

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK YAPILARININ DAVRANIŞLARININ JEODEZİK ÖLÇÜLERLE  
İZLENMESİ



GÜLDANE OKU

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
GEOMATİK PROGRAMI

DANIŞMAN  
PROF. DR. ENGİN GÜLAL

İSTANBUL, 2016

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK YAPILARININ DAVRANIŞLARININ JEODEZİK ÖLÇÜLERLE  
İZLENMESİ**

Güldane OKU tarafından hazırlanan tez çalışması 29.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Engin GÜLAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Engin GÜLAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halil ERKAYA  
Okan Üniversitesi

Doç. Dr. Burak AKPINAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

## ÖNSÖZ

---

Yüksek Lisans tez danışmanlığımı üstlenen, tez çalışmamın her aşamasında deneyim ve bilgi birikimlerini benimle paylaşan hayatımda bir yol gösterici olarak yanımda olan tez danışmanım Prof. Dr. Engin GÜLAL'a teşekkürlerimi arz ederim.

Bu çalışmam boyunca gerek bilgi birikimlerini benimle paylaşarak gerek çalışmanın uygulamasına bizzat katılarak projeye destek olan Doç. Dr. Hediye ERDOĞAN'a, Doç. Dr. Burak AKPINAR'a, Doç. Dr. Ahmet Anıl DİNDAR'a, Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU'na, Doç. Dr. C. Özer YİĞİT'e, Araş. Gör. Dr. Onur AYKUT'a ve Araş. Gör. Fahri KARABULUT'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresi boyunca yardımlarını esirgemeyen tüm Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma, tüm akrabalarım ve yakınlarıma teşekkürler ederim.

Evlatları olmaktan gurur duyduğum, bugünlere gelmemde emekleri büyük olan canımdan öte sevdiğim aileme, biricik ablam Ceylan'a, babam Basri OKUR'a ve ben daha başarılı olabileyim diye ömrü boyunca çabalayan en değerli varlığım annem Nur OKUR'a, teşekkürlerimi bildirmeyi borç bilirim.

Eğitim hayatımın büyük bir bölümü boyunca yanımda olan başarılarımla gururlanan, çalışmalarım süresince bana destek olan ve her zorlukta yanımda hissettiğim yol arkadaşım Gökhan TOPAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Saygı ve sevgilerimle.

Kasım, 2016

Güldane OKU

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vii
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT .....	xv
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	1
1.1    Literatür Özeti .....	3
1.2    Tezin Amacı .....	10
1.3    Hipotez .....	11
<b>BÖLÜM 2</b>	
YAPI SAĞLIĞI İZLENMESİ .....	12
2.1    Yapı Sağlığı İzlenmesi Uygulama Alanları.....	13
2.2    Günümüzde Yaygın Olarak Kullanılan Teknik ve Teknolojiler.....	16
2.2.1    Akselometre (ivmeölçer ) ile Vibrasyon Ölçümü.....	16
2.2.2    Eğim Ölçer ile Vibrasyon Ölçümü .....	17
2.2.3    Robotik Total Station ile Vibrasyon Ölçümü.....	18
2.2.4    GPS ile Vibrasyon Ölçümü .....	19
2.3    Yapı Sağlığı İzlenmesi Alanında Çalışan Organizasyonlar ve Standartlar ..	20
2.3.1    Avrupa Birliği Araştırma Faaliyetleri.....	23
2.3.2    Amerika Birleşik Devletleri Araştırma Faaliyetleri.....	24
2.3.3    Uzak Doğu Araştırma Faaliyetleri .....	25
2.4    Uygulamalarda Karşılaşılan Problem ve Kısıtlamalar.....	25
<b>BÖLÜM 3</b>	
KÜRESEL KONUMLAMA UYDU SİSTEMLERİ (GNSS) .....	27
3.1    Küresel Konumlama Sistemi (GPS).....	27
3.2    GLONASS .....	28
3.3    GALİLEO.....	29
3.4    Beidou / Compass .....	30

3.5	Konum Belirleme Yöntemleri.....	31
3.5.1	Mutlak Konum Belirleme.....	32
3.5.1.1	Hassas Konum Belirleme Yöntemi (PPP).....	33
3.5.2	Bağıl Konum Belirleme .....	35
3.5.2.1	Statik Ölçü Yöntemi.....	37
3.5.2.2	Hızlı Statik Ölçü Yöntemi .....	37
3.5.2.3	Tekrarlı Ölçü Yöntemi.....	38
3.5.2.4	Dur-Git (Stop and Go) Ölçü Yöntemi.....	38
3.5.2.5	Kinematik Ölçü Yöntemi.....	39
3.5.2.6	Diferansiyel GPS Ölçü Yöntemi .....	39
3.5.2.7	Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) Ölçü Yöntemi .....	39
	Sanal Referans İstasyonları Yöntemi (VRS).....	42
	Alan Düzeltme Parametreleri Yöntemi (FKP).....	43
	Ana-Yardımcı Referans İstasyonları Yöntemi (MAC) .....	44

#### BÖLÜM 4

ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ.....	46	
4.1	Trend Bileşeni Analizi.....	47
4.1.1	Mann-Kendall Testi.....	47
4.1.2	Regresyon Analizi.....	48
4.1.3	En Küçük Kareler Yöntemiyle Parametrelerin Kestirimi .....	49
4.2	Periyodik Bileşen Analizi .....	50
4.2.1	Sinyallerin Zaman Bölgesinde Filtrelenmesi.....	51
4.3	Hızlı Fourier Dönüşümü .....	52
4.3.1	Sinyallerin Pencerelemesi .....	54
4.3.2	Sinyallerin Örneklem Frekanslarının Belirlenmesi.....	55
4.3.3	Sinyallerin Enerjisi ve Gücü.....	56

#### BÖLÜM 5

SARMSA TABLASIYLA GERÇEKLEŞTİRİLEN GPS - TPS ÖLÇÜMLERİ VE VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	58	
5.1	Sarsma Tablası .....	58
5.2	Test Prosedürü .....	60
5.2.1	RTK Ölçümleri Test Prosedürü .....	61
5.2.1.1	İSKİ UKBS Ağı .....	62
5.2.1.2	YLDZ Referans İstasyonu .....	63
5.2.2	PPP Ölçümleri Test Prosedürü.....	64
5.2.2.1	CSRS-PPP ONLINE SERVİSİ .....	64
5.2.3	KPP Ölçümleri Test Prosedürü.....	65
5.2.3.1	GAMIT/GLOBK Yazılımı – TRACK Değerlendirme Modülü .....	66
5.2.4	TPS Ölçümleri Test Prosedürü .....	67
5.3	Verilerin Düzenlenmesi ve Zaman Serileri Analizi ile Değerlendirilmesi ..	67
5.3.1	RTK Ölçüm Verileri.....	68
5.3.1.1	VRS Ölçümlerinin Değerlendirilmesi .....	68
5.3.1.2	FKP Ölçümlerinin Değerlendirilmesi .....	77
5.3.1.3	MAC Ölçümlerinin Değerlendirilmesi .....	80

5.3.1.4	YLDZ Ölçümlerinin Değerlendirilmesi .....	84	
5.3.1.5	RTK GPS Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	85	
5.3.2	PPP Ölçümleri Verileri.....	88	
5.3.3	KPP Ölçümü Verileri.....	94	
5.3.4	TPS Ölçümleri Verileri .....	98	
<b>BÖLÜM 6</b>			
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>			<b>105</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>			<b>111</b>
<b>EK-A</b>			<b>119</b>
<b>FİLTRE VE PENCERELEME SONRASI ÖLÇÜM SONUÇLARI .....</b>			<b>119</b>
<b>EK-B</b>			<b>121</b>
<b>MAC YÖNTEMİ GÜRÜLTÜ İÇEREN HAM VERİNİN GENLİK VE FREKANS DEĞERLERİ.....</b>			<b>121</b>
<b>EK-C</b>			<b>122</b>
<b>SABİT ZAMANLARA İLİŞKİN GENLİK VE REFERANS DEĞERLERİ.....</b>			<b>122</b>
<b>EK-D</b>			<b>124</b>
<b>10 HZ ÖRNEKLEME FREKANSIYLA HESAPLANAN RTK ÖLÇÜM SONUÇLARI .....</b>			<b>124</b>
<b>EK-E</b>			<b>125</b>
<b>PPP ÖLÇÜMLERİ LVDT GENLİK VE FREKANS DEĞERLERİ .....</b>			<b>125</b>
<b>EK-F</b>			<b>126</b>
<b>TPS ÖLÇÜMLERİ LVDT GENLİK VE FREKANS DEĞERLERİ.....</b>			<b>126</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>			<b>127</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

$t$	Zaman
$x^T$	Sistemin bilinmeyen parametreleri
$\bar{y}(t)$	Sistemin kestirim değerleri
$R^2$	Regresyon analizi belirlilik katsayısı
$z$	Standart normal değişken
$X_s(f)$	$x(t)$ sinyali Fourier dönüşümü
$e^{2jft}$	Karmaşık ve periyodik üstel fonksiyon
$w(t)$	Pencere fonksiyonu
$T_s$	Örnekleme periyodu
$f_s$	Örnekleme frekansı
$f_m$	Sinyalin bant genişliği
$E$	Sinyal enerjisi
$S(f)$	Sürekli enerji spektral yoğunluğu
$R_i$	Genlik
$\sigma^2$	Varyans
$P_i$	Kod ölçüsü (m)
$\phi_i$	Faz ölçüsü (m)
$\rho$	Geometrik uzunluk (m)
$c$	Işık hızı (m/sn)
$dt$	Alıcı saat hatası (s)
$dT$	Uydu saat hatası (s)
$dorb$	Uydu yörünge hatası (m)
$dtrop$	Troposferik gecikme (m)
$\lambda_i$	Dalga boyu (m/cycle)
$\epsilon$	Uzunluk şiddeti (m)
$N$	Başlangıç faz bilinmeyeni

## KISALTMA LİSTESİ

---

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AİMT	Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu
APPS	Automatic Precise Positioning Service
BATB	Bilimsel Araştırma ve Teknoloji Bakanlığı
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BLS	Batch Least-Squares
BRIME	Bridge Management in Europe
CCD	Charge Coupled Device
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CORS	Continuesly Operating References System
CSRS-PPP	The Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning
DGPS	Differential Global Positioning System
EC	European Commission
ESA	European Satallite Agency
EUREKA	European Union–led research Partnerships
FKP	Flächen Korrektur Parameter (Alan Düzeltme Parametreleri)
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistem
GNSS	Global Navigation Satallite System (Küresel Navigason Uydu Sistemi)
GOST-R	Rus Federasyonu Ulusal Standartları
GPS	Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
Hz	Hertz
IGS	International GNSS Service
ISIS	Kanada Araştırma Ağı
ISO	International Organization for Standardization
İKÜ	İstanbul Kültür Üniversitesi
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KPP	Kinematic Post Process
KSFD	Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
MAC	Master-Auxiliary Concept
MIT	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
MFBAK	Mühendislik ve Fizik Bilimleri Araştırma Konseyi



NASA	National Aeronautics and Space Administration
NRCan	Natural Resources Canada
PPP	Precise Point Positioning
RTK	Real Time Kinematic
RTWG	Real-Time Orkan Grup
SAMCO	Avrupa Araştırma Ağı
SAPOS	Satelliten Positionierungsdienst (Uydu Konumlama)
SOPAC	Scripps Orbit and Permanent Array Center
SPP	Single Point Positining
TED	Ticaret ve Endüstri Departmanı
TPS	Total Station Positioning System
UKBS	Uydu Konum Belirleme Sistemi
VRS	Virtual Referance Station
YLDZ	Yıldız GNSS Referans İstasyonu
YSİ	Yapı Sağlığı İzlenmesi



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Akselometre görünüm ..... 17
Şekil 2. 2	Leica model bir eğim ölçer [16]..... 18
Şekil 2. 3	Leica model bir total station ..... 19
Şekil 2. 4	İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği [46] ..... 22
Şekil 2. 5	Deprem Yönetmeliği 6. Bölüm [46] ..... 22
Şekil 3. 1	GNSS ile konum belirleme yöntemleri [57] ..... 32
Şekil 3. 2	Mutlak konum belirleme [58] ..... 32
Şekil 3. 3	Bağıl konum belirleme [58] ..... 36
Şekil 3. 4	Statik ölçümler için oturma süreleri [50] ..... 37
Şekil 3. 5	Hızlı statik ölçümler için oturma süreleri [50]..... 38
Şekil 3.6	Real Time Kinematik GPS yöntemi [70] ..... 40
Şekil 3.7	Ağ-RTK sisteminin genel çalışma şeması [57] ..... 41
Şekil 3.8	Bölgesel ağlarda sanal referans istasyonları [84] ..... 42
Şekil 3.9	VRS sisteminin işleyişi [57] ..... 43
Şekil 3.10	FKP yöntemi [57]..... 44
Şekil 3.11	Dört referans istasyonu için FKP yöntemi [57] ..... 44
Şekil 3.12	MAC yöntemi [57] ..... 45
Şekil 4.1	Alçak-geçiren filtre [16]..... 51
Şekil 4.2	Yüksek-geçiren filtre [16] ..... 52
Şekil 4.3	Sinüsün periyodik olarak tekrar etmesiyle oluşan işaret [12] ..... 54
Şekil 4.4	Sinyal pencereleme işlemi [16] ..... 55
Şekil 5.1	Sarsma tablası ..... 59
Şekil 5.2	Test 5 LVDT referans ve ölçüm verisi ..... 60
Şekil 5.3	UKBS referans istasyonları ağı [103] ..... 62
Şekil 5.4	Yıldız Teknik Üniversitesi GPS referans istasyonu (YLDZ) [104]..... 64
Şekil 5.5	RTK-GPS yöntemi LVDT gözlemleri ..... 68
Şekil 5.6	VRS yöntemi doğu yönündeki zaman serisi ..... 69
Şekil 5.7	VRS yöntemi doğu yönündeki zaman serisi lineer trend bileşeni..... 70
Şekil 5.8	VRS yöntemi doğu yönündeki trend giderilmiş zaman serisi ..... 70
Şekil 5.9	VRS yöntemi doğu yönü alçak geçişli filtre uygulanmış seri ..... 71
Şekil 5.10	VRS yöntemi doğu yönü yüksek geçişli filtre uygulanmış seri ..... 71
Şekil 5.11	VRS yöntemi doğu yönündeki seriye uygulanan Hanning Penceresi ..... 72
Şekil 5.12	VRS yöntemi doğu yönü pencerelenmiş zaman serisi ..... 72
Şekil 5.13	VRS yöntemi filtre ve pencerelenmesiz genlik ve frekans değerleri ..... 74

Şekil 5.14	VRS Yöntemi yüksek geçişli filtre uygulanmış genlik ve frekans değerleri .	74
Şekil 5.15	VRS yöntemi alçak geçişli filtre uygulanmış genlik ve frekans değerleri ....	75
Şekil 5.16	VRS yöntemi Hanning pencereleme uygulanmış genlik ve frekans değerleri. .....	75
Şekil 5.17	VRS yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması	76
Şekil 5.18	VRS yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması ....	77
Şekil 5.19	FKP yöntemi Doğu yönündeki zaman serisi lineer trend bileşeni .....	78
Şekil 5.20	FKP yöntemi doğu yönündeki trend giderilmiş zaman serisi.....	78
Şekil 5.21	FKP yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması	79
Şekil 5.22	FKP yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması ....	80
Şekil 5.23	MAC yöntemi ham zaman serisi .....	81
Şekil 5.24	MAC yöntemi doğu yönündeki zaman serisi lineer trend bileşeni.....	82
Şekil 5.25	MAC Yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması.. .....	82
Şekil 5.26	MAC Yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması ..	83
Şekil 5.27	YLDZ Yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması.. .....	84
Şekil 5.28	YLDZ Yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması ..	85
Şekil 5.29	PPP yöntemi testleri farklı frekanslara bağlı olarak azalan genlik değerleri.. .....	89
Şekil 5.30	PPP yöntemi doğu yönündeki zaman serilerinin lineer trend bileşenleri ..	90
Şekil 5.31	PPP yöntemi GPS ölçümlerinin genlik ve frekans değerleri.....	92
Şekil 5.32	KPP yöntemi LVDT referans ve test verileri grafiği .....	95
Şekil 5.33	KPP yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması	95
Şekil 5.34	KPP yöntemi trend bileşeni belirlenmiş ve trend giderilmiş seri grafikleri	96
Şekil 5.35	KPP yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması ....	97
Şekil 5.36	TPS yöntemi LVDT referans ve test veri setleri grafiği.....	99
Şekil 5.37	TPS ham veriler grafiği .....	99
Şekil 5.38	TPS yöntemi zaman serilerinin lineer trend bileşenleri.....	100
Şekil 5.39	TPS yöntemi GPS ölçümlerinin genlik ve frekans değerleri .....	102

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 5. 1 Test 5 uygulama prosedürü.....	61
Çizelge 5. 2 RTK ölçüm sonuçları özetler tablosu.....	86
Çizelge 5. 3 Hareketsiz zamana ait genlik ve frekans değerleri.....	87
Çizelge 5. 4 10 Hz örnekleme frekansı için genlik ve frekans değerleri.....	88
Çizelge 5. 5 PPP ölçümleri trend fonksiyonu katsayıları.....	90
Çizelge 5. 6 PPP ölçümleri sonuçların özet tablosu.....	93
Çizelge 5. 7 KPP ölçümleri sonuçların özet tablosu.....	98
Çizelge 5. 8 TPS ölçümleri sonuçların özet tablosu.....	103

## MÜHENDİSLİK YAPILARININ DAVRANIŞLARININ JEODEZİK ÖLÇÜLERLE İZLENMESİ

Güldane OKU

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Engin GÜLAL

Gelişen teknolojiyle beraber, nüfusun artmasına bağlı olarak artan yapılaşma ve bu alana ayrılan büyük ekonomi; hasar tespit stratejilerinin ortaya çıkmasına ve hızla çeşitlenmesine neden olmaktadır. Hasarın tespit edilebilmesi ihtiyacından yola çıkılarak oluşturulan bu stratejilerden en etkili yapı sağlığı izlenmesi (YSİ) teknikleridir. YSİ'nin ana bileşenleri ve kullanılan farklı tekniklerin avantaj ve dezavantajları incelenerek, günümüz yapılaşma ve teknolojisine uygun standartlarda bir YSİ politikası oluşturulabilir. Hasar tespit stratejileri konusunda en endişeli paydaş grubu olan İnşaat sektörünün hızla büyüyen pazardaki ihtiyaçlarını karşılayabilmek için oluşturulacak etkili bir YSİ politikası, tüm bu yapılaşmanın emniyetli bir şekilde sürdürülebilmesi açısından oldukça önemlidir. YSİ gözlemlerinin amacı, meydana gelebilecek olası kazaların önceden belirlenerek zamanında gerekli önlemlerin alınmasını sağlamaktır.

Son yıllarda Yapı Sağlığı İzlenmesi çalışmalarında jeodezik yöntemler oldukça etkili bir şekilde kullanılmakta ve yüksek doğrulukla sonuç verileri elde edilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada Mühendislik yapılarının davranışlarının jeodezik ölçü yöntemlerinden küresel konumlama sistemi (GPS) ve Robotik Total Station (TPS) kullanılarak izlenmesindeki sonuçlar incelenmiştir. Buna yönelik olarak sarsma tablası üzerinde deneyler yapılmıştır. Sarsma tablası farklı frekans ve genliklerde hareket ettirilerek bu hareketlerin kullanılan jeodezik donanımlar ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen

veriler zaman serileri analizi ve hızlı Fourier dönüşümü teknikleri ile değerlendirilmiş, frekans ve genlik değerleri hesaplanmıştır.

Farklı jeodezik ölçüm yöntemlerinin YSi çalışmalarındaki performanslarını belirleyebilmek amacıyla sarsma tablası üzerinde 4 farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. 1. uygulamada RTK GPS ölçümleri, VRS, FKP, MAC ve YLDZ ölçüm teknikleriyle gerçekleştirilmiştir. 2. uygulama olarak PPP-GPS ölçümleri, 7 farklı frekans ve genlikteki salınımlarda gerçekleştirilmiştir. 3. uygulama olan KPP-GPS tekniği için sarsma tablası üzerine monte edilmiş GPS verileri statik modda toplanmıştır. 4. ve sonuncu uygulamada ise TPS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla sarsma tablası üzerine reflektör monte edilmiş LEICA TPS1200 model robotik total stationla reflektöre farklı frekans ve genliklerdeki salınımlarda 11 çeşit ölçüm yapılmıştır. Yapılan tüm bu uygulama verilerinin analizi zaman ve frekans bölgelerinde (Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak) ayrı ayrı yapılarak salınımların frekans ve genlikleri belirlenmiş, bu değerler sarsma tablasının ölçme donanımı LVDT verileriyle karşılaştırılarak sonuçların doğrulukları belirlenmiştir. Yöntemler kendi içlerinde ve birbirleri arasında karşılaştırılarak hangi yöntemin en etkili sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapı sağlığı izlenmesi, sarsma tablası testleri, GPS ve TPS, Zaman serileri analizi

**MONITORING OF ENGINEERING BUILDINGS BEHAVIOUR WITH GEODESIC MEASUREMENTS**

Güldane OKU

Department of Geomatics Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Engin GÜLAL

With the improving technology, increasing population due to increased construction and these areas largest economy cause to offer damage determination strategies. The most effective of these strategies is Structural Health Monitoring (SHM). Examining the advantages and disadvantages of the different SHM techniques, according to today's construction and technology standard a SHM policy can be created. To provide the needs of the rapidly growing markets of the construction sector, an effective SHM policy must be created. This is very important to maintain all this structuring safely. The purpose of structural monitoring is determining in advance of possible accidents and taking necessary precaution.

In recent years, geodetic methods in SHM surveys are being used very effectively and the results are obtained with high accuracy. So that in this study, determining the behavior of construction using Global Positioning System (GPS) and Robotic Total Station(TPS) are investigated. For that shaking table tests were performed. Shaking table was moved at different frequency and amplitude aiming to determine these movement with a GPS and TPS measuring system. The obtained data were evaluated by analysis of time series and fast Fourier transformation techniques and the frequency and amplitude values are calculated.

In order to determine the performance of different geodetic measurement methods in SHM studies, 4 different applications were carried out on the shake table. In the first

application, RTK GPS measurements, VRS, FKP, MAC and YLDZ measurement techniques were used. As the second application, PPP-GPS measurements were performed at 7 different frequencies and amplitudes oscillations. For the 3rd application KPP-GPS technique, the GPS data mounted on the shake table is collected in static mode. In the 4th and last application, TPS measurements were performed. For this purpose, 11 kinds of measurements were made with the LEICA TPS1200 model robotic total station. So the reflector was mounted on the shaking table and the reflector was oscillated at different frequencies and amplitudes. The analysis of all of these constructed data sets was performed separately in the time and frequency domain (using Fast Fourier Transform) to determine the frequency and amplitude of the oscillations, which were compared with the LVDT data of the shaking table to determine the accuracy of the results. And the methods were compared among themselves and among them to determine which method gave the most effective results.

