T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK YAPILARIN FARKLI SENSÖRLER İLE TAM ÖLÇEKLİ İZLENMESİ VE DİNAMİK PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Cemal Özer YİĞİT

DOKTORA TEZİ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA 2010

ÖZET

Doktora Tezi

Yüksek Yapıların Farklı Sensörler İle Tam Ölçekli İzlenmesi ve Dinamik Parametrelerin Belirlenmesi

Cemal Özer YİĞİT

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cevat İNAL

2010, 132 sayfa

Mühendislik yapıları beklenen hizmet ve yaşam süreleri boyunca maruz kalacakları olası yükleri karşılayabilecek şekilde tasarlanır ve inşa edilirler. Kule, gökdelen vb. yüksek yapıların tasarımında, az katlı yapıların aksine, yapıya dinamik yük olarak etkiyen depremin yanı sıra, rüzgâr yüklerininde göz önüne alınması gereklidir. Yüksek yapıların, deprem yüküne karşı dirençli olabilmesi yapının olabildiğince hafif-ağırlıklı ve esnek olmasını, şiddetli rüzgârlara karşı yapının dirençli olması ise yapının rijitliğinin olabildiğince yüksek olmasını gerektirmektedir ve her iki yük değerine karşı dayanıklı bir yapının tasarlanması gereklidir. Yapıların sismik ve rüzgâr gibi dinamik yükler karşısındaki davranışlarının farklı kabiliyetlere sahip sensörlerle tam ölçekli izlenmesi, yapıların doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm değerlerine ilişkin dinamik parametrelerin belirlenmesi, yapı sağlıklarının

değerlendirilmesi, proje kabullerinin kontrol ve kalibrasyonu yanında, gelecek projelere ışık tutan değerli bir veri ve bilgi alt yapısı oluştururlar.

Bu çalışmada, çok katlı betonarme yüksek bir mühendislik yapısının rüzgâr ve sismik yükler karşısındaki dinamik tepkileri GPS ve eğim sensörü kullanılarak eş zamanlı olarak izlenmiştir. Birbirinden farklı özelliklere sahip, 4 tanesi rüzgâr yükü ve 1 tanesi sismik yük olmak üzere toplam 5 farklı veri setinin zaman ve frekans analizleri, Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ve bir dizi sinyal filtreleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, yapının doğal frekanslarının belirlenmesi ve her iki sensörün yapının dinamik davranışlarını yakalama kabiliyetleri açısından katkıları, eksiklikleri, avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı bir yaklaşımla ele alınmış ve tam ölçekli izleme projelerinde sensör entegrasyonuna ilişkin önemli bulgular elde edilmiştir. Ayrıca yapının tam ölçekli izleme sonucu elde edilen frekans değerleri ile analitik modelden elde edilen değerleri karşılaştırılarak yapının analitik modelinin doğruluğu değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile ayrıca yapıya etkiyen rüzgâr ve sismik yük tiplerinin yapı üzerindeki dinamik cevaplarının benzerlik ve farklılıkları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek yapıların tam ölçekli izlenmesi ve analizi, Dinamik rüzgâr ve deprem yükü, GPS ve eğim sensörü, Sayısal filtreler

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

Full-Scale Monitoring of Tall Structures Using Various Sensors and Determination of Dynamic Parameters

Cemal Özer YİĞİT

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geomatic

Supervisor: Prof. Dr. Cevat İNAL

2010, 132 Page

The engineering structures are designed and constructed to be able to resist against possible load that could be anticipated during expected service and lifetime. Unlike low-rise building, it is necessary to take into account wind loading as much as seismic load as a dynamic load for high-rise structures in design stage. High-rise structures require to be stiffness and heavy against wind load while it require to be flexible and light against seismic force. Hence, it is necessary to design the building resisting these two forces. The monitoring of behaviour of the structures under dynamic loading, such as wind and seismic load, using various sensors which has different ability contribute to determine their dynamic parameters, such as natural frequencies, mode shapes and damping ratio, and provide future projects good and

valuable information database as well as evaluating of structural health and control and calibration of project parameters accepted.

In this study, multistory reinforced concrete tall building dynamic response to wind and seismic load has been monitored using GPS and inclination sensors simultaneously. Time and frequency analysis of 5 data set consisting of 4 wind load and 1 seismic load have been carried out by employing Fast Fourier Transform (FFT) and a few range of signal processing techniques. Assessing the dynamic measurement quality, reliability and ability of GPS and inclinometers for building monitoring applications, and discussing the strengths and weaknesses of GPS vis-a-vis the use of inclination sensors for monitoring and determining the dynamic response of tall buildings is dealt with comparative approach. It was also obtained some findings on integrating sensors for full scale monitoring project. In addition to these, assessing the accuracy of analytical model of the building was made by comparing frequencies obtained from full scale monitoring and derived from Finite Element Model (FEM). Similarity and difference of building dynamic response to wind and seismic load was evaluated.

Key Words: Full-scale Monitoring and analysis of tall building, Dynamic wind and earthquake loading, GPS and inclination sensor, Digital filter

ÖNSÖZ

Günümüzde çoklu disiplinlerin birlikte çalışması, her bir disiplinin kendi kullandığı ölçme, analiz ve değerlendirme sistemlerinin diğer yakın ve bağlantılı disiplinlerde uygulama yeri bulması ve katkıları göz ardı edilemez seviyede önem kazanmıştır. Her bir sistemin kendine göre göz ardı edilemez katkıları yanında eksikliklerinin de mevcut olması araştırma ve inceleme altındaki yapının ya da sistemin tam anlamıyla bir değerlendirmesine her zaman izin vermemektedir. Fakat, ölçme sistemlerinin bir arada kullanılması, analiz sistemlerinin karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmesi ile bahsedilen eksiklikler daha da giderilmekte ve incelenen yapı yada sistem hakkında daha anlamlı ve hatırı sayılır bilgiler mühendislik sistemlerinin tasarımında büyük gelişmeler sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında jeodezik amaçlı uydulardan konum belirleme yönteminin ve ayrıca şuana kadar üzerinde çok fazla çalışılmamış eğim sensörünün yüksek binaların izlenmesine katkıları, sensörlerin güçlü ve zayıf yönleri ve yapı dinamiklerinin belirlenmesine katkıları ve entegrasyonu araştırılmıştır. Böylelikle hem inşaat mühendisliğine katkı sağlayan bir bilgi alt yapısı oluşturulmuş hem de yapının dinamik yükler altındaki durumu değerlendirilmiştir. Çoğunlukla Elektrik-Elektronik Mühendisliği bilim dalında kullanılan sayısal filtreler vb. konular kullanılmıştır. Sonuç olarak, Harita, İnşaat, Jeoloji, Maden, Elektrik-Elektronik ve Rüzgâr Mühendisliği gibi birçok disiplin bilgisini gerektiren çok disiplinli bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin hazırlanması süresince bilimsel tecrübelerini aktaran, yol göstererek ve benim fikirlerimi ve bu tez kapsamında TÜBİTAK bursu ile Avustralya'da araştırma yapmama sıcak bakan danışman hocam Prof. Dr. Cevat İnal'a, The University of New South Wales (UNSW), School of Surveying and Spatial Information Systems(SSIS), Sydney-Avustralya'da 1 yıl boyunca çalışmama destek veren ve beni kendi aralarına alan çok değerli bilim insanı Prof. Chris Rizos ve tüm çalışma ekibine, kendisiyle birebir çalıştığım A/Prof Linlin Ge ve Dr. Xiaojing Li' ye ayrıca SSIS bünyesindeki GEOS grubu elamanlarına, UNSW da bana her zaman destek veren ve yalnız bırakmayan farklı uluslardan tüm arkadaşlarıma, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile binanın analitik modelini oluşturan Yrd.Doç.Dr. Musa Hakan

Arslan ve Arş.Gör. Hakkı Erkan'a, tüm mesai ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasını, 06101026 nolu proje ile ve bu proje kapsamında kabul edilen ve yayınlanan çalışmalara yurtdışı sempozyum katılım desteği veren Selçuk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne, yurt dışı doktora içi araştırma bursu veren TÜBİTAK-BİDEP'e ve FIG 2010 Sydney-Avustralya da düzenlenen sempozyuma gitmeme ilave destek veren GEOS grubu başkanı A/Prof Linlin Ge ve eşi Dr. Xiaojing Li' ye ve binada bilimsel araştırma yapmamıza izin veren Rixos Hotel yönetimi ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak, her türlü desteği hiç bir zaman eksik etmeyen ailemin her bir üyesine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

1 GİRİŞ 1
1.1 Yapıların Tam Ölçekli İzlenmesi ve Önemi 4
1.2 Çalışmanın Ana Hedefleri ve Bilime Katkısı 6
1.3 Tezin Genel Yapısı 7
2 LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALARA GENEL BİR BAKIŞ 9
3 DEFORMASYON MODELLERİ, SİSTEM TEORİSİ, ZAMAN VE FREKANS ANALİZLERİ VE SAYISAL FİLTRELER 18
3.1 Deformasyon Modellerinin Sınıflandırılması 18
3.2 Sistem Teorisi ve Sistem Tanımlama 20
3.2.1 Parametrik ve parametrik olmayan modellerle sistem tanımlaması 23
3.2.1.1 Parametrik modeller 23
3.2.1.2 Parametrik olmayan modeller 25
3.3 Sistem Tanımlama Döngüsü 27
3.4 Zaman Serileri ve Stokastik Süreçler 28
3.4.1 Stokastik süreçler 32
3.4.2 Korelasyon ve otokorelasyon fonksiyonları 34
3.5 Frekans Alanında Analiz ve Filtreleme 35
3.5.1 Fourier analizi 35
3.5.2 Fourier dönüşümleri 36
3.5.3 Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) 36
3.5.4 Ayrık Fourier Dönüşümü öncesi pencereleme 37
3.5.5 Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) 39
3.5.6 Sinyal örnekleme frekansının seçimi 40
3.5.7 Sayısal filtreler 41
3.5.7.1 Temel filtreler 42
3.5.7.2 Ayrık-zamanlı FIR filtre tasarımı 44
3.5.7.3 Ayrık zamanlı IIR filtre tasarımı 45
4 YÜKSEK YAPILARA ETKİYEN YÜKLER 47
4.1 Giriş 47
4.2 Yüksek Yapı ve Yüksek Yapılara Etkiyen Dinamik Yükler 50
4.2.1 Dinamik yük olarak rüzgâr ve deprem yükü 51

4.2.2 Rüzgâr yükü 53
4.2.2.1 Rüzgâr tüneli testi çalışmaları 56
4.2.3 Deprem yükü 58
4.3 Yapı Mod Şekilleri ve Frekansları 61
5 TAM ÖLÇEKLİ İZLENEN YÜKSEK YAPI VE TESİS EDİLEN SENSÖR SİSTEMLERİ 63
5.1 Obje Hakkında Genel Bilgiler 63
5.1.1 Sonlu Elemenlar Modelinin (SEM) oluşturulması 64
5.2 Objeye Sensörlerin Yerleştirilmesi ve Sensörler ile İlgili Bilgiler 65
5.2.1 GPS sensörü 66
5.2.2 Eğim sensörü 68
5.2.3 Anemometre 71
6 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 74
6.1 Giriş 74
6.2 Yapı Rüzgâr Cevabına İlişkin Ölçmeler ve Analizler 74
6.2.1 R1 nolu deney seti zaman ve frekans analizleri 74
6.2.1.1 Binanın doğal frekanslarının belirlenmesi 77
6.2.1.1.1 GPS verilerinin analizi 77
6.2.1.1.2 Eğim sensörü verilerinin analizi 81
6.2.1.2 GPS ve eğim sensörünün rüzgâr yükü altındaki dinamik davranışları izleyebilme kabiliyetlerinin değerlendirilmesi ve sensörlerin karşılaştırılması 84
6.2.1.2.1 GPS ve eğim sensörü karşılaştırılması amacıyla eksenlerinin Benzerlik Dönüşümü ile aynı yöne getirilmesi 85
6.2.1.2.2 GPS koordinat eksenlerinin eğim sensörü koordinat eksen sistemine paralel duruma getirilmesi 86
6.2.1.2.3 Eğim sensörü koordinat sisteminin GPS koordinat sistemi ile aynı yöne getirilmesi 93
6.2.2 R2 Nolu deney seti zaman ve frekans analizleri 99
6.2.2.1 GPS zaman serisindeki sinyal yansıma etkisinin filtrelenmesi 101
6.2.3 R3 nolu deney seti zaman ve frekans analizleri 103

6.2.3.1 GPS verilerinin analizi 104
6.2.3.2 Eğim sensörü verilerinin analizi 105
6.2.3.2.1 Eksen rotasyonu ile frekans bileşenlerinin ana yönlerinin ayrıştırılması ve belirlenmesi 106
6.2.4 R4 nolu deney seti zaman ve frekans analizleri 108
6.3 Binanın Sismik Yük Cevabına İlişkin Ölçmeler ve Analizler 111
6.3.1 Barla-Eğirdir-Isparta depremi 111
6.3.2 Sille-Konya depremi 113
6.3.3 Taş ocağında gerçekleştirilen dinamit patlamaları sonucu meydana gelen yer sarsıntıları ve hava dalgasının binaya etkileri (D1 nolu deney seti) 114
7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER 118
8 KAYNAKLAR 125

KISALTMALAR LİSTESİ

AFD :Ayrık Fourier Dönüşümü

ARMA : Auto Regressive Moving Average

FIR :Finite Impulse Response

GPS : Global Positioning System

HFD :Hızlı Fourier Dönüşümü

IIR :Infinite Impulse Response

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MISO :Multiple Input Single Output

SEM :Sonlu Elemanlar Modeli

SEY :Sonlu Elemanlar Yöntemi

SISO : Single Input Single Output

TS :Türk Standartları

TDY :Türk Deprem Yönetmeliği

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Deformasyonun jeodezik sınıflandırılması.....18
Şekil 3.2 Objenin geometrik tanımlanması.....19
Şekil 3.3 Jeodezik deformasyon analizinde modellerin hiyerarşisi.....20
Şekil 3.4 Girişi u, çıkışı y, ölçülen bozucu etkisi w ve ölçülmeyen bozucu etkili v bir sistem.....21
Şekil 3.5 Sistem teorisinin kısımları.....21
Şekil 3.6 Dinamik sistemlerin giriş ve çıkış sayısına göre sınıflandırılması.....22
Şekil 3.7 Sistem tanımlama metotları.....23
Şekil 3.8 Sistem tanımlama döngüsü.....28
Şekil 3.9 Bir zaman serisinin olası bileşenleri.....29
Şekil 3.10 Muhtemel trend şekilleri.....30
Şekil 3.11 Deterministik trend (I,II) ve stokastik trend (III).....31
Şekil 3.12 Sinyal pencereleme işlemi.....38
Şekil 3.13 Üçgen, Blackman, Hamming ve Hanning pencereleri.....39
Şekil 3.14 Alçak-geçiren filtre.....43
Şekil 3.15 Yüksek-geçiren filtre.....43
Şekil 3.16 Band-geçiren filtre.....44
Şekil 3.17 Band-söndüren filtre.....44
Şekil 4.1 Yapıya etkiyen yüklerin genel bir gösterimi.....48
Şekil 4.2 Çeşitli karakteristik yüklerin zamana göre davranışları.....49
Şekil 4.3 Dünya'da geçmişten günümüze en yüksek yapılar.....50
Şekil 4.4 Deprem ve rüzgâr yüklerinin yapı tiplerine göre yaklaşık spektrum yoğunlukları.....53
Şekil 4.5 Rüzgâr türbülans ve ortalama değeri.....54
Şekil 4.6 Dikdörtgen kesitli bir yapıda, rüzgâr esme yönüne göre yük-titreşim tanımları.....54
Şekil 4.7 Girdap kopmaları ve etkisi.....55
Şekil 4.8 Açık-devre rüzgâr tüneli bileşenleri.....57
Şekil 4.9 Melbourne şehir modeline ait bir bölüm.....57
Şekil 4.10 Elastik ortamda dalga türleri ve yayılma özellikleri.....59
Şekil 4.11 Çok dereceli sistemin dinamik davranışı - mod şekilleri ve periyotlar.....61

Şekil 5.1.Yapının ön (üst sol), yan (üst sağ) ve üst plan (alt) görünüşü 63
Şekil 5.2. Yapının SAP2000 de oluşturulan SE Modeli 64
Şekil 5.7: NIVEL220 izleme sistemi bileşenleri 69
Şekil 5.8 Sensor bileşenleri 70
Şekil 5.9 26. kattaki eğim sensörü ve bilgisayar (sol), 21. kattaki eğim sensörü (sağ) 70
Şekil 5.10 Depolanan eğim sensörü ölçülerine ait dosya örneği.....71
Şekil 5.11 Young Model 05103 Anemometre (sol) Young 26700 kayıt ünitesi (sağ) 71
Şekil 5.12 Bina üzerinde anemometre tesisi 72
Şekil 5.13 Depolanan rüzgâr verilerine ait dosya örneği 73
Şekil 6.1 Rüzgâr ortalama, maksimum hız (üst) ve yön (alt) zaman serisi (450^d-950^d) 75
Şekil 6.2 Rüzgâr ortalama, maksimum hız (üst) ve yön (alt) zaman serisi.....76
Şekil 6.3 Binaya göre sensör eksen yönleri ve ortalama rüzgâr yönü 77
Şekil 6.4 GPS zaman serisi 78
Şekil 6.5 GPS zaman serisine ait HFD genlik spektrumu (0 -5 Hz).....79
Şekil 6.6 GPS zaman serisine ait HFD genlik spektrumu (0 - 1 Hz).....80
Şekil 6.7 Eğim sensörü zaman serisi 81
Şekil 6.8 Eğim değerinden türetilmiş deplasman zaman serisi 82
Şekil 6.9 Türetilmiş-deplasman zaman serisinin HFD genlik spektrumu (0 - 0.5 Hz) 83
Şekil 6.10 Eksenler arasındaki dönüklükler ve belirlenmesi 86
Şekil 6.11 Dönüştürülmüş GPS zaman serisi.....87
Şekil 6.12 Dönüştürülmüş GPS zaman serisinin HFD genlik spektrumu 88
Şekil 6.13 Band geçiren filtre sonrası türetilen genlik-zaman serisi 89
Şekil 6.14 Filtrelenmiş serinin çapraz korelasyon fonksiyonu 90
Şekil 6.15 Aynı zamana getirilmiş GPS ve eğim sensörü zaman serileri.....91
Şekil 6.16 Band geçiren filtre sonrası türetilen genlik-zaman serisi 91
Şekil 6.17 Eğim değerinden deplasman değerine geçisin betimlenmesi 92
Şekil 6.19 Dönüştürülmüş eğim sensörü zaman serisinin HFD genlik spektrumu 94
Şekil 6.20 Band geçiren filtre sonrası türetilen genlik-zaman serisi 95

Şekil 6.21 Filtrelenmiş serinin çapraz korelasyon fonksiyonu 96
Şekil 6.22 Aynı zamana getirilmiş GPS ve eğim sensörü zaman serileri.....96
Şekil 6.23 Band geçiren filtre sonrası türetilen genlik-zaman serisi 97
Şekil 6.24 Rüzgâr ortalama, maksimum hız (üst) ve yön (alt) zaman serisi (500^d-1000^d).....99
Şekil 6.25 Rüzgâr ortalama, maksimum hız (üst) ve yön (alt) zaman serisi.....100
Şekil 6.26 GPS zaman serisi ve HFD spektrumları.....101
Şekil 6.27 Yüksek geçirgen filtre uygulanmış zaman serileri ve HFD spektrumları 102
Şekil 6.28 Band-geçiren filtre uygulanmış zaman serileri ve HFD spektrumları 103
Şekil 6.29 Maksimum, ortalama rüzgâr hızı (üst) ve yönü (alt) (16^d).....104
Şekil 6.30 R3 deneyin boyunca ortalama rüzgârın binaya esme yönü 104
Şekil 6.31 GPS zaman serisi ve HFD spektrumları.....105
Şekil 6.32 Eğim değerinden türetilmiş deplasman zaman serisi ve HFD spektrumları 106
Şekil 6.33 Eksen rotasyonu uygulanmış türetilmiş deplasman zaman serisi ve HFD spektrumları.....107
Şekil 6.34 Eğim sensörü orjinal eksen yönleri ve rotasyon uygulanmış eksen yönleri 108
Şekil 6.35 Ortalama, maksimum rüzgâr hızı ve yönü zaman serisi 108
Şekil 6.36 Eğim değerinden türetilmiş deplasman zaman serisi 109
Şekil 6.37 I ve II deney seti maksimum ve ortalama rüzgâr hızı (üst) ve yönü (alt)109
Şekil 6.38 I ve II deney seti zaman serileri 110
Şekil 6.39 I ve II deney setlerine ait HFD spektrumları 111
Şekil 6.40 Barla-Eğirdir-Isparta deprem merkezi ve bina konumu.....112
Şekil 6.41 Türetilmiş deplasman zaman serisi 112
Şekil 6.42 Sille – Konya deprem merkezleri ve bina konumu.....114
Şekil 6.43 Taş ocağı ve Rixos Hotel binası konumları.....115
Şekil 6.44 Orjinal eksen yönlerinde zaman ve HFD spektrumları.....116
Şekil 6.45 Eksen rotasyonu uygulanmış zaman ve HFD spektrumları.....116
Şekil 6.46 Sismik dalga merkezi, binaya geliş yönü ve dönüştürülmüş sensör yönü 117

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Zaman ve uzayda deformasyon sürecinin jeodezik modeli.....19
Tablo 3.2 Deformasyon modellerinin karakterizasyonu ve sınıflandırılması.....20
Tablo 4.1 Türkiye'deki bazı yüksek yapılar.....51
Tablo 5.1. Rixos binasının ilk 6 moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri.....65
Tablo 5.2 HiPer Pro GPS alıcılarının özellikleri.....68
Tablo 5.3 Nivel 220 özellikleri.....69
Tablo 5.4 Model 05103 anemometre hız ve yön ölçme özellikleri.....72
Tablo 6.1 Dinamik yük deney setleri, deney süresi ve veri toplama frekansları 74

1 GİRİŞ

Günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, gökdelen, yüksek bina, kule vb. yüksek yapıların sayısında dikkate değer bir artış gözlenmektedir. Asma köprüler ve yüksek yapılar, diğer mühendislik yapılarında uygulandığı gibi deprem yüklerini karşılayacak şekilde projelendirilmelerinin yanında, dinamik bir yük oluşturan rüzgâr yüklerini de karşılayabilecek şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir. Daha az materyal ile daha yüksek ve daha uzun yapıların inşası, mühendislik yapılarının yatay rüzgâr yüküne karşı daha hassas olmasına sebep olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, yapıya etkiyen yatay yükün etkilerinin karşılanması tasarımcılar tarafından aşılması gereken bir durum olarak ele alınmalıdır (Liu 1991). Yüksek yapıların, deprem yüküne karşı dirençli olabilmesi yapının olabildiğince hafif-ağırlıklı ve esnek olmasını, şiddetli rüzgârlara karşı yapının dirençli olması ise yapının rijitliğinin olabildiğince yüksek olmasını gerektirmektedir (Li ve ark. 2008). Yapılara dinamik yük oluşturan, deprem ve rüzgâr gibi, iki farklı tasarım ölçütlerinin göz önünde bulundurulması ve her iki yük değerine karşı dayanıklı bir yapının tasarlanması gereklidir.

Mühendislik yapıları malzeme ve yapı mekaniği temel prensipleri yardımı ile tasarlanırlar. Bilgisayarların hızlı gelişimine paralel olarak sayısal hesap yöntemlerinin de uygulanması kolaylaşmış ve birçok mühendislik yapılarına kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) mühendislik yapılarının tasarımına yardım eden ve yaygın olarak kullanılan bir sayısal yöntem halini almıştır. Bu yöntemle mühendislik yapıları belli kabullere göre modellenmekte ve dinamik parametreleri olan doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmektedir. Elde edilen parametrelerin doğruluğu modellemenin ve proje kabullerinin ne kadar gerçekçi olduğuna bağlıdır. Unutulmamalıdır ki, bu tür modellerde yapıya etkiyen rüzgâr ve deprem gibi dinamik yükler statik bir yaklaşımla ele alınmakta ve sonuçlar elde edilmektedir. Fakat gerçekte yükler düşünüldüğü gibi statik değil, rüzgâr ve depremin doğası gereği zamana göre değişen ve çok karmaşık olan bir dinamik yüktür. Bu durum, yapıların dinamik yükler altındaki davranışlarının tam ölçekli olarak izlenmesinin ve analizlerinin ne kadar önemli olduğunu açıkça göstermektedir.

Yüksek yapıların rüzgâr yüklerine cevabı, temel olarak üç bileşen şeklinde olmaktadır. Bu bileşenler ortalama sabit bir yükle etki eden güçlerin neden olduğu statik bileşen, düşük-frekanslı yüklerin sebep olduğu quasi-statik bileşen ve yapıların 1. moduna yakın olan frekanstaki güçlerin sebep olduğu rezonans (dinamik) bileşendir (Tamura 2003, Li 2006). Yapıların yükler karşısında tepki olarak ortaya çıkardığı yapısal titreşim köprülerde düşey deplasmanlara, kule, yüksek bina ve gökdelenlerde yatay deplasmanlara sebep olmaktadır. Yapıların deplasman değerleri bu türden mühendislik yapılarının güvenliğinin değerlendirilmesi için anahtar bir parametredir.

Farklı sensörlerle elde edilen ölçmeler sonucu yapıların doğal frekanslarının belirlenmesi yapı sağlığının/sağlamlığının ve bütünlüğünün değerlendirilmesi açısından en önemli parametrelerden birisidir. Yapıların doğal frekanslarının ve sönümleme oranlarının belirlenmesi, proje kabullerinin kontrol ve kalibrasyonu, analitik modellerin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi ilgili mühendislik yapılarının farklı kabiliyetlere sahip sensörlerle farklı yükler altındaki davranışlarının izlenmesinin önemini ön plana çıkarmaktadır.

Yüksek yapıların rüzgâr yüküne karşı davranışlarının değerlendirilmesi ve dinamik karakterlerinin ortaya çıkarılmasında en güvenilir yöntem, tam ölçekli izleme olarak düşünülür (Li ve ark. 2002). Yapıların tam ölçekli izlenmesi ve dinamik testleri yapıların, davranışları ve performanslarının değerlendirilmesine ilişkin değerli bilgiler sağlarlar. Yapıların modal parametreleri olarak adlandırılan doğal frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm değerleri ile sistem parametreleri olarak adlandırılan rijitlik, kütle ve sönümleme matrisi, ölçülen dinamik cevaplardan elde edilebilir. Bu tanımlanmış parametreler daha sonra yapının performansını değerlendirmek için kullanılabilir ve yapının analitik modelleri bu parametreler kullanılarak değerlendirilebilir (Salawu ve Williams 1995). Buna ilave olarak, ölçmeler sonucu belirlenen parametreler yardımıyla analitik modele yapılacak yeni ilaveler yardımıyla daha gerçekçi modeller elde edilebilir.

İvme sensörü birçok mühendislik yapısının, yükler altındaki dinamik davranışlarının ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde, popülaritesini kanıtlamış ve yapı sağlıklarının izlenmesinde ve değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan

geoteknik bir ölçme aracıdır. İvme sensörü ile ivmelenme değişimleri doğrudan ölçülebilmektedir. İvme değerinden deplasman değerine geçiş ise, çift katlı entegral almayı ve entegral sabitlerinin doğru belirlenmesini gerektirmektedir. İvme sensörü ölçmelerinden, yapıda meydana gelen quasi-statik ve statik deplasmanlar, hız ve deplasmana ilişkin entegral sabitleri bilinmediği için ortaya çıkarılamaz (Li 2006, Roberts ve ark. 2000, 2004).

Yapıların hem statik hem de dinamik deplasman değerlerinin doğrudan ölçülmesinde GNSS alıcıları en etkili araçlardan birisidir. Günümüze kadar birçok yüksek mühendislik yapısı deprem ve rüzgâr yükü karşısındaki tepkimeleri GPS ile ölçülmüştür (Lovse ve ark. 1995, Hristopulos ve ark. 2007, Çelebi ve Şanlı 2002, Tamura ve ark. 2002, Brownjon ve ark. 2004, Li ve ark. 2006-a, Park ve ark. 2008, Breuer ve ark. 2008). Tamura ve ark. (2002), GPS ile 2 Hz den düşük ve 2 cm den büyük olan titreşim genliklerinin belirlenebileceği belirtilmiştir. Chan ve ark. (2006-a), GPS' in hem yatay hem de düşey yöndeki dinamik ölçme doğruluğunu değerlendiren bir simülasyon çalışması yapmıştır. Bu çalışma sonucunda, 1 Hz ve daha düşük frekanslı titreşimlerin yatayda 5 mm den düşeyde de 10 mm den düşük genlikli olmaması koşuluyla GPS ile deplasmanların güvenilir bir şekilde ölçülebileceği sonucuna ulaşmıştır.

GPS ölçüleri alıcı etrafındaki sinyal yansımasına sebep olan yansıtıcı yüzeylerden etkilendiğinden yapıların sabit rüzgâr yükünün etkisi ile oluşan quasi-statik tepkimelerinin doğru belirlenmemesine sebep olmaktadır (Li 2006). Böyle durumlarda GPS ölçülerindeki sinyal yansıma etkisinin uygun sinyal filtreleme modelleri ile giderilmesi gerektirmektedir. Sinyallerin yansıma etkisinden arındırılması ölçünün yapıldığı günü takip eden gün ve günlerde aynı ölçme zaman diliminde fazladan bir ölçme işlemini gerektirmektedir. Yansıma hatası yapıların quasi-statik deplasmanlarının belirlenmesi açısından GPS in etkinliğini düşürmektedir. Yapıların yükler altındaki daha yüksek frekanslarının izlenmesi ve tam ölçekli bir izleme ve analizin gerçekleşmesi için GPS'e ilave olarak ivme vb. sensörleri de kullanılarak bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir (Li ve ark. 2006-a, Ogaja ve ark. 2003, Brownjohn ve ark. 2004). GPS ve geoteknik sensörlerle yapı davranışlarının belirlenmesi yanında robotik total station vb. gibi jeodezik ölçme

aletlerinin dinamik hareketleri izleme performansı üzerine de araştırmalar gerçekleştirilmiştir (Gikas ve ark. 2008, 2009, Danisch ve ark. 2008, Psimoulis ve Stiros 2007, 2008).

Bu tez çalışması kapsamında, benzerlerinden farklı olarak, ivme sensörü yerine eğim sensörü ve GNSS alıcısı kullanılarak, 30 katlı betonarme binanın rüzgâr ve deprem gibi farklı dinamik yükler karşısındaki davranışları eş zamanlı olarak izlenmiştir. GPS ve eğim sensörü verileri hem zaman, hem de frekans alanında analiz edilerek binanın dinamik parametrelerinden olan doğal frekanslar belirlenmiş ve ölçmeler sonucu belirlenen frekans ile SEY' den elde edilen frekans sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylelikle, yapının farklı özelliklerdeki dinamik yüklere olan cevapları ortaya çıkarılmış ve yük-cevap ilişkisinin daha iyi anlaşılması ve proje kabullerinin bir kontrolü sağlanmıştır. Buna ilave olarak, yapının dinamik yükler karşısındaki dinamik cevaplarının ölçülmesi ve belirlenmesi açısından eğim sensörü ve GPS alıcısının performanslarının ortaya konulması, her iki sensör sisteminin güçlü ve zayıf yönlerinin karşılaştırmalı bir yaklaşımla ele alınması hedeflenmiştir. Bu amaçla, çeşitli sinyal filtreleme teknikleri uygulanmış, araştırma bulguları yorumlanmış ve anlamlı sonuçlara ulaşılmıştır.

1.1 Yapıların Tam Ölçekli İzlenmesi ve Önemi

Yapı sağlığının/sağlamlığının izlenmesi, yapısal cevapların ölçülmesi ve deprem, rüzgâr vb. gibi şiddetli yükler ve gittikçe artan çevresel bozulmalar yüzünden meydana gelen hasarların etkili bir şekilde belirlenmesi, yapı üzerinde hasarlı bölgelerin tespit edilmesi ve değerlendirilmesini amaçlar. Yapısal cevaplar, yapıya etkiyen güçler yanında yapının durumunu da yansıtırlar. Böylelikle, yapının yükler altındaki cevaplarının ölçülmesi ve analizi ile, yapı sağlığı/sağlamlığı izlemeleri ile yapının şartlarının ortaya çıkarılması beklenir. Yapı sağlığının izlemesi, mekanik, uzay ve denizcilik alanı kadar inşaat mühendisliği uygulamalarında yoğun bir çalışma alanı oluşturmuştur.

İnşaat mühendisliği açısından, yapı sağlıklarının izlenmesi, yapıların kontrol ve devamlılığı için verimli ve etkili bir araç niteliğindedir. Mühendislik yapıları büyük maliyetler sonucu ortaya çıkan ve insanlığın yaşam kalitesini kolaylaştıran ve

yükselten bir alt yapı hizmetleri olarak hizmet eder. Ancak bu yapılar, zamanla çevresel etkiler ve yüklere maruz kalıp bozuluma uğrarlar.

Yaşlanmadan kaynaklanan yapısal bozulmalara ilave olarak, yapı sağlığı izlemesi deprem, kasırga, tornado ve tayfun gibi şiddetli yükler yüzünden meydana gelen yapısal hasarların ortaya çıkarılmasında da kullanılabilir. Geleneksel detaylı değerlendirmeler ciddi anlamda pahalı ve zaman alıcı olabilir.

Yüksek binalar, gökdelenler, kuleler ve vb. yüksek yapılar, rüzgâr ve deprem gibi çevresel ve kısa zaman aralıklarında ani olarak değişen dinamik yüklere maruz kalırlar. Bu yükler altında yapılar belirli sınırlar içinde kalmak koşulu ile cevap verirler.

Bu dinamik cevapların ölçülmesi ve yükler altındaki dinamik davranışların belirlenmesi ve analizi ile,

1) Yapıların tasarım aşamasındaki kabullerinin ne kadar doğru ve gerçekçi alındığının kontrolünü sağlar.

2) Yeni tasarım projelerinin ve kabullerinin ne derece sağlıklı olduğu test edilebilir.

3) Tam ölçekli izleme sonucu elde edilen bulgular ile Sonlu Elemanlar modeli güncellenerek daha gerçekçi modeller elde edilebilir.

4) Farklı yapı ve karakterdeki dinamik yükler altındaki yapının verdiği cevaplar ile yapının yük –cevap ilişkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlar.

5) Çok kuvvetli bir fırtına veya deprem gibi hasar verici olaylar yaşandıktan sonra yapının sağlık durumunun değerlendirilmesini ve gerekli önlemlerin alınmasına ışık tutar.

6) Uzun dönemli yapısal bozulma ve kötüleşmelerin izlenmesi ve değerlendirilmesini sağlar.

1.2 Çalışmanın Ana Hedefleri ve Bilime Katkısı

Bu çalışmada, benzerlerinden farklı olarak, dinamik cevapların ölçülmesinde, GPS alıcısı yanında ivme sensörü yerine eğim sensörü kullanılmıştır. Bu çalışma ile; yüksek betonarme bir mühendislik yapısının, GPS ve Eğim sensörü ile farklı rüzgâr ve sismik yük altındaki dinamik davranışlarının izlenmesi, yapı doğal frekanslarının ölçüler yardımıyla belirlenmesi, belirlenen frekansların teorik frekanslarla uyumunun ve kullanılan sensörlerin dinamik cevapları yakalayabilme kabiliyetlerinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışma ile disiplinler arası bilgi alış verişinin önemi vurgulanmıştır.

GPS ve eğim sensörünün rüzgâr ve deprem ya da maden ocaklarındaki patlamalar sonucu oluşan yer sarsıntısı gibi dinamik yüklere olan cevabı ölçülmüş, ölçüler zaman ve frekans alanında analiz edilmiştir. Böylelikle,

a) Binanın dinamik parametrelerinden olan doğal frekansları her iki sensör ile belirlenmiş ve teorik modelle uyumu karşılaştırılmıştır.

b) Her iki sensörün zaman ve frekans alanındaki dinamik hareketleri yakalama performansları, sinyal işleme ve filtreleme teknikleri kullanılarak, karşılaştırılmalı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

c) Her iki sensörün kendine ait gürültüleri, sensörlerin güçlü ve zayıf yönleri karşılaştırılmalı bir yaklaşımla ele alınmış ve sensör entegrasyonunun önemi araştırılmıştır.

d) Farklı rüzgâr yükleri altındaki binanın dinamik davranışları incelenmiştir.

e) Binanın rüzgâr ve yer sarsıntısına olan dinamik cevapları ortaya çıkarılmış ve farklı yapıdaki yüklerin yapıya olan etkileri karşılaştırılmalı olarak belirlenmiştir.

f) Yapının deprem öncesi ve sonrası frekansları karşılaştırılmış ve yapı sağlığının global bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

g) Uydu sistemli jeodezik deplasman ölçmelerinin, yapı sağlıklarının ve durumlarının izlenmesi ve dinamik parametrelerinin belirlenmesi açısından katkıları ve diğer çalışma disiplinlerine anlamlı katkısı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın bilime katkısı aşağıdaki gibi sıralanabilir;

a) GPS ve eğim sensörünün dinamik cevapları yakalama performansı açısından avantaj ve dezavantajları ortaya çıkartılmıştır.

b) Her iki sensörün yapının hangi dinamik parametreleri doğrudan ve güvenilir bir şekilde belirleyebildiği değerlendirilmiştir. Dinamik parametrelerin belirlenmesinde sinyal işleme ve filtrelemenin önemi vurgulanmıştır.

c) Yapının farklı dinamik yükler altındaki dinamik cevaplarının ölçülmesi ve analizi ile davranış karakterlerinin ortaya çıkarılması sağlanmış ve gelecek projelere ve tasarım parametrelerine bir bilgi bankası alt yapısı oluşturulmuştur.

d) Koordinat dönüşümü ile yapının ana yönlerinin deneme-yanılma ile bulunması ve yönlere ait frekansların ayrıştırılmasının olanaklı olduğu gösterilmiştir.

1.3 Tezin Genel Yapısı

Tez toplam 7 farklı bölümden oluşmaktadır. Bölümlerde ele alınan konulara ilişkin kısa ve öz bilgiler aşağıda sıralanmıştır.

İlk bölümde, yüksek yapıların izlenilme gereksinimi ve önemi, yapılan çalışmanın amacı, hedefi ve bilime katkısı ile tezin genel yapısı hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, bu tez çalışması ile ilgili literatürde geçmişten günümüze kadar gerçekleştirilmiş ve seçkin dergilerde yayınlanmış bazı çalışmalara genel bir bakış yapılmış ve çalışmalar yıllara göre kısaca özetlenmiştir.

Üçüncü bölümde, deformasyonların sınıflandırılması, modelleri ve sistem teorisi hakkında temel bilgiler yanı sıra, zaman serileri ile ilgili temel istatistiksel kavramlar, frekans alanındaki analizler ve temel filtreler hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, yüksek yapılara etkiyen genel yükler ve özellikle deprem ve rüzgâr gibi dinamik yükler hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde, bu tez kapsamında kullanılan yüksek bina ile ilgili özellikler, yapının Sonlu Elemanlar modeli ve yapı üzerine tesis edilen sensör sistemlerinden ve teknik özelliklerinden bahsedilmiştir.

Altıncı bölümde, 4 tanesi rüzgâr, 1 tanesi sismik yük olmak üzere toplamda 5 farklı dinamik yük deney seti incelenmiş ve bir dizi zaman ve frekans analizi ile filtreler kullanılarak sonuçlar, yapı-yük ilişkisi ile sensör performanslarının karşılaştırmalı bir değerlendirmesi açısından yorumlanmıştır.

Yedinci bölümde, altıncı bölümde elde edilen analiz sonuçlarından yararlanarak ulaşılan bulgular özetleyici bir dille değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2 LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALARA GENEL BİR BAKIŞ

Yapı sağlığının tam ölçekli olarak izlenmesi ve değerlendirilmesi üzerine bir çok araştırma köprü, viyadük, kule, gökdelen ve yüksek binalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Literatürde birbirinden farklı amaçlar için gerçekleştirilmiş çalışmalarla karşılaşılabilir. Yapı sağlıklarının izlenmesi ve dinamik parametrelerinin belirlenmesinde ivme sensörü en yaygın ve etkili olarak kullanılan bir sistemdir. İvme sensörü ile literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. GNSS teknolojisinin nokta konumlarını anlık olarak hassas bir şekilde belirleyebilmesi, GPS alıcılarının veri toplama frekansının artması ve mühendislik yapılarının alçak ve yüksek frekanslı dinamik titreşimlerini doğrudan ölçebilmesi yapıların dinamik yükler altındaki davranışlarının izlenmesine ve analizine yeni bir boyut getirmiştir.

Aşağıda yüksek binaların izlenmesine yönelik sistemler, ölçmeler ve analizlerine ilişkin sonuçlar ve sensörlerin değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar yıllara göre sıralamıştır.

Kwok ve ark. (1990), yaptıkları çalışmalarında Sydney Merkez İş bölgesinde bulunan 13 adet yüksek binanın titreşim doğal frekanslarını ve sönümleme oranlarını belirlemek amacı ile dinamik davranışlarını tam ölçekli izleme projesi ile gerçekleştirmişlerdir. Tüm binaların dinamik davranışları hafif rüzgâr yükü altında yalnızca ivme sensörü kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçülen ve modelden kestirilen veriler karşılaştırılmıştır. Binaların temel doğal frekansları 0.25 ile 0.5 Hz arasında bulunmuştur. Belirlenen doğal frekanslar ile kestirilen frekanslar arasında belirgin fark tespit edilmiş ve bununda binaların rijitliklerinin doğru tahmin edilemediği yorumu yapılmıştır. Fakat, binaların kritik sönüm oranları, %0.5 ile %2 aralığında, AS 1170.2-1989 kriterleri ile hesaplanan değerler ile uyumlu olduğu ortaya konulmuştur.

Lovse ve ark. (1995) GPS teknolojisinin yüksek yapıların dinamik deformasyonlarının izlenmesinde öncülük eden çalışmalardan birini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında, Calgary de bulunan Calgary Kulesinin rüzgâr yükü altındaki titreşim frekansları ve genlikleri 15 dk uzunluğundaki veri setinin analiziyle

belirlenmiştir. Analizler sonrasında, kulenin her iki ana yönde titreşim frekansı yaklaşık 0.30 Hz olarak, genlikleri ise kuzey-güney yönünde 15 mm, doğu-batı yönünde 5 mm olarak tespit edilmiştir. Kuzey güney yönlü verinin belirli bir kısmının detaylı analizi sonucunda, temel frekans 0.36 Hz ve genliği 16 mm olarak elde edilmiştir.

Çelebi (2000), Uzun-periyotlu titreşime sahip yapıların dinamik davranışlarının izlenmesinde GPS in etkinliğini araştıran bir simülasyon çalışması ve 44 katlı bir yapının deprem altındaki davranışını ivme sensörü izleyip analiz etmiştir. Simülasyon çalışmasında, 30-40 katlı bir binayı temsil eden aynı uzunluk ve farklı kalınlıklı iki demir çubuğun temel doğal frekanslarını ve sönümleme oranlarını GPS alıcısı kullanarak ölçmüş ve belirlemiştir. 44 katlı binanın rüzgâr yükü altındaki dinamik davranışını GPS alıcısı ile izlemiş ve temel frekansı 0.23 Hz olarak tespit etmiştir. Aynı binanın, düşük şiddetli bir deprem yükü cevabı daha önceden ivme sensörü ile belirlenmiş ve temel frekansı 0.23 Hz olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak farklı zamanlarda ve yükler altındaki binanın dinamik cevapları ayrı ayrı sensörlerle ölçülmüş ve sonuçlar tutarlıklık göstermiştir. Çelebi bu çalışması ile GPS' in uzun periyotlu dinamik davranışların izlenmesinde ve yüksek bina ve uzun asma köprülerin dinamik davranışlarının ölçülmesinde etkili bir araç olduğunu belirtmiştir.

Li ve ark. (2000) çalışmalarında, 370 m yüksekliğinde olan, Hong-Kong'un en yüksek ikinci binasının iki farklı tayfun olayındaki rüzgâr yükü cevaplarının ölçülmesi ve analizini gerçekleştirmiştir. Ölçmelerde ivme sensörü kullanılmış ve binanın doğal frekansları ile sönüm değerleri ölçmelere dayalı olarak elde edilmiştir. Binanın rüzgâr tüneli testi de model üzerinden gerçekleştirilmiş ve tam ölçekli ölçme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Genlik bağımlı sönüm ve frekanslar Rasgele Azalma Tekniği (Random Decrement Technique) ile incelenmiştir.

Tamura ve ark (2002), Gerçek Zamanlı Kinematik (GZK) GPS kullanarak binaların rüzgâr cevaplarının ölçülmesine ilişkin bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, GZK-GPS' in doğruluğunun belirlenmesi amacı ile referans ve gezici hareketsiz ortamda 10 dakikalık bir ölçmenin sonuçları irdelenmiş ve daha sonra gezici hareketi kontrol edilebilen ve sinüzoidal hareket üreten bir mekanizma

üzerinde test edilmiştir. Yapılan test sonuçlarında, statik test sonrası GZK-GPS zaman serisinin ortalama etrafında 5mm lik bir standart sapma ile salındığı tespit edilmiştir. Sallanan platform deneyi sonrası ise, genliği 2 cm üzerinde ve frekansı 2 Hz in altında olan hareketlerin gerçek hareketlere çok yakın olarak GZK-GPS ile belirlendiğini tespit etmiştir. Bu çalışmada bir başka deney ise, rüzgâr yönünde, rüzgâr yönüne dik ve burulma titreşimi yapabilen 1.6 m yüksekliğindeki bir elastik model üzerinde hem GZK-GPS hem de ivme sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda GPS ve ivme sensörünün bir birine benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, Japonya da 108 m uzunluğundaki bir kulenin rüzgâr yükü altındaki davranışları GZK-GPS ile ölçülmüş ve yapının ilk temel frekansı ve sönümlemesi hem GZK-GPS hem de ivme sensörü ile belirlenmiştir.

