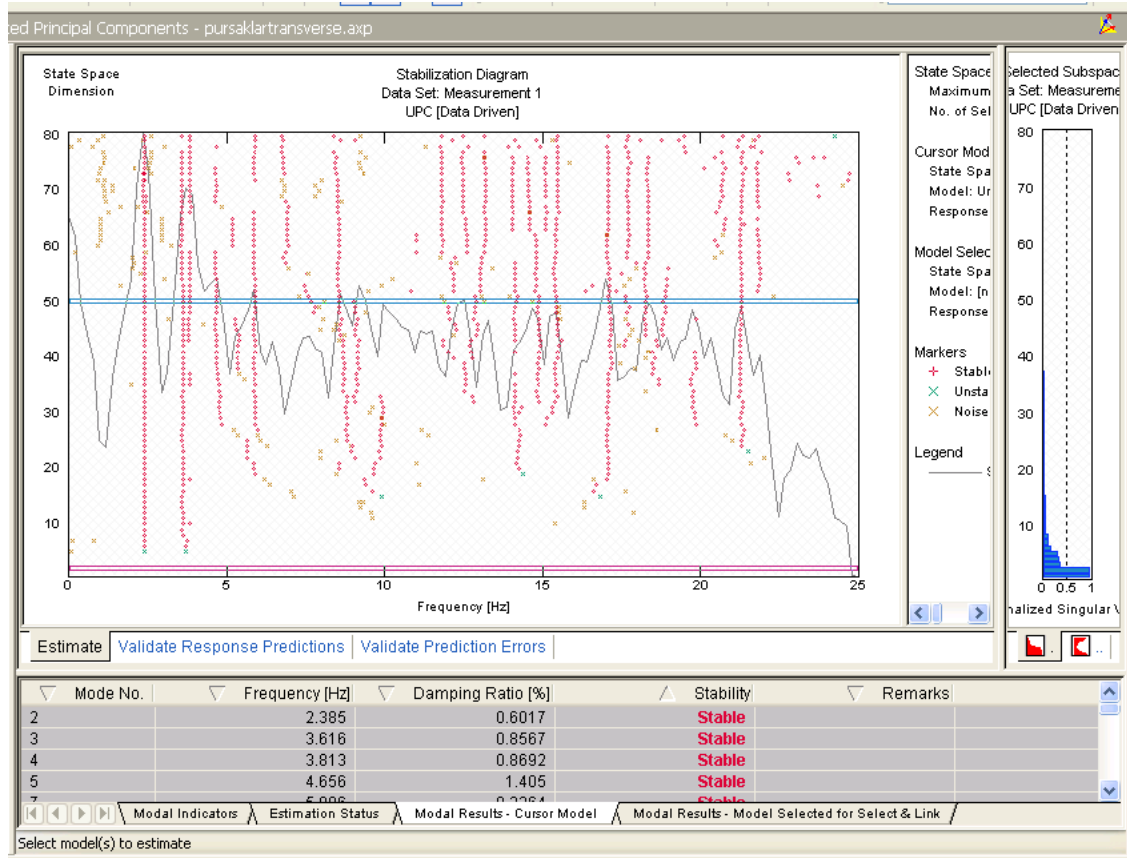




Şekil 75 – Pin deplasmanlarının germe çalışmalarındaki üç boyutlu görüntüsü



Şekil 76 – Köprüden alınan hassas ivme okumalarının frekans uzayındaki dağılımları ve sönüm oranları (düşey yön)

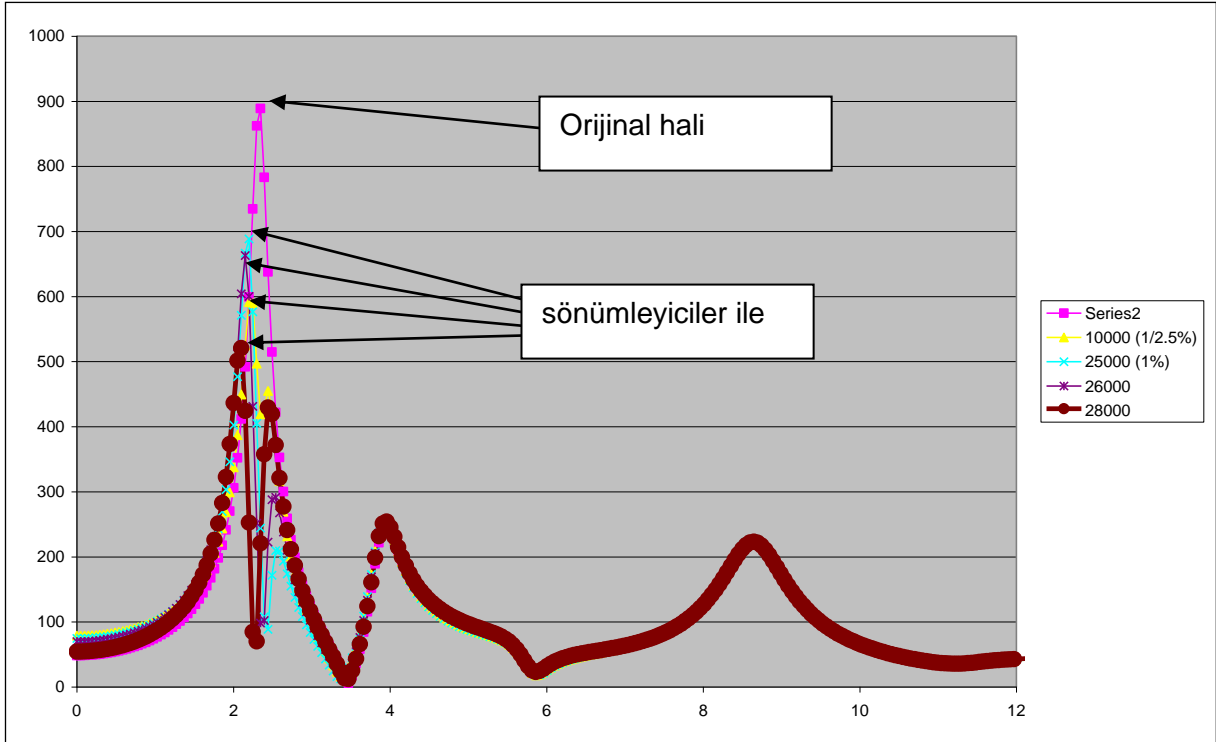
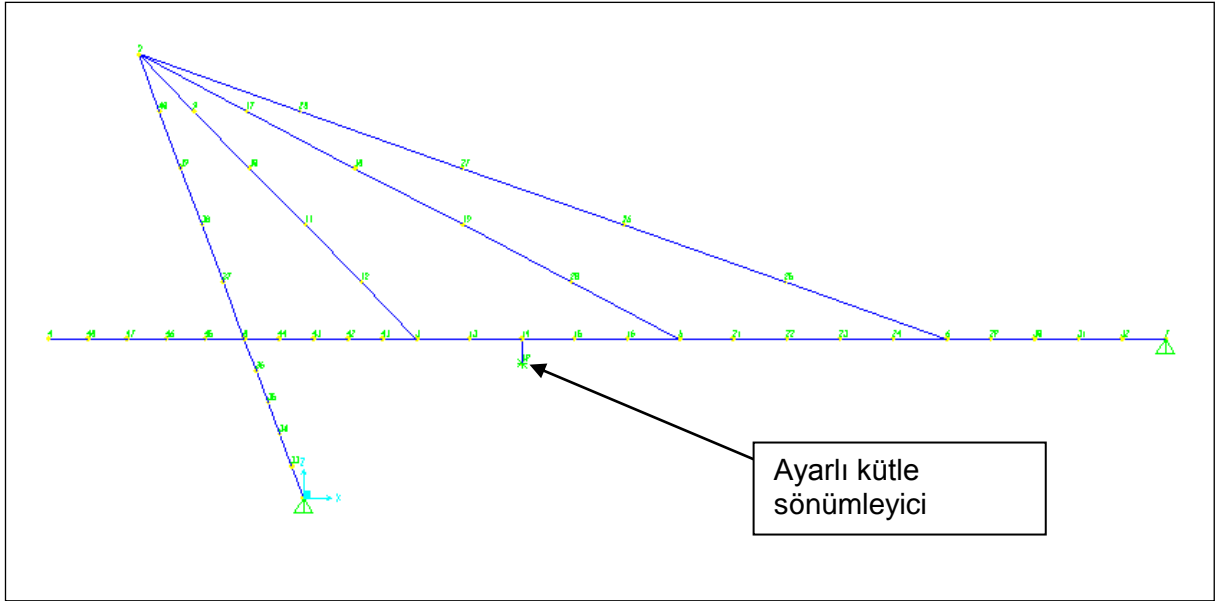


Şekil 77 – Köprüden alınan hassas ivme okumalarının frekans uzayındaki dağılımları ve sönüm oranları (yanal yön)

#### 4.1.4.4 Köprü döşeme titreşim problemi

Bina döşeme titreşim probleminde olduğu gibi, büyük köprülerde (örneğin Boğaziçi köprüsü), büyük köprü halatlarında (örneğin Fatih Sultan Mehmet köprüsü halatları), ya da küçük köprü döşemelerinde (örneğin Esenboğa yaya köprülerinde) titreşim problemleri olabilir. Titreşim problemlerinin makine mühendisliği yapılarında (örneğin araba eksozu) ayarlı kütle sönümleyiciler (tuned mass damper) ile çözüldüğü bilinmektedir. Deneme amaçlı olarak basit bir köprü modeli oluşturulmuş ve köprünün kütle ve rijitliği, ilk mod frekansının 2-2,5 Hz civarında olacak şekilde ayarlanmıştır. İlk modunda elde edilen titreşim miktarının azaltılması için köprü modelinin orta bölgesinden, köprünün toplam ağırlığının %0,4'ü daha sonra da %1'i kadar bir ağırlık asılarak mode titreşimlerinin sönümlenebildiği görülmüştür. Ağırlığın köprüye bağlandığı yay sabiti ayarlanarak titreşim frekanslarının ince ayarı yapılarak sönümlenme oranının optimum seviyeye çekilmesi sağlanmıştır (Şekil 78). Köprü ağırlığının sadece %1'i kullanılarak ilk mod titreşim değerlerinin yarı yarıya azaltılabileceği

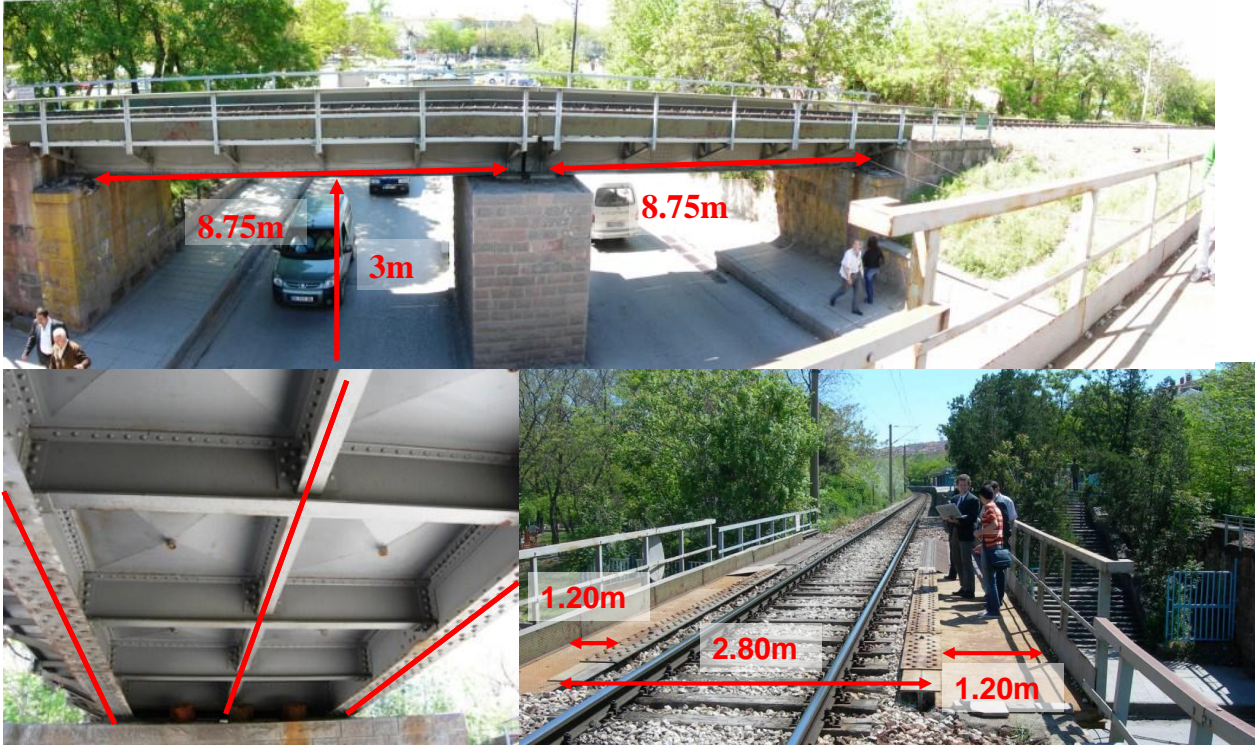
görülmektedir ve bu hesaplama ümit vericidir. İleride gerçek yaya köprülerinde bu tekniğin uygulanması planlanmaktadır.



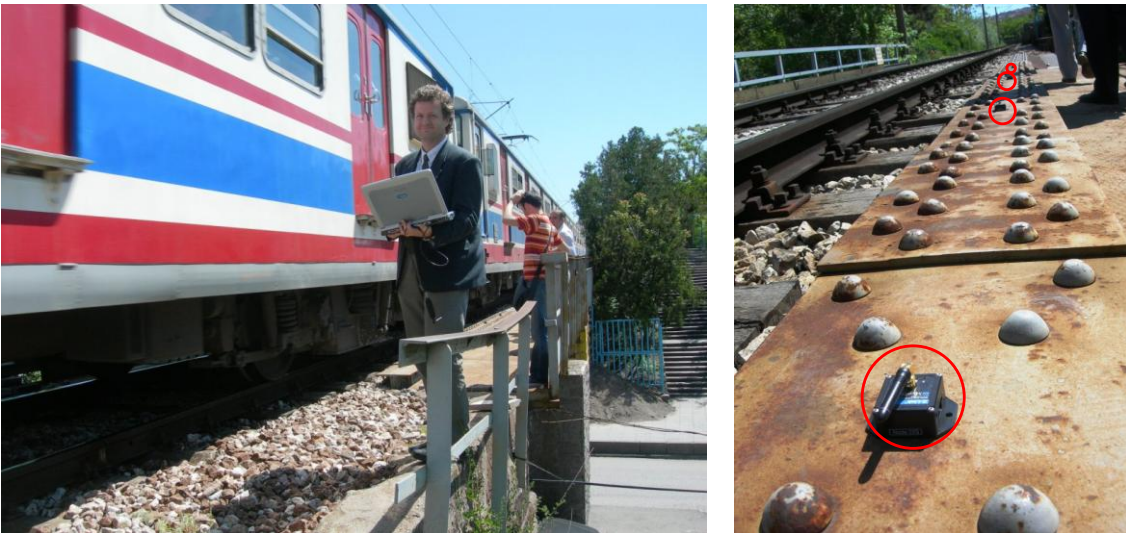
Şekil 78 – Jenerik köprü modeli ve ayarlı kütle sönümleyicinin frekans uzayında etkisi.

#### 4.1.4.5 Tren yolu köprüsü (tek açıklıklı, kiriş)

TCDD ile sözü geçen köprü üzerinde ölçüm çalışmaları yapabilmek için izin alınması hususunda görüşülmüş ve çelik bir tren yolu köprüsü üzerinde ölçüm çalışmaları yapılmak üzere izin alınmıştır. Tren geçerken yapılan ölçümler sırasında, kablosuz ivme ölçerler ile okumalar alınmıştır (Şekil 79, Şekil 80).

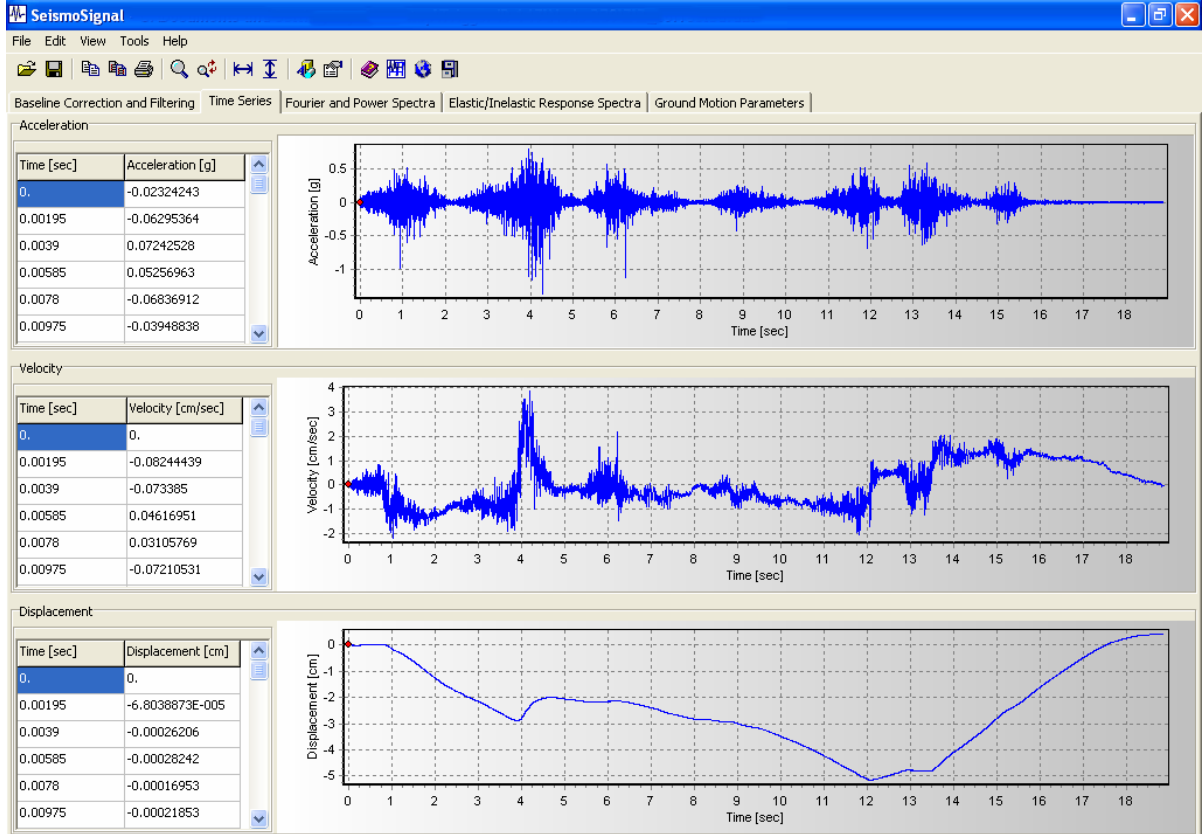


Şekil 79 – Kurtuluş çelik tren köprüsü.



Şekil 80 – Kablosuz ivme ölçerler ile okuma alınması.

Toplanan ivme okumaları zaman ekseninde integral alınarak hız ve deplasman değerleri elde edilmeye çalışılmıştır (Şekil 81). Baz çizgisi düzeltmesi yapılmasına rağmen, kümülatif olarak biriken hataların önemli hatalara sebep olabileceği görülmektedir. Zira 5cm deplasman, 875 cm uzunluğundaki köprüde 1/175 gibi yüksek oranda sehime sebep oluyor görülmektedir. Okunan ivme değerlerinin de 1g'den (9,81 m/s<sup>2</sup>) daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 81 – Kurtuluş köprüsünden okunan ivme değerlerinden hız ve deplasman hesaplama çalışmaları.

Yapılan çalışma sonucunda, köprünün köprü deplasmanlarının ivme ölçümlerinden yola çıkılarak hesaplanmasının teorik olarak çift entegrasyon ile mümkün görünmesine rağmen pratik olarak mümkün olmadığına karar verilmiştir. Okuma alınan ivme ölçerlerin hassasiyeti ya da gürültü seviyesi ve okuma hızı değiştirilirse, kümülatif olarak toplanan hataların azaltılması mümkün olabilir ve daha gerçekçi sonuçlar alınabilir.



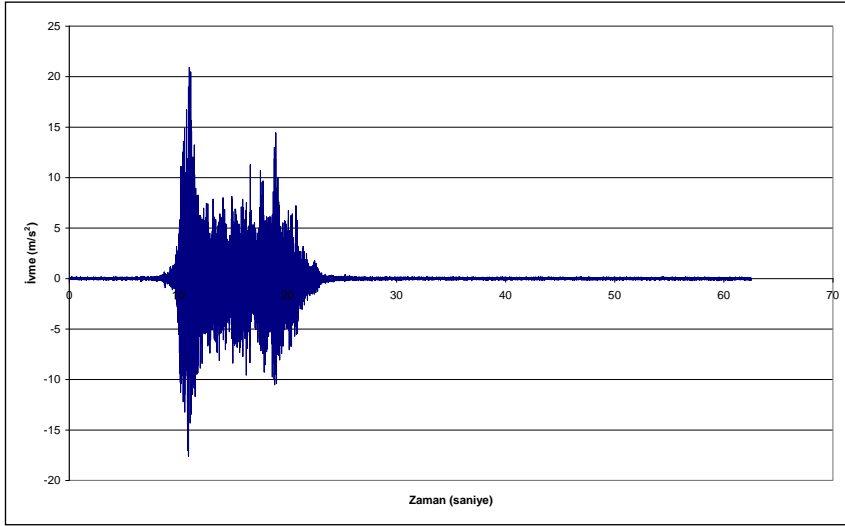
#### 4.1.4.6 Tren yolu köprüsü (üç açıklıklı, makas)

Kızılırmak nehri üzerinde ve Kırıkkale yakınında bulunan üç açıklıklı, çelik makas tren yolu köprüsünün tren geçerken titreşim okumaları alınmış ve alınan okumaların nasıl değerlendirilebileceği konusunda çalışmalar yapılmıştır.



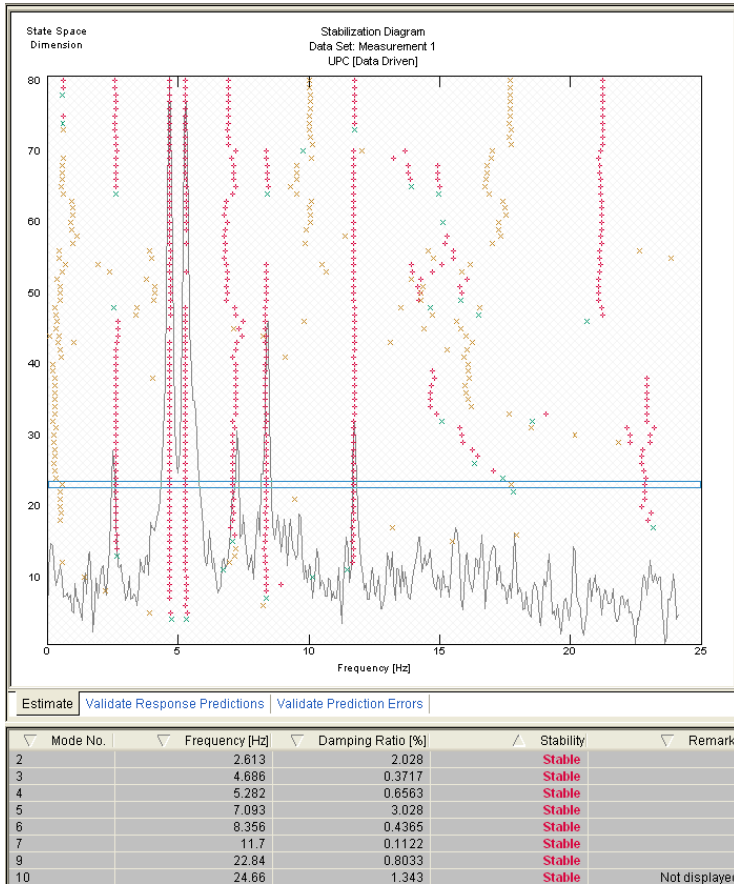
Şekil 82 – Üç açıklıklı makas tren yolu köprüsü, dinamik ölçüm çalışmaları.

Alınan okumaların ilk değerlendirmesinde, tren geçişi sırasında ivme değerlerinin  $9,81 \text{ m/s}^2$  ( $1g$ ) değerini geçtiği ve en yüksek  $2g$  mertebesine ulaştığıdır. Literatür tarandığında, hızlı tren köprülerinde en yüksek ivme değerlerinin  $2 \text{ m/s}^2$  nin altında gerçekleştiği görülmektedir. Eurocode  $3,5 \text{ m/s}^2$  ile ivmeleri sınırlamaktadır, fakat en büyük ivme değerinin  $2 \text{ m/s}^2$  nin altında olması tavsiye edilmektedir. Ölçüm yapılan köprülerde, okunan ivme değerlerinin  $20 \text{ m/s}^2$  den büyük olması endişe vericidir. Özellikle vagonlardan daha ağır olan lokomotifin geçişi sırasında ivme değerlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 83 – Üç açıklıklı makas tren yolu köprüsü, izleme ve ölçüm çalışmaları.

Tren geçişi sırasında ve tren geçişini tamamladıktan sonra köprünün yaptığı serbest salınımlar analiz edilerek, köprünün doğal salınım modları ve sönüm oranları elde edilmiştir (Şekil 84). Yapılan çalışma sonucunda, köprünün doğal salınım frekanslarının oldukça düşük olan 2,6 Hz ile başladığı ve sönüm oranlarının genelde %2'den küçük olduğu görülmüştür.

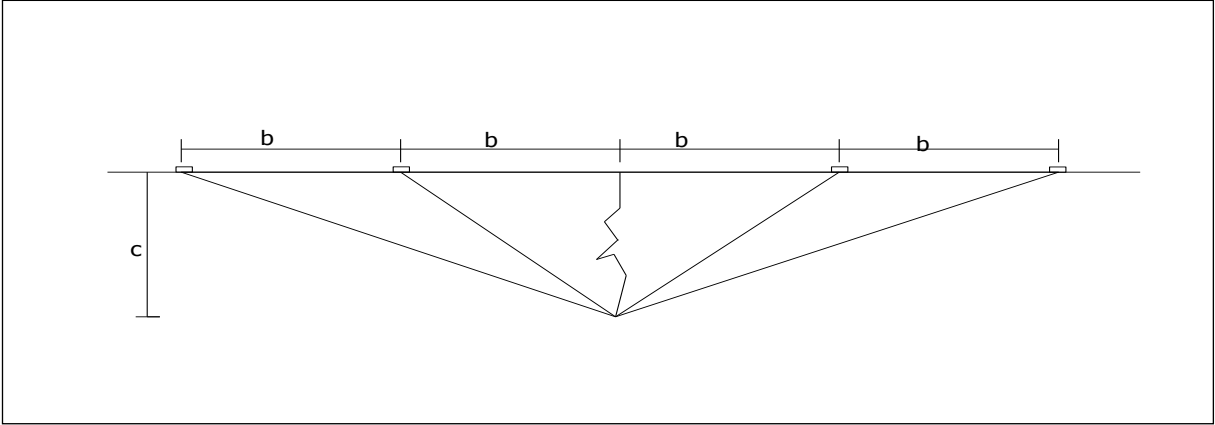


Şekil 84 – Üç açıklıklı makas tren yolu köprüsü, izleme ve ölçüm çalışmaları.

#### 4.1.4.7 Ultrasonik ölçüm çalışmaları

Tahribatsız test ve muayene ölçümlerinden sıkça kullanılan bir diğeri ultrasonik ses ölçümleridir. Malzeme içinde ultrasonik sesin yayılım hızı ölçülerek malzeme hakkında bilgi sahibi olunabilir. Sesin, sert malzemelerde göreceli olarak daha hızlı ilerlediği bilinmektedir. Özellikle betonarme elemanlarda beton kalitesini belirlemek için kullanılan bir tekniktir.

Betonarme kolon ve kirişlerde elastik modül değerini belirlemek için ön çalışmalar yapılmıştır. Kirişlerde bulunan çatlakların derinliğini ölçmek için çatlak olan bölgenin etrafında  $b$  ve  $2b$  mesafeden ses ölçümleri tekrarlanıp, iki ölçüm arasında sesin ilerleme süresi arasında oluşan farktan çatlakın derinliği hesaplanmıştır. Şekil 85'te görüldüğü gibi, çatlakla  $b$  mesafeden yapılan ölçümde sesin kat etmesi gereken mesafe  $2\sqrt{b^2+c^2}$ ,  $2b$  mesafede ise  $2\sqrt{4b^2+c^2}$ 'dir. Ses hızının aynı malzeme içinde sabit olduğu varsayılarak ölçülen zaman farkından  $c$  mesafesi hesaplanabilir.  $2\sqrt{b^2+c^2}=t_1 \cdot V$  ve  $2\sqrt{4b^2+c^2}=t_2 \cdot V$  olarak iki eşitlik yazılıp, eşitliğin iki tarafı birbirine bölündüğünde,  $[(b^2+c^2)/(4b^2+c^2)]=(t_1/t_2)^2$  elde edilir.



Şekil 85 – Ultrasonik okuma ile çatlak derinliğinin ölçülmesi.

Çatlak derinliğinin ölçülmesi çalışmaları ODTÜ, İnşaat Mühendisliği binası kirişlerinde gözlemlenen birkaç seyrek çatlak üzerinde denenmiştir. Uygulamanın yapıldığı 4 kirişten birisinin genel görünüşü ve test sonuçları Şekil 86'da verilmektedir.



Kiriş	b (mm)	t1 (µsec)	t2 (µsec)	Çatlak derinliği (mm)
1	100	144	237	87
2	100	194.7	327	80
3	100	424	440	61.7
4	100	119.8	171.4	13.7

Şekil 86 – Ultrasonik okuma derinliğinin ölçülmesi, pilot uygulamalar.

#### 4.1.4.8 KAM fabrika kolon içi boşluk hesaplaması

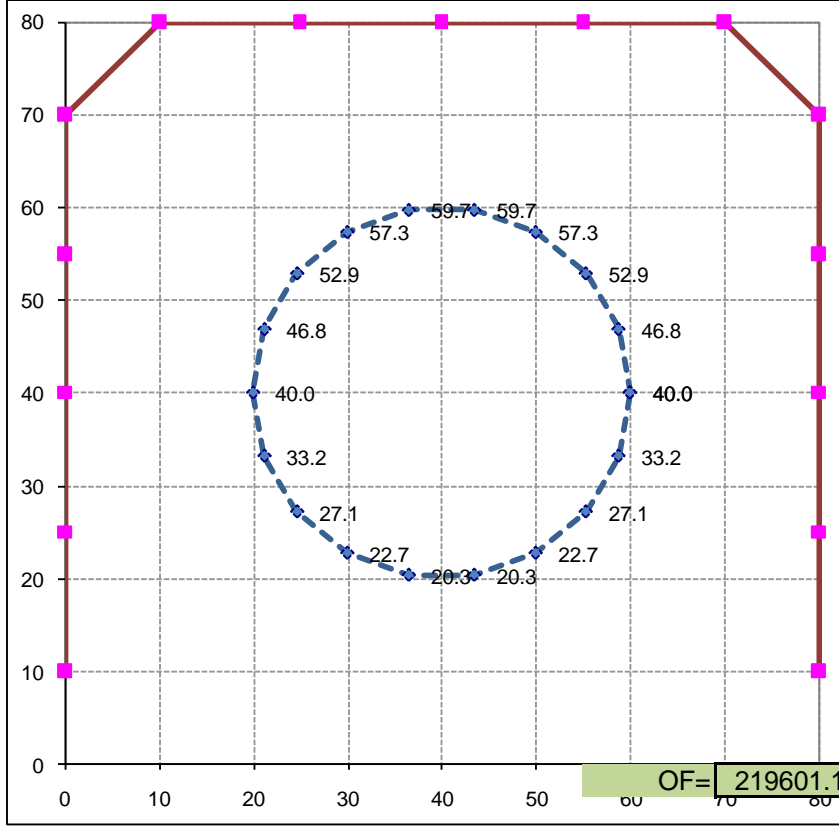
KAM fabrikasında imal edilen kolonlar içinde boşluk bırakılabilmesi için kartondan silindirik elemanlar, donatılar arasına yerleştirilmekte ve beton dökümü, prefabrik kolon yatay konumda iken yapılmaktadır. Fabrika yetkililerinin endişesi, kolona dökülen betonun kaldırma kuvveti sebebiyle karton kutunun ezilerek şeklini kaybetmesi ya da konumunun bozularak yukarı yönde hareket etmesidir.

Yapılan çalışma kapsamında, betonu dökülmüş ve kalıptan çıkartılmış kolonun etrafında her kenarında 5 eşit aralıklı nokta olacak şekilde seçilen noktalar kullanılarak karşılıklı ultrasonik hız ölçümleri alınmıştır. Elde edilen ultrasonik hız ölçümleri baz alınarak, ölçüm alınan iki nokta arasındaki mesafe ile alınan okuma süresi arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilmiştir. Ultrasonik hızın malzeme içinde sabit olduğu ve kolon içine yerleştirilen karton kutunun boşluk oluşturması sebebiyle sesin geçişini engelleyeceği dolayısıyla sesin boşluğun etrafını dolaşmak zorunda kalacağı varsayımı yapılmıştır. Noktalar arasında analitik olarak hesaplanan en kısa yolu ultrasonik sesin kat edeceği süre ile test sırasında ölçülen ultrasonik sesin ulaşım süreleri arasındaki farkların toplamı hata (OF: Objektif fonksiyon) olarak kabul edilmiştir. OF'nin sıfır olması durumunda, simülasyon ve ölçümler tamamiyle bağdaşacaktır. Ortadaki boşluğu tanımlayan karton kutunun koordinatları optimizasyon sırasında değiştirilerek, ölçüm ve simülasyon süreleri arasındaki toplam farkların en aza indirgenmesi için bir çalışma yapılmıştır.

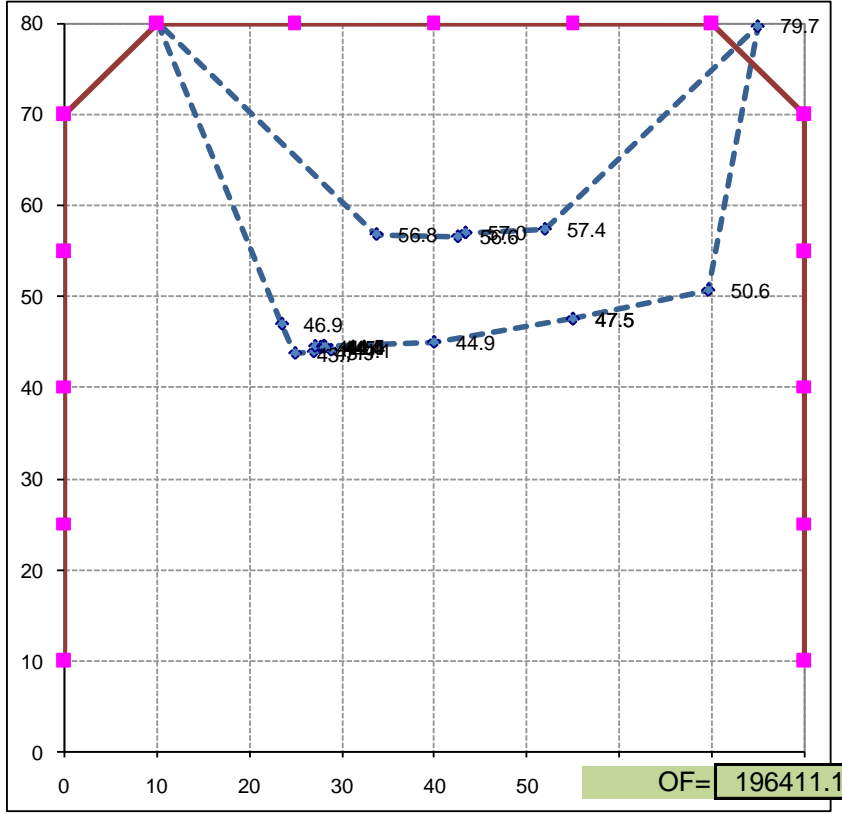
Betonarme ve içi boş olan kolonun optimizasyon öncesi kabul edilen ideal durumunun kesiti tam merkezde bir yuvarlak olarak kabul edilmiştir (Şekil 87). Daha sonra optimizasyon

sonucunda OF'nin en düşük değerini veren konfigrasyon Şekil 88'de olduğu Şekilde bulunmuştur.

Yapılan bu çalışma sonucunda, kolonun merkezinde bulunan silindirik karton boşluğun, beton basıncı sebebiyle yukarı hareket ettiği ve deforme olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 87 – Betonarme içi boş kolon, optimizasyon öncesi kabul edilen durum (kesit grafiği)

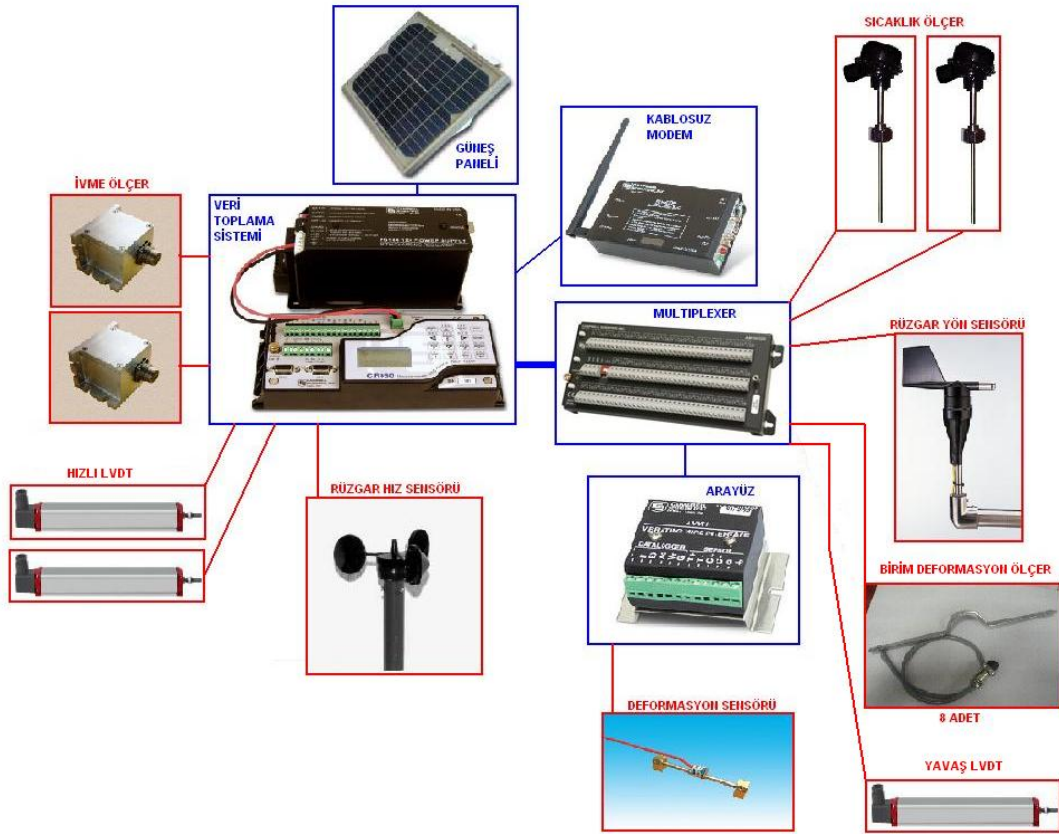


Şekil 88 – Betonarme içi boş kolon, optimizasyon sonrası elde edilen durum (kesit grafiği)

#### 4.1.4.9 Bolu Viyadüğü izleme çalışmaları

Bolu Viyadüğü, hem 58-59 açıklıklı ve 2,3 km uzunlukta bulunan büyüklüğü hem de üzerinde bulunduğu İstanbul – Ankara otoyolunun önemi sebebiyle ülkemizde bulunan en önemli köprülerden birisidir. 1999 Adapazarı ve Düzce depremleri sırasında hasar görmüş olması, köprü ayakları arasından yüzey fay kırılığının geçmiş olması gibi sebeplerle davranışı ayrıca merak edilmekte ve yapısal sağlık izlemesi yapılması için kuvvetli bir aday olarak görülmektedir.