**Keywords:** Structural health monitoring, shaking table tests, GPS and TPS, Time series analysis



### GİRİŞ

Gelişen teknoloji yapılaşmanın giderek artmasına neden olmuş ve bu yapıların yüksek maliyetleri de düzenli bir hasar tespit sistemine olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Son yıllarda sivil yapılar ve binalar ekonomik ve estetik kaygılarla daha yüksek ve daha ince inşa edilmektedir. Çünkü bu yüksek yapılar ilgi odağı haline gelerek turistleri bu şehirlere çekmektedir ve şehrin kent simgesi haline gelmektedir. Yüksek yapılar rüzgâr yüklemesi gibi hareketli yüklemelerden fazlasıyla etkilenmektedir ve bu yapıların yapısal performansını etkileyen dinamik tepkilerine etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Yüksek yapıların olduğu bölgelerin popülasyonun yoğun olduğu bölgeler olması nedeniyle bu yapılarda meydana gelebilecek olası bir hasar binlerce can kaybına neden olabilmektedir. Bu sebeple bu yapıların sürekli bir şekilde gözlemleri yapılarak, tasarım ömürlerine ulaşıp ulaşmadıkları kontrol edilmeli ve kalan ömürleri tespit edilmelidir [1]. Yapılardaki bu değişimlerin gözlenmesi ve hasar tespitinin yapılması da ancak sistemli bir Yapı Sağlığı İzlenmesi (YSİ) ile mümkün olmaktadır. YSİ gözlemleri sonucunda tasarım ömürlerine ulaşan ya da yüksek hasarlı olduğu tespit edilen yapılarda gerekli güçlendirmenin yapılması olası bir afet sonrası kayıpların azaltılması açısından oldukça önemlidir.

Yapı Sağlığı İzlenmesi teknikleri bilimsel açıdan olgun kabul edilebilir olsa da, çeşitli nedenlerle inşaat mühendisliği uygulamalarında henüz bir standart haline gelememiştir. Bunun en önemli nedeni YSİ sürecini ve özellikle uygulanma şekillerini kapsamlı bir şekilde ele alan standartların eksikliğidir. Bu konuda dayatılmış belli standart ve yaptırımlar olmadan YSİ çalışmalarının inşaat sektöründe bir standart halinde uygulanması düşünülememektedir. Buna ek olarak, Yapı Sağlığı İzleme ve Tasarım

Standartları arasındaki ilişkileri tanımlayan bazı standartların da olması gerekmektedir [2]. YSİ'nin tarihsel süreci boyunca dünyanın çeşitli ülkelerinde yayınlanmış olan standartlar ve güncel çalışmalarda kullanılan standart ve düzenlemeler incelenerek, dünya çapında kullanılabilir standartlar oluşturulmalıdır. Oluşturulan bu standartlar büyük mühendislik yapıları için tasarım aşamasından başlayarak, kullanım ömürleri boyunca gözlemlerini içerecek şekilde ayrıntılı olarak tanımlanmalıdır ve büyük mühendislik yapıları için bu standartların uygulanması yetkili kurumlarca zorunlu tutulmalıdır.

YSİ uygulamalarında onlarca farklı metot ve donanımın kullanıldığını görülmektedir. Fakat günümüzde uzun köprüler, kuleler, yüksek binalar gibi yapılar için yapısal titreşimleri belirleyebilmek amacıyla dinamik deformasyonların gözlenmesinde yaygın olarak Küresel Konumlama Sistemleri (GPS) kullanılmaktadır. GPS uydulardan yayınlanan radyo sinyalleri yardımıyla her türlü hava koşullarında, gece ve gündüz, süratli, doğru ve ekonomik olarak, noktalar arası görüş gereği olmaksızın üç boyutta konum belirleme yetisine sahiptir [3]. Gelişen GPS Yöntemi yardımıyla YSİ çalışmaları da yeni bir boyut kazanmış ve eşzamanlı olarak edinilen datalar yardımıyla güncel bir gözleme dayalı hale gelmiştir.

Yapısal titreşimlerin gözlenmesinde GPS ölçümlerinin analizi için kullanılan etkili yöntemlerden biri sistemlerin çıkış sinyallerine bağlı olarak sinyallerde bulunan trend, periyodik ve stokastik bileşenin tespit edildiği zaman serileri analizi ve sinyallerin frekans özelliklerini incelerken kullanılan spektral analiz yöntemidir. Günümüzde sinyallerin frekans bölgesinde incelenmesi için Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) kullanılmaktadır. 1965'li yıllarda ortaya çıkan HFD ile sayısal sinyal işleme alanında spektrum analizi ve sinyallerin genlik ve frekans değerlerinin tespit edilmesi gibi işlemler etkili bir biçimde yapılmaktadır [4].

Bu tez çalışması kapsamında yapısal titreşimlerin belirlenmesinde kullanılan farklı jeodezik ölçüm yöntemlerinin performanslarını belirleyebilmek amacıyla sarsma tablası üzerinde 4 farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Sarsma tablası üzerinde farklı genlik ve frekanslarda salınım yaptırılan GPS donanımıyla elde edilen veriler Küresel konum belirleme yöntemlerinden RTK, PPP ve KPP yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu ölçümlerde örnekleme frekansı maksimum 20 Hz seçilerek Nyquist kriterleri doğrultusunda maksimum 10 Hz'lik frekanstaki bir salınımla belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Daha sonra sarsma tablası üzerinde farklı genlik ve frekanslarda salınım yaptırılan bir reflektöre, robotik total station (TPS) ile açı ve mesafe okumaları yapılarak daha düşük frekanstaki salınımların TPS ile gözlenme performansı araştırılmıştır. Bu uygulamada ise örnekleme frekansı 1 Hz seçilmiş ve maksimum 0.5 Hz'lik bir salınımla tespiti yapılmıştır. Her 4 uygulama sonucunda elde edilen veriler zaman ve frekans bölgesinde analiz edilmiştir. Bu amaçla ilk olarak zaman serileri analizi uygulanarak zaman bölgesindeki, daha sonra Hızlı Fourier Dönüşüm Analizli uygulanarak frekans bölgesindeki genlik ve frekans değerleri belirlenmiş, bu değerler sarsma tablasının ölçme donanımı LVDT verileriyle karşılaştırılarak sonuçların doğrulukları tespit edilmiştir. Yöntemler kendi içlerinde ve birbirleri arasında karşılaştırılarak hangi yöntemin en etkili sonuçlar verdiği tespit edilmiş, araştırma bulguları yorumlanmış ve anlamlı sonuçlara ulaşılmıştır.

### **1.1 Literatür Özeti**

Modern İnsanlar büyük yapıların inşasına başladığı tarihten bu yana bu yapıların sürekli olarak gözlenmesi, tasarım ömürlerine ulaşp ulaşmadığının kontrol edilmesi ve gerekli tedbirlerin alınması birçok disiplinin ortak endişe konusu olmuştur. Bu yapılara ait çalışmalar göstermiştir ki yapılardaki değişimlerin gözlenmesi ve hasar tespitinin yapılması sistemli bir yapı sağlığı izlenmesi ile mümkün olmaktadır. Sistemli YSİ çalışmaları yapabilmek için farklı disiplinlerden birçok araştırması YSİ'nin tanımlanması, teknik ve teknolojilerinin tespiti ve geliştirilmesi, etkin YSİ standartlarının oluşturulabilmesi amacıyla yıllardır birçok çalışma yapmakta ve bu çalışmaların belli kurum ve organizasyonların çatısı altında yürütülmesini sağlamak amacıyla uğraşmaktadır. Bu çalışmalar kullanılan teknik ve teknolojilere göre çeşitlenmekle birlikte büyük mühendislik yapıların gözlenmesinde GPS teknolojisi kullanılarak yapılan çalışmalar güncel ve popüler durumdadır.

90'lı yıllara kadar bireysel ya da kurum çaplı olarak birbirinden bağımsız olarak gerçekleştirilen yapısal deformasyonların gözlemlerine ait çalışmalar 90'lı yıllardan sonra sistemli hale getirilmeye çalışılmış ve yapı gözlem çalışmaları geçmişten itibaren

incelenerek YSİ'e genel bir bakış sağlanmıştır. Bu amaçla Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü Deprem Mühendislerinden Prof. Dr. George W. Housner ve arkadaşları "Yapısal Kontrol: Geçmiş, Günümüz ve Gelecek" isimli 75 sayfalık makaleyi yayınlamıştır. George W. ve arkadaşlarının yapmış olduğu bu çalışma [4] kendilerinden sonra gelen tüm yapı gözlem çalışmalarına ışık tutmuş ve çalışmaların sistemli olarak yürütülmesini sağlamıştır. Oldukça kapsamlı olan bu çalışmada pasif enerji sönmemesine, yalnızca statik yüklemelerin dikkate alındığı klasik dönemin aksine sistemin dinamik tepkilerinin de incelendiği aktif kontrol dönemine, hibrit kontrol sensör ve sistemlerine, yapılar için akıllı materyal sistemlerine, yapı sağlığı ve hasar tespit sistemlerine, mühendislik yapılarına uygulanmış geçmiş kontrol çalışmalarına ve YSİ araştırma gereksinimlerine yer verilmiştir. Sonuç olarak makalede tüm bu yöntem ve sistemler ayrıntılı olarak anlatıldığı için gelecekte uygulanacak yapı kontrol çalışmalarında uygun yöntemin seçilebileceğine ve yapısal tasarımlarda makalede aktarılan akıllı materyallerin kullanılmasının önemliliği aktarılmıştır.

Yapı Sağlığı İzlenmesinin ayrıntılı olarak tanımlandığı bir diğer çalışma ise İngiltere Los Alamos Ulusal Laboratuvarından C. R. Farrar ve K. Worden'ın yaptığı "Yapı Sağlığı İzlenmesine Giriş" isimli makaledir. Makalede [6] YSİ çalışmalarına tarihsel olarak bakılarak Makine, Havacılık ve İnşaat sektörlerindeki kullanım alanları aktarılmıştır. Makalenin en dikkat çeken kısımlarından biri YSİ sürecini 4 basamakla (operasyonel değerlendirme, veri toplama, normalleştirme ve temizleme, özellik seçimi, özelliklerin ayrımı için istatistiksel model geliştirme) tanımladığı "İstatistik Örüntü Tanıma Paradigması" bölümüdür ve bu bölümde 4 aşamanın her biri ayrıntılı olarak aktarılmıştır. Daha sonra YSİ'de karşılaşılan zorluklar ve çözüm yolları aktarılmıştır.

Yapı Sağlığı İzlenmesine ilişkin can alıcı konulardan biri ise bu alanda çalışan organizasyon ve sistemli standartların varlığıdır. YSİ çalışmalarını bilimsel teorik çalışmalardan çıkararak inşaat sektöründe güncel olarak kullanılabilir hale getirecek en önemli konu bu organizasyon ve standartların varlığıdır. Bu amaçla Belçikalı araştırmacılar Auweraer ve Peeters [7] yayınlamış oldukları makalede bu alanda çalışan ulusal ve uluslararası tüm organizasyonları ve projeleri bir araya toplamış ve bu proje ve organizasyonların çalışma prosedürlerini incelemiştir. Bu alanda yayınlanmış standartları tek çatı altında toplayabilmek amacıyla ise İtalyan Profesör A. E. Grosso [2] bir makale yayınlamıştır. Bu

makalesinde tarihsel süreci dikkate alarak ülkelerde yayınlanmış YSİ uygulama prosedür ve standartlarını ayrıca var olan yapı dizayn standartlarını aktarmıştır. Bunlardan en önemlileri olan ilk standartlar 2001 yılında yayınlanan ISIS Kanada tarafından yayınlanan YSİ Ulusal Standartlarıdır [8] ve bunun yanında bir diğer önemli belge Rusya tarafından yayınlanan ve kullanımı devlet tarafından zorunlu tutulan Teknik Durum İzleme ve Yapı Sağlığı için Bina ve Yapı Kurallarıdır. Grosso'nun bu makalesi dünyanın birçok ülkesinde var olan ve uygulanan tüm standartları özetler niteliktedir ve ülkesel standart oluşturma çalışmalarında kaynak olabilecek bir çalışma niteliğindedir.

GPS teknolojisinin yapısal deformasyonların izlenmesi için kullanılmasına bakılacak olursa 90'lı yıllardan bu yana özellikle yüksek yapılar ve köprüler gibi mühendislik yapılarında ve bu alanda yapılan akademik çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı görülür. 1993'de J. W. Lovse ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [9] YSİ alanında kullanılan ivmeölçer, lazer interferometre, elektronik uzunluk ölçer gibi GPS'siz ölçüm yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları anlatılarak GPS yönteminin bu yöntemlere göre üstünlükleri aktarılmıştır ve Alberta Kanada'da ki Calgary Kulesinin yapısal titreşimlerinin ölçülmesi için GPS teknolojisinin kullanılma sebepleri açıklanmıştır. 1968'de yapımı tamamlanan Calgary Kulesi 160 metrelik yüksekliği ile o tarihte Kanada'da yapılmış en yapıdır. Ve bu çalışmada kulenin yapısal titreşimlerini belirleyebilmek için kulenin tepesine yerleştirilen iki GPS anteni ve referans noktasına kurulu bir GPS alıcısı ile diferansiyel GPS ölçme yöntemi kullanılarak 10 Hz'lik örnekleme frekansıya 15 dakikalık veri toplanmıştır. Veriler Calgary Üniversitesi tarafından geliştirilen ve faz belirsizliklerini en küçük kareler kestirim yöntemiyle elime eden FLYKIN programıyla post-process edilmiştir. Yapılan saha uygulamasının değerlendirilmesi sonucunda kulenin doğu-batı yönlerinde yaklaşık 5mm ve kuzey-güney yönlerinde yaklaşık 15 mm bir genlikle ve her iki yönde 0,3 Hz frekansla salınım yaptığı tespit edilmiştir. Yazarlar kuzey-güney yönlerindeki salınımın daha fazla olmasının nedenini batı yönlü rüzgârların akışının kulenin varlığı nedeniyle bölünmesiyle oluşan kuzey-güney yönlü girdaplara bağlamaktadırlar. Çalışmanın sonucunda Calgary Kulesi gibi yüksek yapıların yapısal titreşimlerinin belirlenebilmesi için GPS teknolojisinin etkin olarak kullanılabilirliğinin ispatlandığı vurgulanmıştır.

Yüksek binaların hareketlerinin GPS ile izlenmesi alanında gerçekleştirilen uygulamalardan bir diğeri P. Uluşık, H. Erkaya ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmasıdır [10]. Uygulama için Şişli Plazadaki 42 katlı bir bina model olarak seçilmiştir, ikisi bina üzerinde, biri ISTA olmak üzere toplam 5 noktalı bir ağ oluşturulmuş ve bu noktalardaki GPS ölçümleri değerlendirilmiştir. Yataydaki baz ölçme duyarlılığı statik yöntem için  $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ , olan bir GPS alıcısı kullanılmış ve 33 saniyesinde bir alınan veriler Ashtech Solution 2.6 ile değerlendirilmiştir. Uygulama sonucunda yazarların görüşü objeye daha yakın ve gerek yeryüzü gerekse gökyüzü geometrisi uygun olacak şekilde, minimum iki veya daha fazla GPS alıcısının referans nokta olarak kullanılarak Multi-reference kinematik yöntemin benimsenmesinin gerekliliği yönündedir. Ayrıca yapının hareketlerini yorumlayabilmek açısından rüzgâr şiddeti, nemlilik, basınç, sıcaklık ve güneş ışınlarının etkileri gibi parametrelerin sürekli ölçülmesi gerekliliği belirtilmiştir. Bunun yanında sistemin ivmeölçer, eğimölçer, robotik total station gibi diğer ölçme sistemleri ile entegre edilmesinin de gerekli olduğu vurgulanmıştır.

RTK ölçüm yöntemiyle köprü salınım ve titreşimlerinin belirlenmesine yönelik önemli bir çalışma ise Ç. Mekik ve arkadaşları tarafından yapılan makaledir [11]. Bu çalışma kapsamından Zonguldak kent merkezinde yer alan 1956 yılında yapılmış tamamı perçinli çelik yapı olan Fevkani Köprüsü'nün günün farklı zamanlarındaki trafik yoğunluğuna bağlı salınım ve titreşimleri köprü üzerine kurulan iki adet GPS alıcısı ile RTK GPS ölçüm yöntemiyle ölçülmüştür. Referans alıcısı kentin yüksek tepelerinden birinin üzerine yerleştirilmiş ve iki gezici alıcı da köprü'nün belirlenen iki noktasında sabit merkezleştirme düzeneği üzerine konulmuştur. Trafiğin en yoğun ve en seyrek olduğu zamanlarda 1 saniye kayıt aralığı ile ölçmeler gerçekleştirilmiştir ve oluşan salınım ve titreşimlerin gün içindeki değişimleri Hızlı Fourier Dönüşümü ve Yapay Sinir Ağları kullanılarak modellenmiştir. Sonuçların incelenmesinde gündüz verilerinde yükseklik farkı 10 cm, gece ölçümlerinde ise 5 cm bulunmuştur. Gece saatlerinde trafik yoğunluğunun azalması ve sıcaklık düşüşü ile köprü'nün elastikiyetinin azalmasının bu yükselmenin sebebi olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışma sonucunda RTK-GPS ölçü yönteminin köprü salınım ve titreşimlerinin belirlenmesinde kullanılabilirliğinin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Mühendislik yapılarının dinamik davranışlarının jeodezik ölçmelerle incelenmesi alanında yapılan diğer önemli çalışmalar ise Doç. Dr. Hediye Erdoğan'ın 2006 yılında sunduğu doktora tezi [12] ve Erdoğan ve arkadaşlarının devamı niteliğindeki çalışmaları [13] ve [14] kapsamında Türkiye'nin en önemli köprülerinden biri olan Boğaziçi Köprüsü'nün (15 Temmuz Şehitler Köprüsü) yapısal salınımlarının izlenmesi uygulamasıdır. Erdoğan, bu çalışmasında dinamik bir sistem olan Boğaziçi Köprüsü'nün jeodezik ölçmelerle sürekli izlenmesi durumunda etki-tepki değişkenlerine bağlı olarak frekans ve zaman bölgesinde parametrik olmayan yöntemlerle tanımlamasını yapmıştır. Boğaziçi köprüsünün temel yapısal özelliklerini vererek yapıda etkili olan yükleri ve örnekleme frekansını belirlemiştir ve köprü üzerinde alınan obje noktalarında yapılan yersel ve GPS ölçmelerinin sonuçlarının incelenmesi sırasında ARX, regresyon analizi, çoklu regresyon analizi ve çapraz korelasyon analizlerini kullanmıştır. Ayrıca periyodik bileşen analizi ile Boğaziçi Köprüsü'nün yüksek ve alçak frekanslarını güç spektrumlarından yararlanılarak belirlemiştir. Erdoğan bu çalışmasının sonucunda rüzgâr kuvveti, sıcaklık değişimleri ve trafik yükü gibi büyüklüklerin değişimlerine bağlı olarak yapılarda meydana gelen tepkilerin, doğruluğu ve örnekleme frekansı yüksek olan uygun jeodezik ölçüm donanımları ile izlenmesi sonucu yapı hareketlerinin belirlenebileceğini kanıtlamıştır. Ayrıca uyguladığı zaman serileri analizi ve Hızlı Fourier Dönüşümleriyle mühendislik yapılarının gözlenmesiyle elde edilen verilerin zaman ve frekans bölgesinde ayrı ayrı incelenmesinin sonuçların doğruluğunu yüksek ölçüde etkilediğini göstermiştir. Erdoğan'ın bu çalışması tabliyenin maksimum salınım frekansı olan 0.5 Hz'lik yapısal salınımların belirlenmesi için uygulanmış olup daha yüksek frekanslardaki titreşimlerin belirlenmesi konusunda ekstra bir çalışma yapılmamıştır.

Erdoğan'ın bu çalışmasının devamı niteliğinde olan bir diğer çalışması ise, 2005 yılındaki Avrasya Maratonu Süresince Boğaziçi Köprüsü'nün hareketlerini RTK GPS yöntemiyle izlenmesi çalışmasıdır [15]. Bu çalışmada doktora çalışmasından farklı olarak Boğaziçi Köprüsü'nün farklı yüklerin etkisi altında sergilediği davranış biçimleri açıklanmaya çalışılmıştır. Çünkü bu tarz asma köprüler, sıcaklık değişimi, rüzgâr kuvveti, deprem, trafik ve yaya yükü gibi yükler altında gösterecekleri tepkilere göre dizayn edilmekte hesaplamalarda ritimli koşullar vb. farklı tipte birçok yükün aynı anda etkili olması gibi özel durumlar ihmal edilebilmektedir. Asma köprülerin bu tarz bir yüke nasıl tepki

vereceğini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada 75000 kişinin katıldığı halk koşusu sırasında köprü üzerinde gözlemler yapılmıştır. Daha sonra gözlemlerde yapılan yüksek-geçişli filtreleme sonucu köprünün anlık hareketlerine bağlı frekans değerleri tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda köprünün tabliye kesiminin maraton sürecinde belirlenen frekanslarının 0 - 0.5 Hz ile 0.75 - 1 Hz aralığında yoğunlaştığı, bu ritimli koşunun köprüde aynı güce sahip birçok frekans değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Fakat ritimli koşunun köprüye etkiye süresi kısa olduğu için yapıda olumsuz bir tepki durumu gözlenmemiştir.

Yapı Titreşimlerinin gözlenmesiyle ilgili çalışmaların ilerletilmesiyle farklı sensörlerin birlikte kullanılmasıyla yapılan araştırmalar ortaya çıkmıştır. Bu amaçla yapılan önemli çalışmalar Doç. Dr. Cemal Özer Yiğit'in doktora tezi [16] ve Yiğit ve arkadaşlarının devamı niteliğindeki çalışmaları [17] ve [18] yüksek yapıların farklı sensörlerle izlenmesine ilişkin çalışmalarıdır. Yiğit bu çalışmasında çok katlı yüksek bir mühendislik yapısının sismik yükler ve rüzgâr karşısındaki dinamik tepkilerini yalnızca GPS donanımıyla değil aynı zamanda eğim sensörü kullanarak eş zamanlı olarak izlemiştir. 1 tanesi sismik yük ve 4 tanesi rüzgâr yükü olmak üzere toplamda 5 farklı veri grubunun zaman ve frekans analizlerini, Hızlı Fourier Dönüşüm yöntemi kullanarak tamamlamıştır. Her iki sistem için alınan sonuçlar karşılaştırılarak her iki sensörün yapının dinamik davranışlarını belirleyebilme kabiliyetleri açısından katkıları ve eksiklikleri belirlenmiş ve sensör entegrasyonuna ilişkin önemli bulgular elde edilmiştir. Rüzgâr ve deprem gibi, dinamik yükler altındaki yapının dinamik davranışlarının GPS (post-process kinematik kullanılarak) ve eğim sensörü ile bazen birlikte bazen de ayrı ayrı ölçülmesiyle yapıya ait doğal frekans hem GPS hem de eğim sensörü ile 0.41 Hz olarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda iki sistemle de yapısal frekansların aynı doğrulukla belirlenebileceği gösterilmiş fakat eğim sensörünün genlik değerinin, GPS genlik değerinden büyük olduğu tespit edilmiş ve bunun nedeninin binanın lineer olmayan hareketinin, eğim sensörünün sonuçlarını olumsuz etkilemesi olduğu vurgulanmıştır. Uygulama sonucunda eğim sensörünün sadece ilk doğal frekansları belirleyebilirken GPS'in daha yüksek dereceden modlara ait doğal frekansları belirleyebildiği fakat GPS verisinin, 0 - 0.2 Hz aralığında sinyal yansıma ve atmosferik vb. gibi diğer GPS hata kaynakları yüzünden meydana gelen



sıçramalar gösterdiği tespit edilirken eğim sensörünün gürültü seviyesinin oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.