Çelebi ve Şanli (2002), Çelebi (2000)' de yapılan çalışmanın devamı niteliğinde gerçekleştirilmiş bir çalışma olup, 34 katlı San Francisco binasının rüzgâr altındaki dinamik cevabını hem GPS hem de ivmeölçer kullanarak eş zamanlı ölçmüş ve analiz etmiştir. Analiz sonucunda her iki sensör ile temel doğal frekans uyumlu bir şekilde 0.24-0.25 Hz aralığında belirlenmiştir. Çalışma ile, GPS in yüksek binaların rüzgâr yükü altındaki dinamik davranışları belirleme kabiliyeti bir kez daha ortaya konulmuştur.

Breuer ve ark. (2002), 155 m yüksekliğindeki Stuttgart TV kulesi ve 245 m yükseklikteki Opole güç istasyonunun endüstriyel bacasının düşük rüzgâr yükü altındaki davranışlarını GPS kullanarak izlemiş ve sonuçları vermiştir. TV kulesi 7 m/sn lik rüzgâr yükü altında, rüzgâr esme yönü boyunca 2.5 cm, rüzgâr yönüne dik doğrultuda ise 4 cm lik deplasmanlar göstermiştir. Bacanın 7 ile 10 m/sn rüzgâr hızı altındaki tepkisinin eliptik bir hareket olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmalara ilave olarak, GPS in performansını test etmek amaçlı bir merkez etrafında belirli bir açısal hızla dönen çubuk üzerinde bir simülasyon çalışması da gerçekleştirmiştir. Simülasyon çalışmasında, referans GPS, hareketli platform üzerindeki gezici GPS den 10, 100, 250, 1000, 5000 ve 10000 m uzaklıklarda ölçmeler yapılarak geçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, GPS in gerçek değerden olan farkların standart sapmaları 2 ile 6 mm arasında tespit edilmiştir.

Li ve ark. (2006-a), Japonya'da bulunan 108 m uzunluğundaki bir kulenin deprem ve rüzgâr yükü altındaki davranışlarını GPS ve ivme sensörü kullanarak ölçmüş ve analiz etmiştir. Çalışmasında ayrıca, sinyal filtreleme tekniklerini kullanarak her iki sensörün hem deprem hem de rüzgâr yükü altındaki yüksek yapıların davranışlarını izleme kabiliyetlerini karşılaştırmıştır. GPS verilerini ivme değerine ve ivme değerinden deplasman değerine geçiş yaparak her iki sensörün statik, quasi-statik ve dinamik açıdan bir karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, ivme sensörünün dinamik bileşen haricindeki diğer bileşenleri yakalayamadığı, GPS inde daha yüksek dereceden dinamik bileşenleri belirleyemediği sonucuna ulaşmıştır. Her iki sensör sisteminin entegrasyonun tam ölçekli izlemede tüm bileşenleri yakalama açısından önemli olduğunu vurgulamıştır. Dinamik bileşenleri yakalama açısından her iki sensöründe birbiri ile uyumlu sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Li (2006), yaptığı tez çalışmasında yukarıdaki çalışmaların yanı sıra, Sydney de bulunan bir yüksek bina ile Hong-Kong daki Tsing Ma'da bulunan bir uzun asma köprünün rüzgâr yükü altındaki davranışlarını izlemiş ve analiz etmiştir. Çalışmasında, GPS ve İvme sensörünün sonuçlarının birbirine dönüştürmek ve sinyal işleme tekniklerini kullanmak suretiyle gerçekleştirmiştir. Her iki sensörün, yapılan deneyler sonrasında uyumlu ve benzer sonuçlar verdiği ve ayrıca sensör entegrasyonunun önemi üzerinde durmuştur. Ayrıca çalışmasında, GPS in çok yolluluk etkisinin giderilmesine yönelik bir araştırmada gerçekleştirmiştir.

Kijewski-Correa ve ark. (2006), GPS'in yüksek binaların dinamik cevaplarının izlenmesinde tam ölçekli tahsisi ve deneysel performansını değerlendirmesi üzerine bir simülasyon çalışma gerçekleştirmiştir. Simülasyon çalışmasında, statik olan bir platformda 10 dakikalık bir ölçü gerçekleştirmiş ve GPS in kendine has olan gürültü seviyesini belirlemiştir. Epok koordinatlarının %99 luk kısımı $\pm 3\sigma$ arasında kalmıştır. Buna ilave olarak, sinüzoidal hareket yapabilen bir mekanizmada ±0.5 cm den ±3 cm ye kadar genlik ve 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 1 ve 2 Hz frekansına sahip hareketler üretilip, GPS ile ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, sinyal-gürültü oranı % 200 ün üzerinde olması durumunda, kabaca titreşim genliği 1 cm üzerinde, GPS deplasman KOH değeri gerçek deplasman KOH değeri ile %10 luk

bir fark içerisinde uyum göstermiştir. Simülasyon çalışmalarına ilave olarak, Şikago da bulunan yüksek bir binanın rüzgâr yükü altındaki dinamik cevabı GPS ve ivmeölçer ile ölçülüp analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, her iki sensörün dinamik bileşenleri yakalama açısından benzer sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

Nickitopoulou ve ark. (2006), GPS in büyük ve esnek yapıların dinamik ve quasi-statik deformasyonlarının izlenmesindeki doğruluğunu ve performansını değerlendirebilmek amacı ile kapsamlı bir simülasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Simülasyon çalışmasında, belirli bir hızda yatay düzlemde dönebilen ve üzerine merkezden R=20, 30, 40 ve 50 cm uzaklıkta alet kurulabilen bir çubuk tasarlamışlardır. Deney çalışmasında, 3-19 sn periyotları arasında 11 farklı periyot ve 4 farklı yarıçap üzerinde toplam 44 adet 1 dk ile birkaç saate kadar değişen uzunluklarda Kinematik yöntemle veri toplanmıştır. Olması gereken koordinatlar ile GPS ile belirlenen koordinatlar arasındaki farklar incelenmiş ve 15 mm den büyük olan deplasmanların GPS ile kolaylıkla izlenebileceği sonucuna varılmıştır. Çalışmasında ayrıca, yüksek binalar ve köprülerin izlenmesine yönelik çalışmalardan da bahsetmiştir.

Chan ve ark. (2006-a), GPS in yatay ve düşeydeki dinamik ölçme doğruluğunu test eden simülasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir. Simülasyon çalışmasında, yüksek yapıların yatay hareketlerine benzer yatay titreşim ve uzun asma köprülerin düşey hareketine benzer düşey titreşim üretebilen motorlu ve bilgisayar tarafından titreşim genliği ile frekansı kontrol edilebilen bir sallanan masa düzeneği tasarlamışlardır. İlk olarak gezicinin de sabit olduğu 9 saatlik bir veri seti toplanıp GPS in kendine has gürültü seviyesi belirlenmesine yönelik bir analiz yapılmıştır. Daha sonra, bu sallanan masa ile 1 boyutlu ve 2 boyutlu yatay hareket ile 1 boyutlu düşey hareketler üretilip GPS ölçmeleri sonucu elde edilen koordinat değerleri ile gerçek değerler arasındaki farklar incelenerek GPS in dinamik performansı değerlendirilmiştir. En son olarak, 69 katlı ve 384m uzunluğunda Hong Kong'da bulunan Di Wang Kulesinin rüzgâr yükü altındaki yatay titreşimine ait bir grup rüzgâr ve yapının titreşim datası simülasyon masasında üretilip sonuçlar karşılaştırılmış. Buna ilave olarak, benzer şekilde 1377 m uzunluğundaki Tsing Ma Köprüsünün 1997 Victor Tayfunundaki salınımlarına ait bir kısım rüzgâr ve salınım datası simülasyon

masasında üretilip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Genel sonuç olarak, simülasyon deneyleri sonrası yatayda genliğin 5 mm den fazla, düşeyde ise 10 mm den fazla ve 1Hz frekansının altındaki hareketlerin çok rahatlıkla GPS ile yakalanabildiği ortaya konulmuştur. Deney sonucunda, yüksek binaların rüzgâr yükü altındaki cevapları ile asma köprülerin düşey hareketlerinin GPS ile tatmin edici bir boyutla izlenebileceği yargısına varılmıştır.

Chan ve ark (2006-b), yapısal deformasyonların izlenmesi için GPS ve ivme sensörü verilerinin entegrasyonu tekniği üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada hedeflenen, statik ve dinamik cevapların birlikte elde edilmesinde GPS ve ivme sensörünün entegrasyonu ile elde edilmesidir. İki sensör verisinin entegrasyonunda Deneysel Mod Ayrışımı ve Uyarlamalı Filtre kullanılmıştır. GPS ve ivme sensörü kullanılarak simülasyon masasında önceden bilinen statik bir değer etrafında üretilen beyaz gürültülü, üst üste bindirilmiş sinüzoidal dalga ve rüzgâr tepkisine ait dinamik hareketler ölçülüp yukarıda bahsedilen iki modellerle değerlendirilmiştir. Her iki sensör ile gerçekleştirilen ölçmelerin değerlendirmesi ile elde edilen statik ve dinamik bileşenler, gerçek değerleri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon deneyleri sonucunda, GPS'in sinyal yansıma etkisi hatasından dolayı bozuluma uğradığı ve yüksek frekansları belirleyemediği, ivmeölçerinde ortalama deplasmanları ve düşük frekanslı dinamik deplasmanları belirleyemediği tespit edilmiştir. Fakat önerilen yöntemlerle entegrasyonun mümkün ve anlamlı derecede bir yapının toplam deplasmanının ölçme doğruluğunu iyileştirildiği ve arttırılabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Dai ve ark. (2006), yüksek binaların izlenmesinde GPS ölçmeleri üzerine troposferik etkinin hem teorik hem de pratik olarak incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Uygulamada referans alıcı 7 katlı bir bina üzerine, gezici alıcı ise referans alıcıdan 2 km uzaklıkta, 225 m yüksekliğindeki bir yüksek yapı üzerinde ölçmeler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, referans ve gezici alıcılar arasındaki yükseklik farkının 100m ve üzeri olması durumunda troposferik etkinin ve modellerin ölçme sonuçları üzerine anlamlı bir etkisinin olduğu ortaya konulmuştur. Bu etkinin azaltılması ve yüksek doğruluğun elde edilebilmesi için etkinin dikkatli modellenmesinin gerçekleştirilmesi gereği vurgulanmıştır.

Kijewski-Correa ve Pirnia (2007), çalışmalarında Boston, Şikago ve Seul de gerçekleştirdikleri yüksek binaların dinamik davranışlarının izlenmesi projelerine ait sonuçları vermiştir. Rüzgâr altındaki binanın dinamik davranışlarına ait sonuçlar incelenmiştir. Dinamik davranışların izlenmesinde bazı yüksek binalarda sadece ivme sensörü kullanılmış ve bazılarına GPS noktaları eklenmiştir. Fakat bu çalışmada, sadece ivme sensörüne dayalı ölçme ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Çalışma ile yapıların doğal frekansları ve sönümleme oranları incelenmiş ve model ile ölçmelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, inşaat mühendisliği perspektifinden değerlendirilmiştir.

Li ve ark. (2007), Yüksek bir binanın rüzgâr yükü altındaki cevabını GPS kullanarak izlemiş ve analiz etmiştir. Analiz sonucunda belirlenen dinamik parametrelerin sonuçlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile hesaplanan modelle uyuşum içinde olduğu görülmüştür. Buna ilave olarak, atmosferik rüzgârın hız bileşeni ve binanın çatısı üzerindeki basınç değişimi arasındaki ilişkiyi, dalgacık analiz yöntemlerini kullanarak ve istatistiksel anlamlılık seviyesini Monte Carlo simülasyon yöntemine dayalı olarak analiz etmiştir.

Hristopulos ve ark. (2007), Singapur 'da bulunan 280 m yüksekliğindeki bir yüksek binanın rüzgâr yükü altındaki davranışlarını GPS ve eğim sensörü ile izlemiştir. Çalışmalarında, GPS zaman serinin gürültülerden ayrıştırılarak binanın temel frekanslarının belirlenmesi üzerine bir araştırma geçekleştirmişlerdir. GPS zaman serisinin yapının sinyali dışındaki gürültülerden temizlenmesinde, birinci olarak ani olan sıçramaların, kesintilerin ve sapmaların filtrelenmesi, ikinci olarak düşük frekanslı gürültülerin filtrelenmesi, üçüncü olarak kalıntıların variogram analizi ve son olarak da spektral analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, filtrelenmiş GPS zaman serisinden yapının ilk temel frekansı 0.19 Hz olarak tespit edilmiş ve bu sonucunda ivme sensörü ile bulunan ile aynı olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, filtrelenmiş GPS zaman serisinin binanın dinamik parametrelerinden olan ilk doğal frekansı rahatlıkla belirleyebileceği gösterilmiştir.

Kijewski-Correa ve Kochly (2007), GPS in yüksek binaların rüzgâr yükü altındaki cevabının izlenmesinde, GPS in performansını ve çok yolluluk sorununun etkileri ve giderilmesi üzerine bir araştırma yapmıştır. GPS in dinamik performansını

sallanan masa deneyi gerçekleştirerek ivme sensörü ile eş zamanlı olarak yaptığı ölçmeler sonucu değerlendirmiştir. Yaptıkları deneyler ve analiz sonucunda dinamik hareketleri yakalama açısından her iki sensöründe birbiri ile uyumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. GPS in uzun periyotlu dinamik hareketleri yakalama açısından çok yolluluk hatasının bir sorun olduğunu ve bu sorunun giderilmesi gereğinden bahsetmiştir. Çok yolluluk hatasının giderilmesinde FFT, Dalgacık analizi ve filtreleme teknikleri kullanmış ve sonuçları rüzgâr tünelinden elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır. Tam ölçekli elde edilen sonuçların modelle elde edilen sonuçlardan genelde daha küçük değerler gösterdiği ve bununda çok yolluluk hatasının yok edilmesinde kullanılan filtreleme sonrasında bazı sinyallerinde ortadan kaldırılmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Mendis ve ark. (2007) yüksek binalar üzerindeki rüzgâr yükü etkilerini detaylıca ele alan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında çoğu orta yükseklikli yapılara etkiyen rüzgâr yükünün quasi-statik bir yaklaşımla ele alındığı ve bu yaklaşımda kullanılan analitik modellerin yüksek yapıların rüzgâr tasarımı için yeterli doğrulukta bir sonuç veremeyeceğinden dolayı rüzgâr tüneli testinin öneminden ve detaylarından bahsetmiştir. Ayrıca çalışmalarında, rüzgâr etkisini azaltan sönümleme sistemlerinden ve akışkanlar dinamiği yönteminden bahsetmiştir.

Breuer ve ark. (2008), 155 m yüksekliğindeki Stuttgart TV kulesinin rüzgâr yükü cevabını GPS ile ölçerek analiz etmiş ve sonuç olarak ilk temel frekansı 0.191 Hz olarak belirlemiş ve binanın daha önceden Lenk tarafından 1959 da belirlenen değeri ile aynı olduğunu tespit etmiştir. Böylelikle kulenin 50 yıllık bir hizmet hayatı sonrası herhangi bir yapısal deformasyona uğramadığı sonucu çıkarılmıştır. Çalışmasında ayrıca, günlük ve mevsimsel sıcaklık değişiminden kaynaklanan binanın uzun periyotlu hareketi GPS ölçmeleri ile belirlenmiştir. Ölçmeler farklı mevsimlerde ve farklı hava şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Park ve ark. (2008) 66 katlı yüksek bir binanın GPS kullanarak rüzgâr yükü altındaki yatay deplasman, burulma ve ivmelenme cevaplarını izlemeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bahsedilen cevapları 3 GPS alıcısı ve 2 ivme sensörü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda, binanın rüzgâr yükü altındaki davranışının RMS ivmelenme ve maksimum ivmelenme değerlerinin tatmin edici

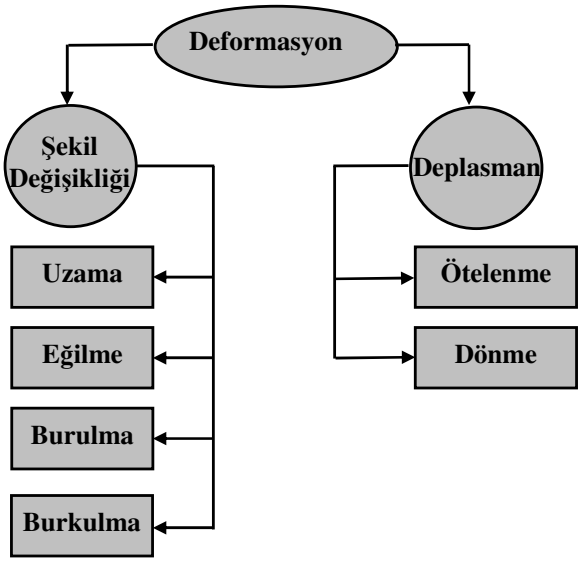
olduğunu ispatlamışlardır. Çalışmalarında ayrıca, sabit bir nokta kullanarak GPS alıcılarının doğruluğunu test etmişlerdir. Ayrıca, bir model üzerinde GPS alıcısı, bir lazer deplasman ölçer ve ivme ölçer kullanarak bir ölçme gerçekleştirmiştir. GPS ölçmelerinden elde edilen deplasman ve ivmelenme değerlerini, lazer ölçer ile elde edilen gerçek deplasman ve ivmelenme ile karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, GPS ile ölçülen deplasman ve ivme değerlerinin lazer ölçer ve ivme ölçer ile belirlenen değerlere, titreşim genliğinin 1 cm üzerinde olması durumunda benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Casciati ve Fuggini (2009) GPS in yüksek ve esnek yapıları izleme performansını değerlendirme amacı ile tasarladıkları bir simülasyon platformu üzerinde bir dizi denemeler ve analizler gerçekleştirmişlerdir. Özellikle frekansı 2 Hz in altında ve deplasmanlar cm seviyesinde olan esnek yapıların izlenmesinde ve dinamik parametrelerini elde etmede GPS in katkısının yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

3 DEFORMASYON MODELLERİ, SİSTEM TEORİSİ, ZAMAN VE FREKANS ANALİZLERİ VE SAYISAL FİLTRELER

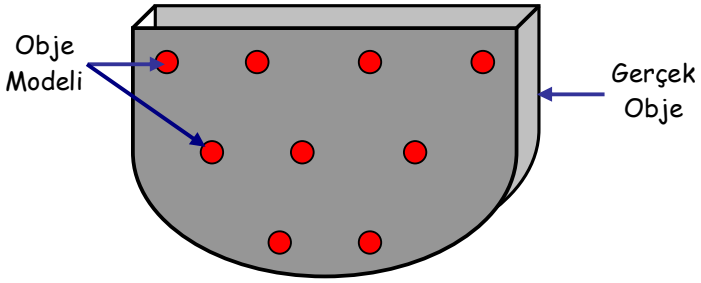
3.1 Deformasyon Modellerinin Sınıflandırılması

Yeryüzü üzerinde bulunan yapay ve doğal kütleler zamanın ve fiziksel etkilerin bir fonksiyonu olarak denge konumunda bulunma eğilimindedir. Bu denge konumu, yer çekimi, objenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, objeye etkiyen statik (sabit) ve dinamik (değişken) kuvvetler ile zamanın fonksiyonu olarak değişkenlik göstermektedir. Bu etkiyen kuvvetler, objenin şeklinde, konumunda ve eksenlerinde bir değişikliğe sebep olursa deformasyon olarak adlandırılır. Jeodezik anlamda deformasyon, deplasman ve şekil değişikliği olarak ikiye ayrılır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Deformasyonun jeodezik sınıflandırılması

Bir objedeki deformasyonların jeodezik olarak belirlenebilmesi, objeyi en iyi şekilde temsil edecek olan noktalar kümesiyle doğrudan ilişkilidir. Obje üzerinde seçilecek noktalar, objeyi karakterize etmeli ve objenin deformasyonlarını temsil etmelidir. Bu *objenin geometrik modellenmesi* anlamına gelmektedir (Welsch ve Heuncke 2001) (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Objenin geometrik tanımlanması

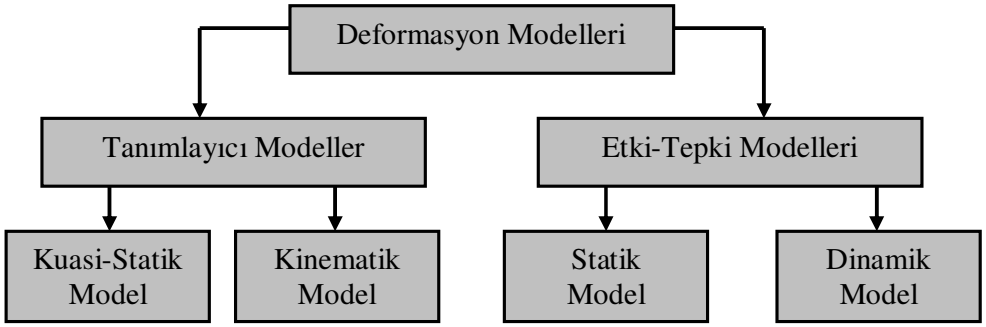
Obje hareketlerinin zamana ait davranışlarının uygun bir şekilde izlenebilmesi için, geometrik modellemeden başka deformasyon sürecinin modellemesi bu karakteristik noktaların belli zaman aralıklarında gözlemlenmesi gerekmektedir. Bunun anlamı yalnızca deformasyonun *zamana ait* yönünün modellemesidir (Tablo 3.1) (Welsch ve Heuncke 2001).

Tablo 3.1 Zaman ve uzayda deformasyon sürecinin jeodezik modeli

	Gerçek Obje	**Obje Modeli**
Geometri Alanı	Obje Süreklidir	Obje karakteristik noktalar ile tanımlanır
Zaman Alanı	Obje Sürekli olarak hareketlidir	Obje belli zaman aralıklarında izlenir

Yakın geçmişte, sistem teorisine dayalı olarak jeodezik deformasyon analizlerinin sınıflandırılması ve tanımlanması için A. Pfeuffer, O. Heunecke ve W. Welsch tarafından büyük çaba harcanmıştır (Heunecke 1995, Welsch 1996, Pfeuffer 1994). Welsch ve Heunecke (2001) sistem teorisinde iyi bilinen sistem hiyerarşisi ve jeodezik deformasyon modelleri arasındaki benzerliği göstermiştir.

Bu sınıflandırma da, deformasyon modelleri *tanımlayıcı modeller* ve *etki-tepki modelleri* olarak iki ana gruba ayrılmıştır. Tanımlayıcı modeller kendi içinde quasi-statik ve kinematik olarak, etki-tepki modelleri kendi içinde statik ve dinamik olarak iki alt gruba ayrılmaktadır (Şekil 3.3) (Welsch ve Heunecke 2001).



Şekil 3.3 Jeodezik deformasyon analizinde modellerin hiyerarşisi

Ayrıca deformasyon modellerinin sınıflandırılmasında, zamanın, objeye etkiyen güçlerin ve objenin deformasyon ölçmeleri sırasındaki kabul edilen durumları Tablo 3.2 de özetlendiği şekilde ele alınır (Welsch ve Heuncke 2001).

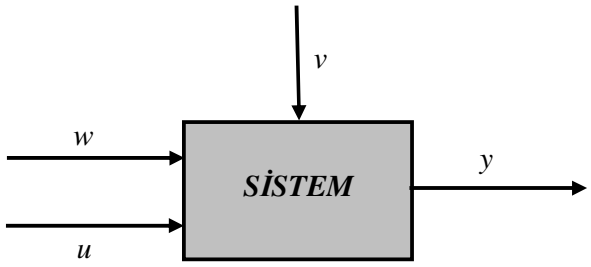
Tablo 3.2 Deformasyon modellerinin karakterizasyonu ve sınıflandırılması

Deformasyon Modeli	**Benzerlik Modeli**	**Kinematik Model**	**Statik Model**	**Dinamik Model**
Zaman	Modellenmez	Zamanın bir fonksiyonu olarak hareket	Modellenmez	Zamanın ve yüklerin bir fonksiyonu olarak hareket
Etkiyen Güçler	Modellenmez	Modellenmez	Yüklerin bir fonksiyonu olarak deplasman	Zamanın ve yüklerin bir hareketi olarak hareket
Objenin Durumu	Dengede	Sürekli olarak hareketli	Yükler altında yeterince dengede	Sürekli olarak hareketli

3.2 Sistem Teorisi ve Sistem Tanımlama

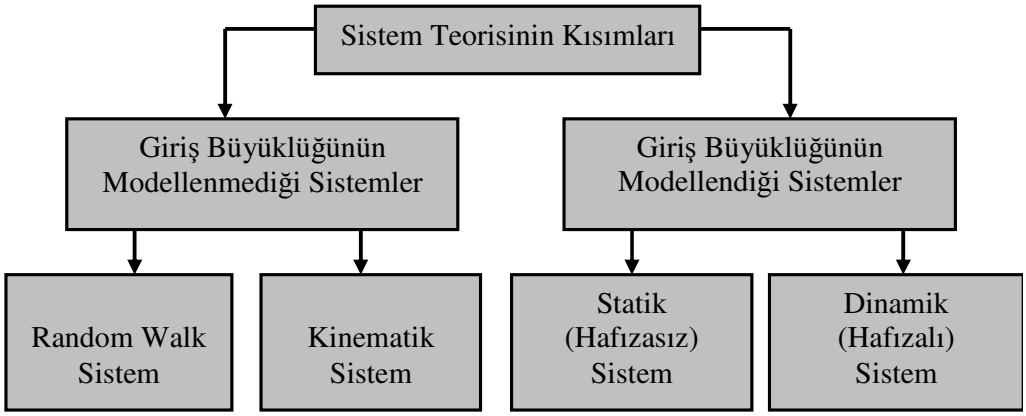
Sinyaller, fiziksel bir durum hakkında bilgi taşıyan, bir veya birden fazla değişkene bağlı fonksiyonlardır. Sistemler ise, istenen niteliklerde sinyal üretmek veya verilen giriş sinyallerine göre belirli çıkışlar üreten düzeneklerdir. Sistem, bir birleriyle etkileşim halinde olan farklı tip değişkenleri içeren ve gözlemlenebilir sinyaller üreten bir nesnedir. Bizim ilgilendiğimiz bu gözlemlenebilir sinyaller genellikle *çıktı (output)* olarak adlandırılır. Bu sistem ayrıca dış sinyaller tarafından etkilenir. Sözü edilen dış sinyaller *giriş (input)* olarak adlandırılır. Diğerleri *bozucu (distrubance)* olarak adlandırılır ve doğrudan ölçülen ve yalnızca çıktı üzerine etkileri gözlemlenebilen olarak ikiye ayrılabilir (Şekil 3.4). Girişler ve ölçülen

bozucu etkiler arasındaki ayrım modelleme süreci için genellikle daha az öneme sahiptir (Ljung 1999).



Şekil 3.4 Girişi u , çıkışı y , ölçülen bozucu etkisi w ve ölçülmeyen bozucu etkili v bir sistem

Sistem teorisinin amacı gerçekte mevcut olan sistemlerin davranışları hakkında nicelikli bilgiler verecek modeller oluşturarak sistemi tanımlamak ve analiz etmektir.



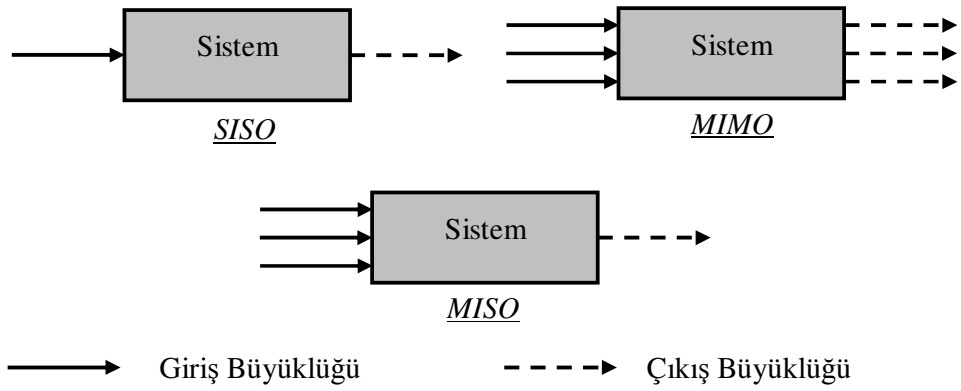
Şekil 3.5 Sistem teorisinin kısımları

Sistem teorisi anlamında enerji depolayan ve zamanla depoladığı enerjiyi veren sistemler *Dinamik Sistemler* olarak tanımlanır. Dinamik sistemler aynı zamanda *hafızalı sistemler* olarak da adlandırılır. Eğer bir sistem gecikmesiz olarak bir denge konumuna ulaşıyorsa, sistemin çıkış büyüklüğü aynı zaman noktasındaki giriş büyüklüğüne bağlıdır. Böyle sistemler *Statik Sistemler* yada *hafızasız sistemler* olarak adlandırılır. Sisteme etkiyen giriş büyüklüklerinin dikkate alınmadığı sistemin tepkimesinin yalnızca zamanın fonksiyonu olarak tanımlandığı sistemler *Kinematik*

Sistemler olarak ifade edilir. Büyüklükleri bir hareket yasası oluşturmayan sistemler *Random Walk Sistemler* olarak tanımlanır (Şekil 3.5).

Sistemin matematiksel modelinin belirlenmesi ve ölçülen sinyaller yardımıyla zamansal davranışının belirlenmesi sistem analizi olarak adlandırılır. Matematiksel model sistem analizinde giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki transfer fonksiyonlarıyla ifade edilir.

Dinamik sistemler, giriş ve çıkış sinyallerinin sayısına göre, üç farklı şekilde sınıflandırılır (Şekil 3.6). Sisteme bir giriş sinyali etkiyor ve tepkime olarak da bir çıkış sinyali elde ediliyorsa, bu sistem *SISO (Single Input Single Output)* olarak adlandırılır. Sisteme giriş büyüklüğü olarak birden fazla sinyal etkiyor ve sistem cevap olarak bir çıkış sinyali üretiyorsa, bu sistem *MISO (Multiple Input Single Output)* olarak adlandırılır. Sisteme giriş büyüklüğü olarak birden fazla sinyal etkiyor ve sistem cevap olarak birden fazla çıkış sinyali üretiyorsa, bu sistem *MIMO (Multiple Input Multiple Output)* olarak adlandırılır.



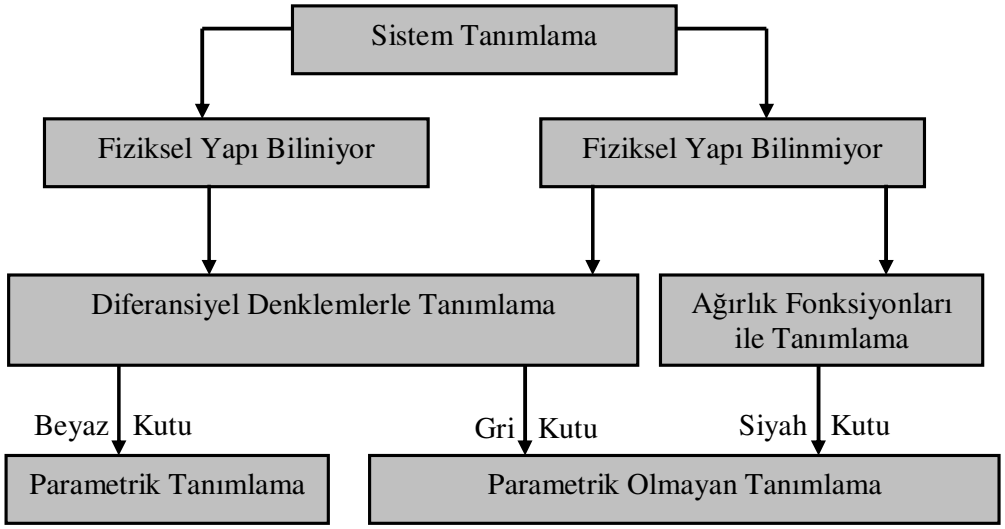
Şekil 3.6 Dinamik sistemlerin giriş ve çıkış sayısına göre sınıflandırılması

Sistem analizi, var olan bir sistemin değişik girişlere nasıl yanıt verdiğinin bulunmasıdır (Ertürk 2005). Sistem analizinde sinyallerin zamansal olarak tanımlanması gerekmektedir. Sinyallerin tanımlanması zamanın veya frekansın fonksiyonu olması durumuna göre *zaman bölgesinde (time domain)* ya da *frekans bölgesinde (frequency domain)* tanımlamadan söz edilir. Sinyallerin tanımlanmasında bir diğer ayırım sinyalin yapısına bağlıdır. Eğer bir sinyal tam

anlamıyla matematiksel olarak tanımlanabiliyorsa *deterministik sinyal*, dolaylı olarak matematiksel olarak tanımlanıyorsa *stokastik sinyal* olarak adlandırılır.

3.2.1 Parametrik ve parametrik olmayan modellerle sistem tanımlaması

Sistem tanımlamasında, bir dinamik sistemin transfer fonksiyonunun uygun matematiksel-fiziksel fonksiyonlar ile oluşturulması sistem tanımlaması olarak adlandırılır. Çıkış sinyalleri gibi giriş sinyalleri de ölçülen büyüklük olarak belirlenebilirse, sistem tanımlamasına ulaşılabilir. Transfer fonksiyonu için nasıl bir modelin kurulacağı ön çalışması, parametrik olmayan bir tanımlamanın seçimi için gereklidir (Welsch ve Heunecke 2001) (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Sistem tanımlama metotları

3.2.1.1 Parametrik modeller

Eğer giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki fiziksel ilişki, yani obje boyunca geçiş yada sinyallerin transfer süreci, yada başka bir değişle giriş sinyalinin çıkış sinyaline geçişi, biliniyor kabul edilirse ve diferansiyel denklemlerle tanımlanabilirse, bu model *parametrik model* (yapısal model) olarak adlandırılır. Sistem tanımlaması '*Beyaz Kutu*' da gerçekleştirilir. Elbette beyaz kutu modelleri, bütün modellerdeki durum gibi gerçek dünyanın bir gerçekleşmesidir.

Bir sistemin her hangi bir dinamik modelinin temel eşitliği lineer dinamik elastikiyetinin diferansiyel denklemleridir.

$$\begin{bmatrix} K & D & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = y(t) \tag{3.1}$$

$y(t)$ Bozucu gürültüler tarafından kirletilen etkiyen güçler yani sistem girişidir. $x(t)$ ve türevleri, jeodezik anlamda ölçülen, sistem çıkışıdır. K, D ve M sertlik, sönüm ve kitle için materyal ve dizayn parametrelerini içeren matrislerdir.

Koordinat sistemleri yapısal model bağlamında referans sistemleri olarak bilinir. Koordinatlar değerlendirme prosedürün ara büyüklükleridir. Bunlar durum vektörünü oluşturan durum parametreleri olarak adlandırılır. Aynı zamanda koordinatlardan başka, ilave olarak fiziksel durum parametreleri kullanılabilir. Sistem teorisi anlamında, durum parametreleri sistemin asıl ilişkisinin tanımlanması için gereklidir; bu parametreler durum uzayını şekillendirir. Yapısal bir model yardımıyla dinamik bir sürecin araştırılması durum uzayının analizine dayanır.

Eğer parametrik sistemlerle tanımlamada, yalnızca sürecin lokal değişkenlerinden ziyade zaman bağımlılığı düşünülürse, bu sistem 'birleştirilmiş parametreler' olarak tanımlanabilir. Bu durumda adi diferansiyel denklemler yeterlidir. Parametrik sistemlerle tanımlamada zaman bağımlılığından ziyade parametrelerin lokal değişkenleri de düşünülür, bu sistem "parçalanmış parametreler" olarak tanımlanmak zorundadır. Bu durumda kısmi diferansiyel denklemler yeterlidir. Diferansiyel denklemler yalnızca sınırlı alanlar için oluşturulursa, kısmi diferansiyel denklemlerin yerini, bu sınırlı alan içerisinde etkili olan adi diferansiyel denklemler alabilir. Belli alanlar için hesaplanan bu çözümler düzgün bir bağlantı ile sınır şartları sağlanarak birbirleriyle birleştirilmek zorundadır. Bu sonuçlar orijinal diferansiyel denklemlerin yaklaşık bir çözümünü ortaya koyar.

3.2.1.2 Parametrik olmayan modeller

Bir sistemin geometrik ve fiziksel yapısının modellemesinin hiçbir yolu yoksa, giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki ilişki yalnızca regresyon yada korelasyon analizi ışığında formüle edilebilir (Davranış Modeli). Zaman serisi analizi faydalı olur. Öyleyse sistem tanımlaması regresyon/korelasyon katsayısının belirlenmesi anlamına gelir. Genellikle bu katsayılar yada kerneller parametreler olarak adlandırılır, araştırma altındaki sürecin fiziksel parametreleri olmamasına rağmen; onlar fiziksel anlamları olmaksızın giriş sinyallerinden ziyade çıkış sinyalleri ile ilişkilidir. Böyle parametrik olmayan modeller "siyah kutu" modelleri olarak adlandırılır. Bunun anlamı sistem tanımlamasının mekanik modellerle değil yalnızca ölçümlere belirlenmesidir; bu bulgudur, model yöneltme değildir.

Parametrik olmayan modellerin en genel tanımı, bir kısmi diferansiyel denklemler seti olmasıdır. Tek giriş tek çıkış olması durumunda bu adi diferansiyel denklemlerle verilir; bu denklemler (Welsch 1996)

$$a_q \frac{d^q x}{dt^q} + a_{q-1} \frac{d^{q-1} x}{dt^{q-1}} + \cdots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_p \frac{d^p y}{dt^p} + b_{p-1} \frac{d^{p-1} y}{dt^{p-1}} + \cdots + b_1 \frac{dy}{dt} + b_0 y \quad (3.2)$$

yaklaşımı ile ortaya konulabilir.

Bu diferansiyel denklemlerden bir fark denklemine geçiş yapılırsa, bu model ARMA (otoregresif haraketli ortalama) modeli olarak adlandırılan model elde edilir.

$$x_k = a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \cdots + a_q x_{k-q} + b_0 y_k + b_1 y_{k-1} + \cdots + b_p y_{k-p} \qquad (3.3)$$

Bilinmeyen a_k ve b_k katsayıları tanımlama prosedüründe tahmin edilecek olan parametrelerdir. Sınır değerleri p ve q hafızanın devamlılığını gösterir; t_k zamanında bu model bu sınırların gerisindeki bütün giriş ve çıkışları yeniden toparlar.

Bu katsayılar sistem materyal ve dizayn parametrelerinin fonksiyonu olarak ele alınmak zorunda olunmasına rağmen, bu temel parametrik olmayan model için karakteristiğini $q > 3$ ve $p > 0$ için fiziksel olarak anlamlı model yapısını kaybettiği gerçektir. Ancak $q \leq 3$ ve $p = 0$ için bu parametreler fiziksel olarak yorumlanabilir.

Diğer bir deyişle bu model "Gri Kutu" olarak adlandırılır. Ancak bu farklı model arasındaki ayırım- beyaz, gri ve siyah- kademelidir ve "parametre" yada "fiziksel yapı" gibi terimlerin değerlendirilmesine bağlıdır.

ARMA modeli yinelemeli ve yinelemesiz bir bölümden oluşur.

$$x_k = \sum_{i=1}^{q} a_i x_{k-i} + \sum_{j=1}^{p} b_j y_{k-j} = R_k(x) + N_k(y) \tag{3.4}$$

$p = 0$ için bu model otoregresifdir. Gerçek gözlem x_k, önceki gözlemler ve şu anki sistem girişi y_k' nın lineer bir kombinasyonu olarak düşünülür. $q = 0$ için model yenilemesiz olur; gerçek sistem çıkışı şu anki ve geçmiş sistem girişinin lineer bir kombinasyonudur. Böylece b_j katsayıları regresyon analizinin çarpanları olarak ele alınır. Sürekli gözlemler için yinelemesiz (lineer) modellerin ortaya konulması konvolisyon entegrali ile sağlanır.

$$x(t) = \int_0^{\infty} g(\tau)\, y(t-\tau) d\tau \tag{3.5}$$

Burada, $g(\tau)$ ağırlık fonksiyonudur ve regresyon analizinde kullanılır.

Lineer olmayan yapılaşmamış problem durumunu ele alış biçimi için VOLTERRA modeli geliştirilmiştir.

$$\begin{aligned} x(t) = & \int_0^{\infty} g_1(\tau_1)\, y(t-\tau_1) d\tau_1 + \int_0^{\infty}\int_0^{\infty} g_2(\tau_1\tau_2)\, y(t-\tau_1)\, y(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\ & + \textit{daha yüksek dereceden terimler} \end{aligned} \tag{3.6}$$

Ayrık durumlarda böyle modeller bir toplam yada çoklu toplam eşitlikleri şeklinde yazılabilir. Parametrik olmayan modeller sistem ve süreçlerin büyük bir bölümüne uygulanabilir. Zaman serileri analizi sistem tanımlamanın diğer bir metodudur ve çoğunlukla parametrik olmayan durumlara uygulanır. Bir zaman serisinin zaman alanında hesaplanılacak en anlamlı bilgi onun beklenen değeri ve gözlemlenmiş sürecin varyans bilgisini içeren otokovaryans fonksiyonlarıdır. Çapraz kovaryans değerlerini hesaplayarak zaman serilerinin giriş ve çıkış değerlerini

karşılaştırmak suretiyle iki zaman serisinin korelasyonu hakkında ve sistem tepkimesinin giriş sinyallerine göre (faz kayıklığı) gecikip gecikmediği hakkında bilgi elde edilir. Eğer zaman alanından frekans alanına geçmek için Fourier dönüşümü kullanılırsa, sürecin karakteristik frekansı belirlenebilir. Bu çıkış sinyalleri yalnızca giriş sinyallerini de içeren frekanslarını kapsar. Sonuç olarak giriş sinyalleri değil de çıkış sinyallerinin frekansları bu sistemi etkileyen araştırılmış faktörlerden daha fazla olabileceği ip ucunu verebilir. Jeodezik deformasyon analizinde zaman serileri analizi uygulamanın geniş bir alanına sahiptir.

Son zamanlarda yeni analiz teknikleri kontrol mühendisliği tarafından benimsenmiştir; yapay sinir ağları ve bulanık mantık giriş-çıkış sistemlerinin tanımlanması için benimsenmiştir.

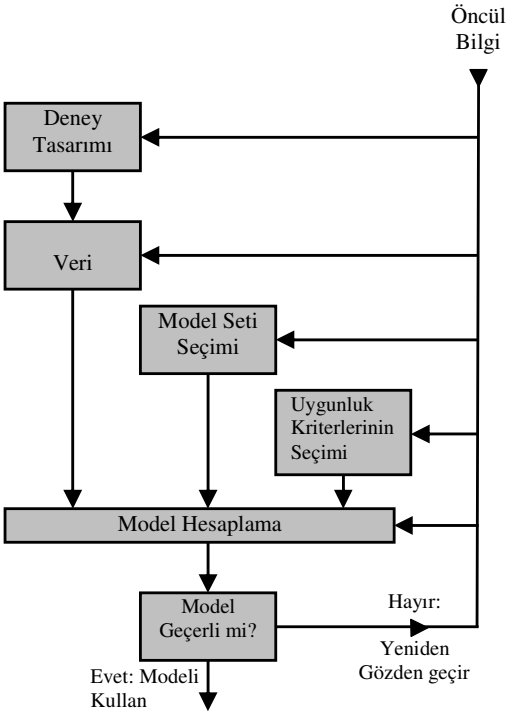
3.3 Sistem Tanımlama Döngüsü

Sistem tanımlama prosedürü doğal bir akış şemasına sahiptir: ilk olarak veriler toplanır, daha sonra bir model seti seçilir, bu model setlerinden en iyi uyan model belirlenir. İlk seçilen modelin model geçerlilik testinden geçemeyeceği oldukça olasıdır. Daha sonra geri dönüp prosedürün çeşitli adımlarını yeniden gözden geçirilmesi gereklidir.

Bu model çeşitli sebeplerden dolayı eksik olabilir:

- Bizim kriterlerimize göre, sayısal prosedür en iyi modeli bulmak için başarısız olabilir.
- Kriterler iyi seçilmemiş olabilir.
- Model seti uygun olmayabilir.
- Veri seti, iyi modellerin seçiminde, rehberlik sağlamak için yeteri kadar bilgi verici değildir.

Sistem tanımlama döngüsü Şekil 3.8’ de gösterildiği şekilde özetlene bilir (Ljung 1999).