2008 yılı sonbahar aylarında Karayolları Genel Müdürlüğü, Otoyolları Daire Başkanlığı ile temasa geçilerek, araştırma projesi kapsamında köprüye sağlık izleme sistemi ön sensörlerinin takılması için izin başvurusunda bulunulmuştur. Hazırlanan protokol kapsamında, 7 – 8 Kasım 2008 tarihlerinde Bolu 1. Viyadük'ü üzerinde Karayolları Genel Müdürlüğü ekipleri gözetiminde Dr. Ahmet Türer ve proje asistanı Hakan Dinçer tarafından yapısal sağlık izleme sistemi montaj çalışmaları yapılmıştır. Montajı yapılan sistemin şematik gösterimi Şekil 89'da verilmektedir.



Şekil 89 – Bolu Viyadüğüne takılan izleme sisteminin şematik gösterimi.

Viyadük üzerine, yaya yolunun kenar korkuluklarına ve viyadük altına yapısal sağlık izleme çalışmalarında kullanılacak olan algılayıcılar, bu algılayıcıların bağlandığı veri toplama sistemi ve bütün sisteme güç sağlayacak olan güneş paneli yerleştirilmiştir. Yaya yolu korkuluğuna Kara Yolları Genel Müdürlüğü'nce yerleştirilmiş olan direğe bir adet nem ve sıcaklık algılayıcısı, bir adet rüzgar yön algılayıcısı, bir adet rüzgar hız ölçüm cihazı ve güneş paneli takılmıştır. 48 nolu açıklığın birleşim derzine, buradaki hareketi ölçmek amacıyla, yaya yolu dışından olmak üzere, bir adet 60cm kapasiteli lineer potansiyometre yerleştirilmiştir. Diğer algılayıcılar viyadük altına Karayolları Genel Müdürlüğü'nce sağlanan platform kollu vinç aracıyla ulaşılmak suretiyle kurulmuştur. Dört adet birim deformasyon ölçer (strain gage), 48 ve 49'uncu ayaklar arasındaki açıklıkta, 48'inci ayağa yakın olacak şekilde ve yol üzerinde 3'üncü şeritten emniyet şeridine doğru sıralanacak biçimde viyadük altındaki kirişlere yerleştirilmiştir. Bu cihazların yerleştirilmesinde ağır araçlar tarafından kullanılan şeritlerin altındaki kirişlerin daha fazla yükleneceği ve bunlarda oluşacak deformasyonların daha fazla olacağı hususu dikkate alınmıştır. Bir adet titreşen telli (VWG) deformasyon ölçer ve omega tipi birim deformasyon ölçer kontrol amacıyla aynı noktaya takılmıştır. Ayrıca VWG üzerinden sıcaklık ölçümü de alınabilmektedir. 48'inci ayağın viyadük tablisesine birleştiği ve

sismik izolatörün bulunduğu bölgeye, tabliyenin ayağa göre göreceli hareketini ölçmek ve deprem durumunda buradaki hareketliliği ölçebilmek için, iki adet iç içe geçen boru ve iki adet lineer potansiyometreden oluşan sistem yerleştirilmiştir. Aynı bölgeye sıcaklık değişimlerini ölçmek için bir adet termokup yerleştirilmiştir. Veri toplama sistemi, kanal çoklayıcı, batarya, güneş paneli için arabirim, VWG are birimi olan AVW1 ve veri toplama sistemiyle uzaktan iletişimi sağlayacak olan modem, yalıtımlı bir kutu içerisine yerleştirilmiş ve bu kutu 48'inci ayak bölgesine güvenli şekilde sabitlenmiştir. Tüm algılayıcılardan gelen kablolar bu kutuya bağlanmış ve nem yalıtımları yapılmıştır. Daha sonra viyadük üzerine takılması planlanan, ivme ölçerler için kablo ve bağlantılar hazırlanmış, bu kablolar yaya yolu kenarına bağlanarak sabitlenmiştir. İkinci aşamada takılacak ivme ölçerler için köprü altına ulaşım güç olacağı için, veri toplama sisteminden uzatılan kablolar yol kenarına bağlanarak bırakılmıştır. Kurulma çalışmalarına ait fotoğraflar Şekil 90 - Şekil 93'de verilmektedir. Daha sonra satın alımı yapılan ivme ölçerler, bu kablolarla bağlanıp köprü üzerine monte edilmiştir.

Açıklığın ortasına takılması planlanan diğer 4 adet birim deformasyon ölçerler ise karşılaşılan güçlükler sebebiyle takılamamıştır. 7 ve 8 Kasım 2008 tarihlerinde şerit kapatma işlemlerinden sorumlu ekiple temasa geçmekte zorlanması, 7 Kasım tarihinde viyadük altına ulaşmayı sağlayacak olan aracın bağlantı kolunda oluşan teknik sorunlar nedeniyle geç açılması, havanın erken kararması nedeniyle çalışmaların saat 16:00'da sona erdirilmek zorunda kalınması, 8 Kasım tarihinde kanal çoklayıcı sistemin bozulması ve bunun düzeltilmesiyle uğraşılacak zorunda kalınması, geçici jeneratör problemi gibi nedenlerle zaten kısıtlı olan zaman daha da daralarak yapılması hedeflenen bazı çalışmalar bu ziyarette bitirilememiştir.

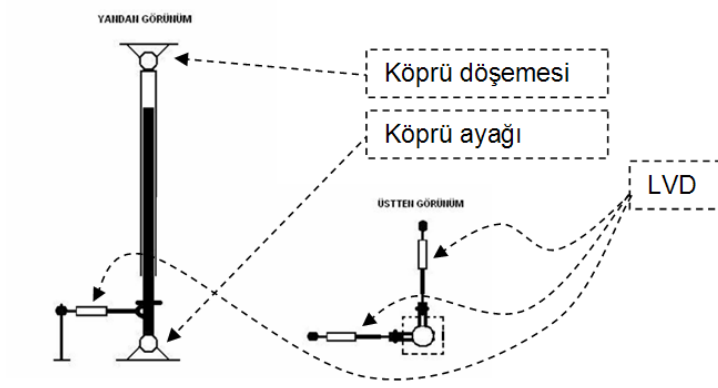




Şekil 90 – Bolu Viyadüğü YSİ sistemi kurulum aşamaları genel fotoğraflar.



Şekil 91 – Bolu Viyadüğü YSI sistemi kurulum aşamaları genel fotoğraflar.



Şekil 92 – Bolu Viyadüğü YSI sistemi için geliştirilen sismik izolatör ölçüm sensörü.

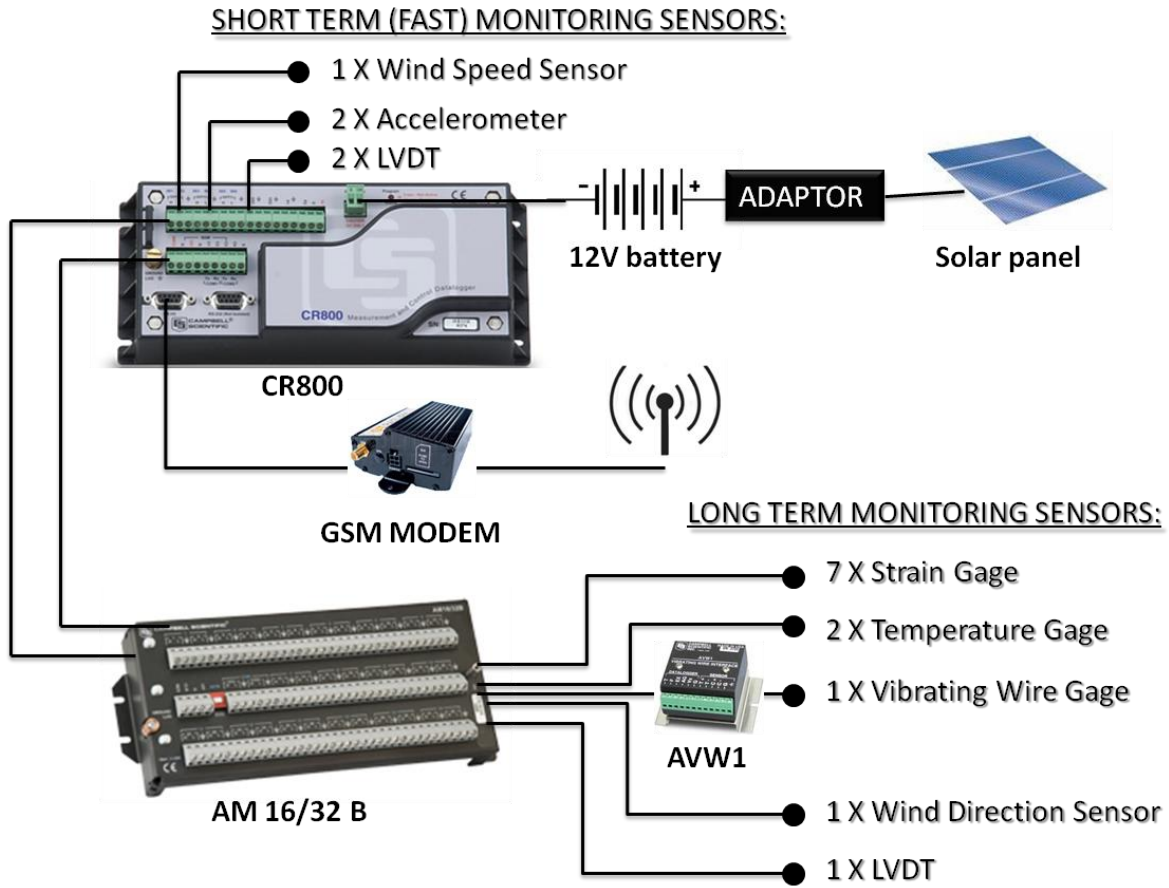


Şekil 93 – Bolu Viyadüğü YSİ sistemi birim deformasyon ölçerler.

Halihazırda, Viyadük üzerine monte edilmiş olarak:

- 1 adet veri toplama sistemi – 6 tek uçlu kanala sahip
- 1 adet çoklayıcı (multiplexer) – tek kanalı 16 kanala genişletmek için
- 1 adet titreşen telli birim deformasyon ölçer (VWG)
- 1 adet VWG okuması için ara birim (AVW1)
- 1 adet VWG'e yapışık sıcaklık ölçer
- 1 adet veri toplama sistemine entegre sıcaklık ölçer
- 3 adet el yapımı birim deformasyon ölçer
- 1 adet sıcaklık ölçümü için termocouple
- 1 adet nem ölçer (%)
- 1 adet sıcaklık ölçer
- 1 adet rüzgar hızı ölçer
- 1 adet rüzgar yönü ölçer
- 1 adet 12V batarya
- 1 adet güneş paneli
- 1 adet batarya şarj ünitesi
- 1 adet 60cm stroka sahip deplasman ölçer (genleşme derzine yerleştirilmiş şekilde)
- 2 adet 25cm stroka sahip deplasman ölçer (ayak ve tabliye arası hareketi x ve y yönlerde ölçmek amacıyla)
- 1 adet GSM modem
- 1 adet Turkcell data hattı

bulunmaktadır. Viyadüğe takılan izleme sisteminin şematik gösterimi Şekil 94'te verilmektedir.



Şekil 94 – Bolu Viyadüğüne takılan izleme sistemi bağlantılarının şematik gösterimi.

Toplam 22 kalemden oluşan yapısal sağlık izleme (YSİ) sisteminden her 20 dakikada 1 olmak üzere, toplam 15 kanaldan veri toplanmaktadır. Bu veriler sırasıyla 1) panel sıcaklık, 2) termocouple 3) sıcaklık, 4) %nem, 5) VWG sıcaklık, 6) VWG freq, 7) rüzgar hızı, 8) rüzgar yönü, 9) 7inci kanal birim deformasyon ölçer, 10) 8inci kanal birim deformasyon ölçer, 11) 9uncu kanal birim deformasyon ölçer, 12) 60cm stroklu deplasman ölçer, 13) 25cm stroklu deplasman ölçer, 14) 25cm stroklu deplasman ölçer, 15) batarya voltajı. Şekil 95’de görülen batarya voltaj grafiği, kış aylarında zaman zaman bataryanın güneş paneli ile şarj edilemediğini göstermektedir. Kış aylarında karşılaşılan yağmurlu ve sisli havalar ile kar örtüsünün güneş panelini örttüğü zamanlarda güneş panelinin şarj görevini bir süreliğine tam olarak yapamadığı görülmektedir. Batarya bu süre zarfında ölçümlerin alınabilmesi için veri toplama sistemine elektrik sağlama görevini yerine getirmektedir. Şekil 96’de derz açıklığının kış ve yaz ayları arasında yaklaşık 8cm açılıp kapandığı görülmektedir. 10 açıklıkta yaklaşık 390m boyundaki parçanın Şekil 97 ve Şekil 103’da görüldüğü gibi 25 C derecelik sıcaklık değişiminde  $(10 \mu\epsilon/C) * (20 C) * (390 000 \text{ mm}) = 78 \text{ mm}$  değişiklik olması beklenmektedir. Ölçülen derz genişliği değişimi, beklenen sınırlar dahilindedir. Bu ölçümler sonucunda, derz

mekanik sisteminin çalışmakta olduğu ve ayaklar üzerinde bulunan sismik izolatörlerin sıcaklık değişiminde köprünün hareketine izin verdiği görülmektedir.

Şekil 98 ve Şekil 99 köprü üzerinde bulunan rüzgar hız ve yön sensörlerinden alınan verileri grafiksel olarak göstermektedir. Her iki grafik de incelendiğinde, rüzgarın ölçüm yapılan süre boyunca en fazla 40 km/saat hızla estiği tespit edilmiştir. Bu süratte esen rüzgar, aşağıda verilen formüller kullanılarak (TS498) yaklaşık olarak 7.8 kgf/m<sup>2</sup> ya da 0.078 kN/m<sup>2</sup> kuvvet oluşturur.

$$q = \frac{\rho V^2}{2g} \quad \text{kN/m}^2$$

$$q = \frac{v^2}{1600} \quad \text{kN/m}^2$$

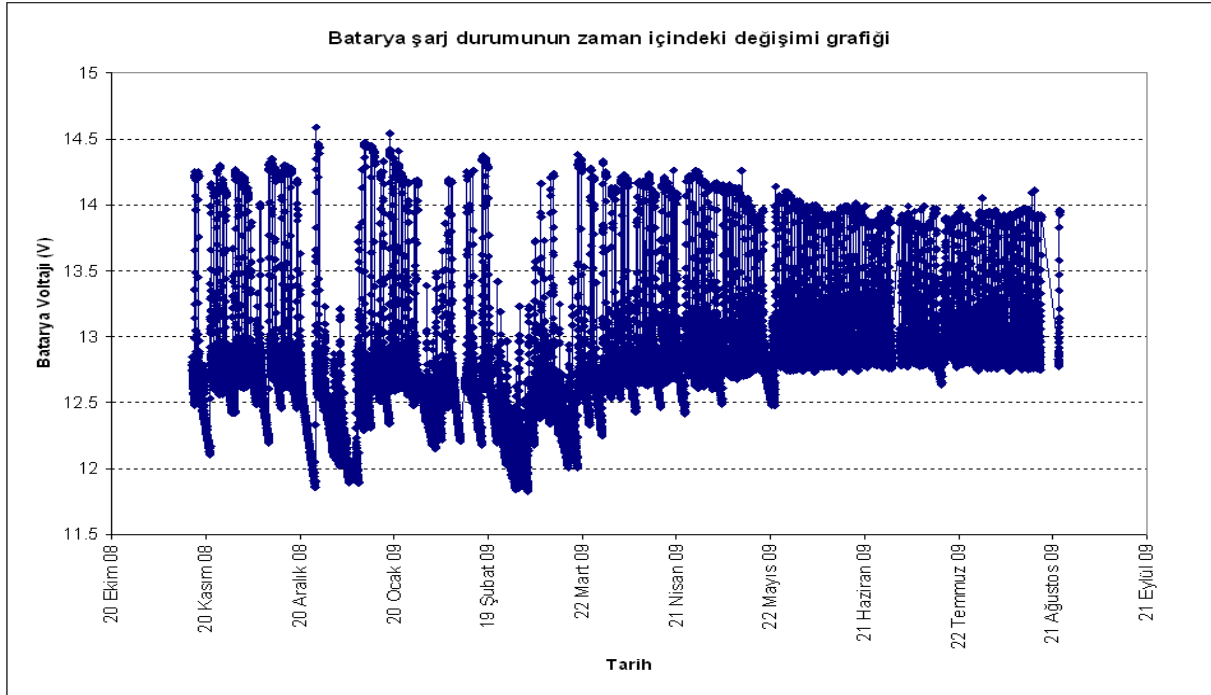
Rüzgar 40 km/saat hızla eserken Viyadük üzerinden geçmekte olan 3m x 10m yanal boyutlarında bir kasaya sahip kamyon üzerinde yaklaşık 0.24 ton kuvvet oluşacaktır. Bu kuvvetin seviyesi itibariyle çok sorun yaratmayacağı düşünülmektedir. Rüzgar yönünün ağırlıklı olarak kuzeyde bulunan vadi yönünden estiği görülmektedir.

Şekil 100'de verilen nem ve sıcaklık grafiği incelendiğinde, köprü bölgesinin hem kış hem de yaz aylarında nem oranının yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 101'de nem ve sıcaklık verilerinin genellikle ters ilişkili olduğu görülmektedir. Sıcaklık yükseldiği zaman nem azalmaktadır. Şekil 102'de genleşme derzi ile sıcaklık arasında da ters orantılı ve doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Sıcaklık arttığı zaman derz genişliği kapanmaktadır. Şekil 104'te 48 nolu ayağın negatif moment bölgesine takılan 4 adet birim deformasyon ölçerin yerleri görülmektedir. Şekil 105, Şekil 106 ve Şekil 107'de sırasıyla 7, 8 ve 9uncu kanallara bağlı sensörlerden alınan birim deformasyon değişimleri görülmektedir. Şekil 108'de aynı noktaya takılan iki farklı birim deformasyon ölçerden alınan okumalar karşılaştırılmakta ve çok benzer oldukları görülmektedir. Şekil 15'de tüm 4 sensörden alınan okumalar karşılaştırıldığında, 7 nolu kanala bağlı olan sensörün 8inci kanala bağlı olan ve VWG ile (konumlarındaki benzerlik sebebiyle) benzer okumalar almaları gerektiği fakat 7inci kanala bağlı sensörün hatalı okumalar aldığı görülmektedir. Şekil 110'da ise döşemeye yakın olarak montajı yapılan 9uncu kanala bağlı birim deformasyon ölçer ile kirişin alt kısmına yakın montajı yapılan birim deformasyon ölçer verileri arasındaki fark ve bu iki sensörden alınan verilerin ortalaması görülmektedir. Kirişin üst ve alt yüzeylerine yakın montajı yapılan sensörlerin okumaları arasındaki fark kesitteki momente, ortalamaları ise kesitteki eksenel kuvvete işaret etmektedir. Şekil 110 incelendiğinde, günlük sıcaklık değişimleri neticesinde köprünün üst tarafında bulunan döşemenin güneş ışınları ile alt tarafta bulunan kirişlere oranla daha fazla ısındığı ve sürekli kiriş kesitinde eğilme momentleri oluşturduğu görülmektedir. Her iki okumanın ortalamasına bakıldığında ise, eksenel kuvvete bağlı

değişimlerin göreceli olarak daha az olduğu görülmektedir. Alınan okumalar, kesitin doğal (neutral) eksenini etrafında eşit mesafede yerleştirilmediği için kesitte oluşan kuvvetler hakkında doğru değer vermemekte fakat ancak fikir vermektedir. Köprünün günlük sıcaklık değişimleri sırasında kolayca genişlediği, fakat üst ve alt bölümler arasında gün içinde oluşan sıcaklık farklılıkları (gradient) sebebiyle eğilme momentleri oluştuğu görülmektedir.

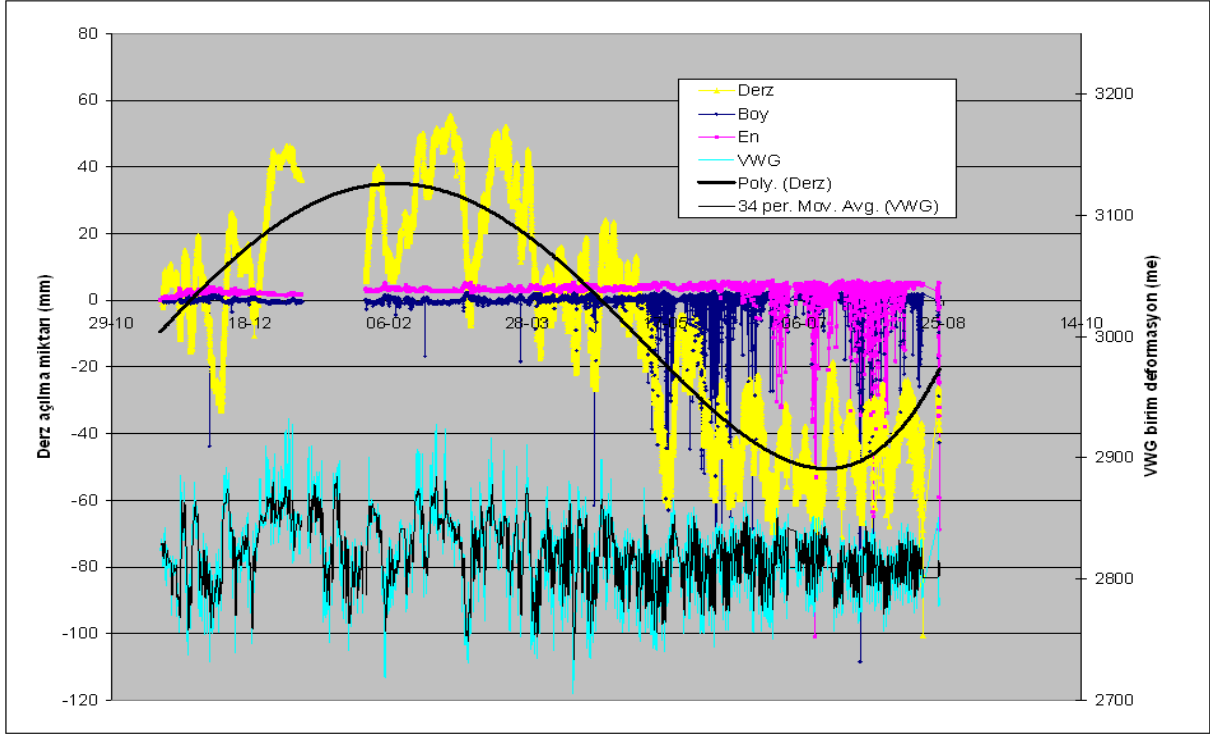
Tablo 7’de verilen rüzgar hızı ve gözlemler tablosuna bakarak, 40 km/saat hızda esen rüzgarın Beaufort indeksine göre 6 derecesinde olduğu; bu hızda esen rüzgar olduğu zaman büyük ağaç dallarının sallandığı, elektrik tellerinde ısıklık sesinin oluştuğu, şemsiye kullanımının güçleştiği ve boş plastik çöp tenekelerinin devrilebileceği söylenmektedir. Gözlem yapılan süre içinde rüzgar hızında aşırı bir okuma gerçekleşmediği söylenebilir.

2008 yılında yapılan montaj çalışmaları sırasında, Viyadük üzerine sensörlerin takılması aşamasında iş gücünün eksik kaldığı görülmüştür. Proje personeli olarak Dr. Ahmet Türer ve asistanı Hakan Dinçer tarafından, veri toplama sistemi + güneş paneli + nem ve sıcaklık sensörleri + köprü altındaki montajlar için 2 gün sürede kısıtlı sayıda sensör takılabildiği görülmüştür.

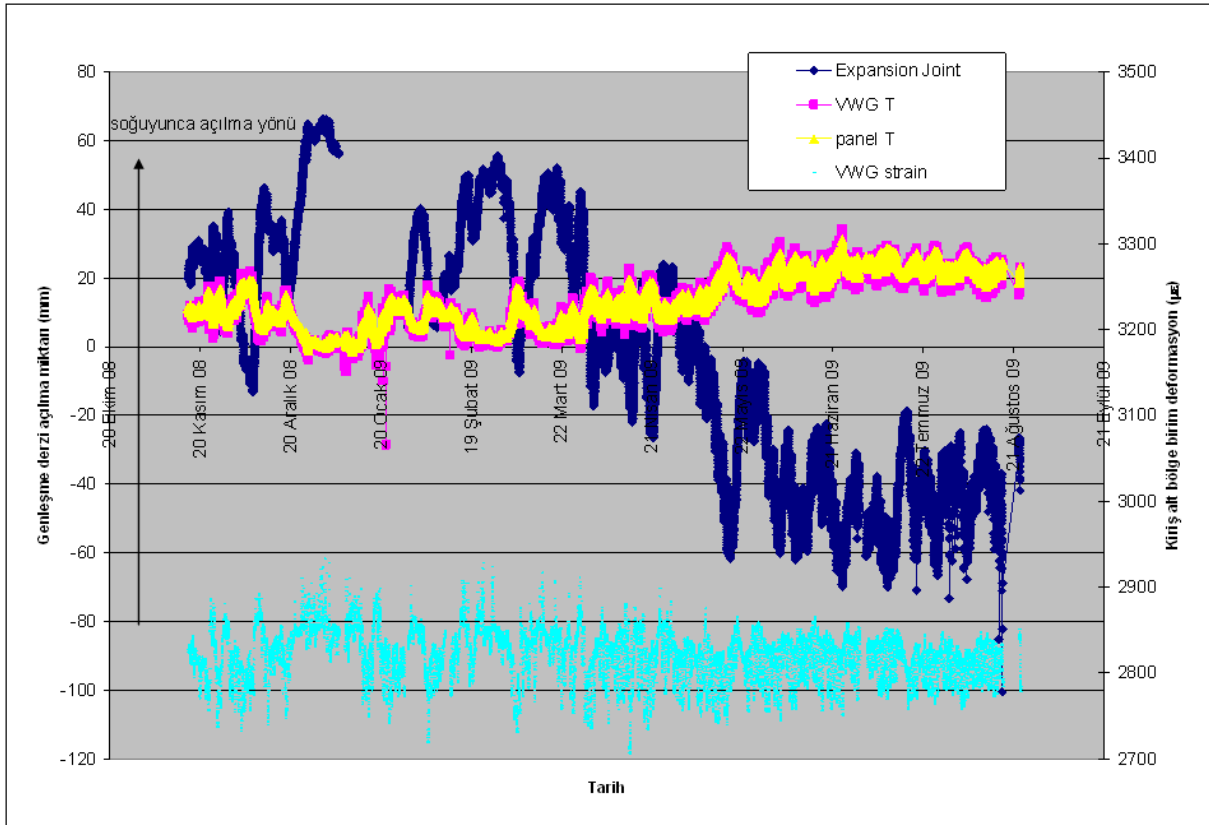


Şekil 95 – Bolu Viyadüğü YSİ - batarya şarj durumu grafiği.

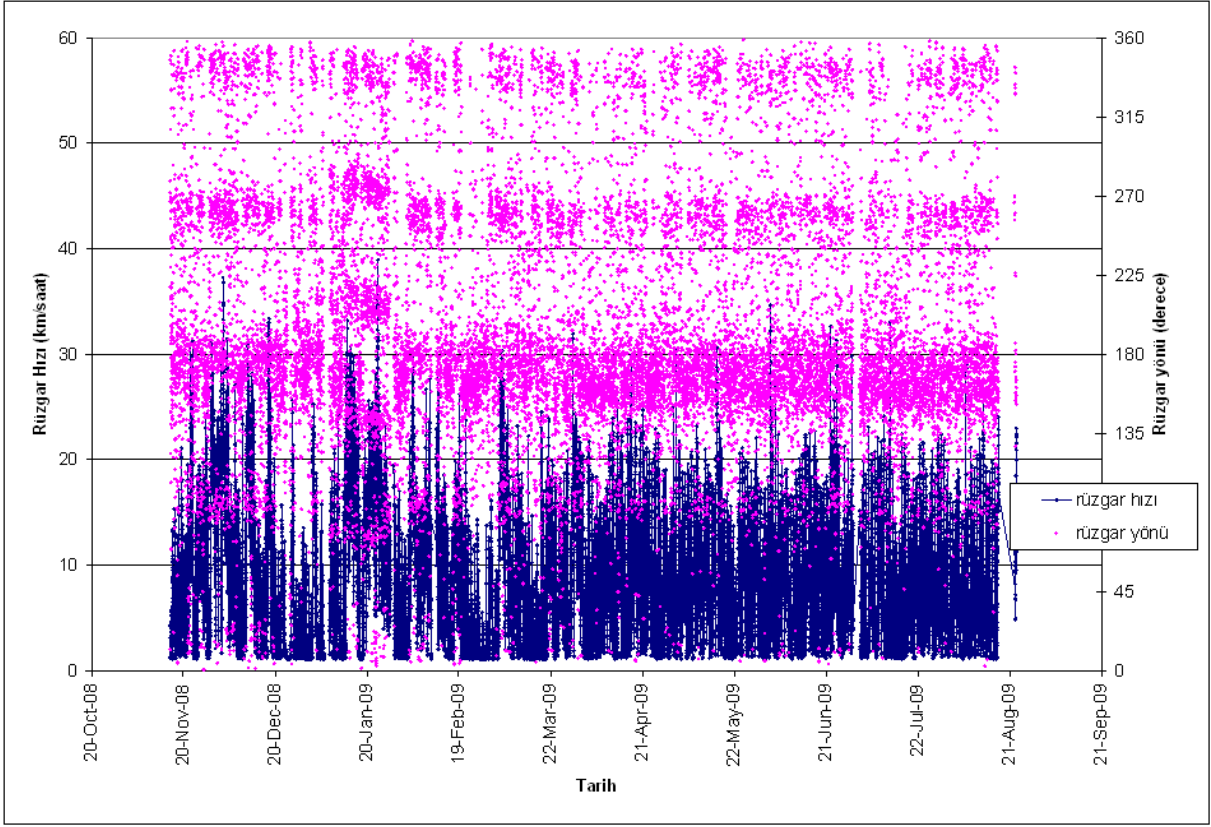




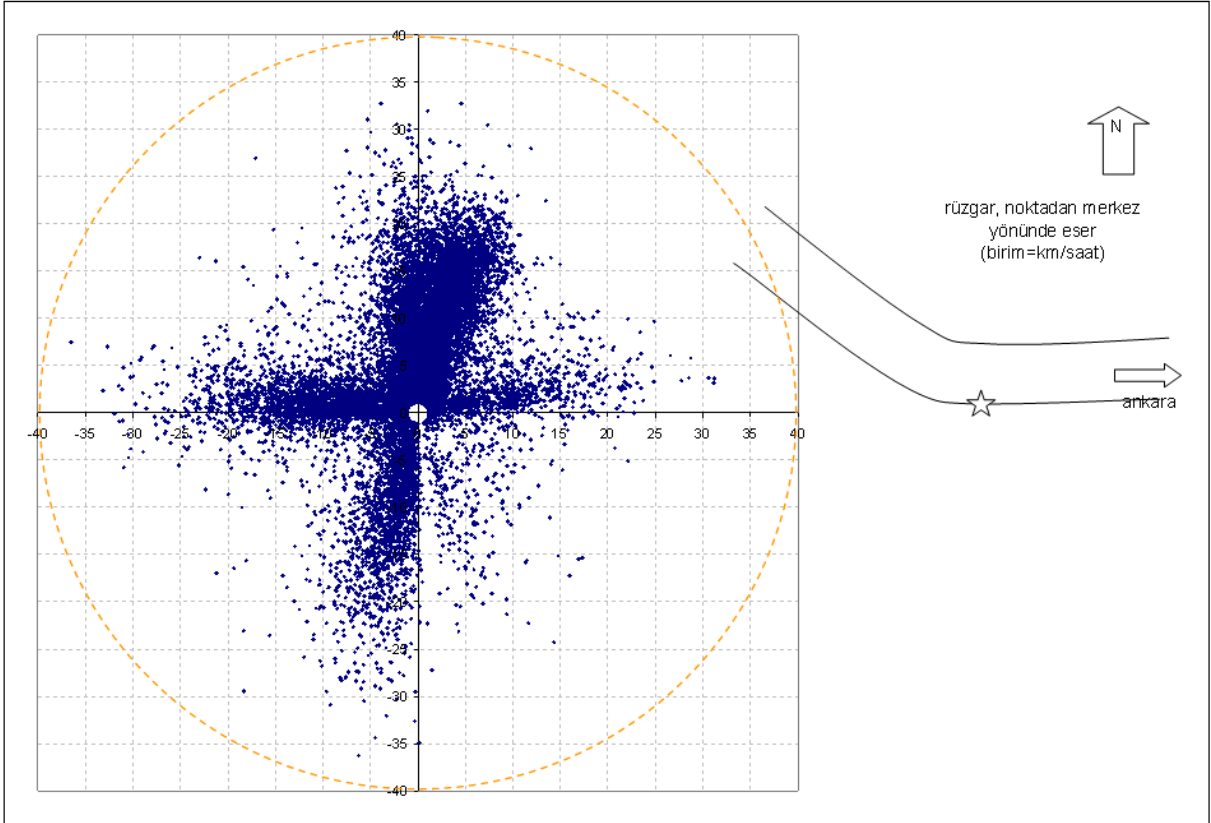
Şekil 96 – 50 nolu derz açıklığı değişimi, 48 nolu ayak hareketi ve VWG birim deformasyon değişim grafiği .



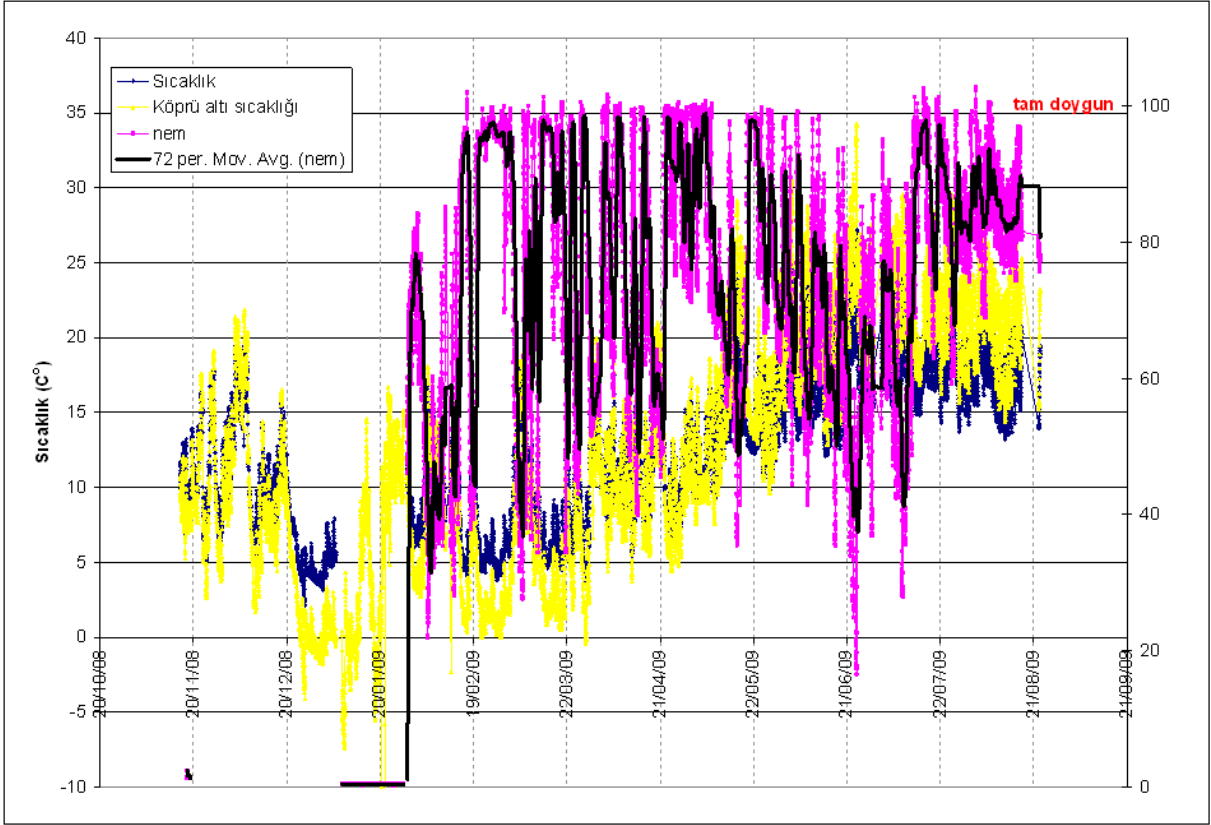
Şekil 97 – 50 nolu derz açıklığı ve sıcaklık değişimi grafiği.



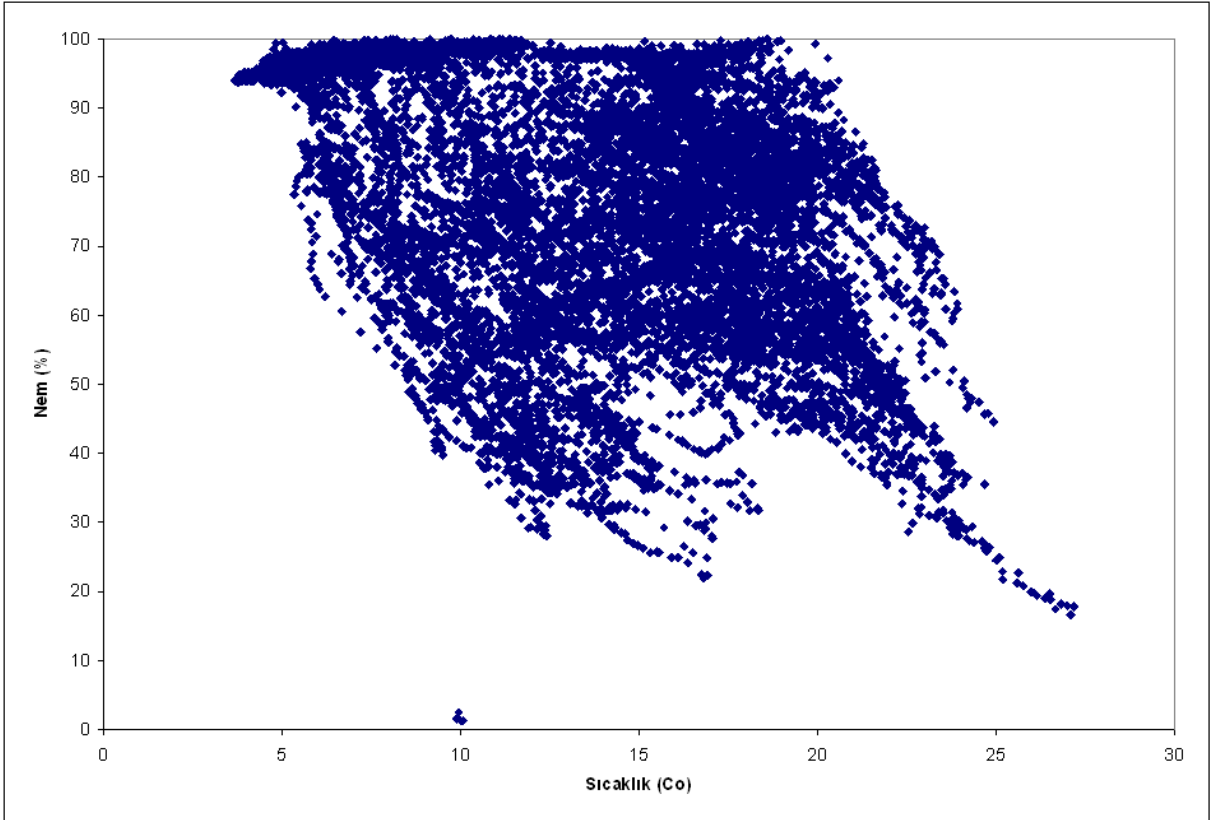
Şekil 98 – Rüzgar hızı ve rüzgar açısı grafiği (zaman ekseninde).