Farklı sensör tiplerinin GPS sensörleriyle entegre edilerek kullanılmasıyla oluşturulan hibrit sistemlerle yapılan çalışmalarda YSİ alanındaki en güncel çalışmalardır. Bu alanda Türkiye'deki çalışmaların en önemlilerinden biri Doç. Dr. Burak Akpınar ve arkadaşlarının yürütmüş oldukları "Yapı Sağlığı İzlenmesine Yönelik Ulusal Ölçme Sistemi Geliştirme Projesi"dir. 115Y250 numaralı bu TÜBİTAK Projesi inşaat mühendisi, elektronik mühendisi ve harita mühendislerini bünyesinde bulunduran multidisipliner bir çalışmadır. Proje kapsamında GNSS sistemlerinin yanında ivmeölçerler aktif olarak kullanılmaktadır. İvme ölçerler ve GPS ölçülerinin entegre bir şekilde analiz edilmesi sonucunda, izlenen yapının hareketleri ile ilgili daha doğru tahminler yapılabilmektedir. GPS ve ivmeölçerlere ek olarak eğimölçerlerle de yapının düşey doğrultudan olan eğilmeleri belirlenebilmektedir. Proje kapsamında GPS, ivme ölçer ve eğim ölçerin entegrasyonundan oluşan donanımla bunların web ortamında online olarak ilgili kullanıcılara sunulması amacıyla kullanılacak yazılımdan oluşan bir sistem tasarımı ve üretimi planlanmaktadır. Ulusal mühendislik yapıları izleme sistemi oluşturularak ilgili alanda öncelikle yurtdışına ödenen yüksek bedellerin önüne geçilmesi projenin ana hedefidir. Devam etmekte olan projenin ilk bulgu ve sonuçları ACE2016 ve 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumunda aktarılmıştır [19].

Bu çalışmanın da ana konusu olan sarsma tablası testleriyle GPS'in yapısal titreşimleri belirleyebilme kapasitesinin tespiti birçok araştırmamanın konusu olmuştur. Wang ve arkadaşlarının 2010 Chile Depremi sonrası yapmış oldukları çalışma [20] bu alandaki önemli testlerden biridir. Wang ve arkadaşları (2012) üç eksenli sarsma tablası testleri ile 2010 Şili Depremi için yüksek hızlı GPS veri gözlemlerinin performans testlerini gerçekleştirmişlerdir. Testlerinde, üç akselerometre ve bir çift frekanslı GNSS alıcısı üç eksenli bir sarsma tablası üzerine yerleştirilerek, önceden tanımlı genlik ve frekansta harmonik hareketler oluşturulmuştur. Sarsma tablasına gönderilen hareketler  $\pm 5$  cm genlikli 2 Hz frekanslı sinüzoidal hareketlerdir. İvmeölçerler 100 Hz örnekleme frekansıyla verilerini kaydederken GNSS alıcısı saniyede 10 Hz örnekleme frekansıyla veri toplamıştır. İvmeölçer ve jeosensör ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ile GNSS

alıcılarının bir gözlem noktasının yatay hareketinin belirlenmesinde büyük bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Tek eksenli bir sarsma tablasıyla gerçekleştirilmiş olan Önen ve arkadaşlarının testlerinde [21] harmonik ve rastlantısal hareketler oluşturularak bu hareketlere ilişkin GPS, ivmeölçer ve LVDT sonuçları karşılaştırılmıştır. Test esnasında ölçülen maksimum frekans genlik ilişkisi 80 mm - 1 mm, 1 Hz - 10 Hz şeklindedir. CORS ağına bağlanarak gerçekleştirmiş oldukları RTK ölçümlerinde 17 mm'lik salınım  $\sigma = 3.05$  mm standart sapma ile , 10 mm'lik salınım ise  $\sigma = 1.40$  mm standart sapma ile belirlenmiştir.

## 1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı yapısal deformasyonların belirlenmesi ya da afet yönetiminin ilk aşaması olan afet tehlikesinin ve riskinin belirlenmesi mümkünse önlenmesi veya büyük kayıplar doğurmaması için gereken önlemlerin alınması amacıyla yapılan Yapı Sağlığı İzlenmesi çalışmalarında jeodezik ölçüm yöntemlerinin etkin olarak kullanılıp kullanılmayacağına tespit edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda yapısal deformasyonların belirlenmesinde güncel olarak kullanılan Küresel Konum Belirleme Sistemi (GPS)'in kullanımıyla sarsma tablası üzerinde gerçekleştirilen farklı testlerin sonuçları incelenmiştir. RTK-GPS ölçümleri, (VRS-FKP-MAC-YLDZ) , PPP-GPS ölçümleri, KPP-GPS ölçümleri kullanılarak farklı frekans ve genlikteki salınımların sonuçları kendi içlerinde ve birbirleri arasında karşılaştırılarak bu yöntemlerin YSİ çalışmalarında kullanılabilirlikte sonuçlar üretilip üretilmediği ve hangi yöntemin bu çalışmalarda daha yüksek doğruluğa sahip olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Küresel Konumlama Yöntemlerinin dışında Robotik Total Station kullanılarak da yapısal titreşimlerin belirlenebileceği öngörülmüştür ve bu amaçla sarsma tablası farklı frekans ve genliklerde hareket ettirilerek üzerine tesis edilen reflektöre açı ve mesafe okumaları yaptırılmış, robotik Total Stationın sonuç doğruluğu belirlenerek gözlemleyebileceği salınım frekansları belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan bu uygulamaların sonuçlarının analiz edilmesiyle testlerde kullanılan jeodezik ölçüm yöntemlerinin YSİ çalışmalarında kullanılabilirliğini belirlemek amaçlanmaktadır.

### 1.3 Hipotez

Yapı Sağlığı İzlenmesi çalışmalarında jeodezik ölçüm yöntemlerinden olan Küresel Konum Belirleme Sistemi GPS'in ölçüm tekniklerinden olan RTK (VRS, FKP; MAC, YLDZ), PPP ve KPP teknikleri etkin olarak kullanılabilir. ve bu tekniklerin kullanılmasıyla yapılarda meydana gelen titreşimler hassas bir şekilde tespit edilir. Bu tekniklerin dışında yine jeodezik ölçüm yöntemlerinden olan Robotik Total Station kullanılarak yapısal titreşimlerin belirlenmesinde düşük frekanslardaki salınımlar belirlenir ve yapısal titreşimlerin belirlenmesi amacıyla TPS ölçümleri etkin olarak kullanılır. Önceden belirlenmiş genlik ve frekansla hareket eden bir sarsma tablasıyla gerçekleştirilen testler sonucunda bu yöntemlerin yapısal titreşimlerin belirlenmesinde etkin olarak kullanılabileceği kanıtlanmış olur.

### YAPI SAĞLIĞI İZLENMESİ

Yapı Sağlığı İzlemesi (Structural Health Monitoring) uçak-uzay, inşaat ve mekanik mühendisliği altyapısı için geliştirilmiş bir uygulama olup, hasar tespit stratejisi olarak tanımlanmaktadır. Burada hasar, sistemin performansını olumsuz yönde etkileyebilecek olan materyaldeki veya geometrik şekildeki değişim olarak tanımlanmakta ve sınır koşullarındaki değişimler de bu tanımın kapsamı içinde yer almaktadır. En genel tanımla hasar, sistemin karşılaştığı, şu anki ve gelecekteki performansını olumsuz yönde etkileyecek değişimlerdir. Bu tanımdan da dolaylı olarak anlaşıldığı gibi sistemin iki durumu arasındaki karşılaştırma olmadan hasar anlamsızdır. Bu iki durumdan biri başlangıç olarak tanımlanan genellikle hasarsız halidir. Yapılardaki ve mekanik sistemlerdeki hasar tespiti yapı sağlığı izlenmesi çalışmalarının ana meselesidir [6]. Bu tanımlamadan da anlaşıldığı gibi Yapı Sağlığı İzlenmesi için öncelikle hasarın ayrıntılı bir şekilde tanımlanması ve yapılacak gözlemlerde aranacak sonuçların ne olacağını belirlenmesi gerekmektedir.

Hasarın tanımının yapılmasının ardından bunun Yapı Sağlığı İzlenmesi (YSİ)'ye entegrasyonu ve böyle bir sisteme neden ihtiyaç duyulduğu irdelenmelidir. Gelişen teknoloji yapılaşmanın giderek artmasına neden olmuş ve bu yapıların yüksek maliyetleri de düzenli bir hasar tespit sistemine olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Son yıllarda sivil yapılar ve binalar ekonomik ve estetik kaygılarla daha yüksek ve daha ince inşa edilmektedir. Çünkü bu yüksek yapılar ilgi odağı olarak turistleri çekmektedir ve şehrin kent simgesi haline gelmektedir. Bunun yanında parsel alanlarını daha etkili kullanabilmekte bu yapıların inşa edilmelerinin ana sebebidir. Bu yüksek yapılarında

önemi azımsanamamaktadır çünkü bu yapıların olduğu bölgeler popülasyonun yoğun olduğu bölgelerdir. Bu nedenle bu yapıların sürekli bir şekilde gözlemleri yapılmalı, tasarım ömürlerine ulaşip ulaşmadıkları kontrol edilmeli ve kalan ömürleri tespit edilmelidir [1]. Yapılardaki bu değişimlerin gözlenmesi ve hasar tespitinin yapılması sistemli bir Yapı Sağlığı İzlenmesi ile mümkün olmaktadır. Bu gözlemler sonucunda tasarım ömürlerine ulaşan ya da yüksek hasarlı olduğu tespit edilen yapılarda gerekli güçlendirmenin yapılması afet sonrası kayıpların azaltılması açısından oldukça önem arz etmektedir.

Bir yapının uzun vadeli olarak kullanılabilmesi için, yapının güvenlik, dayanıklılık, servis ve sürdürülebilirlik ihtiyacını karşılamak gerekmektedir. Uzun vadeli kullanım sırasında, yapı yavaş yavaş bozulup veya ağır hasar alabilmektedir. Hatta deprem ve kuvvetli bir rüzgâr gibi doğal afetlere maruz kaldığında bu yapılar çökebilmektedir. Yapı Sağlığı İzleme teknolojisi bir yapının sürdürülebilirliğini sağlamak ve kullanım ömrünü arttırmak amacıyla hizmet ömrü boyunca yapının güvenlik ve dayanıklılığını değerlendirebilmeye imkân sağlamaktadır. Bir YSI sistemi sensörler, veri toplama ve iletim sistemleri, etkin veri yönetimi ve durum tespiti için (veri işleme, veri azaltma, hasar tespiti, model güncelleme, güvenlik değerlendirme ve güvenilirlik analizlerini içeren) etkili bir veri tabanından oluşmaktadır [22]. Tüm bu Yapı Sağlığı İzleme çalışmaları etkili ve güvenilir yapı kullanımı ve sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir.

## **2.1 Yapı Sağlığı İzlenmesi Uygulama Alanları**

Araştırmacıların tahminlerine göre, Hasar tespiti modern insanlar aletleri kullanmaya başladığından beri uygulanmaya başlanmış olup, bu hasar tespiti dinamik tepki değişikliklerinden yararlanılarak yapılmaktadır. Tren tekerleklerindeki değişikliklerin akustik testlerle tespiti gibi deneyler ilk hasar tespit uygulamalarına örnek olarak gösterilebilmektedir [23].

Hasar Tespiti geçmişten günümüze kadar birçok bilim dalının ilgisini çekmiştir ve bu konularda birçok multidisiplin ortak çalışmıştır. Fakat en dikkat çekici çalışmalar yine bu konuda en endişeli paydaş grubu olan Makine, havacılık ve inşaat sektöründen gelmektedir. Bu sektörlerdeki gelişimlere ayrı ayrı bakılacak olursa her biri için hasar

tespit stratejilerinin çok önemli olduğu görölmekle birlikte inşaat sektöründe bu çalışmaların YSI adı altında tek bir çatı altında birleştirildiği görölmektedir.

Makina topluluğunda hasar tespit stratejilerinin büyük üretim makinelerindeki (döner makineler) hasarın tespit edilebilmesi amacıyla uygulandığı görölmektedir. Bu hasarların tespit ve kontrolünün yapılması makina sektörü için oldukça önem arz etmemdir çünkü bu büyük makinaların arızalanması nedeniyle üretimin durması ya da yavaşlaması firmaları çok büyük masrafa sokabilmektedir. Bunun için hasar tespiti yapılacak makine ayrıcalıklı bir modelle çok iyi tanımlanmalıdır. Tanımlama işleminin temeli tek bir noktada ölçülen deplasman, hız ve ivme değerlerinin zaman içindeki değişimleridir. Veri tabanları çeşitli hasarların titreşim işaretlerinden anlaşılabilmesine izin verecek şekilde geliştirilmiştir. Bu makine sistemleri için, yaklaşık hasar konumu genellikle tek kanallı hızlı Fourier transformasyonu ile belirlenmektedir. Tespit edilebilir tipik hasarlar gevşek ya da hasarlı rulmanlar, hizasız miller ve yontulmuş dişlilerdir [6].

Havacılık topluluğu uzay mekiği gelişimi ile birlikte 1970'lerin sonu ve 1980'lerin başında titreşim bazlı hasar tespit teknolojisini geliştirmeye başlatmıştır. Bu çalışmada mevcut uygulamalar Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi İstasyonu ve gelecekteki fırlatma aracı tasarımları için araştırılan merkezlere yatırımlar yapılarak devam etmiştir ve sistemli bir hasar tespit sistemiyle üretilen araçların güvenliği üst düzeyde tutulmaya çalışılmıştır [24] , [6].

İnşaat Mühendisliği Topluluğu ise 1980'lerin başından beri köprü yapılarının ve binaların incelenmesinde titreşim bazlı hasar tespiti üzerine çalışmaktadır. Köprü yapılarındaki hasarın tespitinde dinamik esneklik ve şekil eğriliği matris endeksleri gibi model özellikleri kullanılmaktadır. Çevre ve çalışma koşullarındaki değişkenlik köprü izleme çalışmalarını ciddi şekilde zorlaştırmaktadır. Bu yapıların fiziksel büyüklükleri de pratikte titreşim bazlı hasar tespit yöntemini uygulamayı oldukça zorlaştırmaktadır [25] , [6].

Tarihsel süreçte YSI'nin İnşaat Mühendisliği alanındaki çalışmalarına bakılacak olunursa insan yapımı olan tüm yapılar üzerinde uygulanabilir olduğu görölmekle birlikte geçmişten günümüze kadar en çok çalışmaların barajlar, köprüler, açık deniz tesisleri, kuleler ve yüksek yapılar, nükleer tesisler, tüneller ve kazılar üzerine uygulandığı gözlenmektedir. Barajlar tarihsel olarak yapı sağlığı izlenmesinin ilk olarak yoğunlaştığı

yapılardandır. Çünkü tarih boyunca pek çok kötü olaydan ders alınmıştır ki barajlarda meydana gelen hasarlar binlerce insanın hayatına mal olmakta maddi manevi olarak büyük kayıp verdirmektedir. Aynı şekilde binlerce insan ve taşıt tarafından kullanılan köprülerin çökmesi ve ya hasara uğraması durumundaki büyük kayıplar YSİ çalışmalarının bu alanda da yoğunlaşmasına neden olmuştur. Petrol çıkarma rafinerisi gibi açık deniz tesislerindeki yapılar da deniz aşındırması kaynaklı sürekli hasar tehlikesi altındadır ve bu nedenle bu tesislerde de düzenli bir hasar tespit sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Tarih boyunca kulelerin ve yüksek yapıların rüzgâr yüklenmesi altında ve ya bir deprem anındaki davranışlarının belirlenmesi de YSİ çalışmalarının ana meselesi haline gelmiştir. Nükleer tesislerdeki YSİ çalışmaları da büyük önem arz etmektedir. Çünkü bu nükleer reaktörlerin kontrollerinin yapılmaması çok büyük can ve mal kaybına neden olmakla birlikte, etkileri nesiller boyu sürececek olumsuzluklara sebep olabilmektedir. Bunun yanında tünel ve kazı çalışmalarına da YSİ politikası uygulanmaktadır. Çünkü tünellerin çökmesi vb. gibi büyük can kaybına neden olabilecek istenmeyen durumların önüne geçmek ancak bu çalışmalar sayesinde mümkün olmaktadır [25].

Bugün de inşaat sektörüne bakıldığında ana endişenin artan yaşlanan yapılar ve buna bağlı olarak artan denetleme ve bakım maliyeti bunun yanında deprem etkisi ve yapının dayanıklılığı olduğu görülmektedir. Bu konuda en çok çalışılan yapılar ise halen köprüler ve yüksek yapılardır. Köprülere ait çalışmalar ayrıca Köprü Yönetim Çalışmaları olarak da anılır [7]. Yüksek yapılardaki dinamik deformasyonlar da uzun yıllardır mühendislik alanının ilgisini çekmektedir. Bu yapılardaki dinamik deformasyonlara örnek verilecek olunursa sıcaklık ya da operasyon koşullarındaki değişimler nedeniyle binalarda meydana gelen hareketler ve açık ocaklı maden yamaçları gibi geoteknik yapılardaki ivmesel hareketler sonucu oluşan hasarlar gösterilebilmektedir. Uzun köprüler, kuleler, yüksek binalar gibi yapılar için harmonik frekansın aralığı genellikle 0,1 Hz - 10 Hz arasındadır ve genliği de 10 mm - 200 mm arasındadır. İnşaat mühendisliği alanında frekansa olan ilginin artmasının sebebi, her geçen gün daha çok yüksek ve uzun yapının ortaya çıkması ve artık bu yapıların çok daha esnek şekilde inşa edilmeleridir [9].

Deprem riskinin artması ve olası afetlerin çok büyük mal ve can kaybına neden olması da İnşaat sektöründe YSİ alanındaki çalışmaların önem kazanmasına neden olmuştur. Artan

yapılaşma, inşa edilen yapıların çok daha ince ve yüksek yapılması, bu yapıların daha yoğun olarak kullanılması ve olası bir felakette bu durumdan daha yüksek miktarda insanın etkilenecek olması etkili bir YSİ çalışmasına olan gereksinimi arttırmaktadır. Bu sebeplerdendir ki yapıların hasar tespitlerinin düzenli bir şekilde yapılması, gerekli önlemlerin alınması ve uyarı mekanizmasının oluşturulması gerekmektedir. Senkronize ve güncel bir hasar tespit sistemi oluşturularak yapılara entegrasyonunun sağlanması olası bir afette oluşabilecek hasarı en aza indirecektir. Bu amaçla YSİ çalışmaları da en etkin biçimde İnşaat sektöründe kullanılmaktadır.

## **2.2 Günümüzde Yaygın Olarak Kullanılan Teknik ve Teknolojiler**

Geçmişten günümüze kadar YSİ birçok disiplinin çalışma alanı olmuş özellikle Mekanik, havacılık ve İnşaat Sektörü için dinamik bir araştırma alanı olarak birçok araştırma ve projenin konusu olarak yerini almıştır. İlk yöntemler de düşünülecek olunursa YSİ alanında onlarca farklı metot ve donanımın kullanıldığı görülebilmektedir. Fakat günümüzde uzun köprüler, kuleler, yüksek binalar gibi yapılar için yapısal titreşimleri belirleyebilmek amacıyla dinamik deformasyonların gözlenmesinde genellikle dört ana yöntem kullanılmaktadır. Bunlar akselometre (ivmeölçer) ile vibrasyon ölçümü, eğimölçer ile vibrasyon ölçümü, robotik total station ile vibrasyon ölçümü ve geliştirilen son teknolojiyle küresel konumlama sistemi (GPS) ile vibrasyon ölçümüdür.

### **2.2.1 Akselometre (ivmeölçer ) ile Vibrasyon Ölçümü**

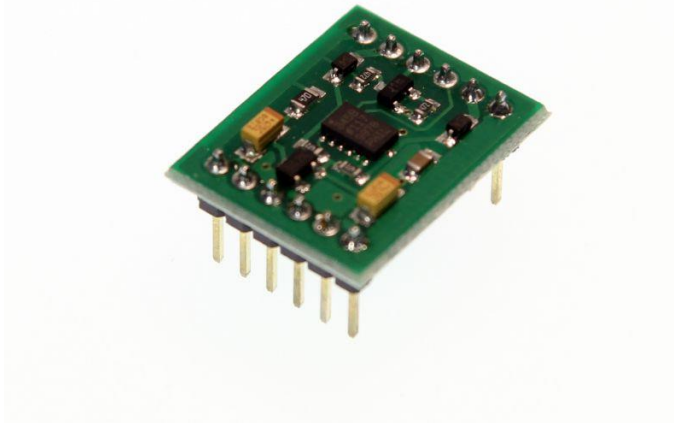
Kütle üzerine uygulanan ivmeyi ölçen cihazlara İvmeölçer veya akselerometre denmektedir. Bu yöntem yapısal vibrasyonların ölçümündeki standart yöntemdir. Akselometre çok hafif (0.5 g) ve çok kompakt (5 mm diyametre) olabilmektedir ve bu nedenle vibrasyon sistemi üzerinde minimum etkiye sahiptir (Şekil 2.1). Akselometre binanın titreşim modlarını belirleyebilmek için yapının çeşitli yerlerine yerleştirilebilmektedir. Akselometre ile ölçüm yöntemi sensörlerin yapıyla direk temas halinde olmasını zorunlu kıldığı için zor bir tekniktir. Ayrıca akselometreyi ana kayıt ünitesine bağlamak için kablo kullanmak gereklidir. Kablo kolaylıkla hasar görebilmektedir ve özellikle kablo çok uzun olduğunda aktarım sırasında parazitlere neden olabilmektedir. Akselometreler döşenirken yapıya uygun olup olmadığına



bakılmazsa daha sonra ek problemler oluşabilmektedir. Eğer ki akselometreler yapının içine monte edilmişse muhtemelen belirli birkaç tanesi hasar görecektir. Akselometreleri yapı üzerine yerleştirmek ve kablolamak zor bir işlemdir, özellikle deniz kenarındaki yapılar ve uzun direklerde neredeyse imkânsızdır [9].