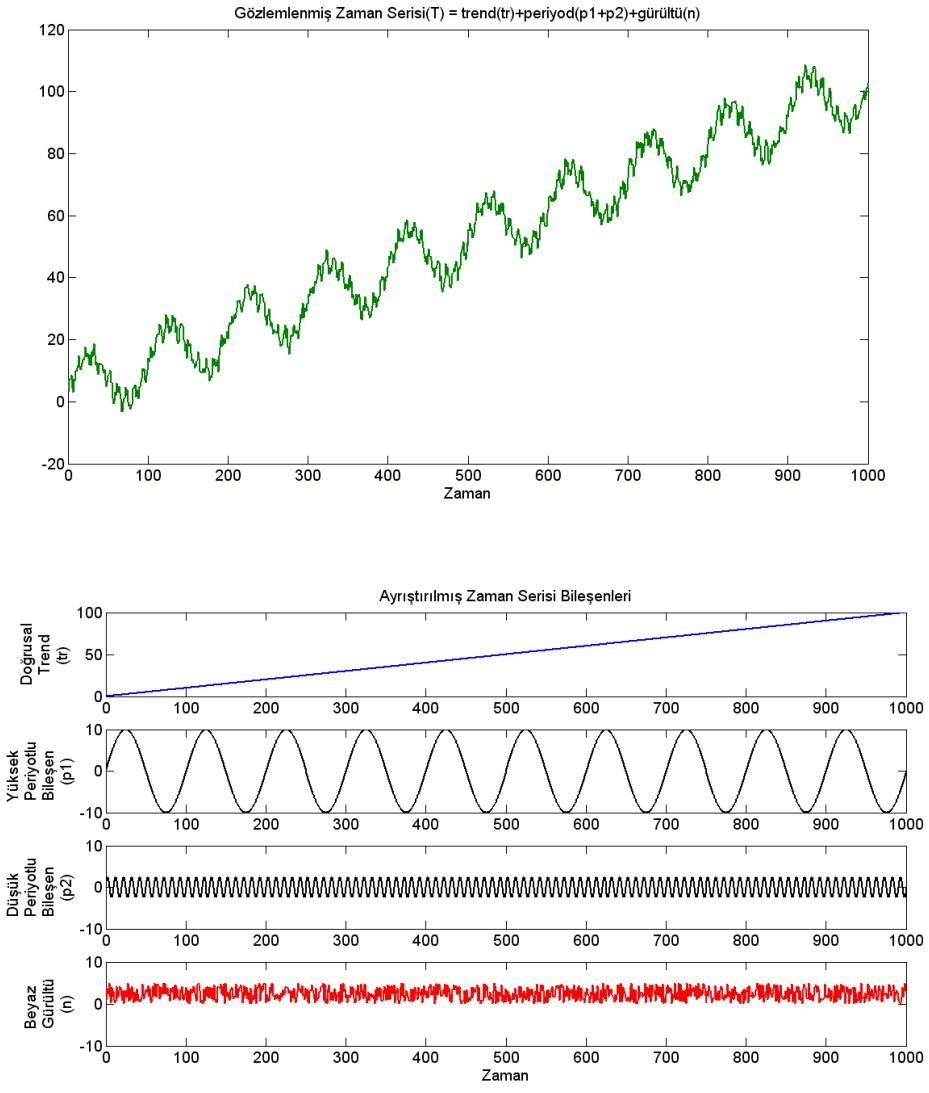
Şekil 3.8 Sistem tanımlama döngüsü

3.4 Zaman Serileri ve Stokastik Süreçler

Özellikle yapılar ve yer kabuğundaki deformasyonların izlenmesi gibi çalışmalar, farklı tip aletler ile belirli fiziksel değişkenlerin ölçülmesine dayanır. Matematiksel ve istatistiksel temellere dayandırılan zaman serilerini şekillendiren böyle ölçümlerin analizi, 'belli bölgelerdeki tektonik hareketlerin oranının nedir?', 'rezervuarı dolu olan bir barajın tepkisinin ne olduğu?' vb. gibi sorulara cevap bulur (Pytharouli ve ark. 2004).

Bir zaman serisi, zaman içinde gözlenen ölçümlerin bir dizisidir. Zaman serisi verileri, değişkenlerin bir dönemden diğerine ardışık şekilde gözlendiği sayısal değerler hakkında bilgiler verirler. Gözlenen verilerin zaman içerisinde ardışık bir biçimde olması gerekli bir koşul değildir. Fakat düzenli zaman aralıklarında dizinin gelişimini takip etmesi doğru analiz açısından önemlidir (Sevütekin ve Nargeleçekenler 2005).

Zaman serileri ortalamadan gösterdiği sapmalara göre, durağan ve durağan olmayan seriler olmak üzere, başlıca iki ana başlık altında incelenmektedir. İncelenen zaman serisinin ortalaması veya trendi ve varyansı simetrik bir değişme göstermiyorsa veya seri periyodik dalgalanmalardan arınmış ise, böyle serilere durağan zaman seri olarak adlandırılır. Durağanlık zaman serilerinde en önemli kavramlardan biridir. İstatistiki çıkarımlar durağan zaman serileri için yapılabildiğinden, durağan olmayan zaman serileri önce durağan hale getirilir ve analizler daha sonra yapılır (Akdi 2003).



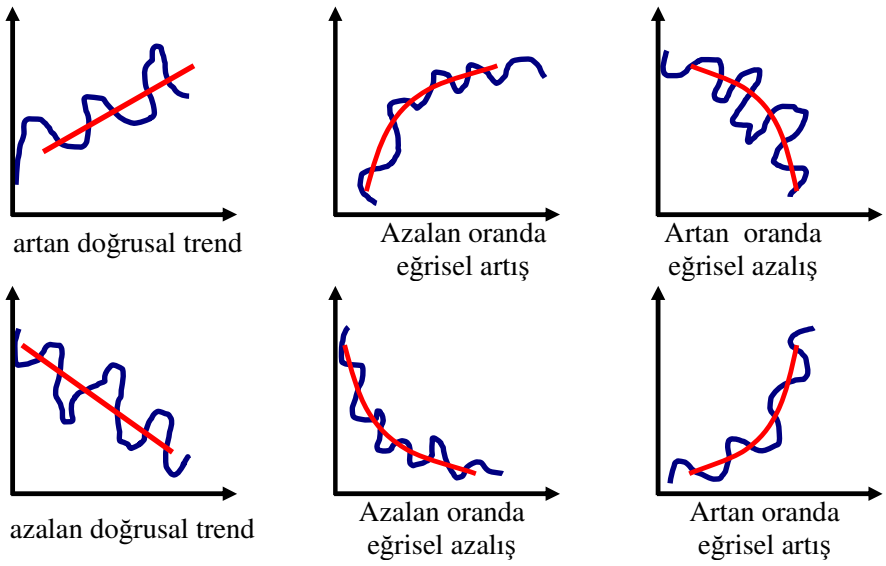
Şekil 3.9 Bir zaman serisinin olası bileşenleri

Zaman serisi analizinde, farklı zaman noktalarındaki gözlemler arasındaki bağımlılık araştırılmaktadır. Bu bağlamda bir zaman serisini oluşturan bileşenlerin ortaya çıkartılması gerekmektedir. Bir zaman serisi için üç bileşen söz konusudur.

- Trend bileşeni
- Periyodik bileşen
- Stokastik bileşen

Gözlemlenmiş bir zaman serisinin ayrıştırılmış bileşenleri Şekil 3.9 da görülebilir. Şekilde üst çizim orijinal zaman serisini, alt çizimler ise sırasıyla orijinal serisinin ayrıştırılmış, trend, periyodik sinyal ve rasgele gürültülerini temsil etmektedir.

Trend, değişkenin uzun dönem hareketini ortaya koyan bir bileşendir. Trend etkisini üzerinde barındıran bir seri, zaman ilerledikçe artan veya azalan bir görünüm sergiler. Başka bir deyişle trend, zamanın artan ya da azalan bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon bazen zamana göre doğrusal olabildiği gibi bazen de doğrusal olmayan bir yapıda karşımıza çıkabilmektedir. Gerçekleşmesi mümkün olan birkaç eğrisel ve doğrusal trend şekilleri Şekil 3.10'da gösterilmiştir (Özek 2010).

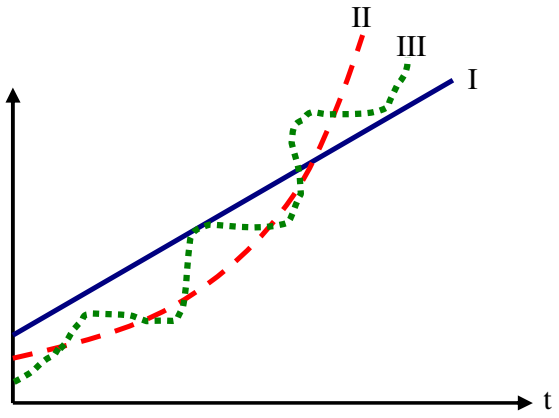


Şekil 3.10 Muhtemel trend şekilleri

Bir zaman serisindeki trend iki şekilde karşımıza çıkabilmektedir.

Deterministik trend (sürekli artış veya sürekli azalış)

Stokastik trend (zaman içinde genel eğilimi artış fakat bazen düşüşlerinde olduğu trenddir)



Şekil 3.11 Deterministik trend (I,II) ve stokastik trend (III)

Uzun dönemli trend eğrisi etrafında artış ve azalışlarla oluşan dalgalanmalar periyodik hareketler olarak adlandırılır. Bir zaman serisindeki, trend ve periyodik bileşenlerin arındırılmasından sonra bu seride geriye kalan değişimler rassal değişiklikler olarak adlandırılmaktadır.

Bir zaman serisi trend (T), periyodik hareketler (C) ve rassal değişiklikler (R) olarak üç bileşenden oluşmaktadır. Literatürde bir zaman serisi için, bu üç bileşene bağlı olarak aşağıdaki gibi gösterilen toplamsal model veya çarpımsal model olarak iki tür model ele alınmaktadır. Bu modeller sırasıyla eşitlik 3.7 ve 3.8 de verilmiştir.

$$X = T + C + R \tag{3.7}$$

$$X = T.C.R \tag{3.8}$$

Açıktır ki bu bileşenlerden biri belirlendiğinde, zaman serisinden bu bileşeni ayrıştırmak modelin toplamsallığına veya çarpımsallığına göre değişecektir.

3.4.1 Stokastik süreçler

Zaman serileri için olasılık modellerinin diğer bir tanımı stokastik süreçlerdir. Literatürde stokastik süreç hem reel fizik süreç hem de onun matematiksel bir modeli olarak algılanılır. Rassal süreç kavramı ile stokastik süreç kavramı eş anlamda kullanılır.

Reel olarak gözlenen bir zaman serisi $y_t, t = 1,2,\ldots,T$ stokastik süreç olarak adlandırılan bir teorik sürecin gerçekleşmesi olarak düşünülür. Geleneksel istatistikte *ana kütle* ve *örneklem* gibi hayati önemi olan kavramların teorik zaman serisi analizlerinde özdeşi sırasıyla *stokastik süreç* ve *gerçekleşme (gözlenen seri)* kavramlarıdır. Zaman serisi analizlerinin temel amacı gözlenen seride içerilen bilgiden yararlanarak stokastik sürecin özellikleri veya temel öğeleri hakkında çıkarımlarda bulunmaktır. Analizdeki ilk adım genellikle belirli özet istatistikleri formüle etmek, fakat asıl amaç verilerden bir model kurarak serinin yapısını açıklamaktır.

Bir stokastik süreci tasvir etmenin bir yolu, $t_1,\ldots,t_n$ herhangi bir seti için $y_{t_1},\ldots y_{t_n}$ birleşik olasılık dağılımını tanımlamaktadır. Yine stokastik bir süreci tasvir etmenin bir başka yolu ise momentlerini oluşturmaktadır. Özellikle ortalama, varyans ve otokovaryans fonksiyonları olarak adlandırılan birinci ve ikinci momentler tanımlanır. y_t değişkeninin birinci ve ikinci momentleri veya ortalama ve varyansı,

Ortalama;

$$\mu_t = E(y_t) \tag{3.9}$$

Varyans;

$$\sigma_t^2 = Var(y_t) = E(y_t - \mu_t)^2 \tag{3.10}$$

ve y_{t_1} ve y_{t_2} arasındaki otokovaryansı,

$$\gamma_{t_1,t_2} = Cov(y_{t_1}, y_{t_2}) = E[(y_{t_1} - \mu_{t_1})(y_{t_2} - \mu_{t_2})] \tag{3.11}$$

şeklinde yazılabilir.

Bir zaman serisinin eğer ortalamasında sistematik bir değişme yoksa (trend yapmıyorsa), eğer varyansında sistematik bir değişme yoksa ve eğer düzenli periyodik değişmeler ortaya çıkarmıyorsa, seri durağandır denir. Durağan bir süreçte iki dönem arasında hesaplanan kovaryans, bu kovaryansın hesaplandığı döneme değil yalnızca iki dönem arasındaki uzaklığa bağlıdır.

Zaman serileri ile ilgili olasılık teorilerinin önemli bir kısmı durağan zaman serileri ile ilgilidir. Zaman serisi modellerini geliştirebilmek için, belirli bir stokastik sürecin zamana bağlı olarak değişip değişmediğinin bilinmesi gereklidir. Eğer stokastik sürecin özellikleri zaman boyunca değişiyorsa, yani süreç durağan dışı ise, zaman serisinin geçmiş ve gelecek boyunca zaman aralıklarını basit bir cebirsel modelde göstermek genelde zordur. Diğer taraftan eğer stokastik süreç zaman içinde sabitse, yani süreç durağan ise; geçmiş değerlerden tahmini yapılabilecek sabit katsayılı bir denklem ile süreç modeli elde edilebilir.

a) Zayıf Durağanlık (İkinci dereceden durağanlık)

Zaman serisinin durağanlığı sabit ortalamayı işaret etmektedir.

$$E(y_t) = E(y_s) = \mu \qquad (t \neq s) \tag{3.12}$$

Ayrıca (y_t, y_s) ile (y_{t+i}, y_{s+i}) nin aynı dağılıma sahip olmaları nedeniyle ikinci momenti söz konusu olmakta ve durağanlık $s > t$ olduğunda

$$\gamma(y_t, y_s) = E(y_t - \mu)(y_s - \mu) = \gamma(s-t) = \gamma_{s-t} \tag{3.13}$$

olacak şekilde gösterilmektedir.

Zayıf durağan bir seri;

- $E(y_t)$ nin sabit ve zamandan bağımsız olması
- $Var(y_t)$ nin sabit ve zamandan bağımsız olması
- $Kov(y_t, y_s)$ nin zamanın değil, $(t-s)$ nin bir fonksiyonu olması

biçiminde tanımlanır.

b) Güçlü Durağanlık

y_t rassal değişkeninin zayıf durağanlıkta bahsedilen özelliklere sahip olmasının yanı sıra dağılımının zaman içinde değişmemesi özelliğine de sahip olması durumu "güçlü durağanlık" olarak adlandırılmaktadır.

$n \geq 1$ ve k herhangi bir tamsayı olması koşuluyla $(y_1, \cdots, y_n)$ ve $(y_{1+k}, \cdots, y_{n+k})$ aynı birleşik dağılıma sahipse $\{y_t \quad (t = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots)\}$ güçlü durağandır (Fan ve Yao 2003).

c) Kesin Durağanlık

y_t rassal değişkenin yukarıda sıralanan özelliklere sahip olmasının yanı sıra bileşik dağılımının normal olması durumu "kesin durağanlık" olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda, yani bileşik dağılımın normal olması ile de süreç ile ilgili önemli bilgi sağlanmış olmaktadır.

3.4.2 Korelasyon ve otokorelasyon fonksiyonları

Korelasyon iki rassal değişken arasındaki ilişkinin yönünü ve gücünü belirtir. Korelasyon katsayısı, bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin yönü ve büyüklüğünü belirten katsayıdır. Katsayı -1 ile +1 arasında bir değer alır. Pozitif değerler direk yönlü doğrusal ilişkiyi; negatif değerler ise ters yönlü bir doğrusal ilişkiyi belirtir. Korelasyon katsayısı 0 ise söz konusu değişkenler arasında doğrusal bir ilişki yoktur anlamına gelir.

Bağımsız değişken x ve y arasındaki korelasyon katsayısı

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E((x - \mu_x).(y - \mu_y))}{\sigma_x \sigma_y} \tag{3.14}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, μ_x, μ_y sırasıyla x ve y nin beklenen değerlerini, σ_x , σ_y sırasıyla varyanslarını temsil etmektedir.

Korelasyon x ve y gibi iki değişken arasındaki ilişkiyi belirlerken, bu değişkenlerden her hangi birinin kendi zaman serisi gözlemlerinin gecikmeli değerleri arasındaki kovaryans yada korelasyon katsayısı hesaplanabilir. Tek bir zaman serisi değişkeninin gecikmeli değerleri arasında birlikte değişimin bir ölçüsü otokovaryans ve otokorelasyon olarak adlandırılır. Zaman serisi analizlerinde otokovaryans ve otokorelasyon en önemli araçlardan biridir. Bu fonksiyonlar hem zaman serisi analizinde hem de durağanlığın araştırılmasında kullanılabilmektedir. Bir y_t zaman serisi için otokovaryans formülü eşitlik (3.11)'de verilmiştir. μ serisinin ortalamasını, k gecikmeyi temsil etmek üzere, ρ_k otokorelasyon fonksiyonu,

$$\rho_k = \frac{\text{cov}(y_t, y_{t+k})}{\sqrt{\text{var}(y_t).\text{var}(y_{t+h})}} \tag{3.15}$$

şeklindedir.

3.5 Frekans Alanında Analiz ve Filtreleme

3.5.1 Fourier analizi

Periyodik bir sinyal, çeşitli genlik ve frekanstaki birçok sinüs ve kosinüs sinyalinin toplamı seklinde ifade edilebilir. Bu şekilde elde edilen seri fourier serisi olarak adlandırılırken, serinin elemanları fourier bileşenlerini göstermektedir. Fourier serisi elde etme işlemi fourier analizi olarak adlandırılır. Sinüzoidal olmayan bir periyodik işaretin fourier analizi sonrasında zaman bölgesindeki eşitliği (3.16)' daki gibi gösterilebilir.

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin t + \cdots + A_n \sin nt + B_1 \cos t + \cdots + B_n \cos nt \tag{3.16}$$

A_0, A_n *ve* B_n katsayıları

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t).dt \tag{3.17}$$

$$A_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t).\sin(n.t).dt \tag{3.18}$$

$$B_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t).\cos(n.t).dt \tag{3.19}$$

eşitlikleri ile elde edilmektedir. Sinüzoidal olmayan zaman serisinin özelliğine göre bu katsayılardan bir kısmı sıfır değerlerini alacaktır.

3.5.2 Fourier dönüşümleri

Fourier dönüşümü, zaman alanındaki bir işaretin frekans içeriğini analiz etme ve belirleme amacıyla birçok mühendislik biliminde etkili bir şekilde kullanılan yöntemdir. Dönüşüm, ilk olarak tanım alanı zaman olan bir fonksiyonun, tanım alanı frekans olan bir fonksiyona dönüştürülmesi ile başlar. Bundan sonra sinyalin frekans içeriği incelenebilir. Dönüştürülen fonksiyonun katsayıları, her bir frekans değerine karşılık sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının katsayılarını temsil eder. Ters Fourier Dönüşümü ile verinin frekans alanından zaman alanına dönüştürülmesi gerçekleştirilir.

Fourier analizinde entegral alma işleminin kullanılması, analiz süresini oldukça uzatmaktadır. Periyodik olmayan sinyallerin de harmonik analizinin yapılabilmesi amacıyla, sayısal işlemci tabanlı Ayrık Fourier Dönüşüm (AFD) yöntemi tanımlanmıştır. Algoritması gereği, AFD yöntemi de fourier analizi gibi uzun bir zaman almaktadır. Daha sonraki yıllarda dönüşüm süresini kısaltmak için AFD'nin özel bir durumu olan Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) yöntemi geliştirilmiştir. HFD algoritmasının hızlı olması, n pozitif tam sayı olmak üzere 2^n gibi uygun veri sayısının işlenmesi ile sağlanmıştır. Fourier analizi periyodik olan sinyalin fonksiyonunu kullanırken, AFD ve HFD yöntemleri periyodik olan veya olmayan sinyalin örneklenmiş verilerini kullanmaktadır.

3.5.3 Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD)

Bir işaretin frekans spektrumu hesaplanırken 2π ile periyodik olan ayrık zamanlı frekansın bir periyodunun dikkate alınması yeterlidir. Frekans spektrumu

hesabı sırasında *N* adet frekans değeri için hesaplama yapılacaksa eğer bu frekans değerlerinin 2π temel frekans bölgesinde *N* adet eşit aralıklı frekans değeri,

$$\Omega = \frac{2\pi}{N} k \quad k = 0,1,\cdots,N-1 \tag{3.20}$$

olarak bulunmaktadır. Ayrık frekans dönüşümünün *N* adet ayrık frekans değeri için hesaplanması,

$$X[k] = X(e^{j\Omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\Omega n} \qquad k = 0,1,\cdots,N-1 \tag{3.21}$$

şeklindedir. Ters ayrık fourier dönüşümü,

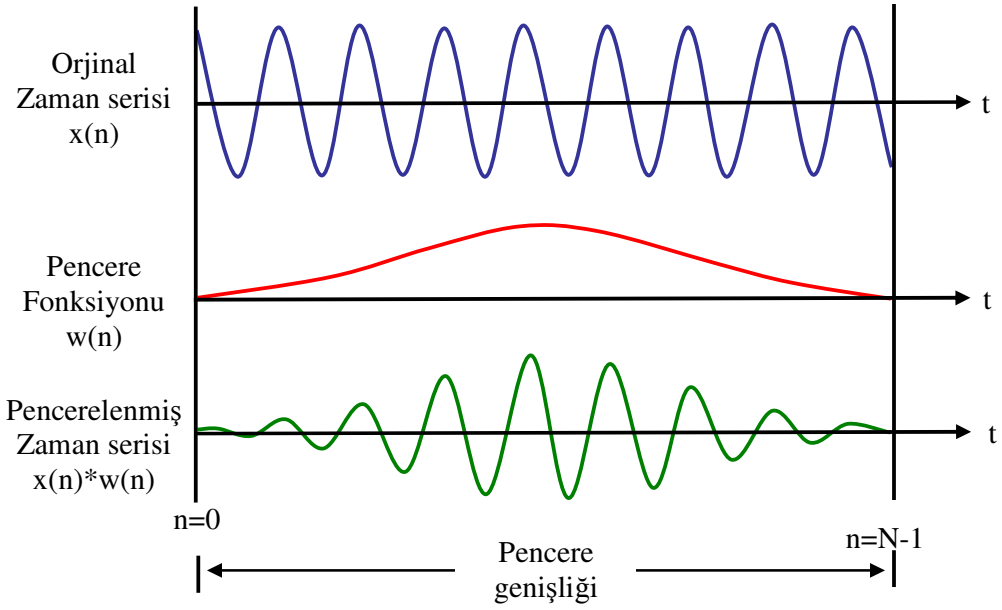
$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\Omega n} \qquad n = 0,1,\cdots,N-1 \tag{3.22}$$

olarak tanımlanmaktadır (Ertürk 2005).

3.5.4 Ayrık Fourier Dönüşümü öncesi pencereleme

AFD ile bir işaretin spektrumu hesaplanırken, işaret son örneğinin arkasından tekrar ilk örneği geliyormuş gibi işlem görmektedir. İşaretin periyodik olarak tekrar ettiği düşünüldüğünde, işaretin son örneğinin arkasından bir sonraki periyot için tekrar işaretin ilk örneği gelmektedir. AFD hesabında işaretin son örnekleri ile ilk örnekleri birbirini takip ediyormuş gibi ele alındığı için aralarındaki frekans ilişkisi frekans bileşenlerinin değerlerine yansımaktadır.

Periyodunu tamamlamamış bir sinüs işaretinde yapılan hesaplamada ise, işarette bir süreksizlik meydana geldiğinden AFD' de, esasında işaretin yapısında olmayan frekans bileşenleri görülür. AFD hesabı sırasında işaretin son değerleri ile ilk değerleri arasında meydana gelen devamsızlık, enerjinin diğer frekanslara sızmasına neden olur ve spektral sızma olarak adlandırılmaktadır. Spektral sızmayı azaltmanın yolu, işaretin son değerler ile ilk değerleri arasındaki devamsızlığın giderilmesidir. Bu amaçla işaret, AFD öncesi pencereleme işleminden geçirilmektedir (Ertürk 2005).



Şekil 3.12 Sinyal pencereleme işlemi

Pencereleme yaklaşımı işaretin, AFD hesabı öncesinde genliği kenarlara doğru yavaşça sıfıra yaklaşan bir pencere fonksiyonu ile çarpılmasını öngörmektedir. Bu sayede işaretin son değerleri ile ilk değerleri arasındaki devamsızlık giderilmektedir. Değişik pencere fonksiyonlarının kullanımı mümkündür. Yaygın olarak kullanılan pencere fonksiyonları üçgen pencere, Blackman penceresi, Hamming penceresi, Hanning penceresidir (Şekil 3.13). Bu pencere fonksiyonlarına ilişkin bağıntılar, sırasıyla eşitlik 3.23, 3.24, 3.25 ve 3.26 da verilmiştir.

Üçgen,

$$w[n] = 1 - \left| \frac{2.n - N}{N} \right| \quad , 0 \le n \le N \tag{3.23}$$

Blackman,

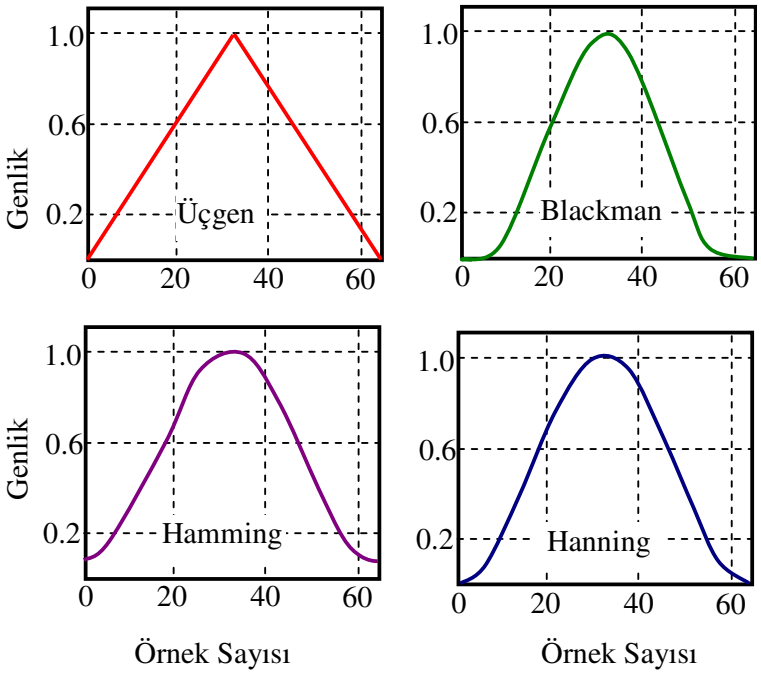
$$w[n] = 0.42 - 0.5\left[\frac{2.\pi.n}{N} \right] + 0.08\cos\left(\frac{4.\pi.n}{N} \right) \quad , 0 \le n \le N \tag{3.24}$$

Hamming,

$$w[n] = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2.\pi.n}{N}\right) \quad , 0 \le n \le N \tag{3.25}$$

Hanning,

$$w[n] = 0.5 - 0.5\cos\left(\frac{2.\pi.n}{N}\right) \quad , 0 \le n \le N \tag{3.26}$$



Şekil 3.13 Üçgen, Blackman, Hamming ve Hanning pencereleri

Pencereleme sayesinde spektral sızma azaltılmaktadır. Bu nedenle, bir işaretin AFD' si hesaplanmadan önce işaret çoğunlukla pencerelenir. Kullanılan pencere çeşidi uygulamaya göre değişmektedir. Genel amaçlı uygulamalarda çoğu zaman Hanning penceresi kullanılmaktadır.

3.5.5 Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD)

AFD' nin hızlı bir biçimde hesaplanmasına olanak tanıyan yöntemler HFD olarak adlandırılmaktadır. HFD, AFD' nin işaret isleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Bir işaretin ayrık fourier dönüşümü doğrudan (3.21) eşitliği kullanılarak,

$$X[k] = X(e^{j\Omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\Omega n} \qquad k = 0,1,\cdots,N-1 \tag{3.27}$$

hesaplanabilmektedir. Bu durumda, dönüşümün her *k* değeri için *N* adet karmaşık çarpma ve *N-1* adet karmaşık toplama işlemi yapılması gerekmektedir. *N* noktalı bir AFD için N^2 ile orantılı bir hesap yükü anlamına gelmektedir. AFD' ki faz faktörü,

$$W_N = e^{-j(2\pi/N)} \tag{3.28}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Faz faktörünün simetri ve periyodiklik özellikleri kullanılarak, AFD' nin daha verimli hesaplanabilmesi mümkündür. Faz faktörünün simetri özelliği,

$$W_N^{k+N/2} = -W_N^k \tag{3.29}$$

faz faktörünün periyodiklik özelliği de,

$$W_N^{k+N} = W_N^k \tag{3.30}$$

ilişkisini vermektedir.

HFD, ayrık fourier hesabı için faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliğinden faydalanılarak hızlı bir hesaplama sağlamaktadır. HFD yöntemleri zamanda örnek seyreltme ve frekansta örnek seyreltme yöntemleri olarak iki grupta sınıflandırılabilir (Ertürk 2005).

3.5.6 Sinyal örnekleme frekansının seçimi

Bir sistemin çıkış sinyallerinin zaman ve frekans bölgesindeki analizlerinin yapılabilmesi için, ardışık iki sinyal arasındaki sürenin eşit alınması yada ölçme sisteminin zaman hatasından kaynaklanan frekans dalgalanmalarının belirli matematiksel enterpolasyon yöntemleriyle düzeltilerek giderilmesi gerekmektedir. Ardışık iki sinyal arasındaki süre örnekleme periyodu (T_s), örnekleme periyodunun tersi ise örnekleme frekansı ($f_s = 1/T_s$) olarak isimlendirilmektedir.

Sinyaldeki bilgiyi doğru olarak temsil edecek kadar örnek alınmaması sonucu sinyalde bilgi kaybı oluşacaktır. Sinyallerde bir bilgi kaybı olmaması için örnekleme frekansının seçiminde Nyquist kriterine uyulması gerekmektedir. Örnekleme frekansının, analog sinyalin içerdiği frekans bileşenlerinden maksimum frekans değerine eşit olması yada bu değerden büyük olması Nyquist kriteri olarak bilinmektedir. f_m sinyalin band genişliği olmak üzere; f_s örnekleme sinyali,

$$f_s \geq 2.\, f_m \tag{3.31}$$

olarak Nyquist kriterine uygun bir biçimde seçilmelidir. Böylelikle, örneklenmiş sinyalin frekans spektrumunda bir çakışma meydana gelmeyecek ve bant-sınırlı bir işarette bilgi kaybı olmayacaktır.

3.5.7 Sayısal filtreler

Genellikle bütün ölçme araçları belirli bir seviyede ölçme hatası içerirler ve sinyallerle birlikte istenmeyen gürültülerde ölçülen büyüklükler içerisine dahil olurlar. Filtreleme bir gürültü azaltma yada istenmeyen frekans bileşenlerin sinyal içerisinden yok edilmesi yada arzu edilen frekans bandının güçlendirilmesi amacıyla sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Özellikle GPS gibi ölçme sistemlerinin yapı sağlıklarının izlenmesi ve dinamik parametrelerin belirlenmesi amacıyla kullanıldığında, sinyal çok yolluluk (multipath) ya da atmosferik etkilerden kaynaklanan gürültülerin GPS zaman serilerinden uzaklaştırılması ve yapıya ilişkin doğal frekansların belirlenmesinde filtreleme tekniklerinin kullanılmasını gerektirir (Carrion ve Spencer 2007).

Sadece gürültülerin yok edilmesi değil aynı ortamda bulunan birden fazla sinyalin ayrıştırılmasında da filtreler kullanılmaktadır.

Sayısal filtrelerin tasarım safhaları, ayrık-zamanlı bir sitemin tasarım safhaları ile aynıdır. Bu sebeple, filtre tasarımı, ayrık zamanlı bir sistem tasarım aşamaları olarak ele alınabilmektedir (Ertürk 2005).

1) Sistem özelliklerinin belirlenmesi

Sistem tasarımının birinci aşaması, sistemin yerine getirilmesi istenilen işlevlerin tanımlanmasıdır. Örneğin, belirli bir frekans bandından iletilmiş ola bir sinyalin ortamdaki diğer sinyallerden ayrıştırılması için sinyalin iletildiği frekans bandını geçirecek fakat diğer sinyallere ait frekansları bastıracak bir sistem istenmektedir. Bu durumda filtrenin hangi frekans aralığını geçireceği, filtrenin geçiş bandının keskinliği, söndürme bandının zayıflatılması gibi özellikler belirlenmektedir.

2) Sistemin tasarımı

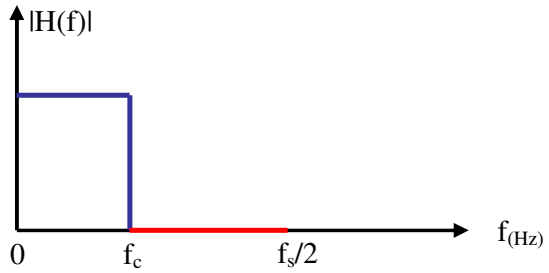
Sistem özellikleri belirlendikten sonra, bu özellikleri yerine getiren bir sistemin tasarımı gerçekleştirilmelidir. Sistemin özelliklerine ve yapısına göre sistemin tasarımı gerçekleştirilir ve bu amaçla sonlu–dürtü yanıtı (FIR) veya sonsuz-dürtü yanıtlı (IIR) gibi yöntemlerden biri tercih edilir. Kısaca bu aşamada sistemin fiziksel olarak hayata geçirilmesi için parametreler saptanır.

3) Tasarlanan sistem hayata geçirilir.

3.5.7.1 Temel filtreler

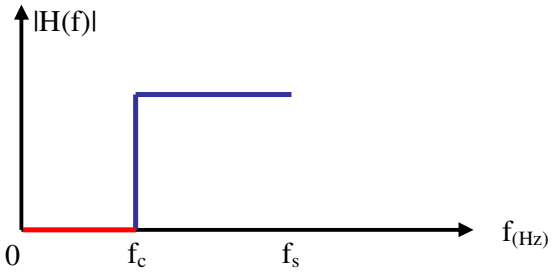
Bir filtrenin istenen frekanslar ile istenmeyen frekansları ayırması beklenir. Filtreler genellikle geçirdikleri ve bastırdıkları frekans bandına göre sınıflandırılmakta ve isimlendirilmektedir. Çoğunlukla kullanılan temel filtreler, alçak-geçiren (low-pass), yüksek-geçiren (high-pass), band-geçiren (band-pass) ve band-söndüren (band-stop) filtrelerdir.

Alçak-geçiren filtreler istenmeyen yüksek frekansları bastırarak düşük frekansların geçirilmesi amacıyla tasarlanırlar. Alçak geçiren filtreler, zaman alanında zaman serilerinin kısa dönemli hareketlerini yok ederek uzun dönemli salınımlarını ortaya çıkaran ve zaman serisinin daha düzgün gözükmesini sağlayan kayan ortalamalar yöntemine benzer bir rol oynamaktadır. Her iki yöntemde de amaç kısa-dönemli salınımların yok edilmesi ve uzun dönemli bileşenin ortaya çıkarılmasıdır. Şekil 3.14 ve 3.15' de f_c kesme frekansı, f_s ise örneklem frekansını temsil etmektedir.



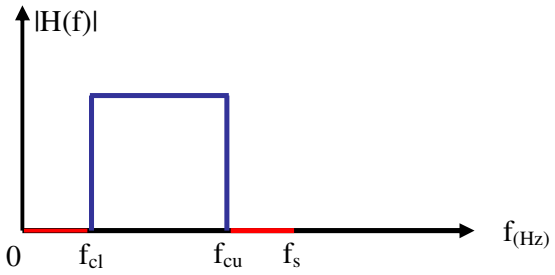
Şekil 3.14 Alçak-geçiren filtre

Yüksek-geçiren filtre, alçak geçiren filtrenin aksine istenmeyen düşük frekansların bastırılması ve yüksek frekans bileşenin geçirilmesi arzu edilen durumlarda kullanılır ve tasarlanırlar. Yüksek geçiren filtre ile zaman serilerindeki uzun dönemli salınımların ortadan kaldırılarak kısa dönemli bileşenlerin ön plana çıkarması amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle GPS zaman serilerinde sinyal yansıma hatasından kaynaklanan etkilerin yok edilmesinde yüksek-geçiren filtre kullanılmaktadır (Li 2006).



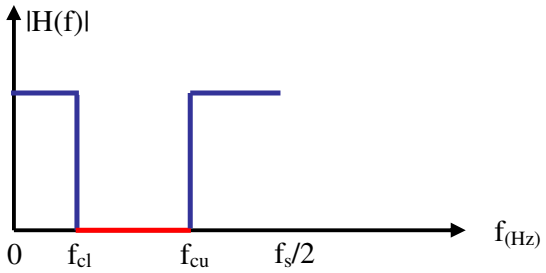
Şekil 3.15 Yüksek-geçiren filtre

Band-geçiren filtreler, seçilen band genişliğinin altındaki düşük frekanslar ile üstündeki yüksek frekansların bastırılması suretiyle sınırlı istenen frekans bandının geçmesine izin verir. Band geçiren filtreler ayrıca yüksek-geçiren ve alçak geçiren filtrenin bir kombinasyonudur. Şekil 3.16' da f_{cl} ve f_{cu} geçirilmesine izin verilen bandın alt ve üst frekans değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 3.16 Band-geçiren filtre

Band-söndüren filtreler, band geçiren filtrelerin aksine belirli bir frekans altındaki ve üstündeki bandın geçmesine, yada başka bir ifade ile istenmeyen bir frekans bandının bastırılması amacıyla tasarlanır ve uygulanır. Şekil 3.17' de f_{cl} ve f_{cu} durdurulması istenen bandın alt ve üst frekans değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 3.17 Band-söndüren filtre

3.5.7.2 Ayrık-zamanlı FIR filtre tasarımı

Ayrık zamanlı bir süzgecin dürtü yanıtı h[n]'in sadece sonlu sayıda sıfırdan farklı değeri mevcut ise filtre, sonlu dürtü yanıtlı (Finite Impulse Response,FIR) süzgeç olarak adlandırılmaktadır. Nedensel bir süzgeç ele alındığı takdirde süzgecin dürtü yanıtı h[n] sadece n=0,1,...,M için tanımlanmış ise, sistemin giriş/çıkış ilişkisi,

$$y[n] = h[0]x[n] + h[1]x[n-1] + \cdots + h[M]x[n-M] \qquad (3.32)$$

şeklinde gösterilebilmektedir.

Filtrenin giriş/çıkış ilişkisinin z-dönüşümü alındığında, süzgecin transfer fonksiyonu

$$H(z) = \frac{Y(s)}{X(s)} = h[0] + h[1]z^{-1} + \cdots + h[M]z^{-M} \tag{3.33}$$

şeklinde elde edilmektedir. Dürtü yanıtı uzunluğu M+1 olan bir FIR filtrenin M adet sıfırı ve M adet kutbu vardır. Fitrenin M adet kutbu olduğundan, filtre M' inci dereceden bir filtre olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle M' inci dereceden bir FIR filtrenin dürtü yanıtı uzunluğu M+1 olmaktadır.

FIR süzgeçleri her zaman kararlıdır ve bu kararlılık önemli bir özelliktir. Bu filtrelerin diğer önemli bir özelliği de doğrusal faz yanıtının sağlanabilmesidir. Böylelilikle, bu durum herhangi bir faz bozunumuna yol açmamakta ve sinyalde sadece bir gecikmeye neden olmaktadır (Ertürk 2005).

3.5.7.3 Ayrık zamanlı IIR filtre tasarımı

Dürtü yanıtı h[n], sonlu olmayan ve sonsuza kadar devam eden filtreler, sonsuz dürtü yanıtlı (Infinite Impulse Response, IIR) filtre olarak adlandırılmaktadır.

Sabit katsayılı fark denklemi şeklinde tanımlanmış bir IIR filtrenin giriş/çıkış ilişkisi

$$\sum_{k=0}^{N} a_k\, y[n-k] = \sum_{k=0}^{N} b_k\, x[n-k] \tag{3.34}$$

şeklinde gösterilmektedir. Sistemin transfer fonksiyonu

$$H(z) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\sum_{k=0}^{N} b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^{N} a_k z^{-k}} \tag{3.35}$$

olarak bulunmaktadır.

Sistem N'inci dereceden bir fark denklemi şeklinde tanımlandığından süzgecin N adet kutbu bulunmaktadır ve filtre N'inci derece bir IIR filtre olarak adlandırılmaktadır. Bir filtrenin sonsuz dürtü yanıtlı olması için dürtü yanıtında a sabit bir katsayı olmak üzere $a^n u[n]$ şeklinde bir terim olmalıdır. Dolayısıyla,

sistemin transfer fonksiyonunun z=0'dan farklı bir konumda bulunan ve bir sıfır tarafından nötrlenmeyen en az bir adet kutbu olmalıdır. Bir IIR süzgecin kararlı olması için, transfer fonksiyonunun tüm kutuplarının birim çemberin içerisinde olması gerekmektedir (Ertürk 2005).

4 YÜKSEK YAPILARA ETKİYEN YÜKLER

4.1 Giriş

Herhangi bir yapı tasarlanırken, tasarımcılar yapının ömrü boyunca karşılaşa bileceği umulan yüklerin tiplerini ve büyüklüklerini göz önüne alabilecek bir bilgi birikimine sahip olmalıdır. Çok farklı tipte ve yapıdaki yükler yapıya etki edebilir. Bu yükler, istatistiksel özelliklerine ve karakterine göre 3 kategorideki sınıflandırılabilir (Nowak ve Collins 2000).

Tip 1. Bu kategorideki yüklerin zamana göre değişimi söz konusu değildir. Yapısal (ölü) yük ve yapısal olmayan (yaşayan) fakat zaman göre değişmeyen yükler bu kategorideki yüklere örnektir.

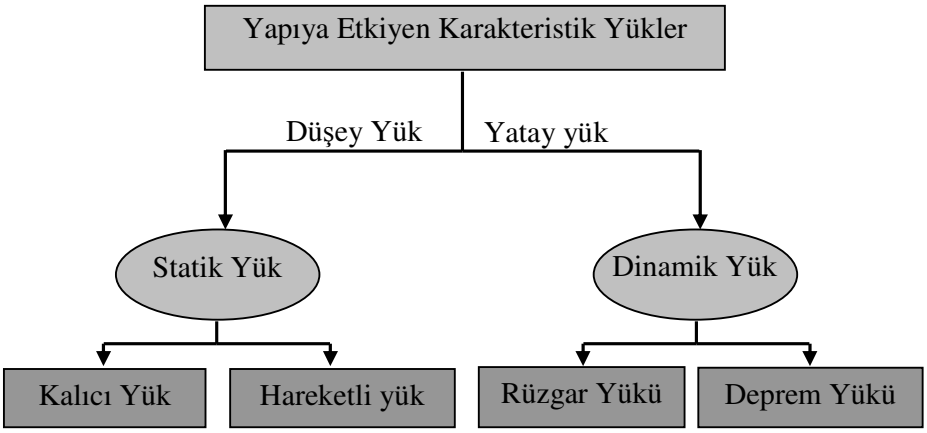
Tip 2. Bu kategorideki yükler periyodik zaman aralıklarında meydana gelir ve yüklerin etkisi zamana bağımlıdır. Bu yüklere örnek, şiddetli rüzgâr, kar yükü ve zamana göre değişen yapısal olmayan yüklerdir.

Tip 3. Bu kategorideki yüklerin oluşum zamanı önceden bilinemez ve yapının ömrü boyunca ne kadar ve ne zaman gerçekleşeceği çoğu durumda önceden kestirilemez. Bu tür yüklere örnek, depremler ve kasırgalardır.

Tasarım fazında, yapıya etkiyen yüklerin gerçekçi bir şekilde modellenmesi çok kompleks, zor ve hatta bazen olanaksızdır. Yapıya özellikle çevresel olan yada fiziksel olan zamana göre değişen şiddetli rüzgâr, kasırga ve deprem gibi yükler etkimekte ve bu yüklerin yapı tarafından en optimum şekilde karşılanması gerekmektedir.

Türkiye de yapılara etkiyen karakteristik yükler yönetmeliklerde verilmiştir (TDY 98, 1998; TS 500-2000, 2000). Bunlar en genel şekliyle, düşey yükler sınıfına giren, kalıcı ve hareketli yükleri, yatay yükler sınıfına giren deprem, rüzgâr, toprak etkisi ve sıvı yükü ve diğer yükler sınıfına giren sıcaklık farkı, büzülme, sünme gibi yüklerdir. Kalıcı yükler, döşeme, kolon, kiriş ve duvar gibi yapı elemanlarının oluşturduğu öz ağırlıktır ve yapının ömrü boyunca sabit kaldığı düşünülür. Hareketli

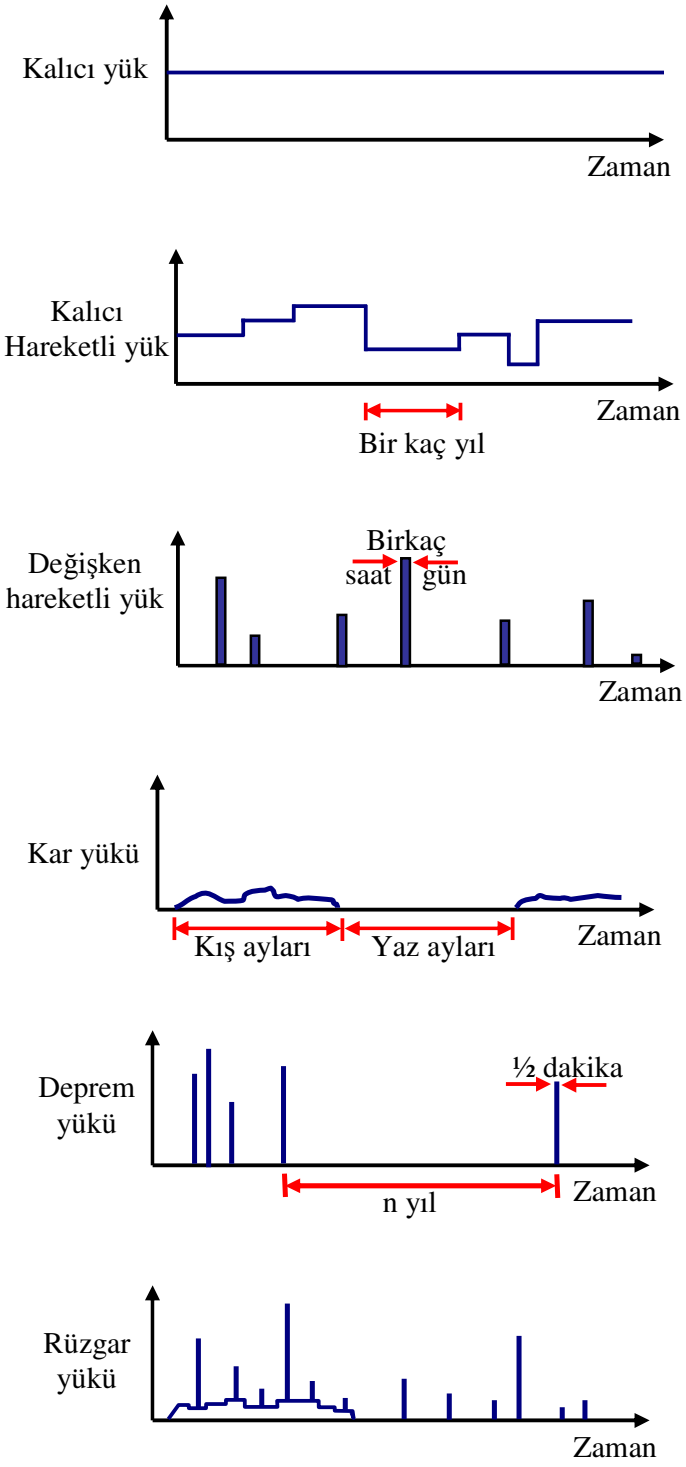
yükler, eşya, insan ve kar gibi yapı ömrü boyunca kullanım şekline göre zaman zaman farklılık gösteren ve yer değiştiren statik-düşey yüklerdir. Bu durumu genel olarak ifade eden bir şekil aşağıdaki gibi oluşturulabilir.