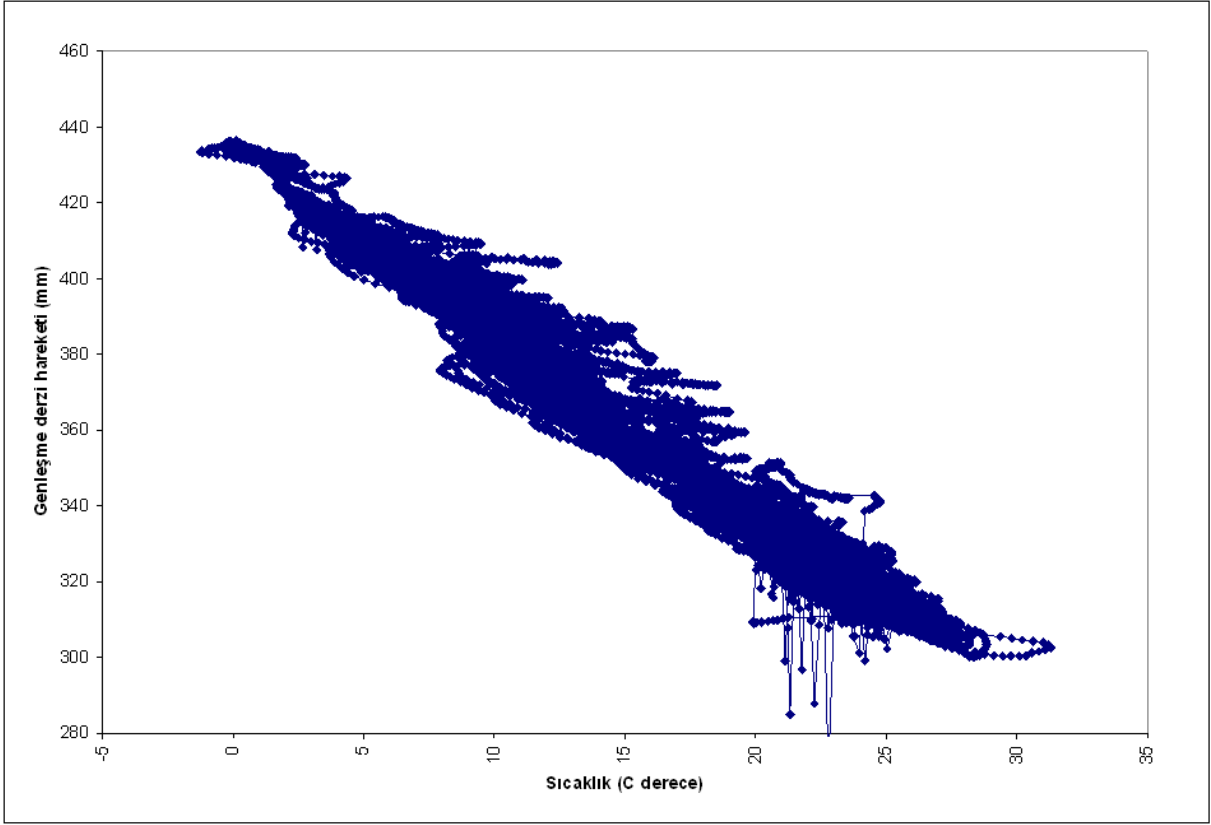
Şekil 99 – Rüzgar hızı (km/saat) ve rüzgar yönü değişim grafiği (planda).



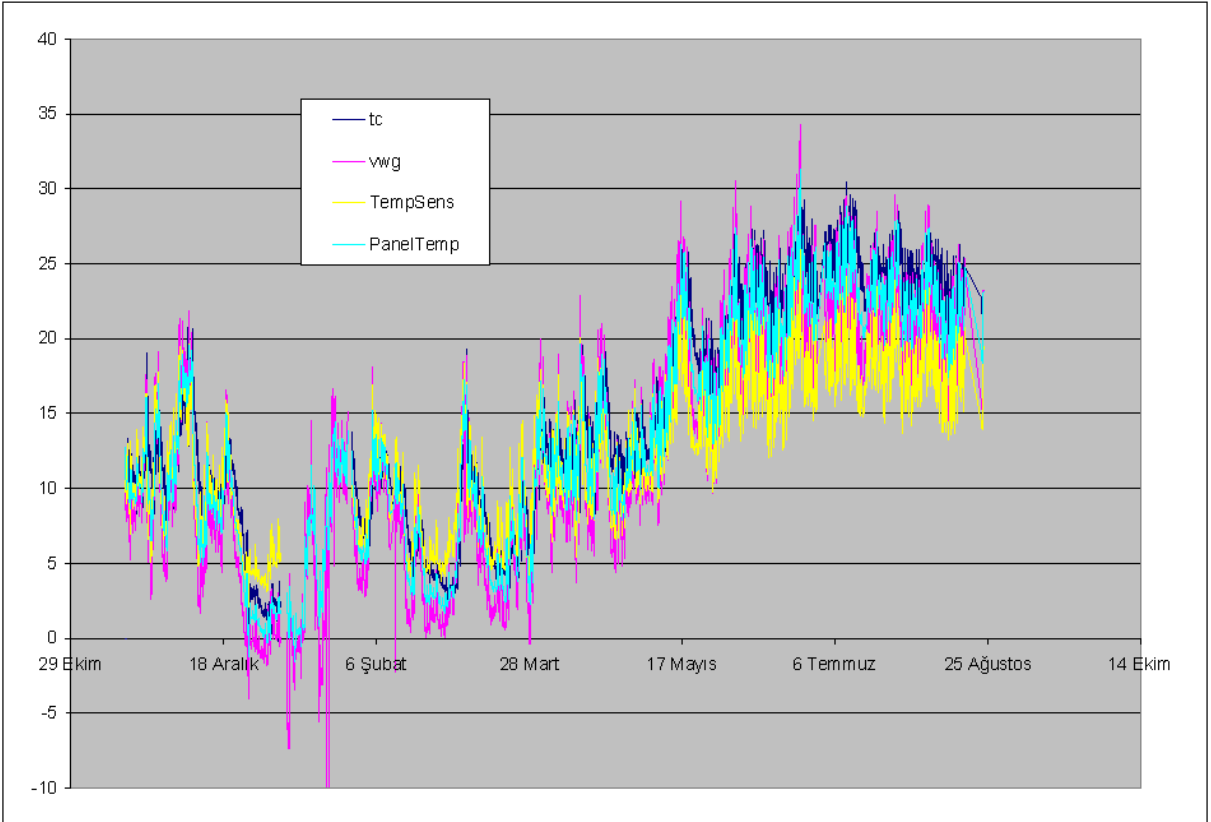
Şekil 100 – Köprü sıcaklık ve nem değişimi grafiği (zaman ekseninde).



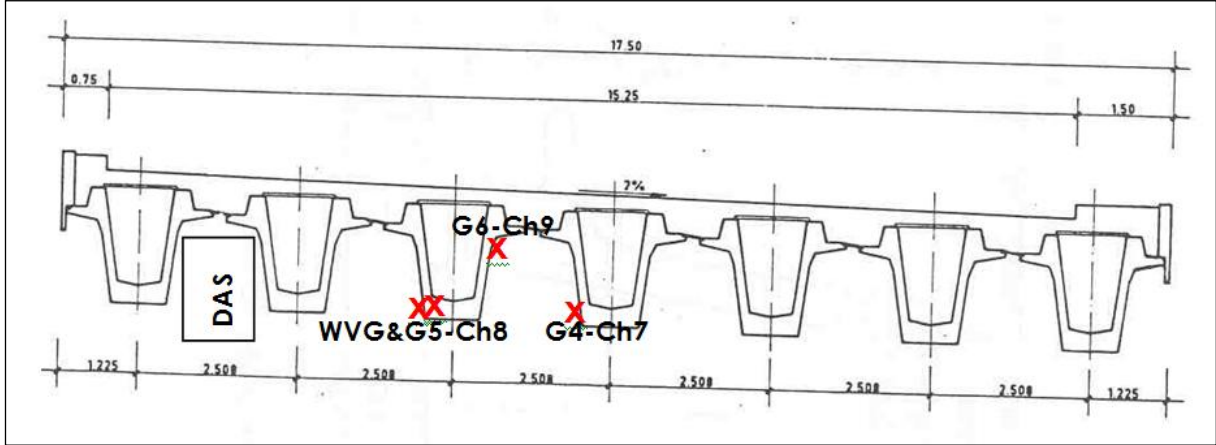
Şekil 101 – Sıcaklık ve nem oranı ilişkisi grafiği.



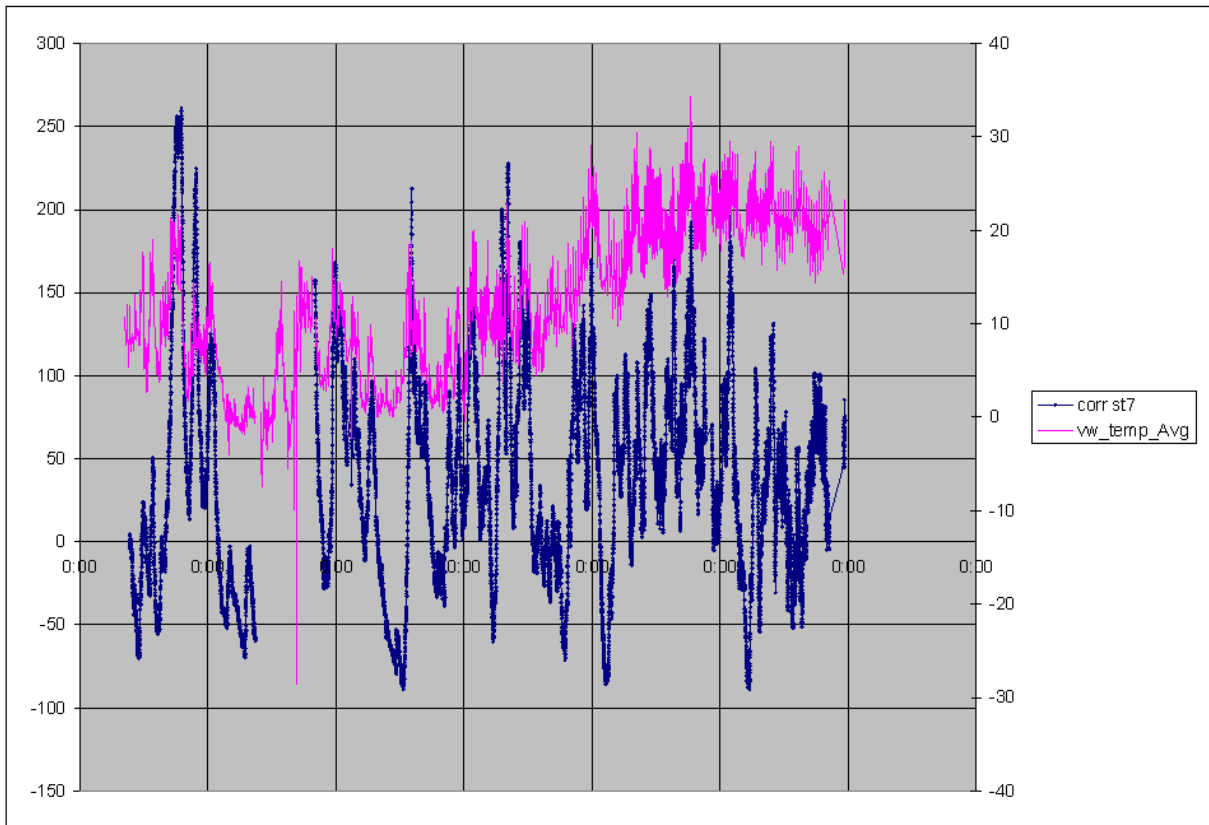
Şekil 102 – Genleşme derzi ve çevre sıcaklığı arasındaki ilişki grafiği.



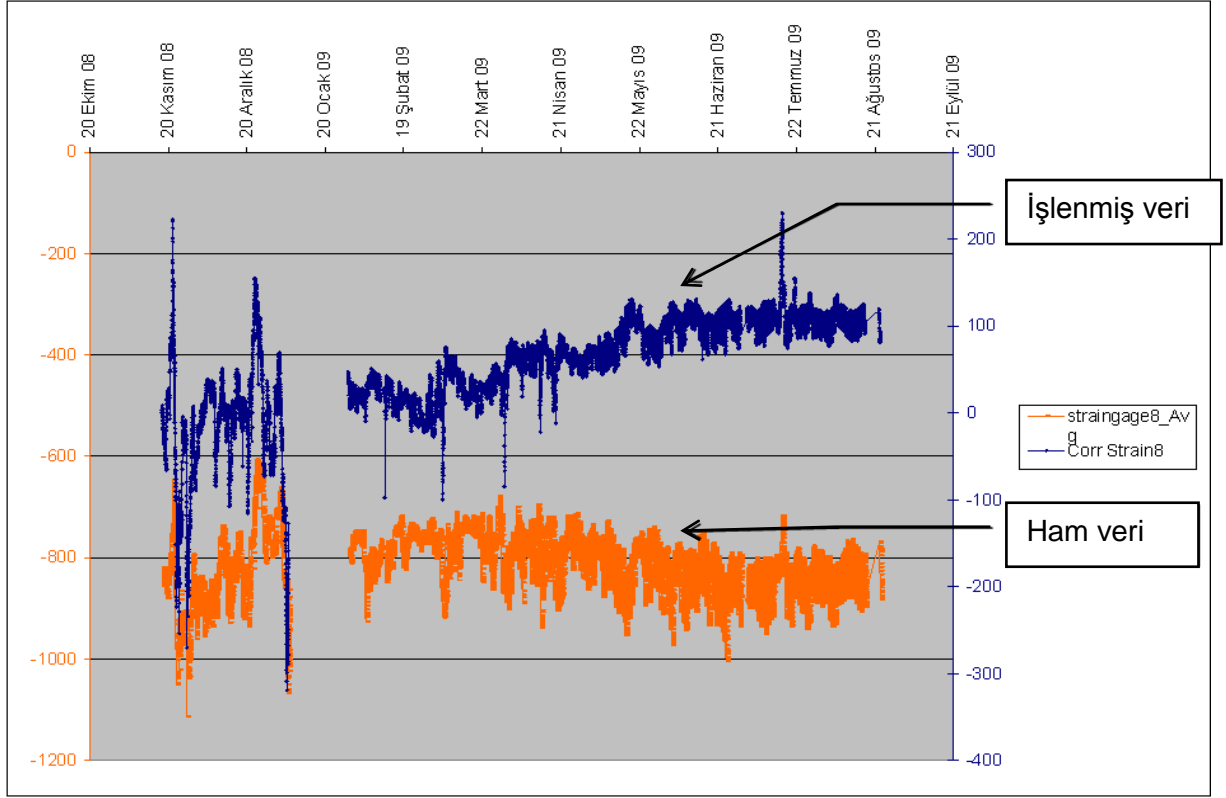
Şekil 103 – Bolu Viyadüğünde farklı sensörlerden toplanan sıcaklık verileri grafiği.



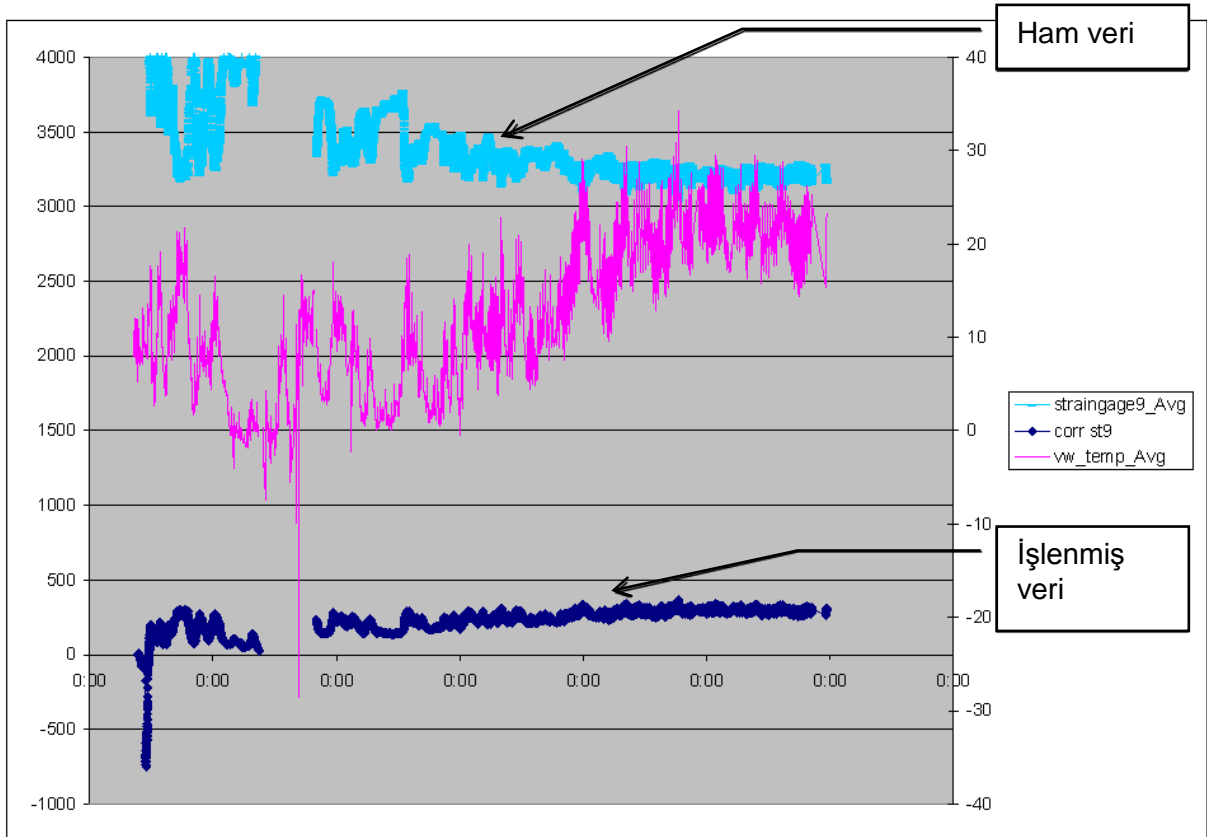
Şekil 104 – Bolu Viyadüğüne takılan birim deformasyon ölçerlerin yerleşim planı.



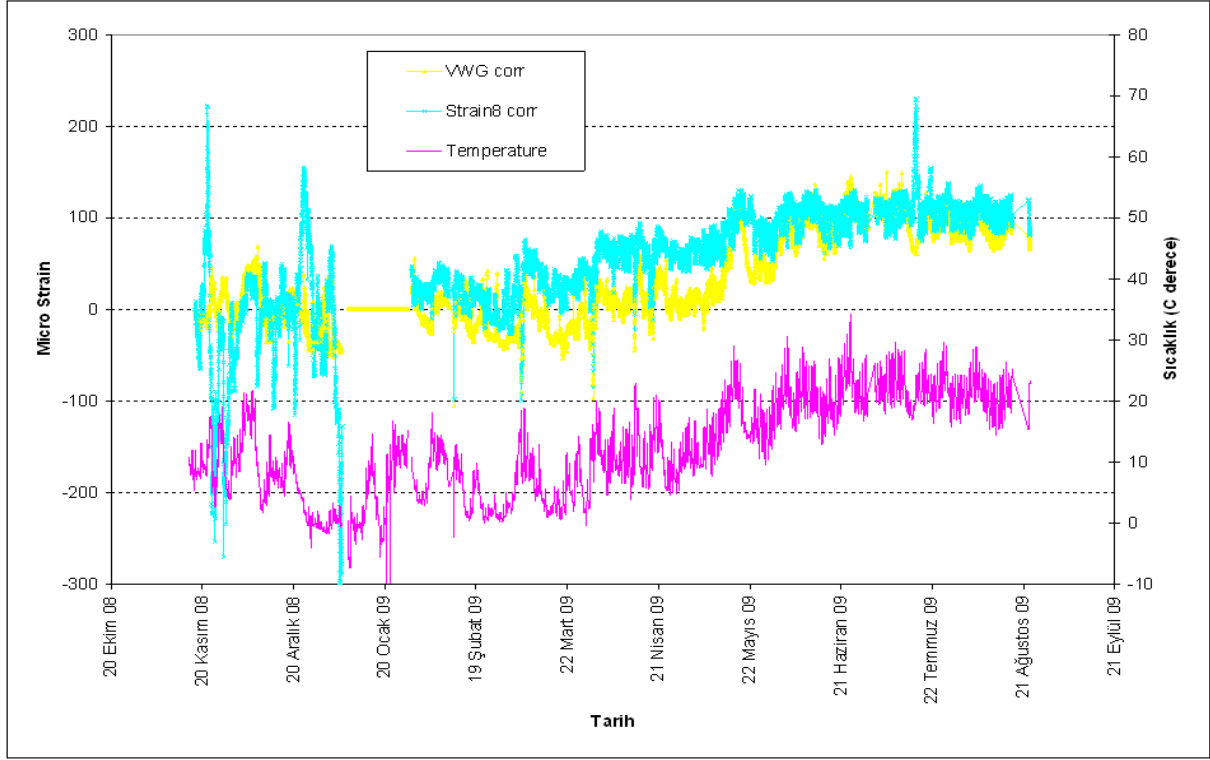
Şekil 105 – 7inci kanala takılan 4nolu sensör (birim deformasyon) değışim ve sıcaklık grafiği.



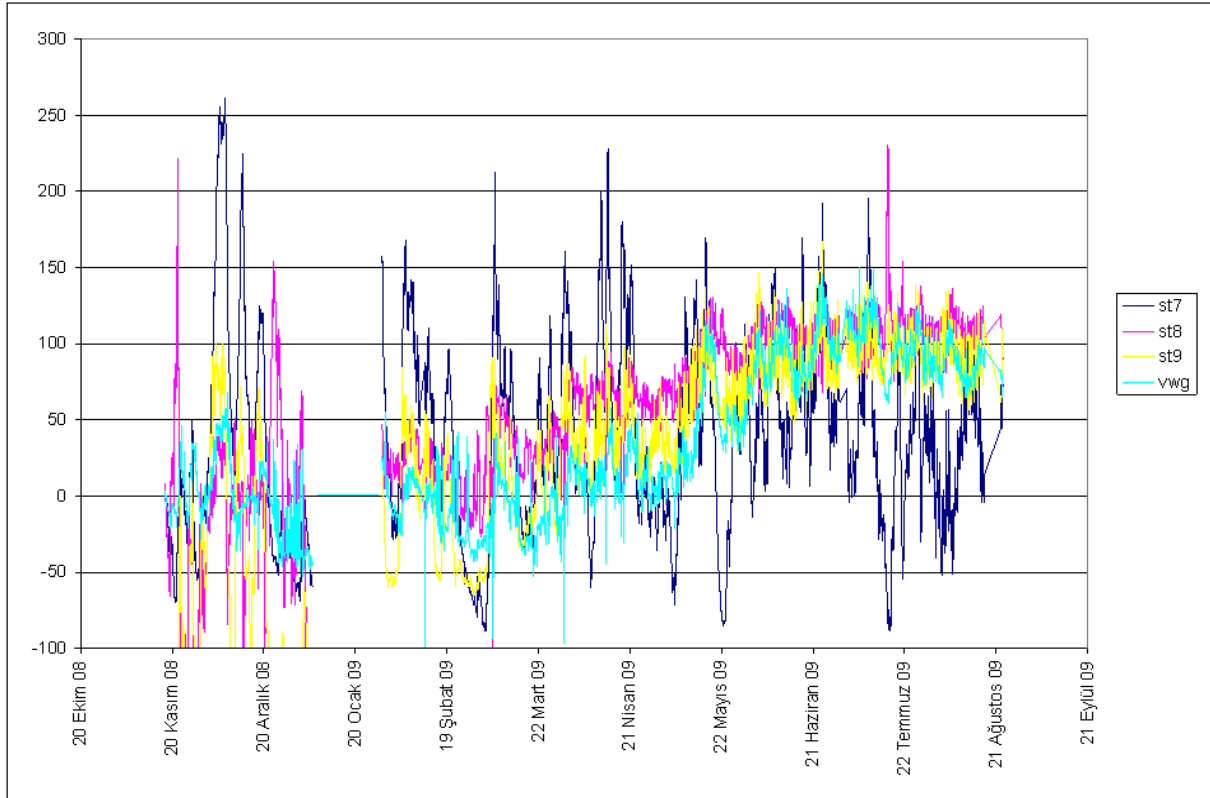
Şekil 106 – 8inci kanala takılan 5nolu sensör birim deformasyon değişim grafiği.



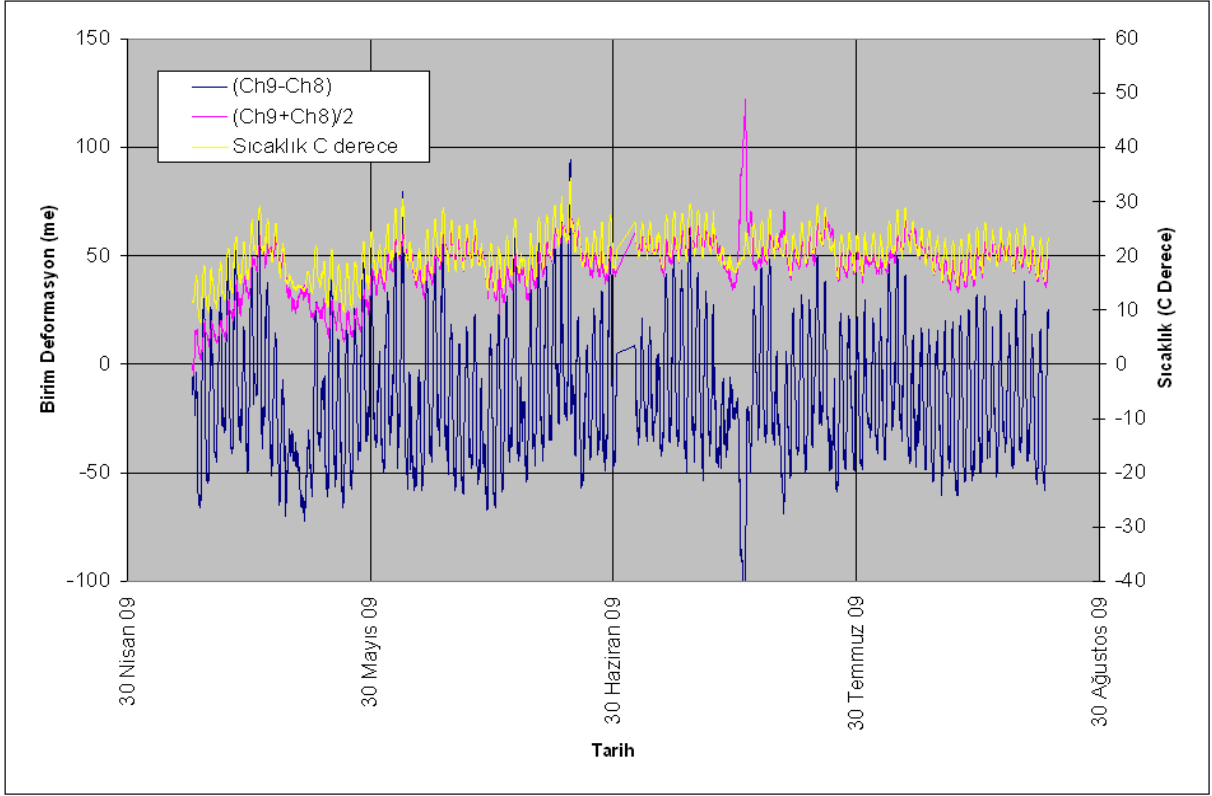
Şekil 107 – 9uncu kanala takılan 6nolu sensör (birim deformasyon) değişim ve sıcaklık grafiği.



Şekil 108 – Aynı noktaya takılan VWG ve 8nci kanala bağlı omega sensör verilerinin karşılaştırılması.



Şekil 109 – Tüm sensör okumalarının karşılaştırılması (bozuk olan 7nci kanala bağlı 4 nolu sensör).



Şekil 110 – 8 ve 9uncu kanallara bağlı sensörlerin farkları ve ortalamalarının karşılaştırılması.

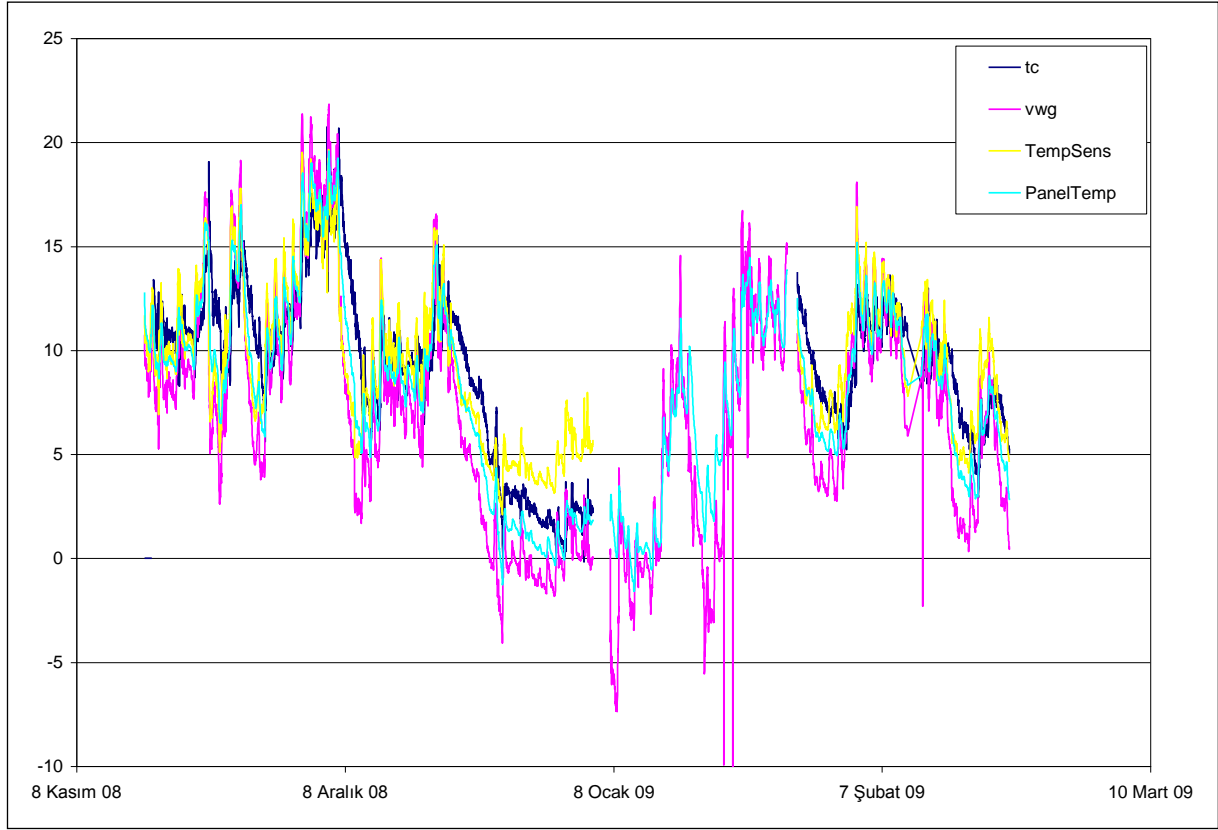


Tablo 7 – Rüzgar hızı, Beaufort sayısı ve karada gözlemlenen rüzgar etkileri tablosu

Kaynak: [http://en.wikipedia.org/wiki/Beaufort\\_scale](http://en.wikipedia.org/wiki/Beaufort_scale)

Beaufort number	Description	Wind speed				Land conditions
		<a href="#">km/h</a>	<a href="#">mph</a>	<a href="#">kts</a>	<a href="#">m/s</a>	
0	<a href="#">Calm</a>	< 1	< 1	< 1	< 0.3	Calm. Smoke rises vertically.
1	<a href="#">Light air</a>	1 – 5	1 – 3	1 – 2	0.3 – 1.5	Wind motion visible in smoke.
2	Light breeze	6 – 11	3 – 7	3 – 6	1.5 – 3.3	Wind felt on exposed skin. Leaves rustle.
3	Gentle breeze	12 – 19	8 – 12	7 – 10	3.3 – 5.5	Leaves and smaller twigs in constant motion.
4	Moderate breeze	20 – 28	13 – 17	11 – 15	5.5 – 8.0	Dust and loose paper raised. Small branches begin to move.
5	Fresh breeze	29 – 38	18 – 24	16 – 20	8.0 – 11	Branches of a moderate size move. Small trees begin to sway.
6	Strong breeze	39 – 49	25 – 30	21 – 26	11 – 14	Large branches in motion. Whistling heard in overhead wires. Umbrella use becomes difficult. Empty plastic garbage cans tip over.
7	High wind, Moderate gale, Near	50 – 61	31 – 38	27 – 33	14 – 17	Whole trees in motion. Effort needed to walk against the wind. Swaying of skyscrapers may be felt, especially by people on

	gale					upper floors.
<b>8</b>	Gale, Fresh gale	62 – 74	39 – 46	34 – 40	17 – 20	Some twigs broken from trees. Cars veer on road. Progress on foot is seriously impeded.
<b>9</b>	Strong gale	75 – 88	47 – 54	41 – 47	21 – 24	Some branches break off trees, and some small trees blow over. Construction/temporary signs and barricades blow over. Damage to circus tents and canopies.
<b>10</b>	Storm <sup>[6]</sup> , Whole gale	89 – 102	55 – 63	48 – 55	25 – 28	Trees are broken off or uprooted, saplings bent and deformed. Poorly attached asphalt shingles and shingles in poor condition peel off roofs.
<b>11</b>	Violent storm	103 – 117	64 – 72	56 – 63	29 – 32	Widespread vegetation damage. Many roofing surfaces are damaged; asphalt tiles that have curled up and/or fractured due to age may break away completely.
<b>12</b>	Hurricane <sup>[6]</sup>	≥ 118	≥ 73	≥ 64	≥ 33	Very widespread damage to vegetation. Some windows may break; mobile homes and poorly constructed sheds and barns are damaged. Debris may be hurled about.



Şekil 111 – Bolu Viyadüğü sıcaklık değişim grafiği.

Köprü altına monte edilen veri toplama sistemi yağışlardan korunmakla birlikte, zamana bağlı olarak birkaç sensörde okumalarda bozulmalar olmuştur. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ile yapılan protokol kapsamında, köprü altına erişimi sağlayan kovalı kamyon senede bir defa tahsis edilmektedir. Bu sebeple sistemin köprü altında kalması, kovalı kamyonun kullanılmadığı durumlarda oluşan arızalara müdahale şansı bırakmamıştır. Bu sebeple veri toplama sisteminin köprü üzerinde kolayca erişilebileceğimiz bir yere monte edilmesi kararlaştırılmıştır. Buna ek olarak projenin hedefleri açısından köprüde dinamik verilerin de toplanması gerekmektedir. Bu amaç için iki adet ivme ölçer alınmıştır ve veri toplama sisteminin bağlı olduğu 48inci ayağa yakın, 48 ve 49 ayaklar arasında bulunan 48inci açıklığın ortasına, güney cephede bulunan yaya yolu kenarına daha önceden bırakılan kablolarla monte edilmiştir.

Proje asistanı Hakan Dinçer, Ağustos 2009 içinde projeden ayrılmak istediğini belirtmiştir. Kendi isteği ile ayrılan proje asistanının yerine yapılan aramalar sonucunda Ekim 2009'dan başlamak üzere Alper Özge Gür atanmıştır.

26-29 Ekim 2009 tarihleri arasında proje asistanı Alper Özge Gür ile yapılan Bolu Viyadüğü ziyaretinde, veri toplama sistemi Viyadüğün üst tarafına taşınmıştır. 48inci açıklığın

ortasına önceden takılamayan yeni birim deformasyon ölçerler monte edilmiştir. Karayolları tarafından saha çalışmaları sırasında 1 adet teknik eleman bize yardım için verilmiş ve bu eleman montaj ve kablolama çalışmalarında bize yardımcı olmuştur. Projenin son gününde sistemin çalışıp çalışmadığını denetlediğimiz sırada yağmur başlamış ve denetleme çalışması akşam da olduğu için tam olarak bitirilmeden dönülmek zorunda kalınmıştır. Bu seferden döndükten sonra uzaktan erişim yöntemiyle kontrol denenmiş fakat veri toplama sistemi ile bağlantı kurulamamıştır. Dolayısıyla uzaktan yapılması planlanan programlama çalışmaları tamamlanamamıştır.

Veri toplama sistemini muhafaza eden kutunun su almış olması ihtimali göz önünde bulundurularak yeni bir muhafaza kutusu satın alınmış ve monte edilmeye hazır hale getirilmiştir. 5-6 Kasım 2009 tarihleri arasında yaptığımız teknik ziyarette muhafaza kutusunun içine su aldığı görülmüştür. Eski kutu sökülmüş ve yenisi takılmış, sensörlerin bağlantı kabloları yeni kutu içerisine monte edilmiştir. Sistem yeni haliyle yerinde test edilmiş, donanım ve yazılımla ilgili sorunlu olduğu düşünülen noktalarda yeniden düzenleme çalışmaları yürütülürken sağanak bir yağmur başlamıştır. Yağmura ek olarak gezi için alınan iznin süresinin de dolması sebebiyle Ankara'ya dönülmek zorunda kalınmıştır.

Bu gezi dönüşünde hava tahmin raporu özenle takip edilmiş ve 21 Kasım 2009 günü sonuncu sefer yapılmıştır. Bu gezide veri toplama sistemi ve GSM modem cihazları yeni işletim sistemi yüklenerek sıfırlanmış ve çalışır hale getirilmiştir. Bunların sonucunda veri toplama sistemi ve GSM modem düzgün çalışmaya başlamıştır. Buna karşın nem ölçer, derzdeki deplasman ölçer ve çoklayıcıya bağlı sensörlerin büyük kısmından okuma alınamadığı görülmüştür. Bunlara ilave olarak viyadük üzerindeki sistemden ayrı olarak bu geziye mahsus olmak üzere, viyadük üzerinde mobil ivmeölçerlerle dinamik test yapılmıştır.

Şekil 112'de, yürütülen YSİ çalışmaları için viyadük üzerine yerleştirilen birim deformasyon ölçerlerin, 48. açıklık üzerindeki yerleri gösterilmektedir. Şekil 113'de görülen grafik, veri toplama sistemini besleyen bataryada yüklü voltajın (kırmızı renkli seri) değerlerini ve ortam sıcaklığı değerlerinin (mavi seri) zamana göre değişimi görülmektedir. Ölçüm yapılan ayların kış ayları olması sebebiyle bataryayı besleyen güneş paneli çok bulutlu havalarda ve yağan karların güneş panelinin üzerini kapattığı zamanlarda, bataryayı beslemekte zaman zaman yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Bunun yanında sisteme yeni eklenen ivmeölçerlerden faydalanmak için bu sensörlerin sürekli 5V ile beslenmesi ve sürekli izlenmesi gerekmektedir. Bu işlemin de bataryadaki enerjiyi çok hızlı tükettiği ve güneş panelinin yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Son olarak, titreşen telli birim deformasyon ölçerlerden gelen sinyali okumaya yarayan arabirim de sürekli besleyen güç kanalına bağlanmıştır ve bataryanın hızlı bitmesinde etkisi olmuştur.