Akselometreyle gözlem sistemlerinde yapının dinamik tepkileri ölçülebilmektedir ve ölçüm kapsamı da oldukça geniştir. Bu nedenle yüksek frekans aralıkları için ivmeölçer kullanılabilir. Buna rağmen, bu uygulama statik ve yarı-statik yer değişim için uygulanamamaktadır ve sayısal entegrasyon hatalarını da içerebilmektedir. Bu nedenle akselometre ile gözlemde bu entegrasyon hatalarını azaltmak için uygun bir post-processing tekniğine ihtiyaç duyulur. Bu nedenlerle akselometre ile vibrasyon ölçümü eş zamanlı gözlem yapmak için kısıtlı kalmaktadır [1], [26], [27], [28].

Özellikle köprülerde kalıcı statik yer değişimi oldukça önemlidir. Çünkü köprülerde gelgit, gemi çarpışmaları, ya da diğer etkiler nedeniyle meydana gelmiş erozyon ve çökme, tüm köprünün aniden düşmesine neden olabilmektedir. Fakat akselometre sistemiyle gözlemde kalıcı yer değişime ait bilgi elde edilememektedir [1], [29], [30]. Bu sebeplerle akselometre YSİ çalışmalarında etkin olarak kullanılmasına rağmen günümüz teknolojisinde tek başına kullanıldığında yetersiz kalmaktadır.



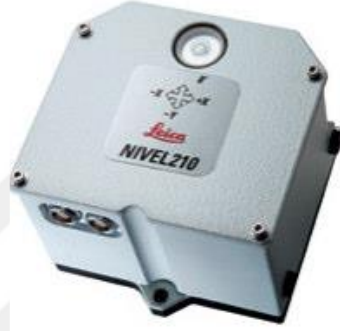
Şekil 2. 1 Akselometre görünüm

### 2.2.2 Eğim Ölçer ile Vibrasyon Ölçümü

Yatay eksene asılı olarak duran manyetik bir ibreden ve bölümlenmiş bir daireden oluşmuş, dikey olarak duran mekanik aygıt eğimölçer ya da meyil ölçer olarak adlandırılır

(Şekil 2.2). Eğimölçerde, ivmeölçer gibi Yapı Sağlığının tespiti amacıyla sıklıkla kullanılan eski ve standart yöntemlerden biridir.

Eğim sensörleri binadaki eğim değişimlerini prezisyonlu bir şekilde ölçebilme yetisine sahiptir. Eğim sensörleriyle eğim ve yönü eş zamanlı olarak ölçülmeye çalışılmaktadır. Bu sensörler temelde elektro-optik bir prensibe göre çalışmaktadır. Burada amaç eğime sahip olan yüzey ile yatay bir yüzey olan sıvı yüzeyi arasındaki açının doğru bir şekilde ölçülebilmesidir. Uygulanan yöntemle bağlı olarak elektro-optik açı ölçme sistemi ile ölçülen açı, dijital veya analog çıkış sinyaline dönüştürülür [31], [16].



Şekil 2. 2 Leica model bir eğim ölçer [16]

### 2.2.3 Robotik Total Station ile Vibrasyon Ölçümü

Robotik Total Stationlar elektronik uzunluk ölçerlerin en gelişmişlerinden olup göndericiden gönderilen sinyalin yansıtıcı bir yüzeyden yansıyıp alıcıya geri ulaşmasıyla hesaplanan uzunluk ve açı ölçümlerini gerçekleştiren aletlerdir (Şekil 2.3). Klasik Total Stationlardan farklı olarak robotik hedef sistemiyle çalışmaktadırlar. Sisteme hedeflerin bir kere tanıtılmasıyla istenilen sayıda tekrarlı ölçüm Total Station tarafından operatörsüz olarak gerçekleştirilebilmektedir ve yine bu aletler hedefe otomatik olarak kilitlenebildiği için belirli salınımlar altındaki hedefin gözlemlerinde kullanılabilirler. Bu nedenlerle de robotik total stationlar klasik elektronik uzunluk ölçerlere oranla Yapı Sağlığı İzlenmesi çalışmalarında daha etkin bir şekilde kullanılabilirler.

Robotik total station ölçmelerinin dezavantajı ise hem mesafe değişimlerinin çözünürlüğünün (genellikle 1 mm) hem de örnekleme oranının (genellikle 10 Hz'den az) düşük olmasıdır. Bu 1 mm'lik çözünürlük büyük mühendislik yapılarının frekanslarının

ölçümü sırasında sorun yaratmayabilir (çünkü genlikleri 10 - 200 mm arasındadır) fakat çoğu Total Station 10 Hz ya da daha düşük örnekleme hızına sahip olduğu için örnekleme hızı problem yaratabilmektedir [9].



Şekil 2. 3 Leica model bir total station

#### 2.2.4 GPS ile Vibrasyon Ölçümü

Yukarıda anlatılan tüm geleneksel YSİ yöntemleri etkili olmasına rağmen günümüz teknolojisine ayak uydurabilecek donanım ve işleve tam olarak sahip değildir ve tek başlarına kullanıldıklarında yetersiz kalmaktadırlar. Dinamik ve statik yer değişimini eşzamanlı olarak gözlemleyebilmek için alternatif yaklaşım GPS yöntemidir. Gelişen GPS yöntemi yardımıyla YSİ çalışmaları da yeni bir boyut kazanmıştır ve eşzamanlı olarak edinilen datalar yardımıyla güncel bir gözleme dayalı hale gelmiştir.

GPS teknolojisi ilk olarak hava trafiği ve uçak inişlerini düzenleyebilmek için diferansiyel taşıyıcı faz ölçmelerinde kullanılmıştır [32], [33]. Daha sonra GPS jeodezik ölçmelerde ve statik ve dinamik yer değişikliklerini belirlemede kullanılmaya başlanmıştır. GPS hızlı ve doğru ölçümlerle statik pozisyon belirleyebilmekte bu nedenle de uzun köprülerde ve yüksek yapılardaki ölçümlerde kullanılmaktadır [34]. GPS aletlerindeki ve algoritmalarındaki hızlı gelişmeler bu yapılarda gerçek zamanlı ölçüm yapmaya imkân vermektedir [35], [36]. Buna rağmen GPS gözlemleri düşük frekanslı yapılar için mümkün olmaktadır çünkü alıcılardaki maksimum örnekleme hızı 100 Hz'dir [37]. Buna ek olarak, GPS uygulamalarındaki gözlemler multipath etkisi, uyduların geometrisi etkisi, troposferik gecikme vb. hata kaynakları nedeniyle kritik hatalara sahip olabilmektedir.

GPS gözlemleri yalnızca düşük model frekansına sahip esnek yapılara uygulanabilmesine rağmen, yine de statik ve dinamik yer değişimini tespit edebilmek için uygulanabilmektedir ve gelecek vaat eden bir teknolojidir [1].

YSİ'de GPS teknolojisinin kullanımında erken evrelerde kullanılan sabit ağ sistemi ve mobil sistem olarak iki yaklaşım bulunmaktadır [36]. Geleneksel GPS yöntemi arazi ölçümlerinde kullanılan bir noktanın koordinatları için birkaç saat beklenen gözlemlere dayalı sabit ağ sistemidir. Burada 2 alıcı kullanılır ve bu iki alıcı arasındaki fark hesaplamalarıyla pozisyondaki değişimler belirlenmektedir. Yüksek kalitede veri toplamak için, gezici GPS alıcısı referans GPS'e kısa süreli olarak sabitlenmelidir. Bu yöntem uzun süreli gözlem yapabilmek ve hata kaynaklarını giderebilmek için önemlidir. Mobil sistem metodu yapılardaki kısa-süreli hareketleri belirleyemez fakat uzun süreçteki yer değişimini tespit edebilmektedir. Köprüler ve yüksek yapılara birkaç gözlem yapılarak çökme ve eğilme nedeniyle oluşmuş geometrik değişimler gözlenebilmektedir. Kısa süreli yer değişimini belirleyebilmek için sabit ağ sistemi gelişmiş algoritmalarla yükseltılarak kullanılabilir [38].

Günümüzde, GPS alıcılarının performansı hızla iyileşmiştir ve 50 - 100 Hz'e kadar örnekleme hızına sahiptir. Gelişmiş cihaz ve algoritmalarla son olarak yapılan GPS çalışmaları göstermiştir ki GPS tekniğiyle yer değişimindeki küçük genlikler milimetre hassasiyette belirlenebilmektedir [1]. GPS ile deplasmanın belirlenebilmesi, bu yöntemin eğim ve ivme ölçere en önemli üstünlüğüdür.

### **2.3 Yapı Sağlığı İzlenmesi Alanında Çalışan Organizasyonlar ve Standartlar**

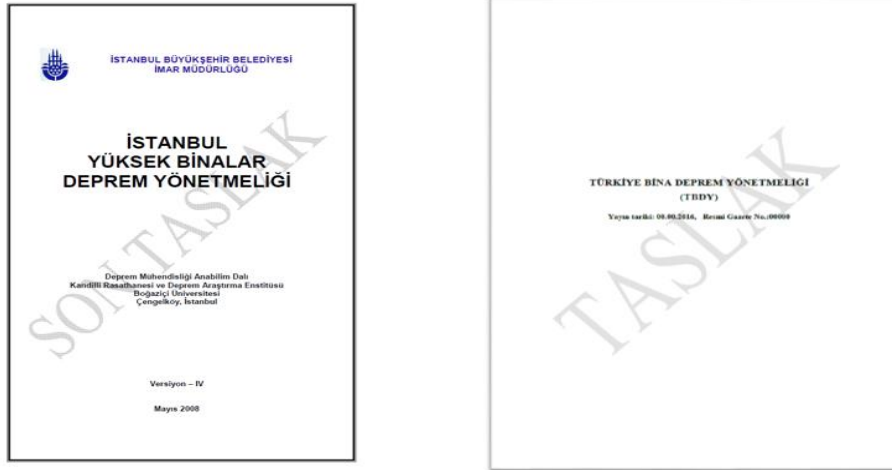
Yapı Sağlığı İzlenmesi teknikleri bilimsel açıdan nispeten olgun kabul edilebilir olsa da, çeşitli nedenlerle inşaat mühendisliği uygulamalarında henüz bir standart haline gelememiştir. Bunun en önemli nedeni YSİ sürecini ve özellikle uygulanma şekillerini kapsamlı bir şekilde ele alan standartların eksikliğidir. Bu konuda dayatılmış belli standart ve yaptırımlar olmadan YSİ çalışmalarının inşaat sektöründe bir standart halinde uygulanması düşünülememektedir. Buna ek olarak, Yapı Sağlığı İzleme ve Tasarım Standartları arasındaki ilişkileri tanımlayan bazı standartlarında olması gerekmektedir. İnşaat sektörünün YSİ çalışmalarında bir standarda sahip olmamasının diğer nedenleri de ekonomik çıkarlar, güç ve teknik beceriler bakımından tamamen farklı

olan tesis sahipleri, tasarımcılar ve müteahhitler de dâhil olmak üzere inşaat mühendisliği sektöründe faaliyet gösteren katılımcıların aşırı çeşitliliği, inşaat sektöründe yer alan yapısal tipolojilerin ve durumların aşırı çeşitliliği, YSİ tekniklerinin kullanımı ile oluşturulabilecek potansiyel yararları anlayış eksikliği ve YSİ piyasasındaki oyuncuların aşırı çeşitliliğidir [2].

Bu konuda var olan mevcut YSİ standartlarına göz gezdirilecek olunursa özellikle inşaat mühendisliği yapılarının kontrolündeki tartışmaların önüne geçmek amacıyla, geçmişte bazı kuralların yayınlandığı görülmektedir. Konuyla ilgili ilk yayınlardan biri ISIS Kanada tarafından piyasaya sürülmüştür. ISIS Kanada Araştırma Ağı (ISIS), Kanada'da inşaat mühendisliği mesleğini ilerletmek için sivil yapılara YSİ uygulanması amacıyla 1995 yılında kurulmuştur. Yayınlamış oldukları oldukça kapsamlı olan bu belge YSİ uygulamalarındaki birçok önemli konudan bahsetmekte ve ortaya çıkan yeni izleme teknolojileri tanıtmaktadır. Temelde, statik ve dinamik alan testleri ve periyodik sürekli statik ve dinamik izleme teknikleri ele alınmaktadır ve veri toplama işleme için bir derleme yapılarak standartlaştırma oluşturulmuştur. Bunların dışında belirli yapılarda önceden gerçekleştirilmiş YSİ örnekleri yol gösterici olarak sunulmaktadır [2], [8]. Avrupa Araştırma Ağı (SAMCO) çerçevesinde üretilen belgeler gibi diğer benzer yayınlar ise son zamanlarda ortaya çıkmaktadır [39].

Önemli bir belge de Rusya GOST-R 53778-2010 (Rus Federasyonu Ulusal Standartları) tarafından "Teknik Durum İzleme ve Yapı Sağlığı için Bina ve Yapı Kuralları" yayınlanmıştır. Bu belgenin kullanımı Rusya Federasyonu tarafından zorunlu tutulmuştur. Bu belge farklı yapı türlerine uygulanacak test metotlarını görsel olarak açıklayan, YSİ'nin mutlaka uygulanmasının gerekli olduğu durumları belirten bunların yanı sıra kontrol altına alınacak fiziksel parametreleri tanımlayan bir belgedir [2], [40]. Yine köprü ve diğer mühendislik yapılarının izlenmesi için resmi bir kılavuz 2012 yılında Avusturya'da yayımlanmıştır [41]. Geniş açıklıklı köprülere uygulanacak YSİ prosedürü için bir kılavuz da Çin'de piyasaya sürülmüştür [42]. Köprü ve binaların titreşim tepkisini ölçmek ve uygulanmasını sağlamak için ISO standartları da hatırlamak gerekmektedir [43], [44], [45]. Var olan tüm bu standartlar YSİ çalışmasına hız kazandırmak ve etkin projeler yürütmek amacıyla ortaya çıkarılmıştır.

Türkiye’deki yasal duruma bakıldığında İstanbul Büyükşehir Belediyesi İmar Müdürlüğü tarafından 2008 yılında yayınlanan “İSTANBUL YÜKSEK BİNALAR DEPREM YÖNETMELİĞİ” 4. versiyonunda Yüksek Binaların Yönetimi ve Yapı Sağlığı’na ilişkin ayrıntılı kurallar olduğu görülmektedir (Şekil 2.4). Yönetmeliğe bakıldığında 6. bölümün Yüksek Binalarda kurulacak Yapı Sağlığı İzleme Sistemlerine ayrıldığı görülmektedir (Şekil 2.5).

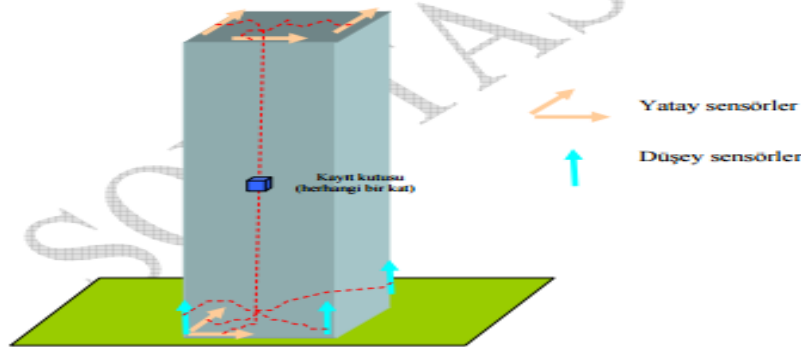


Şekil 2. 4 İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği [46]

## 6. YAPI SAĞLIĞI İZLEME SİSTEMLERİ

Yüksek binaların gerçek davranışlarını izlemek, mevcut yönetmelikleri iyileştirmek ve büyük bir deprem sonrasında yapıda hasar olup olmadığını kısa sürede tahmin edebilmek amacıyla binalarda en az 8 ivme ölçerden oluşan ve Şekil 6.1’de gösterildiği gibi yerleştirilecek yapı sağlığı izleme sistemleri kurulacaktır.

- (a) İvme ölçerler senkronize olarak en az 20-bit duyarlılığında ve GPS zaman kartlı digital bir kayıt sistemine bağlanacaktır. Kayıt sistemi bina titreşimlerini sürekli olarak kaydedecek ve verileri belirlenen merkezlere internet, modem veya benzeri kanallardan gerçek zamanlı olarak transfer edebilecektir. Sistem, elektrik veya iletişimin kesilmesi durumunda en az bir hafta süreyle çalışabilecek ve veriyi kendi içinde saklayabilecek batarya ve disk kapasitesine sahip olacaktır.
- (b) İzleme sisteminde kullanılacak sensör ve kayıt sistemlerinin teknik şartnamesi İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından ayrıca hazırlanacaktır.
- (c) Titreşim kayıtları gerçek zamanlı olarak İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nde kurulacak Yapı Sağlığı İzleme Merkezi’ne gönderilecek ve kayıtlar hem de bina sahibi hem de bu merkez tarafından saklanacaktır.
- (d) Bina sahipleri bu sistemin bakımından ve korunmasından sorumlu olacaktır.



Şekil 6.1

Şekil 2. 5 Deprem Yönetmeliği 6. Bölüm [46]

Uygulama prosedürü için oluşturulan standartların dışında, kamusal ve özel birçok endüstri kuruluşunun, üniversitelerin, araştırmacıların ortak ilgi alanı olan YSİ birçok farklı disiplinin de birlikte çalışabilmesine olanak sağlamaktadır. Artan kurumsallaşma ve araştırmalara verilen önemin artmasıyla var olan projelerin birleştirilmesiyle ya da birkaç kuruluşun bir araya gelerek araştırmalar yapmasıyla ortak projeler ortaya çıkmaktadır. Bazı bölgelerde YSİ alanındaki ortak çalışmaya bağlı projeler ulusal düzeyde organize edilmektedir. Bunları AB, ABD ve Uzak Doğu Ülkelerindeki çalışmalar olarak ayrı ayrı ele alınacaktır.

### **2.3.1 Avrupa Birliği Araştırma Faaliyetleri**

Avrupa ülkeleri YSİ çalışmalarına ve bu alanda geliştirilen projelere çok önem verdiği için devletler bu alandaki çalışmalara büyük destek sağlamaktadır. Avrupa'da YSİ alanındaki ortak çalışmaya bağlı bu projelerden bazıları ulusal düzeyde yürütülmektedir. Örneğin bu projeler İtalya'da Bilimsel Araştırma ve Teknoloji Bakanlığı (BATB) , Büyük Britanya'da ise Ticaret ve Endüstri Departmanı (TED) ve Mühendislik ve Fizik Bilimleri Araştırma Konseyi (MFBK) tarafından organize edilmektedir. Fakat Avrupa Birliği kapsamında bu konudaki temel işleyiş, ulusal ve ya üniversite araştırma programlarının yanında spesifik alandaki çalışmaların da uluslararası projelerle sürdürülmesi şeklindedir. Bu ortak araştırmalar için uygulamada genel olarak 2 şekil yürütme düzeni vardır. Bunlar Avrupa Komisyonu (EC) Çerçeve Programı projeleri ve EUREKA projeleridir [47], [7].

Avrupa Komisyonu (EC) Çerçeve Programı Projelerinden en iyileri Avrupa Komisyonu tarafından belirlenip yürütülmektedir. Sistemin çalışma şekli üst-alt mantığı şeklindedir. Araştırmalar önem sıralarına göre Avrupa Birliği düzeyinde tanımlanmakta ve araştırma teklifleri Avrupa Birliğinden araştırma fonunu alabilmek için uluslararası bir komisyona gönderilmektedir. Bu projelerde öncelik halkın refah ve sağlığının sağlayabilmek amacıyla yapılarıdaki güvenlik ve sürdürülebilirliktir. Birçok çerçeve program Avrupa birliği kapsamında sürdürülmesine rağmen bunlardan en önemlileri genellikle sivil yapılaşma üzerine olanlardır. Avrupa Komisyonu Ulaşım Programı: BRIME Projesi bunların en önemlilerinden biridir. BRIME Projesi 1998-1999 yılları arasında sürdürülmüş Avrupa'daki köprülerin yönetimi projesidir. Bu projede amaç yoğun trafik ve çevresel

etkiler nedeniyle yıpranmış yaşlanmış ve taşıma kapasitesi düşmüş köprülerin durumlarının, kalan ömürlerinin incelenmesidir [7].

EUREKA Projeleri yine önemli bir diğer proje şeklidir. Bu Avrupa konseyi tarafından sürdürülen bir proje olmamasına karşın belirli bir sekretarya vasıtasıyla hükümetler arası düzeyde yürütülmektedir. Endüstriyel ve sosyal tüm bireysel projeler EUREKA Projesine başvurulabilmektedir. Avrupa Komisyonu Projesinin aksine EUREKA 'da sadece Avrupa etiketi vardır bunun dışında her bir proje katılımcı ülkeler tarafından bireysel olarak değerlendirilip ulusal fondan desteklenir. Bu nedenle EUREKA projesi Avrupa Komisyonu Projesi ne göre daha çok piyasa uygulaması şeklindedir. Geniş alanlarda çalışan EUREKA projesi YSI için de geniş bütçe sağlamaktadır [7].

### **2.3.2 Amerika Birleşik Devletleri Araştırma Faaliyetleri**

Amerika da YSI'ye özellikle havacılık ve inşaat alanında özel ilgi gösterilmektedir. Ulaşım altyapılarının hasarlanması, deprem etkilerinin incelenmesi ve dayanıklılığın kontrolü gibi konular genel endişe içeren konulardır. Bu konulardaki çalışmalar genellikle Kaliforniya, Houston, Stanford, Utah, Cincinnati, Texas A & M, Drexel, ve Johns Hopkins Üniversiteleri gibi büyük üniversitelerde ve NASA ve Hava Kuvvetleri'ndeki gibi büyük araştırma laboratuvarlarında yoğunlaşmıştır. Gerekli fon genellikle direk üniversitelerin bütçelerinden ya da Ulaşım Departmanı, Enerji Departmanı gibi otoriteler tarafından sağlanmaktadır. Bunun yanında birçok bireysel girişimciye Ulusal Bilim Fonundan yardım sağlanmaktadır. Fakat Amerika'da yapılandırılmış ortak araştırma projeleri Avrupa Komisyonundakilere göre çok daha azdır. Amerika'da hasar gözlem çalışmaları; Federal Karayolları İdaresi ve Ulusal Bilim Vakfı projeleri gözleminde sürdürülmektedir [48], [7].

Bunların dışında Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu (AİMT) Yapı Sağlığı İzlenmesi Komitesi de 1999 yılında AİMT içerisinde YSI için oluşturmuştur. YSI üzerinde çalışmaya başlayan bu ekip birçok metot ve çözüm tekniği üzerine çalışmaktadır. Bu grubun çalışmalarını içeren bir web site oluşturulmuştur ve buradan kullanıcılar çalışmaları indirebilmektedir.