Şekil 4.1 Yapıya etkiyen yüklerin genel bir gösterimi

Yapıya etkiyen yüklerin zaman göre davranışları ise Şekil 4.2 de görülebilir (Nowak ve Collins 2000). Şekillerden de açıkça görüldüğü gibi, kalıcı yükler yapının ömrü boyunca değişmez niteliktedir. Kalıcı hareketli yükler ise yapının ömrü süresince farklı zamanlarda yapıda meydana gelecek yenileme ve iç düzenleme çalışmaları sonucu ortaya çıkarlar. Değişken hareketli yükler ise yapının kullanım amacına göre birkaç saatlik değişim gösterebilirler. Kar yükü ise yapıda sezona bağlı olarak etki etmektedir. Deprem yükü yapının ömrü boyunca herhangi bir anda birkaç sn ile birkaç dakika uzunluğunda meydana gelebilir. Rüzgâr yükü yine yapıya birkaç dakikadan birkaç saat veya gün boyunca yılın belirli dönemlerinde daha fazla ve şiddetli olmak üzere etki ederler.

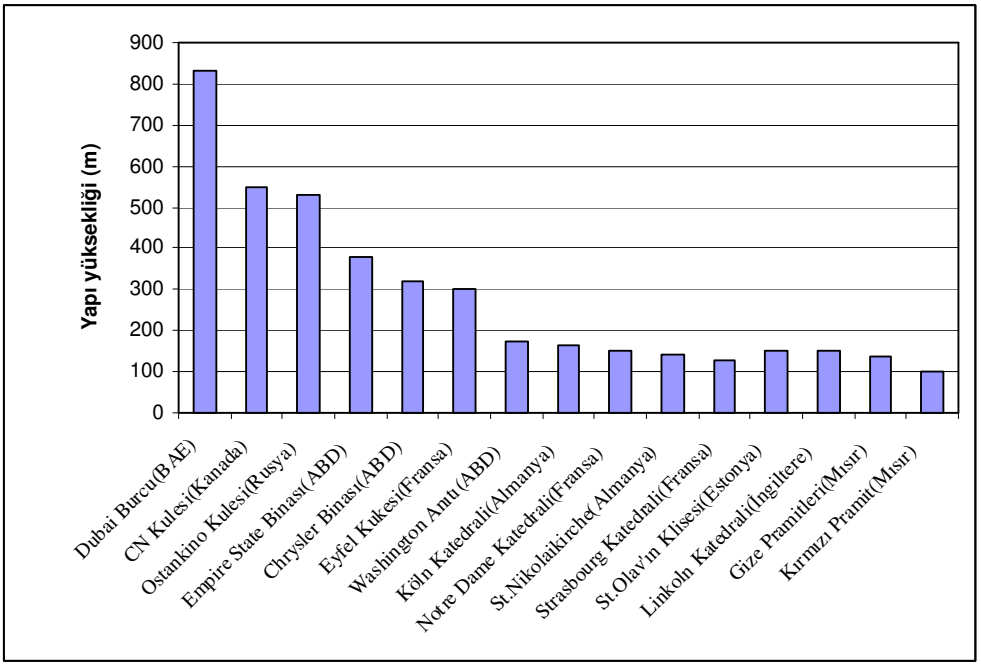
Literatürde yapılara etkiyen yüklerin sınıflandırılması ile ilgili farklı yaklaşımlar olmasına rağmen genelde bu sınıflandırmalar aynı büyüklükleri ele almaktadır. Sınıflandırmanın farklılığı temelde, sınıflandırmada neyin baz alındığıdır. Bu tez kapsamında sadece yüksek binalara etkiyen dinamik yükler üzerinde durulmuş ve takip eden alt bölümlerde literatür bilgileri özet şeklinde verilmiştir.



Şekil 4.2 Çeşitli karakteristik yüklerin zamana göre davranışları

4.2 Yüksek Yapı ve Yüksek Yapılara Etkiyen Dinamik Yükler

Yüksek yapı tanımı ülkeden ülkeye değişiklikler göstermektedir. Örneğin depremsel aktivitelerin yoğun bir şekilde yaşandığı Japonya'da 45 m' den daha yüksek olan yapılar yüksek yapı sınıfına alınıp dinamik hesapla birlikte özel tasarım önlemleri alınırken Türkiye'de bu yapı için 75 m sınırı getirilmiştir (AIJ 2005, TS-500 2000, Hasgür ve Gündüz 1996). Örneğin 20 katlı bir yapı A.B.D. Illinois ve Evanston'da yüksek olarak kabul edilirken, New York' da yüksek olarak algılanmaz (Hasgür ve Gündüz 1996). Örneğin Hindistan'da bir yapının yüksek kabul edilip rüzgâr yüklerinin dinamik hesaplarının yapılabilmesi için, yapının genişlik-yükseklik oranının 4'den büyük olması yada ilk doğal frekansının 1Hz den küçük olması şartları aranır (Krishna ve ark. 2002). Görüldüğü üzere yüksek yapı veya dinamik hesapların dikkate alınma kriterleri ülkelerin veya bölgelerin standartlarına göre farklılıklar göstermektedir.



Şekil 4.3 Dünya'da geçmişten günümüze en yüksek yapılar

Günümüzde ülkemizde ve dünyada yüksek yapıların sayısında hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Geçmişten günümüze dünyanın çeşitli ülkelerindeki en yüksek

yapıların bir kısmı Şekil 4.3'de görülebilir (URL 1). Günümüzde en yüksek yapı Birleşik Arap Emirlikleri-Dubai de Dubai Burcu isimli yapıdır. Yapımı 4 Ocak 2010 da tamamlanmış, 160 katı kullanılabilir ve 828 m yüksekliğindedir (URL 2).

Türkiye'de yüksek yapıların sayısında İstanbul, Ankara, Mersin, Konya vb. büyük şehirlerde artış gözlemlenmektedir. Türkiye'deki bazı yüksek yapıların listesi Tablo 4.1'de verilmiştir (URL 3).

Tablo 4.1 Türkiye'deki bazı yüksek yapılar

Sıra	Kategori	Yapı	Şehir	Yükseklik (m)	Yıl	Kat Sayısı
1	İş Merkezi	Diamond of İstanbul	İstanbul	270	2010	53
2	Otel	Sapphire of İstanbul	İstanbul	261	2009	64
3	İş Merkezi	İşbank Kulesi 1	İstanbul	181	2000	52
4	İş Merkezi/Otel	Mertim Taksim Group Hotel	Mersin	177	1987	52
5	Konut	Şişli Plaza	İstanbul	170	1976	46
6	Konut	Koza Plaza 1	İstanbul	168	2000	45
7	Konut	Tekstilkent Plaza 1	İstanbul	168	2000	44
8	İş Merkezi	SeleniumTwins2	İstanbul	164	2009	44
9	İş Merkezi	Selçuklu Kulesi	Konya	163	2006	42
10	İş Merkezi	Akbank Kulesi	İstanbul	152	1993	40
11	İş Merkezi	Süzer Plaza	İstanbul	154	1993	40

Tez kapsamında yüksek binaların dinamik yükler altındaki dinamik cevaplarının izlenilmesi ve bu yükler karşısındaki ölçülen cevaplarla yapı dinamiklerinden olan doğal frekansların belirlenmesi hedeflendiği için takip eden alt bölümlerde yüksek binalara dinamik yük olarak etki eden sismik ve rüzgâr yüküne ilişkin bilgiler verilecektir.

4.2.1 Dinamik yük olarak rüzgâr ve deprem yükü

Yapı elemanının kendi ağırlığı dışındaki yüklere, hareketli yük denir. Deprem ve rüzgâr yükü de birer hareketli yük oluşturur. Ayrıca bu yükler dinamik bir yüktür. Yapıya çok kısa bir süre etkiyen, başlaması ile tam gücüne ulaşması çok kısa sürede gerçekleşen yük dinamik yüktür (Mertol ve Mertol 2002). Benzer şekilde bir başka tanım olarak da, sisteme etki eden kuvvet küçük zaman birimlerinde kendi değeri ve yönünü değiştiriyor ise ona dinamik kuvvet denir ve bu dinamik yüke dahil edilir (Kasumov 1997). Dinamik yük ile statik yükün oluşturacağı etkiler farklıdır. Statik

yükler altıda yapı statik bir davranış sergiler. Dinamik yükler durumunda ise davranış dinamiktir. Dinamik davranışta yükteki değişmeler belirli bir süre sonra durur, davranışta değişmeler belli bir dengeye kadar sürer. Yapıların, yapı elemanlarının, bir doğal titreşim frekansı (f) ve dolayısı ile periyodu (T) vardır. Tam güçle yükleme noktasına kadar ulaşılması için geçen süre, elemanın doğal titreşim periyodunun 10 katından kısa ise bu bir dinamik yüklemedir (Mertol ve Mertol 2002).

Dinamik kuvvet tipleri genel olarak 3 temel sınıfa ayrılabilir ve

a) Darbesel Kuvvetler (impulsive)

b) Harmonik (sinüzoidal) Kuvvetler

c) Rastgele (Random) kuvvetler

olarak sınıflandırılabilir.

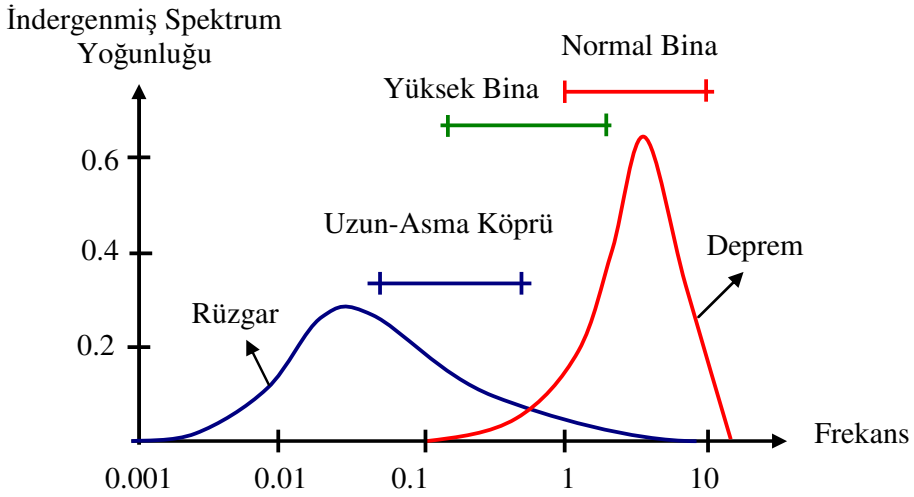
Darbesel Kuvvetler: Tesir süresi kısa olan kuvvetler darbesel kuvvetler olarak nitelendirilir. Çarpma ile ortaya çıkan yüklerdir ve çok kısa bir zaman içinde belli bir değere erişen kuvvetlerdir.

Harmonik Kuvvetler: Genlik-zaman ilişkisi bir takım sinüs fonksiyonu olarak analitik şekilde belirtilen dinamik kuvvetlerdir. Harmonik kuvvetler ile yapı davranışı arasındaki ilişki analitik olarak ifade edilebilir.

Rastgele Kuvvetler: Mühendislik bakımından en önemli olan dinamik kuvvetlerdir. Depremden yapıya gelen dinamik kuvvetler bu sınıfa girer. Genliklerinde olan değişiklikler periyodiklik göstermezler. Yük-zaman ilişkisi matematiksel olarak ifade edilemezler. Kuvvet, deprem bitince ortadan kalkar. Dinamik kuvvetler zamanla değişir. Bu değişim ve sistemin doğal titreşim periyodu önemlidir.

Deprem ve rüzgâr yüklerinin yapı tiplerine göre spektrum yoğunluklarına ilişkin bilgi Şekil 4.4'de birlikte ifade edilmiştir (Ferry-Borges ve Castanheta 1971). Şekil 4.4 incelendiğinde normal binaların en fazla deprem yükünden etkilendiği

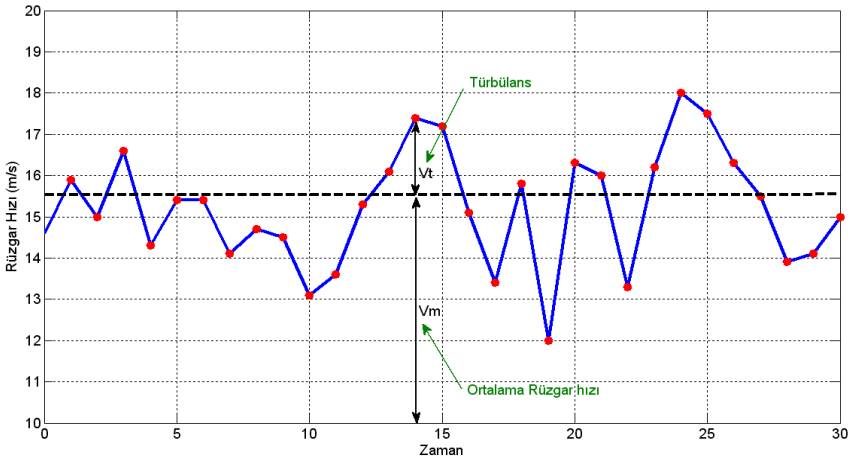
görülürken uzun-asma köprülerin çoğunlukla rüzgâr yükünden etkilendikleri görülmektedir. Yüksek binalara etkiyen yükler incelendiğinde ise, normal yükseklikteki binalar için rüzgâr önemsiz iken yüksek binalarda deprem yükü yanında rüzgâr yükünün de ne kadar önemli ve dizayn aşamasında dikkate alınması gerektirdiğini açıkça göstermektedir.



Şekil 4.4 Deprem ve rüzgâr yüklerinin yapı tiplerine göre yaklaşık spektrum yoğunlukları

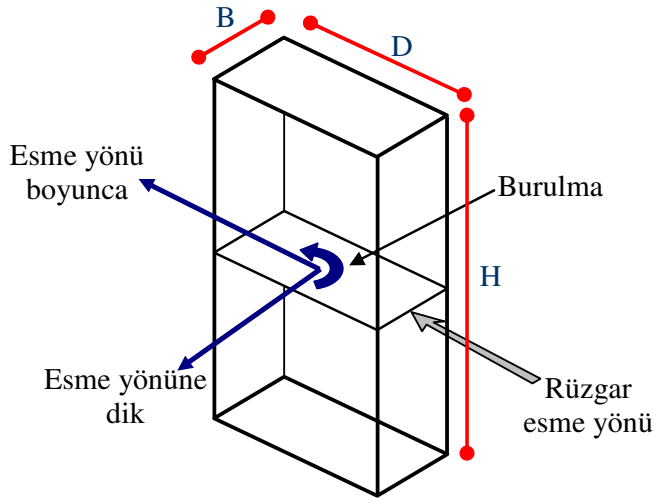
4.2.2 Rüzgâr yükü

Rüzgâr hız ve yönü, zamana göre değişken karakter sergileyen, çok karmaşık bir doğa olayıdır. Rüzgâr atmosfer içerisindeki yüksekliğine bağlı olarak farklı istatistiksel özelliklere bağlı dinamik bir yapı gösterebilir. Genellikle rüzgâr ortalama bir hız ile bu ortalama değer etrafında salınım gösteren, türbülans olarak adlandırılan, bir yapı gösterirler. Ortalama rüzgâr hızı statik bir yük oluştururken, türbülans ani ve zamanla değişen çarpma etkisi ile, bina üzerinde dinamik bir etki oluşturur. Türbülansın yapı üzerine etkisi, sadece türbülansın karakterine değil aynı zamanda yapının boyut ve dinamik karakterlerine de bağlıdır (AIJ 2005). Şekil 4.5'de belirli bir süre aralığı için tanımlanan ortalama rüzgâr hızı (Vm) ve ortalamadan olan sapmaları gösteren türbülans (Vt) görülebilir. Toplam rüzgâr hızı bu iki bileşenin toplamı olarak ifade edilir.



Şekil 4.5 Rüzgâr türbülans ve ortalama değeri

Rüzgârın sebep olduğu yapısal titreşimler büyük oranda, yapının şekli, rijitliği (yada esnekliği) ve sönümleme karakterleri ile ilgilidir. Fakat bu sadece yapının karakterlerine değil, aynı zamanda rüzgârın karakterine bağlıdır. Örneğin, rüzgârın türbülans yapısı, yapısal titreşimi etkileyen en büyük etkenlerden birisidir (Liu 1991, Mendis ve ark. 2007).

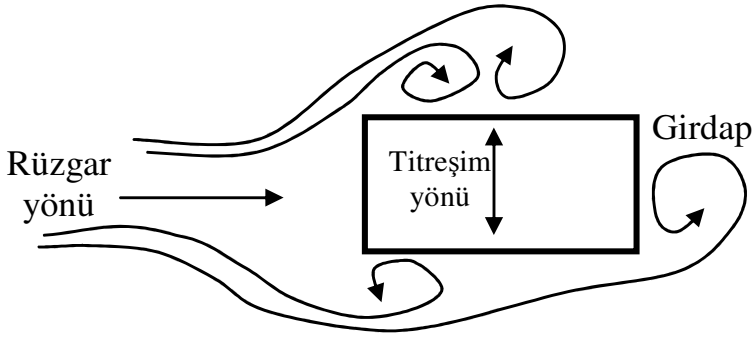


Şekil 4.6 Dikdörtgen kesitli bir yapıda, rüzgâr esme yönüne göre yük-titreşim tanımları

Dinamik yüklerin etkisi altındaki yüksek yapılar rüzgâr esme yönü boyunca, dik doğrultuda ve yapı ekseni boyunca burulma titreşimi yaparlar (Kijewski ve

Kareem 1998). Şekil 4.6'da yüksekliği H, derinliği D ve genişliği B olan, dikdörtgen kesitli bir yüksek yapıya etkiyen rüzgâr yönü ve yapı ana yönleri boyunca oluşabilecek yük-titreşim türleri görülebilir (AIJ 2005).

Rüzgâr esme yönü boyunca olan titreşimler, binaya ön ve arka yüzeyinden etkiyen rüzgâr kuvveti ile oluşurlar. Rüzgâr esme yönüne dik yönde olan titreşimler, yapının her iki kenarına etkiyen değişken yapıdaki rüzgâr sebebiyle oluşur. Burulma ise, yapıya etkiyen rüzgârın yapı üzerindeki basınç dağılımının düzensizliği sonucu ortaya çıkar (Kijewski ve Kareem 1998). Hem burulma hem de rüzgâr yönüne dik gerçekleşen titreşimler genellikle, yapının yan yüzeylerine etkiyen girdap kopmaları yüzünden (Vorteks) meydana gelmektedir (AIJ 2005).



Şekil 4.7 Girdap kopmaları ve etkisi

Yapıların girdap kopmalarının doğasından dolayı titreşimi karmaşıktır (Şekil 4.7). Girdap kopmaları dar bir frekans bandında etkilidir ve yapıya sinüzoidal bir yük olarak etki ederler. Yapı yüksekliği arttıkça yapının doğal frekansı düşer ve girdap kopmalarının frekansına yaklaşır. Bunun sonucu olarak, yapıda rezonans artar ve yapının deplasman cevabı giderek artar (AIJ 2005, Liu 1991).

Yüksek yapıların rüzgâr yüklerine ilişkin kod ve standartları, ülkeden ülkeye değişiklikler göstermektedir. Kijewski ve Kareem (1998), Avustralya, Amerika, Kanada, Çin, Avrupa, İngiltere ve Japonya gibi ülkelerin rüzgâr yüklerine ilişkin kodlarını karşılaştırılmalı olarak incelemiş ve değerlendirmiştir. Çalışmanın yapıldığı dönemde, örneğin Japonya rüzgâr esme yönü boyunca, rüzgâr esme yönüne dik ve burulma etkilerini dikkate alarak tasarım yaparken, Avustralya ve Kanada ilk iki

bileşeni dikkate alarak, Amerika ve Avrupa standartları yalnızca ilk bileşene göre yüksek yapıları tasarlamışlardır. Ülkemizde yakın geçmişe kadar yüksek yapılara etkiyen rüzgâr yüküne ilişkin detaylı bir standart ve yönetmelik mevcut değil iken, İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Boğaziçi Üniversitesi-Kandilli rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü-Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı "İstanbul Yüksek Binalar Rüzgâr Yönetmeliği" isimli bir yönetmelik üzerine çalışmalar yürütmektedir.

4.2.2.1 Rüzgâr tüneli testi çalışmaları

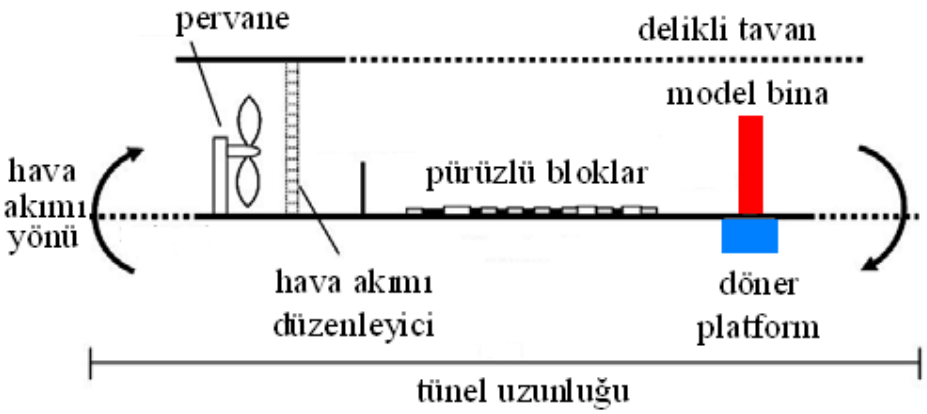
SEM v.b. analitik modellerin rüzgâr yüklerinin belirli tiplerini ve bu yüklerle ilişkili yapısal cevapların tahmin edemeyeceği bir çok durum vardır. Örneğin, yapının aerodinamik şekli oldukça sıra dışıdır yada yapı o kadar esnektir ki yapının hareketleri üzerine etkiyen aerodinamik güçleri etkiler. Böyle durumlarda, bina üzerine etkiyen rüzgâr yüklerinin daha doğru tahmini bir "sınır-katmanı rüzgâr tüneli" aeroelastik model testi aracılığı ile elde edilebilir (Mendis ve ark 2007).

Rüzgâr tüneli testi çoğu yüksek binanın tasarımı için yaygın bir uygulama şeklidir. Çoğu durumlarda, yüksek bina sahipleri aynı zamanda rüzgâr tüneli testine izin vermeleri için bilgilendirilmektedir. Çünkü rüzgâr tüneli testi ile ilgili harcamalar yapının harcamalarında önemli ve anlamlı derecede tasarruf sağlamaktadır. Özellikle rüzgâr tüneli testi sayesinde yapının rüzgâr yükü tasarımına ilişkin daha ekonomik yaklaşımlar rahatlıkla uygulanabilmektedir. Örneğin, Avustralya rüzgâr kodu her hangi bir yapının rüzgâr yükü tasarımını belirlemek için rüzgâr tüneli testine kod tavsiyelerine uygun bir alternatif olarak izin vermektedir (Mendis ve ark 2007).

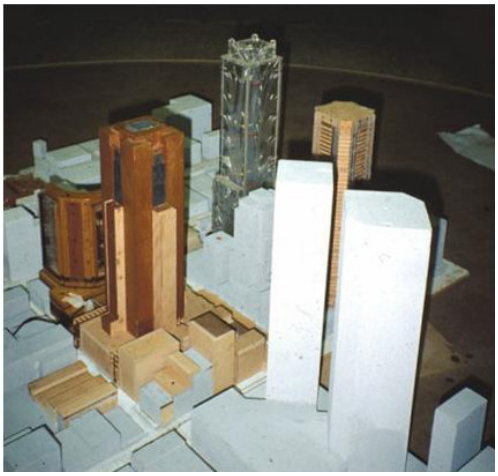
Rüzgâr tüneli testi, mühendislerin karmaşık yapılar üzerine etkiyen rüzgâr yükünün doğasını ve şiddetini belirlemelerine izin veren etkili ve güçlü bir araçtır. Rüzgâr tüneli testi özellikle yapının ve çevresindeki arazinin karmaşıklığı sebebiyle meydana gelen karmaşık rüzgâr akışı yüzünden basitleştirilmiş kod uygulamaları kullanarak rüzgâr yükünün belirlenmesine olanak sağlamayan durumlarda çok yararlıdır.

Rüzgâr tüneli testi araştırma ve inceleme altındaki binanın modeli üzerine rüzgâr yönünü temsil eden binanın yönüne göre bağıl değişen açılarda esen bir hava

akımı gerektirir. Bu genellikle rüzgâr tüneli içerisinde dönen bir platform üzerinde yapı modelinin yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir ve istenilen hızlarda ve açılarda denemeler yapılarak sonuçlar değerlendirilir. Rüzgâr tüneli testi ya açık-akım yada kapalı-akım tipi şeklindedir. Açık-akım rüzgâr tüneline ilişkin bileşenler Şekil 4.8' de ve rüzgâr tüneli için hazırlanmış Melbourne şehir modeline ait bir bölüm Şekil 4.9'da görülebilir (Mendis ve ark. 2007).



Şekil 4.8 Açık-devre rüzgâr tüneli bileşenleri



Şekil 4.9 Melbourne şehir modeline ait bir bölüm

Bir yüksek yapı projesinde sayısal olarak hava tüneli çalışmalarının gerekli olup olmadığına karar vermede rehber olacak genel hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Hasgür ve Gündüz 1996).

a) Binanın yükseklik-genişlik oranı 5 ten büyüktür. Başka bir deyişle yapı narin bir binadır.

b) Yaklaşık hesaplar girdap kopması olasılığının varlığını göstermektedir.

c) Yapı yoğunluk olarak hafiftir.

d) Yapının rijitliği binanın ortasında özellikle toplanmış olup, burulma bakımından esneklik yapmaktadır.

e) Hesaplanan titreşim periyodu 5 ile 10 s. arasındaki gibi oldukça uzundur.

f) Bina hakim rüzgârların estiği yöndeki titreşim oluşturacak şekilde hassas bir yerde bulunmaktadır.

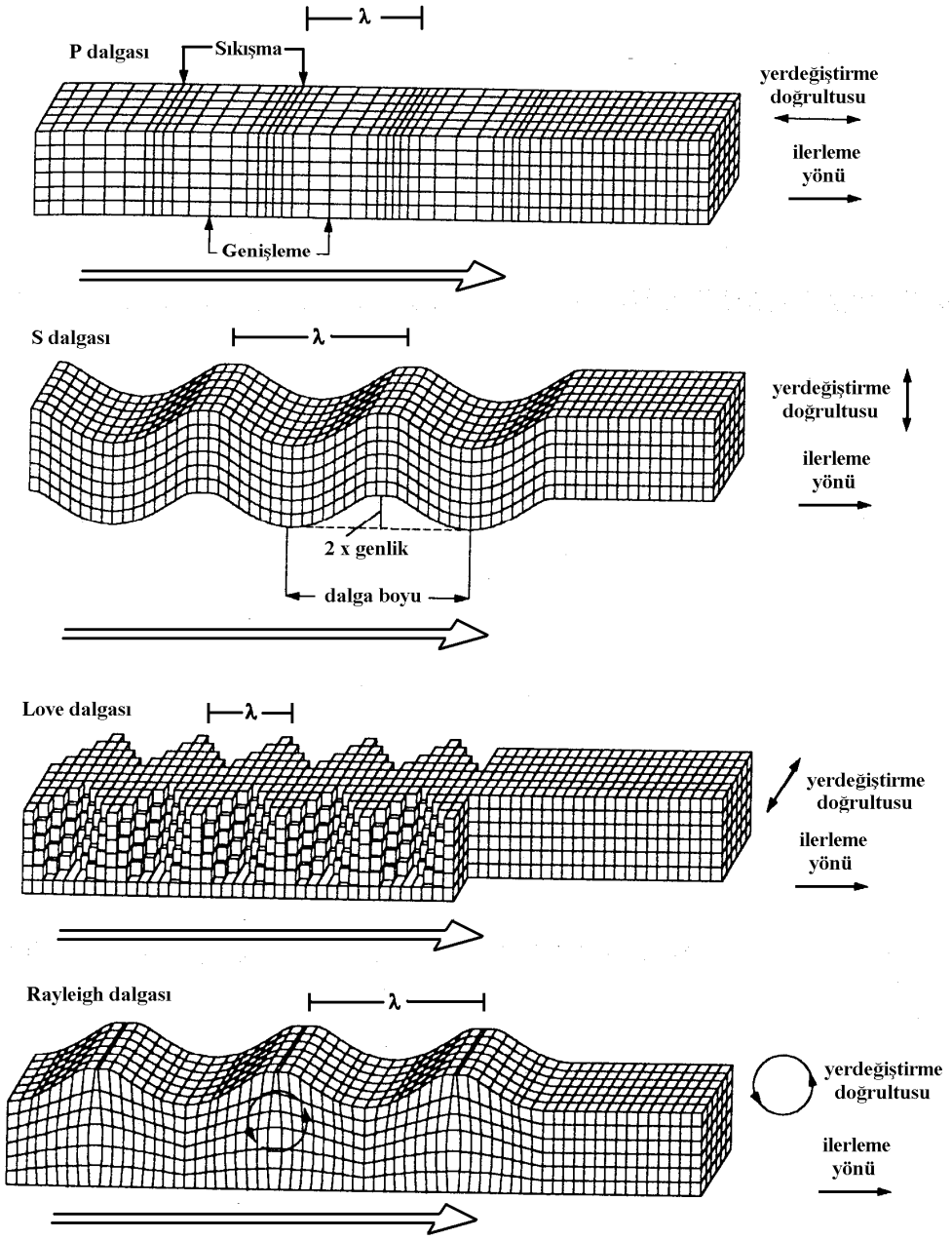
g) Binayı kullanmada, kullananların konforu, rahatı en önemli rolü oynamaktadır. Konut ve otellerde bulunanlar, büro tipi yüksek yapılarda bulunanlara göre bina titreşimlerinden çok daha fazla rahatsız olurlar.

4.2.3 Deprem yükü

Yer kabuğunda iç kuvvetlerin neden olduğu gerilimlerin boşalması ve ani kırılmalar sonucu meydana gelen yer kabuğu hareketlerinin yol açtığı sarsıntılara tektonik depremler adı verilir. Tektonik depremler şiddet ve etki alanı bakımından, volkanik ve çöküntü depremlerine göre, en önemli ve yıkıcı olanlarındandır. Yeryüzünde olan depremlerin %90 ı bu gruba girer ve Türkiye'de olan depremlerin büyük çoğunluğunu oluşturur.

Deprem sırasında açığa çıkan enerji, ses veya su dalgalarına benzeyen ve sismik dalgalar adı verilen dalgalar ile yayılır. Bu dalgalardan cisim dalgaları, P dalgaları ve S dalgaları olarak ikiye ayrılır. P dalgaları, en hızlı yayılan dalgalardır ve titreşim hareketi yayılma doğrultusu ile aynıdır. S dalgaları daha yavaş yayılırlar ve titreşim hareketi yayılma doğrultusuna dik olan dalgalardır. Yüzey Dalgaları ise cisim dalgalarına göre daha yavaş yayılırlar ancak genlikleri daha büyüktür. Hızı daha fazla olan Love ve genliği daha büyük olan Rayleigh dalgaları olarak ikiye ayrılırlar. Yapılarda yıkıma yol açan dalgalar S dalgaları ile yüzey dalgalarıdır. Bu

dalgaların elastik ortamdaki yayılma özellikleri Celeb ve Kumbasar (2000)'de grafiksel olarak bir arada gösterilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Elastik ortamda dalga türleri ve yayılma özellikleri

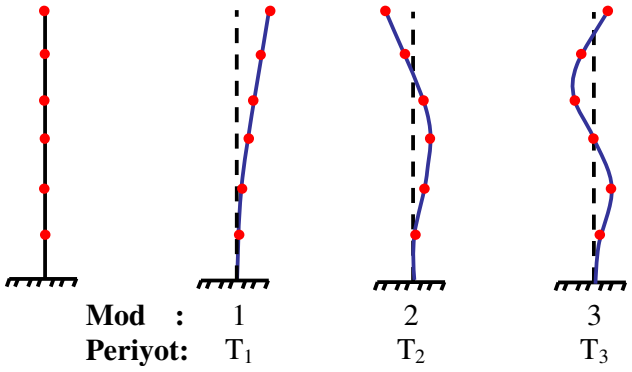
Ani kırılmalar sonucu açığa çıkan enerjinin ürettiği deprem dalgaları yapının zemine kadar geldiğinde kuvvetli yer hareketi olarak ortaya çıkar. Bu harekete karşılık olmak üzere bütün yapı boyunca eylemsizlik kuvvetleri oluşur. Üç bileşene sahip olan bu kuvvetlerden yalnızca yatay olanlarla ilgilenmek, düşey bileşen olan üçüncü bileşeni yapının düşey kuvvetler altında tasarımı zaten yapıldığı ve yapının yeterli rezerve sahip olduğu için ihmal etmek suretiyle genelde yalnızca yatay deprem kuvvetlerin etkisinde olan çok katlı yapılar incelenir. Eğer çok katlı yapı üç boyutlu tasarımının yapılması zorunlu bir mimari tasarıma sahipse, ayrıca yapı faya 10 km gibi yakın mesafede ise düşey bileşen alınabilir.

Yapıda deprem kuvvetine zıt yönlü ortaya çıkan eylemsizlik kuvveti, binanın kütlesine, zemin ivmesine ve yapının rijitlik ve sönüm gibi özelliklerine bağlıdır (Hasgür ve Gündüz 1996). Deprem riski olan bir bölgede yapılacak yapının deprem etkisiyle maruz kalacağı yükler, yapının kütle, rijitlik ve sönüm gibi dinamik özellikleri ile deprem hareketinin özellikleri arasındaki ilişkiye bağlıdır (Mertol ve Mertol 2002).

Çok katlı yapıda, kat yüksekliği arttıkça yapı ağırlığı ve sonuç olarak yatay deprem kuvveti artar. Yapının yatay yükler altında davranışında bazı özellikler aranır. Yapı yüksekliği arttıkça yapıda malzeme mukavemeti yerine yapının yatay şekil değiştirmesi önem kazanır (Mertol ve Mertol 2002). Çok katlı yapıda yatay kuvvetler altındaki davranışların incelenmesi, ön analiz ve boyutlandırmada yatay deplasmanların hesaplanması gerekmektedir. Hafif şiddetteki depremlerden doğan titreşimlerin bina içinde yaşayanlarca hissedilmemesi, seyrek ve orta şiddette depremlerde yapıda lineerlik sınırı pek aşılmaması, çok seyrek ve büyük şiddetteki depremlerde can kaybının olmaması, onarılabilir hasarların oluşması istenir. Bunların tümünün birlikte gerçekleşebilmesi için çok katlı yapının, hafif ve orta şiddetteki yatay yükler altında oldukça rijit bir davranış göstermesi, büyük yatay yükler altında hızla artan plastik deformasyonların meydana gelmesi ile elastik olmayan davranışta bulunması deprem enerjisinin yutulması gerekir. Yatay deplasmanlar sınırlandırılmalıdır.

4.3 Yapı Mod Şekilleri ve Frekansları

Bütün yapıların kendine ait olan doğal frekansları vardır. Yüksek binalar, asma köprüler v.b. mühendislik yapılarının dinamik analizleri çoğunlukla yapıya ait kütle, rijitlik ve sönümleme v.b. gibi parametreler yardımıyla analitik modelleri oluşturularak yapılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi analitik modellerin oluşturulmasında en yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Sonlu elamanlar yöntemi, yapının yapım aşamasında ve durum değerlendirilmesinde en etkili araçlardan birisidir ve günümüzde hemen hemen bütün mühendislik yapılarının tasarımında ve dinamik analizde modal parametrelerden olan mod şekilleri, doğal frekansların ve sönümleme değerlerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu parametreler sadece yapının yükler altındaki dinamik davranışlarının belirlenmesinde değil ayrıca yapının maruz kaldığı deprem, rüzgâr v.b. ciddi yükler karşısında hasar alıp almadığının tespit edilmesinde de kullanılmaktadır (Salawu 1997).



Şekil 4.11 Çok dereceli sistemin dinamik davranışı - mod şekilleri ve periyotlar

Genellikle bütün mühendislik yapıları çok serbestlik derecelidir. Yapıya ait gerçek çözüm ile aynı yapıya ait basitleştirilmiş çözüm modeli arasında büyük bir fark yoktur. Basitleştirmede serbestlik derecesinin azaltılması çözümü kolaylaştırır. Serbestlik derecesinin azaltılması yapının deformasyon mod şekline bağlıdır. Esas sistemle, model olarak kabul edilen sistemin deformasyon mod şekli uygun olursa yapılan kabul uygun olabilir. Çok serbestlik dereceli sistemlerde serbest titreşimden doğal modlar bulunur. Çok serbestlik dereceli sistemlerde serbestlik derecesi sayısı kadar doğal mod, yada bir başka ifade ile karakteristik deformasyon şekilleri, ve

bunlara karşılık gelen doğal titreşim periyotları mevcuttur. Şekil 4.11 de bir yüksek binanın ilk üç moduna ait mod şekilleri ve periyotları görülebilir.

Dikkate alınacak yeterli mod sayısı yapı tipine göre farklılıklar gösterebilir. Yüksek yapılarda yüksekliği değişken kuleler olmadığı sürece tüm modları kullanma gereği doğmaz. Genel olarak $T_i \leq 0.4$ sn olana dek yada ilk 3 moda ait periyotları dikkate almak dinamik hesaplar için yeterli bilgiyi sağlamaktadır (Chopra 1995 ,Hasgür ve Gündüz 1996). Baca, kule tipindeki yapılarda ise daha fazla sayıda mod kullanılması gereklidir (Mertol ve Mertol 2002). Yapı yüksekliği arttıkça yapının kütlesi aratacağından, yapı yüksekliği ve frekansı arasında ters yönlü bir ilişki oluşmaktadır. Böylelikle, yapı yüksekliği arttıkça yapının doğal frekansları azalmaktadır. Örneğin, Japon sönümleme veritabanına göre H yüksekliğindeki bir binanın ilk doğal frekansı f_1

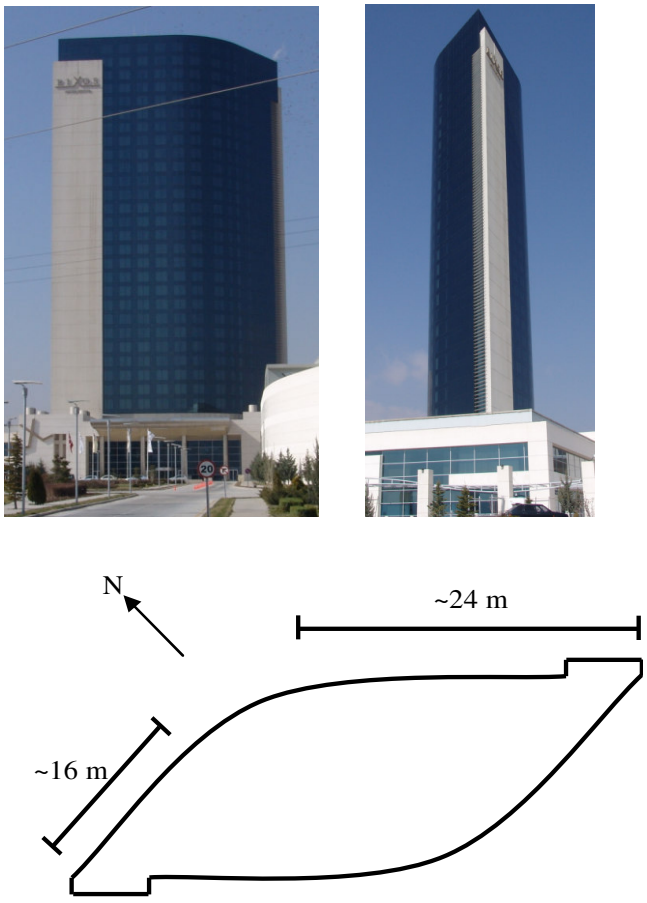
$$f_1 = \frac{50}{H} \tag{4.1}$$

formülüne göre yaklaşık olarak elde edilebilir (Li ve ark 2008).

5 TAM ÖLÇEKLİ İZLENEN YÜKSEK YAPI VE TESİS EDİLEN SENSÖR SİSTEMLERİ

5.1 Obje Hakkında Genel Bilgiler

Rixos otel binası toplamda 30 katlı olup lobi katından itibaren yüksekliği yaklaşık 100 m dir. Temel alanı 685 m^2 dir. Binanın taşıyıcı sistemi betonarme olup, kolon ve perdelerden oluşmuştur. Taşıyıcı sistemde değişik ebatlarda 44 adet kolon ve iki adet perde-çekirdek bulunmaktadır. Plan düzleminde merdiven ve asansör kovalarını kapsayan iki adet betonarme çekirdek ile yatay taşıyıcılık sağlanmıştır. Dolayısıyla deprem ve rüzgâr gibi yanal etkiler için gerekli rijitlik sağlanmıştır. Binanın dış yüzeyi cam olarak kaplanmış olup aerodinamik bir tasarıma sahiptir (Şekil 5.1).

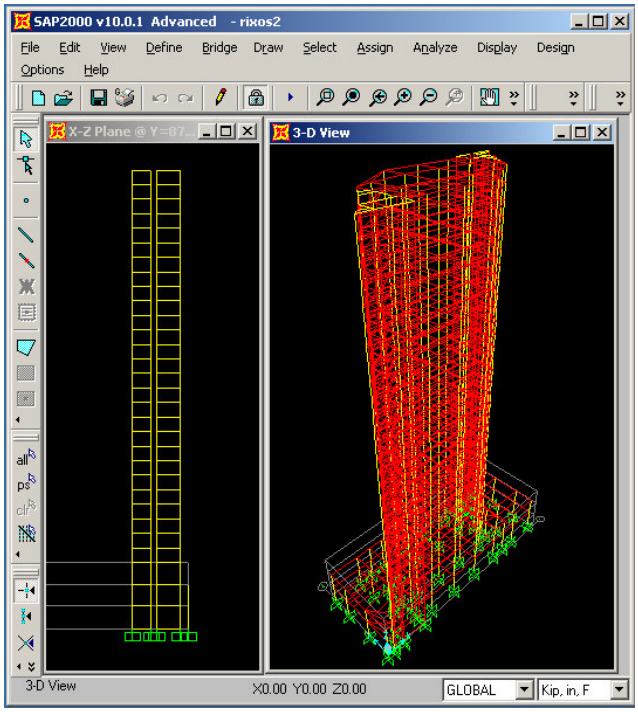


Şekil 5.1.Yapının ön (üst sol), yan (üst sağ) ve üst plan (alt) görünüşü

Binanın projelendirme ve yapımı, Türk Deprem Yönetmeliği -1998 (TDY-1998) ve TS-500-2000 gibi standartlara göre gerçekleştirilmiştir. Binanın yapımında C25 (basınç dayanımı 25 MPa olan beton) ve S420 (çekme dayanımı 420 MPa olan donatı) kullanılmıştır. Zemin emniyet gerilmesi 3.94 kg/m^2 ve temel sistemi radye olarak seçilmiştir. Taşıyıcı sistem süneklik düzeyi yüksek olarak düşünülmüş, dolayısıyla eşdeğer deprem yükünde hesabında taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) 7 olarak kabul edilmiştir. Bölgenin depremselliğine göre tasarım 4. derece deprem bölgesi için yapılarak etkin yer ivme katsayısı 0.10 g olarak, bina önem katsayısı (I) ise 1 olarak alınmıştır. Zemin sınıfı Z2 seçilmiş ve zemin karakteristik periyotları 0.15-0.40 sn olarak alınmıştır (TDY 1998 1998, TS 500-2000 2000).

5.1.1 Sonlu Elemenlar Modelinin (SEM) oluşturulması

İzleme altında olan objeye ait mimari ve betonarme proje bilgileri yardımıyla, objenin 3 boyutlu modeli SAP2000 10.0.1yapı analiz programın yardımıyla, oluşturulmuştur (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Yapının SAP2000 de oluşturulan SE Modeli

Objenin bu modeli yardımıyla teorik doğal frekansları ve bu frekanslara ait şekil değiştirme modları hesaplanmıştır. SEM den elde edilen ilk 6 mod'a ait frekans bilgileri Tablo 5.1'de verilmiştir. Dinamik analizlerde ilk adım olarak genelde doğal frekans değerleri ve bu frekanslara ait şekil değiştirme modları hesaplanmaktadır. Bu değerler yapının her hangi bir zorlayıcı kuvvet altındaki davranışını tespit etmektedirler. Bu modları inceleyerek zorlayıcı kuvvetlerin yapıya hangi modlarda daha çok enerji verebileceği ve yapının hangi noktasındaki tepkiye hangi modun daha büyük katkı yapacağı tespit edilmektedir. Genellikle yapılan çalışmalarda az sayıda modun ve bunlarla ilgili frekans değerlerinin hesaplanması pratik açıdan yeterli olduğu ifade edilmektedir.