Batarya ile sistem arasına gücü düzenleyen bir regülatör yerleştirilmiştir. Bu regülatör, bataryanın ve sistemin zarar görmesini engellemek için bataryadaki voltaj 11.5 volt'un altına düştüğünde sistemi beslemeyi kesmektedir. Yukarıdaki paragrafta anlatılan sebepler sonucu batarya voltajı sık sık kritik değer altına düştüğü Şekil 1'de görülmektedir. Sistemin gücünün bu kadar çok kesilmesi sonucu, sensörlerin okumalarından düzenli zaman serileri alınamamasına sebep olmuştur.

Şekil 114'de YSI sisteminde kullanılan el yapımı birim deformasyon ölçerlerden alınan ölçümlerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Bu sensörler Wheatstone köprüsü kullanılarak labda proje ekibi tarafından üretilmiş olup, besleme terminalleri arasından ve okuma terminalleri arasından kendi aralarında yapılacak olan bir rezistans ölçümünde 120 ohm direnç vermesi gerekmektedir. 21 Kasım 2009 tarihinde Bolu'ya yapılan teknik ziyarette, Karayollarından kovalı kamyon isteme hakkımız olmadığı için bu sensörleri doğrudan kontrol etme şansımız olmamıştır. Veri toplama sistemine bağlanan terminallerinden yapılan rezistans ölçümlerinin sonucunda 13 ve 15 nolu sensörlerden direnç değeri okunamadığı görülmüştür. Bu durum, sensörleri veri toplama sistemine bağlayan kabloların köprü altında kalan bir noktadan kopmuş olması ihtimalini düşündürmektedir. 6 ve 14 no.'lu sensörler ise bataryanın sistemi besleyebildiği zamanlarda okuma almıştır. Bunların dışında kalan 5 adet sensör ise zaman zaman sinyal göndermiş, ancak yaptıkları okumalardaki süreksizlik sebebiyle alınan değerlerin doğruluğundan emin olunamamaktadır. Bu sensörlerin bağlı olduğu çoklayıcı üzerindeki okuma kanallarında, 26-29 Ekim 2009 tarihleri arasındaki Bolu seferinin sonunda yağmur altında yapılmak durumunda kalınan işlemler sırasında bozulmuş olması ihtimali bulunmaktadır. Ayrıca, sensörlerin ana kablolarına bağlandığı noktalarda, muhtemelen rüzgarların etkisiyle oluşan temassızlıkların okumalarda süreksizliğe yol açmış olması da muhtemeldir.

Şekil 115'de okuma alınabilen birim deformasyon ölçerler, ortam sıcaklığı değerleri ile birlikte gösterilmiştir. Bu şekildeki bir analizin amacı, oluşan deformasyonların sebebinin sıcaklık değişimlerine bağlı olup olmadığını anlamaktır. Yukarıda belirtilen batarya gücünün kesilmesi sebebiyle verilerin süreksiz olması, ne oluşan deformasyonları izleyebilme, ne de bu deformasyonların karakterini analiz etme imkanını tanımamaktadır.

Şekil 116'de Viyadüğe monte edilen lineer değişken deplasman ölçer (LVDT)'lerden alınan okumalar gösterilmektedir. Bunlardan LVDT1 viyadük tabliyesinde viyadük uzanım eksenine dik yöndeki deplasmanları, LVDT2 viyadük eksenindeki deplasmanları, LVDT3 50. ayaktaki derz açıklığındaki değişimleri ölçecek şekilde yerleştirilmiştir. 30 Aralık 2009 ile 9 Ocak 2010 arasındaki sürede bataryadaki gücün yetersizliği yüzünden okuma yapılamamıştır. Bu sırada bu sensörlerin düzgün çalışmasını bozan birtakım değişiklikler

olmuş olması muhtemel görünmektedir. Nitekim 9 Ocak 2010 tarihinden itibaren okumalarda bu sensörlerden veri alınmadığı görülmektedir.

Viyadüğe iki adet ivmeölçer montajı yapılmıştır (Şekil 117). Şekil 118'de, 21 Kasım 2009 tarihli Bolu seferinde Viyadükte yapılan dinamik test veri setlerinden biri görülmektedir. Dinamik test için, tabliye üzerinde 1653 Hertz ile dikey yönlü ivme değerleri okunmuştur. Bu ölçümler, mevcut izleme sistemine entegre ivmeölçerden faydalanılamamasının yarattığı dinamik veri eksikliğini bir ölçüde gidermenin yanında, hava şartları tekrar izin verdiğinde, viyadük üzerinde yinelenen veri toplama sistemi onarım çalışmalarından sonra, toplanacak olan dinamik verinin karşılaştırılabilmesi için de referans olarak görev yapacaktır.

Şekil 118'deki verilerde, izlenmekte olan açıklıktan, hangi zamanlarda araç geçtiği rahatlıkla anlaşılabilir. Açıklık boş olduğu sırada, viyadük salınımları 0.005 g civarında ivmelerle olmaktadır. Araç geçişleri sırasında bu ivmeler genellikle 0.02 g.'ye çıkmakta, çok ağır tırlar ise ivmeleri 0.03 g.'ye kadar yükseltebilmektedir.

Şekil 119'de, Viyadüğün izlenen açıklığı üzerinden araç geçmediği zamanlarda okunan ivme verileri 16 set halinde ayrıldıktan sonra, üzerlerinde yapılan fourier analizlerinden bulunan değerlerin grafiği gösterilmiştir. Fourier analizleri sonucunda veri setleri için bulunan genlik spektrumlarının frekans eksenini çözünürlükleri, izlenen verinin uzunluğuna göre 0.0541 Hz. ile 0.500 Hz. arasında değişmektedir. Bu grafikten, köprünün doğal salınım frekansları yaklaşık olarak görülebilmektedir.

Şekil 120 - Şekil 122'de, viyadük üzerinde ivmeölçerlerin yerleştirildiği açıklık üzerinden hafif ve ağır araçlar geçerken, viyadükte oluşan ivmelerin fourier spektrumu verilmiştir. Burada, açıklık boşken viyadük hareketlerine katkıda bulunmayan daha yüksek modların da uyanmış oldukları beklenilebileceği gibi görülmektedir.

Şekil 121 - Şekil 123'de hafif ve ağır araçlar viyadüğün izlenen açıklığını terk ettikleri andan itibaren okunan ivme değerlerinin fourier spektrumları görülmektedir. Bu durumun, izlenen açıklığın üzerinde taşıt olmadığı boş durumdan ayrı olarak raporlanması, yüksek frekansların burada mevcut bulunmasından dolayı gerekli görülmüştür.

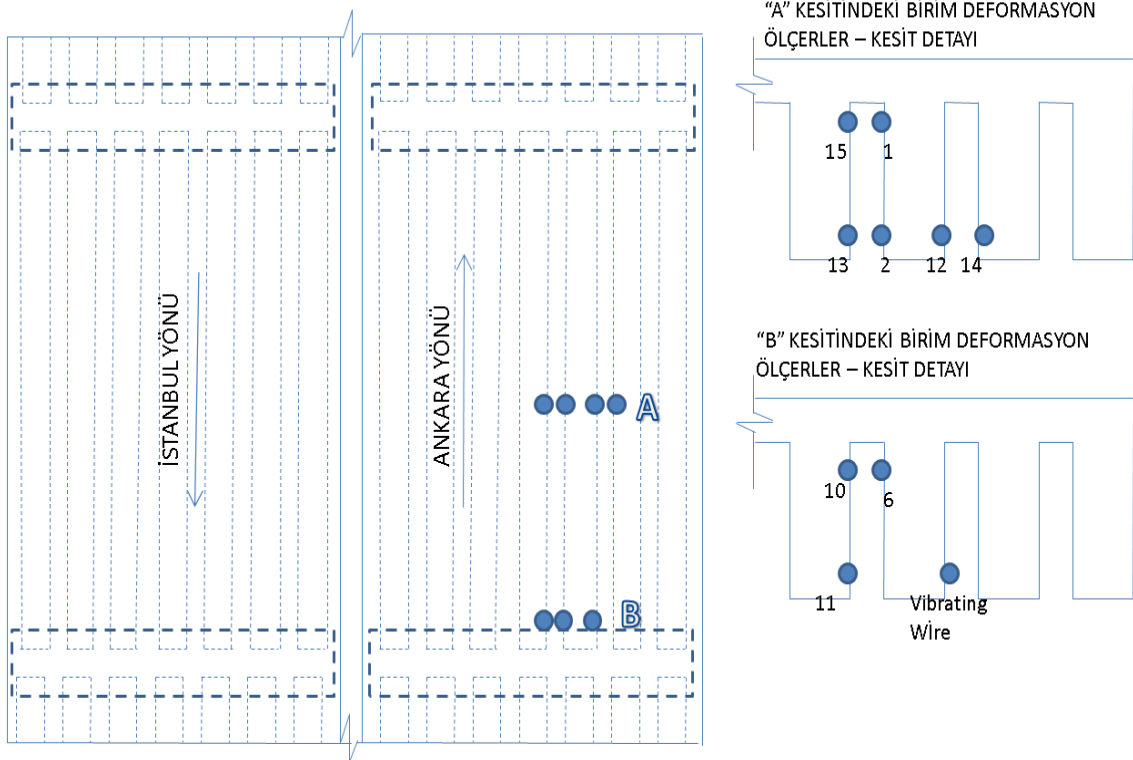
Şekil 124'de sensöre yakın mesafede insan zıplaması sonucu oluşturulan ani darbe uygulanması ile okunan serbest salınım ivme okumalarının fourier spektrumları verilmiştir. Burada elde edilen sonuçları, araç geçtikten sonrası için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılırsa, araç geçişlerinin yüklediği noktaların viyadük eksenine daha yakın olması sebebiyle, burulma (torsiyon) modlarını, ani darbe yüklemesine göre, daha az uyarmaktadır. Bunun sonucu olarak, 10 Hertz üzerindeki frekansların muhtemelen burulma modlarına karşılık geldiği tahmin edilmektedir.

Şekil 125, Şekil 126 ve Şekil 127'de 16 veri seti üzerinde yapılan fourier analizleri sonucu elde edilen ve ayırt edilebilen rezonant frekansların dağılımları, ve bu dağılımlara

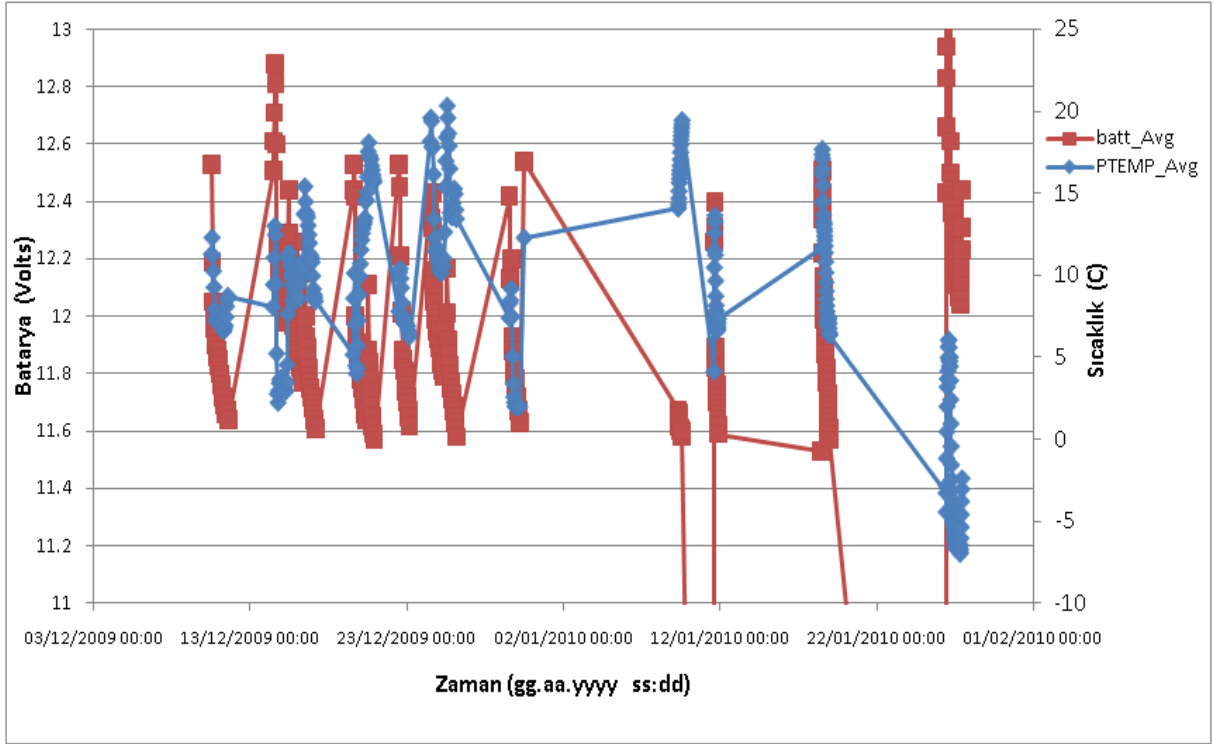
uydurulan normal dağılım eğrileri görülmektedir. Bu dağılımlardan gözlemlenen, birinci ve üçüncü modların daha kararlı bir dağılım gösterdikleri, ikinci moda ise elde edilen frekansların daha dağınık olduğu gözlemlenebilmektedir. Bu çalışma sonucu bulunan üç mod:

- 1. Mod: 2.98 Hertz.
- 2. Mod: 4.47 Hertz.
- 3. Mod: 9.48 Hertz. olarak tespit edilmiştir.

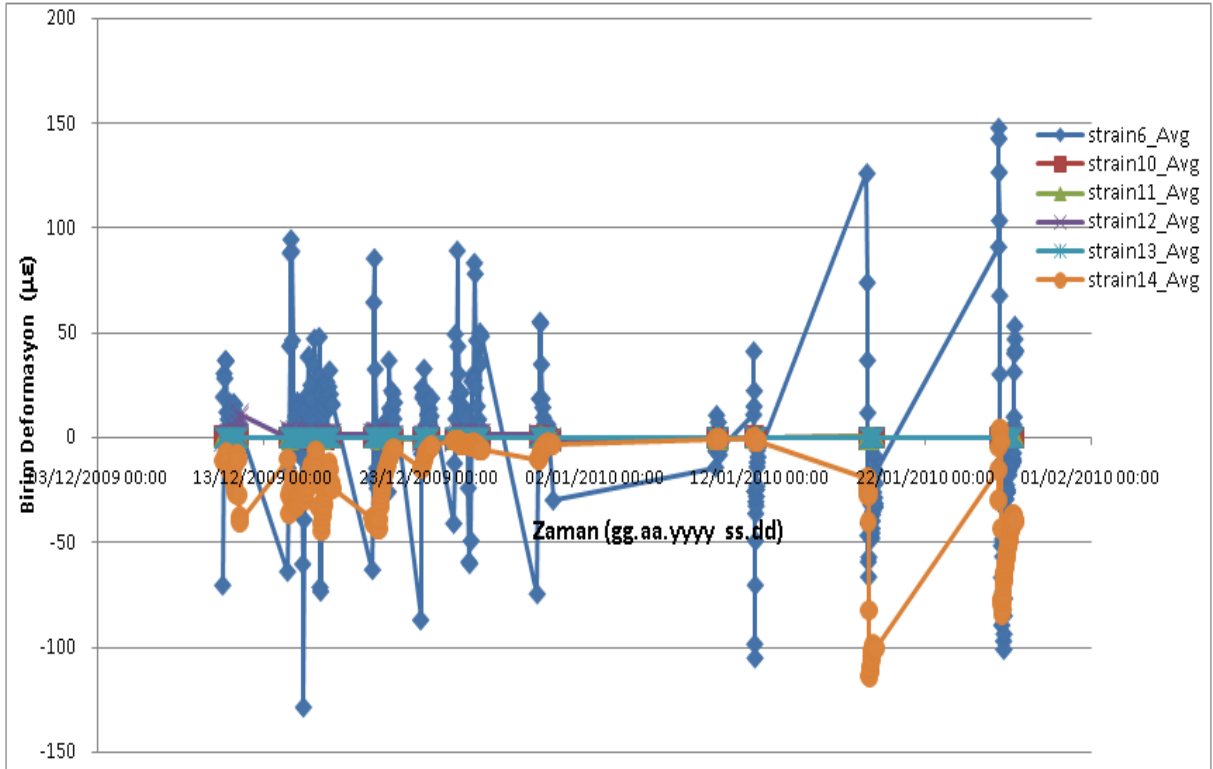
### BİRİM DEFORMASYON ÖLÇERLERİN VİYADÜK ÜSTÜNDEKİ YERLERİ



Şekil 112: Birim Deformasyon Ölçerlerin Viyadük Üzerinde Takıldığı Yerleri Gösteren Kroki.

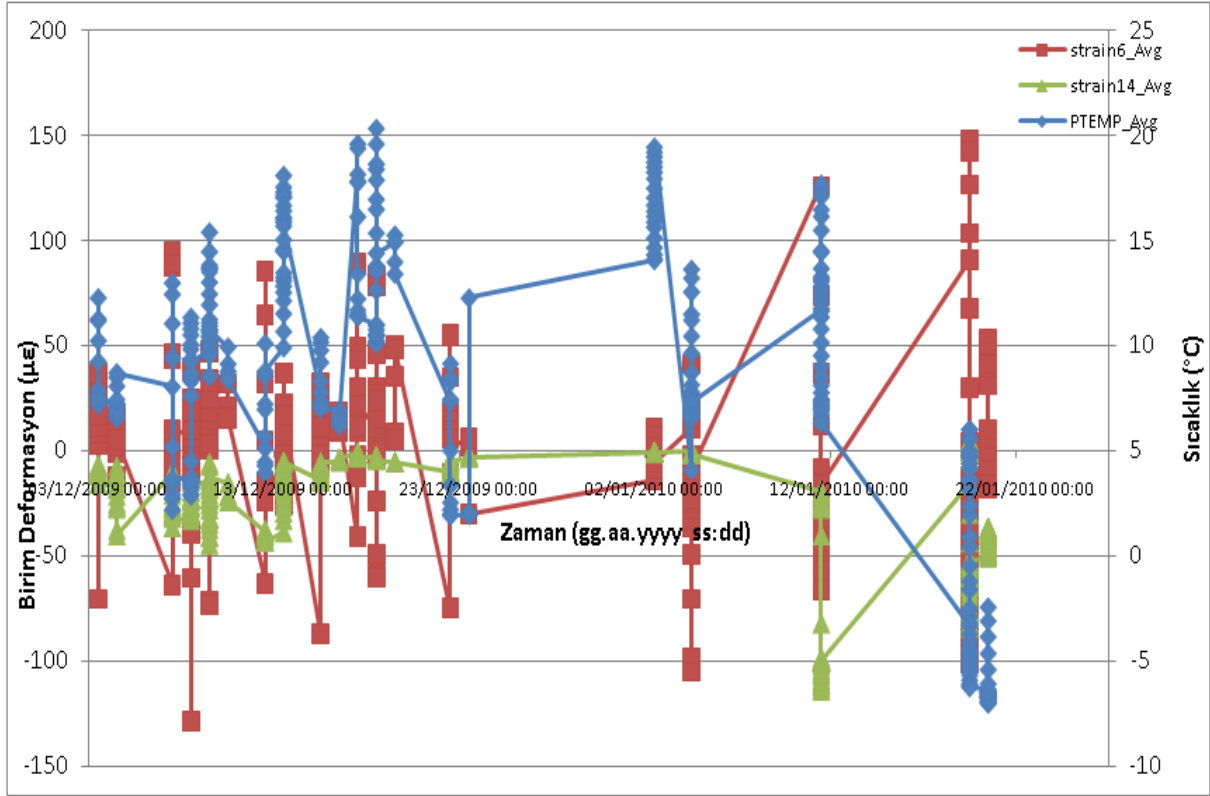


Şekil 113 – Bataryadaki voltaj ve ortam sıcaklığı ölçüm değerleri.



Şekil 114 – Birim Deformasyon Ölçerlerden Okunan Değerler.





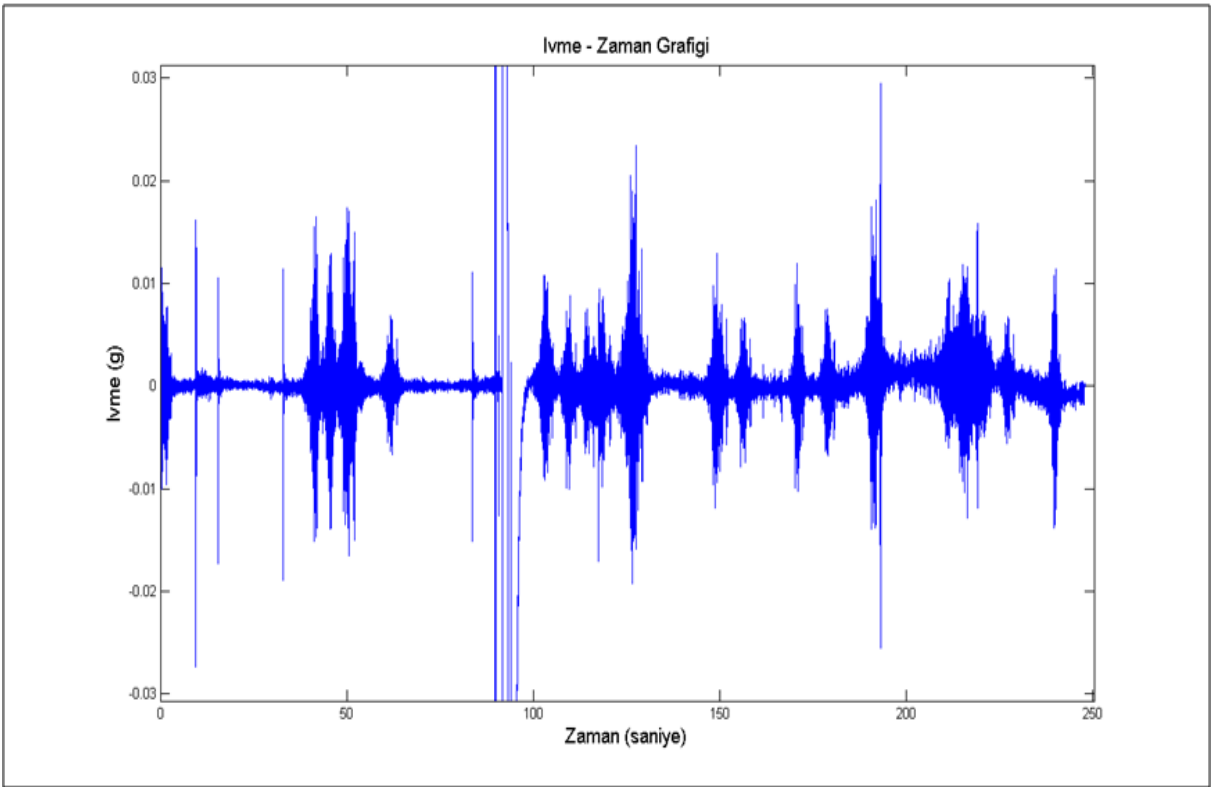
Şekil 115 – Düzenli okuma alınabilen birim deformasyon ve ortam sıcaklığı ölçümleri.



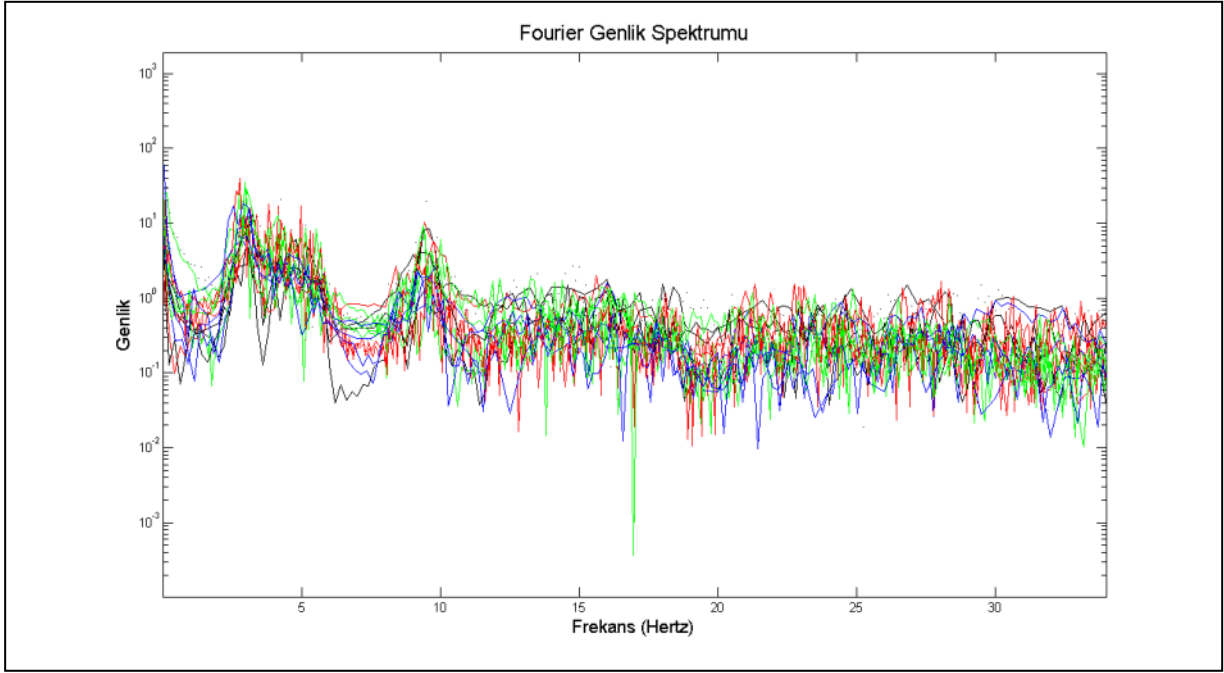
Şekil 116 – Lineer değişken deplasman ölçerlerden okunan değerler.



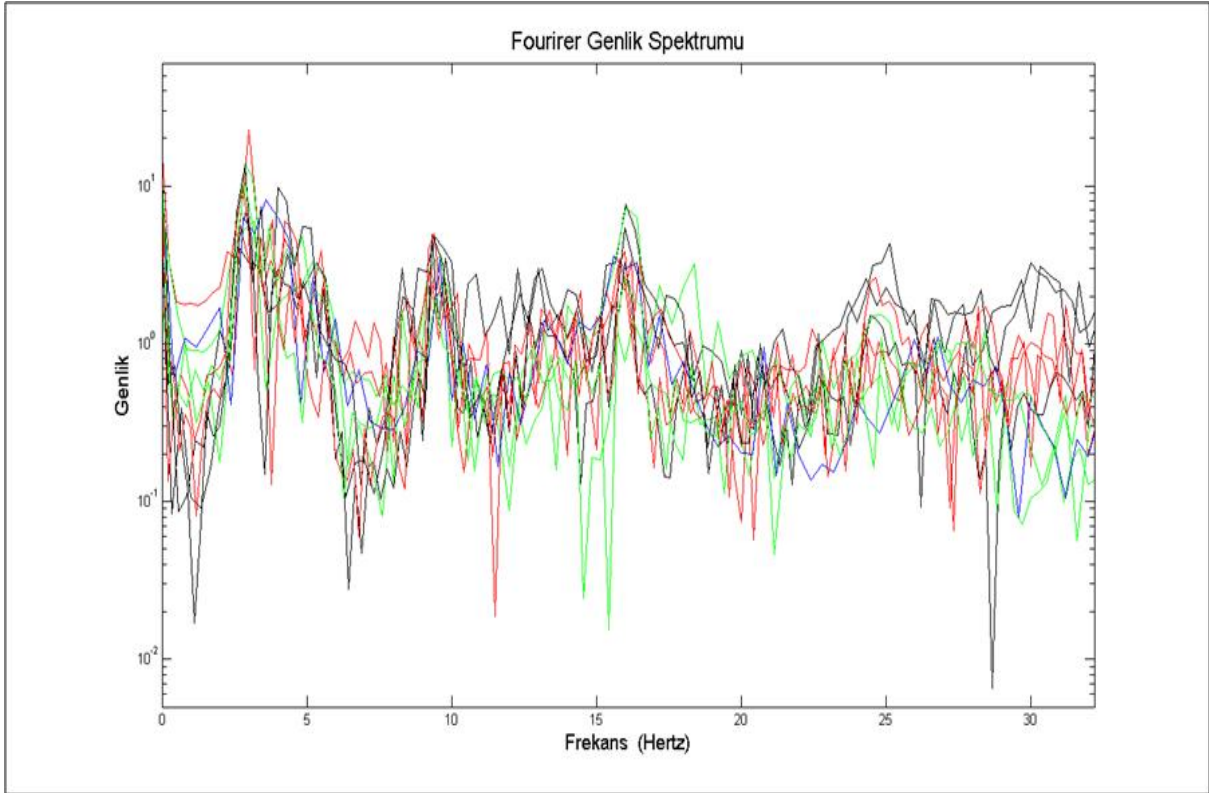
Şekil 117 – Takılan ivme ölçerler.



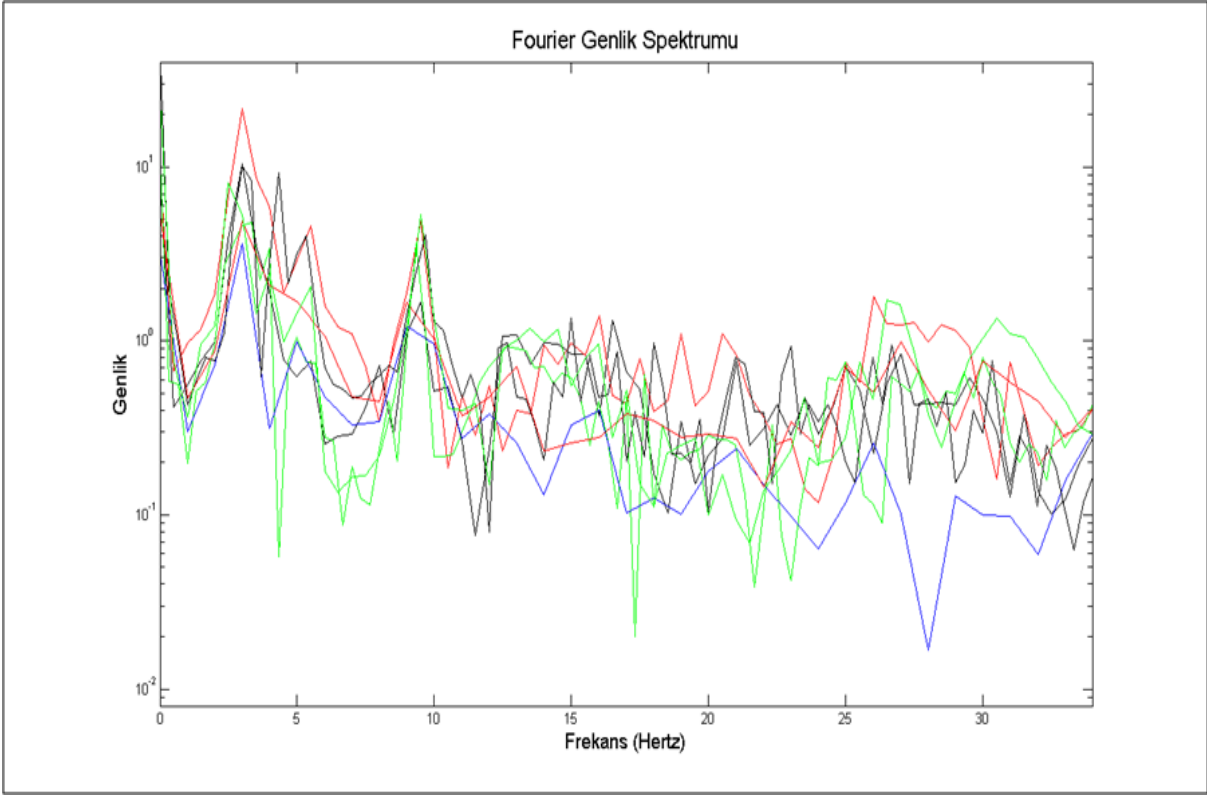
Şekil 118 – Dinamik test verisi.



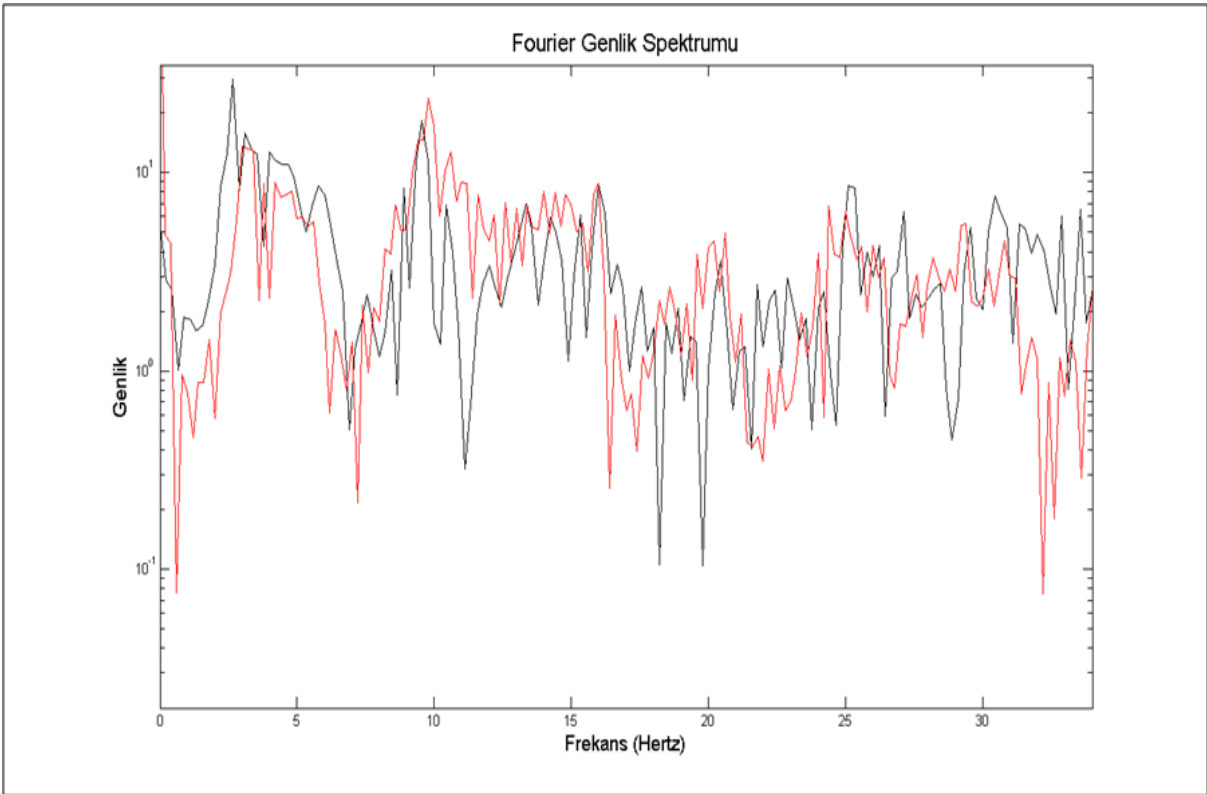
Şekil 119 – Açıklık boşken okunan ivme değerlerinin fourier spektrumu.



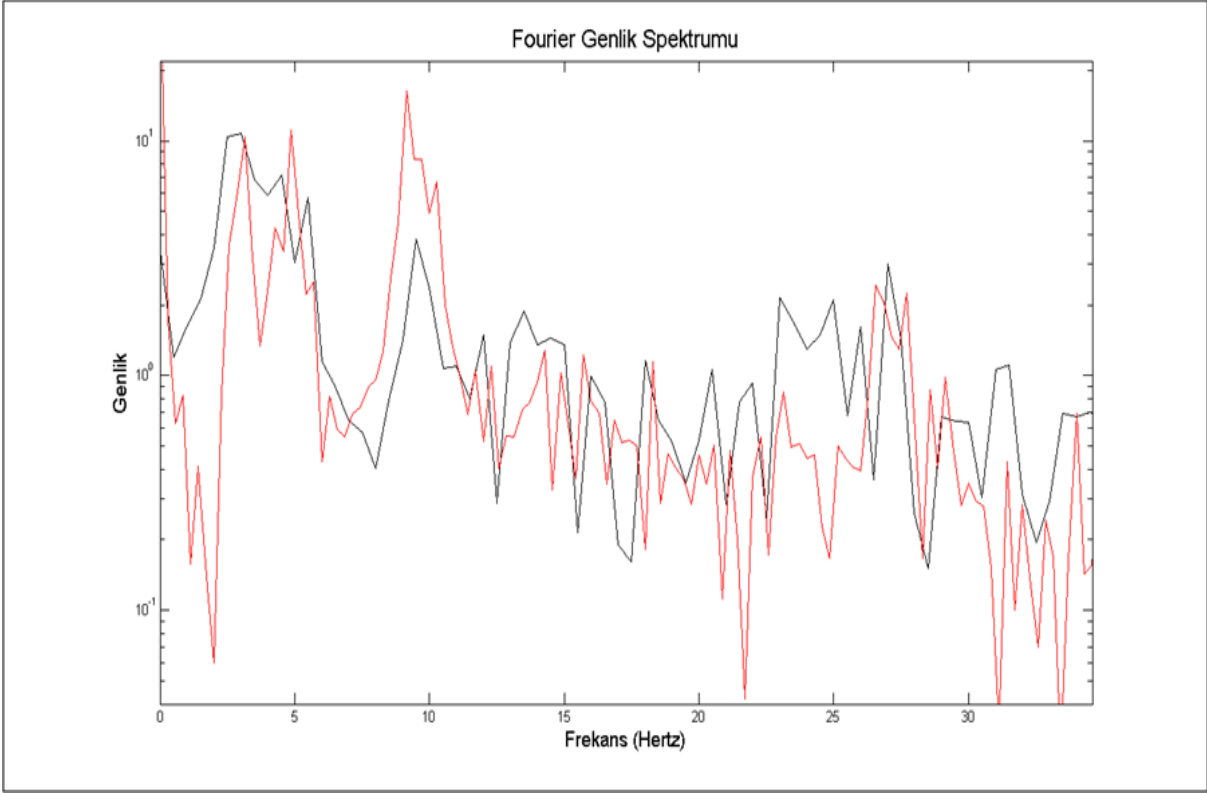
Şekil 120 – Açıklıktan Hafif araç geçerken okunan ivme değerlerinin fourier spektrumu.