### 2.3.3 Uzak Doğu Araştırma Faaliyetleri

Uzak Doğu ülkelerinden Yapı Sağlığı konusunda en endişeli olan ülkelerden biri Japonya'dır ve Japonya bu alana büyük yatırım yapmaktadır. Bunun nedeni Japonya'nın zaten az olan anakarasının sürekli deprem riski altında olmasıdır. Japonya'daki gözlem hareketleri genellikle depremler sonrası sistem bütünlüğünün sağlanabilmesi endişesi etrafında şekillenmektedir. Binadaki kaplamalar ve rötuşlar nedeniyle böylesi bir hasarı tespit etmek zordur. Bu hasarın tespiti için gözle inceleme yeterli değildir. Bu nedenle Japonya'da yapı sektörüne ayrılan pay oldukça yüksektir fakat beklenen yeni altyapı ve yeni binalara yatırımların azaltılarak mevcut yapıların tahkik, yönetim ve yenileme çalışmalarının artmasıdır. Bu da etkili bir YSİ politikasının varlığıyla gerçekleşebilmektedir. Bu amaçla Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Organizasyonu tarafından yürütülen "Akıllı Materyaller/Yapı Sistemleri" programı Uluslararası Ticaret ve Endüstri Bakanlığı tarafından finanse edilmektedir ve programın kapsamında ülke genelindeki tüm sivil yapıların gözlem ve yenileme çalışmalarının yapılması vardır. Bina sağlığı ve sensor teknolojisine odaklanmış bir diğer önemli proje ise Yapı Araştırma Enstitüsü tarafından yürütülen "Akıllı Yapı Sistemleri" programıdır ve İnşa Bakanlığı tarafından finanse edilmektedir [7].

Diğer Uzak Doğu bölgelerindeki büyük ortak çalışmalar spesifik köprüler üzerine yoğunlaşmıştır. Honkong bu konuda en çok çalışılan yerlerdendir. Burada çalışılan köprüler için ana gözlem yük gözlemi (Rüzgârlar ya da trafik nedeniyle oluşan etkinin ağırlık sensörleri ya da CCD kameralar aracılığıyla gözlenmesi) şeklindedir. Yine Tayvan'da da Ulusal Araştırma Konseyi bu tarz araştırmaları destekler. Buradaki köprüler deprem şiddetlerine göre incelenir ve tepkileri gözlenir. Ayrıca Kore'de de köprülerin gözlenmesine öncelik verilmiştir. Araç kütlelerinin etkisinin incelenmesi birçok köprü uygulamasıyla gerçekleştirilmiştir [49], [7].

### 2.4 Uygulamalarda Karşılaşılan Problem ve Kısıtlamalar

Yapı Sağlığı İzlemesinde gözlenen yapıya ve kullanılan yöntem, donanım ve teknolojiye göre çeşitli zorluklar araştırmanın ve uygulamanın işleyişini yavaşlatmaktadır. Temel problemler teorik kısımdan pratik kısma yani uygulama aşamasına geçildiğinde ortaya çıkmaktadır.

YSİ uygulamasına geçmeden önce çözülmesi gereken bazı teknik olmayan detaylar vardır ve bu sistem güvenilirliği olarak adlandırılmaktadır. Bu detaylar yapısal sistem kullanıcılarının bu uygulamanın onlar için şuan ki hallerinden daha ekonomik olacağına ve düzenleyici kurumları bu uygulamanın can güvenliği açısından gerekli olduğuna ikna etme çalışmalarıdır. Bunun içinde ilk harcamalardan itibaren planlama, satın alma ve kurulum, sistemin işletme ve bakım maliyetleri düşük olmalıdır [25].

Yeni sensör teknolojisinin kullanılmasıyla ortaya çıkan bir zorlukta; sistem özelliklerini tanımlayabilecek uygun algılama sensörlerini geliştirmek bunların yerleştirilmesini doğru bir şekilde gerçekleştirmek ve mümkünse arazi dağılımından sonra sensörlerin hasar almayacağını garantilemektir. Çünkü sensörlerin de hasar görme olasılığı varsa, onlarında takibinin yapılması gerekir ve bu da ekstra yük ve masraf demektir. Bu takip ya kendi kendini doğrulayan sensörlerin kullanılmasıyla ya da birbirlerinin durumunu rapor eden sensörlerin kullanılmasıyla sağlanabilmektedir. Ayrıca sensör bağlantısı da sorunsuz olmalıdır. Eğer bir sensör hasar verirse, hasar tespit algoritmaları yeni bağlantıyı kurabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Bunu sağlamak içinde gereğinden fazla sensör ağına yerleştirilmelidir. Ayrıca bu sensörlerin vizyon kapasitesi geçen araçlardan etkilenebilmekte ve gözlem mesafeleri birkaç yüz metreyle kısıtlı kalabilmektedir. Ayrıca gözlem koşullarının da çok iyi olması gerekir çünkü ölçüm sonuçları toz, yağmur ve çevre ışıklandırmasından etkilenebilmektedir [1].

Bir diğer problem, yüksek data toplama ve depolama sorunudur. Bu yapılarıdaki hasarın tespit edilebilmesi için güncel ve senkronize veri toplama zorunluluğu vardır. Buda depolama sorunsalını ortaya çıkarmaktadır. Yine bu sensörlerle kesintisiz bir bağlantı oluşturulması ihtiyacı uygulamadaki bir başka kısıttır. Toplanan dataların işlenerek bilgiye dönüştürülmesi ve analiz edilmesi de uygulamadaki zorluklardan birisidir [25].

Tüm bu zorlukların aşılması için en önemli konu ortak çalışma projelerinin yürütülmesi, bu projelerin devlet ve özel kuruluşlar tarafından desteklenerek geliştirilmesi ve uygulamaya konulmasıdır. Bu sayede YSİ için kullanılan yöntemlerdeki zorluklar da optimum koşullar ve iyileştirme çalışmaları uygulanarak olabildiğince elimine edilebilecektir.

### KÜRESEL KONUMLAMA UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)

Küresel konumlama uydu sistemleri, dünya üzerindeki bir kullanıcının konumunu belirlemek amacıyla, en az 4 uydudan kod veya faz varış süresinin ölçülmesi temeline dayanan uydu ölçme sistemidir. Sistem, “geriden kestirme” esasına dayanarak konum belirleme yapmaktadır. Konumu bilinmeyen bir noktanın konumunu hesaplayabilmek için, konumu bilinen noktalara yapılan gözlem ve hesaplara dayanan bu yöntem konum belirlemenin temel mantığını oluşturmaktadır. Uydularla konum belirleme sistemleri (GNSS) ABD tarafından üretilen GPS, Rusya tarafından geliştirilen GLONASS, Çin tarafından geliştirilen BEIDOU/COMPASS ve Avrupa Birliği tarafından geliştirilen GALLILEO olmak üzere temelde 4 çeşittir. Bunların dışında yaygın kullanımı olmamakla birlikte Japonya tarafından geliştirilen QZSS, Hindistan tarafından geliştirilen IRNSS/GAGAN ile Uydu bazlı sistemler (SBAS) olmak üzere diğer GNSS sistemleri de mevcuttur.

#### 3.1 Küresel Konumlama Sistemi (GPS)

Bugün NAVSTAR/GPS adı verilen uydu sistemi 1960’lı yılların başlarında A. B. D. Savunma Bakanlığı tarafından tasarlanmıştır. Bugünkü tanımıyla Küresel Konumlama Sistemi (GPS) kullanıcılara konumlandırma, navigasyon ve zamanlama hizmetleri sağlayan ABD sermayeli bir yardımcı programdır. GPS ‘in orijinal hedefleri dünyanın her yerinde her türlü hava koşulunda pozisyonun ve hızın anlık tespiti (yani, navigasyon) ve zamanla kesin koordinasyonunun (yani, zaman transferi) doğru bir şekilde elde edilmesidir. Bu sistem uzay segmenti, kontrol segmenti ve kullanıcı segmenti olmak üzere üç bölümden

oluşmaktadır. ABD Hava Kuvvetleri, bu sistemi sürdürmekte geliştirmekte ve uzay ve kontrol segmentlerini yönetmektedir [50], [51].

GPS uzay bölümü kullanıcılarına radyo sinyallerini ileten uydulardan oluşmaktadır. Bu bölümde sürekli çalışan ve tek yönlü radyo sinyali ileterek uydu konum ve saat bilgisini ileten 24 uydu bulunmaktadır. Dünyanın her yerinde her saatte en az 4 uydu görülecek şekilde bir dağılım istendiği için GPS uydu sayısını sürekli arttırma eğilimindedir ve 1 Eylül 2016 tarihi itibarıyla, GPS takımıyıldızında 31 işlevsel uydu bulunmaktadır [51].

GPS kontrol bölümü ise uyduların düzgün bir şekilde çalışıp çalışmadığını kontrol eden, toplanan verileri inceleyen ve uydu yörüngelerini tespit eden, uydu saat hatalarının hesaplanmasını gerçekleştiren bölümdür. Ana kontrol istasyonları, 11 komut ve kontrol yer anteni ve 15 izleme istasyonundan oluşmaktadır. Sistemin tüm kontrolünden, uydu efemeris bilgilerinin ve saat düzeltmelerinin her bir uydu için hesabından, uydulara bilgi yükleme işlerinden Ana Kontrol istasyonu sorumludur [51].

Kullanıcı bölümü ise uydulardan sinyali alarak ulaşan bilgiler yardımıyla 3 boyutlu konumu hesaplayan algılayıcı (sensör), kontrol ünitesi, alıcı anteni ve güç kaynağından oluşan GPS alıcılarını içermektedir. Konumunu belirlemek isteyen kullanıcıda bu bölüm altında değerlendirilmektedir. Gelişen GPS teknolojisiyle kullanıcılar askeri ya da sivil amaçlarla hassas bir şekilde konumlarını belirleyebilmektedir. Bunun yanında bu yöntem navigasyon amaçlı olarak uçaklarda, gemilerde ve kara taşıtlarında da sıklıkla kullanılmaktadır [1], [51].

### **3.2 GLONASS**

GLONASS adı Rusça "Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema"dan gelmektedir ve İngilizceye çevrilecek olursa Global Navigation Satellite System olarak adlandırılmaktadır. Türkçe anlamı ise Küresel Uydu Konumlandırma Sistemidir. 1970'lerin ortalarında, Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler eski Birliği Doppler uydu sistemi Tsikada ile deneyimlerine dayanarak GLONASS sisteminin gelişimini başlatmışlardır. Koordinasyon Bilimsel Bilgi Merkezi tarafından 2002'de yayımlanan GLONASS ara yüzü kontrol belgesinde tanımlandığı gibi GLONASS'ın amacı, hava, deniz, kara gibi dünyanın herhangi bir noktasında sınırsız sayıda ve her hava koşulunda kullanıma elverişli üç

boyutlu konumlandırmayı sağlamak amacıyla hız ve zaman ölçümlerinin gerçekleştirilmesidir [50], [52].

Amerikan ordusunun GPS'ine alternatif olarak geliştirilen GLONASS Rus askeri güçleri tarafından işletilen askeri bir sistem olması nedeniyle başlarda neredeyse hiçbir detaylı bilgi kamuya ulaşmamaktaydı. Mayıs 1988'deki Özel Komitesi toplantısında Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü tarafından GLONASS teknik ayrıntılarını içeren bir kâğıt sunulmuş ve GLONASS navigasyon sinyallerini dünya toplumunun kullanımına ücretsiz sunan bir sistem haline gelmiştir [53]. 2011 yılı Ekim ayı itibariyle ise GLONASS toplam 24 uydudan oluşan etkin ve hassas konumlama yapabilen bir sistem haline gelmiştir [54].

### **3.3 GALİLEO**

Avrupa Global Navigasyon Uydu Sistemi Ajansı'nın yaptığı tanımlamaya göre Galileo birçok kullanıcıya ve Avrupa servis sağlayıcısına pozitif etkisi olan gelişmiş konumlandırma ve zaman bilgisi sağlayan Avrupa'nın Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi (GNSS)'dir. Galileo kullanıcılara kesin konumlarını belirleyebilmek için mevcut diğer sistemler tarafından sunulandan daha hassas konum bilgisi sağlayabilmektedir. Arabalardaki navigasyonlardan, telefonlara kadar insanların her gün kullandıkları aletler Galileo'nun sağladığı artan doğruluktan yararlanmaktadır. Bunun dışında kritik, acil müdahale-hizmetleri de Galileo'nun hizmetlerinden yararlanmaktadır. Ve Bu sistem küresel GNSS pazarında 175 milyardan daha büyük bir paya sahip olan Avrupa'nın gelişimciliğini, birçok yeni ürün ve hizmetlerin yaratılmasına katkıda bulunarak ve yeni iş olanakları sunarak artırmaktadır. Ayrıca Galileo programı vatandaşlara Açık Servis, Ticari Servis, Arama Kurtarma Servisleri gibi belirli çevresel faydaları olan birçok yeni hizmetler sunmaktadır [55].

İlk iki operasyonel Galileo uydusu Ekim 2011'de Fransız Guyana bölgesindeki Avrupa'nın uzay üssünden gönderilmiştir. Takımyıldızda yer alan Galileo uyduları ekvatorun 56 derecelik bir açıyla eğimli ve yaklaşık olarak eşit üç yörünge düzlemine yayılacak şekilde tamamlanmıştır. Her bir uydunun dünya çevresindeki yörüngesi tamamlaması yaklaşık 14 saat sürmektedir. Her düzlemde herhangi bir aksaklık durumu için hazır konumda bekleyen bir de yedek uydu yer almaktadır. Dünya üzerindeki birçok nokta için hassas bir doğrulukla (santimetre) zaman ve konum belirlenmesine imkân tanıyan altı ila sekiz

Glönass uydusu görünür durumdadır. Diğer sistemlerle birlikte kullanılabilirliği sadece hizmetlerin güvenilirliğini arttırmakta yalnız başına Glönass uyduları da hassas konum belirleme için yeterli olmaktadır [55].

Avrupa Konseyi tarafından Galileo fikrinin ortaya atıldığı 1994 yılına kadar, GNSS kullanıcıları sivil olmayan Amerikan GPS ve Rus GLONASS sinyallerine bağlı olmak zorunda kalmışlardır. Kullanıcılar Galileo ile diğer programların aksine, sivil kontrolü altında olan yeni ve güvenilir bir alternatif GNSS sistemine sahip olmuşlardır. Programının temel hedefi Avrupa bağımsızlığı iken, Galileo hızla genişleyen GNSS küresel masasında Avrupa'ya da bir koltuk kazandırmıştır. Program GPS ve GLONASS gibi mevcut ve planlanabilecek olan tüm GNSS'ler ile uyumlu ve birlikte çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu anlamda Galileo kullanıcılar için daha sorunsuz ve doğru deneyim sağlayabilen bir sistem haline gelmiştir [55].

### **3.4 Beidou / Compass**

Çin Halk Cumhuriyeti, ilk uydularını gönderdikleri 1970'lerden beri uzay faaliyetleri yürütmektedir. Çin'de Uydu navigasyon fikri ABD Geostar şirketi tarafından inşa edilen benzer bir bölgesel sistemin yapıldığı 1980'lerden beri benimsenmektedir. 1989 yılında, Çift-Star programı kapsamında iki iletişim uydusu uydu navigasyonu için yapılan ilk testlerde başarıyla kullanılmıştır ve 1993 yılında, Beidou adında bağımsız bir navigasyon sistemini uygulanmaya karar verilmiştir. Beidou adı Büyükayı olarak bilinen yedi yıldızlı takımyıldızını simgelemektedir. Bu takımyıldız yüzyıllardır kuzey yarımkürede kuzey yönünü gösteren kutup yıldızını belirlemek için kullanılmaktadır [50].

Beidou hakkında yalnızca bazı küçük resmi bilgiler genel kullanıma açıktır. Ara yüz şartname belgelerinin halka açılmaması nedeniyle kullanılması gereken en önemli sistem parametrelerine erişilememektedir [50].

Beidou Global Navigasyon Uydu Sistemi Ajansı'nın tanımlamasına bakılacak olunursa Beidou uydu konumlandırma sistemi Çin tarafından bağımsız olarak geliştirilmiş, Çin'in global navigasyon uydu sistemidir. Sistemin hedefi: Çin'in bağımsızlığı korumak ve inisiyatifi kendi ellerinde tutmak, teknolojiye uyumlu, açık, istikrarlı ve güvenilir küresel hizmet sunmak, böylece navigasyon uydu sanayi zincirinin temelini hızlandırmak,

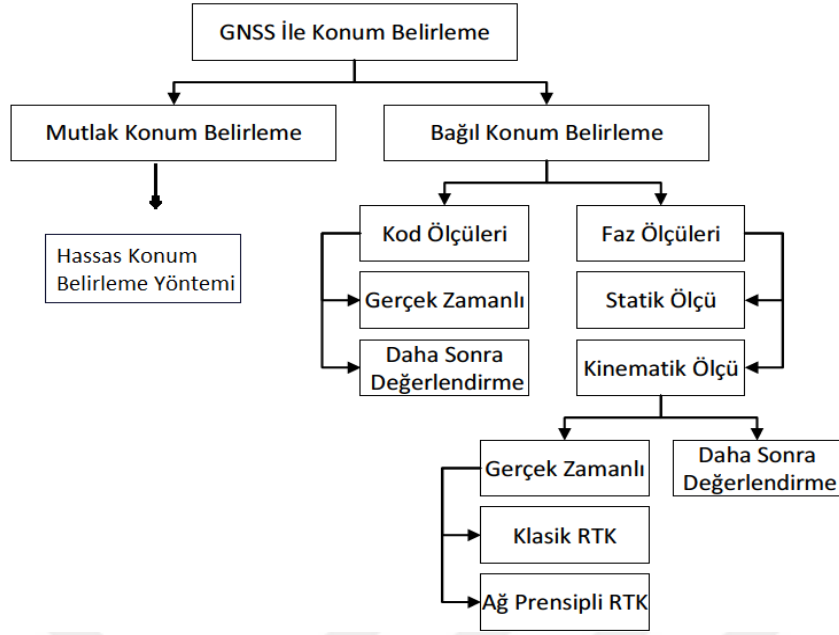
sürdürülebilir ve garantili bir sistem kurmak ve ülkenin ekonomik ve sosyal sektörde uygulama yelpazesini genişletmektir [56].

Beidou uydu konumlandırma sistemi uzay bölümü, yeryüzü bölümü ve kullanıcı bölümü adı verilen üç bölümden oluşmaktadır. Uzay bölümü 5 sabit ve 30 sabit olmayan yörünge uydusundan oluşmaktadır. Yeryüzü bölümü, ana kontrol istasyonları, fırlatma istasyonları ve izleme istasyonları dâhil olmak üzere belirli sayıda istasyondan oluşmaktadır. Kullanıcı bölümüyse Beidou kullanıcılarını ve bu sistemi diğer sistemlerle entegre olarak kullanan kullanıcıları içermektedir [56].

### **3.5 Konum Belirleme Yöntemleri**

Küresel konum belirleme, dünya üzerindeki bir kullanıcının konumunu belirlemek amacıyla, en az 4 uydudan kod veya faz varış süresinin ölçülmesi temeline dayanan uydu ölçme sistemidir. Sistem, “geriden kestirme” esasına dayanarak konum belirleme yapmaktadır. Konumu bilinmeyen bir noktanın konumunu hesaplayabilmek için, konumu bilinen noktalara yapılan gözlem ve hesaplara dayanan bu yöntem konum belirlemenin temel mantığını oluşturmaktadır.

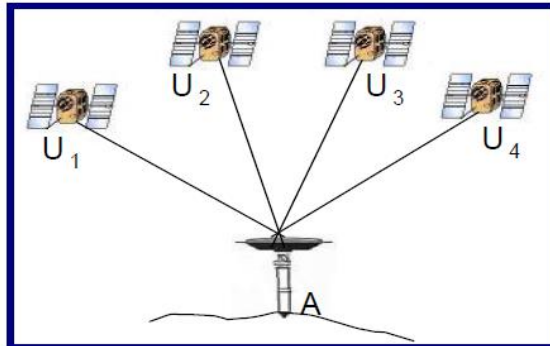
Konum belirlemede ölçülen noktaların cinsine, ölçümden istenilen duyarlılığa ve ölçümün amacına göre farklı ölçme metotları uygulanmaktadır. Ölçümlerden elde edilen koordinatlar alıcının tipine, gözlemin süresine, uyduların konumuna ve sayısına, ölçü tipine göre değişmektedir. Genel olarak GNSS’de mutlak ve bağıl olmak üzere iki türlü konum belirleme yöntemi mevcuttur (Şekil 3.1).



Şekil 3. 1 GNSS ile konum belirleme yöntemleri [57]

### 3.5.1 Mutlak Konum Belirleme

Mutlak konum belirleme yönteminde tek bir alıcı ile en az dört uyduya ilişkin kod gözlemleri yapılarak alıcının kurulu olduğu noktanın koordinatları belirlenmektedir. Bu yöntem geriden kestirme esasına dayanmaktadır (Şekil 3.2). Uzak geriden kestirmede sinyalin uydudan çıkışından alıcıya varana kadar geçen zaman ve ışık hızı çarpılarak uydusalıcı uzaklıkları ve uyduların bilinen koordinatları hesaplanmaktadır. Bu mutlak konum belirleme tekniği ile 5 - 10 m duyarlıkla konum belirlemek kısa süreli veri toplayarak mümkün olabilmektedir [58], [59].



Şekil 3. 2 Mutlak konum belirleme [58]



### 3.5.1.1 Hassas Konum Belirleme Yöntemi (PPP)

PPP tekniği 1970' de ortaya çıkmış olup, ilk olarak Zumberge vd. (1997) tarafından teorik temelleri verilmiştir [60]. Yöntemin amacı tek bir alıcı ile yüksek nokta konum doğruluğuna ulaşmaktır. Gelişen teknoloji ve geliştirilen algoritmalar sayesinde yüksek konum doğruluğuna adım adım ulaşılmaya başlanmaktadır. PPP yöntemi sıfır fark tekniğinin özel bir durumu olup, Diferansiyel GPS (DGPS) ve Real Time Kinematic (RTK) gibi yöntemlerden farklı olarak sabit istasyona ve eş zamanlı gözleme gereksinim duymamaktadır. Hassas Konum Belirleme yöntemi International GNSS Service (IGS), Center for Orbit Determination in Europe (CODE), Jet Propulsion Laboratory (JPL) gibi merkezlerden yayınlanan Global Navigation Satellite System (GNSS) uydularına ait saat ve yörünge düzeltmelerini kullanarak bir GNSS alıcısının konumunun hassas olarak belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Yalnızca alıcının gözlem verileri kullanılarak ve gözlem süresine bağlı olarak cm mertebesindeki doğrulukla konumlama gerçekleştirilmektedir. Bu durum da maliyet yönünden oldukça avantaj sağlamakta ve PPP tekniği diferansiyel yöntemlere göre avantajlı bir konuma ulaşmaktadır. Ancak cm mertebesinde doğruluğa ulaşabilmek için, uydu sayısı, geometrisi ve bunun yanında diğer parametrelere bağlı olarak, en az 20 dakika bir süre gerekmektedir. Bu yöntemle ayrıca dinamik ve global olarak (ITRF) çözümler de elde edilebilmektedir [61], [62].