Analizlerde dikkate alınacak mod sayısı yapı tipine göre değişmektedir. Yüksek bina analizlerinde ilk mod toplam tepkinin yaklaşık %90'ını içerdiğinden, bu tür yapılar için yapı davranışını belirlemede ilk üç modun dikkate alınması yeterli olmaktadır (Dumanoğlu ve Severn 1987).

Tablo 5.1. Rixos binasının ilk 6 moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri

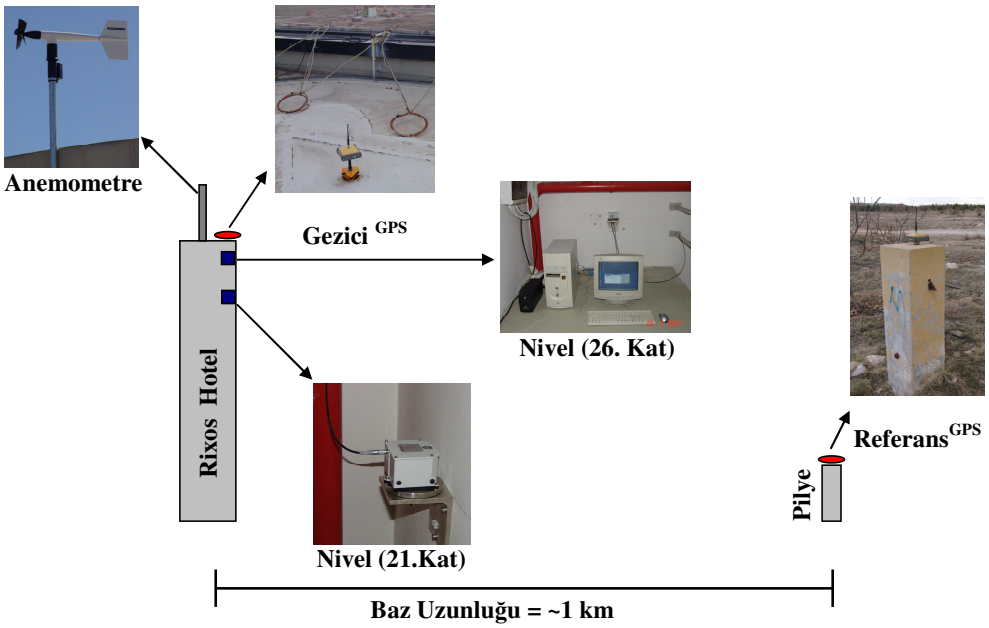
Mod No.	Frekans	Periyot
1	0.38 Hz	2.6 sn
2	0.55 Hz	1.8 sn
3	0.62 Hz	1.6 sn
4	1.25 Hz	0.8 sn
5	1.61 Hz	0.6 sn
6	2.13 Hz	0.5 sn

5.2 Objeye Sensörlerin Yerleştirilmesi ve Sensörler ile İlgili Bilgiler

Bu çalışmada Leica firmasının NIVEL200 eğim sensörü serisinin NIVEL220 modeli kullanılmıştır. Eğim sensörleri binanın iki çekirdek-perdelerinden kuzeye bakan çekirdek-perde üzerine binanın iç kısmına tesis edilmiştir (Şekil 5.3). Binada, çekirdek-perde kısmı yangın merdiveni ve asansörleri içermekte olup PC ve eğim sensörlerinden birisi 26. kat, diğer eğim sensörü ise 21. kat seviyesinde monte edilmiştir (Yiğit ve ark. 2008, 2009, 2010).

Rüzgârın hız ve yön verilerini elde etmede Young Model 05103 anemometresi kullanılmıştır. Anemometre binanın damında bulunan ek bina üzerine hiçbir fiziksel engelin olmayacağı sağlıklı verilerin toplanabileceği hakim bir noktaya tesis edilmiştir (Şekil 5.3). Anemometre tesisinde sıfır doğrultusu eğim sensörünün Y ekseni ile paraleldir.

Binanın rüzgârlı havalardaki yatay hareketlerinin belirlenmesi amacıyla bina üzerinde eğim sensörünün bulunduğu çekirdek-perde üzerine denk gelen bir GPS noktası tesis edilmiştir (Şekil 5.3). Kinematik-GPS ölçmeleri için yatayda baz ölçme duyarlığı 10+2 ppm olan Topcon^{TM} marka Hiper seri GPS alıcıları kullanılmıştır.



Şekil 5.3 Sensör sistemleri ve bina üzerindeki konumları

Yapı üzerine tesis edilen sensörlere ilişkin daha detaylı bilgiler takip eden alt bölümlerde verilmiştir.

5.2.1 GPS sensörü

Binanın rüzgârlı havalardaki yatay hareketlerinin belirlenmesi amacıyla bina üzerinde eğim sensörünün bulunduğu çekirdek-perde üzerine denk gelen bir GPS noktası tesis edilmiştir (Şekil 5.4). GPS noktası yeri seçiminde ayrıca uydu

görüşünün de rahat ve engelsiz olabileceği bir yer olması kriteri göz önüne alınmıştır. Tesis için tarafımızdan tasarlanan üzerine GPS kurulabilen tabla bina üzerinde belirlenen yere sağlam bir şekilde monte edilmiştir. Referans noktası olarak binadan yaklaşık 1 km uzaklıkta ve sağlam zemin üzerinde pilye tesisli bir nokta seçilmiştir (Şekil 5.5). Bu tez kapsamında, Kinematik GPS ölçmeleri için yatayda baz ölçme duyarlığı 10+2 ppm olan Topcon™ marka Hiper seri GPS alıcıları kullanılmıştır. Bahsedilen GPS alıcı ve antenine ilişkin detaylı bilgiler Tablo 5.2 de görülebilir



Şekil 5.4 Yapı üzerinde sabitlenen GPS noktası tesisi



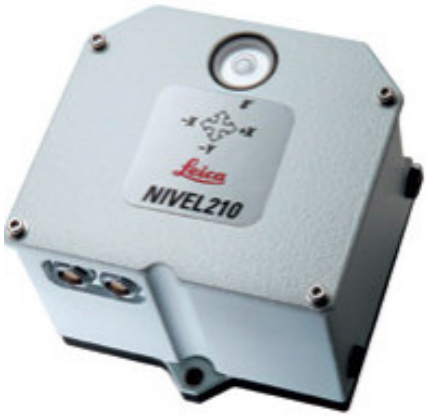
Şekil 5.5 Yapı üzerindeki gezici nokta ve referans noktası

Tablo 5.2 HiPer Pro GPS alıcılarının özellikleri

İzleme Özellikleri	İzleme kanalları	standart: 40 L1 GPS (20 GPS L1+L2) Seçim: 20 GPS L1+L2 (GD), GPS L1+GLONASS (GG), 20 GPS L1+L2+GLONASS (GGD)
	İzlenen sinyaller	L1/L2 C/A and P Code & Carrier and GLONASS
Ölçme Özellikleri	Statik, Hızlı Statik	Yatay: 3mm+ 0.5ppm (x baz uzunluğu) Düşey: 5mm+ 0.5ppm (x baz uzunluğu)
	GZK	Yatay: 10mm+ 1.0ppm Düşey: 15mm+ 1.0ppm
Hafıza & Kayıt	Ham data kayıt	1Hz den 20 Hz
	Veri tipi	L1 and L2, GPS and GLONASS Kod ve taşıyıcı faz
Veri giriş/çıkış	Gerçek zamanlı veri çıktıları	RTCM SC104 version 2.1, 2.2, 2.3, CMR, CMR+
	diğer çıktılar	NMEA 0183 version 2.2
	çıktı oranı	TPS format 1 Hz den 20Hz e kadar.
GPS Anten Özellikleri	GPS Anteni	Birleşik
	Anten tipi	Merkez-tepe UHF anteni
	Yer düzlemi	düz bir yer düzlemi üzerinde anten

5.2.2 Eğim sensörü

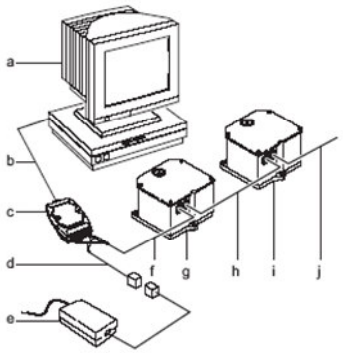
Bu çalışmada Leica firmasının NIVEL200 eğim sensörü serisinin NIVEL220 modeli kullanılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Nivel 220 eğim sensörü

Nivel200 eğim sensörü eğimi ve yönünü eş zamanlı olarak ölçen iki eksenli yüksek hassasiyetli eğim sensörüdür. Sensör elektro-optik bir prensibe göre

çalışmakta olup yatay bir yüzey olan sıvı yüzeyi ile eğime sahip olan yüzeyin arasındaki açının ölçülmesine dayanır. Bu elektro-optik açı ölçme sistemi tarafından ölçülen açı, uygulanan yönteme bağlı olarak dijital veya analog çıkış sinyaline dönüştürülür (Leica Geosystem 2007). NIVEL220 sistemine ait izleme sistemi bileşenleri Şekil 5.7 de görülebilir.



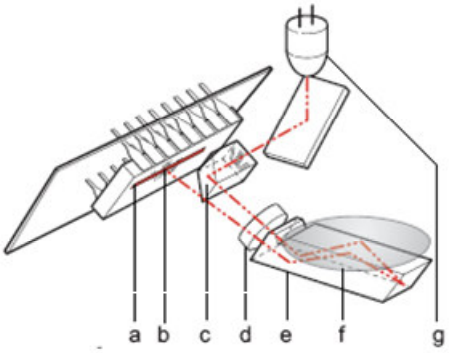
a) Bilgisayar
b) Kablo- Dönüştürücü/bilgisayar
c) RS485 dönüştürücü
d) Kablo- Lemo 1/Dönüştürücü
e) Güç sağlayıcı
f) Kablo- Dönüştürücü/Lemo 0
g) Nivel220 RS485
h) Kablo – Lemo 0/Lemo 0
i) Nivel220 RS485
j) Kablo – Lemo 0/Lemo 0

Şekil 5.7: NIVEL220 izleme sistemi bileşenleri

NIVEL220 ile X ve Y yönlerindeki eğim değişimleri 0.001 mrad (mm/m) doğruluk ile belirlenebilmektedir. Sensör ±1.5 mrad aralığında çalışmaktadır. Ayrıca NIVEL220 ile eğim değişimlerinin belirlenmesi yanında içerisinde bulunan sıcaklık sensörü yardımıyla sıcaklık değerleri ölçülebilmektedir. Sensör içerisindeki bileşenler Şekil 5.8'de sensöre ilişkin özellikler Tablo 5.3 de verilmiştir.

Tablo 5.3 Nivel 220 özellikleri

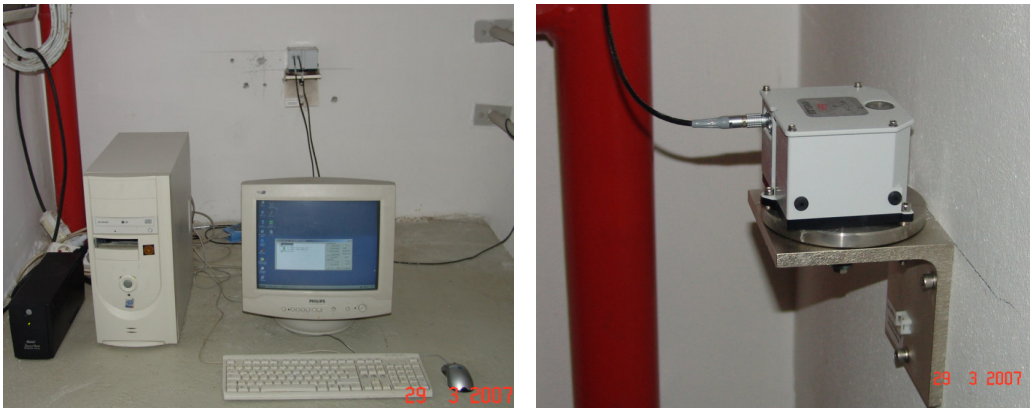
Özellik	**Büyüklük**
Ölçme aralığı	-1.5 to +1.5 mrad
Çözünürlük	0.001 mrad (mm/m)
Sıfır-noktası kararlılığı	0.00471 mrad / ^{o}C
Doğruluk	± 0.0047 mrad
Isı sensörü ölçme aralığı	-20 ile +50 ^{o}C



a) CCD dizisi
b) Eşlenmiş çizgi
c) Çizgi prizma
d) Lens sistem,
e) Prizma
f) Sıvı yüzeyi
g) Işık veren diyot

Şekil 5.8 Sensor bileşenleri

Eğim sensörleri binanın iki çekirdek-perdelerinden kuzeye bakan çekirdek-perde üzerine binanın iç kısmına tesis edilmiştir. Binada, çekirdek-perde kısmı yangın merdiveni ve asansörleri içermekte olup PC ve eğim sensörlerinden birisi 26. kat, diğer eğim sensörü ise 21. kat seviyesinde monte edilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 26. kattaki eğim sensörü ve bilgisayar (sol), 21. kattaki eğim sensörü (sağ)

Eğim sensörü ile ölçülen veriler Şekil 5.10 da verilen dosya örneğinde görülebilir. Dosyada sırasıyla; ölçü numarası, seri port ismi, eğim sensörü ismi, tarih, saat, X yönündeki eğim, Y yönündeki eğim ve sıcaklık değerlerini içermektedir.

nivel220_rixos - Not Defteri

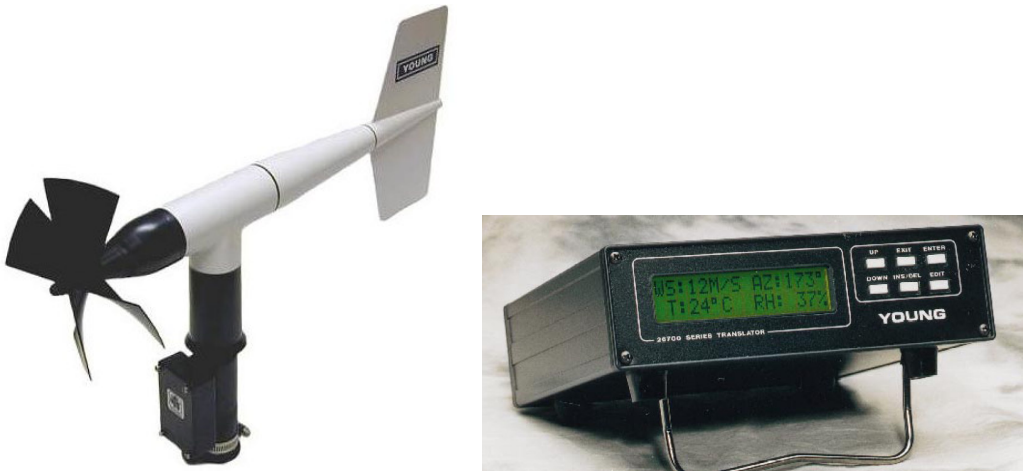
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım

```
00000000 COM1 N1 26/5/2007 10:28:53.968 -0.066 +0.325 +22.5
00000001 COM1 N2 26/5/2007 10:28:54.437 +0.515 +0.617 +24.5
00000002 COM1 N1 26/5/2007 10:28:55.421 -0.071 +0.330 +22.5
00000003 COM1 N2 26/5/2007 10:28:55.890 +0.493 +0.643 +24.5
00000004 COM1 N1 26/5/2007 10:28:56.875 -0.061 +0.315 +22.5
00000005 COM1 N2 26/5/2007 10:28:57.343 +0.510 +0.618 +24.5
```

Şekil 5.10 Depolanan eğim sensörü ölçülerine ait dosya örneği

5.2.3 Anemometre

Bu çalışmada rüzgârın hız ve yön verilerini elde etmede Young Model 05103 anemometresi kullanılmıştır. 0 ile 100 m/s aralığındaki rüzgâr hızını ±0.3 m/s doğruluğunda, 0^o ile 360^o aralığında $\pm 3^o$ doğruluğunda da yön değerlerini ölçebilmektedir (Tablo 5.4). Anemometre verileri yine aynı firmanın Young 26700 programlanabilir veri kayıt ünitesinde, kullanıcı tarafından istenilen aralıkta, depolanmaktadır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Young Model 05103 Anemometre (sol) Young 26700 kayıt ünitesi (sağ)

Anemometre binanın damında bulunan ek bina üzerine hiçbir fiziksel engelin olmayacağı sağlıklı verilerin toplanabileceği hakim bir noktaya tesis edilmiştir (Şekil 5.12). Anemometre tesisinde sıfır doğrultusu binanın X ekseni kabul ettiğimiz eksen boyunca yapılmıştır. Veri kayıt ünitesi binanın iç kısmında uygun bir konumda bırakılmıştır.

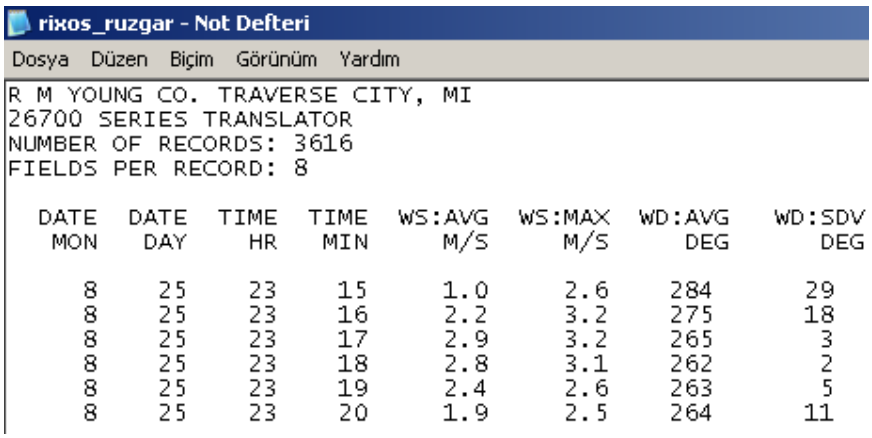
Tablo 5.4 Model 05103 anemometre hız ve yön ölçme özellikleri

Rüzgâr Hızı	
Ölçme Aralığı	0-134 mph (0-60 m/s)
Doğruluk	± 0.6 mph (± 0.3 m/s)
Başlangıç eşik değeri	2.2 mph (1 m/s)
Çarpma etkisi	220 mph (100 m/s)
Çıktı	Ac voltaj 1800 rpm (90 Hz)= 19.7 mph (8.8 m/s)
Rüzgâr Yönü	
Ölçme aralığı	0-390^{o} mekanik 355^{o} elektriksel (5^{o} açık)
Doğruluk	± 3^{o}
Başlangıç eşik değeri	2.2 mph (1.1 m/s)
Sönümleme oranı	0.25
Çıktı	10 kΩ voltmetre dirençli analog dc voltaj



Şekil 5.12 Bina üzerinde anemometre tesisi

Depolanan veriler RS232 kablo aracılığı ile bilgisayar ortamına özel programı yardımıyla aktarılabilmektedir. Veriler bir txt uzantılı dosyada kayıt edilmektedir. Dosyada sırasıyla; ay, gün, saat, dakika, ortalama rüzgâr hızı, maksimum rüzgâr hızı, ortalama yön ve standart sapma değerleri bulunmaktadır. Veriler 1 dakika aralıkla kayıt edilmektedir (Şekil 5.13).


rixos_ruzgar - Not Defteri

Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım

R M YOUNG CO. TRAVERSE CITY, MI
26700 SERIES TRANSLATOR
NUMBER OF RECORDS: 3616
FIELDS PER RECORD: 8

DATE MON	DATE DAY	TIME HR	TIME MIN	WS:AVG M/S	WS:MAX M/S	WD:AVG DEG	WD:SDV DEG
8	25	23	15	1.0	2.6	284	29
8	25	23	16	2.2	3.2	275	18
8	25	23	17	2.9	3.2	265	3
8	25	23	18	2.8	3.1	262	2
8	25	23	19	2.4	2.6	263	5
8	25	23	20	1.9	2.5	264	11

Şekil 5.13 Depolanan rüzgâr verilerine ait dosya örneği

6 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

6.1 Giriş

Tez çalışması süresince, rüzgâr ve deprem gibi, dinamik yükler altındaki binanın dinamik davranışları GPS ve eğim sensörü ile bazen birlikte bazen de ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu bölüm de, hem binanın dinamik parametrelerinin değerlendirilmesi hem de GPS ve Eğim sensörünün dinamik cevapları ölçebilme kabiliyetleri zaman ve frekans alanında yapılan analizler ile filtreleme teknikleri kullanılarak incelenmiş ve yorumlanmıştır. Ölçülmüş olan tüm veri setlerinin analizinin tez kapsamında analizi mümkün olmayacağı için rüzgâr ve deprem yüklerine ilişkin seçilmiş deney setleri ile sınırlandırılmıştır.

Bu bağlamda, Tablo 6.1'de kısaca incelenen deney setlerine ilişkin kullanılan sensörler ve veri toplama frekansları ile yük tipi ve deney süresine ilişkin bilgiler verilmiştir.

Tablo 6.1 Dinamik yük deney setleri, deney süresi ve veri toplama frekansları

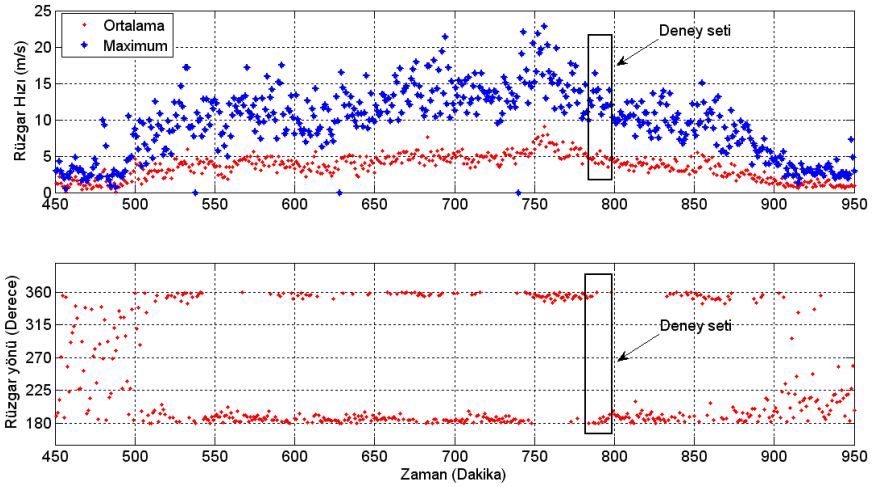
Deney seti ismi	Dinamik yük tipi	İncelenen deney süresi	Veri toplama frekansı		
			GPS	Eğim sensörü	Anemometre
R1	Rüzgâr	16d 40s	10 Hz	1 Hz	1/60 Hz
R2	Rüzgâr	15^{d} 35^{s}	10 Hz	-	1/60 Hz
R3	Rüzgâr	15^{d} 35^{s}	2 Hz	4 Hz	1/60 Hz
R4	Rüzgâr	$2*50^{d}$	-	4 Hz	1/60 Hz
D1	Sismik	4^{d} 10^{s}	-	4 Hz	-

6.2 Yapı Rüzgâr Cevabına İlişkin Ölçmeler ve Analizler

6.2.1 R1 nolu deney seti zaman ve frekans analizleri

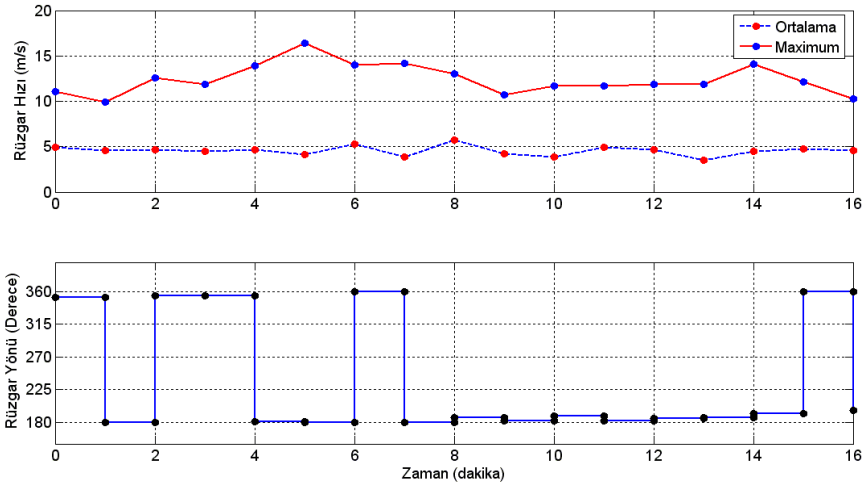
21 Mart 2008 günü meydana gelen şiddetli rüzgâr karşısında binanın dinamik cevabı hem GPS hem de eğim sensörü ile ölçülmüştür. Buna ilave olarak, yapıya etkiyen rüzgâr hız ve yönü anemometre yardımı ile ölçülmüştür. Bahsedilen günün, rüzgârlı olduğu zaman aralığına ilişkin zaman serisi Şekil 6.1 de verilmiştir. Şekil 6.1'de üst çizim 1 dakika veri toplama aralığındaki ortalama ve maksimum rüzgâr

hızını, alt çizim ortalama rüzgâr yönünü temsil etmektedir. Şekil 6.1 'den de görüldüğü gibi rüzgâr maksimum 23 m/sn (82.8 km/saat) rüzgâr hızına ulaşmıştır. Hem GPS hemde eğim sensörü ile eş zamanlı toplanan verinin uzunluğu 1000 sn (16^d 40^s) dir. Deney setine karşılık gelen rüzgâr hız ve yönüne ait bilgiler Şekil 6.2 de görülebilir.



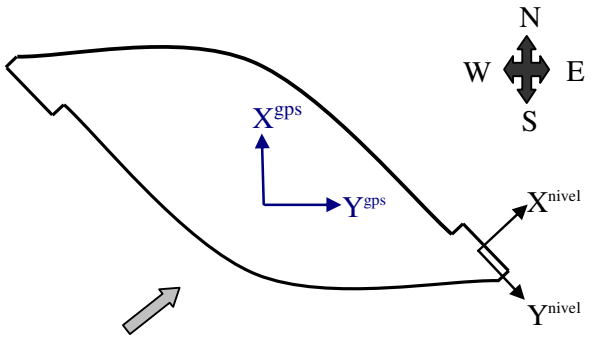
Şekil 6.1 Rüzgâr ortalama, maksimum hız (üst) ve yön (alt) zaman serisi (450^d-950^d)

Daha öncede bahsedildiği gibi binaya etkiyen rüzgârın hızı, ortalama rüzgâr hızından olan dalgalanma şiddeti, frekansı ve yönü yapının deplasman cevabını etkileyen en büyük etkenlerdir. Şekil 6.2'de alt çizim detaylı şekilde incelendiğinde, rüzgârın binaya esme yönü genelde çok fazla değişkenlik göstermemektedir. Şekil 6.2 üst çizim detaylı bir şekilde incelendiğinde, rüzgârın ortalama hızı 5 m/sn civarında, maksimum rüzgâr hızları ise 10m/sn ile 17 m/sn aralığında değişmektedir. Burada şu unutulmamalıdır ki, çizim 1 dakika aralıklı ortalama değerleri yansıtmaktadır. Eğer rüzgâr verileri 1 sn veri aralığında yani 1 Hz lik bir örnekleme sıklığında toplanmış olsaydı, binaya etkiyen rüzgârın karakteri daha detaylı bir şekilde incelenebilecekti.



Şekil 6.2 Rüzgâr ortalama, maksimum hız (üst) ve yön (alt) zaman serisi

Rüzgârın binaya ortalama esme yönünün ve GPS ile eğim sensörünün eksenlerinin binaya göre durumlarının daha açık görülebilmesi amacıyla Şekil 6.3 çizilmiştir. Şekil 6.3 den de açıkça görüldüğü üzere, deney süresince rüzgârın binaya ortalama esme yönü eğim sensörünün X^{nivel} yönü ile çakışıktır. Eğim sensörünün binaya göre konumu kullanıcı tarafından kontrol edilebilir olmasına rağmen, GPS ile elde edilen koordinat eksenleri yönü seçilen datum ve projeksiyon koordinat sistemi ile doğrudan ilişkilidir. Bu tez kapsamında ham GPS verileri Leica Geo Office 3.0 yazılımı ile analiz Post-Process Kinematik yöntemle analiz edilmiştir. Analizde elde edilen yer merkezli kartezyen koordinatlardan projeksiyon koordinatları türetilmiştir. Şekil 6.3 de GPS in koordinat yönlerini yaklaşık temsil eden koordinatlar projeksiyon koordinatlarıdır. Bu tez boyunca bahsedilen GPS koordinatları projeksiyon koordinatları olup bundan sonra konunun daha anlaşılabilir olması ve kolaylık olması açısından sadece GPS eksen koordinatları olarak isimlendirilecektir. Şekil 6.3 de GPS koordinat eksenlerinin binaya göre konumu binanın üst kısmında yapılan ilave ölçmeler sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 6.3 Binaya göre sensör eksen yönleri ve ortalama rüzgâr yönü

R1 deneyinde GPS veri örnekleme frekansı 10 Hz, eğim sensörü veri örnekleme frekansı 1 Hz dir.

6.2.1.1 Binanın doğal frekanslarının belirlenmesi

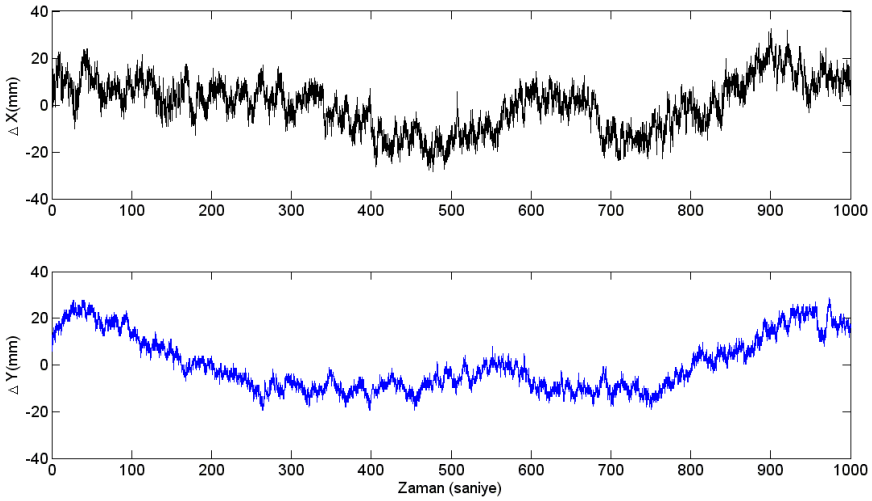
6.2.1.1.1 GPS verilerinin analizi

Binanın R1 deneyi boyunca GPS ile ölçülen ve proses sonucu her epok a ait X^{gps} ve Y^{gps} koordinatları elde edilmiştir. Elde edilen GPS koordinatlarının yönleri Şekil 6.3 de gösterildiği şekildedir. Binanın GPS eksenleri boyunca zamana göre bağıl değimlerinin daha açık görülmesi amacıyla GPS zaman serileri çizilmiştir (Şekil 6.4). Şekil 6.4'de ΔX^{gps} ve ΔY^{gps} koordinatları,

$$\Delta X_i^{gps} = X_i^{gps} - \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^{gps}}{n} \quad , \quad \Delta Y_i^{gps} = Y_i^{gps} - \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i^{gps}}{n} \qquad (6.1)$$

formülleri ile hesaplanmıştır. Burada, n veri sayısıdır.

(6.1) formülü ile elde edilen GPS zaman serisi hem zaman alanındaki binanın daha rahat görülebilmesi hem de eğim sensöründen türetilmiş deplasman değerlerinin karşılaştırılmasının daha sağlıklı yapılabilmesi amacıyla çizilmiştir.

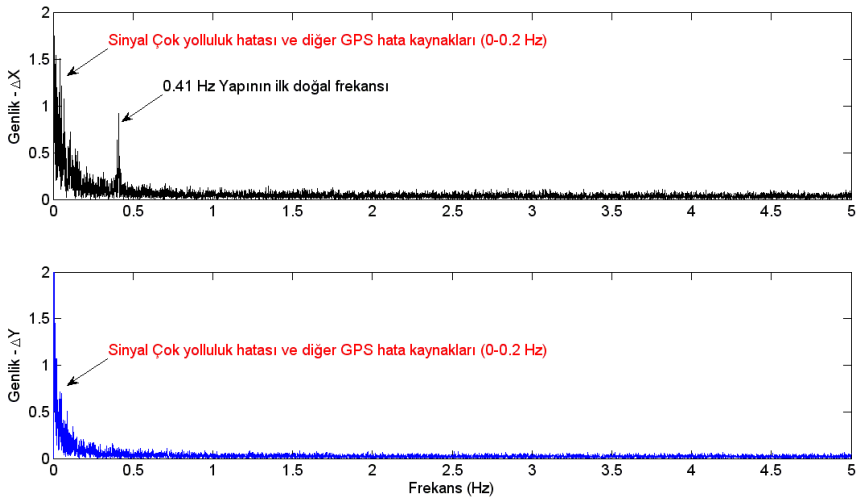


Şekil 6.4 GPS zaman serisi

Şekil 6.4' de X ve Y yönlerindeki karşılaştırmanın kolay olması amacıyla dikkat edilirse hem alt hem de üst çizimlerde yatay ve düşey eksene ait ölçekler aynı seçilmiştir. Böylelikle, herhangi bir istatistik hesaba gerek kalmaksızın sadece zaman serisinin göz ile incelenmesi ile yorum yapılabilir. Şekil 6.4 de yüksek frekans bileşeni, başka bir ifade ile kısa dönemli periyodik bileşen incelendiğinde, hareketin genliği ΔX bileşeninde ΔY bileşenine göre daha fazladır. Bu durum binanın dinamik cevabının X^{gps} yönünde Y^{gps} yönü ile karşılaştırıldığında daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bir başka ifade ile, rüzgârın bina üzerinde etkisinin çoğunlukla X^{gps} yönünde olduğunu ve binanın bu bahsedilen yönde daha esnek olduğu söylenebilir. Şekil 6.4 de kısa dönemli hareketin yanında uzun dönemli, sanki binada ortalama rüzgâr hızındaki değişimin sebep olduğu, bir hareket de varmış gibi gözükmektedir. Fakat Şekil 6.2 de üst çizimde de görüldüğü gibi ortalama rüzgâr hızı çok küçük bir standart sapma ile 5 m/sn lik ortalamadan sapmaktadır. Bu durum deney süresi boyunca binada quasi-statik bir hareketin beklenmediğine işaret etmektedir. Bu hareketin temel nedeni, GPS alıcısının etrafındaki binanın bir parçası olan metal kaplamaların sebep olduğu GPS çok yolluluk hatasıdır. Bu durum, eğim sensörünün zaman alanındaki serilerinin incelenmesi ile daha da açıklık kazanacaktır.

Yüksek binaların yükler altındaki dinamik davranışlarının sadece zaman alanındaki genlik- zaman ilişkisini yansıtan zaman serisini incelemekle

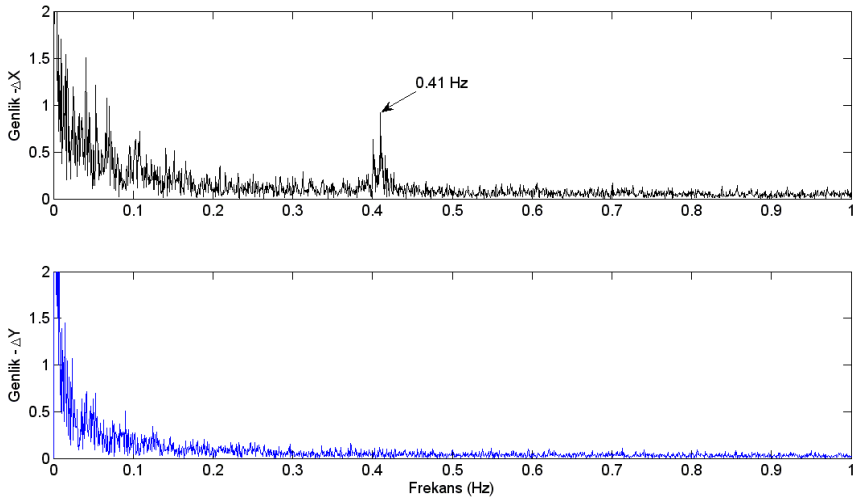
değerlendirmek yeterli değildir. Dinamik parametrelerden olan yapının temel doğal frekanslarının belirlenmesi sinyalin içerdiği frekans bilgisinde saklıdır. Bir zaman-genlik gösterimini, her hangi bir hesap yapmaksızın, göz ile incelemek suretiyle, seride periyodik bir yapının olup olmadığı sezgisel olarak bazı durumlarda ilk bakışta anlaşılabilir, fakat bu periyodik hareketin frekansının ve genliğinin sayısal olarak belirlenmesi harmonik analiz ya da frekans bölgesinde spektral analiz yapılmasını gerektirir. Bu amaçla, zaman serilerinin frekans spektrumları HFD yöntemi ile frekans alanında incelenmiştir.



Şekil 6.5 GPS zaman serisine ait HFD genlik spektrumu (0 -5 Hz)

Şekil 6.4 deki GPS zaman serisinin genlik-frekans ilişkisi Şekil 6.5 de görülebilir. GPS ile toplanan verilerin fs örnekleme frekansı 10 Hz olduğundan Nyquist kriterinden dolayı fs/2 değeri olan 5 Hz e kadar olan binaya ait doğal frekanslar belirlenebilir. Şekil 6.5 de 0 – 5 Hz arasındaki frekanslar ve karşılık gelen genlik değerleri görülebilir. Şekil incelendiğinde 0-0.2 Hz düşük frekans bölgesinde aşırı derecede sıçramaların olduğu hem ΔX hem de ΔY bileşeninde görülmektedir. Bu frekans bölgesindeki hareketliliğin sebebi daha öncede bahsedildiği gibi GPS sinyalinin çok yolluluk hatasından kaynaklanmaktadır (Li, 2006). Düşük frekanslı bölgedeki bu hareketliliğin her iki bileşende de olması bu yorumu daha da kuvvetlendirmektedir.

0.2- 5 Hz arasındaki frekans band aralığı, başka bir değişle yüksek frekanslı bölgeler incelendiğinde, ΔX bileşenindeki 0.41 Hz frekansında sıçrama haricinde bir sıçrama bölgesi göze çarpmamaktadır. 0.2 – 5 Hz arasında binanın doğal frekansına işaret eden ΔX bileşenindeki 0.41 Hz frekansında sıçrama haricindeki frekansların genliklerinin aynı seyretmesi GPS in bu aralıkta beyaz gürültü niteliğinde gürültüler ürettiğine işaret etmektedir. 0.41 Hz frekansındaki sıçrama binanın SEY ile 0.38 Hz olarak hesaplanan birinci doğal frekansı ile karşılaştırıldığında arada % 7 lik bir fark olduğu gözükmektedir.



Şekil 6.6 GPS zaman serisine ait HFD genlik spektrumu (0 - 1 Hz)

0-1 Hz frekans band aralığındaki değişimlerin daha detaylı görülebilmesi amacı ile Şekil 6.6 incelenebilir. Dikkat edilirse, 0.41 Hz lik sıçrama sadece ΔX bileşeninde ortaya çıkmakta ve ΔY bileşeninde böyle bir frekans sıçraması gözükmemektedir. Bu durum, binanın X^{gps} ekseni boyunca bir dinamik salınım gösterdiğine işaret etmektedir. Binada, Y^{gps} ekseni boyunca dinamik bir cevabın gözükmemesinin yada olmamasının sebebi aşağıda sıralanan 3 nedenden kaynaklanabilir. Bunlar;

a) binaya etki eden bu rüzgâr deneyinde gerçekten bina Y^{gps} ekseninde harekete sebep olabilecek büyüklükte bir rüzgâr kuvveti ile karşılaşmaması.

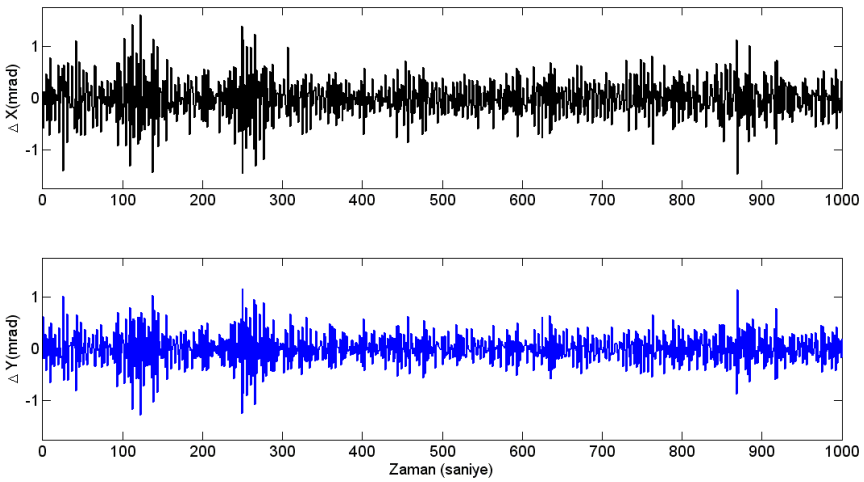
b) bina Y^{gps} ekseni yönünde X^{gps} eksenine göre daha rijit bir yapıda olması.

c) bina Y^{gps} yönünde de bir dinamik cevap verdi fakat hareketin genliğinin GPS' in kendi yapısından kaynaklanan hataların sebep olduğu gürültüsü içerisinde kaybolması şeklinde sıralanabilir.

Yukarıda ortaya atılan olası yorumlara cevap, binada yapılan eş zamanlı diğer sensörlerin analizi ile aydınlığa kavuşabilir. Bu durum, neden yapıların farklı özelliklerdeki sensörlerle ölçülmesi ve entegrasyonun önemine dair olan sebeplerden birisini ortaya çıkarmaktadır.

6.2.1.1.2 Eğim sensörü verilerinin analizi

R1 deneyi boyunca GPS in yanı sıra binanın dinamik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla eğim sensörleri ile de ölçmeler yapılmıştır. Daha önceden de bahsedildiği gibi, eğim sensörü binadaki eğim değişimlerini hassas şekilde ölçebilme kabiliyetine sahiptir. Eğim değişimine ait zaman serisi mrad biriminde Şekil 6.7 de görülebilir. Şekil 6.7'de üst çizim ΔX, alt çizim ΔY bileşenini temsil etmektedir. Eğim sensörü eksen yönlerinin binaya göre durumu Şekil 6.3 de görülebilir.



Şekil 6.7 Eğim sensörü zaman serisi

Şekil 6.7 deki eğim değişimlerini inceleyerek binanın rüzgâr yükü karşısındaki salınımlarını görmek ve algılamak zor olacağından, ayrıca ileride GPS ile

karşılaştırılmasının mümkün olması açısından eğim değerinden türetilmiş-deplasman değerlerinin hesaplanması ve çizilmesi daha anlamlı olacaktır. Bu bağlamda, eğim değerinden deplasman değerlerinin türetilmesinde aşağıdaki basit doğrusal ilişki denkleminden faydalanılmıştır.

$$d = h.\overline{\alpha} \tag{6.2}$$

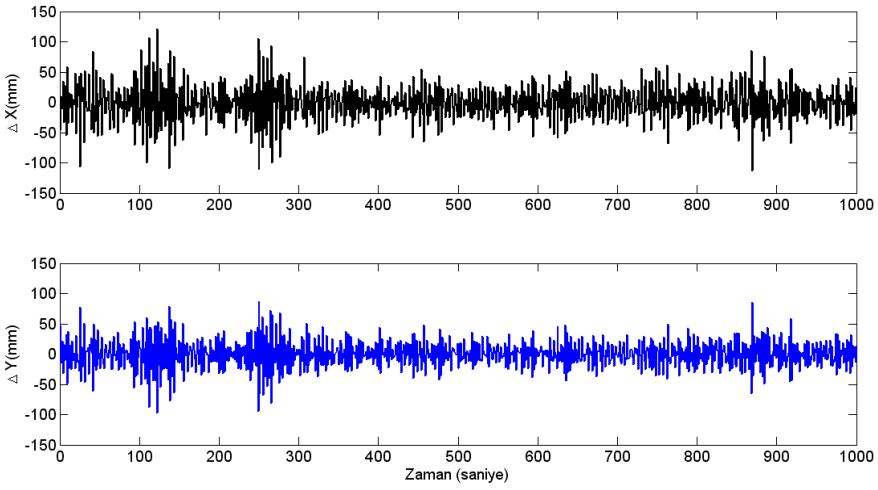
Burada,

d: mm biriminde türetilmiş deplasman,

h: m biriminde sensörün tesis yüksekliği yada deplasmanı hesaplanacak noktanın yükseklik değeri

$\overline{\alpha}$: mrad biriminde eğim değeri

Şekil 6.8, Şekil 6.7 deki eğim değerlerini içeren zaman serinden 6.2 formülüne göre türetilmiş deplasman değerleri serisidir.