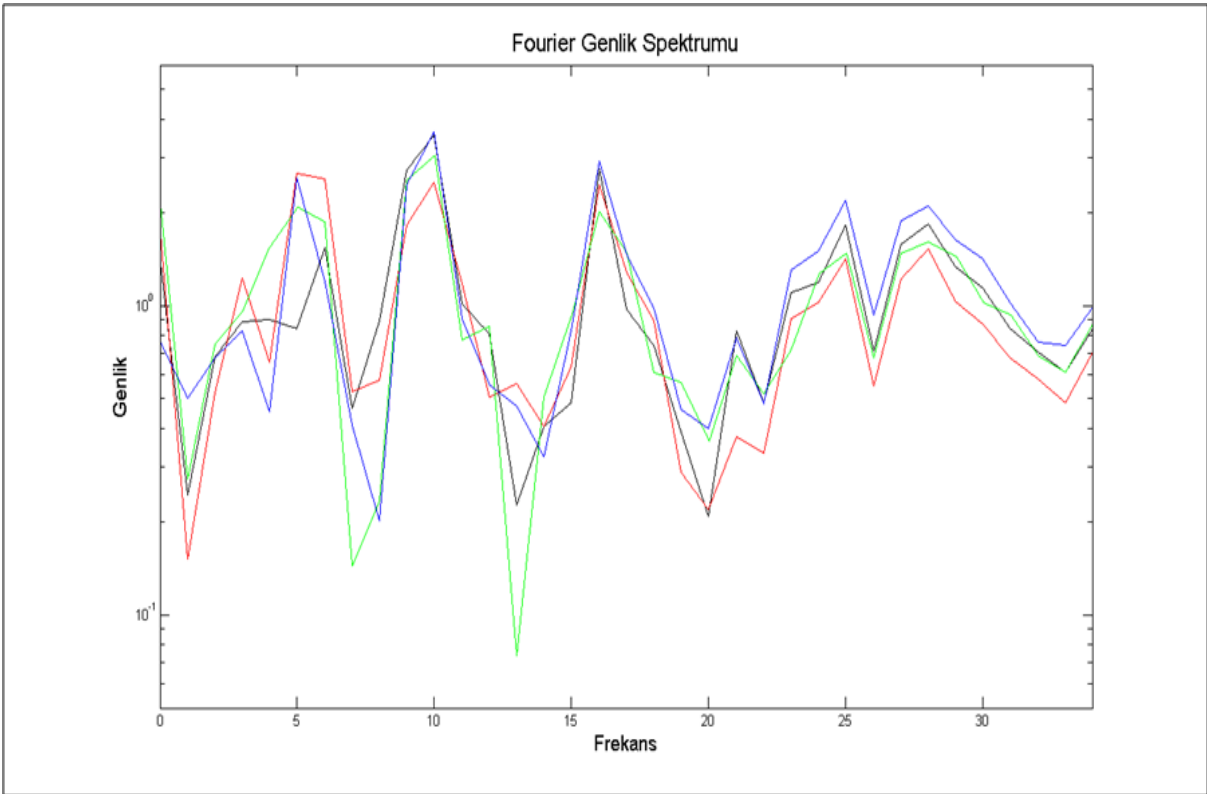
Şekil 121 – Hafif araçlar açıklığı terk ettikten sonra okunan ivme değerlerinin fourier spektrumu.



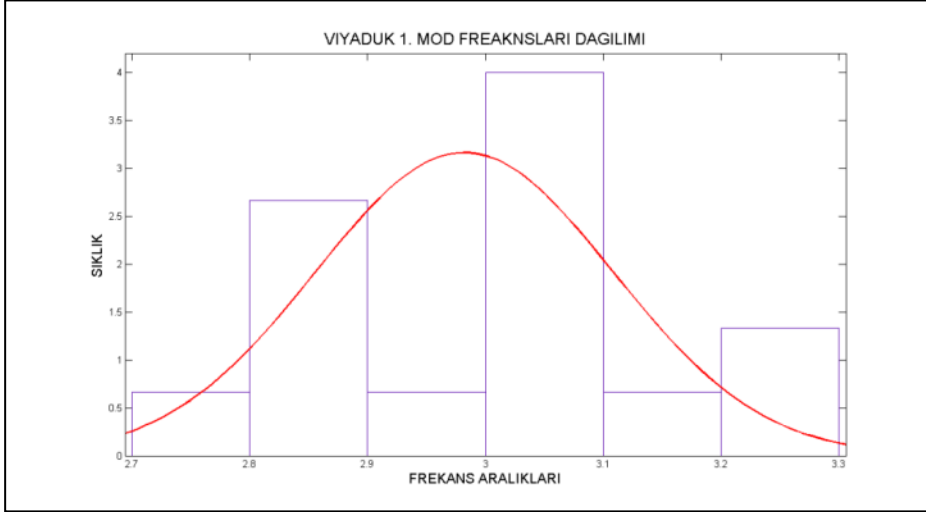
Şekil 122 – Açıklıktan ağır araç geçerken okunan ivmelerin fourier spektrumu.



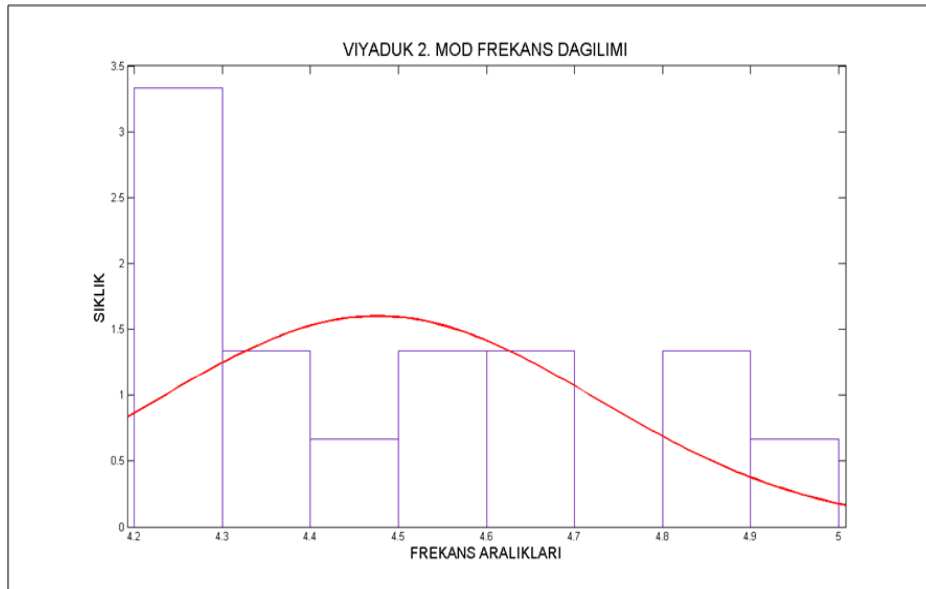
Şekil 123 – Ağır araçlar açıklığı terk ettikten sonra okunan ivmelerin fourier spektrumu.



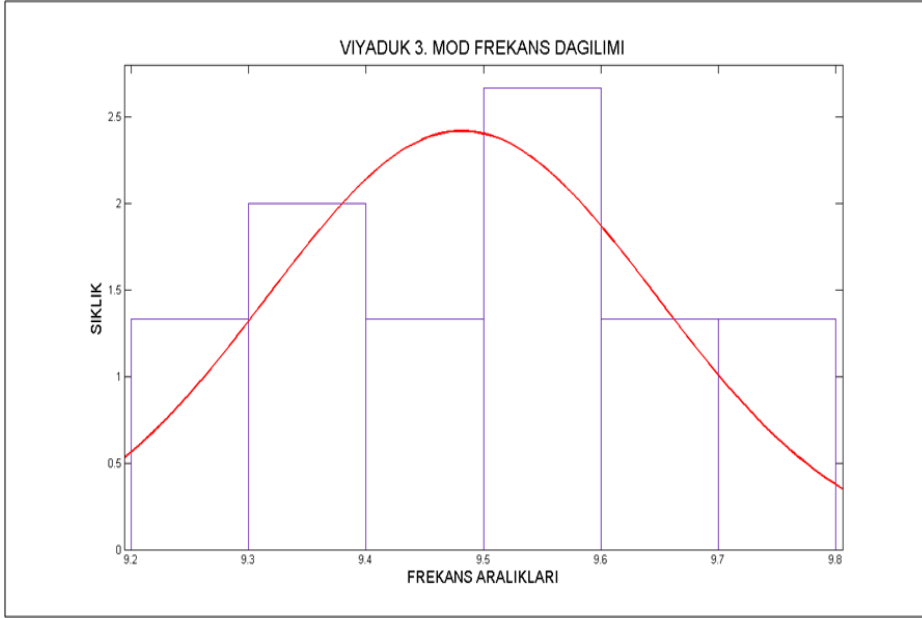
Şekil 124 – Ani darbe etkisi sonucu okunan ivmelerin fourier spektrumu.



Şekil 125 – Fourier analizlerinden elde edilen birinci modların dağılımı.



Şekil 126 – Fourier analizlerinden elde edilen ikinci modların dağılımı.



Şekil 127 – Fourier analizlerinden elde edilen ikinci modların dağılımı.

Viyadüğün ulaşımı ve bölge şartlarının (köprü altına 50m yükseklikte kova ile ulaşılması, zaman kısıtlaması vb) elverişsizliğine ilaveten karşılaşılan beklenmeyen sorunlar (böcek istilası, kutunun su sızdırması, ivme ölçerlerin düzgün çalışmaması, multiplexer bozulması vb) sebebiyle, 29 Ekim 2009 tarihinden proje bitimine kadar sistem düzgün olarak çalışmamıştır. Mevcut verilerin zaman serilerindeki kesintisine rağmen, viyadük üzerinden kısa süreli ve farklı bir veri toplama sistemi ile alınan dinamik verilerin değerlendirilmesi mümkün olmuştur.

Pilot uygulamalardan en önemlisinde karşılaşılan bu aksilikler neticesinde, viyadükten istenilen süre boyunca ve kesintisiz veri toplanamaması sonucu oluşmuştur. Veri toplama sistemini oluşturan cihazların, kutu yeri değiştirilirken, su sızıntısı, ya da böcek istilası sebebiyle kısmen çalışmaz duruma geldiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bozulmuş olan çoklayıcının, AVW1 ara biriminin, nem-sıcaklık ölçerinin ve veri toplama sisteminin parçalarının yenilerinin alınması, bahar aylarında değiştirilmesi ve en azından 2010 yılı sonuna kadar izlenmesi gerekli olduğu görülmektedir. Ek bütçe ve ek süre başvurusu yapılmış, fakat grup kararı ile ek süre verilirken ek bütçe verilmediği için cihazları yenileriyle değiştirme imkanı olmamıştır. Proje kapsamında uygulanan diğer pilot çalışmalar sonucu proje hedeflerine ulaşıldığı düşünülmektedir.

#### 4.1.4.10 Adana Andırap Köprüsü yapısal sağlık izleme çalışmaları

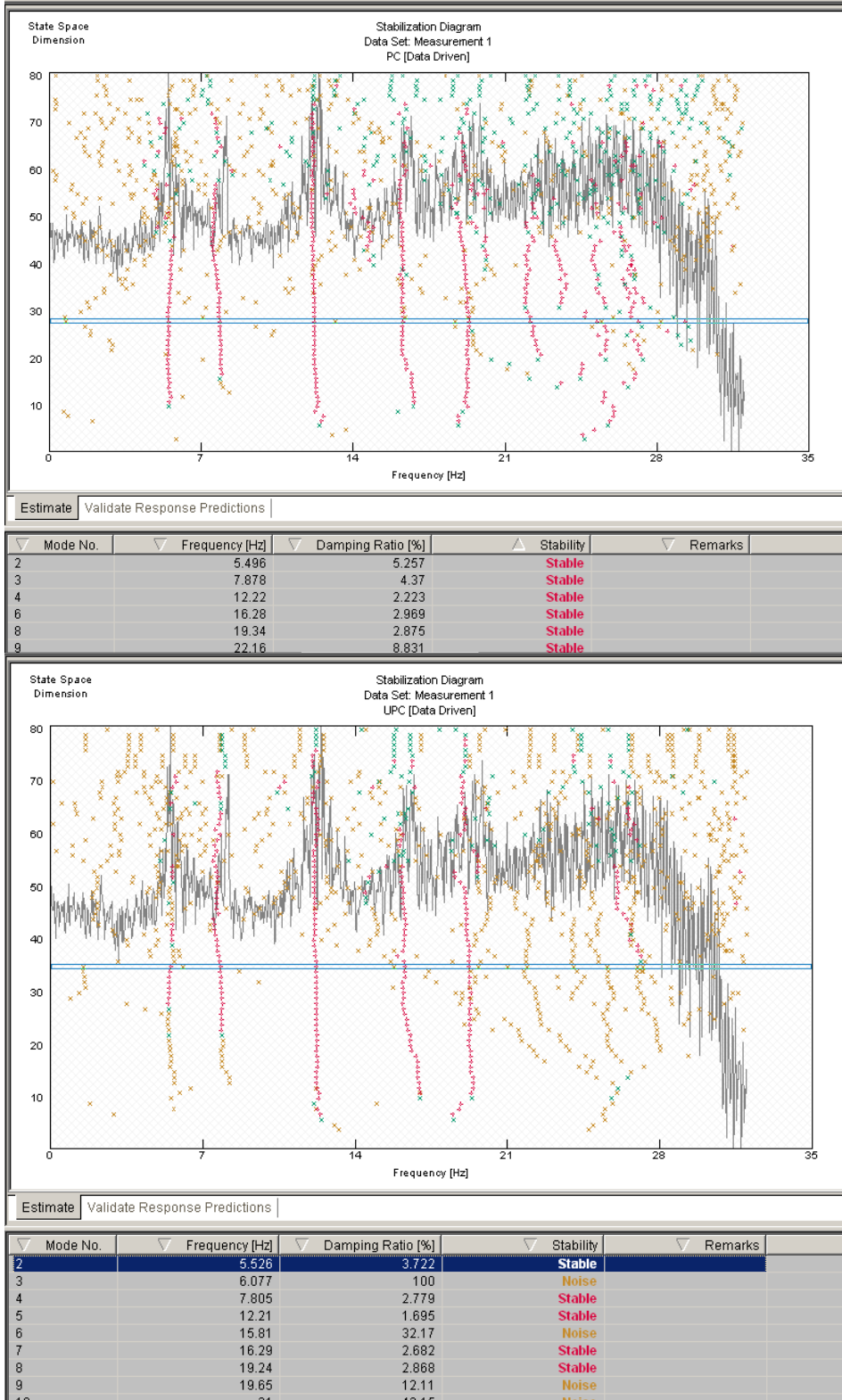
İnşaat halinde olan Ermenek barajına götürülmesi gereken ağır kazı taşıtları ve sonrasında çok sayıda (günde yaklaşık 100 – 250 adet) ağır yüklü (50 ila 70 ton) kamyonların köprüden geçmesi gerekmektedir. Kritik vadi geçişinde bulunan kemer köprü'nün güçlendirmesi yaptırılmış, fakat performansının tam olarak izlenmesi gerekli görülmüştür. Yük geçişleri sırasında köprü'nün davranışının izlenmesi ve kalıcı bir deformasyon yapıp yapmadığının araştırılması pilot uygulamalardan birisi olarak seçilmiştir.

Andırap köprüsü Seyhan nehri üzerinde bulunmaktadır ve Kavşak Bendi Hidroelektrik santral barajı inşaatı açısından hayati öneme sahiptir. Baraj gövde kazı – dolgu çalışmaları sırasında standart dışı ağır kamyonların geçebileceği bölgedeki tek köprüdür. Köprü'nün dizayn edildiği standart yük HS20 kamyonu için toplam  $4+16+16 = 36$  ton yüke göre tasarlanmış olması muhtemel iken, analitik modelleme ile emniyetli olarak 25 ton kapasitede olduğu öngörülmüş ve güçlendirilmesi gerektiği anlaşılmış durumdadır. Köprü güçlendirilmeden önce 10 adet birim deformasyon (strain) sensörler ve 1 adet LVDT yerleştirilerek test yapılmıştır. Köprü üzerine dinamik ivme ölçer sensörler yerleştirilerek köprü'nün salınım frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir (Şekil 128 - Şekil 131).

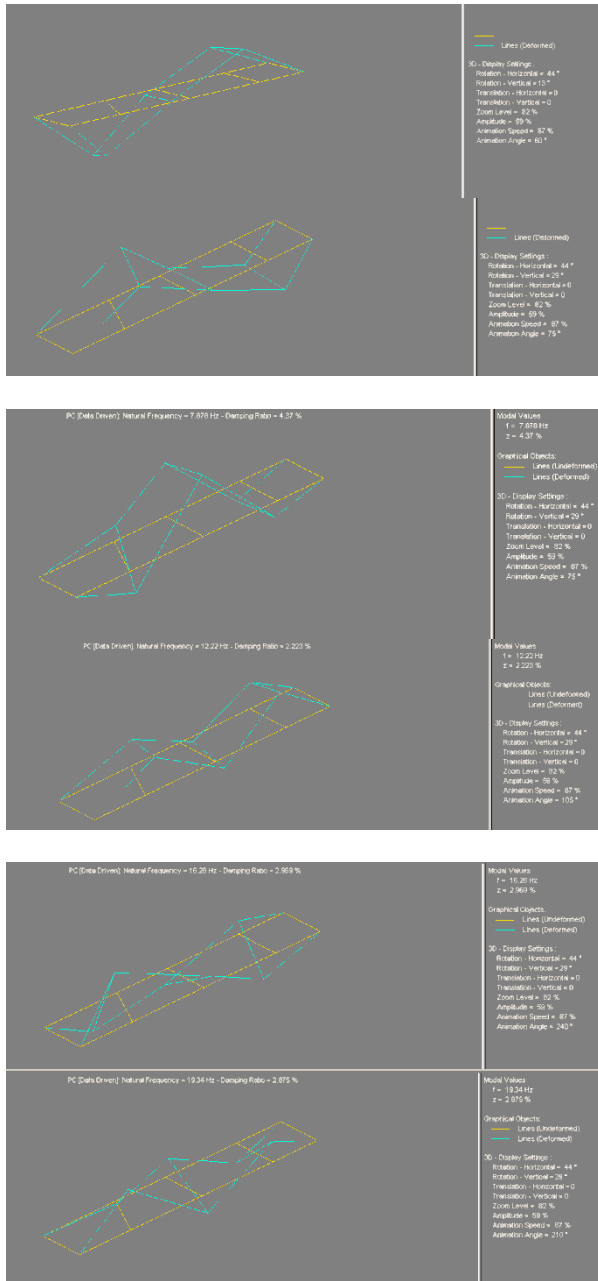


Şekil 128 – Köprü üstüne yerleştirilen ivme ölçerler ve kepçe ile vurularak dinamik test yapılması.

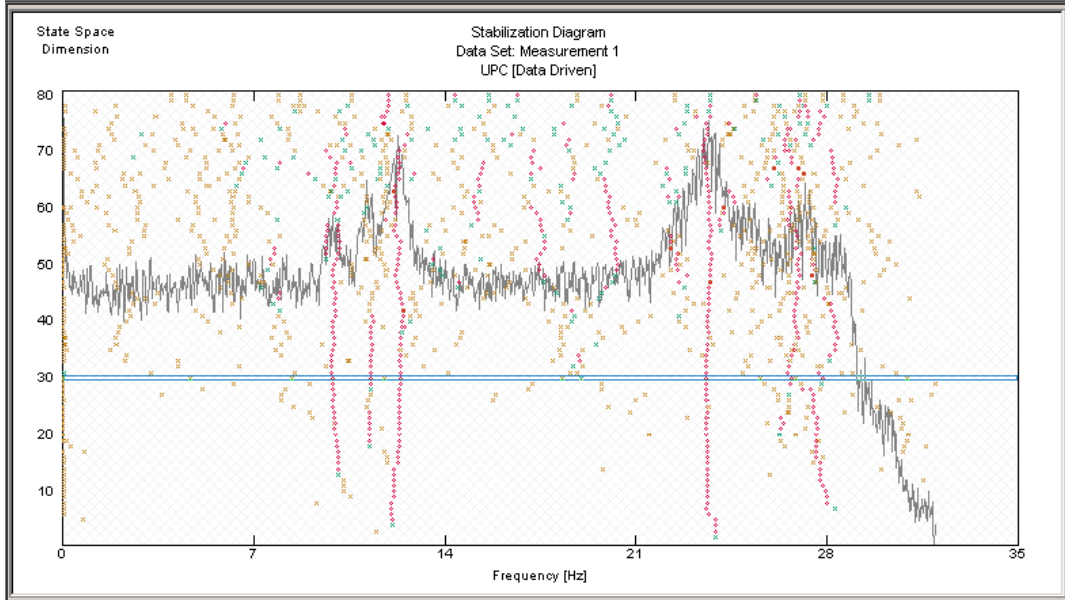




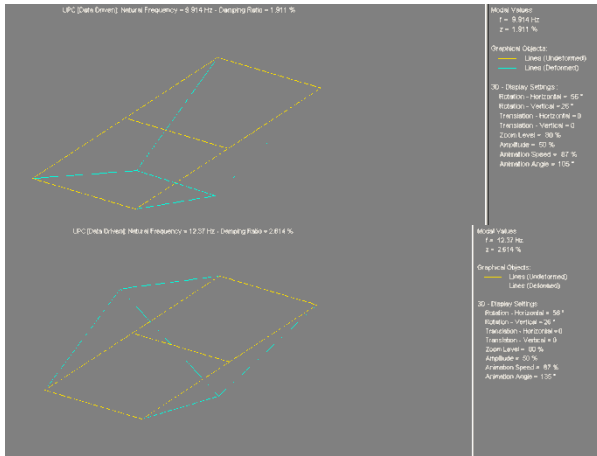
Şekil 129 – Köprü dinamik test sonuçları – modal frekanslar ve sönüm oranları.



Şekil 130 – Köprü dinamik test sonuçları – mod şekilleri.



Mode No.	Frequency [Hz]	Damping Ratio [%]	Stability	Remarks
5	9.914	1.911	Stable	
6	11.28	4.837	Stable	
8	12.37	2.614	Stable	
11	23.6	1.963	Stable	
13	26.72	3.034	Stable	
15	27.84	4.041	Stable	
1	0.012	100	Noise	
2	0.07953	NaN	Noise	Not displayed
3	4.649	100	Noise	

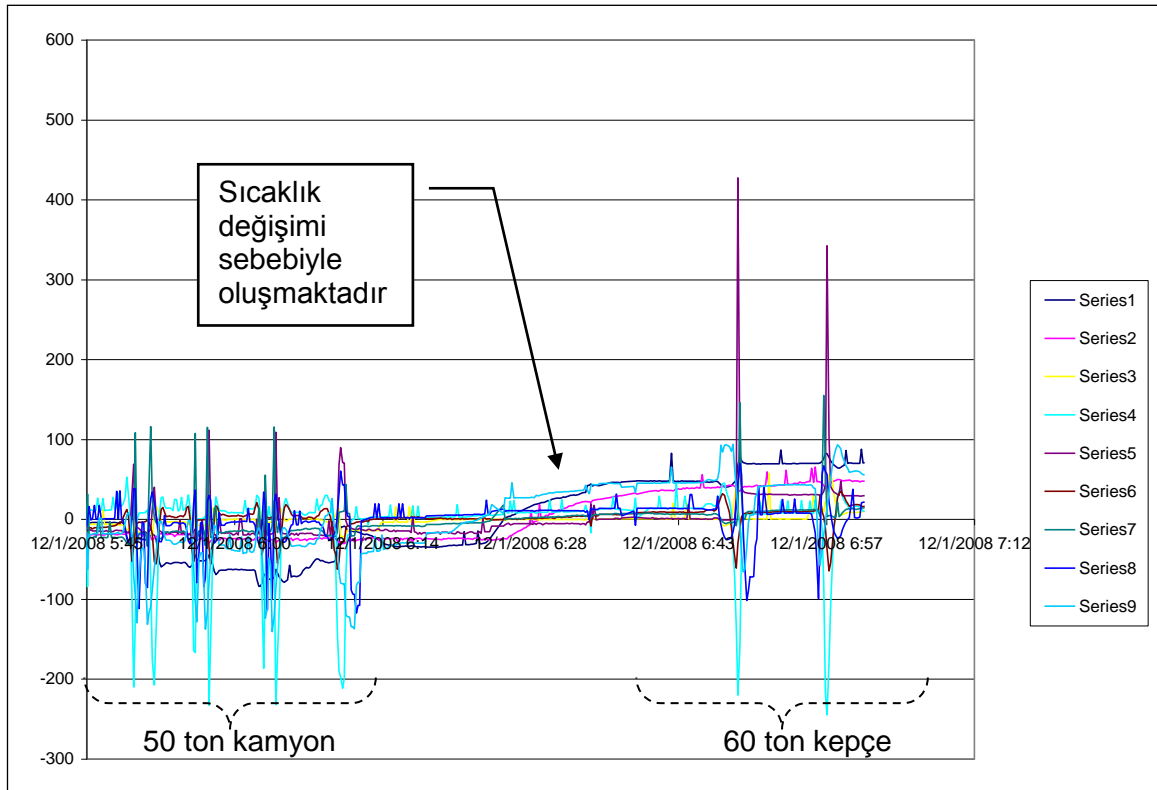


Şekil 131 – Yaklaşım açıklığı dinamik frekanslar ve mod şekilleri.

Köprü üzerinden 25 ton toplam ağırlığa sahip bir kamyon geçirilerek yapılan ön yükleme deneyinde okunan birim deformasyon değerlerinin  $70 \mu\epsilon$  seviyesinde olduğu, 50 tonluk kamyonların çok sayıda geçiş yapması beklendiği (2 yıl boyunca günde yaklaşık günde 200 adet) ve modelleme çalışmasında kolon ve kiriş kapasitelerinin zorlandığı tespit edildiği için kamyonların geçişini üstlenen firma tarafından güçlendirme çalışması yaptırılmıştır. Güçlendirme çalışması sonrasında hedeflenen 50 tonluk kamyon ve 60 tonluk vinç yükleri kullanılarak yapılan kontrollü geçiş deneylerinde okunan en fazla şekil değiştirme miktarının

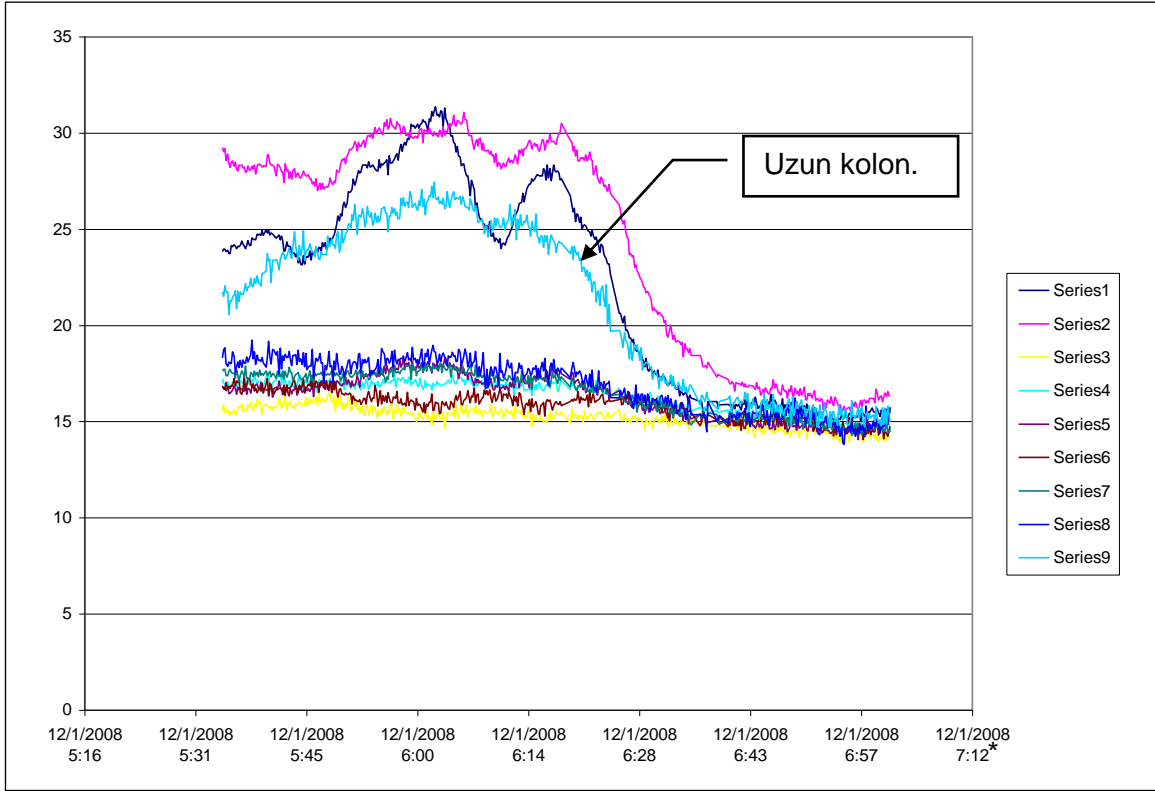
100  $\mu\epsilon$  seviyesinde kaldığı görülmüştür (Şekil 132). Fakat 60 ton kepçe geçerken döşemeye bağlı sensör tarafından 400  $\mu\epsilon$  değerine yakın okumalar alınmıştır. Kepçenin hem ağır oluşu hem de paletler arası uzaklığın kamyondan farklı olarak döşemenin tam ortasına gelecek şekilde olması sebepleriyle yüksek okuma alınmıştır.

Kamyon geçişleri sırasında okunan ham veri değerlendirildiğinde, geçiş sırasında köprü ve hava sıcaklığı değişimlerinden kaynaklanan termal etkilerin köprü üzerinde ilave yükler oluşturduğu görülmüştür (Şekil 133). Kolona bağlı bazı sensörlerin de sıcaklık değişiminden etkilendiği gözlemlenmiştir.

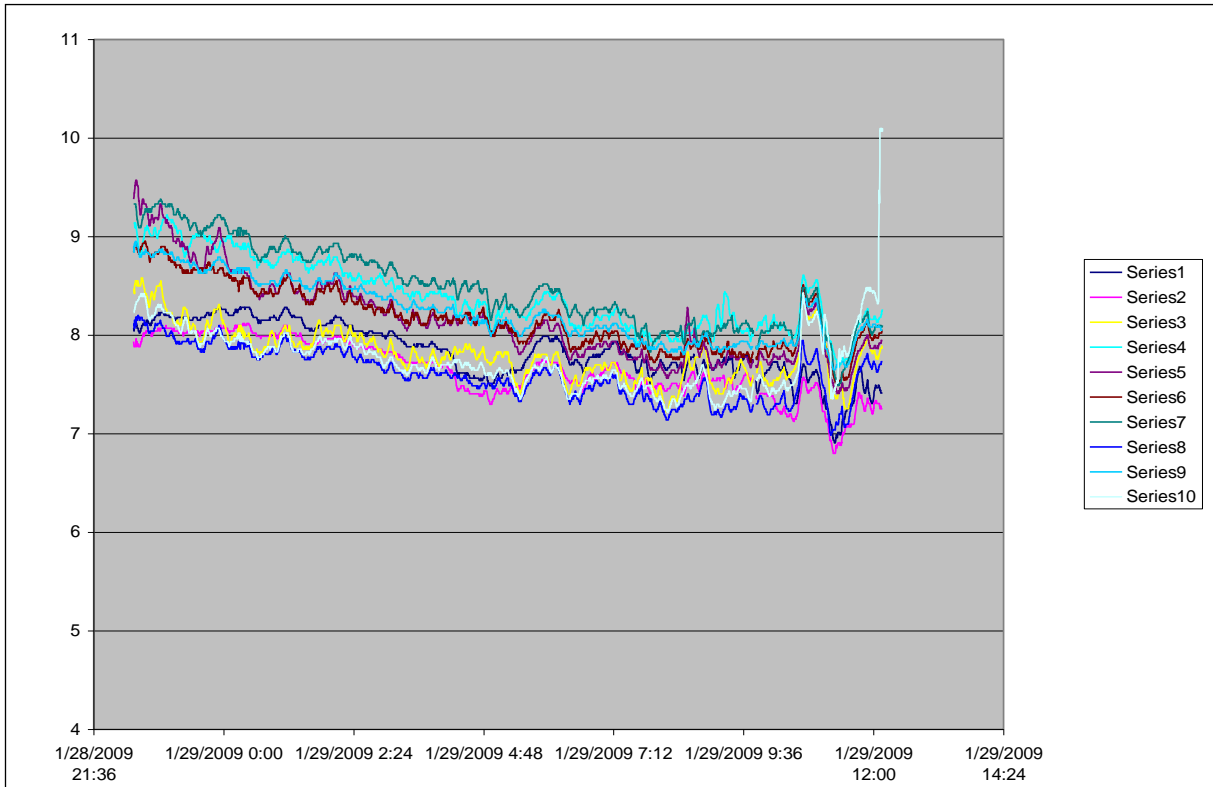


Şekil 132 – Kontrollü kamyon ve vinç yükü geçişleri sırasında alınan okumalar.

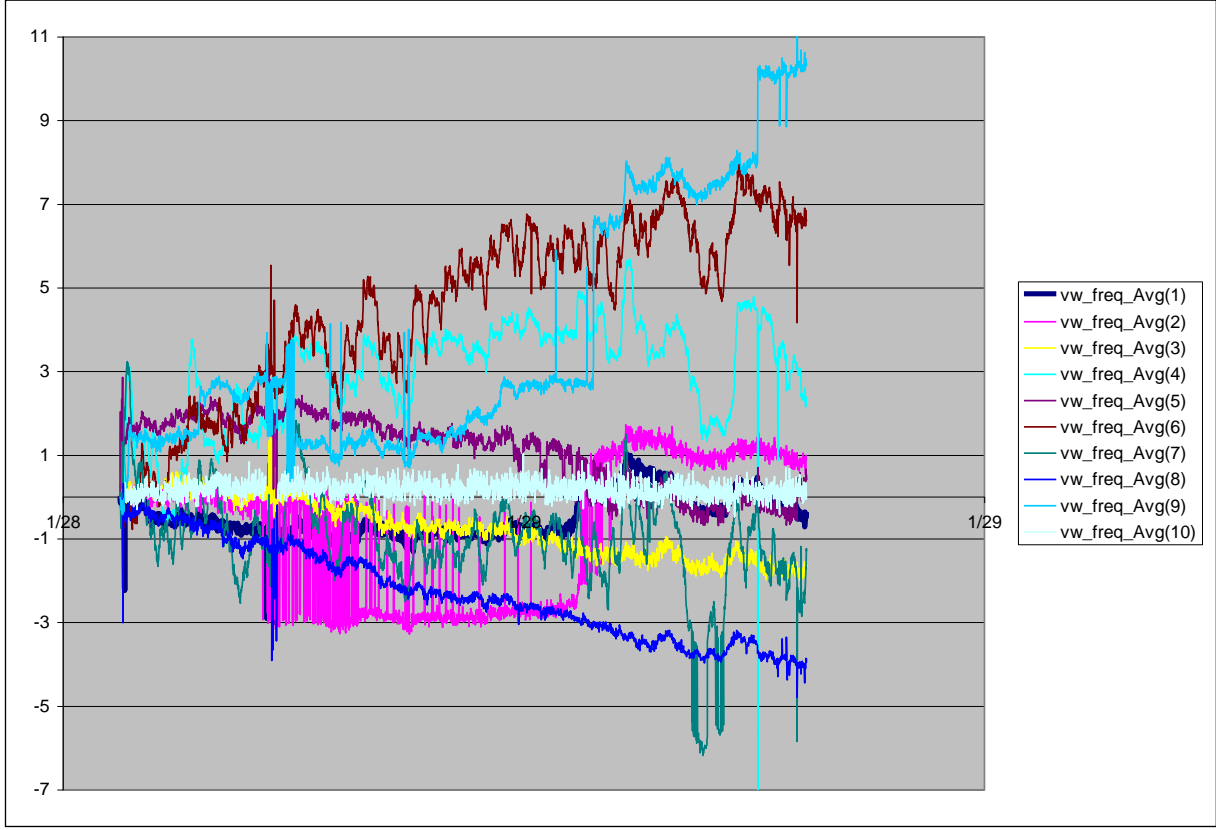
Gece süresince köprünün soğuması sırasında olası şekil değişimlerinin büyüklüğü öğrenilmek üzere her 12 saniyede bir okuma alınarak 29 Ocak 2009 gecesi köprü sürekli izlenmiştir. Gece 9:00 ve sabah 7:00 arasında alınan sıcaklık verileri Şekil 134'de ve birim deformasyon verileri Şekil 135'de verilmektedir. Sıcaklık değişimi 1-2 derece, birim deformasyon değişimi de 10  $\mu\epsilon$  ile sınırlı kalmıştır.



Şekil 133 – Sensörlerin bulunduğu noktadaki sıcaklık değişimi verileri.

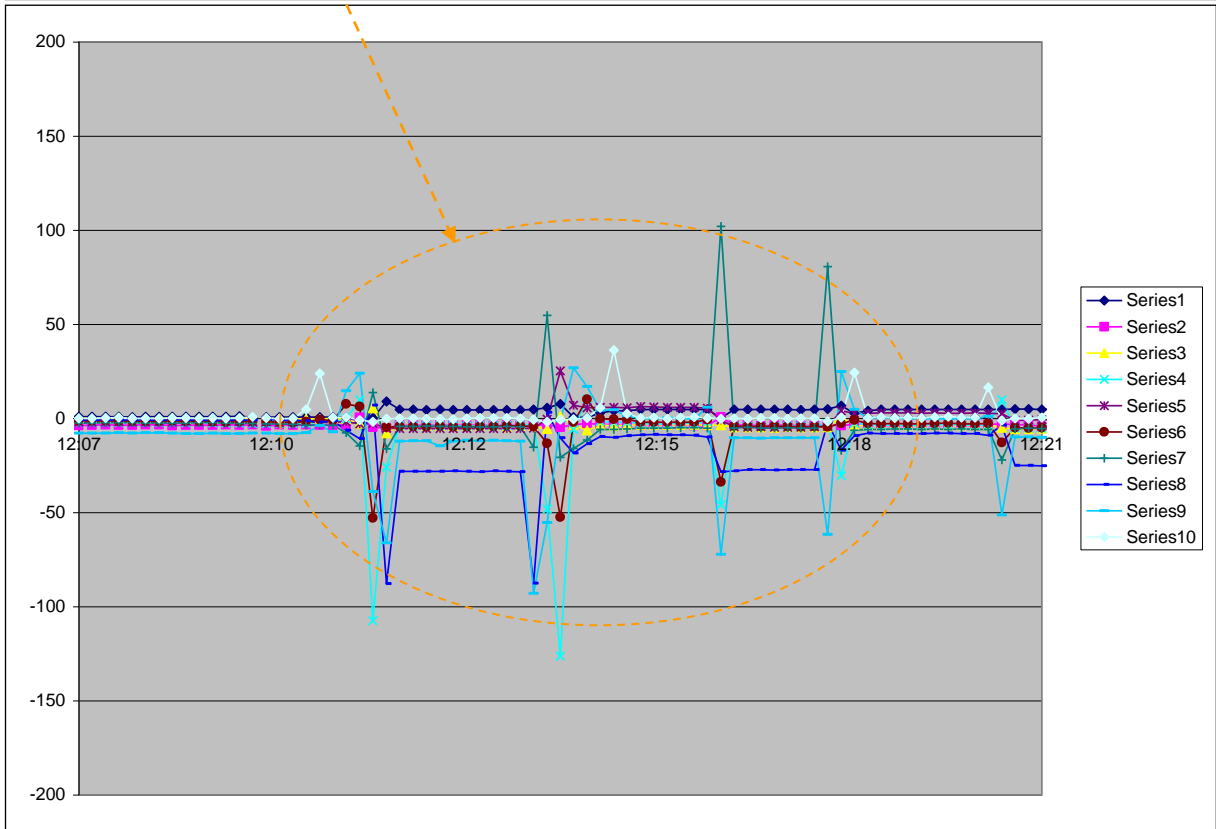
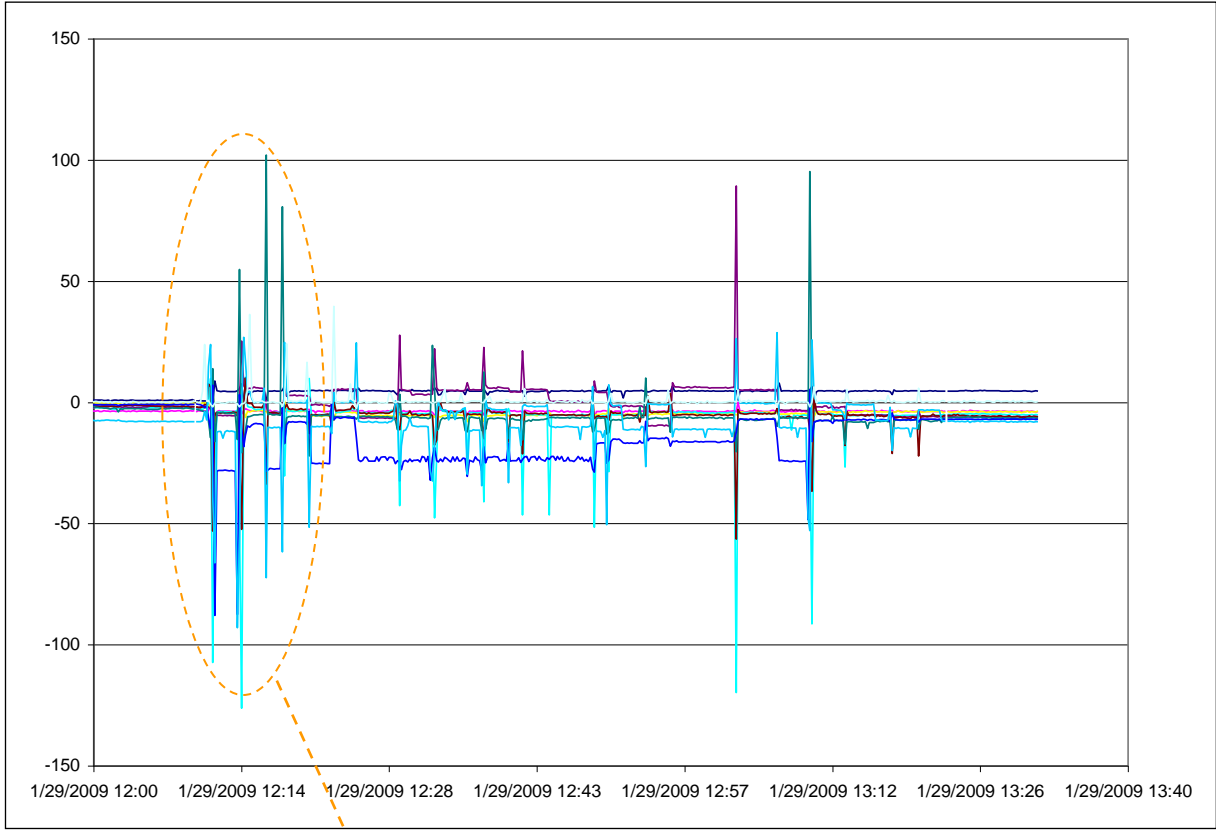


Şekil 134 – Sensörlerin bulunduğu noktadaki sıcaklık değişimi verileri.