PPP yöntemi L1 ve L2 faz gözlem farklarını ve bunun yanında kod ölçüm farklarını kullanarak iyonosferden bağımsız kombinasyonlar oluşturur ve iyonosfer hatasının elimine edilmesini sağlar. Alıcı-uydu arasındaki L1 ve L2 faz gözlemleri ile kod gözlemleri (3.1) ve (3.2) eşitlikleri ile tanımlanır.

$$P_i = \rho + cdt - cdT + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion/P_i} + d_{mult/P_i} + \varepsilon_{P_i} \quad (3.1)$$

$$\phi_i = \rho + cdt - cdT + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion/\phi_i} + d_{mult/\phi_i} + \lambda_i N_i + \varepsilon_{\phi_i} \quad (3.2)$$

$P_i$  Kod ölçüsü (m)

$\phi_i$  Faz ölçüsü (m)

$\rho$  Geometrik uzunluk (m)

$c$  Işık hızı(m/sn)

$dt$	Alıcı saat hatası (s)
$dT$	Uydu saat hatası(s)
$dorb$	Uydu yörünge hatası (m)
$dtrop$	Troposferik gecikme (m)
$\lambda_i$	Dalga boyu (m/cycle)
$N$	Başlangıç faz bilinmeyi
$d_{mult}/P_i$	Kod ölçülerini etkileyen yansıma(multipath) etkisi (m)
$d_{mult}/\phi_i$	Faz ölçülerini etkileyen yansıma(multipath) etkisi (m)
$\varepsilon$	Uzunluk şiddeti (m)

PPP yönteminde nokta konumunu belirleyebilmek için GNSS alıcılarıyla gözlem yapmadan, yörünge ve saat hatalarını azaltabilmek için hassas yörünge ve saat ürünleri kullanılır. Yörünge düzeltmeleri ve iyonosfer düzeltme denklemleri (3.3) ve (3.4) ile verilmiştir.

$$P'_{IF} = \rho + cdt + d_{orb} + \varepsilon_{P_{IF}}^I \quad (3.3)$$

$$\phi'_{IF} = \rho + cdt + d_{orb} + N'_{IF} + \varepsilon_{\phi_{IF}}^I \quad (3.4)$$

Denklemden  $P'_{IF}$  iyonosferden bağımsız kod gözlemleriyle metre mertebesindeki düzeltme,  $\phi'_{IF}$  birim uzunluktaki başlangıç bilinmeyi ;  $\varepsilon_{IF}$  multipath hatasını ifade eder. Geleneksel modeldeki bilinmeyen parametreler 3 koordinat bileşeni, 1 alıcı saati, 1 nem kaynaklı zenit doğrultusunda troposferik gecikme bileşeni ve her gözlenen uydu ile ilişkili birleştirilmiş başlangıç bilinmeyeninden oluşmaktadır [63], [64].

Hassas konum belirleme tekniği kendi içinde Gerçek Zamanlı PPP ve ölçü sonrası PPP olarak ikiye ayrılmaktadır.

Gerçek zamanlı PPP tekniği genellikle navigasyon amaçlı kinematik uygulamalarda kullanılmaktadır. IGS bu uygulamaları desteklemek adına uydu yörünge ve saat düzeltmeleri, atmosfer parametreleri, sinyal kayıklığı gibi bilgilerin erişimini sağlamak için RTWG (Real-Time Orkan Grup) gerçek zamanlı çalışma grubunu oluşturmuştur. Alman Kartografik Federasyonu (BKG), Avrupa Uzay Ajansı (ESA) ve Kanada Ulusal

Kaynakları (NRCan) yörünge ve saat ürünlerinin sağlanmasında IGS'le ortak çalışmaktadır. Dünya geneline yayılmış durumda olan 10 analiz merkezi ve 160 istasyon bulunmaktadır. Gerçek zamanlı PPP hassas tarım, meteorolojik tahminler, tsunami veya sel baskını heyelan gibi afet izleme durumları için günümüzde tercih edilen konumlama tekniğidir [64].

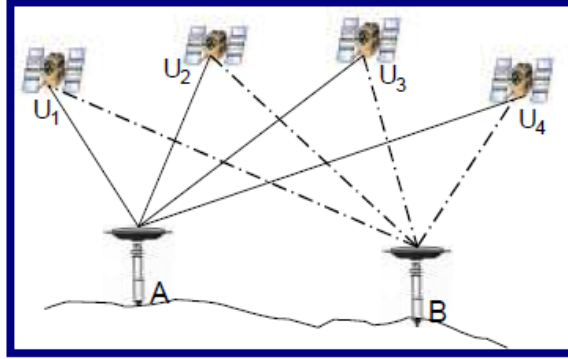
Ölçü sonrası olarak adlandırılan Post-Process kinematik PPP tekniği deniz seviyesi belirlenmesi, arktik kısımlardaki buzul çalışmaları, datum sıklaştırması gibi uzun gözlem süreli ve mm seviyesinde hassasiyet gerektiren çalışmalarda tercih edilmektedir. Post-process PPP için IGS ürünlerine ücretsiz erişim SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) tarafından sağlanmaktadır [64].

PPP yöntemi ile konum belirleyebilmek amacıyla farklı yazılım alternatifleri üretilmiştir. Farklı yazılım paketleri ya da web tabanlı GNSS yazılımları ile bu yöntemde konum belirleyebilmek mümkündür. CSRS-PPP (The Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning), MagicGNSS, APPS (Automatic Precise Positioning Service) yazılımları web tabanlı online GNSS yazılımlarına; GIPSY-OASIS, GrafNav ve Bernese ise akademik ve paket programlara örnek olarak verilebilmektedir. Online sistemler aldıkları verileri bazı seçeneklerle birlikte (static/kinematic, datum tipi gibi) kısa sürede değerlendirip, sonuçlarını birtakım grafiklerle birlikte geri göndermektedir [65]. Bu web tabanlı yazılımlardan; Galileo yörüngesinin belirlenmesi ve zaman senkronizasyonu için geliştirilmiş yazılım BLS (Batch least-squares) algoritmasını kullanan MagicGNSS yazılımıdır [66]. CSRS-PPP, NRCan yazılımını ve çözümler için de BLS algoritmasını kullanmaktadır [67]. APPS ise, PPP çözümü verirken GIPSY-OASIS yazılımını kullanan JPL laboratuvarının bir ürünüdür [68].

### **3.5.2 Bağlı Konum Belirleme**

Bağlı konum belirleme tekniği koordinatlarını bilinen bir noktaya bağlı olarak koordinatlarını bilinmeyen nokta ya da noktaların koordinatlarının belirlenmesi temeline dayanmaktadır (Şekil 3.3). Bağlı konum belirleme tekniğinde iki farklı noktaya kurulmuş olan iki alıcı ile aynı uydulara eş zamanlı faz ya da kod gözlemleri yapılarak elde edilebilecek doğruluk 0.001 - 100 ppm arasında değişim göstermektedir [58]. Bu yöntemde gezici alıcının sabit olarak bekleme mecburiyeti yoktur, bu durum

uygulanmakta olan GPS konumlama yöntemine bağılı olarak farklılık göstermektedir [69], [70].



Şekil 3. 3 Bağılı konum belirleme [58]

Bağılı (rölatif) konum belirleme kullanıldığında uyduya ve GPS ölçülerine bağılı hatalar minimize edilmiş olmaktadır. Bu yüzden hassas konum belirleme gerektiğinde bu yöntem kullanılmaktadır [71]. Bu yöntemde iki ya da daha fazla alıcı tarafından senkronize olarak toplanan pseudorange ve taşıyıcı faz ölçümleri kullanılmaktadır. Aynı uydu grubundan yapılan senkronize gözlemler bazı farklı yaklaşımlarla (tekli, ikili ve üçlü fark gibi) değerlendirilerek çözüme ulaşılmaktadır. Bağılı konumlanmanın ana amacı, bilinmeyen nokta koordinatlarının hesabının bilinen noktalara dayalı olarak hesaplanmasıdır. Sonuçta bilinen nokta ve bilinmeyen noktalarda yapılan senkronize gözlemlerin değerlendirilmesiyle noktalar arasındaki baz vektörlerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır [72], [70].

Bağılı konum belirleme yönteminde genel olarak yedi ayrı yöntem var olup bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir.

- Statik Ölçü Yöntemi
- Hızlı Statik Ölçü Yöntemi
- Tekrarlı Ölçü Yöntemi
- Dur-Git (Stop and Go) Ölçü Yöntemi
- Kinematik Ölçü Yöntemi
- Diferansiyel GPS Ölçü Yöntemi

- Gerçek Zamanlı Kinematik(RTK) Ölçü Yöntemi

### 3.5.2.1 Statik Ölçü Yöntemi

Statik ölçme metodu en çok kullanılan bağıl ölçü yöntemi olup doğruluğu kullanılan baz uzunluğu, gözlem süresi, gözlenen uydu sayısı ve DOP adı verilen uyduların geometrik dağılımına bağlıdır. Statik konum belirlemenin doğruluğu doğrudan baz uzunluğu ile ilişkilidir. Doğruluk 100 km'nin üzerinde olan bazlarda 0.1 - 1 ppm arasındadır [50].

Statik ölçü yönteminde konum doğruluğu GPS alıcısına ve kullanılan değerlendirme yazılımına göre değişmektedir. Yatay konumda yüksek duyarlıklı sonuçlar elde edilebilirken, düşeyde, yatay konum duyarlığının 2 katı daha kötü duyarlıkta sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu ölçü yönteminde 5 mm + 1 ppm duyarlıkla sonuçlara ulaşılabilmektedir [58].

Statik yöntemle toplanan ölçüler uygun GPS yazılımlarıyla büro ortamında (postprocess) değerlendirilmektedir. Burada gözlem süresi bazın büyüklüğüne, uydu geometrisine ve gözlenebilen uydu sayısına bağlıdır (Şekil 3.4). Statik ölçü yöntemi; yüksek doğruluk istenen uygulamalarda, uzun bazlarda, büyük mühendislik yapılarının deformasyonlarının belirlenmesinde, yer kabuğu hareketlerinin araştırılmasında, ülke nirengi ağlarının güncelleştirilmesinde ve uydu geometrisinin başka bir ölçüm tekniğine olanak vermediği zamanlarda kullanılan en iyi yöntemdir [73].

<b>Alıcı Özelliği</b>	<b>Statik Ölçüm Oturum Süresi</b>
L1	30 dakika + 3 dakika/km
L1 ve L2	20 dakika + 2 dakika/km

Şekil 3. 4 Statik ölçümler için oturum süreleri [50]

### 3.5.2.2 Hızlı Statik Ölçü Yöntemi

Hızlı statik ölçüm yöntemi statik ölçüm metoduna benzemekle birlikte gözlem süresi ve baz uzunlukları daha kısadır. Bu ölçümde de uygun ölçüm geometrisi ve multipath gibi etkilerin en az olması gerekmektedir [74], [75].

Bu yöntem, her iki frekans üzerinde faz ve kod gözlemlerinin kombinasyonlarını kullanmaktadır ve yöntemin kullanılabilmesi için iki frekanslı alıcılarla uygun bir uydu geometrisi gerekmektedir. Yine burada da gözlem süresi bazın büyüklüğüne, uydu geometrisine ve gözlenebilen uydu sayısına bağlıdır (Şekil 3.5). Hızlı Statik Ölçü tekniği 20 km ile sınırlandırılmaktadır ve cm mertebesinde doğruluk elde edilebilmektedir [50], [75].

<b>Alıcı Özelliği</b>	<b>Hızlı Statik Ölçüm Oturum Süresi</b>
L1	20 dakika + 2 dakika/km
L1&L2	10 dakika + 1 dakika/km

Şekil 3.5 Hızlı statik ölçümler için oturum süreleri [50]

### 3.5.2.3 Tekrarlı Ölçü Yöntemi

Tekrarlı ölçü yöntemi kinematik ve statik ölçü yöntemleri arasında bir teknik olarak düşünülebilmektedir. Bu yöntemle kinematik yöntemle oranla daha az, statığe göreyse daha fazla nokta üretilebilmektedir. Yöntemde bir iki saatlik ölçüm süresinin başında ve sonunda birkaç dakika süreyle iki kere ölçüm yapılmaktadır. Bu uygulamanın nedeni değişen uydu geometrisinden yararlanmaktır. Bu teknik ile 5 - 10 mm + 1 ppm hassasiyette sonuçlar elde edilebilmektedir [58], [73].

### 3.5.2.4 Dur-Git (Stop and Go) Ölçü Yöntemi

Dur-Git yönteminde bir alıcı konumu bilinen bir noktada sürekli olarak ölçüm yapmaktadır. Diğer alıcı ise ilk olarak herhangi bir noktaya kurulmakta ve bu noktada aynen hızlı statik yöntemde olduğu gibi birkaç dakika ölçüm yapılmaktadır. Başlangıçtaki ölçümün amacı bu noktada ambiguity (faz başlangıç belirsizliğini) belirlemektir. Başlangıç faz belirsizliği çözümü için yeterli sayıda veri toplandıktan sonra ikinci alıcı uydulara olan gözlemlere devam ederek diğer noktalarda birkaç epokluk (10 - 20 saniyelik) ölçümler yapılmaktadır. Bu yöntem ölçüm noktaları birbirine yakın olduğu zaman daha iyi sonuç vermektedir [76], [73].

### **3.5.2.5 Kinematik Ölçü Yöntemi**

Bu yöntemde önceden belirlenen herhangi bir güzergâh üzerindeki nokta konumları belirli zaman aralıkları ile belirlenmektedir. Bu yöntemde de senkronize ölçülerin beraber değerlendirilmeleri söz konusudur. Alıcılardan biri koordinatları bilinen referans istasyonunda sürekli gözlem yaparken, alıcının diğeri gezici alıcılar olarak anlık ya da birkaç epokluk gözlem yapmaktadırlar. Sonuçta tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde, referans istasyonundan yeni noktalara olan baz vektörleri belirlenmiş olur. Bu ölçüm yönteminin doğruluğu yapılan hesaplarda kodların ya da taşıyıcı fazların kullanılmasına bağlı olarak değişmektedir. Bu ölçü yöntemi topoğrafik ölçülerin ve kontrol noktalarının tesisi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kinematik ölçü yönteminde 1 - 2 cm + 1 ppm hassasiyetle sonuçlar elde edilebilmektedir [58], [75].

### **3.5.2.6 Diferansiyel GPS Ölçü Yöntemi**

Diferansiyel GPS (DGPS) ölçü yöntemi, özellikle kara, deniz ve hava araçları için navigasyon sağlamak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Diferansiyel GPS yöntemi temelde RTK GPS yöntemine benzemektedir, yalnızca DGPS yönteminde RTK'nın aksine faz ölçüleri kullanılmamaktadır. Alıcılardan biri koordinatları bilinen sabit noktada gözlem yaparken, gezici alıcı istenilen noktalarda ve hatta gözlem yapmaktadır. Daha sonradan her bir epok için sabit noktada hesabı yapılan düzeltmeler aynı epoka ait gezici alıcı gözlemine uygulanmaktadır. Uygulamadaki asıl önemli nokta ise epoklar arasında bir bağın olmayışıdır. Sonuç olarak sinyal kesikliği sadece o epokları etkilemektedir. Diferansiyel GPS yöntemi ile 1 metrenin altında konum hassasiyetine ulaşılabilmektedir [77], [73].

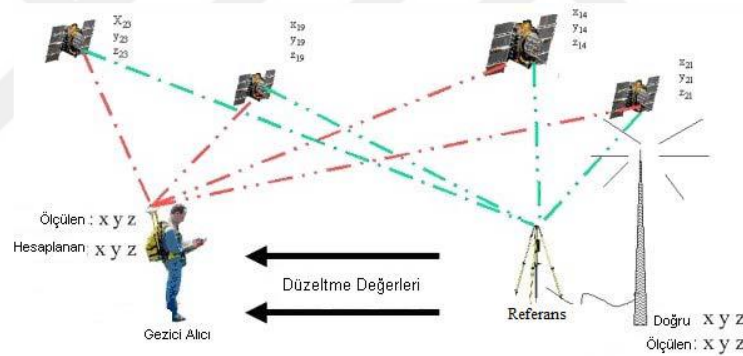
### **3.5.2.7 Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) Ölçü Yöntemi**

RTK ölçü yönteminde uydu ile referans istasyonundaki alıcı arasında, herhangi bir epokta ölçülmüş olan taşıyıcı faz uzunluğu ile uydu - alıcı arasındaki koordinat farkları ile hesaplanan geometrik uzunluk karşılaştırılarak taşıyıcı faz ölçülerine getirilecek düzeltmeler hesaplanmaktadır (Şekil 3.5). Bu düzeltmeler radyo dalgaları ile gezici alıcılara iletilmektedir. Radyo dalgaları üzerine modüle edilen düzeltmelere göre, hareketli alıcı tarafından taşıyıcı faz ölçülerine getirilen düzeltme ile konum

hesaplanmaktadır. RTK tekniğinde sabit alıcı ve gezici alıcı arasındaki iletişim radyo-modemler ile sağlanmaktadır [75], [77].

Bağıl konum belirleme esasına göre çalışan faz ölçülerini kullanan RTK yöntemi cm doğrulukla gerçek zamanlı nokta konumlarını belirleyebilmektedir. Yöntemin ana şartı eş zamanlı olarak 5 uyduya gözlem yapmak gerekliliğidir. Eş zaman ifadesi gezici -alıcı arasındaki radyo bağlantısına bağlıdır. Bu yöntemde sabit alıcı - gezici alıcı arasındaki iletişimi sağlamak için radyo-modemler kullanılmaktadır. GNSS alıcısına referans istasyonundaki düzeltmeler RTCM veri formatında gönderilmektedir [64], [78].

Yöntemde düzeltmeleri gönderen referans alıcı anteninin herhangi bir engelin olmadığı açık bir alana monte edilmesi önemlidir. Referans noktasının konumu da hassas ve doğru olarak bilinmelidir. Fakat çalışma alanında önceden hiçbir ölçüm gerçekleştirilmemiş ise referans noktasının konumu Single Point Positining - SPP (tek nokta konumlama çözümü) ile belirlenebilmektedir [70], [79].



Şekil 3. 6 Real Time Kinematik GPS yöntemi [70]

RTK GPS ölçüm yöntemi kısa sürede hızlı bir gelişim göstererek gerçek zamanlı konumlamaya yeni bir anlayış getirmiştir. RTK GPS ölçüm yöntemi ile santimetre mertebesinde doğrulukla konum bilgisi elde edilebildiği için geniş kullanım alanı bulmuştur. Yöntem hâlihazır harita yapımında, kanal ve boru hattı projelerinde, imar uygulamalarında, nesne davranış belirlemede, yol projelerinde, araç takibinde, kent bilgi sistemi projelerinde, aplikasyon işlerinde doğru ve hızlı sonuçlar üretmesi nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır [70], [80].

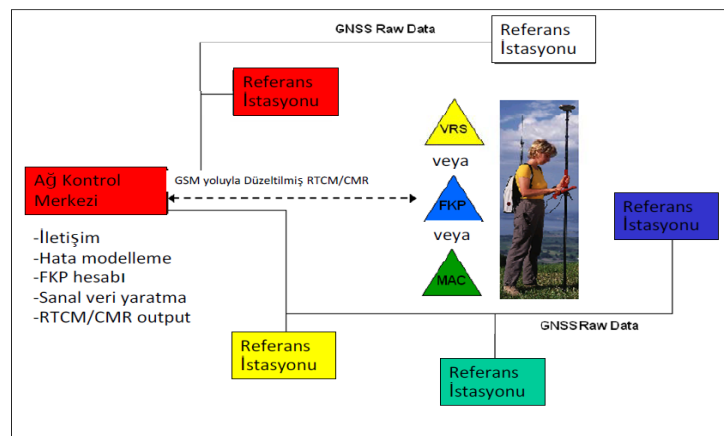
RTK ölçü yöntemi Klasik RTK ve Ağ-RTK olarak iki farklı tekniğe sahiptir. Klasik RTK tekniğinin mantığında koordinatı bilinen noktaya referans istasyonu (base) kurularak



düzeltilmelerin istasyondan gezici (rover) alıcısına yayınlanması vardır. Burada konum doğruluğu gezici alıcı-referans istasyonu arasındaki mesafeye bağlıdır. Alıcılar arasındaki uzaklık 10 - 15 km'yi geçmemelidir. Çünkü atmosferik etkiler (iyonosfer, troposfer) mesafenin artmasıyla doğru orantılı olarak artmaktadır [64], [81], [82].

Ağ-RTK ölçü tekniğinde düzeltilmeler, tek referans istasyonundan değil, çoklu referans istasyonlarından oluşan bir sistemden üretilmektedir. Yönteminin en büyük avantajı cm doğruluk elde edebilmek için gereken 15 km'lik çalışma alanı sınırının 100 km baz mesafesine çekilmesidir [64]. Ülkemiz ve K.K.T.C de Ağ-RTK ölçüm prensibine göre çalışma yapan ulusal TUSAGA-Aktif sistemi mevcuttur. Bu sistem İstanbul Kültür Üniversitesi (İKÜ) yürütücülüğünde, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'nün (TKGM) ve Harita Genel Komutanlığı'nın (HGK) ortak çalışması olan bir projedir. TUSAGA-Aktif sisteminde ülke geneline yayılmış durumda olan toplamda 146 istasyon bulunmaktadır. [64], [83]. Ağ-RTK tekniğinde çalışan ulusal çaplı olmayıp bölgesel çalışan bazı diğer ağlarda mevcuttur. Örneğin tüm İstanbul'u kapsayacak şekilde 8 sabit istasyonu bulunan İSKİ-UKBS ağı bu yerel ağlardan biridir. Ülkemizde kurumsal yapıya sahip olan çoğu belediye veya devlet tabanlı kuruluş kendi bölgedeki vatandaşlara konum bilgisini sunmak adına bu sistemleri kurmuştur [64].

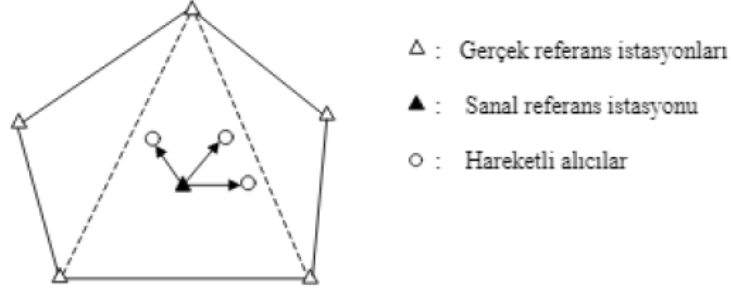
RTK konum belirleme amaçlı düzeltilmelerin ve nokta koordinatlarının yayınlanmasında kullanılan 3 ana teknik bulunmaktadır. Bunlar Sanal Referans İstasyonu Yöntemi (VRS), Alan Düzeltme Parametreleri Yöntemi (FKP), Ana-Yardımcı Referans İstasyonları Yöntemi (MAC) teknikleridir (Şekil 3.6).