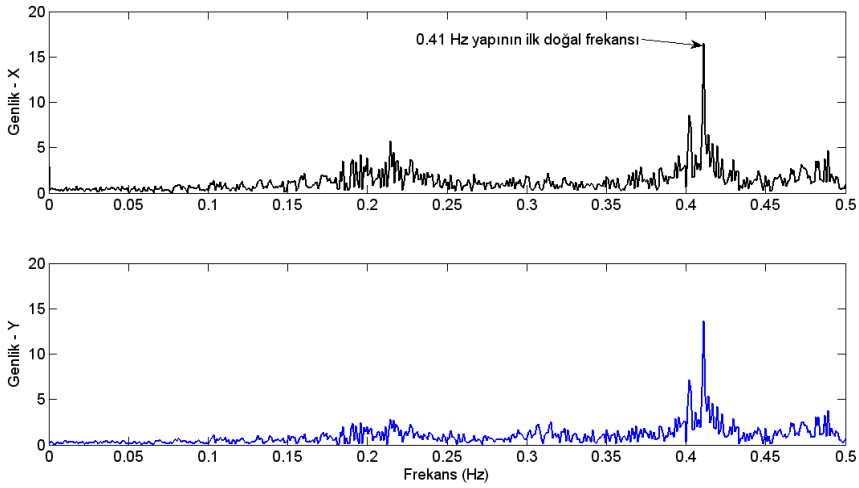


Şekil 6.8 Eğim değerinden türetilmiş deplasman zaman serisi

Şekil 6.8' de X ve Y yönlerindeki karşılaştırılmanın kolay olması amacıyla dikkat edilirse hem alt hem de üst çizimlerde yatay ve düşey eksene ait ölçekler aynı seçilmiştir. Şekil 6.8 de alt ve üst çizimler kendi içerisinde karşılaştırıldığında, ΔX

bileşeninin ΔY bileşenine göre daha fazla salınım genliği gösterdiği rahatlıkla görülebilir. Bu durum, yine GPS zaman serilerinin yorumunda yapılanlara benzer şekilde, bina eğim sensörünün X^{nivel} ekseni boyunca Y^{nivel} ekseni boyunca daha fazla dinamik etkiye ve salınıma uğradığı anlamına gelmektedir. GPS ve eğim sensörlerinin eksen yönlerinin binaya göre aynı olmamasına rağmen, sayısal bulgular verilmeksizin, sadece zaman alanındaki grafikleri incelenerek de rahatlıkla bu durum algılanabilir.

Şekil 6.8 deki eğim sensörü zaman serisinin genlik-frekans ilişkisi Şekil 6.9 da görülebilir. Eğim sensörü ile toplanan verilerin fs örnekleme frekansı 1 Hz olduğundan Nyquist kriterinden dolayı fs/2 değeri olan 0.5 Hz e kadar olan binaya ait frekanslar belirlenebilir. Bu, yapıda 0.5 Hz in üstünde gerçekleşecek olan doğal frekansların 1 Hz lik örnekleme frekansı ile mümkün olmayacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 6.9 Türetilmiş-deplasman zaman serisinin HFD genlik spektrumu (0 - 0.5 Hz)

Şekil 6.9 incelendiğinde eğim sensörünün hem X hem de Y eksenleri yönünde maksimum sıçramanın 0.41 Hz frekansında olduğu açıkça görülmektedir. Şekilden yine açıkça görüldüğü üzere ΔX bileşenindeki frekans sıçraması ΔY bileşenine göre daha yüksektir. Bu durum, zaman bölgesindeki grafiklerin yorumlanmasına benzer

şekilde, binanın X^{nivel} yönündeki dinamik cevabının Y^{nivel} yönündeki dinamik cevabına göre daha yüksek olduğunu doğrulamaktadır.

GPS ve Eğim sensörlerinin frekans alanındaki grafikleri, sırasıyla Şekil 6.6 ve 6.9, karşılaştırıldığında binanın doğal frekans değeri olan 0.41 Hz lik sıçrama, GPS in sadece ΔX bileşeninde gözükmekte iken, eğim sensörünün her iki bileşeninde de gözükmektedir. Bu durum eğim sensörünün eksen yönlerinin binanın ana titreşim yönleri ile paralel olmamasından kaynaklanmaktadır. Eksen yönlerindeki farklılıklara bakılmaksızın binanın birinci moduna ait doğal frekansı hem GPS hem de eğim sensörü ile 0.41 Hz olarak belirlenmiştir. GPS sonuçları ayrıca, binanın 0.41 Hz frekansının X^{gps} ekseni boyunca gerçekleşen birinci mod doğal frekansı olduğuna işaret etmektedir. Fakat bu konunun daha açıklık kazanması ve ayrıca eğim sensörü ve GPS in detaylı olarak hem zaman hem de frekans alanında karşılaştırılması, sensörlerin aynı eksen doğrultularına getirilmesinden sonra daha anlamlı ve gerçekçi olacaktır. Buna ilişkin detaylı analiz ve sonuçlar takip eden alt bölümde verilmiştir.

6.2.1.2 GPS ve eğim sensörünün rüzgâr yükü altındaki dinamik davranışları izleyebilme kabiliyetlerinin değerlendirilmesi ve sensörlerin karşılaştırılması

Bir önceki bölümde sensörlerin binaya tesis edildikleri orijinal eksen yönlerinde ve herhangi bir eksen dönüşümü yapılmaksızın hem zaman hem de frekans alanındaki durumları kısaca değerlendirilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere, GPS ve eğim sensörünün zaman ve frekans alanındaki davranışları binanın hareket yönleri açısından uyumluluk göstermesine rağmen, tam anlamıyla benzer sonuçlar vermediği görülmüştür. Örneğin hem GPS hem de eğim sensörleri ile bulunan sonuçlarda X bileşenleri Y bileşenlerine göre daha fazla olmasına rağmen, sensörlerin tamamen hem zaman hemde frekans alanındaki sonuçlarında bazı farklılıklar göze çarpmaktadır. Örneğin, GPS in HFD sonuçlarında ΔX bileşeni 0.41 Hz de sıçrama yaparken ΔY bileşeninde yapmamasına rağmen, eğim sensörü HFD sonuçlarında her iki bileşende de 0.41 Hz lik sıçrama gözükmektedir. Bu farklılığın temel sebebi, GPS ve eğim sensörlerinin yönlerinin birbirine paralel olmamasıdır.

GPS ve Eğim sensörünün rüzgâr yükü altındaki binanın dinamik cevaplarını ölçebilme kabiliyetlerinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması açısından sensörlerin eksenlerin birbirlerine paralel hale getirilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, takip eden alt bölümlerde;

a) GPS eksenlerinin 2 boyutlu benzerlik dönüşümü ile eğim sensörü eksenine dönüştürülmesi

b) Eğim sensörü eksenlerinin 2 boyutlu benzerlik dönüşümü ile GPS eksenlerine dönüştürülmesi

konuları ayrı ayrı ele alınıp incelenmiştir.

6.2.1.2.1 GPS ve eğim sensörü karşılaştırılması amacıyla eksenlerinin Benzerlik Dönüşümü ile aynı yöne getirilmesi

Jeodezide farklı koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm, problemin yapısı ve amaca göre uygun olan benzerlik, Affine vb. gibi modellerden birisi seçilerek gerçekleştirilir. Dönüşüm parametreleri, her iki sistemde koordinatları bilinen noktalar aracılığı ile en küçük kareler yöntemi kullanılarak kestirilir. Örneğin 2 boyutlu benzerlik dönüşümünde 2 öteleme, 1 dönüklük ve 1 ölçek olmak üzere 4 bilinmeyen dönüşüm parametreleri kestirilir. Bu çalışmada, GPS ve eğim sensörü eksenlerinin birbirine dönüşümünde benzerlik yada bir başka isimle Helmert dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Her iki sensörde aynı bina üzerinde olması ve sensörlerle toplanan verilerin binanın bağıl hareketlerini yansıtan kısmı ile ilgilenildiği için, benzerlik dönüşümündeki ölçek faktörü 1, koordinat eksenlerindeki 2 öteleme miktarı 0 kabul edilmiştir. Böylece dönüşüm, sadece eksenler arasındaki dönüklüğün giderilmesi şeklini almıştır. Dönüşüm, aşağıdaki dönüklük matrisi yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

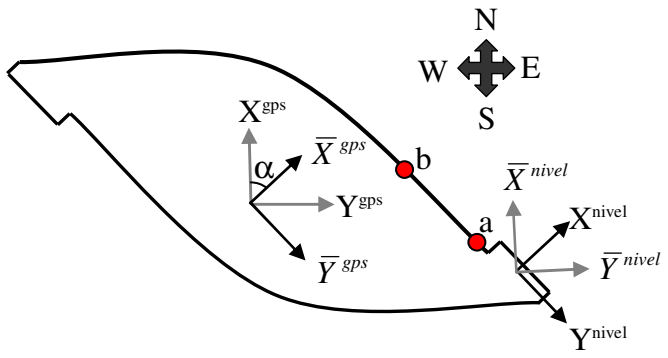
$$\begin{bmatrix} \Delta\overline{X}_i^{\,gps} \\ \Delta\overline{Y}_i^{\,gps} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_i^{\,gps} \\ \Delta Y_i^{\,gps} \end{bmatrix} \qquad (6.3)$$

Burada,

ΔX_i^{gps} , ΔY_i^{gps} : (6.1) formülüne göre koordinat merkezine indirgenmiş koordinat sistemi

$\Delta \overline{X}_i^{gps}$, $\Delta \overline{Y}_i^{gps}$: dönüştürülecek koordinat sistemi

α : iki sistem arasındaki dönüklük açısı



Şekil 6.10 Eksenler arasındaki dönüklükler ve belirlenmesi

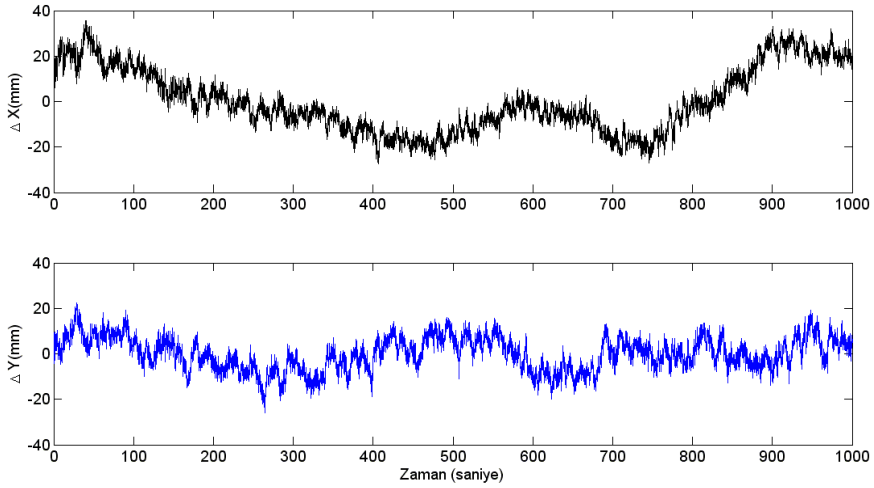
İki sistem arasındaki α dönüklük açısı, bina üzerinde yapılan ilave jeodezik ölçmeler sonucunda belirlenmiştir. Dönüklük açısı α, Y^{nivel} ekseni boyunca bina üzerinde belirlenen ardışık a ve b noktaları üzerinde statik GPS ölçmeleri sonucu koordinatların hesaplanması ile elde edilmiştir ve aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y_a - Y_b}{X_a - X_b}\right) - 100^g \qquad (6.4)$$

6.2.1.2.2 GPS koordinat eksenlerinin eğim sensörü koordinat eksen sistemine paralel duruma getirilmesi

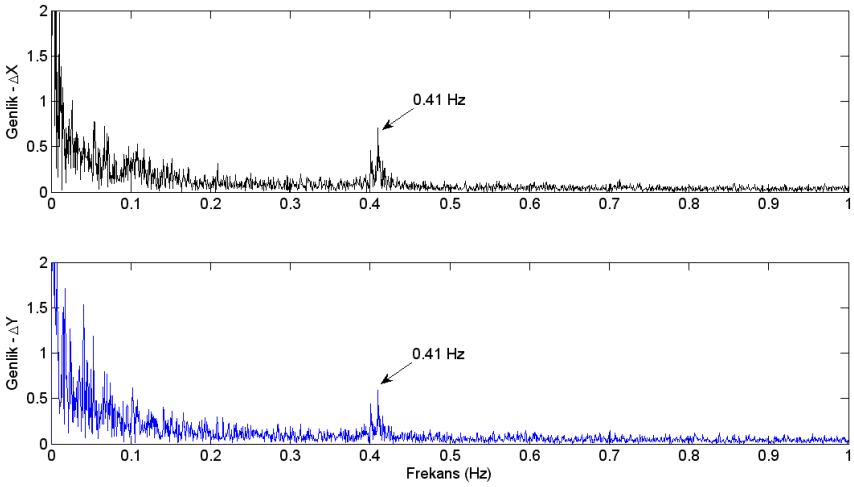
X^{gps}, Y^{gps} orijinal GPS projeksiyon koordinat sistemi (6.3) formülü yardımı ile X^{nivel}, Y^{nivel} eğim sensörü sistemine paralel olan $\overline{X}^{gps}$, $\overline{Y}^{gps}$ sistemine dönüştürülmüştür (Şekil 6.10). Şekil 6.4' de ki GPS zaman serisine dönüşüm uygulanmış ve yeni sistemdeki zaman serisi Şekil 6.11'de çizilmiştir. Şekil 6.4 ile Şekil 6.11 karşılaştırıldığında dikkate değer bir biçimde farklılıklar hem kısa

periyotlu dinamik bileşenin genliğinde, hem de uzun periyotlu bileşenin genliğinde gözükmektedir.



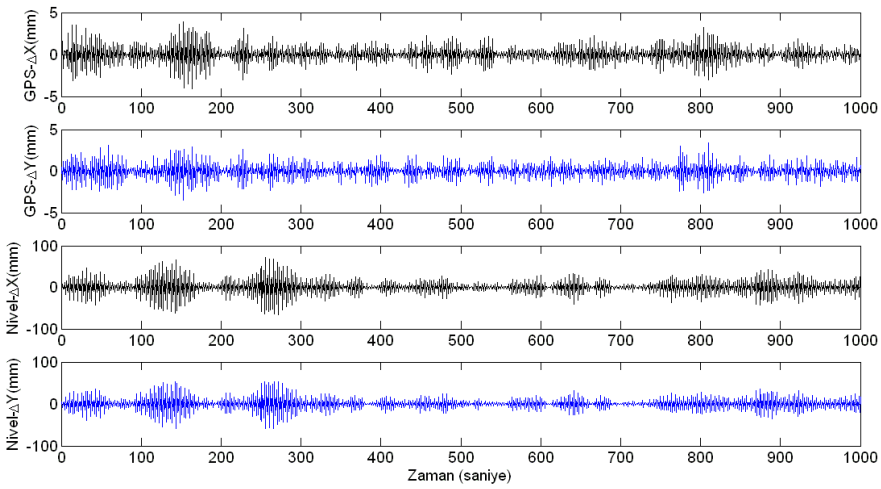
Şekil 6.11 Dönüştürülmüş GPS zaman serisi

Şekil 6.11'in frekans alanındaki HFD genlik spektrumu Şekil 6.12 de görülebilir. Şekil 6.12 incelendiğinde Şekil 6.6 daki HFD genlik spektrumundan farklı olduğu gözükmektedir. Dikkat edilirse, dönüşüm sonrası, ΔY bileşeninde de 0.41 Hz frekans değerinde bir sıçrama açıkça göze çarpmaktadır. Frekans alanındaki Şekil 6.12 ve Şekil 6.9 karşılaştırıldığında, GPS ve eğim sensörünün frekans alanında, yapının doğal frekansını tespit etme açısından, benzerlik gösterdiği görülmektedir.



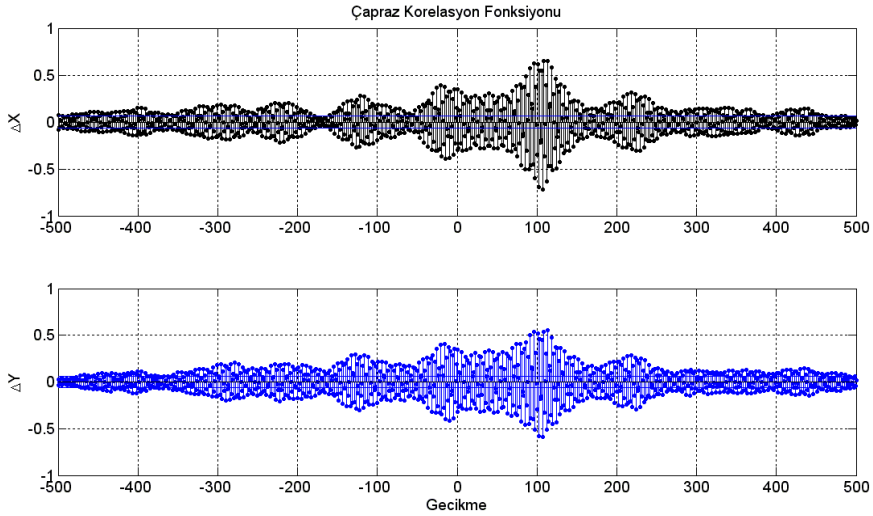
Şekil 6.12 Dönüştürülmüş GPS zaman serisinin HFD genlik spektrumu

GPS ve eğim sensörünün binanın dinamik bileşenine ait genlik-zaman ilişkisinin sadece zaman serilerinin görsel karşılaştırılması ile mümkün değildir. Hem dinamik hem uzun dönemli hem de quasi-statik bileşenin karşılaştırılması sinyal işleme ve filtreleme tekniklerinin kullanılmasını gerektirmektedir. İki sensörün zaman alanındaki dinamik bileşenin karşılaştırılması amacıyla sonsuz-dürtü cevaplı 6. dereceden Chebyshev Tip –I band geçiren filtre uygulanmıştır. Band geçiren filtrede, binanın doğal frekansı olan 0.41 Hz frekansına karşılık gelen hareketin ortaya çıkarılması amacıyla, 0.40 – 0.42 aralığındaki bandın geçmesine izin verilmiştir. Filtreleme sonucu elde edilen genlik-zaman ilişkisi Şekil 6.13 de verilmiştir.



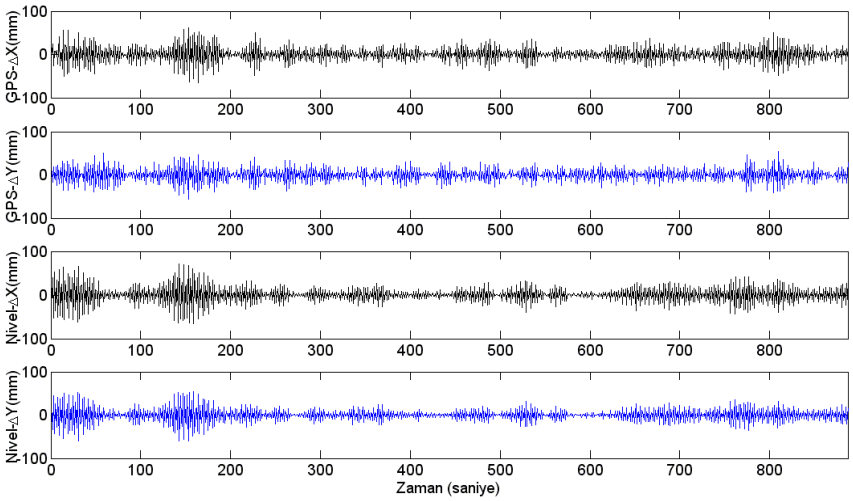
Şekil 6.13 Band geçiren filtre sonrası türetilen genlik-zaman serisi

Şekil 6.13 incelendiğinde band geçiren filtrenin bir özelliği olarak GPS zaman serisininde çok yolluluk hatasından kaynaklanan hataların yok olduğu ve sadece dinamik bileşenin ortaya çıkarıldığı görülebilir. GPS ve eğim sensörünün genlik – zaman ilişkisi karşılaştırıldığında belirli bir kayıklıkla benzerlik gösterdiği görülebilir. GPS zamanı ile eğim sensörü zamanı arasındaki farkın belirlenmesi amacıyla, her iki sensörün hem X hem de Y bileşenlerine ayrı ayrı çapraz korelasyon uygulanmıştır. Çapraz korelasyon sonucu, hem X bileşenleri hem de Y bileşenleri arasındaki zaman kayıklığı, sırasıyla 0.65 ve 0.55 lik bir korelasyon ile, 113 sn olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.14).

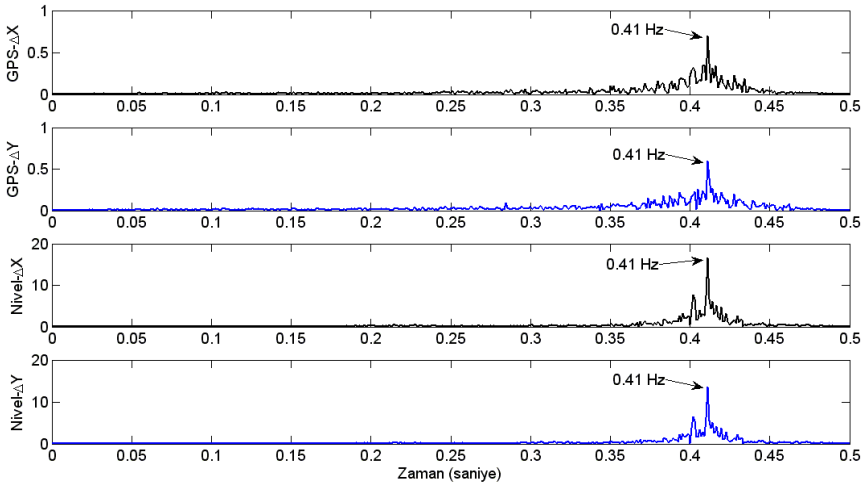


Şekil 6.14 Filtrelenmiş serinin çapraz korelasyon fonksiyonu

Dinamik salınımların genlikleri açısından sensörlerin karşılaştırması yapıldığında, farklılık açıkça göze çarpmaktadır. GPS' in salınımları -3.5 mm ile 3.5 mm arasında değişirken, eğim sensörününden türetilmiş salınımlar -65 mm ile 65 mm arasında değişmektedir. Sayısal değerlerden de görüldüğü üzere, eğim sensöründen türetilmiş deplasman değerleri, GPS deplasman değerlerinden yaklaşık 20 kat daha fazla gözükmektedir. Çapraz korelasyon sonrası hesaplanan iki sistem arasındaki 113 sn lik gecikme ortadan kaldırılıp, GPS zaman serisi değerleri 20 katsayısı ile çarpılarak eğim sensörü ile benzerliği karşılaştırılmıştır (Şekil 6.15). Şekil 6.15 den de görüldüğü gibi GPS ve eğim sensörü verileri her iki eksen yönünde benzerlik göstermektedir.



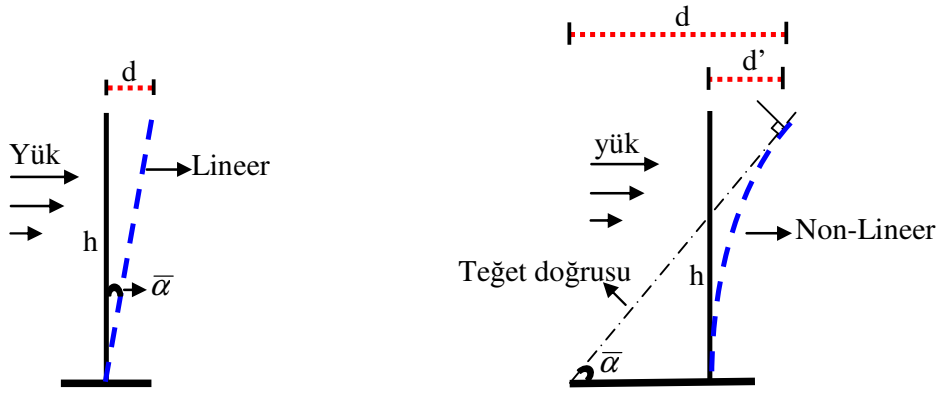
Şekil 6.15 Aynı zamana getirilmiş GPS ve eğim sensörü zaman serileri



Şekil 6.16 Band geçiren filtre sonrası türetilen genlik-zaman serisi

Filtrelenmiş serilerin, frekans ve genlik ilişkilerinin görülmesi ve yorumlanması amacıyla, Şekil 6.13 deki zaman serilerinin HFD spektrumları Şekil 6.16'da verilmiştir. Şekil 6.16 incelendiğinde, zaman bölgesinde bahsedilen eğim sensörünün genlik değerinin, GPS genlik değerinden büyük olduğu açıkça görülmektedir.

Bu noktada, neden eğim sensöründen türetilmiş deplasman değerleri GPS deplasman değerlerinden farklı sorusu akla gelmektedir? Formül 6.2 incelendiğinde, eğim değerinden deplasman değerine dönüşümde objenin düşey ekseni boyunca her noktasındaki eğiminin aynı olması, başka bir değişle obje bir bütün olarak doğrusal bir hareket göstermelidir. Fakat, yüksek bir binanın yükler altındaki davranışı doğrusal değil, eğriseldir. Şekil 6.17 yükler altındaki lineer ve lineer olmayan durumu temsil etmektedir. Şekil 6.17-b yükler altındaki yüksek binanın davranışını, Şekil 6.17-a ise yüksek binalarda normal şartlar altında olası olmayan lineer durumu göstermektedir. Eğer bina Şekil 6.17-a da gösterildiği şekilde lineer davransa idi formül 6.2 ile hesaplanan deplasman değerleri GPS e yakın hatta daha yüksek bir hassasiyet ve doğrulukla belirlenebilirdi. Fakat, bina lineer olmayan Şekil 6.17-b deki gibi davrandığından eğim sensörü kurulu olduğu noktadaki teğetin eğimini belirleyeceğinden, gerçekte d' olması gereken deplasman değeri, teğetin eğimi kullanılarak 6.2 formülü ile hesaplanan deplasman değeri d olacaktır. Bu durum, neden eğim sensörü ile bulunan deplasman değerlerinin GPS ile ölçülen deplasman değerlerinden yaklaşık 20 kat büyük olduğunu açıklamaktadır.



(a) lineer durum (b) Lineer olmayan durum

Şekil 6.17 Eğim değerinden deplasman değerine geçisin betimlenmesi

Bu durumda, yapının yükler altındaki doğrusal olmayan hareketi yüzünden eşitlik 6.2 doğrudan dönüşüm formülünün kullanılması anlamlı değildir. Gerçek deplasmanların belirlenebilmesi için doğrusal dönüşüm denklemi 6.2' ye C gibi bir

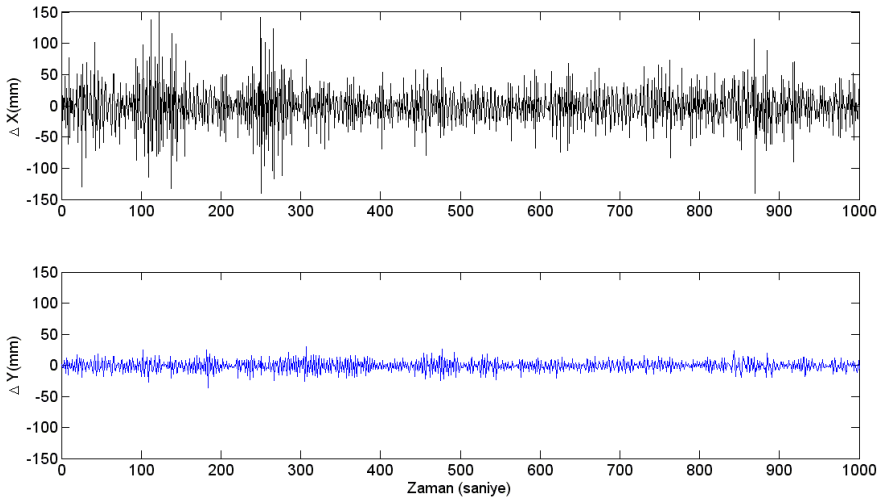
düzeltme katsayısının eklenmesi ve bu katsayının belirlenmesi gerekmektedir. düzeltme katsayısı ilave edilmiş formül 6.5 de verilmiştir.

$$d = c.h.\overline{\alpha} \tag{6.5}$$

Düzeltme katsayısı C, GPS yada ivme sensörü gibi ölçme araçları ile doğrudan yada dolaylı olarak elde edilen ilave ve eş zamanlı ölçmeler ile karşılaştırma yoluyla elde edilebilir. Bu katsayı, sadece sensörün tesis edildiği yüksekliğe bağlı değil aynı zamanda binanın yapısal sistemi, rijitliği ve kullanılan malzeme ve gelen yükün tipi gibi değişen özelliklere bağlı olarak farklılık göstereceği ve böylece her bir yapı için farklı sayısal değerlere ait düzeltme katsayıları elde edileceği düşünülmektedir.

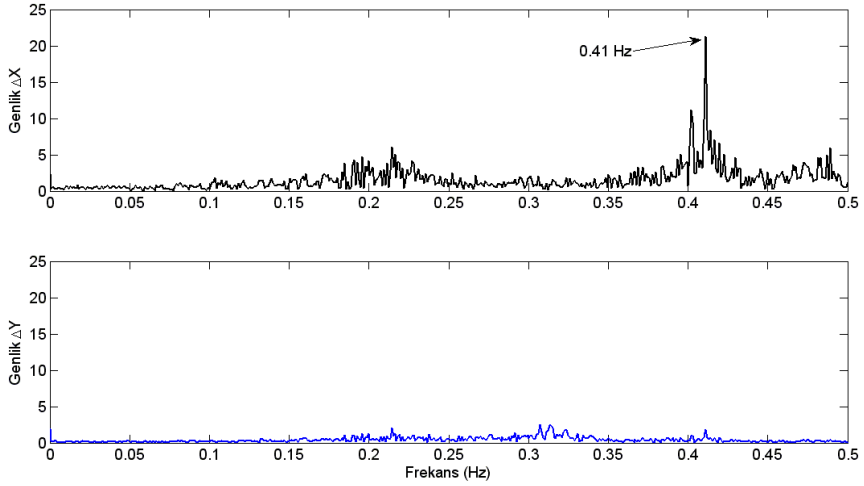
6.2.1.2.3 Eğim sensörü koordinat sisteminin GPS koordinat sistemi ile aynı yöne getirilmesi

Bu alt bölümde, bir önceki bölümdekine benzer nitelikte bir araştırma yapılmıştır. Fakat, bu sefer X^{nivel}, Y^{nivel} eğim sensörü koordinat sistemi (6.3) formülü yardımı ile X^{gps}, Y^{gps} GPS projeksiyon sistemine paralel olan $\overline{X}^{nivel}$, $\overline{Y}^{nivel}$ koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Şekil 6.8' de ki eğim değerinden türetilmiş deplasman zaman serisine dönüşüm uygulanmış ve yeni sistemdeki zaman serisi Şekil 6.18'de çizilmiştir. Şekil 6.8 ile Şekil 6.18 karşılaştırıldığında dikkate değer bir biçimde farklılıklar dinamik bileşenin genliğinde göze çarpmaktadır.



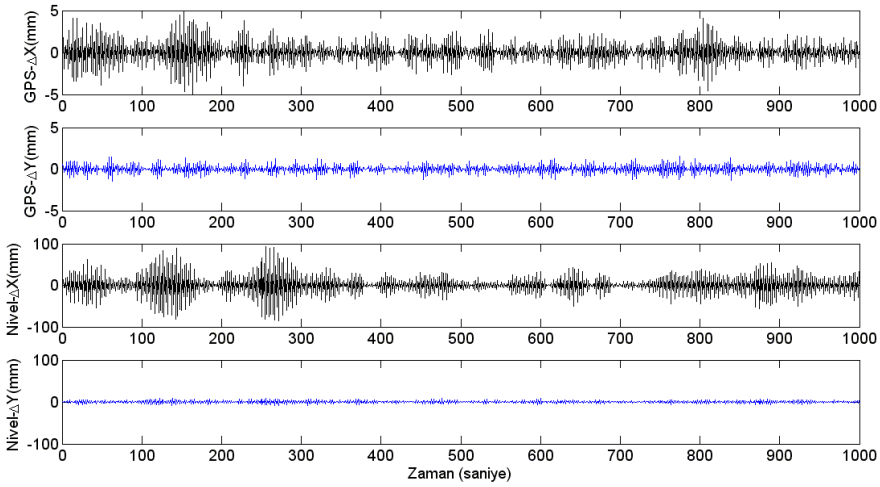
Şekil 6.18 Dönüştürülmüş eğim sensörü deplasman türetilmiş zaman serisi

Şekil 6.18'in frekans alanındaki HFD genlik spektrumu Şekil 6.19 da görülebilir. Şekil 6.19 incelendiğinde Şekil 6.9 daki HFD genlik spektrumundan farklı olduğu rahatlıkla gözükmektedir. Dikkat edilirse, dönüşüm sonrası, ΔY bileşeninde de 0.41 Hz frekans değerinde bir sıçrama artık göze çarpmamaktadır. Frekans alanındaki Şekil 6.19 ve Şekil 6.6 karşılaştırıldığında, GPS ve eğim sensörünün frekans alanında özellikle binanın doğal frekansı olan 0.41 Hz lik frekans değeri açısından büyük benzerlik göstermektedir.



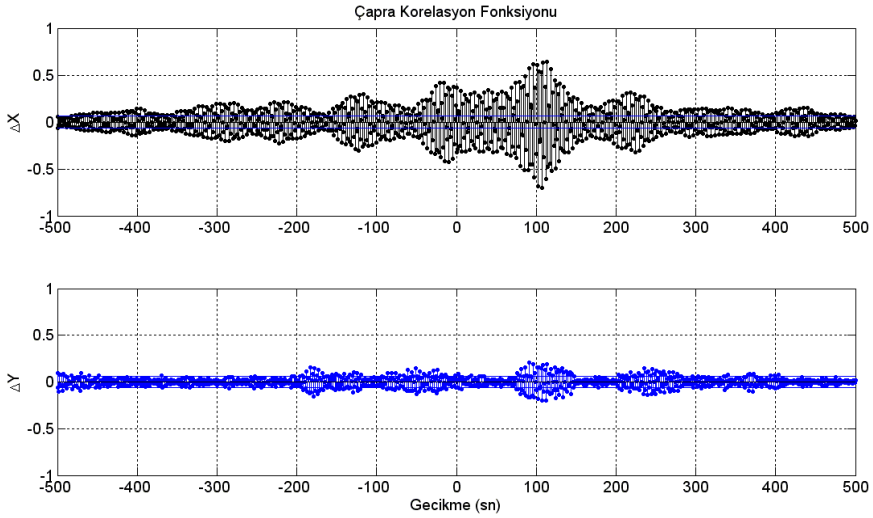
Şekil 6.19 Dönüştürülmüş eğim sensörü zaman serisinin HFD genlik spektrumu

Yine bir önceki alt bölümde uygulandığı biçimiyle, iki sensörün zaman alanındaki dinamik bileşenin karşılaştırılması amacıyla sonsuz-dürtü cevaplı 6. dereceden Chebyshev Tip –I band geçiren filtre uygulanmıştır. Band geçiren filtrede, binanın doğal frekansı olan 0.41 Hz frekansına karşılık gelen hareketin ortaya çıkarılması amacıyla, 0.40 – 0.42 aralığındaki bandın geçmesine izin verilmiştir. Filtreleme sonucu elde edilen genlik-zaman ilişkisi Şekil 6.20 de görülebilir.



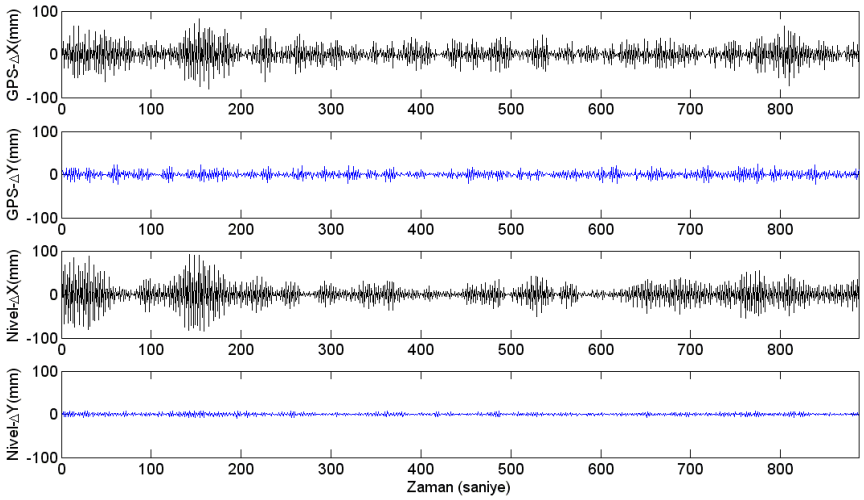
Şekil 6.20 Band geçiren filtre sonrası türetilen genlik-zaman serisi

Şekil 6.20 incelendiğinde filtreleme sonrası, GPS zaman serisininde çok yolluluk hatasından kaynaklanan periyodik dalgalanmaların yok olduğu ve sadece binanın dinamik bileşenin ortaya çıktığı görülebilir. GPS ve eğim sensörünün genlik – zaman ilişkisi karşılaştırıldığında belirli bir kayıklıkla benzerlik gösterdiği görülebilir. GPS zamanı ile eğim sensörü arasındaki farkın belirlenmesi amacıyla, her iki sensörün hem ΔX hem de ΔY eksen bileşenleri için çapraz korelasyon uygulanmıştır. Çapraz korelasyon sonucu, ΔX bileşeninde zaman kayıklığı 0.64 lük bir korelasyon ile, 113 sn çıkmıştır (Şekil 6.21). Bir önceki alt bölümdekinin aksine ΔY bileşeninde korelasyon ihmal edilebilir derecede düşüktür. Şekil 6.21 ΔY bileşenine ait korelasyon fonksiyonuna ait çizim incelendiğinde bu durum açıkça görülebilmektedir. Bu bileşendeki korelasyon yokluğu, binanın Y^{gps} ekseni boyunca hareket etmediği, ve zaman serilerinde gözüken küçük genlikli rasgele hareketlerin sinyal değil GPS' in beyaz gürültüsü olması yüzündendir.



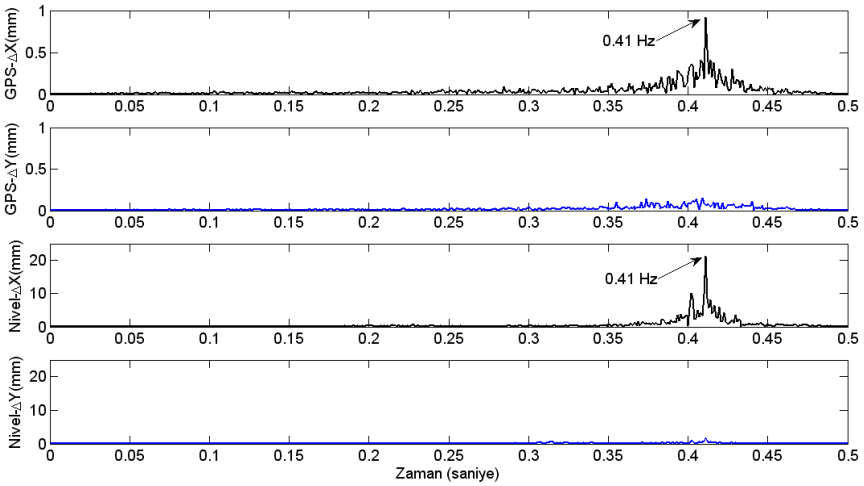
Şekil 6.21 Filtrelenmiş serinin çapraz korelasyon fonksiyonu

Çapraz korelasyon sonrası hesaplanan iki sistem arasındaki 113 sn lik gecikme ortadan kaldırılıp, GPS zaman serisi değerleri 20 katsayısı ile çarpılarak eğim sensörü ile benzerliği karşılaştırılmıştır (Şekil 6.22). Şekil 6.22 den açıkça görüldüğü gibi GPS ve eğim sensörü verileri ΔX bileşeni yönünde benzerlik göstermektedir.



Şekil 6.22 Aynı zamana getirilmiş GPS ve eğim sensörü zaman serileri

Filtrelenmiş serilerin, frekans ve genlik ilişkilerinin görülmesi ve yorumlanması amacıyla, Şekil 6.20 deki zaman serilerinin HFD spektrumları Şekil 6.23'de verilmiştir. Şekil 6.23'de her iki sensöre ait ΔX bileşeni incelendiğinde, eğim sensörü genlik değerinin GPS genlik değerinden büyük olduğu tekrar açıkça görülmektedir. Şekil 6.23 de ΔY bileşeni incelendiğinde, her iki sensörün HFD spektrumlarında 0.41 Hz de bir sıçrama olmadığı gözükmektedir.



Şekil 6.23 Band geçiren filtre sonrası türetilen genlik-zaman serisi

GPS ve eğim sensörünün yüksek binaları izleme kabiliyetlerinin detaylı bir araştırmasını yapmak amacıyla gerçekleştirilen 2 boyutlu benzerlik dönüşümüne ait çalışmalar sonrasında;

- Her iki sensöründe zaman bölgesinde benzer karakterde hareketler gösterdiği fakat eğim sensörünün doğrudan ölçtüğü eğim değerinden türetilmiş deplasmanların olması gerekenden büyük olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi, yüksek binaların yükler altındaki lineer olmayan davranışları yüzündendir. Bu durumda, 6.2 denklemi sadece doğrusal durumlar için geçerlidir ve eğim sensörü yapıya ne kadar yukarıda tesis edilirse, bu hata eğrilik değerinin büyümesiyle orantılı olarak artacaktır.

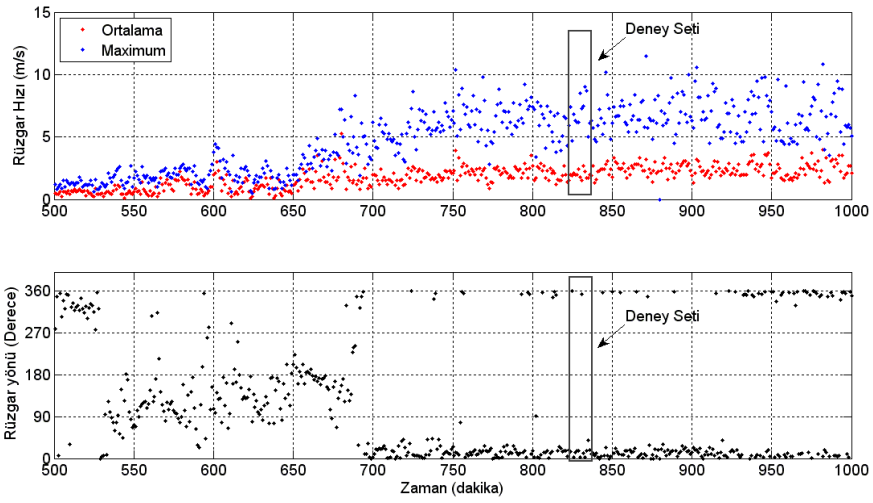
- Her iki sensörde, binanın dinamik performansını belirleme açısından, binanın 1. doğal frekansı olan 0.41 Hz frekans değerini benzer şekilde belirlemiştir. Yapılan eksen dönüşümleri sonrası, her iki sensörün HFD spektrumları, genlik değerlerindeki sayısal büyüklükler göz ardı edilmeksizin, benzer karakterler sergilemiştir.

- Filtrelenmemiş GPS zaman serilerinin genlik-zaman ilişkileri incelendiğinde, binada ortalama rüzgâr hızındaki değişimlerden kaynaklanan, quasi-statik hareketler varmış gibi algılanmaktadır. Oysa eğim sensörü verileri incelendiğinde, filtrelenmemiş GPS serisinde gözlemlenen büyüklüklerde quasi-statik bir hareket olmadığı ve eğim sensörü zaman serilerinin sadece dinamik bileşenlere ait hareketleri gösterdiği görülmektedir. Filtrelenmemiş GPS zaman serilerindeki bu hareketin ana gerekçesinin, çok yolluluk hatası olduğu eğim sensörü zaman serileri ile ortaya çıkmaktadır. Her iki sensörün frekans alanındaki HFD spektrumları incelendiğinde, 0-0.2 Hz frekans bölgesindeki çok yolluluk hatasından kaynaklanan gürültüler GPS' in HFD spektrumunda görülmekte iken, eğim sensörünün bahsedilen bölgesindeki frekans genlikleri oldukça temizdir.

- Her iki sensörün karşılaştırılması amacıyla, GPS koordinat sisteminin eğim sensörüne, eğim sensörü koordinat eksenlerinin GPS koordinat eksenleri yönüne dönüşümü ile, aslında binanın da hangi yönde hareket ettiğini belirlemeye katkı sağlamıştır. Bir dikdörtgen binanın hareket yönü önceden bilinebilir ve araştırmada kullanılacak sensörlerin yöneltmeleri, binanın yada mühendislik yapısının ana yönlerini temsil edecek şekilde tesis edilir ve ölçmeler yapılır. Fakat, bu teze konu olan yapının şekli, alışılmış ve geleneksel binaların şeklinden oldukça farklı ve nadir bulunan bir şekle sahiptir. Bu durumda, binanın ana yönleri önceden bilinemeyebilir, fakat bu tez kapsamında 2 boyutlu dönüşüm ile koordinat eksenlerine göre frekansların ayrıştırılabildiği ve binanın yükler altındaki dinamik cevaplarına ait yönlerinin tespit edilebilirliği açıkça görülmüştür.

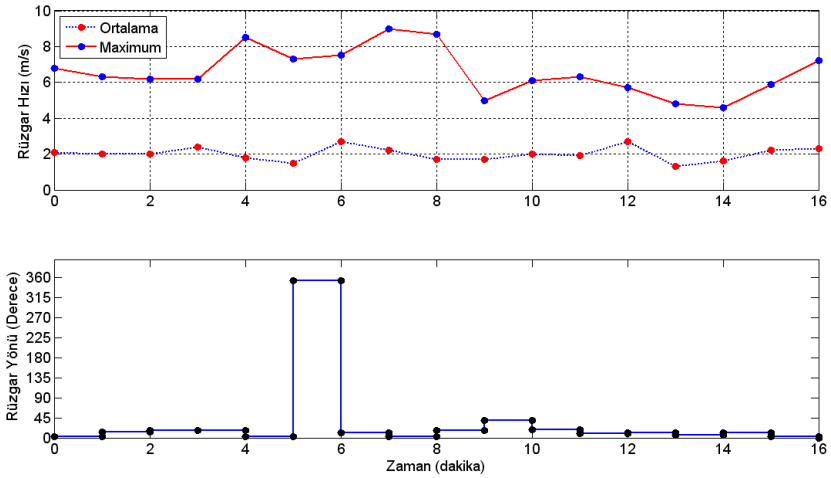
6.2.2 R2 Nolu deney seti zaman ve frekans analizleri

23 Mart 2008 günü meydana gelen şiddetli rüzgâr karşısında binanın dinamik cevabı, bilgisayar sisteminde meydana gelen teknik bir problem dolayısı ile eğim sensörü verileri olmaksızın, sadece GPS ile ölçülebilmiştir.