Şekil 135 – Sensörlerin bulunduğu noktadaki sıcaklık değişimi verileri.

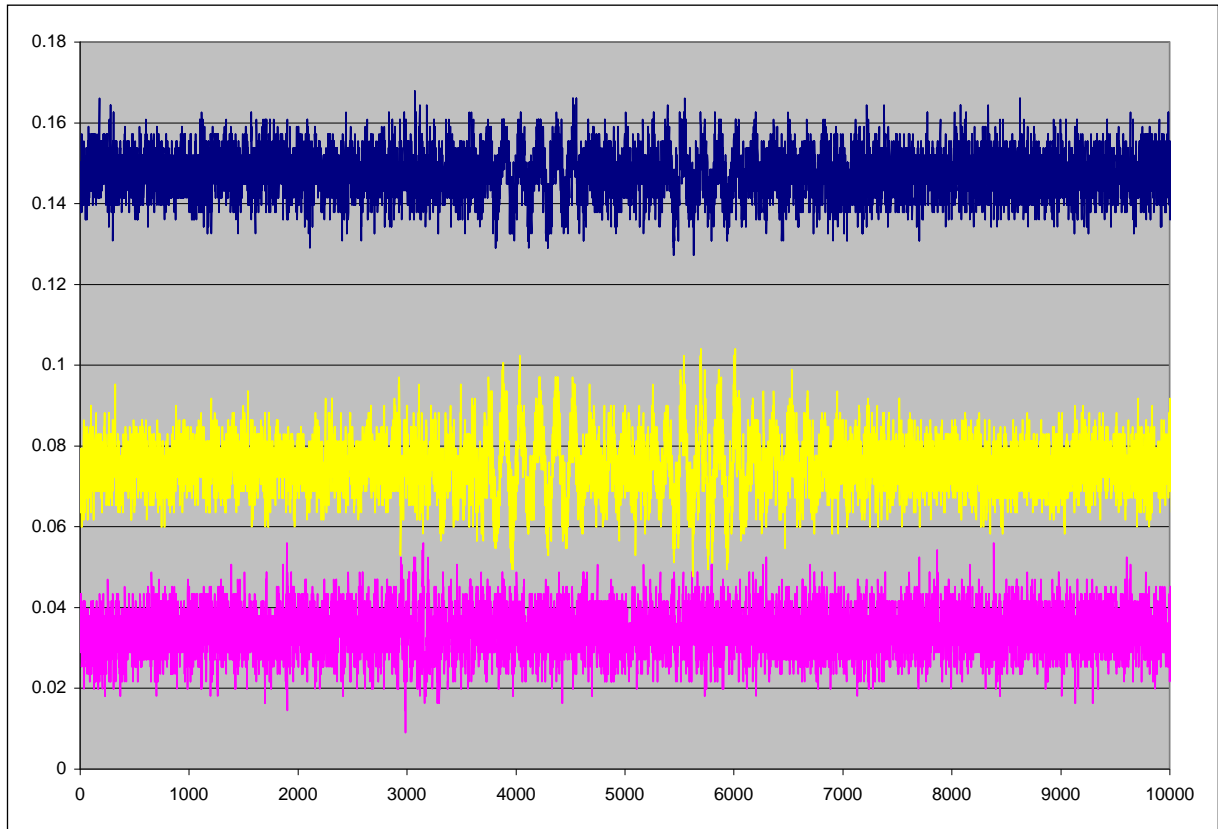
Köprü üzerinden kamyonların geçişleri sırasında kamyonların geçiş hızlarının etkisi değerlendirilmiştir. Farklı hızlarda kamyonların geçişi sağlanarak köprüden birim deformasyon (Şekil 136) ve ivme titreşim (Şekil 137) verileri okunmuştur. Okunan en fazla birim deformasyon  $100 \mu\epsilon$  ve en fazla ivme  $0,025g$  ( $0,25 \text{ m/s}^2$ ) olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, kamyon hız sınırlaması tespit edilmemiş, fakat hızlı geçişlerin köprüye yapacağı kümülatif ve dolaylı etkiler göz önünde bulundurularak sabit hızla (hızlanma ya da yavaşlama yapmadan) ve  $15 \text{ km/saat}$  hızı geçmeyecek şekilde geçmeleri tavsiye edilmiştir.



Şekil 136 – Kamyonların farklı hızlarda köprüden geçişlerinde alınan statik okumalar.

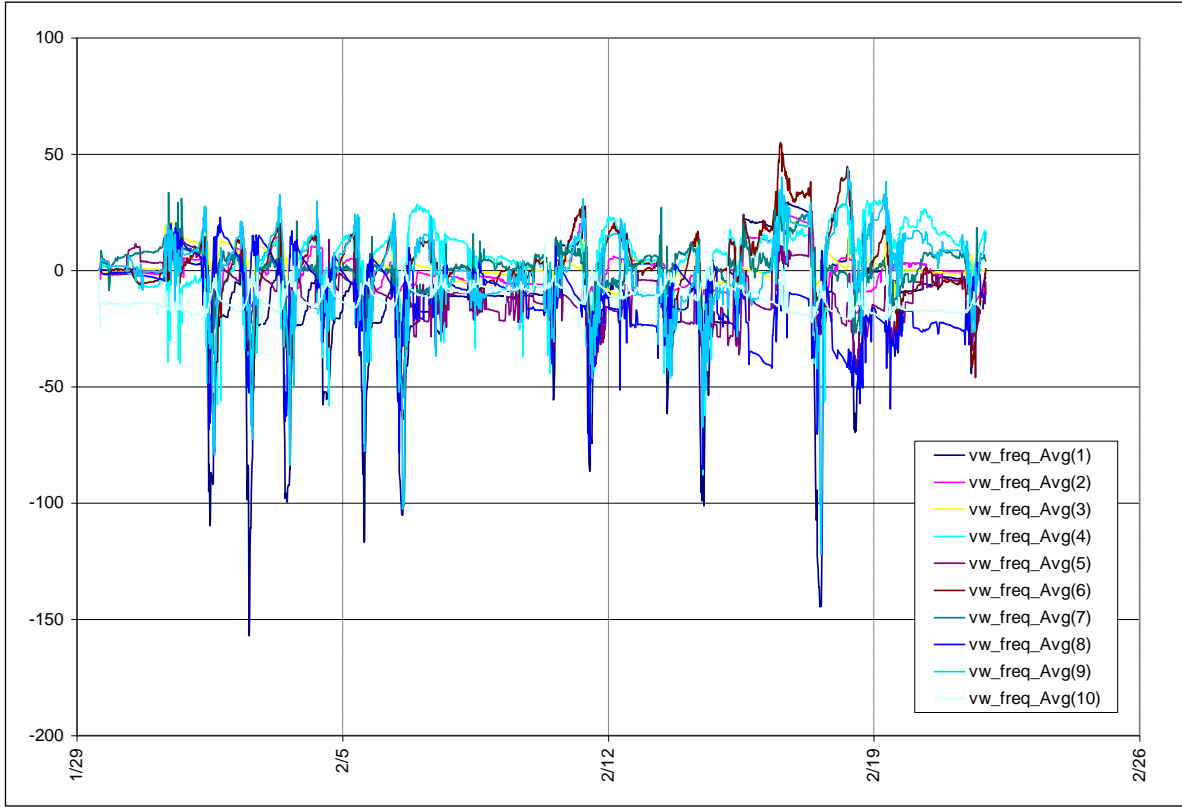
Andırap köprüsüne bırakılan yapısal sağlık izleme sistemi, 15 dakikada bir olmak üzere tüm kanallardan veri okuyacak şekilde ayarlanmıştır. Yapılan izleme çalışmaları sırasında elde edilen veriler Şekil 138'de görülmektedir. 24 saat boyunca alınan tüm okumaların  $150 \mu\epsilon$  sınırı içinde kaldığı görülmektedir. Alınan birim deformasyon okumaları ve sıcaklık okumaları aynı grafikte karşılaştırıldığında (Şekil 139),  $150 \mu\epsilon$  okumalarının köprü bölgesinde oluşan ani sıcaklık artışları ile örtüştüğü görülmektedir.

Andırap köprüsünde bulunan yapısal sağlık izleme sistemi, güneş paneli yardımıyla gündüz doldurulan kuru aküler tarafından çalıştırılmaktadır. Batarya voltajı da düzenli olarak ölçülerek kaydedilmektedir. Batarya voltajı ve köprü sıcaklığı grafiği aynı grafik üzerinde incelendiğinde bataryanın tam olarak şarj edilemediği günlerde köprü sıcaklığında da ani değişiklikler olmadığı görülmektedir (Şekil 140). Bu sayede, köprünün ısınmadığı günlerde havanın bulutlu ya da yağışlı olduğu ve yine aynı günlerde az güneş alması sebebiyle bataryanın yeteri kadar şarj edilemediği anlaşılmaktadır.

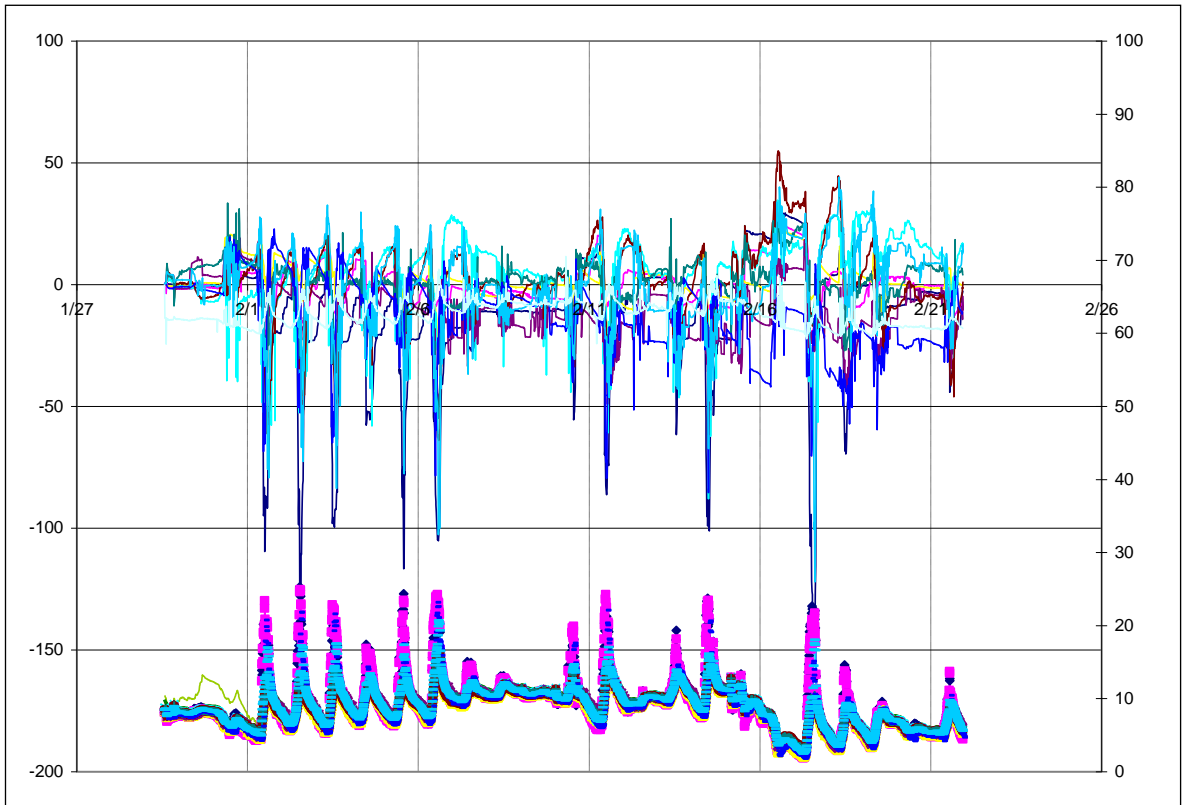


Şekil 137 – Kamyonların farklı hızlarda köprüden geçişlerinde alınan dinamik okumalar.

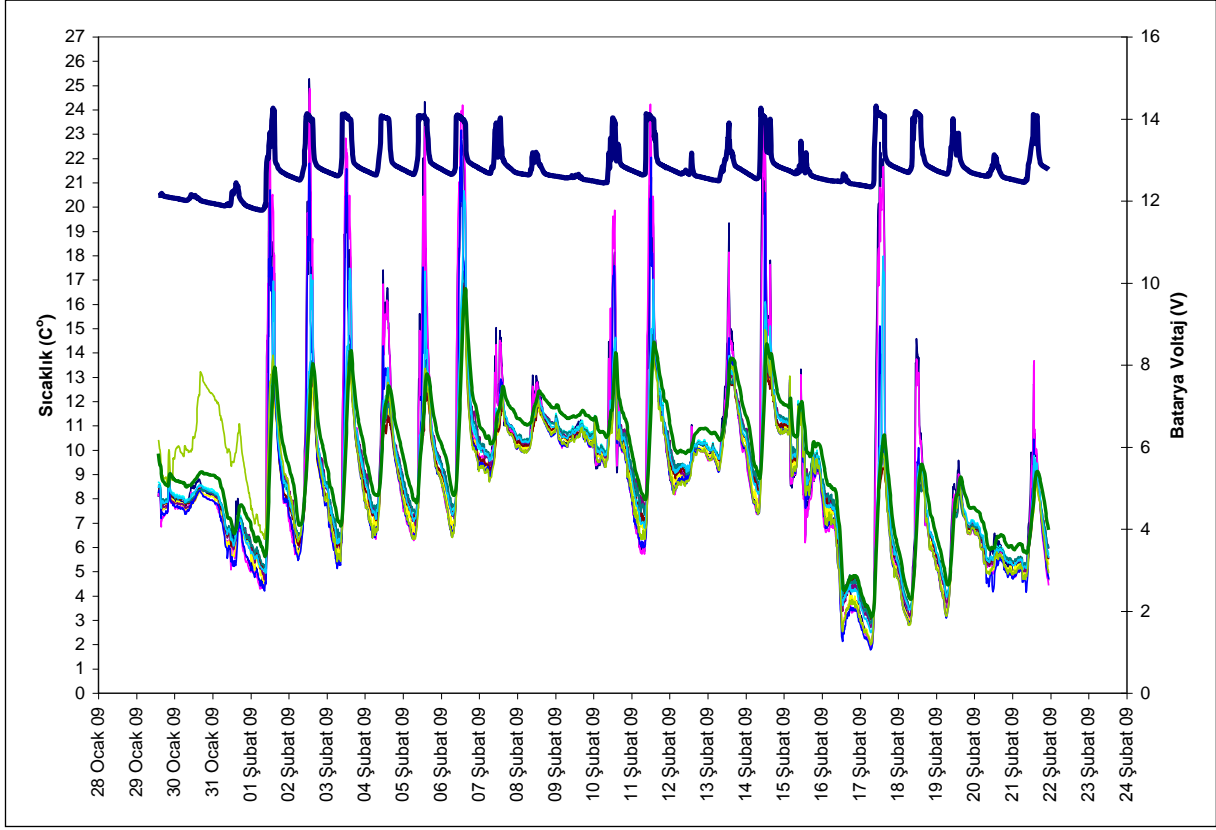




Şekil 138 – Andırap Köprüsü sürekli olarak 15 dakikada bir alınan okumalar.



Şekil 139 – Andırap Köprüsü sürekli birim deformasyon ve sıcaklık grafiği.



Şekil 140 – Andırap Köprüsü batarya voltajı ve sıcaklık değişim grafiği.

Andırap köprüsüne bırakılan yapısal sağlık izleme sistemini besleyen batarya, sistemin çalışması için hayati öneme sahiptir. Bataryanın takıldığı zaman 12V civarında voltajı olduğu, fakat güneş paneli ile şarj olmaya başladıktan sonra 12,5 V ile 14 V aralığında bulunduğu görülmektedir. Tüm sensörlerde 100 ila 200  $\mu\epsilon$  civarında değişimler görülmektedir. Şekil 141’de sistemi besleyen akünün voltaj değişimi ve besleme yapılamayan süre görülmektedir.

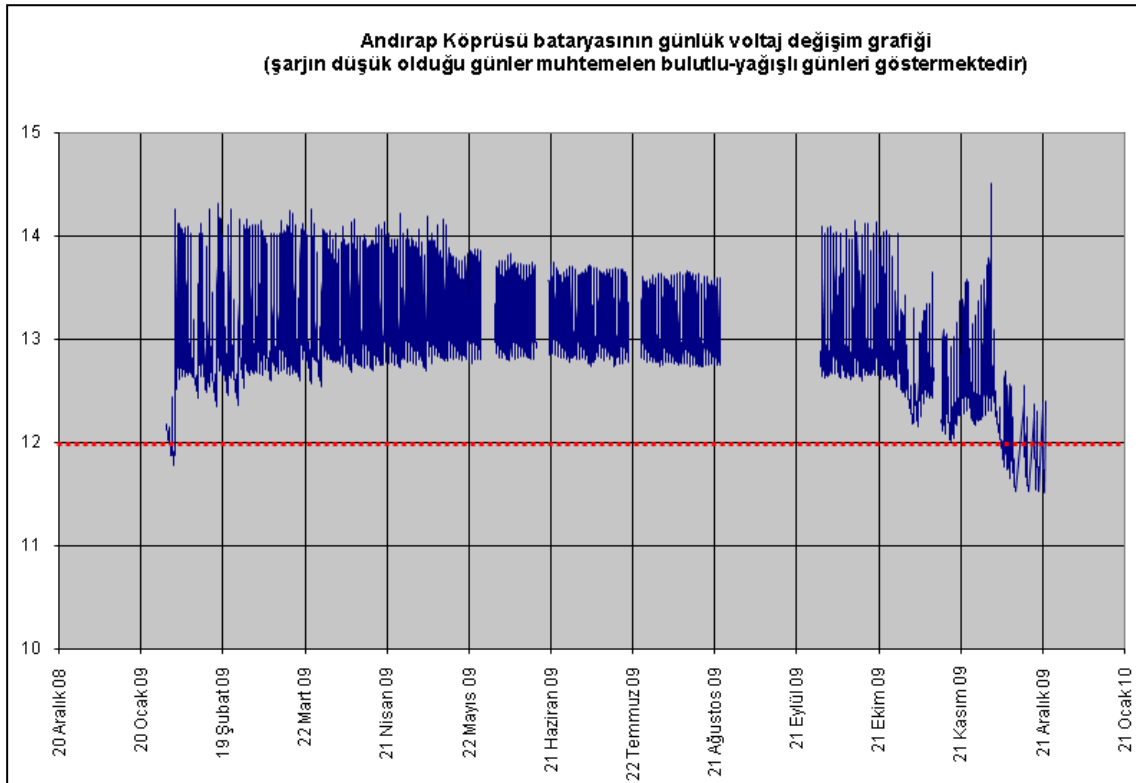
Andırap köprüsüne montajı yapılan 10 adet birim deformasyon ölçerden alınan ilk 1 aylık veriler Şekil 140’de verilmektedir.

Köprü’nün kemer ayaklarının hareketini gözlemlemek için ayaklar arasına halat gerilerek yaylı LVDT bağlanmış, sonrasında ise düşey hareketleri ölçebilmek amacıyla yaylı bir LVDT ucuna çelik tel bağlanarak nehir yatağına atılan bir büyük taşta çelik tel ankrajlanmıştır. Böylelikle düşey hareketlerin köprü altından akan suya rağmen ölçülmesine çalışılmıştır. Düşey LVDT, nehir sularında hareket eden ağaç dal ve kütük parçaları sebebiyle Şubat 2009’da, yatay LVDT de bilinmeyen bir sebeple Mayıs 2009’da hasar görerek okuma almamaya başlamıştır (Şekil 142). Kalibre edilmiş ve edilmemiş okumaların her birisine doğrusal bir çizgi oturtulup çizgilerin eğimleri incelendiğinde (Şekil 144), en çok değişimin 4 ve 5 nolu sensörlerde olduğu görülmüştür. 4 nolu sensör kısa kolona, 5 nolu sensör ise

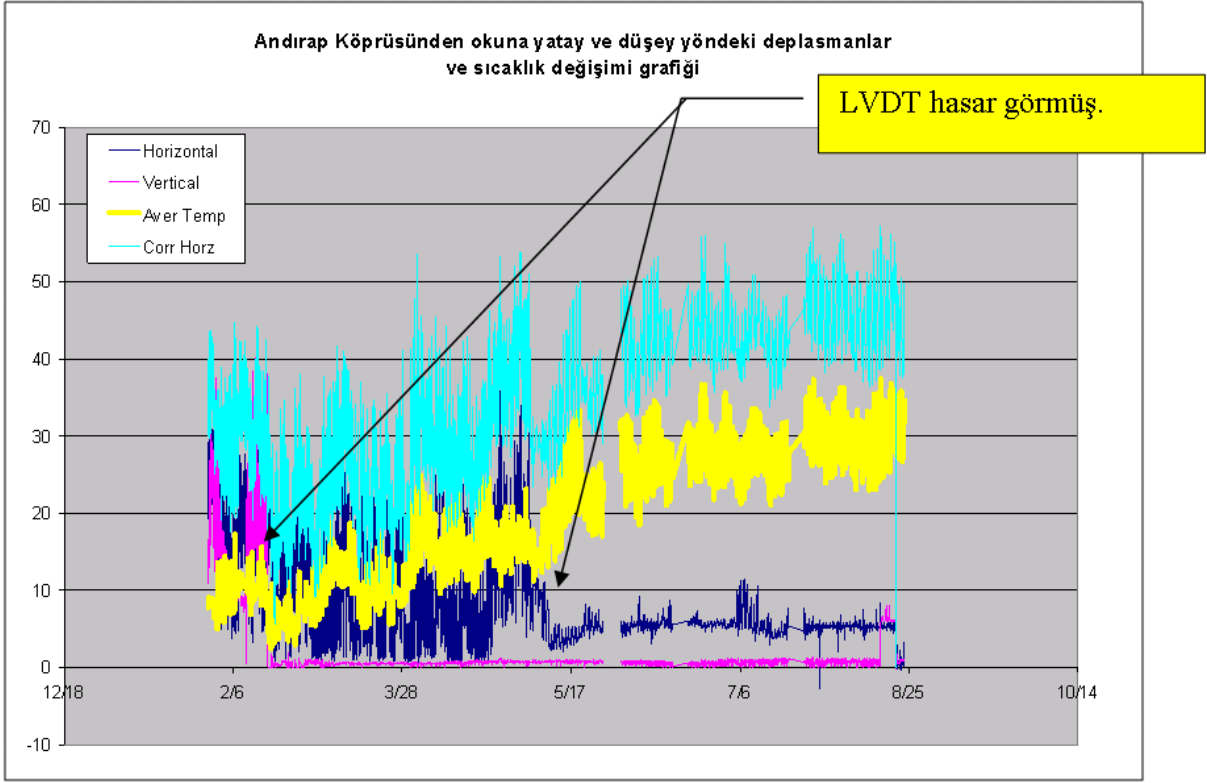
döşemeye bağlıdır. Sıcaklık değişimleri sebebiyle kemer köprünün bazı iç yüklemelere maruz kaldığı görülmektedir. Kısa kolonun yüksek yanal rijitliği sebebiyle fazla birim deformasyon okuması alması bu sebeptir. Buna ilaveten, döşemeye konulan birim deformasyon ölçer, köprünün enine yönünde yerleştirilmiştir ve kirişler arasında tek yönlü çalışan döşemenin yüklenmesini ölçmeyi amaçlamaktadır. Döşemenin enine yöndeki yüklemesinin sıcaklık sebebiyle olmayacağı tahmin edilmektedir. Döşemenin kamyon yükleri sebebiyle eğilme yönünde zorlandığı tahmin edilmekte fakat okunan ölçümlerin büyüklük değerinin endişe uyandıracak seviyede olmadığı değerlendirilmektedir.

Okunan şekil değiştirme değerlerinin sıcaklık ortalaması ile karşılıklı değerlendirildiği Şekil 145 incelendiğinde, birim deformasyon okumaları ile sıcaklık değişimi arasında bir ilişki olduğu görülmektedir. Okumalar ve sıcaklık arasındaki korelasyon değerleri Şekil 146'de verilmektedir. Birçok sensörün (2 ve 9 numara hariç) sıcaklık değişimi ile yüksek seviyede ilişkisi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, ilerleyen zamanlarda havanın soğuması ile beraber beklendiği gibi ölçümlerin tekrar azaldığı görülmektedir.

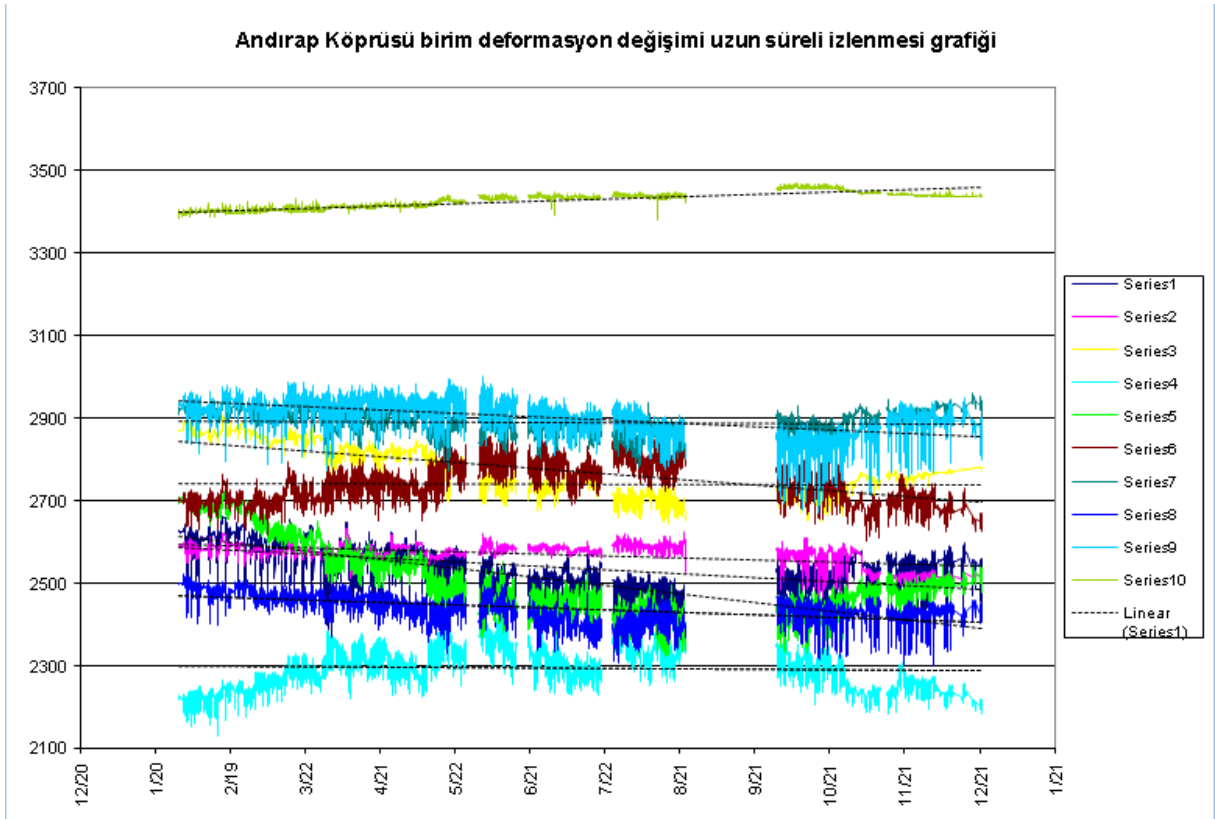
Köprünün proje süresince yapılan izlemesi (Şekil 147) değerlendirildiğinde, sıcaklık değişimlerinin birim deformasyon okumaları üzerinde etkin faktör olduğu net olarak görülmektedir. Köprü üzerinden bir yıl içinde binlerce ağır kamyon ve iş makinası geçişi sonrasında bazı kalıcı birim deformasyonlar olduğu fakat en fazla 200 me civarında olan bu kalıcı değişimlerin önemli olmadığı görüşüne varılmıştır.



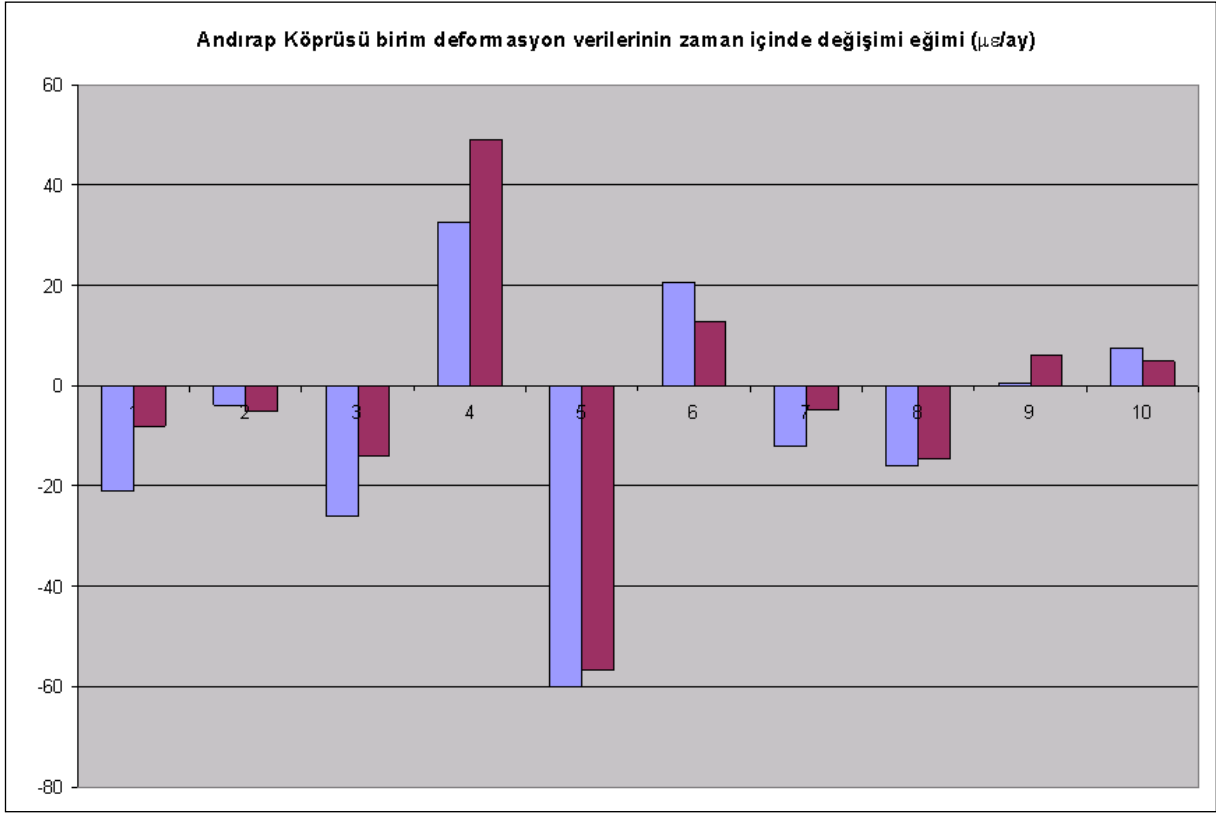
Şekil 141 – Andırap Köprüsü batarya voltaj değişim grafiği



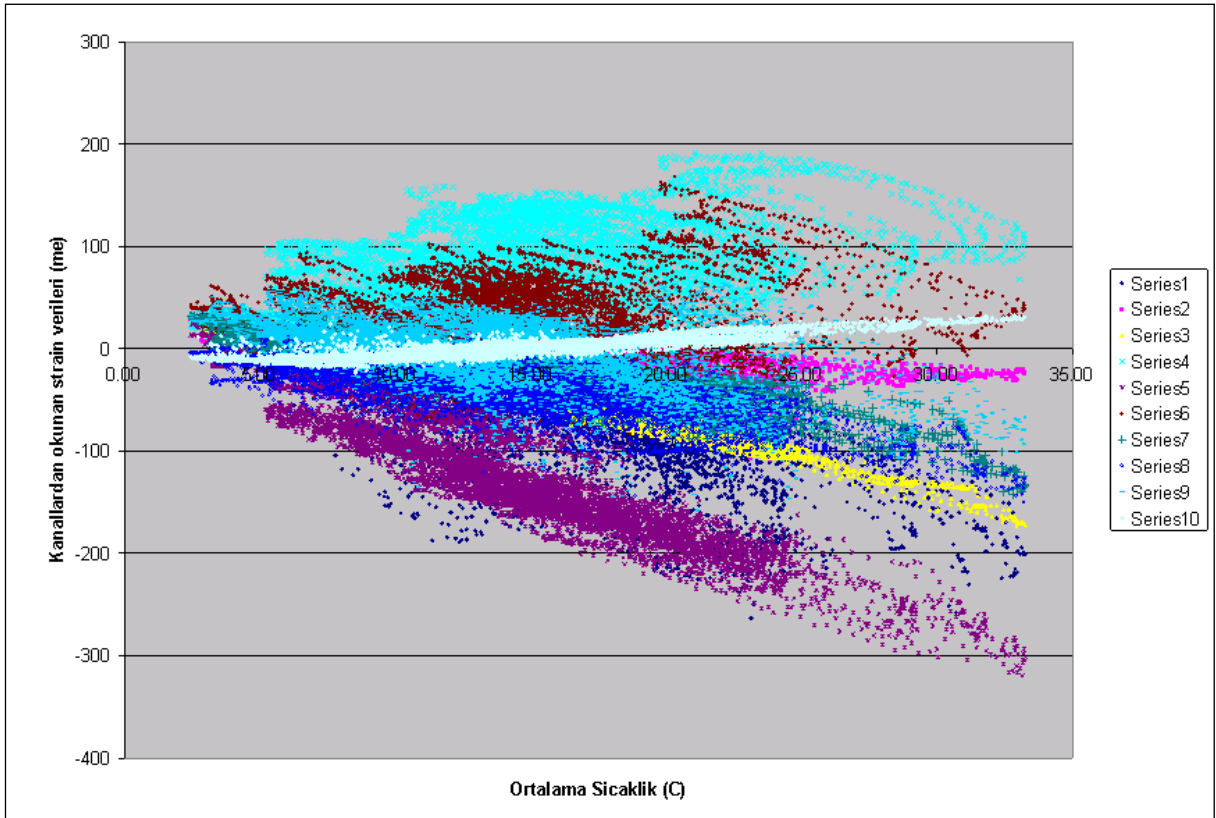
Şekil 142 – Andırap Köprüsü yatay ve dikey deplasman (LVDT) ve sıcaklık değişim grafiği.



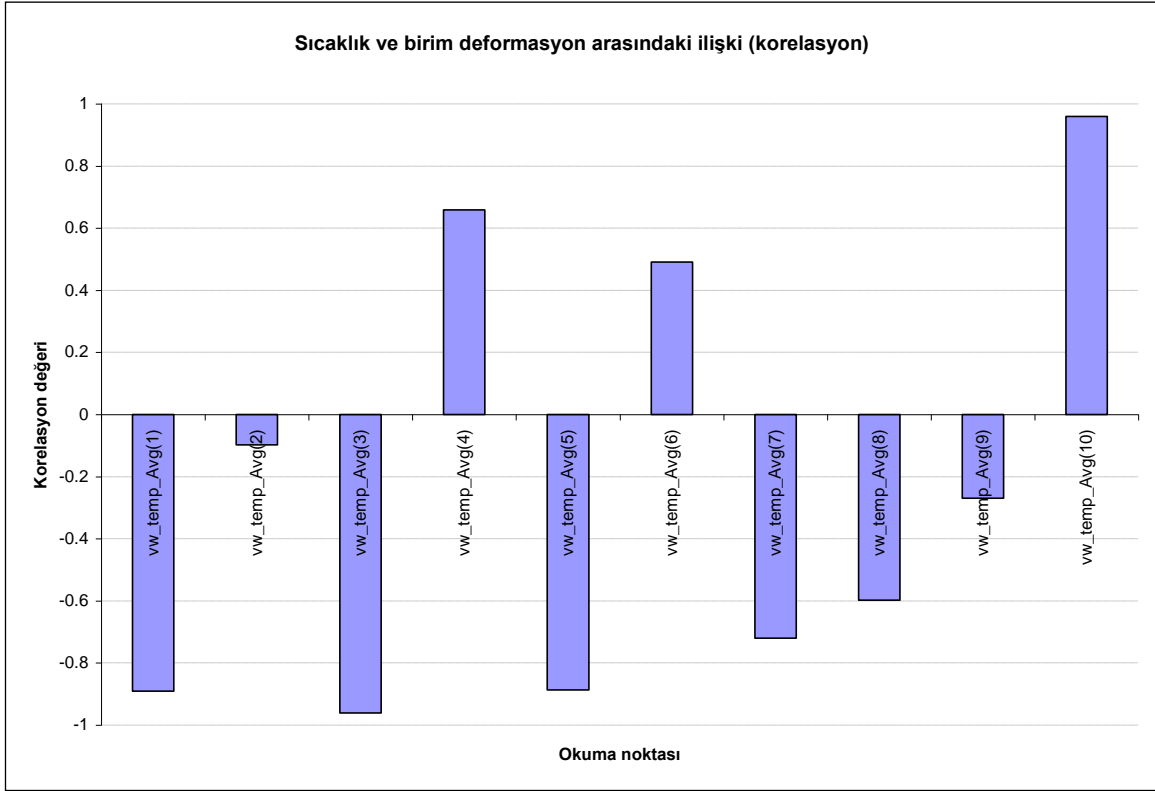
Şekil 143 – Andırap Köprüsü birim deformasyon değişimi grafiği.