Şekil 3. 7 Ağ-RTK sisteminin genel çalışma şeması [57]

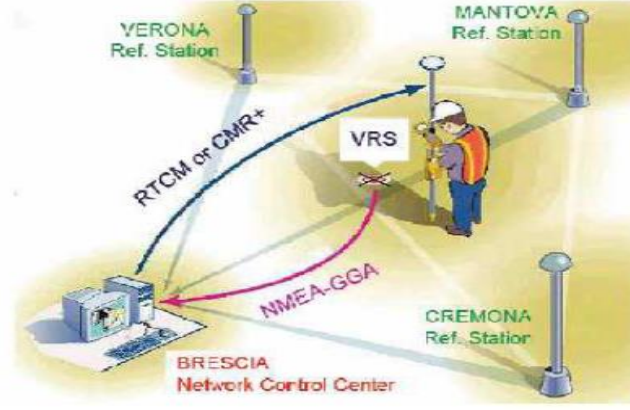
### Sanal Referans İstasyonları Yöntemi (VRS)

VRS Yöntemi, çalışma bölgesini kaplayan referans istasyonları verilerini kullanarak oluşturulan sanal bir referans istasyonuna göre hareketli alıcılarının konumunun belirlenmesine dayanmaktadır (Şekil 3.7) [84].



Şekil 3. 8 Bölgesel ağlarda sanal referans istasyonları [84]

VRS (Sanal Referans İstasyonu Yöntemi) yönteminde üzerine alet kurulmamış sanal bir istasyon olduğu varsayılarak, gezen alıcıdan sadece birkaç metre uzaklıkta olduğu farz edilmektedir. VRS noktalarına ait gözlem verileri civardaki referans istasyonlarının verilerinden yararlanılarak sanki VRS noktasında alet kurularak gözlem yapıyormuş gibi oluşturulmaktadır. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, buradaki temel kabul; gezici alıcılar için geçerli düzeltme parametrelerinin çalışma alanı civarındaki birden fazla referans istasyonu verisinden enterpolasyon yapılarak hesaplanmasıdır. Bu şekilde gezen alıcıların ölçülerindeki birtakım sistematik etkiler (troposfer, iyonosfer, anten faz merkezi, yörünge vb.) önemli ölçüde azaltılmış olmaktadır. Böylece klasik RTK tekniğinin aksine gezen alıcılarla referans istasyonları arasındaki uzaklığın artırılması sağlamaktadır ve sistem güvenilirliğini de artırmaktadır. Bu yöntem ile ağdaki herhangi bir referans istasyonunun işleyişinde aksaklık olsa dahi gerekli GNSS düzeltmeleri diğer istasyon verileri kullanılarak hesaplanabilmektedir [84], [85], [86], [87], [57].



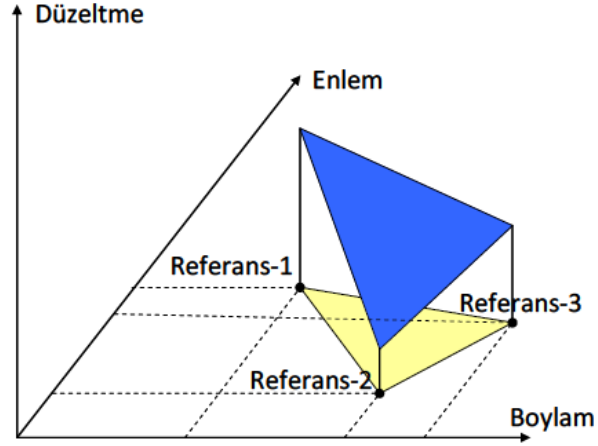
Şekil 3. 9 VRS sisteminin işleyişi [57]

### Alan Düzeltme Parametreleri Yöntemi (FKP)

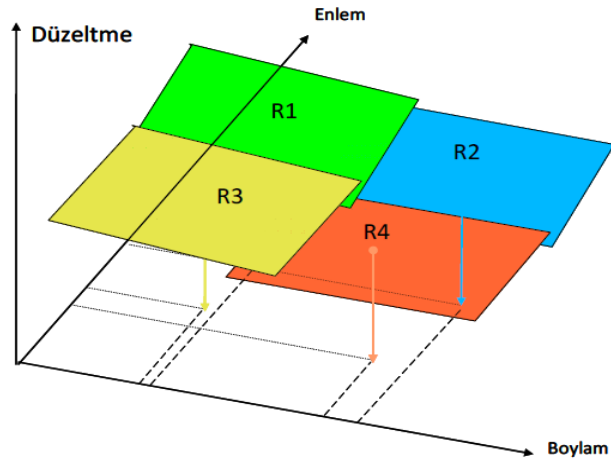
Alman SAPOS grubu tarafından gündeme getirilen ve Almanca karşılığı FKP (FlächenKorrekturParameter) olan Alan düzeltme parametreleri yönteminde düzeltme parametrelerinin hesabında yüzeyler referans olarak kullanılmaktadır. En basit yüzeyin tanımlaması yapılacak olursa, üç nokta arasında gerilmiş olan bir düzlemdir. Koordinatları bilinen üç nokta arasındaki düzeltme parametreleri, Kuzey-Güney yönlerindeki eğim ve Doğu-Batı yönlerindeki eğim değerleri ile tanımlanmaktadır. Üç noktanın oluşturduğu bu yüzeyi tanımlayan parametreler alan düzeltme parametreleri olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemin de temel prensibi (VRS) yöntemiyle aynıdır. Burada da referans istasyonlarındaki verilerin gezen alıcılara aktarılması, gezen alıcıların yaklaşık konumunun da bilinmesi gerekmektedir. FKP yönteminde düzeltmeler, gezici alıcıların gerçek konumlarının enterpolasyon ile hesaplanabilmesi için kullanılan açılal değişim parametreleri (gradyen) biçiminde yayınlanmaktadır [86], [87], [88], [57].

İyonosferik etkiler kısa zaman aralıklarında değiştiği için yöntemdeki düzeltme parametresi iyonosferik ve geometrik bileşenden oluşmaktadır. Geometrik bileşen yörünge hatalarını ve troposferik zaman gecikmesini içermektedir. Gezici, gereken ağ düzeltmesini en yakın sabit istasyonların birinden almaktadır. Çift yönlü haberleşmelerde bu istasyonu kontrol merkezi belirlemektedir. Tek yönlü haberleşmede kullanıcı, kendisine en yakın olan istasyonu kendi seçmek durumunda olduğundan, bu yöntemde tek yönlü haberleşme hemen hemen hiç kullanılmamaktadır. Baz hattı en

yakındaki referans istasyonu ile gezici arasında kurulmuş olmaktadır [57]. Bu yöntemin çalışma prensibi Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10 FKP yöntemi [57]



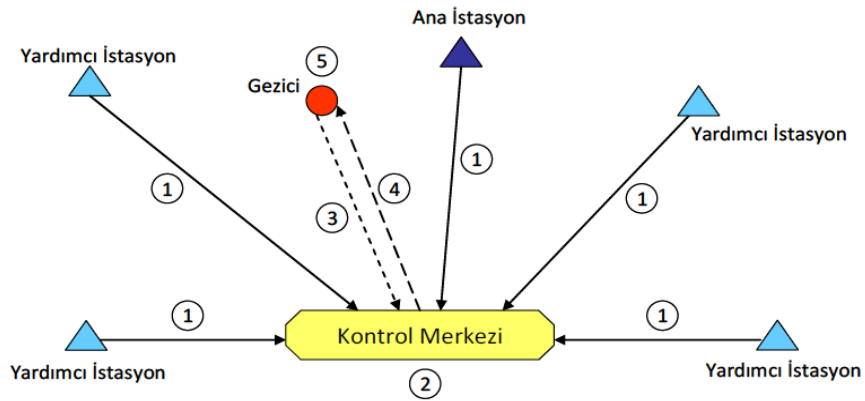
Şekil 3.11 Dört referans istasyonu için FKP yöntemi [57]

### Ana-Yardımcı Referans İstasyonları Yöntemi (MAC)

MAC yönteminin adı ana ve yardımcı referans istasyonları teriminin İngilizce karşılığı olan (Master-Auxiliary Concept - MAC) kısaltmasından türetilmiştir. Yöntemin temel prensibi, bir tane ana istasyon (master) ve birkaç yardımcı istasyondan (auxiliary) oluşmakta olan ağ içerisinde gezici alıcının konumunun belirlenmesine dayanmaktadır. Bu yöntemin kritik noktası hesaplamaların büyük bir bölümünün gezici alıcıda yapılmasıdır [57].

Gezicinin yaklaşık koordinatlarını kontrol merkezine gönderildikten sonra kontrol merkezi gezici için tüm referans istasyonlarından bir ana istasyon ve en fazla 14 adet olmak koşuluyla birden çok yardımcı istasyon belirlemektedir. Bu yöntemde ana istasyonun alıcıya en yakın istasyon olması gerekmemektedir. Kritik nokta alıcı ile aynı uydulara gözlem yapılmış olmasıdır. Ana istasyonun görevi düzeltme bilgilerinin yayınlamasıdır. Ana istasyonun bir nedenle işlevini yerine getirememesi durumunda görevi yardımcı istasyonlardan biri üstlenmektedir [57].

MAC yönteminde bütün hata kaynaklarına ait düzeltme verileri gezici alıcılara iletilmektedir ve bunun sonucunda sistem bütünlüğü tesis edilmekte, uydulara kilitlenme, ölçüye başlayabilme süresi kısaltmakta, faz belirsizliği çözümleri daha doğru ve hızlı olmaktadır. Bu nedenle konum belirleme hassasiyeti artmaktadır. Hata düzeltme verileriyle birlikte ana istasyona ait faz ölçüleri de RTCM V3.1 formatında gezici alıcılara iletilmektedir. Yöntemin çalışma prensibi Şekil 3.10'da gösterilmiştir [57], [86], [87].



Şekil 3.12 MAC yöntemi [57]

### ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ

Zamanın periyodik noktalarında, bir sonuç değişkeninin gözlemlenmesi yoluyla verilerin toplanması zaman serisi olarak adlandırılmaktadır [89]. Zaman serileri belli zaman aralıklarıyla bir değişkenin ardışık değerlerinin kaydedilmesi ile ortaya çıkmaktadır [90]. Zaman serileri analizi ile tepki büyüklüğüne dayalı olarak sistemlerin davranışları incelenebilmektedir. Ekonomi, mühendislik, çevre bilimleri, tıp, işletme gibi birçok disiplin bilimsel araştırmalarda zaman serilerinin ileride göstereceği performansı ve davranış biçimini tahmin edebilmek için zaman serileri analizini kullanmaktadır. “Zaman serileri analizi, ardışık olarak belli aralıklarla gözlenen sistemin zaman serisindeki; trend, periyodik ve düzensiz hareketleri ayrıştırarak, sistemin özelliklerini ortaya koymakta, sistemi tanımlamakta ve özellikle parametrik olmayan durumlarda sıkça uygulanmaktadır” (Erdoğan [12]).

Zaman serileri analizinin uygulanmasında temelde 4 amaç bulunmaktadır. Bunlar;

1. Veri setlerinin grafiğe dökülmesiyle bu grafiklerden dönemlik değişim ve eğilim hakkında bilgi almak ve diziye uymayan aykırı değerleri tespit edebilmek,
2. İki veya daha fazla parametreye bağlı değerler için her parametreye göre farklı grafikler oluşturarak, bu parametreler arası matematiksel ilişki (regresyon) kurmak,
3. Kurulan matematiksel modele göre gelecekteki bir değer için kestirim yapmak,
4. Kestirim değerinin gerçek değere yakınlığını tespit ederek modelin doğruluğunu kontrol etmektir [90].

Zaman serisi analizleri sırasında ilk olarak serinin zamana bağlı grafiğinin oluşturulması gerekmektedir. Daha sonra seride var olan trend bileşeni, periyodik bileşen ve stokastik bileşenin analizi yapılarak seriden giderilmesi sağlanmaktadır. Bir zaman serisi için gözlenen değerlerin üç bileşenden oluştuğu düşünülerek fonksiyonel bir ilişki, "Zaman Serisi= f (Trend Bileşeni, Periyodik Bileşen, Stokastik Bileşen)" olarak yazılabilmektedir (Erdoğan [12]).  $Y_t$  gibi bir zaman serisi için bütün bileşenlerin toplamsal modeli 4.1 eşitliğiyle gösterilmektedir. Burada;  $Y(t)$ = t dönemindeki serinin gözlemlerini,  $Y_T$ = trend bileşeni,  $Y_p$ = periyodik bileşen ve  $Z_t$  ise stokastik bileşeni göstermektedir.

$$Y(t)=Y_T+Y_p+Z_t \quad (4.1)$$

#### 4.1 Trend Bileşeni Analizi

Ardışık olarak yapılan gözlemler sırasında doğal etkiler yada insan etkisiyle homojenliğin bozulması şeklinde herhangi bir faktöre bağlı bir şekilde artan veya eksilen yönde gözlemlenen değişimlere trend denilmektedir [12], [91].

Zaman serileri incelenirken istatistiksel olarak trend bileşeni olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir. Bu da verilere doğrudan bağlı olmayan Mann-Kendall testi ve Kendall Sıra Korelasyon testiyle yapılmaktadır.

##### 4.1.1 Mann-Kendall Testi

Mann-Kendall testinde zamana bağlı sıralanmış  $y_1, y_2, \dots, y_n$  gözlemleri,  $H_0$  hipotezinin tanımlanmasına göre zamandan bağımsız olarak ve benzer şekilde dağılmış rasgele değişkenlerdir.  $H_1$  hipotezi ise ( $k \neq j$ ) olmak üzere tüm ( $k, j \leq n$ ) için seride  $y_k$  ve  $y_j$  değerlerinin dağılımının benzer olmadığını söylemektedir, yani seride lineer bir trend var olmaktadır. Mann-Kendall testinin istatistiği olan  $S$ , (4.2) ve (4.3) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır [12], [92].

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(y_j - y_k) \quad (4.2)$$

$$\text{sgn}(y_j - y_k) = \begin{cases} +1 & \text{eğer } (y_j - y_k) > 0 \\ 0 & \text{eğer } (y_j - y_k) = 0 \\ -1 & \text{eğer } (y_j - y_k) < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Normal bir dağılıma sahip ve ortalaması sıfır olan test istatistiği  $S$ 'nin varyansı;

$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$  şeklinde hesaplanmaktadır. Standart normal değişken ( $z$ ) ise;

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{eğer } S > 0 \\ 0 & \text{eğer } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{eğer } S < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

4.4 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eğer öngörülen anlamlılık düzeyinde,  $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$  ise  $H_0$  hipotezi kabul edilir, diğer durumda reddedilir. Hesaplanan  $S$  değeri pozitif çıkarsa artan, negatif çıkarsa azalan bir trendin varlığı tespit edilmiş olmaktadır. Bu teknik eksik verilerin varlığında da uygulanabilirliği ve herhangi bir dağılıma uyma zorunluluğu olmadığı için sıklıkla kullanılmaktadır [12], [93].

Zaman serilerinde trend bileşenin varlığı tespit edilirse, bu bileşenin seriden ayrıştırılabilmesi için En Küçük Kareler Yöntemi ile zamana bağlı olarak uydurulan bir doğru ( $YT = a + b.t$ ) denklemi gerekmektedir. Elde edilen denklemin katsayıları ise regresyon analizi ile hesaplanmaktadır.

#### 4.1.2 Regresyon Analizi

Regresyon analizi değişkenler arasındaki bağıntıyı temsil eden matematiksel modeli belirlemeye ve modelin yeterlilik düzeyini araştırmaya ilişkin, etkin ve farklı bilim alanlarında yaygın şekilde kullanılan bir yöntemdir [12], [94].

Genel olarak polinom şeklindeki bir regresyon modeli; 4.5 eşitliğiyle tanımlanmaktadır. Burada  $y(t)$ ; tepki büyüklüğü (bağımlı değişken vektörü),  $x$ ; etki büyüklüğü (bağımsız değişken vektörü),  $a$ ,  $b_1$  ve  $b_2$  bilinmeyen parametre vektörleri,  $e$ ; hata değişkeni vektörü olup,  $(E(e) = 0)$  ortalaması sıfırdır ve varyansı ( $\text{var}(e) = \sigma^2$ ) sabittir. Regresyon analizi sırasında gözlem noktalarının koordinat eksenindeki dağılımını gösteren grafikler etki büyüklüklerinin modele ne şekilde gireceğinin ve ya değişkenler arasındaki ilişkiyi ifade



edebilecek olan modelin hangi model olacağı konusunda başlangıçta bir fikir elde edebilmek için incelenmektedir [12].

$$y(t) = a + b_1x(t) + b_2 x^2(t) + \dots + b_{nb} x^{nb} + e(t) \quad (4.5)$$

#### 4.1.3 En Küçük Kareler Yöntemiyle Parametrelerin Kestirimi

Regresyon analizi sırasında oluşturulan modelin  $x_T$  parametrelerin kestirimi için, En Küçük Kareler Yöntemi en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. En küçük kareler yönteminde parametre kestirimi sırasında, bilinmeyen parametrelerinin doğrusal fonksiyonları olan ölçülerin beklenen değerlerinin  $E(y(t))$ , ölçü değerleri  $y(t)$  ile  $\bar{y}(t)$  kestirim değerleri arasındaki farklarının karesel toplamının minimum olması istenmektedir. Ölçü değerleri ile kestirim değerleri arasındaki fark ise  $\varepsilon(t)$  "prediksiyon hatası" olarak adlandırılmaktadır. Bu hataların karesel toplamının minimum olması sağlanarak modelin parametreleri kestirilmektedir. Düzeltme değerleri de prediksiyon hatası olarak ele alınabilmektedir [95]. Prediksiyon hatası;

$\varepsilon(t) = y(t) - \bar{y}(t)$  ve  $\varepsilon(t)^T(t) = \min$  olması koşulu ile  $x$ 'in En Küçük Kareler tahmin edicisi ve ağırlık katsayılar matrisi  $Q_{xx}$ 'dir.

$$x^T = [a, b_1, b_2, \dots, b_{nb}] \quad \text{ve}$$

$$A = [1 \ x(t) \ x(t)^2 \ \dots \ x(t)_{nb}]$$

$$\bar{x} = (A^T A)^{-1} \cdot (A^T y(t)) \quad (4.6)$$

$$Q_{xx} = (A^T A)^{-1}$$

Birim ağırlıklı ölçünün standart sapması ise,  $f$  (serbestlik derecesi) =  $N$  (ölçü sayısına) –  $u$  (bilinmeyen parametre sayısına) göre,

$$m_o = \sqrt{\frac{\varepsilon^T(t) \varepsilon(t)}{f}} \quad (4.7)$$

4.7 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bir parametrenin standart sapması ise

$$m_x = m_o \sqrt{Q_{xx}} \quad (4.8)$$

4.8 eşitliği ile verilmektedir (Erdoğan [12]).

(4.6) eşitliği ile hesaplanan parametrelerin anlamlı olup olmadıklarını test etmek için kurulmuş olan sıfır hipotezinde her bir parametre değerinin "0" olduğu öne sürülmektedir.  $H_0: a=b_1=b_2=b_{nb}=0$ 'dır. (4.9) eşitliği ile belirlenen test büyüklüğü (parametrenin standart sapması) serbestlik derecesi  $f=n-u$  ve anlamlılık düzeyi %5 için t-dağılımının güven sınırı  $t_{f,1-\alpha/2}$  ile karşılaştırılmaktadır.

$$\hat{t} = \frac{x}{mx} \quad (4.9)$$

Eğer  $\hat{t} > t_{f,1-\alpha/2}$  ise polinom parametrelerinin "0" beklenen değerinden sapmaları anlamlıdır, polinomun derecesi  $\hat{t} < t_{f,1-\alpha/2}$  ise parametrelerin "0" beklenen değerinden sapmaları anlamsızdır (Erdoğan [12]).

Zaman serilerindeki trend  $Y_t=a+b.t$  denklemi ile elde edilmektedir. Elde edilen denklemin katsayıları ise regresyon analizi ile hesaplandıktan sonra bu trendin zaman serilerinden çıkarılmasıyla trend giderilmiş zaman serileri elde edilmiş olur.

## 4.2 Periyodik Bileşen Analizi

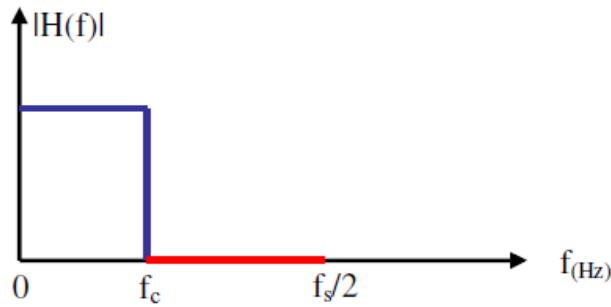
Zaman serilerindeki periyodik bileşen, düzenli olarak tekrarlanan değişimleri ifade etmektedir. Bir yıldan daha az periyotlarda yapılan gözlemlerde dünyanın güneş ve kendi eksenini etrafında dönmesi sebebiyle belli aralıklarla periyodik bileşen ortaya çıkmaktadır. Günlük olarak gözlemlenen verilerden oluşan bir serinin olası periyodik bileşenleri ise Fourier Yaklaşımı ile temsil edilmektedir [12], [96].

Periyodik salınımlar, periyotları bilinen salınımlar ve bilinmeyen salınımlar olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Eğer periyotlar biliniyorsa periyodik bileşenlerin zaman serisinden giderilebilmesi daha kolay olmaktadır. Fakat periyotların bilinmemesi durumunda periyotların ayrıntılı olarak incelenmesi gereklidir ve bunun için spektral analiz adı verilen yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemle zaman serisinin frekans bölgesindeki analizi yapılmaktadır. Zaman bölgesinde zamanın farklı anlarındaki gözlemler arasında ortaya çıkan ilişkiler, frekans bölgesindeyken periyodik hareketlerin belirlenmesi şeklinde karşımıza çıkmaktadır. İki bölgede de yapılan analizler birbirini tamamlayıcı özelliğe sahiptirler. Aynı bilgi farklı yollarla zaman serisinin özelliği hakkında farklı fikirler vermektedir. Bu amaçla Hızlı Fourier Dönüşümü zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüşüm yapmak için kullanılmaktadır (Erdoğan [12]).