Şekil 6.24 Rüzgâr ortalama, maksimum hız (üst) ve yön (alt) zaman serisi (500^{d}-1000^{d})

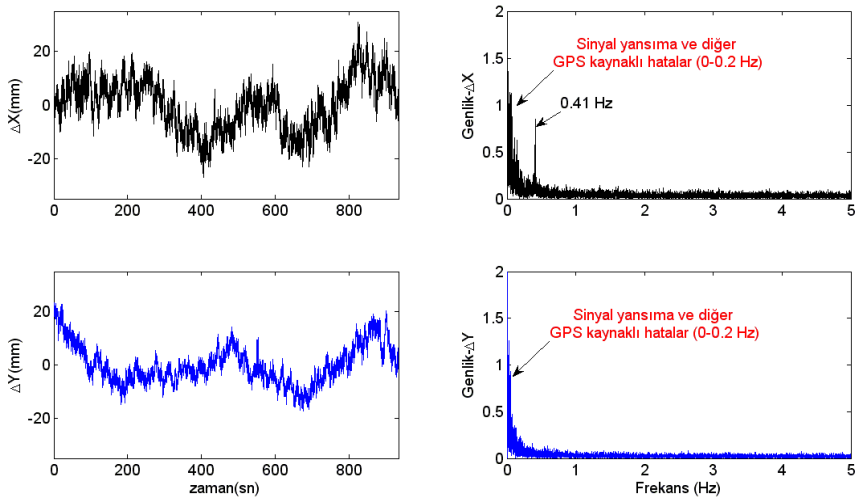
GPS ölçmelerine ilave olarak, bina etkiyen rüzgâr hız ve yönü anemometre yardımı ile herhangi bir problem olmaksızın ölçülmüştür. Bahsedilen günün, rüzgârlı olduğu zaman aralığına ilişkin zaman serisi Şekil 6.24 de verilmiştir. Şekil 6.24'de üst çizim 1 dk lık veri toplama aralığındaki ortalama ve maksimum rüzgâr hızını, alt çizim ortalama rüzgâr yönünü temsil etmektedir. Şekil 6.24 'den de görüldüğü gibi rüzgâr maksimum 12 m/sn (43.2 km/saat) rüzgâr hızına ulaşmıştır. Toplanan veri uzunluğu toplamda 2 saat olmasına rağmen, burada inceleme amacı ile 935 sn (15^{d} 35^{s}) uzunluğunda bir veri seti seçilmiştir.



Şekil 6.25 Rüzgâr ortalama, maksimum hız (üst) ve yön (alt) zaman serisi

Deney setine karşılık gelen rüzgâr hız ve yönüne ait bilgiler detaylı Şekil 6.25 de görülebilir. Şekil 6.25'de üst çizim detaylı bir şekilde incelendiğinde, rüzgârın ortalama hızı 2 m/sn civarında, maksimum rüzgâr hızları ise 5 m/sn ile 9 m/sn aralığında değişmektedir. Deney süresince rüzgârın binaya ortalama esme yönü R1 deneyinde olduğu gibidir.

R2 deneyinde GPS veri örnekleme frekansı (f_s) 10 Hz dir. Binanın R2 deneyi boyunca GPS ile ölçülen ve proses sonucu her epok' a ait X^{gps} ve Y^{gps} koordinatları elde edilmiştir. Elde edilen GPS koordinatlarının yönleri Şekil 6.3 de gösterildiği şekildedir. Binanın GPS eksenleri boyunca zamana göre bağıl değişimlerinin daha açık görülmesi amacıyla GPS zaman serileri ve HFD spektrumları çizilmiştir (Şekil 6.26).



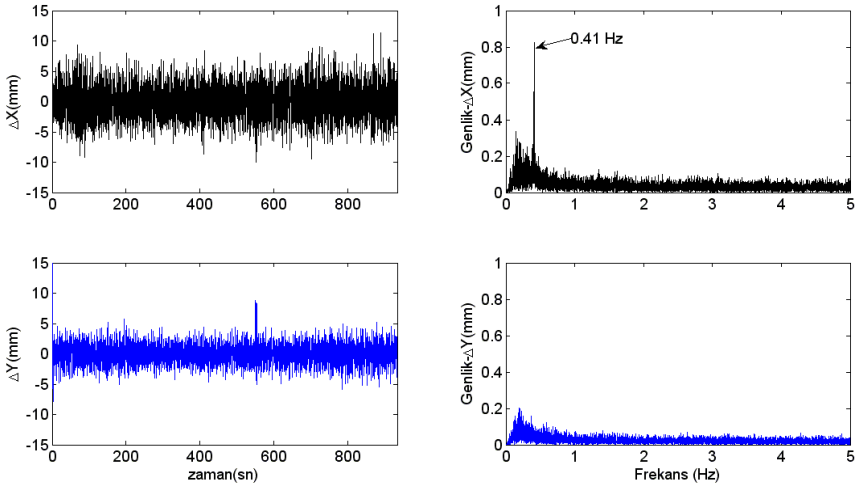
Şekil 6.26 GPS zaman serisi ve HFD spektrumları

Şekil 6.26 da genlik-zaman ilişkisini gösteren zaman serilerinin yüksek frekans bileşeni incelendiğinde, başka bir ifade ile kısa dönemli bileşen incelendiğinde, hareketin genliği ΔX bileşeninde ΔY bileşenine göre, R1 deneyinde olduğu gibi, daha fazladır. Şekil 6.26 da frekans alanındaki, HFD spektrumları incelendiğinde, her iki bileşenin 0-0.2 Hz band aralığında gürültüleri benzer olup, binanın doğal frekansı olan 0.41 Hz'de sadece ΔX bileşeninde sıçrama yapmaktadır. 0.2-5 Hz band aralığında, 0.41 Hz'de ΔX bileşenindeki sıçrama dışında, frekans değerlerine karşılık gelen genlikler homojen ve rasgelelik gösteren beyaz gürültü değerlerini içermektedir. Neden 0.41 Hz frekansındaki sıçrama sadece ΔX bileşeninde gözükmektedir sorusunun cevabı; R1 deneyindekine benzer şekilde, binaya etkiyen yüklerin X^{gps} ekseni boyunca etkili olduğu ve binanın bu yönde daha esnek olduğudur.

6.2.2.1 GPS zaman serisindeki sinyal yansıma etkisinin filtrelenmesi

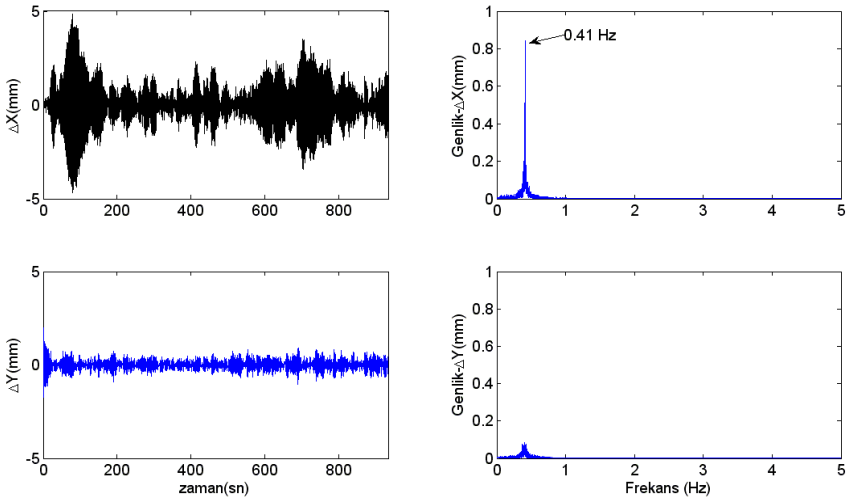
Bir önceki R1 deneyindekine benzer şekilde, R2 deneyinde de GPS sinyal yansıma hatası beklenen bir durumdur. Zaman serisinden sinyal yansıma hatasını, 0 Hz den istenen bir frekans aralığına kadar olan frekans bileşenlerini yok etmek amacı ile, frekans alanında uygun bir yüksek geçiren filtre uygulanarak ortadan kaldırılabilir. Böylelikle sinyal yansıma etkisinden arınmış zaman serisi elde

edilebilir ve yapının sadece dinamik davranışlarını içeren sinyallerle ilgilenilebilir. Sonlu dürtü cevaplı yüksek geçiren Chebyshev Tip –I filtresi uygulanmıştır. Filtre ile 0-0.2 Hz aralığındaki banda ait bileşenler bastırılmıştır. Filtrelenmiş zaman serisi ve HFD spektrumları Şekil 6.27 de görülebilir. Şekil 6.27 incelendiğinde hem zaman hem de frekans alanındaki çizimler dinamik bileşenlere ait sinyalleri ve özellikleri yansıtmaktadır. Fakat şu unutulmamalıdır ki, yüksek geçiren filtre ile filtrelenmiş zaman serileri, binada ortalama rüzgâr hızından kaynaklanabilecek ve frekansı sinyal yansıma frekansı içerisine düşen quasi-statik davranışları içeren sinyalleri de ortadan kaldıracaktır. Yapıların yükler altındaki quasi-statik davranışlarının incelemeye değer olduğu durumlarda, sinyal yansıma hatasından kaynaklanan bu durum GPS in tek başına yeterli olmadığı ve eğim sensörü vb. gibi sensörlerle GPS' e entegre izleme sistemlerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Fakat, yapı sağlıklarının ve durumlarının değerlendirilmesinde quasi-statik davranıştan ziyade, dinamik davranışların incelenmesi ve analizi söz konusudur.



Şekil 6.27 Yüksek geçirgen filtre uygulanmış zaman serileri ve HFD spektrumları

Şekil 6.27 sadece binanın 0.41 Hz lik dinamik bileşenini değil aynı zaman diğer yüksek frekanslı bileşenleride içermektedir. Daha ileri seviyede analiz yapabilmek amacıyla band geçiren bir filtre ile 0.41 Hz frekansındaki binanın hareketleri filtrelenmiştir. Filtre ve parametreleri R1 deneyinde olduğu gibidir. Filtrelenmiş GPS zaman serisi ve HFD spektrumları Şekil 6.28 de görülebilir.



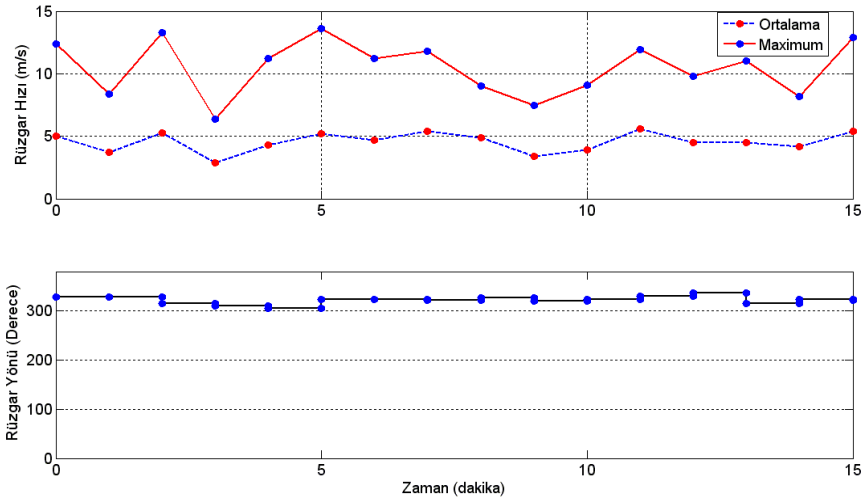
Şekil 6.28 Band-geçiren filtre uygulanmış zaman serileri ve HFD spektrumları

6.2.3 R3 nolu deney seti zaman ve frekans analizleri

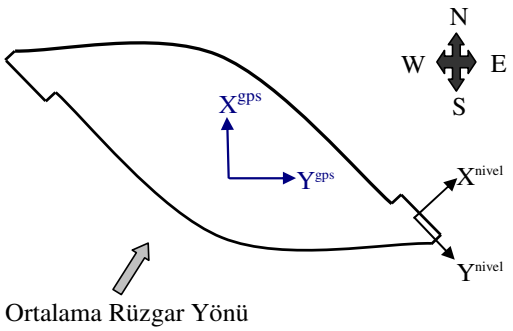
R1 deneyinde eğim sensörünün veri toplama frekansı 1 Hz seçilmişti. Daha öncede bahsedildiği gibi Nyquist teoremine göre fs örnekleme frekansının yarısına kadar olan frekanslar belirlenebilir. Bu, binada 0.5 Hz in üzerinde gerçekleşen doğal frekansların, eğim sensörünün örnekleme frekansının 1 Hz seçilmesi durumunda, belirlenememesi anlamına gelmektedir. R1 deneyinde GPS ile binada 5 Hz e kadar gerçekleşebilecek doğal frekanslar belirlenebileceği halde binanın ilk doğal frekansı olan 0.41 Hz dışında daha yüksek mod değerlerine ilişkin frekanslarda bir sıçrama gözlemlenmemiştir.

R3 deneyinde eğim sensörü örnekleme frekansı (fs) 2 Hz' den 4 Hz' e arttırılmıştır. Bu, binada rüzgâr yükü altında birinci moda ilişkin doğal frekans dışında, 2 Hz e kadar, daha yüksek dereceden olan doğal frekansların belirlenebileceği anlamına gelmektedir. Bu deneyde, GPS örnekleme frekansı (fs) ise 2 Hz seçilmiştir.

Hem GPS hem de eğim sensörü ile eş zamanlı toplanan veri setinden, 950 sn lik bir deney verisi incelenmek üzere seçilmiştir. Deney süresince yapıya etkiyen maksimum ve ortalama rüzgâr hızı ve ortalama rüzgâr yönüne ait bilgiler Şekil 6.29'da, ortalama rüzgâr yönünün binaya esme doğrultusu Şekil 6.30 da görülebilir.



Şekil 6.29 Maksimum, ortalama rüzgâr hızı (üst) ve yönü (alt) (16^{d})

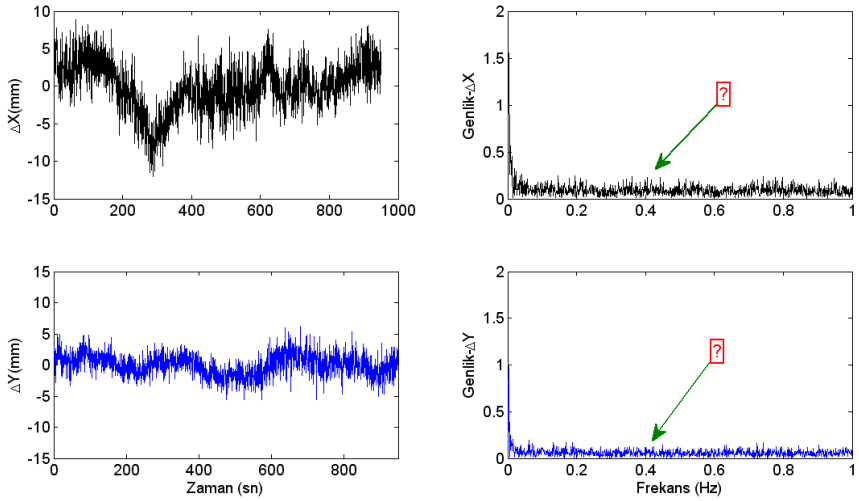


Şekil 6.30 R3 deneyin boyunca ortalama rüzgârın binaya esme yönü

6.2.3.1 GPS verilerinin analizi

Kinematik GPS verilerinin prosesi sonucu her 0.5 sn (2 Hz) ye karşılık gelen epok koordinatlarına ait zaman serisi ve HFD spektrumları Şekil 6.31'de görülebilir. Her iki koordinat bileşenine ait zaman serilerinin yüksek frekanslı hareketleri incelendiğinde, ΔX bileşeninin ΔY bileşenine göre biraz daha yüksek genlikli olduğu söylenebilir. Her iki bileşenin HFD spektrumları incelendiğinde, 0-0.02 Hz aralığında meydana gelen sıçramalar dışında herhangi bir frekans sıçraması göze çarpmamaktadır. Böylece, binaya etkiyen rüzgâr yükünün diğer R1 ve R2 deneyinde olduğu gibi etkili olmadığı söylenebilir. Bir diğer çıkarım ise, bu deney boyunca etki eden rüzgâr yükünün bina tarafından verilen cevabının GPS ile belirlenemeyecek

kadar küçük boyutta olması şeklindedir. Bunun anlamı, binanın rüzgâra olan dinamik cevabının, GPS in kinematik konum belirleme doğruluğunun altında olmasından, yada bir başka ifade ile GPS sinyal-gürültü oranının düşük olmasındandır.

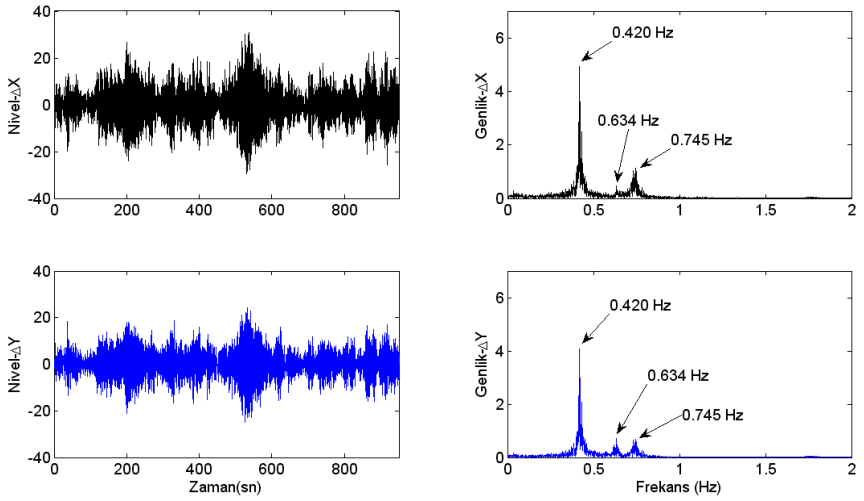


Şekil 6.31 GPS zaman serisi ve HFD spektrumları

6.2.3.2 Eğim sensörü verilerinin analizi

Rüzgâr süresince üst katta tesis edilen eğim sensörü ile eğim değişimleri kayıt edilmiş ve deplasman zaman serileri ve bu zaman serilerine ait HFD spektrumları Şekil 6.32 de verilmiştir. Şekil 6.32 de görülen grafiklerdeki koordinat yönleri eğim sensörünün bina üzerindeki tesis edilen yönleri olup her hangi bir koordinat eksen rotasyonu yapılmamıştır. Şekil 6.32'de zaman alanındaki grafikler incelendiğinde binaya etkiyen rüzgârın zamana göre değişen şiddet ve yönüne bağlı olarak, genlik değerindeki değişimleri göze çarpmaktadır. Şekil 6.32'de frekans alanındaki HFD spektrumları incelendiğinde, 0.42 Hz olan binanın ilk moduna ait doğal frekansı dışında hem ΔX hem de ΔY bileşenlerinde 0.634 Hz ve 0.745 Hz frekanslarında da sıçramalar gözükmektedir. Bu, binanın rüzgâr yükü karşısında ilk 3 doğal frekansının harekete geçtiği anlamına gelmektedir. Koordinat bileşenlerinin bir birlerine göre durumu frekanslardaki genlik değerlerinin büyüklükleri açısından incelendiğinde, 0.420 ve 0.745 Hz lik frekansların ΔX bileşeninde daha büyük, 0.634 Hz lik frekansın ise ΔY bileşeninde daha büyük olduğu açıkça görülmektedir. Eğim sensörü ile frekans alanında elde edilen sonuçlar, GPS in sonuçları ile karşılaştırıldığında,

GPS bu rüzgâr yükü karşısında meydana gelen binanın düşük genlikli dinamik hareketlerini belirleyemez iken, eğim sensörü bu düşük genlikli hareketleri hassasiyetinin yüksek olması sebebiyle belirleyebilmiştir. R1 deneyinin aksine, R3 deneyinde eğim sensörü veri toplama frekansı (fs) yüksek olduğundan binada meydana gelen ilk 3 doğal frekansları belirlenebilmiştir. Bu durum, düşük şiddetli rüzgâr yükü karşısında meydana gelen hareketlerde eğim sensörünün GPS' e göre daha duyarlı olduğunu ve yapı sağlıklarının izlenmesinde ve kontrolünde farklı sensörlerin entegrasyonunun önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır.

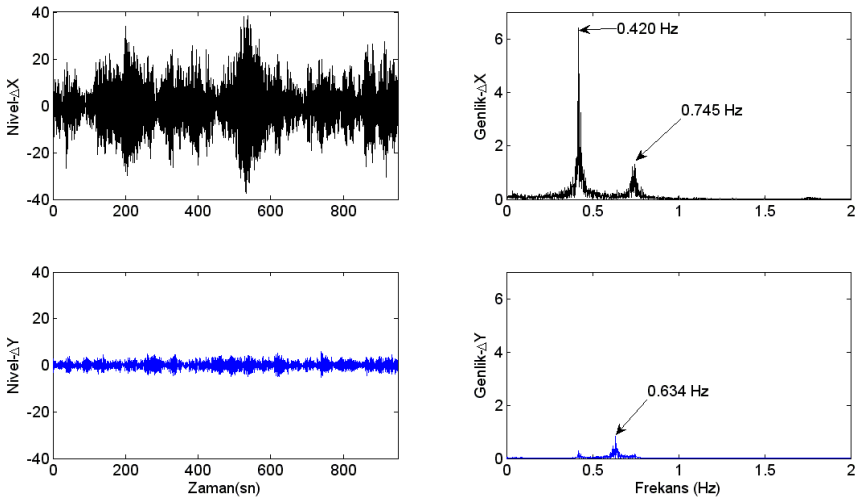


Şekil 6.32 Eğim değerinden türetilmiş deplasman zaman serisi ve HFD spektrumları

6.2.3.2.1 Eksen rotasyonu ile frekans bileşenlerinin ana yönlerinin ayrıştırılması ve belirlenmesi

Şekil 6.32'de verilen zaman ve frekans alanındaki grafikler eğim sensörünün binaya tesis edildiği koordinat yönlerindeki sonuçlar olup, her iki koordinat bileşenine ait HFD spektrumlarında binanın ilk 3 temel frekansına işaret eden farklı genliklere sahip sıçramaları içermektedir. Bu alt bölümde, temel frekansın en baskın olduğu yönün bulunması ve hangi frekansın hangi yöne ait olduğunun bulunması yada bir başka değişle, frekansların yönlere göre ayrıştırılması amacıyla eksen rotasyonu uygulanmıştır. Burada şu noktaya dikkat edilmelidir ki, R1 deneyinde GPS ve eğim sensörünün karşılaştırılması amacıyla eksenler arasındaki ölçülen dönüklük açısı yardımıyla eksenler birbirine paralel getirilmiştir. Fakat, burada amaç iki

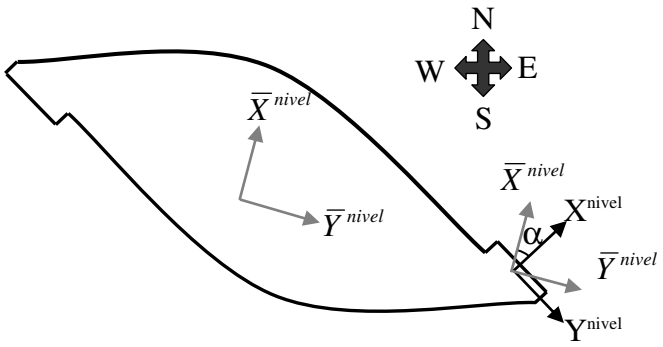
sensörün karşılaştırılması değil, 3 temel frekansın baskın olduğu ana yönlerin bulunması ve binanın rüzgâr yükü karşısındaki tepkisinin en baskın olduğu yönlerin ortaya çıkarılmasıdır. Bu amaçla, (6.3) formülü ile eksen rotasyonu farklı α açıları ile uygulanmış ve en uygun α açısı ve bu açı uygulanarak elde edilen zaman serileri ve HFD spektrumları elde edilmiştir (Şekil 6.33).



Şekil 6.33 Eksen rotasyonu uygulanmış türetilmiş deplasman zaman serisi ve HFD spektrumları

En uygun α açısı, saat ibresinin tersi yönünde, 41^g olarak belirlenmiştir (Şekil 6.34). Bu açı aynı zamanda eğim sensörü ve GPS sistemleri arasındaki dönüklük açısı olan $49^g.5$ a yakın olup, dönüştürülmüş eğim sensörü yönleri hemen hemen GPS in orijinal eksen yönleri ile paraleldir. Şekil 6.33'de zaman bölgesindeki grafikler incelendiğinde, ΔX bileşen yönünde deplasman değerleri ΔY bileşeni yönündekinden oldukça yüksek genliklidir. Aynı şeklin frekans bölgesindeki grafikleri incelendiğinde, ΔX bileşeni yönünde sadece 0.420 ve 0.745 Hz lik frekans sıçramaları gözükmekte olup, 0.634 Hz de çok düşük olan sıçrama artık, eksen rotasyonu sonrası gözükmemektedir. Benzer şekilde, ΔY bileşeni yönünde 0.420 ve 0.745 Hz de meydana gelen sıçramalar eksen rotasyonu sonrası artık gözükmemekte olup, tek sıçrama 0.634 Hz de gözükmektedir. 0.420 ve 0.745 Hz sırasıyla, $\overline{X}^{nivel}$ yönündeki birinci ve ikinci doğal frekans, 0.634 Hz ise $\overline{Y}^{nivel}$ yönündeki birinci doğal frekansa işaret etmektedir. Böylelikle eksen rotasyonu ile yapının rüzgâr yükü

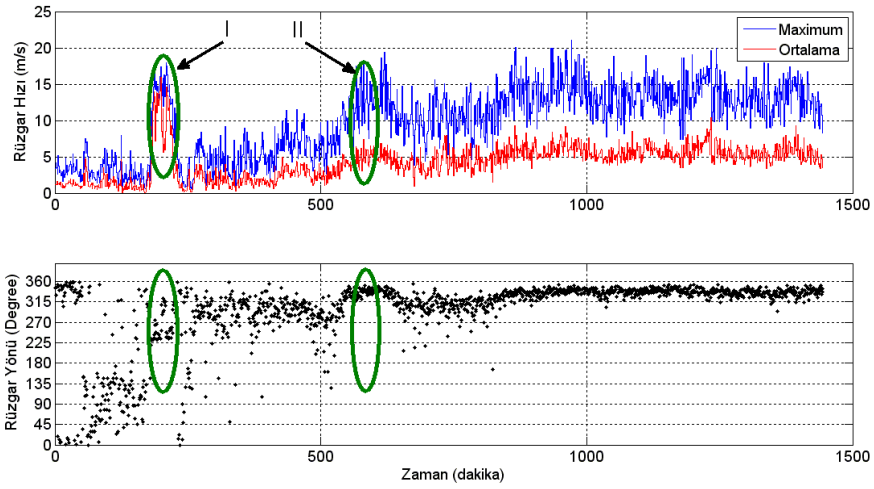
karşısındaki dinamik cevapları daha açık bir şekilde anlaşılmış ve yapı titreşimine ilişkin ana yönler belirlenebilmiştir.



Şekil 6.34 Eğim sensörü orjinal eksen yönleri ve rotasyon uygulanmış eksen yönleri

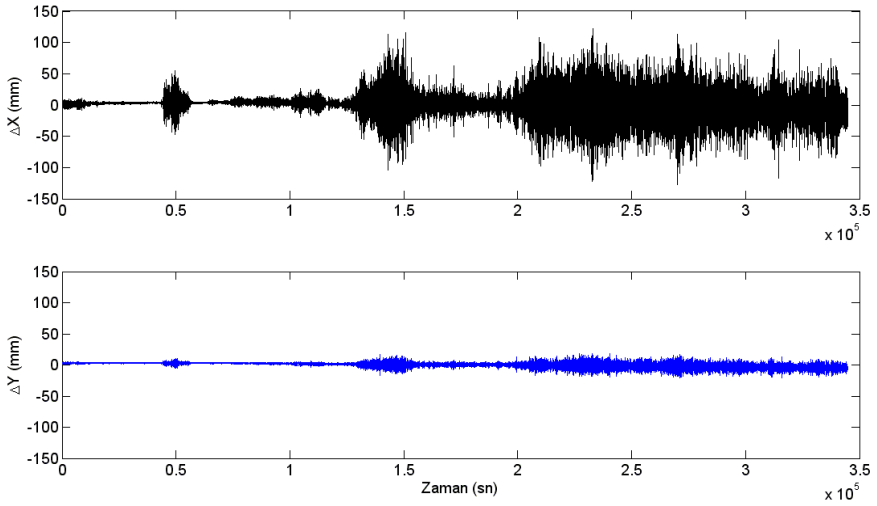
6.2.4 R4 nolu deney seti zaman ve frekans analizleri

Bu deney ile hedeflenen, ortalama ve standart sapma bakımından farklı istatistiksel özelliklere sahip dinamik rüzgâr yükünün yapı üzerindeki dinamik cevapları açısından etkileri araştırılmış, bu amaçla 4 Mart 2010 tarihli gün boyunca binaya etkiyen bir rüzgâr veri seti incelenmiştir. Şekil 6.35'de ortalama, maksimum rüzgâr hızı ve ortalama rüzgâr yönüne ait zaman serileri görülebilir.



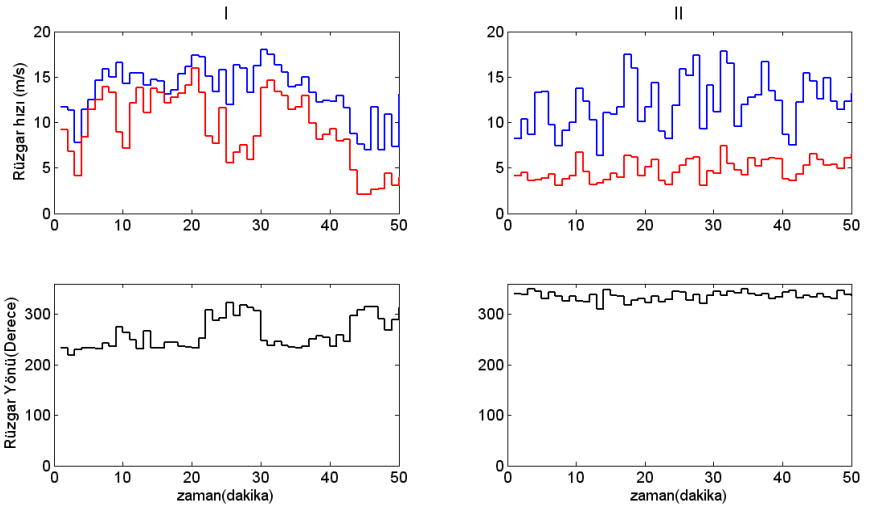
Şekil 6.35 Ortalama, maksimum rüzgâr hızı ve yönü zaman serisi

Şekil 6.36'da ise eksenleri rotasyon yapılmış tüm güne ait eğim değerinden türetilmiş deplasman zaman serisi görülebilir. Eksen rotasyonunda en uygun α açısı R3 deneyindeki gibi 41^{g} olarak belirlenmiştir.



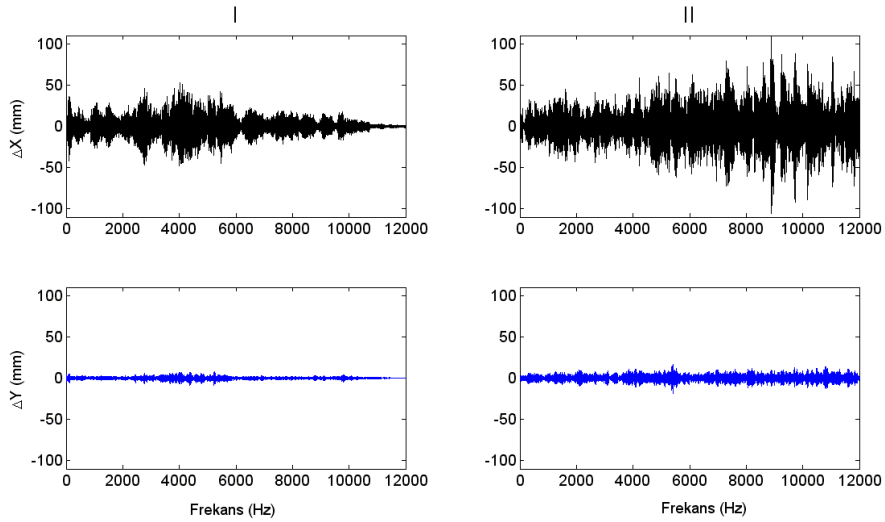
Şekil 6.36 Eğim değerinden türetilmiş deplasman zaman serisi

Şekil 6.35'de görüldüğü gibi, I ve II olarak isimlendirilen, her biri 50 dakika uzunluğunda ve istatistiksel özellikleri birbirinden farklı olan iki veri seti seçilmiştir. İki veri setine ait maksimum ve ortalama rüzgâr hızı ve ortalama rüzgâr yön bilgilerinin detayları Şekil 6.37'de görülebilir.



Şekil 6.37 I ve II deney seti maksimum ve ortalama rüzgâr hızı (üst) ve yönü (alt)

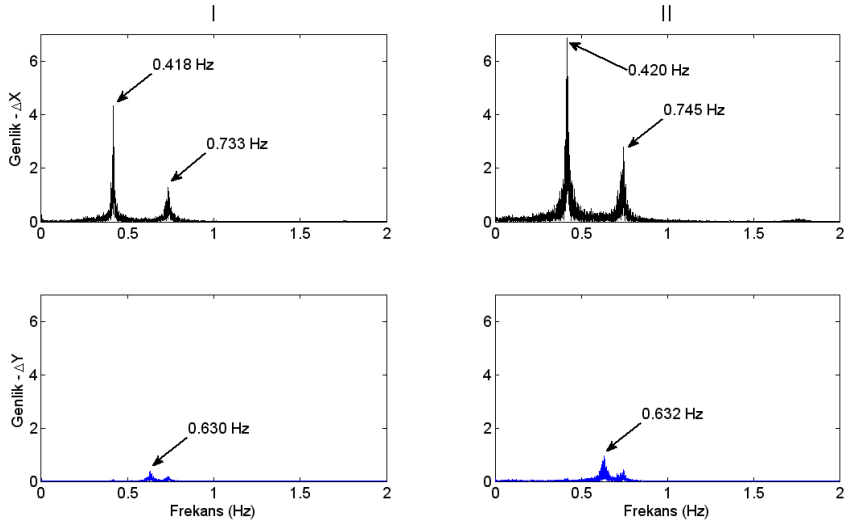
Ortalama rüzgâr hızı açısından, I ve II nolu veri seti karşılaştırıldığında I'e ait ortalama rüzgâr hızı, deney süresi boyunca II' nin ortalama rüzgâr hızından daha büyük değerlere ve deney süresince gerçekleşen ortalama değerden daha yüksek dalgalanmalara sahiptir. I nolu deney setinde ortalama ve maksimum rüzgâr hızı açısından birbirine yakın değerler takip ederken, II nolu deney setinde maksimum ve ortalama rüzgâr hızı daha yüksek farklar göstermektedir. Bu, II nolu deney seti süresince, I nolu deney seti ile karşılaştırıldığında, rüzgârın daha yüksek dereceden bir dinamik yapı gösterdiği anlamına gelmektedir. I ve II nolu deney seti ortalama rüzgâr yönü açısından karşılaştırıldığında, farklı yapılar ve ortalamalar göstermektedir (Şekil 6.37).



Şekil 6.38 I ve II deney seti zaman serileri

I ve II nolu deney setlerinin zaman serileri ve HFD spektrumları Şekil 6.38 ve 6.39'da sırasıyla verilmiştir. Zaman ve frekans alanlarındaki grafikler incelendiğinde, her iki deney setinde de binaya ilişkin 3 temel frekans, I nolu deney seti için ΔX bileşeninde 0.420 ve 0.733 Hz, ΔY bileşeninde 0.630 Hz, II nolu deney seti için ise ΔX bileşeninde 0.420 ve 0.745 Hz, ΔY bileşeninde 0.632 Hz, harekete geçmiştir. I ve II nolu deney setinde gerçekleşen frekansların genlikleri II nolu deney de, I nolu deneye göre daha yüksek değerlere sahiptir. Ortalama ve maksimum rüzgâr hızı I nolu deneyde daha yüksek değerlere sahip olmasına rağmen, zaman ve frekans alanındaki sonuçlar I nolu deneyde daha düşük genlikli değerler göstermektedir. Bunun anlamı, II nolu deney setinde binaya etkiyen rüzgâr yükünün dinamik

bileşeninin I nolu deney setine göre daha yüksek seviyede olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum gösteriyor ki, binaya etkiyen rüzgâr yükünün büyüklüğünden ziyade, dinamik yapısı ve frekansı etkilidir.



Şekil 6.39 I ve II deney setlerine ait HFD spektrumları

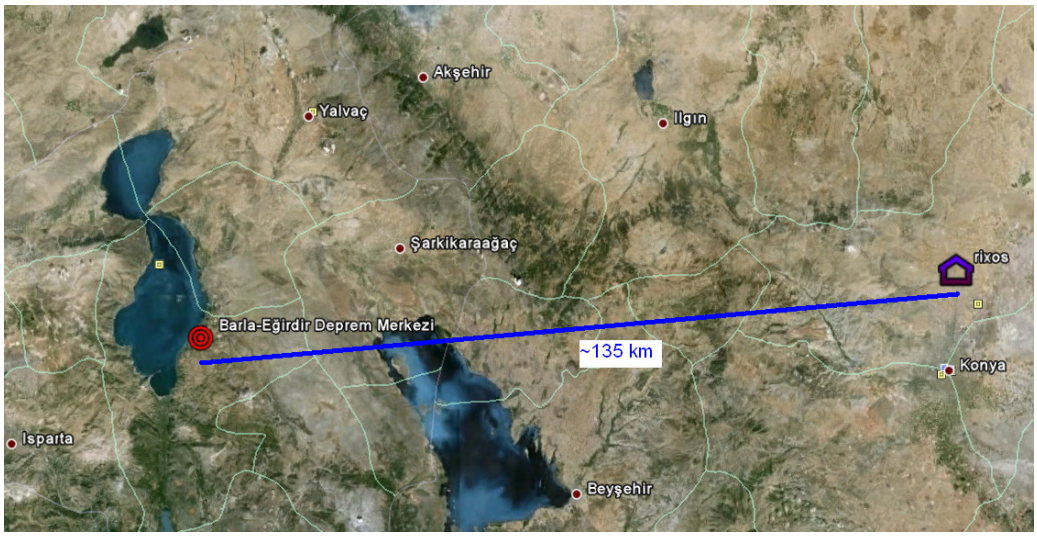
6.3 Binanın Sismik Yük Cevabına İlişkin Ölçmeler ve Analizler

6.3.1 Barla-Eğirdir-Isparta depremi

11 Nisan 2007 yerel saat ile 01:00'de merkez üssü Barla-Eğirdir yakınlarında büyüklüğü 4.9 ML ve derinliği 8.1 km olan bir deprem meydana gelmiştir. Bu depremden önce yerel saat ile 00:39 da büyüklüğü 4.6 ML olan bir deprem meydana gelmiştir. Bölge genel anlamda tektonik açıdan Batı Anadolu Açılma Rejimi içinde Isparta Büklümü diye tanımlanan alan içerisinde yer almaktadır. Bölge yoğun deformasyon alanında olup ve farklı yerel tektonik yapıları içinde barındırmaktadır (BU, Kandilli Rasathanesi).

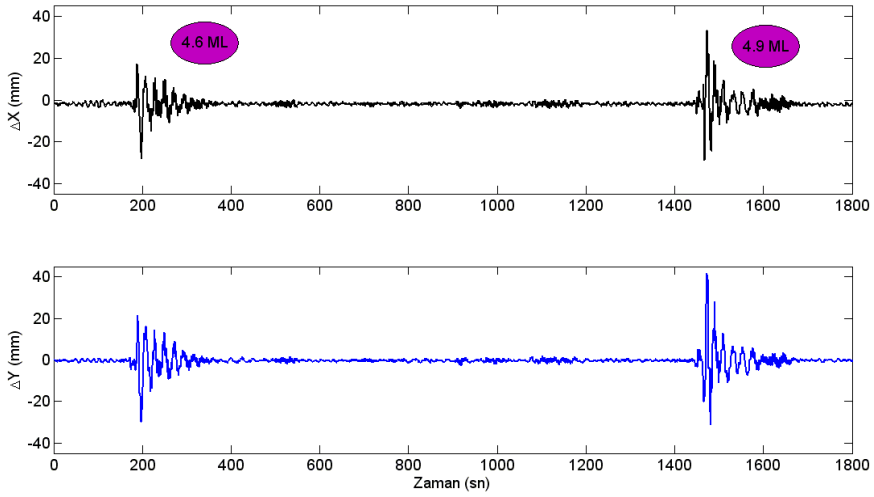
Deprem merkezinin binaya olan mesafesi yaklaşık 135 km olup, deprem merkezi ve binanın birbirlerine göre konumları Şekil 6.40'da görülebilir. Binanın depremlere olan cevabına ilişkin eğim sensöründen türetilmiş deplasman zaman serileri Şekil 6.41'de görülebilir. Deprem süresince eğim sensörü veri örnekleme

frekansı (fs) 0.667 Hz olduğundan ve bu sebep ile binanın temel frekanslarını belirlenemeyeceğinden, frekans alanında herhangi bir analiz yapılamamıştır.



Şekil 6.40 Barla-Eğirdir-Isparta deprem merkezi ve bina konumu

Şekil 6.41 incelendiğinde, depremler arasındaki şiddet farkının binanın deplasman cevabı açısından farkı açıkça görülebilmektedir. Görüldüğü üzere, uzak depremlerin yüksek binalara etkisi eğim sensörü ile rahatlıkla belirlenebilmektedir.



Şekil 6.41 Türetilmiş deplasman zaman serisi

6.3.2 Sille-Konya depremi

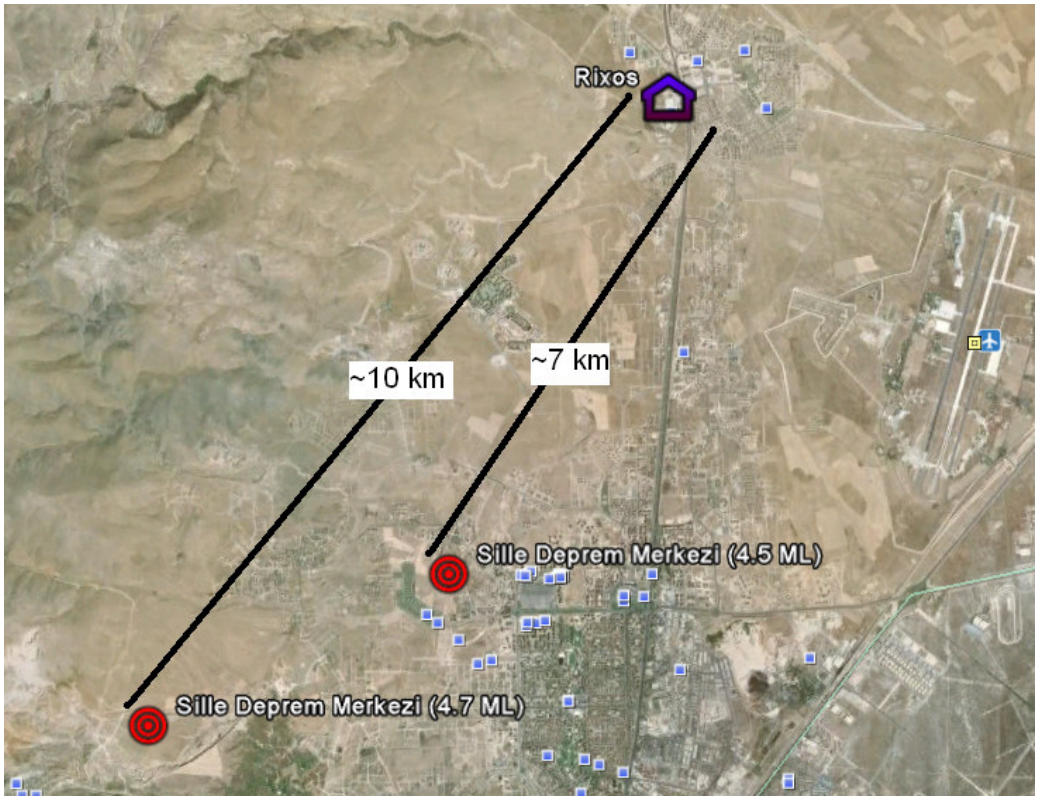
10 Eylül 2009 yerel saat 21:29'da büyüklüğü 4.5 ML olan hafif şiddette, merkezi binaya yaklaşık 7 km uzaklıkta, 5 km derinlikli bir deprem meydana gelmiştir. Depremin dış merkezi Konya iline bağlı Selçuklu ilçesinin tarihi Sille köyü yakınlarıdır. Depremin dış merkezi Konya'ya 10 km., Selçuklu' ya yaklaşık 7 km., Sille'ye ise 5 km. uzaklıktadır. Deprem özellikle Konya ve çevresinde kuvvetlice hissedilmiş ve halk arasında paniğe neden olmuştur. Depremi hemen takip eden zaman sürecinde artçılar gece boyu devam etmiştir (BU, Kandilli Rasathanesi).