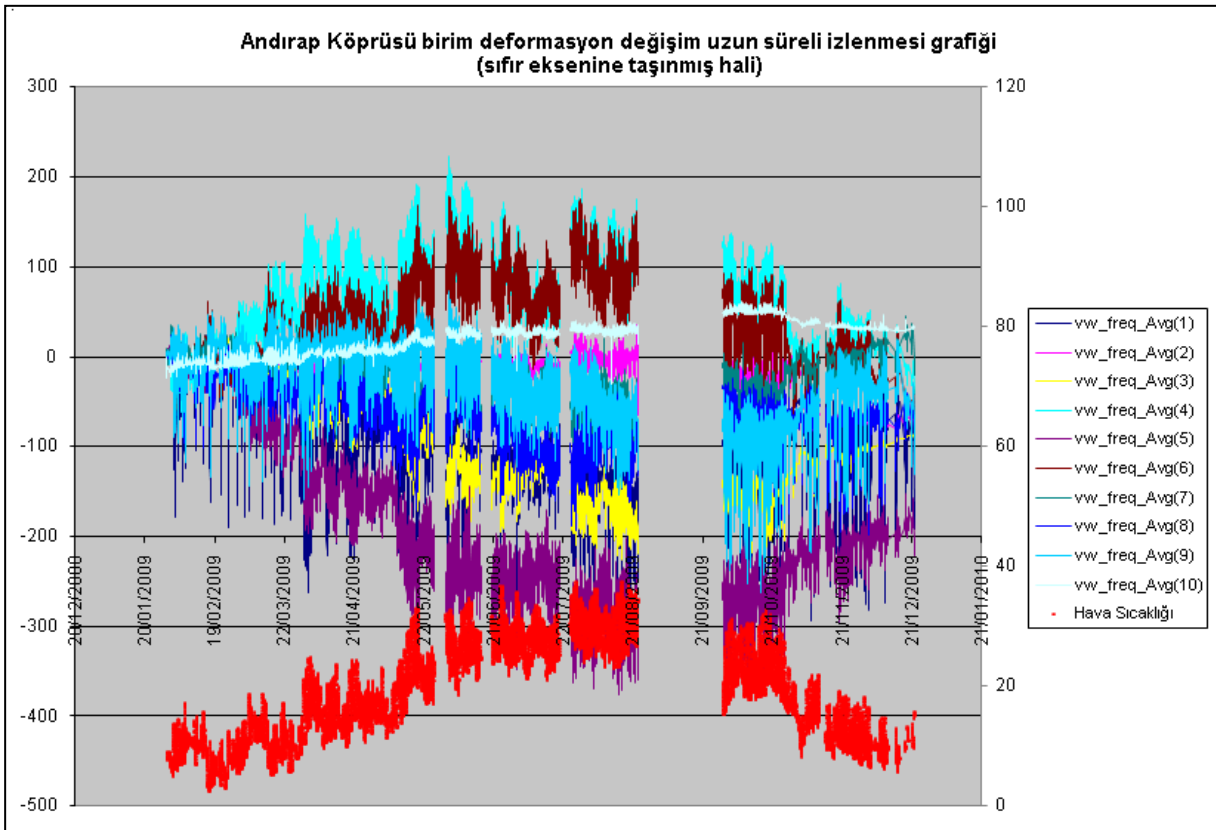
Şekil 144 – Birim deformasyon verilerine yerleştirilen eğrinin eğimi grafiği.



Şekil 145 – Birim deformasyon ve ortalama sıcaklık ilişkisi grafiği.



Şekil 146 – Birim deformasyon ve sıcaklık korelasyon indeksi grafiği.



Şekil 147 – Andırap Köprüsü sıfırdan başlayan birim deformasyon değişimi grafiği.

## 4.2 Sensör çalışmaları

### 4.2.1 Hareket halinde dingil yükü ölçer (WIMS) çalışmaları

“Weigh-in-Motion” sistemleri, kısaca WIMS “hareket halinde tartma sistemi” manasına gelen kelimelerin ilk harflerinden oluşmaktadır; taşıtlar cihazın üzerinden geçerken aracın aks ve toplam ağırlığını ölçmek ve kaydetmek üzere tasarlanmış aletlerdir. Eski tip sabit ağırlık ölçerlerin aksine WIM sistemleri araçların durmasını gerektirmez, ve bu da ölçüm işleminin çok daha verimli olmasını sağlar. Aks ağırlığı ve toplam ağırlık ölçümleri genel olarak şu işlerde kullanılır:

- Yol tasarlanması, izlenmesi ve araştırmaları
- Köprü tasarlanması, izlenmesi ve araştırmaları
- Büyüklük ve ağırlık yaptırımları
- Mevzuat ve yönetmelik gereksinimleri
- Yönetim ve planlama.

American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme ve Test Kurulu – ASTM) WIM türlerini genel olarak 4 tip altında inceler (Şekil 148).

ASTM WIM System Classification

	CLASSIFICATION			
	TYPE I	TYPE II	TYPE III	TYPE IV
Speed Range	16 • 113 km/h (10 • 70 mph)	16 • 113 km/h (10 • 70 mph)	24 • 80 km/h (15 • 50 mph)	24 • 80 km/h (15 • 50 mph)
Application	traffic data collection	traffic data collection	weight enforcement station	weight enforcement station
Number of Lanes	up to four	up to four	up to two	up to two
Bending Plate	X	X	X	X
Piezoelectric Sensor	X	X		
Load Cell	X	X	X	X
Wheel Load	X		X	X
Axle Load	X	X	X	X
Axle-Group Load	X	X	X	X
Gross Vehicle Weight	X	X	X	X
Speed	X	X	X	X
Center-to-Center Axle Spacing	X	X	X	X
Vehicle Class	X	X		
Site Identification Code	X	X	X	X
Lane and Direction of Travel	X	X	X	
Date and Time of Passage	X	X	X	X
Sequential Vehicle Record Number	X	X	X	X
Wheelbase (front to rear axle)	X	X		
Equivalent Single-Axle Load	X	X		
Violation Code	X	X	X	X

Şekil 148 – ASTM uyarınca WIM sistemi sınıflandırması.

Tip I, II, III ve IV. ASTM E 1318-94'e ("Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion Systems with User Requirements and Test Systems") göre bu 4 tipin farklı veri toplama, hız aralıkları ve farklı kullanım alanları bulunmaktadır.

Çalışma prensibine göre üç farklı tür WIM den söz edilebilir: bükülen levhalı sistemler, piezoelektrik alıcılı sistemler ve yük hücreli sistemler.

**Piezoelektrik Sistemler:** Alıcıların üzerine taşıtın dingili tarafından yük uygulandığı zaman, cihazda bulunan bir ya da birkaç piezoelektrik alıcı voltaj değişimi üretir. Bu değişim ölçülür ve kaydedilir. Bu kayıttan, cihaza binen dinamik yük hesaplanabilir ve kalibrasyon yöntemleri ile statik yüke (yani araç yüküne) çevrilebilir.

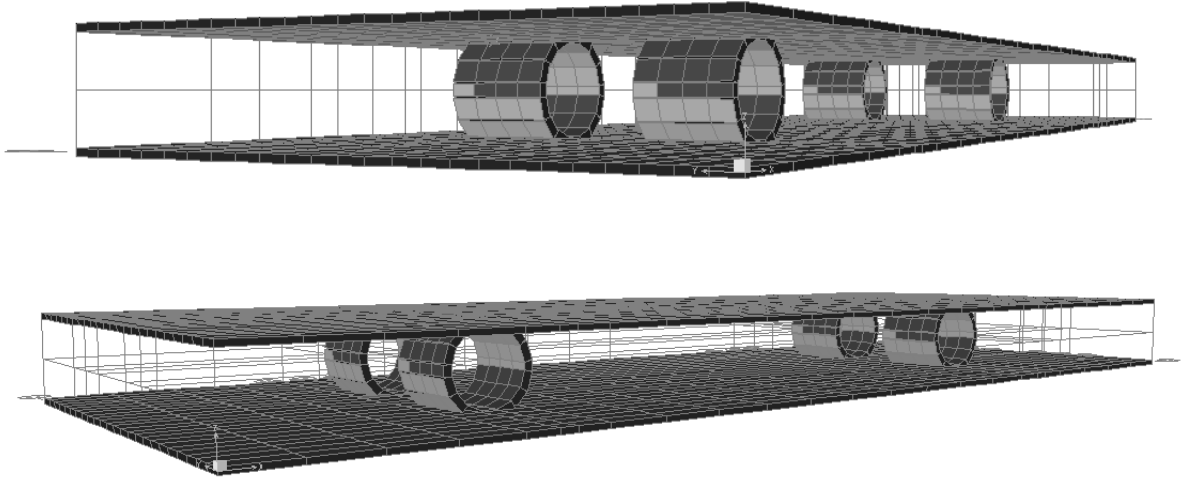
**Bükülen Levhalı Sistemler:** Bu tipte alt kısmına şekil değiştirme ölçen alıcılar monte edilmiş levhalar kullanılır. Taşıt levhanın üzerinden geçerken bükülmesine sebep olur ve bu şekil değiştirme alıcılar tarafından kaydedilir. Bu veri ile dinamik yük hesaplanır. Çeşitli kalibrasyon yöntemleri kullanılarak, elde edilen dinamik yük statik araç ağırlığına dönüştürülür. Bu tip sistemler sürekli veya taşınabilir olarak iki türde bulunmaktadır.

**Yük Hücreli Sistemler:** Bu türde birden fazla yük hücresi aracın aksının sağ ve sol tarafını eşzamanlı olarak tartar. Araç geçerken kaydedilen veriler toplanarak dingil ağırlığı veya toplam ağırlık için gerekli olan toplam dinamik yük bulunur ve kalibrasyonla statik yüke çevrilir. Standart bir WIM ölçme sistemi, bir yük hücre grubu ve en az bir indükleyici kapalı devre içerir. Yük hücresi grubu hareketi izlenmek istenen şeride, trafik yönüne dik olacak şekilde konur. Kapalı devre ise, gelen bir aracın olduğunu fark etmesi ve hücre grubunu çalıştırması için bu grubun ön tarafına monte edilir. Eğer ikinci bir kapalı devre de hücre grubunun arka tarafına konulursa aracın hızı da ölçülebilir.

Kalibrasyon sırasında kullanılacak parametreler, hız – ağırlık ilişkisinde etkili olabilecek değişkenleri yansıtmalıdır. Bunlar araç hızı, kaplama ve araç süspansiyon sistemi dinamiği, vb. olabilir.

Proje kapsamında, dört adet yanal silindirik yük hücresine sahip bir WIM, tasarım amacıyla SAP2000 programı ile modellenmiştir (Şekil 149). Modellemede ince kabuk (shell) elemanları kullanılmıştır. Ölçüm cihazının, ağırlığı 15 tonu bulan kamyon ve otobüslerin dingil yüküne dayanabilmenin yanı sıra, yaklaşık 0.7 ton ağırlığındaki hafif otomobillerin etkisini de hissedebilir/ölçülebilir kabiliyette olmalıdır. Çalışmalar fikir üretme aşamasında kalıp prototip üretimine girilmemiştir.



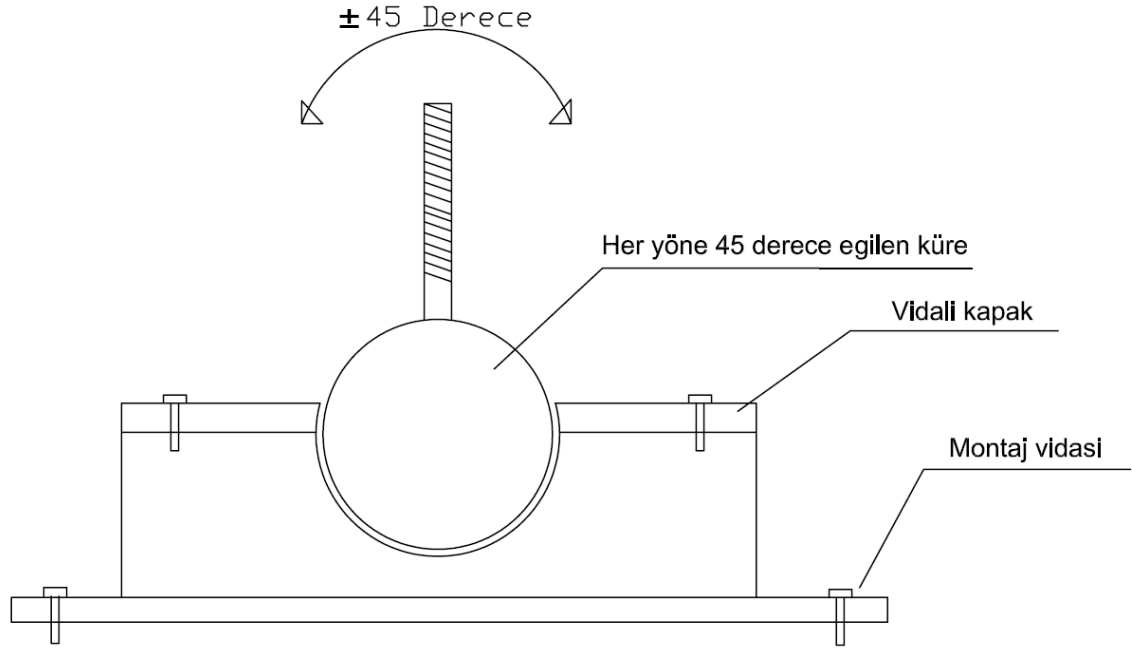


Şekil 149 – SAP2000 WIMS / HDYÖ analitik modeli.

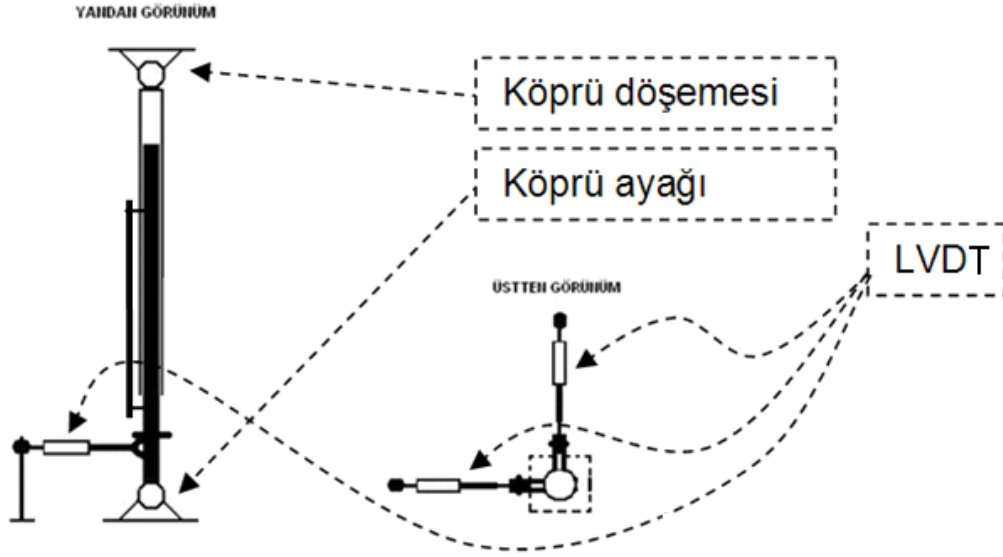
#### 4.2.2 Yüksek mesafeli deplasman ölçer

Sismik izolasyon bulunan (köprü, bina, havaalanı çatısı vb) yapılarda, yapının izole edilen bölümü ile bu bölümün altında bulunan taşıyıcı eleman arasında, deprem esnasında büyük deplasmanlar oluşmaktadır. Bazen metre ölçeğinde gerçekleşen bu deplasmanlar, deprem esnasında hızlı dinamik hareketler halinde olduğu için konvansiyonel deplasman ölçerlerin hem pozitif hem de negatif yöndeki hareketleri okuyabilmesi için 2 ila 3 metre strok uzunluğuna sahip olması gerekmektedir. Deplasmanlar x ve y yönleri olarak anılan yatay hareket komponentlerinden her ikisine de sahip olacağı ve yatay yönde konumlandırılması gerekeceğinden denge ve titreşim problemi yaşamaktadırlar.

Geliştirilen mekanizma birbiri içine geçen ve birbiri üzerinde kayarak açılabilen birden fazla sayıda boru parçasından oluşmaktadır. Bu borular kapalı konumda iken dikey konumda bulunmakta ve sismik izolasyonun yapıldığı üst ve alt katmandaki taşıyıcı elemanlara oynar küreler vasıtasıyla (Şekil 150) monte edilmektedir. Borunun düşük bir yüzdesi (örneğin %10) mesafede konumlandırılan bir somun vasıtasıyla, x ve y yönlerinde uzanan standart boyuttaki LVDTler vasıtasıyla, boruların üst ve alt mesnetleri arasında göreceli oluşan yanıl deplasmanlar mekanik olarak küçültülmekte ve okunmaktadır (Şekil 151). Bu cihazın prototipi üretilerek Bolu Viyadüğünde uygulama yapılmıştır. Atmosferik şartlar sebebiyle boruların paslanmaya meğilli olduğu, greys yağı kullanılmasına rağmen zamanla paslandığı görülmüştür. Dolayısıyla bundan sonraki uygulamalarda galvanizli boru kullanılması gereklidir.



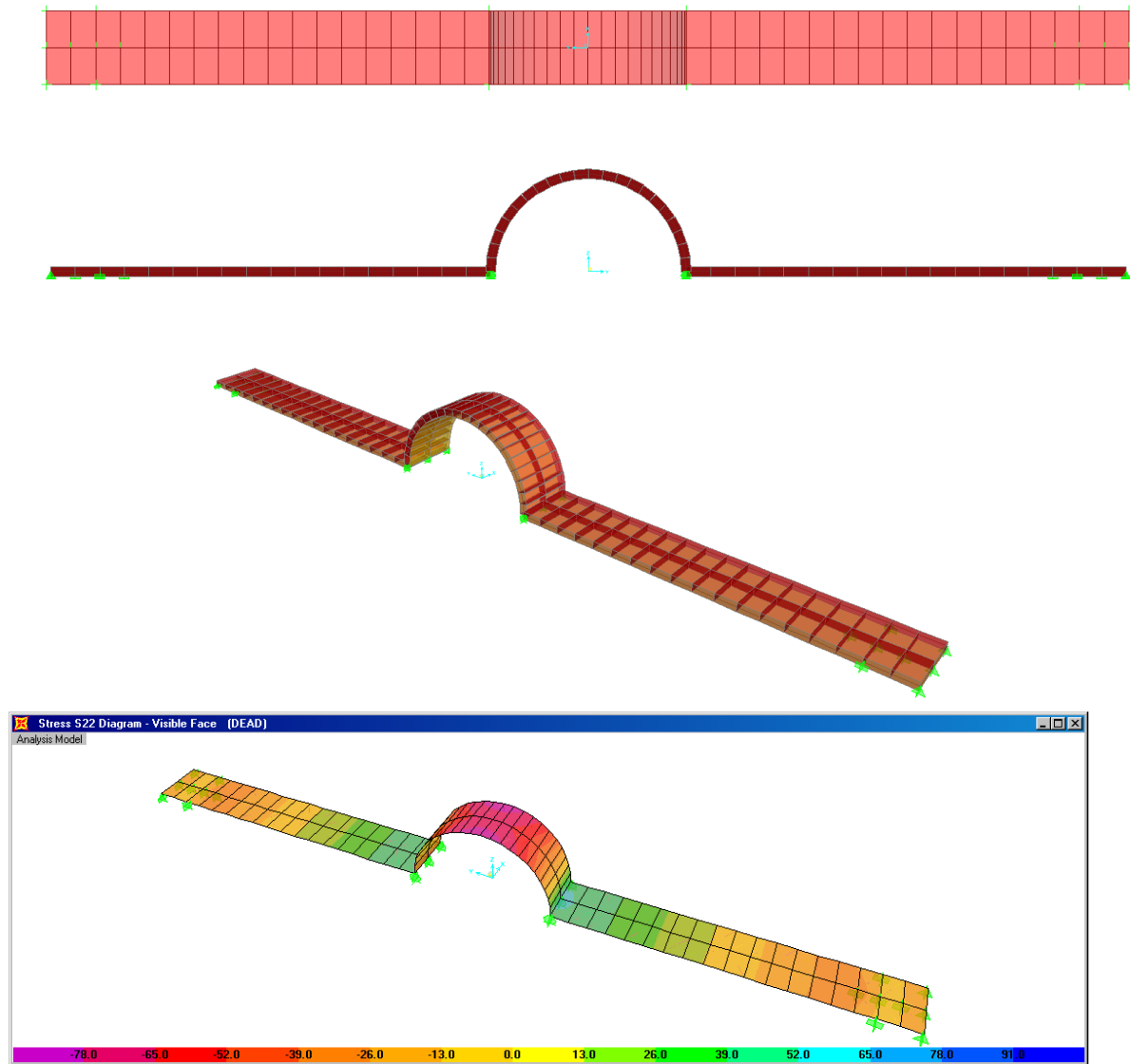
Şekil 150 – Oynar küre mesnet.



Şekil 151 – ASTM uyarınca WIM sistemi sınıflandırması.

### 4.2.3 Omega ( $\Omega$ ) tipi birim deformasyon (strain) ölçer geliştirme çalışmaları

Birim deformasyon ölçer cihazı geliştirme çalışmaları yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Öncelikle bilgisayar modeli oluşturularak sensör üzerinde deplasman simülasyonları yapılmış ve en yüksek birim deformasyon değerlerine nerede ulaşıldığı incelenmiştir (Şekil 152). İmal edilen metal sensör plakası üzerine 4 adet 120 ohm direncinde pul tipi birim deformasyon ölçer monte edilerek wheatstone köprüsü kurulmuştur. Yapılan çalışma sonunda tasarlanan en optimum kesit imal edilerek kalibre edilmiştir. Bu şekilde üretilen sensörler hem laboratuvarında hem de arazide pilot uygulamalarda başarıyla denenmiştir.



Şekil 152 – SAP2000 omega birim deformasyon ölçer analitik modeli.

## 5 Tartışma ve Sonuçlar

“Önleyici Yapısal Sağlık İzleme Metodları, Araç ve Stratejilerinin Araştırılması, Geliştirilmesi ve Uygulanması” başlıklı proje kapsamında yapılan tartışma ve sonuçlar, aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

### 5.1 Tartışmalar

- Modern ve tarihi yapıların durum tespiti, yapısal problemlerinin izlenmesi, vb aşamalarda YSİ çalışmalarına çok ihtiyaç duyulmaktadır. Yapının kısa dönem testler ya da uzun dönem izleme sonuçları ile elde edilecek veriler, yapının yapısal parametrelerinin tahribatsız olarak elde edilmesinde, yapısal problemin tür, büyüklük ve zaman içindeki seyrinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Örneğin:
  - Bolu viyadüğünde derz açılma kapanma ve servis yükleri altında okunan en büyük şekil değiştirme miktarları tespit edilmiştir. Ölçülen açıklığın hakim titreşim modlarının frekansları ölçülmüştür. Bu parametrelerin zaman içinde değişimleri izlenerek yapısal hasar oluşması durumunda, ölçüme dayalı olarak tespit edilebileceği düşünölmektedir.
  - Hazine binası çatlak davranışı izlenmiştir. Çatlak sürekli açılmamakta fakat mevsimsel sinüsoidal bir değişiklik göstermektedir. Ayrıca yapılan son sıcaklık yalıtım çalışmaları sonucunda çatlak davranışında farklılık tespit edilmiştir. Çatlak değişim genliği sabite yaklaşacak şekilde çok azalmıştır (Şekil 63). Hareketlerin azalmış olmasına rağmen çatlağın sert enjeksiyon harcı ile doldurulmasının açılma kapanma hareketini engelleyerek başka yükleme ve çatlaklara yol açacağı, yapısal açıdan problemler doğuracağı düşünölmektedir; dolayısıyla, silikon ya da zift gibi daha esnek malzemelerle doldurulması önerilmektedir.
  - Andırap köprüsünde izlenen şekil değiştirmeler, üstünden geçen ağır yüklere olduğu kadar mevsimsel ısı değişimlerine de tepki vermektedir. 50 ton kamyon yükü altında  $100\mu\epsilon$  ve 60ton kepçe yükü altında  $400\mu\epsilon$  (döşeme) okuma alınırken, mevsimsel bazda  $300\mu\epsilon$ 'e varan değişimler okunmuştur. Ölçülen değerler (atıl yük de ilave edilerek) malzemenin lineer elastik sınırları içinde kalacağından genel anlamda kalıcı hasar oluşumu beklenmemektedir. Bir yıllık sürekli ölçüm sonucunda geri gelmeyen birkaç okumanın çok zorlanan kısa kolon ve döşeme sensörleri olduğu görölmektedir (Şekil 147).

- Hasankeyf Zeynelbey türbesi kubbesinde bulunan çatlaklara takılan sensörler, sürekli açılma yönünde okumalar toplamaktadır. Bu tarihi yapıya acil müdahale yapılarak kubbenin dışarıdan sarmalanarak açılma etkisinin bertaraf edilmesi gerektiği görülmektedir.
  - Çelik yaya ve tren köprülerinde yapılan dinamik ölçümler, ölçülen tüm köprülerde titreşim probleminin olduğunu göstermektedir.
- YSİ sayesinde tespit edilen bilgiler, yapıya yapılacak müdahaleler konusunda yol gösterici olmaktadır. Yapılan pilot çalışmalarda bu özellik net olarak görülmektedir. Buna ilaveten, bir yapısal sistemdeki okunan parametrelerdeki değişimlerin gözlemlenmesi, günlük ya da mevsimsel değişimlerin döngüsel ve sabit bir değer etrafında olmasının, artan konumda fakat sürekli yavaşlayan mahiyette, ya da en kötü senaryo ile sürekli artan ve artış miktarı hızlanan konumda olması durumlarının tespitinde kullanılacağı gibi, müdahaleye karar verme aşamasında da faydalanılabilecektir; hiç müdahale yapmamak, acil müdahale ile desteklemek, kapsamlı yapısal müdahale yapmak gibi farklı seçeneklere karar vermekte kullanılacaktır.
- Cihaz ve veri toplama sistemleri çeşitliliği, marka, tür, fiyat açılarından, çok fazladır. Tüm dünya piyasasına ulaşmak İnternet ile mümkün olsa dahi pratik olarak mümkün değildir. Yurt içinde bayilikleri bulunmayan bazı markaların cihazlarını yurt dışından getirilmesi çok zor ve zahmetli olmaktadır. Yurt içinden alınan yabancı üretilmiş ölçüm aletleri, ulaşım, gümrük, yerel bayi kârı, yerel vergi gibi sebeplerle fiyatı yurt dışına göre en az 2 kat katlanarak artmaktadır. Stokta bulunmayan cihazların Türkiye'ye sipariş sonrası getirilmesi 2 ayı geçkin (bazı durumlarda 6 aya kadar varan) süre almaktadır.
- Aletler arazi şartlarında kolayca bozulabilmektedir. Cihazların konulduğu kutuların atmosferik şartlara çok uygun seçilmesi gereklidir. Su geçirmez diye satın alınan kutular su geçirilmektedir, böcekler kutuya girmektedir.
- Şebeke elektriği bulunmayan yerlerde yapılacak izleme çalışmaları için güneş panelinin kapasitesi ve takılan cihazların elektrik tüketim ihtiyaçları iyi değerlendirilmelidir. Örneğin Bolu Viyadüğündeki ivme ölçerlerin sürekli beslenmesi gerektiği ve fazlaca elektrik tükettikleri görülmüştür. GSM modemler fazlaca elektrik tüketmektedir.
- Nemrut anıtları ile ilgili yapılan ölçümler, modelleme ve yapısal belirleme (St-Id) çalışmalarına ışık tutmuştur. Tarihi yapıların sağlık değerlendirme ve yapısal belirleme çalışmalarının modern inşaat mühendisliği yapılarına oranla birçok özel

zorlukları bulunmaktadır. Kış boyunca yapılan nem ve sıcaklık ölçümleri bölgede bulunan anıtların nasıl doğa şartlarına maruz kaldıkları hakkında fikirler vermektedir.

- Hasankey'de bulunan Zeynelbey Türbesinin çatlaklarının oldukça hızlı bir şekilde açılmakta olduğu tespit edilmiştir. Yapıya acil müdahale yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Kubbedeki açılma hareketini engellemek amacıyla dışarıdan enine yönde gergi uygulanması önerilmiştir.
- Bolu Viyadüğünde yapılan YSİ kurulum çalışmaları, en basit sistemin bile planlama, dizayn, programlama, yerine ulaşım, sensör montaj, kablolama, uzaktan veri toplama, toplanan veriyi işleme, ve çıkarımda bulunma gibi aşamalarında birçok zorluklar yaşandığını göstermektedir. Projenin pilot uygulama aşamaları sayesinde, uygulamada karşılaşılan güçlükler ve problemler ile ilgili çok değerli deneyimler elde edilmiştir.
- Andırap köprüsüne takılan yapısal sağlık izleme sistemi, kamyonların sürekli geçişi altında yapısal elemanlarda kalıcı birim deformasyon okunup okunmaması ile yapının sağlığı arasında bir ilişki kurulmasını sağlamıştır. Alınan birim deformasyon verilerden, köprüdeki gerilimlerin özellikle sıcaklık değişimlerine karşı çok duyarlı olduğu görülmektedir.
- Proje, büyük bir oranda iş programına uygun olarak ilerlemiştir. Bununla birlikte, Bolu Viyadüğü ölçüm sisteminde yaşanan aksilikler ve bozulmalar sebebiyle proje süresinde uzatma ve ilave teçhizat bütçesi istenmiş, fakat kabul edilmediği için bu aşamada bırakılmıştır.
- Oluşan bir çatlak genişliği sürekli ölçüm ile artık değişmediği ya da sadece çevre sıcaklığı ya da yeraltı suyu seviyesi ile salınımlar yaptığı tespit edilirse, yapının bu haliyle stabil bir durumda olduğu ve önlemlerin çok acil olmadığı düşünülebilir.

## **5.2 Sonuçlar**

- Nemrut anıtları ile ilgili yapılan ölçümler, modelleme ve yapısal belirleme (St-Id) çalışmalarına ışık tutmuştur. Kış aylarında sıcaklığın  $-15\text{ C}^{\circ}$  altına inmediği ve kış aylarında her yıl yaklaşık 80 adet donma çözülme olayı olduğu tespit edilmiştir.
- Yaya köprülerinde insan yürüyüşü sebebiyle oluşan titreşimlerin, ayarlı  $m\%=1$  kütle sönümleyiciler ile yarı yarıya azaltılabileceği ön görülmektedir.
- Test edilen çelik tren köprülerinde ölçülen titreşimlerin  $20\text{ m/s}^2$  ( $2g$ ) mertebesinde olması, Avrupa kodunda tanımlanan  $3,5\text{ m/s}^2$  sınırının aşıldığı ve tavsiye edilen  $2\text{m/s}^2$

sınırının 10 katından fazla titreşim olduğu göstermektedir. Benzer sönümleyicilerin tren yolu köprülerinde de kullanılması faydalar sağlayacaktır.

- Farklı ölçme ve değerlendirme metotları araştırılmıştır. Sadece deplasman, birim deformasyon (strain), eğim, sıcaklık, ivme-titreşim gibi ölçümler değil, bunlara ek olarak titreşim hızı (velocitymeter), ultra yüksek frekansta ölçümler (50-60 kHz) ve beraberinde gelen impact-echo ve ultrasonic-pulse-velocity gibi teknikler, lamb dalgaları, wavelet analiz, fotogrametrik metotlar, temassız ölçümler (lazer, ultrasonik vb), kablosuz iletişim ve veri aktarımı, alarm sistemleri (akıllı ve zeki yapılar) gibi birçok ölçme, değerlendirme ve sistem oluşturma yöntemleri bulunmaktadır.
- Andırap köprüsüne takılan yapısal sağlık izleme sistemi, kamyonların sürekli geçişi altında yapısal elemanlarda kalıcı birim deformasyon okunup okunmaması ile yapının sağlığı arasında bir ilişki kurulmasını sağlamıştır. Alınan verilerden öğrenilen en önemli bilgi, okunan birim deformasyon değişimlerinin, özellikle sıcaklık değişimlerine karşı çok duyarlı olduğudur. Yıl içinde yaşanan sıcaklık değişimleri ile oluşan  $300\mu\epsilon$  mertebesindeki şekil değiştirmeler, günlük bazda oluşan sıcaklık değişimleri ve kamyon yüklemeleri ile oluşan en büyük  $100\mu\epsilon$  şekil değiştirmenin 3 katı kadardır. Mevsimsel sıcaklık değişimi ve sınır koşulları ile köprü üzerinde oluşan yüklemeler, köprü üzerinden geçen 50 ton kamyonun oluşturduğu döşemede  $200\mu\epsilon$  ve 60 ton kepçenin oluşturduğu döşemede  $400\mu\epsilon$  kadardır. Sıcaklık değişimleri ve yük geçişleri sırasında oluşacak en gayri müsait şekil değiştirmenin köprü malzeme kapasitesi olarak kabul edilen  $2000\mu\epsilon$  şekil değiştirmenin muhtemelen altında kalacağı değerlendirilmiştir.
- Hasankey'de bulunan Zeynelbey Türbesinin çatlaklarının yaklaşık 3mm/yıl hızında açılmakta olduğu tespit edilmiştir. Yapıya acil müdahale yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Kubbedeki açılma hareketini engellemek amacıyla dışarıdan enine yönde gergi uygulanması önerilmiştir.
- Proje, iş programına uygun olarak yürütülmüştür. Çok sayıda uygulama yapılarak hem farklı uygulamalar için kullanılması gereken teçhizat ve programlama üzerine deneyim elde edilmiş hem de uygulama aşamasında karşılaşılan problemlere pratik çözümler geliştirilmiştir. Köprü düşey deplasmanları ölçebilmek için yaylı LVDT, birim deformasyon ölçer ve sismik izolasyon yapılan yerlerde büyük yanal deplasmanların okunabilmesi için çift borulu sensör bunlar arasındadır.
- Kablo kuvvetini statik yöntemlerle ölçen alet başarıyla geliştirilmiştir, fakat yaylı kuvvet ölçer ile ilgili mekanik problemler sebebiyle bazı sorunlar yaşanmıştır. Ölçüm aletinin üzerinde çalışmalar, proje kapsamının dışında da devam ettirilecektir.

### 5.3 Proje genel değerlendirmesi

Proje kapsamında yapılan pilot uygulama alışmaları, Tablo 8’de özetlenmektedir. Bu çalışmaların uzun süreli izleme tipi olanların izleme süreleri Şekil 153’de grafiksel olarak verilmektedir. Proje süresi kalmadığı ve kapsam dahilinde yeterli sayıda uygulama yapıldığı için son dönemde uygulama için ngrlen “Divriği Ulucami” ve “Gordion” çalışmalarına başlanmamıştır. Dönem gelişme raporlarında bulunan mağara çatlak izleme alışması Hazine alışması ile benzerlik içerdiğinden kapsam dışında bırakılmıştır. Diğer uygulama projeleri ise en azından 1 yıl süre ile izlendikleri ve elde edilen veriler hem günlük hem de mevsimsel değişimleri içerdiği için başarılı olarak değerlendirilmektedirler. Bolu Viyadüğü’nde sonbahar aylarında veri alınamayan veri toplama sistemine kiş Şartları sebebiyle ulaşılamamış, bozulduğu anlaşıldıktan sonra ise bütçe bulunmadığı için yenisi ile değiştirilememiştir. Dolayısıyla Bolu Viyadüğü uygulaması, cihazı değiştirmek için ek bütçe bulunamadığı için 1,2 yıl süreksiz okumalar ve dinamik veri değerlendirmeleri ile sonlandırılmıştır.

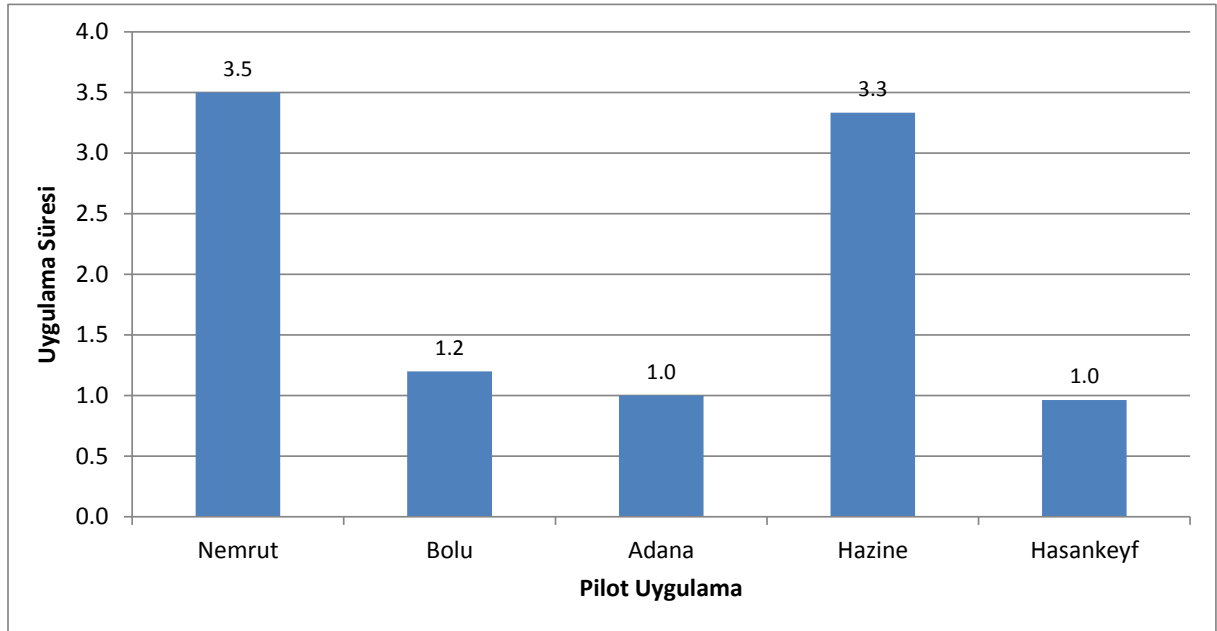
Proje süresince birçok uygulama alanlarına girilmesinin sebepleri başlıca aşağıdaki Şekilde zetlenebilir:

- 1) Uygulama aşamasında karşılaşılan zorlukların farklı uygulama yapıları ve evre Şartları seçilerek uygulama sırasında görülmesi.
- 2) Uygulama yapılarının farklı seçilerek, değişik önem seviyesine sahip bu yapılardan toplanacak verilerin derlenmesi değerlendirilmesi ile farklı yapıların zaman içindeki davranışları hakkında bilgi edinilmesi.
  - a. Bolu viyadüğü,
  - b. Adana andırap köprüsü
  - c. Hasankeyf Zeynelbey Türbesi kubbesi
  - d. Hazine binası betonarme çatlağın izlenmesi
  - e. Nemrut anıtları bölgesi hava Şartlarının izlenmesi
- 3) Farklı sensör teknolojilerinin uygulamalarının denenerek, bu sensör tiplerinin teknik özellikleri sebebiyle veri toplama sistemleri ile uyumlu çalışmaları konusunda tecrübe sahibi olunması.
- 4) Farklı uygulamalar için erken uyarı ve alarm sistemlerinin değerlendirilmesi.



Tablo 8 – Pilot Çalışmaların Listesi

Pilot uygulama çalışmaları		Başlangıç	Bitiş	Süre (yıl)	Son Durum
Uzun süreli yapısal sağlık izleme ve değerlendirme çalışmaları	Nemrut anıtlar bölgesi izleme çalışmaları	01-10-2006	01-04-2010	3.5	Başarıyla Sonlandırıldı
	Bolu Viyadüğü izleme çalışmaları	20-11-2008	01-02-2010	1.2	Bozulan cihaz değiştirme ek bütçe yok. Sonlandı.
	Adana Andırap köprüsü izleme çalışmaları	01-02-2009	01-02-2010	1.0	Başarıyla Sonlandırıldı
	Hazine binası çatlak okuma çalışmaları	01-12-2006	01-04-2010	3.3	Başarıyla Sonlandırıldı
	Hasankeyf Zeynelbey türbesi izleme çalışmaları	14-04-2009	01-04-2010	1.0	Başarıyla Sonlandırıldı
Kısa süreli yapısal test, analiz ve değerlendirme çalışmaları	ODTÜ lab döşemesi dinamik testi yapılması	Aralık 2005	Aralık 2005	Kısa süreli test ve değerlendirme	Başarıyla Sonlandırıldı
	Esenboğa yolu yaya köprüleri ölçüm ve değerlendirme çalışmaları	Haziran 2007	Haziran 2007	Kısa süreli test ve değerlendirme	Başarıyla Sonlandırıldı
	Köprü döşeme titreşim problemi	Temmuz 2007	Temmuz 2007	Analitik değerlendirme	Başarıyla Sonlandırıldı
	Ankara Esenboğa yeni binası döşeme titreşim problemi	Haziran 2006	Haziran 2006	Kısa süreli test ve değerlendirme	Başarıyla Sonlandırıldı
	Tren yolu köprüsü (tek açıklıklı, kiriş)	Mayıs 2007	Mayıs 2007	Kısa süreli test ve değerlendirme	Başarıyla Sonlandırıldı
	Tren yolu köprüsü (üç açıklıklı, makas)	Ağustos 2007	Ağustos 2007	Kısa süreli test ve değerlendirme	Başarıyla Sonlandırıldı
	Ultrasonik ölçüm çalışmaları, ODTÜ - CE kirişi	Eylül 2007	Eylül 2007	Kısa süreli test ve değerlendirme	Başarıyla Sonlandırıldı
	KAM fabrika kolon içi boşluk hesaplaması	Ağustos 2008	Ağustos 2008	Kısa süreli test ve değerlendirme	Başarıyla Sonlandırıldı



Şekil 153 – Pilot çalışmaların grafiksel dökümü.

Proje süresince proje kapsamında yapılan konferans yayınları aşağıda listelenmektedir:

- 1) Turer, A., "Conservation of Heritage Structures in Turkey: Practice and Difficulties", 7th International Conference on Structural Analysis of Historic Constructions SAHC2010, Tongji University, China. Oct. 2010
- 2) Turer, A., "SHM Studies on Bolu Viaduct, Turkey", The 7th International Workshop Structural Health Monitoring - Stanford University, USA. Sept. 2009
- 3) Turer, A., "Structural Monitoring of Andirap Bridge for Overload Passage", The 7th International Workshop Structural Health Monitoring - Stanford University, USA. Sept. 2009.
- 4) Turer, A., Y.D. Aktas, N. Sahin Guchan, "Structural stability evaluation of Nemrut Monuments", International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments and Sites in The East Mediterranean Region. ITU, Turkey. July 2009.
- 5) Y. Aktas, Turer, A., "Issues in the Identification and Monitoring of Historical Structures/Monuments", 11th international conference on durability of building materials and components - DBMC11, Turkey, May 2008
- 6) Y. Aktas, Turer, A., "Issues in the Identification and Monitoring of Historical Structures/Monuments", 11th international conference on durability of building materials and components - DBMC11, Turkey, May 2008.
- 7) Y. Aktas, Turer, A., "A General Procedure for The Structural Condition Assessment of Historical Earthen Masonry Structures Through Structural Identification and Monitoring", Terra 2008 - 10th international conference on the study and conservation of earthen architectural str., GETTY & IIC, Mali , 2008.
- 8) Ahmet Turer, Dynamic testing of existing bridges for high speed trains. "The fourth International Conference on Bridge Maintenance and Safety (IABMAS-08)", -, (2008).
- 9) Ahmet Turer, Matrix based cable-stay bridge cable force and deck elevation adjustments and FEM updating. "The fourth International Conference on Bridge Maintenance and Safety (IABMAS-08)", -, (2008).
- 10) Turer, A. , Yücel, M.C., Yılmaz, Ç., "Matris Metodu ile Köprü Kablolarına Düzenli Gergi Uygulaması", 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya, Türkiye, 29-30 Nov. 2007.
- 11) Turer, A., Yılmaz, Ç., "Temperature Induced Internal Force Problem in a High Rise Twin Tower Platform and Viscous Isolator Solution", ASSISi, 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures, Istanbul, Turkey, May 27-30, 2007.

- 12) Aktas, Y.D., Turer, A., "Preliminary Structural Monitoring and 3D Modeling of Nemrut Monuments, Turkey", International Symposium Studies on Structural Heritage SHH07, Antalya, Turkey, 17-22 September 2007.
- 13) Turer, A., "Structural Modeling, Earthquake Analysis, and Strengthening Proposals for Gaziantep Ali Nacar Mosque Minaret", International Symposium Studies on Structural Heritage SHH07, Antalya, Turkey, 17-22 September 2007.
- 14) Turer, A., A. Caner ve C. Yilmaz, "Cable Hanger Plate Replacement; a Case Study on Bosphorus Bridge", Proc. 3rd International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management (IABMAS), 433, Balkema, Porto-Portekiz, 2006.
- 15) Turer, A., Boz, B., "FE Modeling and Dynamic Testing of Historic Aspendos Theatre in Antalya, Turkey", Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC2006, India, 2006.
- 16) Turer, A., Eroglu, T., "Structural Analysis of Historic Temple of Augustus in Ankara, Turkey", Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC2006, India, 2006.
- 17) Turer, A., Eroglu, T., "Structural Health Monitoring - A Methodological Approach for Application", ACE Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Yildiz Technical University, 2006.

Bazı uygulama çalışmalarında karşılaşılan güçlükler (örneğin Bolu Viyadüğündeki veri toplama cihazının ve modem bozulması gibi), hakemli dergilerde yayın yapılmasına imkan vermemiştir. Proje süresi uzatılmış olmasına rağmen ek bütçe verilmemiş olması ve kalan bütçenin de kullanımına izin verilmemesi sebebiyle uygulama çalışmalarındaki aksaklıklar düzeltilememiştir.

Proje süresince yapılan hakemli dergi yayınları aşağıda listelenmektedir:

- Turer A, Boz B. , "Computer modeling and seismic performance assessment of historic Aspendos theatre in Antalya, Turkey", Engineering Structures, 30: 2127–2139 (2008).
- Turer A, Didem A. Yasemin, Guchan, Ş. Neriman., "Reverse-engineering evaluation and monitoring of Nemrut monuments", International Journal of Architectural Heritage, *basımda* (2011).

Proje dahilinde yapılan çalışmalar ile ilgili olarak 2011 yılı içinde hakemli dergilere gönderilmesi planlanan makaleler şöyledir:

- 1) Ürgüp – Çatlak ilerleme mekanizmaları ve çatlak hareketi izleme çalışmaları.
- 2) Andırap – Dizayn yükünün üstünde kamyon yüklerinin izleme çalışmaları
- 3) Hasankeyf – Zeynelbey Türbesi kubbesinin izleme ve güçlendirme çalışmaları
- 4) Sensörler – Farklı sensörlerin istatistiki kullanım dağılımı.

Başarılı uygulama çalışmalarının artması, hakemli dergilerde yayın gönderme ve kabul ihtimalini arttıracığı için olabildiğince fazla uygulama yapmaya çalışılmıştır. Bu projenin ilerleyen aşamalarında tespit edilen gerçek, uygulama alanında çeşitlilik oluşturulması ve olabildiğince fazla uygulama yapılarak hem uygulama tekniklerinin öğrenilmesi/geliştirilmesi hem de farklı uygulamalardaki zorlukların görülerek bu problemlere yönelik çözüm metotlarının oluşturulmasıdır.

## **5.4 Öneriler**

Proje kapsamında satın alımı ve değerlendirilmesi mümkün olmamış aşağıdaki teçhizat – yazılım araştırma ve satın alımı diğer araştırmacılar için önerilmektedir:

- infra-red kamera
- GPR radar sistemleri,
- Hız ölçer (velocity meter)
- Yüksek frekanslı ivme ölçer ve veri toplama sistemi (50-60 kHz)
- Lamb-dalgaları
- Akustik emisyon (AE)

Aşağıdaki pilot bölge araştırma ve uygulamaların yapılması önerilmektedir:

- İstanbul boğazı tüneli
- Marmara altgeçit ve köprü YSI
- Augustus tapınağı – duvar eğiminin değişiminin okunması
- Gordion duvarı şişme probleminin izlenmesi ve öneriler geliştirilmesi.

Bolu Viyadüğünün tümünün yapısal sağlık izleme projesi geliştirilmesi

- Bolu Viyadüğüne ölçüm aletleri takılması için KGM ile destek görüşmeleri
- Kapsamlı alarm (buzlanma ve sis), yapısal izleme ve sismik ölçüm sistemi geliştirilmesi ve montajı

Ölçüm aleti geliştirme

- kablo kuvvetini statik ve dinamik yöntemlerle ölçen alet
- arabaların hareket halindeyken ağırlığını ölçen alet (WIMS)

## 6 Referanslar

Referanslar, yararlanılan kaynaklar soyadı sırasına göre hazırlanmıştır.

- AKTAS, Y.D., Türer, A., Caner-Saltık, E.N.; FE Modeling and Material Characterization of Tahir ile Zühre Mescidi, Konya, Turkey; Structural Analysis of Historical Constructions, Eds. Lourenço, P.B., Roca, Modena, C., Agrawal, S.; New Delhi; 2006; 1999-2009
- AUGUSTÌ, G., Ciampoli, M.; Heritage Buildings and Seismic Reliability; Progress in Structural Engineering and Materials 2 (2000) 225-237
- AVDELÌDÌS, N.P., Moropoulou, A.; Applications of Infrared Thermography for the Investigation of Historic Structures; Journal of Cultural Heritage 5 (2004) 119-127
- BARONÌO, G., Binda, L., Tedeschi, C., Tiraboschi, C.; Characterization of the Materials Used in the Constructions of the Noto Cathedral; Construction and Building Materials 17 (2003); 557-571
- BHANDARÌ, N.M., Kumar, P.; Structural Health Monitoring and Assessment of Masonry Arch Bridges; Advances in Bridge Engineering; March 24-25, 2006; 115-139
- BÌNDA L., Gambarotta L., Lagomarsino S., Modena C., A multilevel approach to the damage assessment and the seismic improvement of masonry buildings in Italy, Seismic Damage to Masonry Buildings, Ed. A. Bernardini, Balkema, Rotterdam, 1999; 179-194
- BÌNDA, L., Anzani, A., Baila, A., Baronio, G.; A Multi-Level Approach for Damage Prevention in Seismic Areas: Application to Historic Centers of the Western Liguria; 9NAMC (9th International North American Masonry Conference) 2003, 1-4/6/2003, Clemson, South Carolina, USA, CD-ROM, 556–566
- BÌNDA, L., Anzani, A., Saisi, A.; Preservation of the Historic Structures: Investigation and Diagnosis as Essential Steps for Compatible Choices; ICPCM – A New Era of Building, Cairo, Egypt; February 18-20, 2003
- BÌNDA, L., Anzani, A.; Structural Behavior and Durability of Stone Masonry; Saving Our Architectural Heritage: The Conservation of Historic Stone Structures; Eds. Baer, N.S., Sneathlage, R.; John Wiley & Sons Ltd; 1997; 113-149
- BÌNDA, L., Cantini, L., Fernandes, F., Saisi, A., Tedeschi, C., Zanzi, L.; Diagnostic Investigation on the Historical Masonry Structures of a Castle by the Complementary Use of Non Destructive Techniques; 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam; July 4-7, 2004
- BÌNDA, L., Lenzi, G., Saisi, A.; NDE of masonry Structures: Use of Radar Tests for the Characterization of Stone Masonries; NDT&E International 31-6 (1998); 411-419
- BÌNDA, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., Valle, S., Colla, C., Forde, M.; Application of Sonic and Radar Tests on the Piers and Walls of the Cathedral of Noto; Construction and Building Materials 17 (2003); 613-627

- BÎNDA, L., Saisi, A., Tiraboschi, C.; Investigation Procedures for the Diagnosis of Historic Masonries; *Construction and Building Materials* 14 (2000); 199-233
- BÎNDA, L., Saisi, A.; Non Destructive Testing Applied to Historical Buildings: The Case of Some Sicilian Churches; *Historical Constructions*, Eds. Lourenço, P.B., Roca, P.; Guimarães; 2001
- BÎNDA, L., Saisi, A.; Research on Historic Structures in Seismic Areas in Italy; *Progress in Structural Engineering and Materials* 7 (2005) 71-85
- BÎNDA, L., Saisi, A.; State of the Art of Research on Historical Structures in Italy; ITAM-ARCCHIP Workshop ARIADNE 11 Ed. Drdacky, M., "Historic Structures", Prague; May 20-26, 2002; 487-534
- BÎNDA, L., Tiraboschi, C., Baronio, G.; On-Site Investigation on the Remains of the Cathedral of Noto; *Construction and Building Materials* 17 (2003); 543-555
- BÎNDA, L., Zanzi, L., Lualdi, M., Condoleo, P.; The Use of Georadar to Assess Damage to a Masonry Bell Tower in Cremona, Italy; *NDT&E International* 38 (2005) 171-179
- CÓIAS e Silva, V., Lourenço, P.B.; Survey and Assessment of Portuguese Heritage Using Non-Destructive Methods in View of Its Seismic Rehabilitation; *Monument* 98 – Seismic Performance of Monuments, Lisbon; 1998; 157-166
- CORRADI, M., Borri, A., Vignoli, A.; Experimental Study on the Determination of Strength of Masonry Walls; *Construction and Building Materials* 17 (2003); 325-337
- DE STEFANO, A., Clemente, P.; S.H.M. on Historical Heritage: Robust Methods to Face Large Uncertainties; 1st International Conference On Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement, Australia; December 12-14, 2005
- DURAN, Z., Toz, G.; Photogrammetric Reconstruction and Virtual Presentation of Monastery of Christ Pantepoptes; The ICOMOS & ISPRS Committee for Documentation of Cultural Heritage CIPA 2003 XIX<sup>th</sup> International Symposium, 30 September - 4 October, Antalya; 523-528
- GIORDANO, A., Mele, E., De Luca, A.; Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through A Case Study; *Engineering Structures* 24 (2002); 1057-1069
- GREGORCZYK, P., Lourenço, P.B.; A Review on Flat-Jack Testing; *Engenharia Civil* 9 (2000) 39-50
- KANDEMİR-Yücel, A., Tavukçuoğlu, A., Caner-Saltık, E.N.; In Situ Assessment of Structural Timber Elements of a Historic Building by Infrared Thermography and Ultrasonic Velocity; Article in Press; *Infrared Physics & Technology* 49 (2007) 243-248
- LAGOMARSINO, S., Podestà, S.; Seismic Vulnerability of Ancient Churches: I. Damage Assessment and Emergency Planning; *Earthquake Spectra* 20 (2); May, 2004; 377-394
- LOURENÇO, P.B., Computations on Historic Masonry Structures. *Progress in Structural Engineering and Materials* 4 (2002) 301-319

- LOURENÇO, P.B., Oliveira, D.V., Vasconcelos, G., Ramos, L.F.; Improving the Seismic Resistance of Cultural Heritage Buildings; 1st US-Portugal International Workshop – Grand challenges in earthquake engineering 2005, Lamego, Portugal, 19.1-19.13
- LOURENÇO, P.B.; Analysis of Historical Structures: From Thrust–Lines to Advanced Simulations; Historical Constructions; Historical constructions 2001, Eds. P. Lourenço and P. Roca, Universidade do Minho, Guimarães, p. 91-116 (2001)
- LOURENÇO, P.B.; Assessment, Diagnosis and Strengthening of Outeiro Church, Portugal; Construction and Building Materials 19 (2005); 634-645
- LOURENÇO, P.B.; Current Experimental and Numerical Issues in Masonry Research; International Workshop on "Masonry Walls and Earthquakes", Eds. P.B. Lourenço et al., Universidade do Minho, Guimarães, 2004, 119-136
- LOURENÇO, P.B.; From Fracture Mechanics to Case Studies: the Issue of Cultural Heritage; Anales de Mecánica de la Fractura; 22 2005; 10-17
- LOURENÇO, P.B.; Guidelines for the Analysis of Historical Masonry Structures; Finite Elements in Engineering and Science, Eds. Hendriks, M.A.N. et.al.; Rotterdam; 2002; 241-247
- LOURENÇO, P.B.; Historical Structures: Models and Modelling; em: EPMESC VII: Computational Methods in Engineering Science, Eds. J. Bento et al., Elsevier, Amsterdam, Países Baixos, p. 433-442 (1999)
- LYNCH, J.P.; Loh, K.J.; A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring; The Shock and Vibration Digest; March 2006; 91-128
- MCCANN, D.M., Forde, M.C.; Review of NDT Methods in the Assessment of Concrete and Masonry Structures; NDT&E International 34 (2001) 71-84
- MELE, E., De Luca, A., Giordano, A.; Modeling and Analysis of a Basilica Under Earthquake Loading; Journal of Cultural Heritage 4 (2003); 355-367
- MONTALVÃO, D., Maia, N.M.M., Ribeiro, A.M.R.; A Review of Vibration-Based Structural Health Monitoring with Special Emphasis on Composite Materials; The Shock and Vibration Digest; March 2006; 295-324
- OLIVEIRA, C.S.; Seismic Vulnerability of Historical Constructions: A Contribution; Bulletin of Earthquake Engineering 1 (2003) 37-82
- OLIVEIRA, D.V., Lourenço, P.B., Roca, P.; Cyclic Behaviour of Stone and Brick Masonry under Uniaxial Compressive Loading; Materials and Structures 39 (2); March, 2006; 219-227
- RAMOS, L.F., Lourenço, P.B.; Modeling and Vulnerability of Historical City Centers in Seismic Areas: A Case Study in Lisbon; Engineering Structures 26 (2004); 1295-1310
- SCHUEREMANS, L., Van Rickstal, F., Ignoul, S., Brosens, K., Van Balen, K., Van Gemert, D.; Continuous Assessment of Historic Structures – A State of the Art of Applied Research and Practice in Belgium; , ITAM-ARCCHIP Workshop ARIADNE 11 Ed. Drdacky, M., "Historic Structures", Prague; May 20-26, 2002

- SCHULLER, M., Berra, M., Atkinson, R., Binda, L.; Acoustic Tomography for Evaluation of Unreinforced Masonry; *Construction and Building Materials* 11 (1997) 199-204
- SOFRONIE, R.A., Crisan, R., Toanchina, M.; Retrofitting the Masonry of Cultural Heritage Buildings; *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul*; 26-30 May 2003
- THAKKAR, S.K., Ghosh, G., Singh, Y.; Structural Damage Identification and Health Monitoring and Damage Identification of Bridges; *Advances in Bridge Engineering*; March 24-25, 2006; 11-30
- TRİNGALÌ, S.; The Partial Reconstruction Design of the Cathedral of Noto Part 1: The Social-Economic Impact on the Town and on the Territory and the Cross-Vaults, Arches and Dome System; *Construction and Building Materials* 17 (2003); 595-602
- TÜNER, A., Boz, B.; FE Modeling and Dynamic Testing of Historic Aspendos Theatre in Antalya, Turkey; *Structural Analysis of Historical Constructions*, Eds. Lourenço, P.B., Roca, Modena, C., Agrawal, S.; New Delhi; 2006
- TÜNER, A., Eroğlu, T.; Structural Analysis of Historic Temple of Augustus in Ankara, Turkey; *Structural Analysis of Historical Constructions*, Eds. Lourenço, P.B., Roca, Modena, C., Agrawal, S.; New Delhi; 2006
- VAN Gemert, D., Janssens, H., Van Rickstal, F.; Evaluation of Electrical Resistivity Maps for Ancient Masonry; *Matériaux et Constructions* 29 (1996) 158-163
- ZANZÌ, L., Saisi, A., Binda, L., Cardarelli, E.; Sonic Tomography and Flat Jack Experiments on the Stone Piers of the Temple of S.Nicolo' L'Arena (Italy); *Proceedings of the International Conference on Structural Faults and Repair*, London; July 4-6, 2001
- ZUCCHİNÌ, A., Lourenço, P.B.; A Micro-Mechanical Model for the Homogenization of Masonry; *International Journal of Solids and Structures* 39 (2002); 3233-3255



## 7 Ekler

Rapor ana metni içinde geçmeyip rapora eklenmesi uygun görülen tablo, diğer bilgi bu bölümde verilmektedir:

### **EK A - Mesafe Ölçer**



Lazer Mesafe Ölçerler

#### Mak Ticaret Ltd. Şti. (Acuity)

Gersan Sanayi Sit. 656 SK. No:3  
Batikent, Ankara, Turkey  
Tel: 0312 2561606 Fax: 0312 2561541  
[www.makticaret.com](http://www.makticaret.com)

#### Astech

Tel: (49) 38144073 0  
Fax: (49) 38144073 20  
<http://www.astech.de/>  
[info@astech.de](mailto:info@astech.de)

#### Riegl Laser Measurement Systems

Tel: (43) 29824211  
Fax: (43) 29824210  
[www.riegl.com](http://www.riegl.com)  
[office@riegl.co.at](mailto:office@riegl.co.at)

#### Hilti İnşaat Malzemeleri Tic A.Ş. (Hilti)

Ihlamur Kuyu Mah. Tepe Üstü Mevkii Soner Sok. Meral Plaza No 11 34771 Ümraniye / İstanbul  
Tel: 02165286800 Fax: 5286898

Öte yandan, yukarıda firmalarına ilişkin iletişim bilgilerinin görüldüğü lazer mesafe ölçerler, -10°C ve +50°C arasında çalışmaktadırlar. Bu sıcaklık aralığının alt limiti, kış koşulları düşünüldüğünde sözü geçen uygulamaya uygun olmayacaktır. Ancak, Hilti tarafından satılan PD 38 lazer mesafe ölçer bluetooth aracılığıyla kablosuz veri aktarımı yaparak bu anlamda büyük bir avantaj sunmaktadır. Ne

yazık ki, ederi vergiler hariç 600 dolar olan bu cihaz, Türkiye'deki dağıtımçı tarafından getirilememektedir.

Araştırılan bir diğer mesafe ölçer çeşidi de ultrasonik mesafe ölçerlerdir. Bu tür mesafe ölçer sunan bir firmaya rastlanmıştır.

Senix Corporation

Craig Kolk [craig@senix.com](mailto:craig@senix.com)

Doug Boehm [doug@senix.com](mailto:doug@senix.com)

Tel: (802) 4535522 Fax: (802) 4532549

[www.senix.com](http://www.senix.com)

-40°C'a kadar ölçüm yapabilen Senix marka TS-15S serisi ultrasonik mesafe ölçerlerin amaca uygun olduğuna karar verilmiştir. Nemrut Dağı'nın tepesinde kış koşullarında sıcaklığın bu sınırın dahi altına düşmesi her ne kadar muhtemelse de, kış aylarının büyük çoğunluğunda ölçüm yapılabilecektir. Şirket ayrıca % 30'luk bir eğitim kurumu indirimi de sunmaktadır. Buna göre, bir ultrasonik mesafe ölçerin fiyatı vergiler hariç 1436 dolardır. Bundan iki adet alınması düşünülmektedir.

### **EkB – Gözlem Kamerası**



Everfocus EHD 525 EX, -40°C'a kadar çalışabilen bir gözlem kamerası. Düşük sıcaklıklarda çalışan bir kamera bulmak zor olduğundan Nemrut durumu için oldukça iyi bir olasılık teşkil ediyor.

Kamera hakkında daha fazla bilgi edinmek ve fiyat öğrenmek amacıyla Everfocus'a yazılmış bulunmaktadır. Fiyat bilgisi için halen beklenmektedir.

### **Ek C – İvme Ölçer**



#### Marmatek Mühendislik (Crossbow)

Engin Altındaş, Levent Mert

Tel: 0216 4421090 Fax: 0216 3522075

[info@marmatek.com](mailto:info@marmatek.com)

[www.marmatek.com](http://www.marmatek.com)

#### E3TAM A.Ş. (Microstrain)

Sami Sedat Ömeroğlu

Tel: 0212 2752280 Fax: 0212 2732319

[info@e3tam.com](mailto:info@e3tam.com)

[www.e3tam.com](http://www.e3tam.com)

MicroStrain adındaki firmadan (iki adet G-Link kablosuz ivme ölçer, bir adet USN istasyonu, bir adet ilgili software ve şarj aletinden oluşan) bir starter kit (başlangıç paketi) ve altı adet daha G-Link kablosuz ivme ölçer için fiyat istenmiştir. Modellerin 1, 2 ve 3 eksenlileri mevcuttur. Fiyat talebinde bulunan ivme ölçerler 3 eksenlidir. Tüm bu ekipman için toplam fiyat 7117 dolardır (Ayrıntılı döküm sonraki sayfadadır).

### **Ek D – Georadar**

#### Geosearches

Tel: (440) 8930642

Fax: (440) 8930646

Ücretsiz hat: 1 866 442 4225

[hamill@geosearches.com](mailto:hamill@geosearches.com)

[www.geosearches.com](http://www.geosearches.com)

## Geomodel

Tel: (703) 7779788

Fax: (703) 777-3814

e-mail: geomodel@geomodel.com

www.geomodel.com

Atlas Copco [www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com)

Ali Pektaş Cep: 0532 2917650

Kiralama Müdürü

Beşir Kaçar Cep: 0533 6804255

Kiralama Servis Teknisyeni

Atlas Copco Makinaları İmalat A.Ş.

İstasyon Arkası,34940 Tuzla - İstanbul

Tel: 0216 5810542 - 0216 5810582

[ali.pektas@tr.atlascopco.com](mailto:ali.pektas@tr.atlascopco.com)

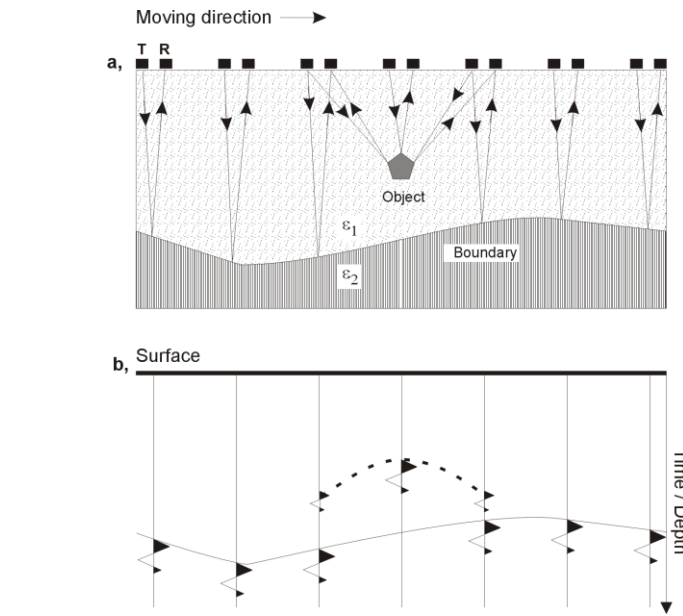
[besir.kacar@tr.atlascopco.com](mailto:besir.kacar@tr.atlascopco.com)

Horizon International Trade and Contract Co. Ltd.

Erdal Dirican Tel: 0312 4784319

Osman Temiz Mahallesi, 7 Cadde, No:32/8 06450 Dikmen Ankara

[horizonint@superonline.com.tr](mailto:horizonint@superonline.com.tr)<http://www.geophysical.com/EuropeSalesReps.htm>



Georadar cihazının çalışma prensibini gösteren bir resim ([www.tricon-online.de/html/gpr.html](http://www.tricon-online.de/html/gpr.html))

### **Ek E - Ultrasonik Cihaz Sivri Uçlu Alıcı ve Vericisi**



Sahip olunan Proceq TICO ultrasonik ölçüm aleti satış sorumlusuyla bağlantıya geçilmiş, ve ellerinde bu alete uyumlu, taş için daha uygun olacak sivri uçlu alıcı ve vericiler olup olmadığı sorulmuştur. Ancak henüz bu konuyla ilgili olarak yanıt alınmış değildir.

### **Ek G- PhotoModeler**



PhotoModeler, verilen iki boyutlu fotoğrafları ortak referans noktalar aracılığıyla üç boyutlu modeller haline getiren software'ler içinde tarihi yapıların modellenmesi amacıyla en sık kullanılanıdır. Bunun dışında, çağdaş mimarlık yapılarının ve arkeolojik alanların modellenmesi içinde kullanılmaktadır.

Bu paket için verilen fiyat, vergiler hariç 1168 CAD (Kanada doları)'dır.

ALET	TÜRKİYE DAĞITICISI (VARSA) (ÜRETİCİ FİRMA/KURUM)	İLETİŞİM	MODEL	BİLDİRİM	GERİ BİLDİRİM	FİYAT
Lazer Tarayıcı	GRAFTEC (Trimble)	Semih Yıldız (Tel: 0216 4254781 Fax: 4254783) (yildiz@graftec.com.tr)	GX 200, GS 200	✓	✓	?
	SEZA (Riegl)	Semih Kirişcioğlu (Tel: 4462656-57 Fax: 4462658) (semih@seza.com.tr)	LMS420i, LMS390	✓	✓	?
	Sistem bilgisayar (Leica)	Volkan Pasinli (Tel: 2351011 Fax: 2350550) (volkanpasinli@leica-sistem.com)	CYRAX 3D	✓	X	?
Lazer Titreşim Ölçer	DBKES (Polytec)	Çınar Kurra (Tel: 02122360175&05336273627) (cinar.kurra@db-kes.com.tr)	OFV500-505+PSV4001	✓	✓	45+60-80 bin avro
Ultrasonik Mesafe Ölçer	SENIX	Craig Kolk (Fax: 8024532549) (craig@senix.com)	TS15	✓	✓	595 dolar+%30 indirim
	SENIX	Doug Boehm (doug@senix.com)	Ultra U family(ULTRA-U-SS2+UA-MB+SS+SPAN-U)	✓	✓	1436 dolar (2004 fiyatı)
Lazer Mesafe Ölçer	Astech	Tel: (49) 38144073 0 Fax: (49) 38144073 20 (info@astech.de)	LDM 40A, 41A, 42A	X	X	?
	Riegl	Tel: (43)29824211 Fax: (43)29824210 (office@riegl.co.at)	LD 90 3100 HS	X	X	?
	Mak (Acuity)	Tel: 0312 2561606 – 2561903 Fax: 2561541 (mak@makticaret.com)	AR 200, AR 600	X	X	?
	Hilti (Hilti)	Tel: 0216 5286800 Fax: 5286898	PD 38	✓	✓	600 dolar + KDV
Kablosuz Birim Deformasyon Ölçer	Marmatek (Crossbow)	Engin Altındaş (Tel: 0216 4421090 Fax: 3522075) (info@marmatek.com)	MICA2, MICA/DOT	X	X	?
	E3tam (Microstrain)	Sami S. Omeroglu (Tel: 0212 2752280 Fax: 2732319) (info@e3tam.com)	G-Link,SG-Link	✓	✓	1200-1300 dolar
3D Model için Software	PhotoModeler	Matt Klymson (Tel: 604-732-6658) (matt@photomodeler.com)	PhotoModeler Pro5	✓	✓	1168 CAD +KDV
Notebook Bilgisayar	Teknosa		HP NX6110 PG819EA			588 dolar
Mod Analizi için Software	Cincinnati Üniversitesi	webmaster@www.sdrl.uc.edu	X-Modal	✓	✓	1250 dolar + KDV
Gözlem Kamerası	EverFocus	Tony Lin (Tel: (886) 2 26982334/159 Fax: (886) 2 26982380/159) (tony@everfocus.com.tw)	EHD 525 EX, EPTZ 1000	✓	✓	?
Kablosuz İvme Ölçer	E3TAM (Microstrain)	Sami S. Omeroglu (Tel: 0212 2752280 Fax: 2732319) (info@e3tam.com)	G-Link	✓	✓	7117 dolar (altı ivme ölçer ve bir başlangıç paket fiyatı)
Georadar Hizmeti	Geoseraches	Tel: (440) 8930642 Fax: (440) 8930646 (hamill@geoseraches.com)		X	X	?
	Geomodel	Tel: (703) 7779788 Fax: (703) 777-3814 (geomodel@geomodel.com)		X	X	?
	Atlas Copco	Ali Pektaş Ş Beşir Kaçar (Tel: 0216 5810542 - 0216 5810582) (ali.pektas@tr.atlascopco.com, besir.kacar@tr.atlascopco.com)		X	X	?
	Horizon	Erdal Dirican Tel: 0312 4784319 (horizont@superonline.com.tr)		X	X	?

## 8 Proje Özet Bilgi Formu

### TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: MAG - 1041108
Proje Başlığı: Önleyici Yapısal Sağlık İzleme Metodları, Araç ve Stratejilerinin Araştırılması, Geliştirilmesi ve Uygulanması
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Yürütücü: Doç. Dr. Ahmet Türer. Araştırmacılar: Yasemin Didem Aktas, Hakan Dinçer, Alper Özge Gür, Murat Erdoğan, Tuba Eroğlu, Pourang Ezzatfar
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Lab. 06531 Çankaya Ankara.
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.04.2005 – 01.04.2010 + 6 ay ek süre (01.10.2010).
Öz (en çok 70 kelime) Yapısal sağlık izleme, mühendislerin analiz ve değerlendirmelerinde kullandıkları bazı varsayımları gerçek uygulamada test etme imkanı tanıyan, yapısal önemi yüksek ya da yapısal problem yaşayan yapıların kritik parametrelerinin izlendiği çalışmalar kapsamıdır. Bu proje kapsamında, gerçek yapıların ölçüme dayalı olarak izlenme metodları, araç ve stratejilerinin araştırılması, geliştirilmesi ve uygulanması hedeflenmiş; bu amaca yönelik çalışmalar yapılmıştır. İzleme yöntemleri öğrenilmiş, cihazlar alınmış, programlanmış, çok sayıda uygulama yapılarak karşılaşılan problemler çözülmüş, yeni cihazlar geliştirilmiştir. (69 kelime)
Anahtar Kelimeler: Yapısal sağlık izleme, ölçüm, sensör, önemli, problem, çatlak, oturma, eğilme, titreşim.
<a href="#">Fikri Ürün Bildirim Formu</a> Sunuldu mu? Evet <input checked="" type="checkbox"/> Gerekli Değil <input type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.

### Projeden Yapılan Yayınlar:

Proje süresince yapılan hakemli dergi yayınları aşağıda listelenmektedir:

- Turer A, Boz B. , “Computer modeling and seismic performance assessment of historic Aspendos theatre in Antalya, Turkey”, Engineering Structures, 30: 2127–2139 (2008).
- Turer A, Didem A. Yasemin, Guchan, Ş. Neriman., “Reverse-engineering evaluation and monitoring of Nemrut monuments”, International Journal of Architectural Heritage, *basımda* (2011).

Proje kapsamında hakemli dergilere gönderilme hazırlığı devam etmekte olan yayınlar aşağıda listelenmektedir:

- Turer A., Pourang “Statistical sampling of monitoring instruments”
- Ürgüp – Çatlak ilerleme mekanizmaları ve çatlak hareketi izleme çalışmaları.
- Andırap – Dizayn yükünün üstünde kamyon yüklerinin izleme çalışmaları
- Hasankeyf – Zeynelbey Türbesi kubbesinin izleme ve güçlendirme çalışmaları

Proje süresince yapılan ve desteklenen tez çalışmaları aşağıda listelenmektedir:

- Alper Özge Gür, “Structural health monitoring of viaducts and large span roofs”
- Kısmen desteklenen:
  - Murat Erdoğan “Seismic strengthening of masonry buildings”
  - Hakan Dinçer “GIS applications in civil engineering”
  - Yasemin Didem Aktaş “Performance evaluation and testing of Ottoman himis houses and Nemrut monuments”

Proje süresince yapılan konferans yayınları aşağıda listelenmektedir:

- 1) Turer, A., “Conservation of Heritage Structures in Turkey: Practice and Difficulties”, 7th International Conference on Structural Analysis of Historic Constructions SAHC2010, Tongji University, China. Oct. 2010
- 2) Turer, A., “SHM Studies on Bolu Viaduct, Turkey”, The 7th International Workshop Structural Health Monitoring - Stanford University, USA. Sept. 2009



- 3) Turer, A., "Structural Monitoring of Andirap Bridge for Overload Passage", The 7th International Workshop Structural Health Monitoring - Stanford University, USA. Sept. 2009.
- 4) Turer, A., Y.D. Aktas, N. Sahin Guchan, "Structural stability evaluation of Nemrut Monuments", International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments and Sites in The East Mediterranean Region. ITU, Turkey. July 2009.
- 5) Y. Aktas, Turer, A., "Issues in the Identification and Monitoring of Historical Structures/Monuments", 11th international conference on durability of building materials and components - DBMC11, Turkey, May 2008
- 6) Y. Aktas, Turer, A., "Issues in the Identification and Monitoring of Historical Structures/Monuments", 11th international conference on durability of building materials and components - DBMC11, Turkey, May 2008.
- 7) Y. Aktas, Turer, A., "A General Procedure for The Structural Condition Assessment of Historical Earthen Masonry Structures Through Structural Identification and Monitoring", Terra 2008 - 10th international conference on the study and conservation of earthen architectural str., GETTY & IIC, Mali , 2008.
- 8) Ahmet Turer, Dynamic testing of existing bridges for high speed trains. "The fourth International Conference on Bridge Maintenance and Safety (IABMAS-08)", -, (2008).
- 9) Ahmet Turer, Matrix based cable-stay bridge cable force and deck elevation adjustments and FEM updating. "The fourth International Conference on Bridge Maintenance and Safety (IABMAS-08)", -, (2008).
- 10) A. Turer, "Dynamic testing of existing bridges for high speed trains", IABMAS 2008, Seoul-Kore.
- 11) Turer, A. , Yücel, M.C., Yılmaz, Ç., "Matris Metodu ile Köprü Kablolarına Düzenli Gergi Uygulaması", 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya, Türkiye, 29-30 Nov. 2007.
- 12) Turer, A., Yılmaz, Ç., "Temperature Induced Internal Force Problem in a High Rise Twin Tower Platform and Viscous Isolator Solution", ASSISi, 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures, Istanbul, Turkey, May 27-30, 2007.
- 13) Aktas, Y.D., Turer, A., "Preliminary Structural Monitoring and 3D Modeling of Nemrud Monuments, Turkey", International Symposium Studies on Structural Heritage SHH07, Antalya, Turkey, 17-22 September 2007.
- 14) Turer, A., "Structural Modeling, Earthquake Analysis, and Strengthening

- Proposals for Gaziantep Ali Nacar Mosque Minaret”, International Symposium Studies on Structural Heritage SHH07, Antalya, Turkey, 17-22 September 2007.
- 15) Turer, A., A. Caner ve C. Yilmaz, “Cable Hanger Plate Replacement; a Case Study on Bosphorus Bridge”, Proc. 3rd International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management (IABMAS), 433, Balkema, Porto-Portekiz, 2006.
  - 16) Turer, A., Boz, B., “FE Modeling and Dynamic Testing of Historic Aspendos Theatre in Antalya, Turkey”, Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC2006, India, 2006.
  - 17) Turer, A., Eroglu, T., “Structural Analysis of Historic Temple of Augustus in Ankara, Turkey”, Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC2006, India, 2006.
  - 18) Turer, A., Eroglu, T., “Structural Health Monitoring - A Methodological Approach for Application”, ACE Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Yildiz Technical University, 2006.