Bölgedeki ikinci önemli deprem 11 Eylül 2009 günü sabaha karşı 04:58'de meydana gelmiştir. Depremin yerel büyüklüğü 4.7 ML olup, derinliği 5.4 km ve merkezi binaya yaklaşık 10 km uzaklıktadır (BU, Kandilli Rasathanesi).

Depremlerin meydana geldiği alan İç Anadolu deformasyon alanı olup bölgede aktif tali kırıklar mevcuttur. Bu kırıklar çok sık olmasa da zaman zaman bu büyüklüklerde depremleri meydana getirmektedirler. Bu yüzden meydana gelen depremleri bölgede süregelen iç deformasyonun bir sonucu olarak değerlendirilmektedir (BU, Kandilli Rasathanesi).

Depremin merkezlerinin binaya göre konumları ve uzaklıkları Şekil 6.42'de görülebilir. Deprem süresince eğim sensörü verilerini kayıt eden bilgisayar sistemindeki teknik arıza sebebiyle bina tepkimesi ölçülememiştir. Bu sebepten dolayı, binaya çok yakın gerçekleşen böyle bir yer sarsıntısının dinamik analizi yapılamamıştır.

Her ne kadar bu depreme ilişkin ölçmeler ve analizler gerçekleştirilmemiş olsa da, binanın deprem öncesi ölçülen ve analiz sonucu belirlenen ilk temel frekansı ve deprem sonrası yapılan ölçmeler sonrası belirlenen frekanslarının karşılaştırılması ve bu depremin binaya herhangi kalıcı bir deformasyona sebep olup olmadığı bir sonraki sonuçlar ve öneriler bölümünde değerlendirilmiştir.

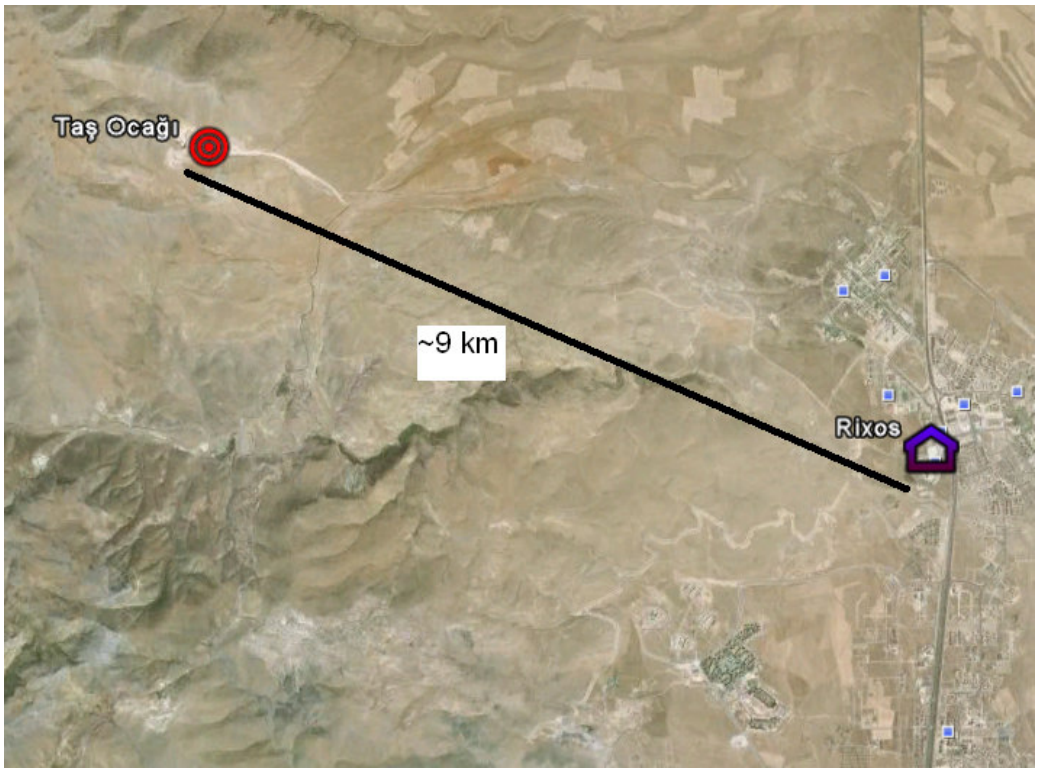


Şekil 6.42 Sille – Konya deprem merkezleri ve bina konumu

6.3.3 Taş ocağında gerçekleştirilen dinamit patlamaları sonucu meydana gelen yer sarsıntıları ve hava dalgasının binaya etkileri (D1 nolu deney seti)

Selçuk Üniversitesi kampüsünün batı kesiminde, özel bir firma tarafından işletilen, bir taş ocağı bulunmaktadır. Taş ocağı binaya 9 km uzaklıktadır. Taş ocağı ve Rixos Hotel binasının birbirlerine göre konumları Şekil 6.43'de görülebilir. Taş ocağında zaman zaman dinamit patlatmaları gerçekleştirilmektedir. Eğim sensörü ile sürekli veri toplaması gerçekleştirildiğinden, taş ocağında zaman zaman gerçekleştirilen patlamalar sonucu, deprem anındaki dalgalara benzer, yer dalgaları oluşmakta ve binaya dinamik yük olarak etki edebilmektedir. Gerçekleştirilen patlamalar sonucu, sadece yer sarsıntıları değil aynı zamanda belirli bir frekans değerine sahip hava dalgaları da oluşturmaktadır. Gerçekleşen yer dalgaları ve hava dalgalarının binaya etkileri, dalgaların frekanslarına, zemini oluşturan yapıya, topografyaya, hava şartlarına vb. etkilere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

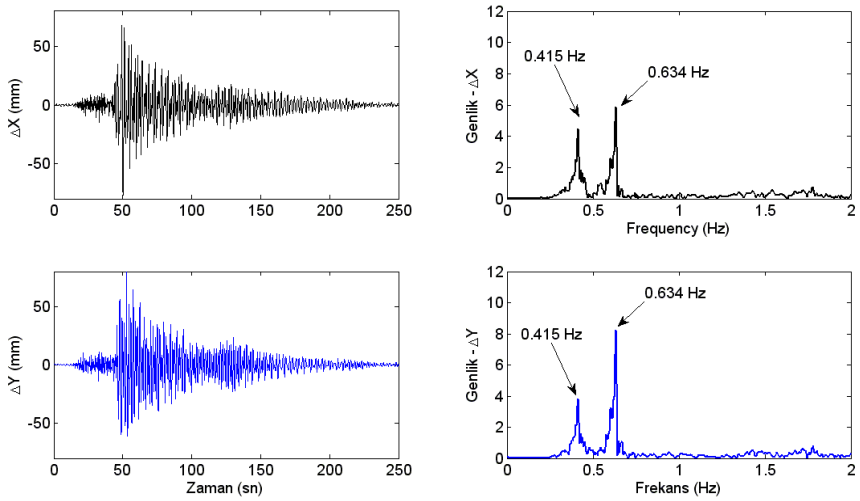
Bu tez kapsamında, taş ocağındaki patlama sonucu meydana gelen sarsıntının binaya etkileri, tezin beklenen rüzgâr ve deprem yükü ölçmeleri ve analizi dışında gerçekleşen bir olgu olması dolayısıyla, yer sarsıntısının yada hava dalgasının şiddeti ve frekansının belirlenmesine yönelik bir ölçme gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 6.43 Taş ocağı ve Rixos Hotel binası konumları

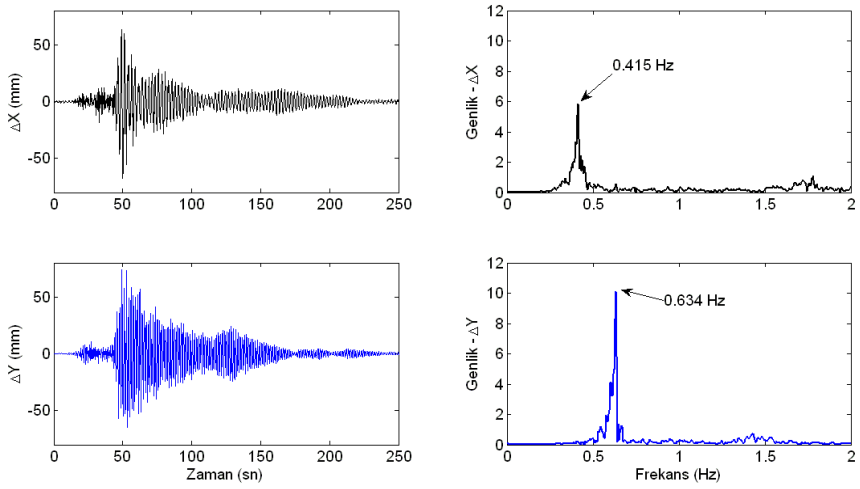
Eğim sensörü ile ölçülen eğim değeri yardımıyla türetilmiş deplasman değerlerine ait zaman serileri ve HFD spektrumları Şekil 6.44'de görülebilir. Şekil 6.44 de ΔX ve ΔY bileşenlerinin yönleri, eğim sensörünün orijinal tesis yönlerinde olup, eğim sensörünün eksenlerine herhangi bir rotasyon uygulanmamıştır. Şekil 6.44' den görüldüğü üzere hem ΔX ve ΔY bileşenlerinde 0.415 ve 0.634 Hz frekans bileşenlerinde sıçramalar gözükmektedir. Böylece, taş ocağındaki patlamanın etkisiyle oluşan dinamik yüklerin binada iki temel frekansın harekete geçmesine sebep olmuştur. Fakat dikkat edilirse, R3 ve R4 deneylerinden farklı olarak 0.745 Hz frekansında hiç bir sıçrama gözükmemektedir. Buna ilave olarak 0.634 Hz

frekansının genlik değeri, hem ΔX hem de ΔY bileşenlerinde 0.415 Hz frekansının genlik değerinden daha düşüktür.



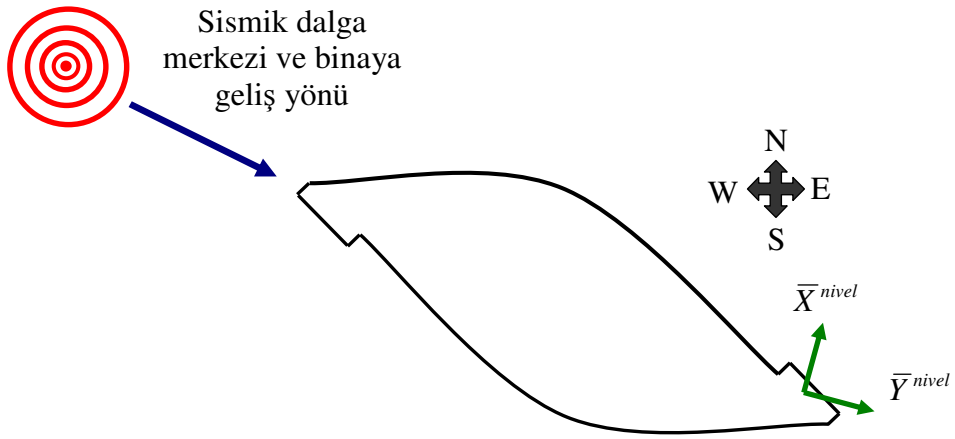
Şekil 6.44 Orjinal eksen yönlerinde zaman ve HFD spektrumları

Daha önceki R3 ve R4 deneylerinde uygulanan eksen rotasyonları sonucu 0.415 Hz ve 0.634 Hz frekanslarının yönler açısından ayrıştırılabildiği görülmüştür. Bu sebeple, R3 ve R4 deneylerindekine benzer şekilde eksen rotasyonu uygulanmış ve frekansların yönlere ayrıştırılmasının araştırması yapılmıştır. Yapılan eksen rotasyonu sonucu, zaman serisi ve HFD spektrumları Şekil 6.45 de görülebilir.



Şekil 6.45 Eksen rotasyonu uygulanmış zaman ve HFD spektrumları

Şekil 6.45'de zaman serilerinin HFD spektrumları incelendiğinde, 0.415 ve 0.634 Hz frekanslarının ayrıştırılabildiği açıkça görülmektedir. 0.415 Hz frekansı sadece ΔX bileşeninde, 0.634 Hz frekansı ise sadece ΔY bileşeninde sıçrama yapmaktadır. Dikkat edilirse, R3 ve R4 deneylerinde rotasyon sonrası ΔX bileşeninde 0.415 Hz lik sıçramanın yanı sıra daha küçük genlikli 0.745 Hz de bir sıçrama mevcut iken, D1 deneyinde bir sıçrama gözükmemektedir. Buna ilave olarak, R3 ve R4 rüzgâr deneylerindekinin aksine ΔY bileşenindeki 0.634 Hz frekansı, ΔX bileşenindeki 0.415 Hz frekansındaki sıçramanın genliğinden daha yüksek bir değer göstermiştir. Bu, rüzgârın ve yer sarsıntısının binaya dinamik etkilerinin farklı şekilde ortaya çıktığı anlamına gelmektedir. Şuda hatırda tutulmalıdır ki, Şekil 6.44 de gerçekleşen ΔY bileşeni yönündeki 0.634 Hz'in genliğinin daha yüksek genlikli olmasının sebebi, binaya gelen yer sarsıntısının yönü ile de doğrudan ilişkilidir (Şekil 6.46).



Şekil 6.46 Sismik dalga merkezi, binaya geliş yönü ve dönüştürülmüş sensör yönü

7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yaklaşık 100 m yüksekliğindeki betonarme bir yapının 2007 Kasım ve 2010 Mart arasında meydana gelen rüzgâr ve sismik yer hareketleri karşısındaki dinamik cevapları GPS ve eğim sensörü kullanılarak ölçülmüş ve seçilen veri setlerinin bir dizi zaman ve frekans alanındaki analizleri gerçekleştirilerek hem yapı dinamiklerinden olan doğal frekanslar belirlenmiş hem de GPS ve eğim sensörünün yapı dinamik parametrelerini belirleme kabiliyetleri açısından katkıları, eksiklikleri avantaj ve dezavantajlarının bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

Çalışmada dört farklı rüzgâr veri seti, bir tanede sismik yer hareketi olmak üzere toplam 5 farklı dinamik yük-cevap ilişkisi incelenmiştir. Her bir çalışma sonrası elde edilen araştırma sonuçları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

R1 orta şiddetli rüzgâr deney setinin analizi sonucunda, yapının ilk doğal frekansı her iki sensör ile 0.41 Hz olarak tespit edilmiştir. Bu değer yapının analitik modeli olan Sonlu Elemanlar Modeli ile elde edilen ilk doğal frekansı (0.38 Hz) ile %7 lik bir fark ile uyum içerisindedir. Aradaki farkın birçok sebebi olabilir, fakat kısaca yapının analitik modeli oluşturulur iken kabul edilen değerlerinin gerçeği yansıtma oranı ve yapının yapım aşamasından sonra meydana gelen bazı değişikliklerden kaynaklanması örnek olarak verilebilir.

R1 deneyinde GPS veri toplama frekansı 10 Hz ve eğim sensörü veri toplama frekansı 1 Hz olarak gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, GPS 5 Hz e kadar, Eğim sensörü ise 0.5 Hz e kadar olan bina doğal frekanslarını belirleyebilir. Binanın daha yüksek modlarına ait doğal frekansları bu veri toplama frekansları göz önüne alındığında Eğim sensörü sadece ilk doğal frekansları belirleyebilir iken GPS daha yüksek dereceden modlara ait doğal frekansları belirleyebilir. Fakat GPS verisinin frekans alanındaki sonuçları binanın ilk doğal frekansı olan 0.41 Hz dışında daha yüksek bir frekans değerinde bir sıçrama göstermemiş, 0-0.2 Hz aralığında sinyal yansıma ve atmosferik vb. gibi diğer GPS hata kaynakları yüzünden meydana gelen sıçramalar meydana gelmiştir. Eğim sensörü verilerinin frekans alanındaki

sonuçlarda binanın ilk doğal frekansı dışında anlamlı bir sıçrama göstermemiştir. Bu durum, eğim sensörünün gürültü seviyesinin oldukça düşük olduğuna işaret etmektedir.

GPS ve eğim sensörünün koordinat eksenleri binaya göre farklılık göstermekte olup GPS ve Eğim sensörünün karşılaştırılmasının daha anlamlı olabilmesi açısından, binaya göre her iki GPS sensörünün eksen dönüklükleri ilave jeodezik ölçmelerle belirlenmiş ve iki boyutlu koordinat dönüşümü uygulanarak giderilmiştir. Koordinat dönüşümü öncesi GPS in sadece X ekseni yönündeki bileşeni frekans alanında 0.41 Hz değerinde sıçrama göstermiş fakat Y yönünde göstermemiştir. Aslında bu elde edilen sonuç ile binanın rüzgâr yükü altındaki titreşim yönünün GPS in eksenleri ile örtüştüğü tespit edilmiştir. Fakat eğim sensörünün dönüşüm yapılmadan frekans alanındaki sonuçları hem X hem de Y eksenleri yönünde 0.41 Hz de sıçrama göstermiştir. Ancak X yönündeki sıçramanın genliği, Y yönündeki sıçramanın genliğinden büyüktür. Her iki sensörün daha detaylı karşılaştırılabilmesi amacıyla GPS eksenleri eğim sensörü eksenlerine, Eğim sensörü eksenleri GPS eksen yönlerine dönüştürülmüştür. Her iki durumda, frekans alanındaki sonuçlar yapının ilk doğal frekansı olan 0.41 Hz frekansındaki sıçramayı belirleme açısından, GPS ve Eğim sensörünün, genlik değerlerine bakılmaksızın, hem X hem de Y yönüne ait bileşenleri benzer sonuçlar göstermiştir. Eğim değerinden türetilmiş deplasman değeri GPS ile doğrudan ölçülenden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmada kullanılan iki sensörün zaman alanındaki dinamik bileşenin karşılaştırılması amacıyla ve eğim sensöründen türetilmiş deplasman değerlerinin GPS ile doğrudan ölçülen deplasman değerlerinden ne kadar fazla olduğunu daha iyi belirleyebilmek için, Sonsuz-dürtü cevaplı, 6. dereceden Chebyshev Tip–I band geçiren filtre uygulanmıştır. Band geçiren filtrede, binanın doğal frekansı olan 0.41 Hz frekansına karşılık gelen hareketin ortaya çıkarılması amacıyla, 0.40 – 0.42 aralığındaki bandın geçmesine izin verilmiştir. Filtreleme sonrası eğim sensörü ile türetilen deplasman değerinin GPS ile doğrudan belirlenen deplasman değerinden yaklaşık 20 kez daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu, yapının yükler altındaki doğrusal olmayan hareketi yüzünden olduğu ve gerçek deplasmanların belirlenebilmesi için doğrusal dönüşüm denklemine bir düzeltme katsayısının

belirlenmesi gerekmektedir. Düzeltme katsayısı GPS ya da ivme sensörü gibi ölçme araçları ile doğrudan yada dolaylı olarak elde edilen ilave ve eş zamanlı ölçmeler ile karşılaştırma yoluyla elde edilebilir. Bu katsayı, sadece sensörün tesis edildiği yüksekliğe bağlı değil aynı zamanda binanın yapısal sistemi, rijitliği ve kullanılan malzeme ve gelen yükün tipi gibi değişen özelliklere bağlı olarak farklılık göstereceği ve böylece her bir yapı için farklı sayısal değerlere ait düzeltme katsayıları elde edileceği düşünülmektedir.

R2 orta şiddetli rüzgâr deneyinde, sadece GPS ile veri toplama sıklığı 10 Hz olarak yapının rüzgâr cevabı ölçülmüştür. Frekans alanındaki analizler sonucunda R1 deneyindeki GPS sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiş ve binanın ilk doğal frekansı X yönünde 0.41 Hz olarak belirlenmiştir. GPS ölçülerindeki sinyal yansımasından kaynaklanan uzun periyotlu salınımların ortadan kaldırılması amacıyla yüksek-geçirgen filtre uygulanmıştır. Yüksek-geçirgen filtre sonrası elde edilen zaman serisi sadece dinamik salınımları ve beyaz gürültüleri içermektedir, fakat ortalama rüzgâr hızından kaynaklanan ve filtre için seçilen kesme frekansı ile 0 Hz arasındaki band aralığına düşen quasi-statik hareketlerde filtreleme sonrası kaybedilmektedir.

R3 hafif şiddetli rügar deneyinde daha yüksek mod değerlerine ait doğal frekansların harekete geçip geçmediğini ve eğim sensörünün bu değerleri yakalayabilme kabiliyetinin ortaya çıkarılması için eğim sensörü veri toplama frekansı 1 Hz den 4 Hz çıkarılmıştır. Bu deneyde, GPS veri toplama frekansı 10 Hz den 2 Hz düşürülmüştür. Frekans alanındaki HFD analizleri sonucunda, GPS verilerinde R1 ve R2 deneyinden farklı olarak, sinyal yansıma ve diğer GPS hata kaynaklarından ortaya çıkan sıçramalar dışında anlamlı yapının doğal frekanslarına ilişkin bir sıçrama tespit edilmemiştir. Fakat eğim sensörü verileri incelendiğinde, herhangi bir koordinat dönüşümü yapmaksızın hem X hem de Y bileşeninde genlikleri farklı olmak üzere 0.420 Hz, 0.634 Hz ve 0.745 Hz değerlerinde anlamlı sıçramalar göstermiştir. Bu frekansların yön açısından ayrıştırılması dönüşüm uygulanarak gerçekleştirilmiş ve dönüşüm sonrası X yönünde 0.634 Hz ortadan kalkmış 0.420 Hz ve 0.745 Hz frekansında sıçrama, Y yönünde ise 0.420 Hz ve 0.745 Hz ortadan kalkmış 0.634 Hz frekansında sıçrama tespit edilmiştir. Böylelikle,

bu deney sonucunda hem binanın rüzgâr yükü altındaki gerçekleşen X yönündeki ilk iki mod değeri, hem de Y yönündeki ilk mod frekans değerleri dönüşüm ile ayrıştırılabilirliği görülmüştür.

R4 orta şiddetli deney setinde iki farklı türbülans özelliğine sahip deney setleri seçilip, yapının dinamik cevabı sadece eğim sensörü verileri kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her iki deney seti sonrası R3 deneyindekine benzer şekilde, eğim sensörünün eksen dönüşümü uygulandıktan sonra X ekseni yönünde yapının ilk iki mod doğal frekansları 0.42 Hz ve 0.745 Hz, Y yönünde ilk mod doğal frekansı 0.634 Hz olarak tespit edilmiştir. Türbülans şiddeti daha yüksek olan deney setinin her iki bileşen yönündeki frekans daha yüksek genlik göstermiştir.

D1 deney setinde, taş ocağı aktiviteleri sonucu meydana gelen sismik yer hareketlerinin yapıda meydana gelen dinamik cevapları eğim sensörü ile ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Verilerin koordinat dönüşümü yapılmaksızın HFD analizi sonucu her iki koordinat bileşeninde 0.42 Hz ve 0.634 Hz frekans değerlerinde sıçrama yapmıştır. Koordinat dönüşümü ile bu iki frekans değerleri ayrıştırılmış ve 0.42 Hz frekansı X bileşeninde, 0.634 Hz Y bileşeninde sıçrama yapmıştır. Yapının Y yönündeki dinamik cevabı X yönündeki dinamik cevabından daha yüksek bir genlik değeri göstermiştir.

Rüzgâr yükleri ile sismik yüklerin yapı üzerindeki dinamik cevapları karşılaştırılmalı olarak incelendiğinde, rüzgâr yükü X yönünde birinci ve ikinci mod doğal frekanslarını harekete geçirmiş, Y yönünde ise ilk mod doğal frekansı harekete geçirmiştir. Sismik yük ise, hem X hem de Y bileşeni yönünde sadece birinci moda ait doğal frekansları harekete geçirmiştir. Sismik yük, rüzgâr yükünden farklı olarak sadece X yönündeki ikinci moda ait doğal frekansı harekete geçirecek bir etki oluşturmamıştır. Bir diğer önemli fark ise, sismik yük sonucu yapının Y yönünde gerçekleşen dinamik cevabının X yönündekinden daha şiddetli olmasıdır ve bu rüzgâr yükünde meydana gelenin tamamen tersidir. İncelenen rüzgâr yükü deneylerinde her zaman X yönündeki doğal frekansların genlikleri Y yönündekinden daha yüksek elde edilmiştir. Bu farkı oluşturan temel sebeplerden birisi sismik dalganın binaya geliş yönüdür.

Yapı proje süresince biri uzak merkezli, yapıdan yaklaşık 135 km uzaklıkta, 11 Nisan 2007 Borlu-Eğridir-Isparta tarihli 4.7 ve 4.9 ML şiddetindeki ardışık iki deprem ve deprem merkezi yapıdan 7 km uzaklıkta şiddeti 4.5 ve 4.7 ML şiddetinde iki deprem 10-11 Eylül 2009 tarihinde meydana gelmiştir. Uzak merkezli depremin sebep olduğu yapıdaki dinamik cevaplar eğim sensörü veri toplama frekansının düşük olması sebebiyle analiz edilememiştir. Yakın merkezli depremin meydana getirdiği dinamik cevap ise bilgisayardaki teknik problem yüzünden ölçülememiştir.

Fakat her ne kadar bu depremlerle ilgili ölçmeler ve dinamik analizler gerçekleştirilememiş olmasına rağmen, deprem öncesi ve deprem sonrası meydana gelen rüzgâr ve sismik yük cevaplarının analizi ile yapının çalışma durumu deprem öncesi ve sonrası frekans karşılaştırılması ile değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda deprem öncesi ve sonrası frekans değerlerinde anlamlı bir değişim olmadığı ve sonuç olarak yapının depremden zarar görmediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, tam ölçekli izlemenin önemini ortaya açıkça koymuş ve mühendislik yapılarının belirli aralıklar ile tam ölçekli olarak dinamik cevaplarının ölçülmesinin gerekliliğini bir kez daha göstermiştir.

Tam ölçekli izleme sonucunda sadece hasar verici nitelikteki yüklere maruz kalan yapının sağlık şartlarının ve durumunun değerlendirilmesi değil aynı zamanda farklı yükler altındaki yapının dinamik cevap karakteri ile projelerin daha sağlıklı oluşturulması ve kabul edilen parametrelerin daha güvenilir ve gerçekçi olması yönünden de büyük önem ve katkılar oluşturacaktır. Ayrıca gerçek yükler karşısındaki dinamik cevapları içine alan bir veri alt yapısı ile farklı materyal, şekil ve yapısal elemanlara sahip yüksek mühendislik yapılarının bir karşılaştırılması imkanıda bulunmuş olacaktır.

GPS ve eğim sensörünün yapı dinamiklerini belirleme yönünden katkıları, eksiklikleri ve birlikte kullanılmasının önemi bu proje ile ortaya konulmuştur. Frekans alanındaki sonuçlara göre, yapının ilk moda ait doğal frekansının belirlenmesi açısından GPS ve eğim sensörü bir biri ile uyumlu sonuçlar vermiştir. R1 ve R2 deneyinde yapının dinamik deplasman cevaplarının 1 cm nin altında olmasına rağmen GPS yüksek bir performans göstermiştir. Rüzgâr yükünün az olması durumunda yapının yatay yöndeki deplasman cevabı GPS in Kinematik

ölçme duyarlığının altında olması ve yapı sinyallerinin GPS in gürültüsü içerisinde kalmasından dolayı belirlenememektedir. Fakat eğim sensörünün küçük eğim değişimlerini bile yüksek bir hassasiyetle ölçebilmesinden dolayı GPS ile birinci moda ait frekanslar belirlenemez iken, eğim sensörü ile daha yüksek dereceden modların doğal frekansları belirlenebilmektedir.

GPS uydu bağımlı bir konum belirleme sistemi olması sebebiyle açık bir gökyüzü görüşü zorunludur ve böylece GPS ile yüksek yapıların yada diğer mühendislik yapılarının en üst noktasında ölçme yapmayı gerektirir. Bu sebeple, GPS ile sadece yapının üst bölgesinde gerçekleşen modlara ait deplasmanlar ölçülebilir ve doğal frekans değerleri hesaplanabilir. Fakat eğim sensörü çalışma prensibi gereği yapının istenilen her bölgesinde ve farklı yüksekliklerde tesis edilip, ölçmeler ve analizler gerçekleştirilebilir. Böylelikle GPS in aksine yapının sadece üst bölgelerinde değil istenilen her yerinde birden çok eğim sensörü tesis edilebilir ve eş zamanlı eğim değişimi ölçmeleri gerçekleştirilerek yapının dinamik yükler altındaki mod şekilleri belirlenebilir.

GPS ve eğim sensörü ile gerçekleştirilen R1 ve R3 deneylerinin sonuçlarından da anlaşıldığı üzere eğim sensöründen türetilen deplasmanlar yapının yükler altındaki doğrusal olmayan hareketlerinden dolayı basit dönüştürme eşitliğine herhangi bir düzeltme katsayısı kullanmadan gerçek deplasman değerlerine ulaşılamamaktadır. Yapının dinamik yükler altındaki gerçek deplasman cevaplarının yapının dinamik parametrelerinden olan sönümleme oranı v.b. türetilmiş değerlerin doğru bir şekilde belirlenmesi açısından önemlidir. Bu bağlamda, GPS doğrudan deplasman ölçmeleri sağladığı için hala yapıların tam ölçekli izlenmesinde vazgeçilmez bir jeodezik ölçme aracı olduğu göz ardı edilemez. GPS çok yolluluk hatasının ölçülerden giderilmesi ya ardışık günlerde yapılacak ölçmeler ve analizi gerektirmekte yada sinyal çok yolluluk hatasının frekans aralığı filtreleme yöntemi ile ortadan kaldırılabilmektedir. Fakat bu durumda yapıda çok yolluluk hatası frekans band içerisine giren, ortalama rüzgâr hızından meydana gelebilecek quasi-statik hareketlerde kaybedilmektedir. GPS her ne kadar sinyal çok yolluluk hatasından dolayı etkilense de, çok yolluluk yada diğer GPS hatalarından meydana gelen frekans bandı içerisine girmeyen yapı doğal frekansları sinyal filtreleme teknikleri yardımı

ile rahatlıkla belirlenebilecektir. Bu bağlamda GPS, yapı dinamiklerinin belirlenmesi amacıyla bu hatalar olması durumunda ve bahsedilen şartların sağlanması durumunda etkili bir ölçme aracı olmayı sürdürecektir.

Sonuç olarak, her iki sensörün de katkıları, avantaj ve dezavantajları göz önüne alındığında yüksek yapıların tam ölçekli izlenmesinde ve dinamik analizlerinin yapılması ve değerlendirilmesinde büyük katkıları ve birlikte eş zamanlı kullanılması göz ardı edilemez. Yapıların tam ölçekli izlenmesinin belirli zaman aralıklarında gerçekleştirilmesi ile deprem vb. hasar verici yüklere maruz kalan yapının durum değerlendirmesi kolaylıkla yapılabilecektir.

Tez kapsamında kullanılan sensörlerin ilave simülasyon deneyleri gerçekleştirilerek daha ileri seviyede değerlendirmesi gelecek çalışmalarla ortaya çıkarılabilir. Bunlara ilave olarak, daha farklı materyaller ile inşa edilmiş ve farklı aerodinamik yapı ve şekle sahip yüksek yapıların tam ölçekli izlenmesi ile hem sensörlerin performansı hem de yapıların yükler altındaki davranışlarının karşılaştırılması yapılabilir ve böylelikle gelecekte daha güvenilir ve ekonomik tasarımlar gerçekleştirilebilir. Mühendislik yapıları üzerine kurulacak bir izleme sisteminin maliyeti, yapının inşası ve ileride deprem vb. sebepten dolayı yapıda kontrolsüzlükten oluşabilecek zararların maliyeti göz önüne alındığında çok az miktarda olmaktadır. Bu sebeple, mühendislik yapılarında gerçek zamanlı izleme sistemlerinin kurulması, yapı sağlığının değerlendirilmesi ve buna ilişkin düzenlemelerin ve yönetmeliklerin hazırlanması her açıdan büyük yararlar sağlayacaktır.

8 KAYNAKLAR

AIJ 2005. Recommendation for Load on Buildings, Architectural Institue of Japan, Japan,

Akdi Y., 2003. Zaman Serileri Analizi (Birim Kökler ve Kointegrasyon), Bıçaklar Kitabevi , 298 sf, Ankara

Breuer, P., Chmielewski, T., Gorski, P., Konopka, E. 2002. Aplication Of GPS Technology To Measurement of Displacements Of High-Rise Structures Due to Weak Winds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 90 (3), 223-230.

Breuer, P., Chmielewski, T., Gorski, P., Konopka, E., Tarczynski, L. 2008. The Stuttgart TV Tower-displacement of the top caused by the effects of sun and wind, Eng Struct, 30:2771-2781.

Brownjohn, J. Rizos, C. Tan, G.H. Pan, T.C. 2004. Real-Time Long-Term Monitoring of Static and Dynamic Displacements of an Office Tower, Combining RTK GPS and Accelerometer data. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, 28 June-1July, UK

Carrion, J.E ve Spencer B.F. 2007. Model-Based Strategies for Real-Time Hybrid Testing, NSEL Report Series, University of Illinois at Urbana-Champaign, Report No: 006,

Casciati, F. ve Fuggini, C. 2009. Engineering Vibration Monitoring by GPS: Long Duration Records, Earth Eng & Eng Vib, 8:459-467, DOI:10.1007/s11803-009-9058-8

Celep, Z. ve Kumbasar, N. 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Sema Matbaacılık İstanbul,

Chan, W.S., Xu, Y.L., Dai, W.J. 2006-b. An integrated GPS-Accelerometer Data Processing Technique for Structural Deformation Monitoring, Journal of Geodesy, Vol. 80, 705-719, DOI:10.1007/s00190-006-0092-2

Chan, W.S., Xu, Y.L., Ding, X.L., Xiong, Y.L., Dai, W.J. 2006-a. Assessment of Dynamic Measurement Accuracy of GPS in Three Directions, Journal of Surveying Engineering, Vol. 132 (3), 108-117, DOI: 10.1061/ (ASCE)0733-9453 (2006)132:3 (108)

Chopra, A.K. 1995. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc., 729 sf., ISBN: 0-13-521063-1, USA

Çelebi, M. 2000. GPS in Dynamic Monitoring of Long-Period Structures. Soil dynamic and Earthquake Engineering. 20, 477-483

Çelebi, M. and Sanli, A. 2002. GPS in Pioneering Dynamic Monitoring of Long-Period Structures. Earthquake Spectra. 18 (1):47-61

Dai, W.J., Ding X.L., Li, Z.W., Kwok K.C.S. ve Campbell S. 2006. Tropospheric Effects on GPS Measurements for Monitoring Tall Buildings, Location, November- December

Danisch, L., Chrzanowski A., Bond J., Bazanowski M. 2008. Fusion of geodetıc and mems sensors for integrated monitoring and analysis of deformations, 13th FIG Symp. on Deformation Measurement & Analysis and the 4th IAG Symp. on Geodesy for Geotechnical & Stuctural Eng., "Measuring the Changes", Lisbon, Portugal, 12-15 May, paper 19, CD-ROM procs.

Dumanoglu, A. A. ve Severn, R. T., (1989), "Seismic Response of Modern Suspension Bridges to Longitudinal and Lateral Ground Motion", Proc. Instn. Civ. Engrs.,Part 2, Vol. 87, p. 73-86

Ertürk S. 2005. "Sayısal İsaret İsleme", Birsen Yayınevi Ltd. Sti. , 346 sf, ISBN: 975-511-309-6, İstanbul,

Fan J., Yao Q. 2003. Nonlineer Time Series (Nonparametric and Parametric Method), Springer-Verlag, 551 pg., Newyork

Ferry-Borges, J. and M. Castanheta. 1971. Structural Safety. LNEC. Lisbon, Portugal.

Gikas V. and Daskalakis S. 2008. Comparative Testing and Analysis of RTS versus GPS for Structural Monitoring Using Calibration Measurements Upon Sinusoidal Excitation, 13th Symp. on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon, May 12-15, 2008.

Gikas V., Daskalakis S. 2009. Contribution of Combined RTS and TLS to Dynamic Monitoring of Wind Energy Turbines, 9th Int. Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria, July 1-3

Hasgür, Z., Gündüz, N. 1996. Betonarme Çokkatlı Yapılar, Beta Basım Yayın Dağ. A.Ş., ISBN:975-486-562-5, 233 sf., İstanbul

Hristopulos, D.T. Mertikas, S.P. Arhontakis, I. Brownjohn J.M.W. 2007. Using GPS for Monitoring Tall-Building Response to wind loading: Filtering of Abrubt Changes and Low-Frequency Noise, Variography and Spectral Analysis of Displacements. GPS Solut 11:85-95.

Kasumov, A.A. 1997. Yapı Dinamiği, Stabilitesi, Plastik Analizi, Beta Basım Yayın Dağ. A.Ş., Yayın No:719,Teknik Dizi:34, ISBN: 975-486-614-7, 208 sf., İstanbul

Kijewski-Correa, T. ve Kochly, M. 2007. Monitoring the wind-induced response of Tall Buildings: GPS Performance and the issue of Multipath effects, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, 1176-1198, DOI:10.1016/j.weia.2007.02.002

Kijewski-Correa, T. ve Pirnia, J.D. 2007. Dynamic Behaviour of Tall Building Under Wind: Insights from Full-Scale Monitoring, The structural Design of Tall and Special Buildings, 16. 471-486 DOI:10.1002/tal.415

Kijewski-Correa, T., Kareem, A. ve Kochly, M. 2006. Experimental Verification and Full-Scale Deployment of Global Positioning Systems to Monitor the Dynamic Response of Tall Buildings, Journal of Structural Monitoring, Vol 132, No 8, DOI: 10.1061/ (ASCE)0733-9445 (2006)132:8 (1242)

Kjewski, T. ve Kareem, A. 1998. Dynamic Wind Effects: a Comparative Study of Provisions in Codes and Standarts with Wind Tunnel Data, Wind and Structures, Vol 1, No 1, 77-109

Krishna, P., Kumar, K. ve Bhandari, N.M. 2002. IS:875 (part 3): Wind Loads on Buildings and Structures-Proposed Draft & Commentary, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee

Kwok, K.C.S., Apperley, L.W., Matesic I.J., Mangion, C.B. 1990. Measurement of Natural Frequency of Vibration and Damping Ratios of Tall Building and Structures, The instirution of Engineers Australia Structural Engineering Conference, Adelaide 3-5 October- Australia

Leica Geosystems 2007. Nivel200 User Manual. AG. Switzerland

Li, H.N., Yi, T.H., Yi, X.D., Wang, G.X. 2007. Measurement and analysis of Wind-Induced Response of Tall Building Based on GPS Technology, Advences in Structural Engineering, Vol. 10 No. 1

Li, Q.S., Fang, J.Q., Jeary, A.P., Wong, C.K. ve Liu D.K. 2000. Evaluation of Wind Effects on a Supertall Building Based on Full-Scale Measurements, Earthquake Engng Struct. Dyn, 29:1845-1762

Li, Q.S., Yang, K., Zhang, N., Wong, C.K. and Jeary, P. 2002. Field Measurements of Amplitude-Dependent Damping in A 79-Storey Tall Building and Its Effects On The Structural Dynamic Responses, Struct. Design Tall Build., 11,129-153

Li, X. Ge, L. Ambikairajah, E. Rizos, C. Tamura, Y. ve Yoshida, A. 2006-a. Full-ScaleStructural Monitoring Using an Integrated GPS and Accelerometer System. GPS Solut 10:233-247

Li, X. Rizos, C. Ge, L. Ambikairajah, E. Tamura, Y. Yoshida, A. 2006-b. The Complementary Characteristics of GPS and Accelerometer in Monitoring Structural Deformation. InsideGNSS 48-55

Li, X., 2006. Optimal Integrated Multi-sensor system for Full-Scale Structural Monitoring Based on Advanced Signal Processing, PhD thesis, The University of New South Wales, Australia

Li, X., Yoshida, A., Tamura, Y., Rizos, C., Ge, L., & Imai, R. 2008. How hybrid GPS-based surveying techniques can further assist with structural design and construction, 553-562. Int. Symp. on GPS/GNSS, Yokohama, Japan, 25-28 November.

Liu, H. 1991. Wind Engineering - A Handbook for Structural Engineers, 209 page, Prenctice-Hall, New Jersey

Ljung L. 1999. System Identification-Theory for the User, Prentice Hall. Inc, 609 page, U.S.A.

Lovse, J.W. Teskey, W.F. Lachapelle, G. Cannon, M.E. 1995. Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology. J Surv Eng ASCE 121 (1):35-40

Mendis, P., Ngo, T., Haritos, N., Hira, A., Samali, B. ve Cheung, J. 2007. Wind Loading on Tall Buildings, EJSE, EJSE special issue: Loading on Structures, Melbourne, Australia

Mertol, A., Mertol, H.C. 2002. Deprem Mühendisliği-Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Kozan Ofset, ISBN: 975-92789, 644 sf, Ankara

Nickitopoulou, A., Protopsalti, K., Stiros, S. 2006. Monitoring Dynamic and Quasi-Static Deformation of large flexible engineering Structures with GPS: Accuracy, limitations and promises, Engineering Structures, 28, 1471-1482 DOI:10.1016/j.engstruct.2006.02.001

Nowak A. S., Collins, K.R. 2000. Reliability of Structures:; McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 338 pg., ISBN 0-07-116354-9,Singapore

O. Heunecke 1995. Zur Identifikation und Verification von Deformationsprozessen mittels adaptiver Kalman-Filterung (Hannoversches Fitler), Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen, Universitat Hannover,No.28

Ogaja, C. Wang, J. Rizos, C. 2003. Detection of Wind-Induced response by Wavelet Transformed GPS Solutions. J Surv Eng ASCE 129 (3):99-104

Özek, T. 2010. Zaman Serisi Modelleri Üzerine Bir Simülasyon Çalışması, Yüksek Lisans tezi, Selçuk Üniversitesi FBE

Park, H.S., Sohn, H.G., Kim,I.S., Park, J.H. 2008 Application of GPS to Monitoring of Wind-Induced Responses of High-Rise Buildings, The structural Design of Tall and Special Buildings, 17, 117-132, DOI:10.1002/tal.335

Pfeuffer A. 1994. Classification of models for geodetic examination of deformations. In Perelmulter workshop on Dynamic Deformation Models, Haifa,Israel

Phtharouli S., Kontogianni V., Psimoulis P. ve Stiros S. 2004. Spectral Analysis Techniques in Deformation Analysis Studies, INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia

Psimoulis, P. ve Stiros, S. 2007. Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS), Eng. St., 29 (12) 3312-3324

Psimoulis, P. ve Stiros, S. 2008. Experimental assessment of the accuracy of GPS and RTS for the determination of the parameters of oscillation of major structures , Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 23 , 389-403

Roberts, G.W. Meng, X. Dodson, A.H. 2000. Structural Dynamic and Deflection Monitoring Using Integrated GPS and Triaxial Accelerometers. ION GPS 2000. 19-22 September. Salt Lake City, UT

Roberts, G.W. Meng, X. Dodson, A.H. 2004. Integrating a Global Positioning System and Accelerometers to Monitor the Deflection of Bridges. J Surv Eng ASCE 130 (2):65-72

Salawu, O.S. 1997. Detection of structural damage through changes in frequency: a review, Engng Struct., 19:9,718-723

Salawu, O.S. ve Williams, C. 1995. Review of full-scale dynamic testing of bridge structures, Engng Struct., 17:2,113-121

Sevütekin S., Nargeleçekenler M. 2005. Zaman Serileri Analizi, Nobel yayıncılık, 341 sf., Ankara

Tamura, Y. 2003. Design issues for tall buildings from acceleration to damping, The 11th International Conference on Wind Engineering, Lubbock, Texas, USA, June 2-5

Tamura, Y., Matsui, M., Paginini, L-C., Ishibashi, R., Yoshida, A. 2002. Measurements of wind-induced response of buildings using RTK-GPS., J Wind eng Ind Areodyn, 90:1783-93.

TDY, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik 1998. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

TS 500-2000, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları 2000. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Welsch W. 1996. Geodetic analysis of dynamic processes: Classification and terminology. 8th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Hong Kong,pp. 147-156.

Welsch W.M. ve Heunecke O. 2001. Models and Terminology for the analaysis of Geodetic Monitoring Observations-Official Report of Add-Hoc Committee of FIG Working Group 6.1, 10th FIG International Symposium on Deformation Measurement

Yiğit, C.Ö., Inal, C., Yetkin, M. 2008. Monitoring of Tall Building's Dynamic Dynamic Behaviour Using Precision Inclination Sensors, 13th FIG Symp. on Deformation Measurement & Analysis and the 4th IAG Symp. on Geodesy for Geotechnical & Stuctural Eng., "Measuring the Changes", Lisbon, Portugal, 12-15 May, paper 19, CD-ROM procs.

Yiğit, C.Ö., İnal, C., Li, X., Ge, L., Rizos, C., Yetkin, M., Arslan, M.H, Doğanalp, S. 2009. Rixos Hotel Binasının Rüzgar Yükü Karşısındaki Tepkisinin GPS ve Yüksek Presizyonlu Eğim Sensörü Verileri ile Analizi ve Sensörlerin Karşılaştırılması, 4. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, s.111-121, 14-16 ekim, Trabzon

Yiğit, C.Ö., Li, X., Inal, C., Ge, L., Yetkin, M. and Arslan M.H. 2010. Analysis of wind-induced response of tall reinforced concrete building based on data collected by GPS and precise inclination sensor. XXIV FIG Int. Congress "Facing the Challenges - Building the Capacity", 11-16 April Sydney, Australia

URL 1: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/tr/0/00/En_uzun_yap%C4%B1lar.png

URL 2: http://tr.wikipedia.org/wiki/Burj_Dubai

URL 3 http://tr.wikipedia.org/wiki/Türkiye'deki_en_yüksek_binaların_listesi