#### 4.2.1 Sinyallerin Zaman Bölgesinde Filtrelenmesi

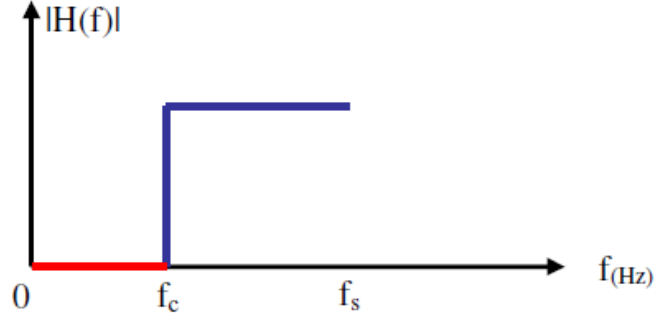
Bir filtreden beklenen istenilen frekanslar ile istenmeyen frekansları ayırmasıdır. Filtreler gürültü vb. sinyallerdeki kirlenme etkenlerinin ayıklanması için de sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle, filtreleme ile istenen frekanslar ile istenmeyen frekansların kesin olarak ayrıştırılması istenmektedir. Filtreler genellikle bastırdıkları ve geçirdikleri frekans bandına göre sınıflandırılmakta ve isimlendirilmektedir. Genellikle kullanılan temel filtreler yüksek-geçiren (high-pass) ve alçak-geçiren (low-pass) filtrelerdir [12], [16].

Alçak-geçiren (low-pass) filtreler düşük frekansların geçirerek istenmeyen yüksek frekansları bastırmak amacıyla tasarlanmışlardır (Şekil 4.1). Alçak-geçiren filtreler, zaman serilerinin kısa dönemli hareketlerini yok edip uzun dönemli salınımlarını ortaya çıkarmakta ve zaman serisinin daha düzgün gözükmesini sağlamaktadır. Bu nedenle kayan ortalamalar yöntemine benzer bir rol oynamaktadır. İki yönteminde amacı kısa-dönemli salınımların yok etmek ve uzun dönemli bileşeni ortaya çıkarılmaktır (Yiğit [16]).



Şekil 4.1 Alçak-geçiren filtre [16]

Yüksek-geçiren (high-pass) filtre, low-pass filtrenin tersine yüksek frekansların geçirilerek istenmeyen düşük frekansların bastırılması için tasarlanmışlardır (Şekil 4.2). Yüksek geçiren filtreyle zaman serilerindeki uzun dönemli salınımlar ortadan kaldırılarak kısa dönemli salınımlar ön plana çıkarılabilmektedir. Yüksek-geçiren filtre özellikle GPS zaman serilerinde sinyal yansıma hatasından (multipath) kaynaklanan etkilerin yok edilmesinde kullanılmaktadır (Yiğit [16]).



Şekil 4.2 Yüksek-geçiren filtre [16]

### 4.3 Hızlı Fourier Dönüşümü

Fourier Tekniğinin temeli Zaman serilerini meydana getiren sinyallerin ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Fourier tekniğinde de Diğer zaman serilerinde olduğu gibi serinin trend bileşeninden arındırılmış olması gerekmektedir. Fourier Tekniğinde T periyotlu bir fonksiyona sinüs ile kosinüs fonksiyonlarının toplamı şeklinde yaklaşılabilmektedir.

$$g(t) = a_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) \quad (4.10)$$

$g(t)$  Fourier dizilerinin gösterimidir. 4.10 formülünde ifade edilen  $a_k$  ve  $b_k$  değerleri  $g(t)$  fonksiyonunun Fourier katsayıları olarak tanımlanmaktadır. Bir dizinin Fourier serisine açılabilmesi için belirli şartlar aranmaktadır.

1. Tanım aralığında fonksiyon tek değerli olmalıdır.
2.  $[0, T]$  aralığında fonksiyon sürekli olmalıdır ve sonlu sayıda maksimum ve minimum noktaya sahip olmalıdır.
3.  $[0, T]$  aralığında fonksiyonun integrali alınabilmelidir.

Bu şartlar sağlandığında Fourier dizileri, fonksiyonun sürekli olduğu her yerde  $g(t)$ 'ye yakınsamaktadır. Fonksiyonun süreksiz olduğu noktalarda ise seri fonksiyonun sağdan ve soldan limitlerinin aritmetik ortalamasına yakınsamaktadır [90], [97]. Fourier serileri periyodik fonksiyonların spektrumunun araştırıldığı çalışmalarda kullanışlıdır fakat kendisini sürekli tekrar etmeyen fonksiyonlarda kullanılamamaktadır. Periyodik olmayan fonksiyonların analizini yapabilmek için ise Fourier dönüşüm yöntemi kullanılmaktadır. Herhangi bir sinyal  $x(t)$  şeklinde zamana bağlı bir fonksiyon olarak gösterilirse bu

fonksiyonu farklı karmaşık üstel fonksiyonlar şeklinde göstermek için fonksiyonun üstel fonksiyonlarla skaler olarak çarpılarak zaman aralığı boyunca toplanması gerekmektedir. 4.11 ve 4.12 ile gösterilen eşitlikler sırasıyla Fourier ve Ters Fourier Dönüşümlerini ifade etmektedirler [12], [98].

$$X_s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t).e^{-2j\pi ft} dt \quad (4.11)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_s(f).e^{2j\pi ft} df \quad (4.12)$$

4.11 ve 4.12 bağıntılarında kullanılan t zamanı, f ise frekansı ifade etmektedir. Denklemdaki  $e^{2j\pi ft}$  karmaşık ve periyodik üstel fonksiyonu ifade etmektedir. Denklemden bulunan  $X_s(f)$  ise  $x(t)$  sinyalinin Fourier Dönüşümünü tanımlamaktadır. Sinyali yeniden elde edebilmek için frekans katsayıları belirlenen üstel fonksiyonlarla katsayıların çarpılarak zaman aralığı boyunca toplanması gerekmektedir. Bu şekilde farklı frekanslardaki periyodik fonksiyonlar toplanarak sinyal tekrar oluşturulmaktadır (Erdoğan [12]). Periyodik olmayan fonksiyonlarda bu şekilde ifade edilebilmektedir. Pencere fonksiyonu olarak bilinen bir sabit fonksiyonun zamanda ötelenmesi bölgesel frekans analizinin yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu şekilde, pencerelenmiş sinyalin Fourier Dönüşümü frekans bileşenleri yanında zaman bilgisini de içermektedir. 1965’de ortaya çıkan, yeni bir algoritmayla, farklı pencere fonksiyonlarının kullanıldığı Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) oluşturulmuştur [99]. KSFD dönüşümünü sağlayan bağıntı 4.13 ile verilmiştir [100].

$$KSFD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t).w^*(t - \tau)]e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.13)$$

Denklemden;  $x(t)$  sinyal,  $w(t)$  pencere fonksiyonu,  $*$  karmaşık eşlenik,  $\tau$  zamanda ötelenmedir. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü, bir pencere fonksiyonuyla çarpılan sinyalin Fourier Dönüşümünden oluşmaktadır. Her bir t ve f için yeni birer KSFD katsayı takımı hesaplanmaktadır. Bu sekliyle Fourier Dönüşümü sadece frekansın bir fonksiyonu olurken KSFD, hem frekansın, hem de zamanın bir fonksiyonu olmaktadır.

Gerçek serilerin teorik olarak tanımlanan bazı serilerin aksine Fourier Dönüşümleri hesaplanamamaktadır. Bu yüzden sayısal sinyaller için Fourier dönüşümünün

kullanılması uygun değildir. N uzunluğundaki, (sonlu) bir x(t) ayrık sinyal için Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) 4.14 eşitliğiyle tanımlanır.

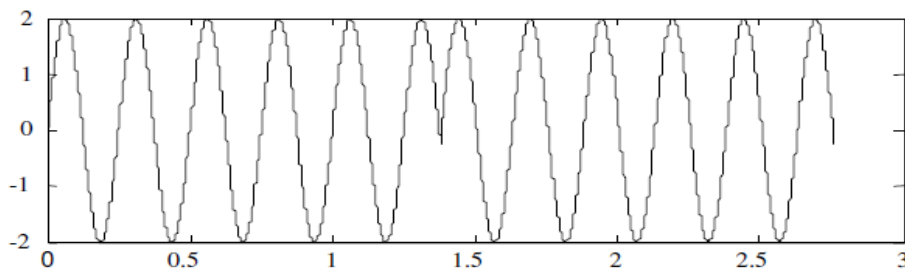
$$\begin{aligned} X_s(f) &= \sum_{t=0}^{N-1} x(t).e^{-j\frac{2\pi}{N}ft} \\ x(t) &= \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} X_s(f).e^{j\frac{2\pi}{N}ft} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD), AFD hesaplamasında etkin olarak kullanılan yaklaşımdır. Cooley ve Tukey tarafından 1965 yılında kurulmuş olan HFD (Fast Fourier Transform-FFT) algoritması; AFD'nin hesaplanması için etkili bir algoritmadır [4], [12]. Bir sinyalin frekans spektrumunun hesapsal işlemlerle elde edilebilmesi için  $2\pi$ 'yle periyodik olan ayrık zamanlı frekansın tek bir periyodunun dikkate alınması yeterli olmaktadır. 4.15 eşitliği ile ayrık-zamanlı frekans spektrumunun  $2\pi$ 'lik temel periyodundaki N adet eşit aralıklı frekans değeri tanımlanmıştır. Formüldeki k (frekans endeksi)  $2\pi$ 'lik temel frekans bandındaki ayrık frekans değerleridir. Fourier dönüşümü N tane ayrık frekans değeri için hesaplandığından toplam N adet ( $k=0,1,\dots,N-1$ ) karmaşık Fourier Dönüşüm değeri  $X_s(f)$  elde edilmektedir. Bir sinyalin genlik, faz ve güç spektrumları Hızlı Fourier Dönüşümü sonucu elde edilen karmaşık sayılardan kolayca belirlenebilmektedir.

$$W = \frac{2\pi}{N}k, \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (4.15)$$

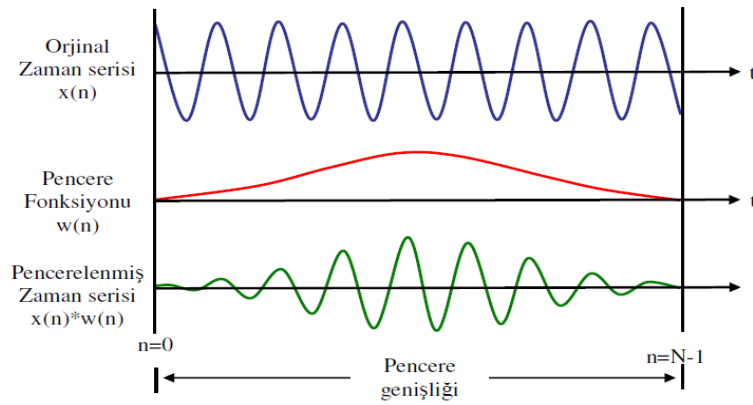
#### 4.3.1 Sinyallerin Pencerenmesi

Ayrık Fourier Dönüşümünün yapısındaki periyodiklik nedeniyle, son örneğinin arkasından tekrar ilk örneği geliyormuş gibi sinyalin spektrumu hesaplanmaktadır (Şekil 4.3). AFD hesabında sinyalin periyodik olarak tekrar ettiği düşünüldüğünden, sinyalin son örneğinden sonra bir sonraki periyot için tekrar ilk örneği geliyormuş gibi ele alındığı için aralarındaki frekans ilişkisi frekans bileşenlerinin değerlerine yansımaktadır [12], [16].



Şekil 4.3 Sinüsün periyodik olarak tekrar etmesiyle oluşan işaret [12]

Periyodunu tamamlamamış bir sinüs işaretinde yapılan hesaplamalarda, işaretle bir süreksizlik meydana geldiğinden aslında işaretin yapısında olmayan frekans bileşenleri görülür. İşaretin son değerleri ile ilk değerleri arasında oluşan devamsızlık, enerjinin diğer frekanslara sızmasına neden olmaktadır ve spektral sızma olarak adlandırılmaktadır. Bu spektral sızmayı azaltmanın yolu ise işaretin son değerleriyle ilk değerleri arasındaki devamsızlığın giderilmesidir. Bunu sağlayabilmek amacıyla işaret, AFD öncesi pencereleme işleminden geçirilmektedir (Şekil 4.4) [101], [16].



Şekil 4.4 Sinyal pencereleme işlemi [16]

Pencereleme yaklaşımında işaretin, AFD hesabı öncesi genliği kenarlara doğru giderek sifıra yaklaşan bir pencere fonksiyonuyla çarpılmasını öngörmektedir. Bu yolla işaretin son değerleriyle ilk değerleri arasındaki devamsızlık giderilmiş olmaktadır. Farklı pencere fonksiyonlarının kullanımı mümkündür. Yaygın olarak kullanılan pencere fonksiyonları Üçgen, Blackman, Hamming ve genel amaçlı uygulamalarda kullanılan Hanning Fonksiyonu 4.16 eşitliği ile tanımlanmaktadır. Herhangi bir sinyalin pencere fonksiyonuyla çarpılması için sinyalin uzunluğuna eş bir pencere işareti oluşturulmaktadır.

$$w(n) = 0,5 - 0,5\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (4.16)$$

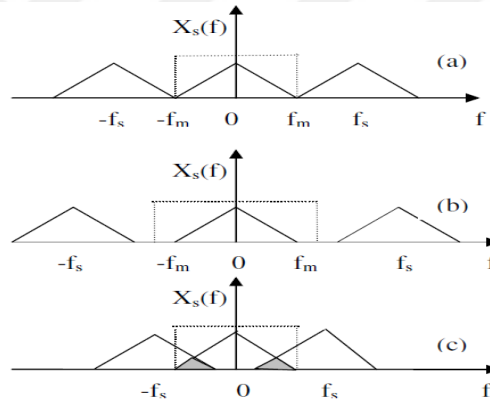
#### 4.3.2 Sinyallerin Örnekleme Frekanslarının Belirlenmesi

Bir sistemdeki çıkış sinyallerinin frekans ve zaman bölgesindeki analizlerinin yapılabilmesini sağlamak amacıyla, ardışık iki sinyal arasındaki sürenin eşit olarak alınması veya ölçme sisteminin zaman hatası kaynaklı frekans dalgalanmalarının

matematiksel enterpolasyon yöntemleriyle düzeltilerek giderilmesi gerekmektedir. Örnekleme periyodu ( $T_s$ ) ardışık iki sinyal arasındaki süre, örnekleme frekansı ise örnekleme periyodunun tersi olan ( $f_s = 1/T_s$ ) olarak isimlendirilmektedir. Sinyalde bilgi kaybı oluşmaması için sinyaldeki bilgiyi tam olarak temsil edecek kadar örnek alınması gerekmektedir. Bu amaçla örnekleme frekansının seçiminde Nyquist kriterine uyulması gerekmektedir. Nyquist kriteri, örnekleme frekansının analog sinyalin sahip olduğu frekans bileşenlerinden maksimum frekans değerine eşit ya da büyük olması olarak bilinmektedir. 4.17 eşitliğinde görüldüğü üzere  $f_m$  sinyalin bant genişliği olmak üzere; örnekleme sinyali  $f_s$  Nyquist kriterine uygun bir biçimde seçilmelidir. Bu örneklenmiş sinyalin frekans spektrumunda bir çakışma meydana gelmemesini sağlayacak ve bant-sınırlı bir işaretle bilgi kaybı olmayacaktır (Şekil 4.5) [12].

$$f_s \leq 2 \cdot f_m$$

$$(4.17)$$



Şekil 4.5 Örnekleme frekansının belirlenmesi [12]

### 4.3.3 Sinyallerin Enerjisi ve Gücü

Bir sinyalin enerjisi veya gücü sinyalin hangi frekanslarda yoğunlaştığının belirlenmesi için kullanılmaktadır.  $y(t)$  zamanın sürekli bir fonksiyonu olan integrali alınabilir deterministik bir analog fonksiyondur ve sinyal enerjisi  $E$  (4.18) eşitliğiyle tanımlanmaktadır. (4.14) eşitliğinin modül karesi spektrum  $S(f)$  olarak adlandırılmaktadır ve (4.19) eşitliğiyle hesaplanmaktadır.

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |y(t)|^2 dt$$

$$(4.18)$$



$$S(f) = |X_s(f)|^2 \quad (4.19)$$

Enerji spektral yoğunluğu  $S(f)$ , frekansın bir fonksiyonu olarak enerjinin dağılımını göstermektedir.  $y(t)$  sinyalinin  $-\infty < n < \infty$  için ayırık bir  $y_n=y(n\Delta t)$  serisi oluşturmak için  $\Delta t$  eşit aralıklarında örnekleme yapılr ise, bant-sınırlı bir süreçten örneklenen datalar için sürekli enerji spektral yoğunluğu (4.19) eşitliği ile özdeş olacaktır.  $n=0$ 'dan  $n=N-1$ 'e kadar olan bir zaman serisinde,  $m=0,1,\dots,N-1$  için  $f=m\Delta f$  frekanslarında örnekler alınarak HFD dönüşümü gerçekleştirilebilmektedir. Böylelikle ayırık enerji spektral yoğunluğu,  $0 \leq m \leq N-1$  için 4.20 eşitliğiyle tanımlanmaktadır [102], [12].

$$S_m = |X_m|^2 \quad (4.20)$$



### SARSMA TABLASIYLA GERÇEKLEŞTİRİLEN GPS - TPS ÖLÇÜMLERİ VE VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüsü İnşaat Fakültesi alanında, 19 Aralık 2014 tarihinde yapısal titreşimlerin jeodezik yöntemlerle tespit edilip edilemeyeceğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen uygulamada Spectra Precision SP80 GNSS Alıcısı ve Leica TPS 1200 model robotik total station sarsma tablası üzerine monte edilerek farklı ölçme yöntemlerinde ve ölçüm sürelerindeki deneyler gerçekleştirilmiştir. Küresel Konum Belirleme tekniklerinden olan RTK, KPP ve PPP konum belirleme yöntemleri kullanılarak sarsma tablası üzerine monte edilen GPS'den sarsma tablası hareketsiz ve hareketli durumdayken farklı sürelerde veriler toplanmıştır. RTK ölçüm prensibiyle veri toplanırken YLDZ ve İSKİ referans istasyonlarına bağlanılmıştır. TPS ölçümleri için sarsma tablası üzerine monte edilen reflektörün farklı frekans ve genliklerde salınımı gözlenirken, robotik total stationa bu hareketi belirleyebilmek amacıyla açı ve mesafe ölçümleri yaptırılmıştır. Saha çalışmaları için hazırlanan test prosedürü takip edilerek yaklaşık saat 11.00'de başlanılan ölçümler 14.30 gibi tamamlanarak sarsma tablasının ölçüm donanımı (LVDT) ölçüm verileri, GPS alıcısı ölçüm verileri ve robotik total station ölçüm verileri kaydedilerek çalışmanın saha testleri tamamlanmıştır.

#### 5.1 Sarsma Tablası

Sarsma tablası, titreşim hareketlerini yapay olarak üreterek deprem hareketlerini taklit eden platforma denilmektedir. Yani deprem hareketinin simülasyonu bu tabla sayesinde

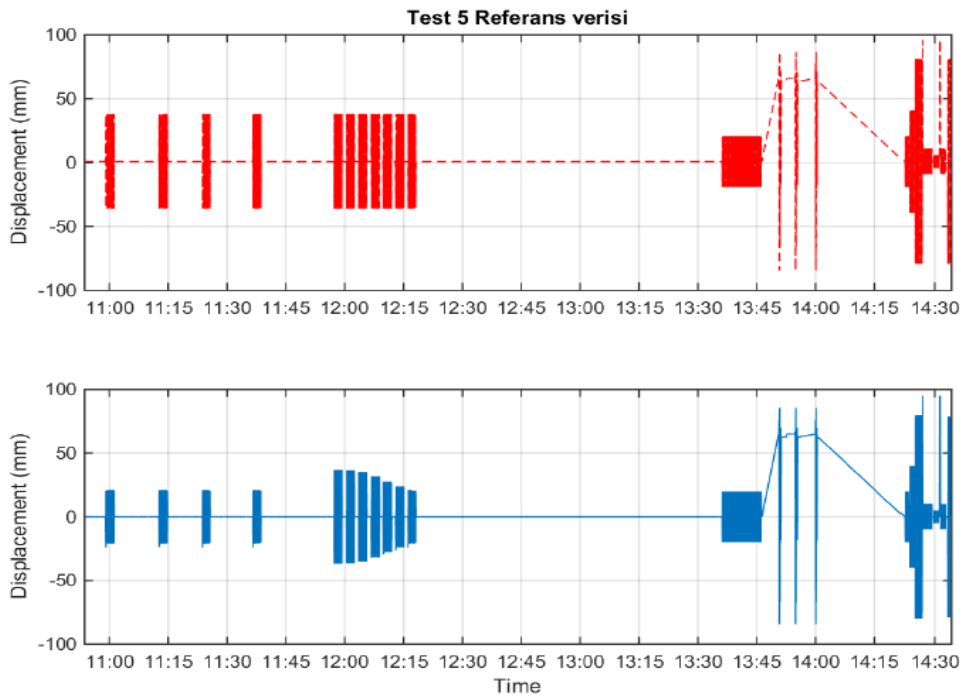
gerçekleştirilebilmektedir. Test edilecek bina modeli sarsma tablası üzerine yerleştirilerek ve yer hareketine maruz bırakılarak dinamik davranışı gözlemlenmektedir. Uygulamada kullanılan QUANSER Sarsma Tablası II (SHII) yapısal dinamikleri, titreşim izolasyonunu, yapı kontrolünü ve deprem, havacılık ve makine mühendisliği ile ilgili diğer denetim konularını araştırmak için ideal yatayda tek eksenli bir deprem simülatörüdür. Sarsma tablası II 7.5 kg kütle ile yüklü olduğunda 2.5 g bir hızlanma sağlayabilen güçlü bir motor tarafından hareket ettirilen bir üst ana bölümden oluşur. Üst ana bölüm düşük yol sapma ile düzgün doğrusal harekete izin veren lineer rulmanlar kullanılarak iki metal mil üzerinde hareket etmektedir. Alt tabla ve üst tabla olarak farklı boyutlardaki iki ana alüminyum bloktan oluşmuştur. Yaklaşık 20 kg ağırlığındaki sistem 50 kg yük altında çalışabilme kapasitesine sahiptir. Sinüzoidal, kullanıcı kontrollü ve gerçek deprem titreşimli hareket kabiliyetine sahiptir. Maksimum  $\pm 2$  g'lik bir ivmeyle sistemin maksimum yer değiştirmesi kapasitesi  $\pm 7,5$  cm'dir. Bilgisayar yazılımlarıyla programlanan genlik ve frekansta hareket eden tablanın çalışma frekansları ise 75 mm için 2.5 Hz, 10 mm için 7 Hz ve 1 mm için 20 Hz şeklindedir. Donanıma entegre olarak bulunan hassas konum geribildirimini sağlayan LVDT sensörleri yardımıyla tablanın hareket aralığını tespit edilmektedir. Uygulamada kullanılan sarsma tablası Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1 Sarsma tablası

## 5.2 Test Prosedürü

Bir dizi saha testinin beşincisi olan uygulama öncesinde tasarlanan test prosedürü Çizelge 5.1’ de yer almaktadır. Bu amaçla 19 Ekim 2014 günü saat 11’de uygulama hazırlıkları tamamlanmış ve saha testlerine başlanmıştır. İlk olarak sarsma tablası üzerine Leica SP80 marka GPS alıcısı monte edilerek sırasıyla 1. uygulama olarak RTK GPS ölçümleri, VRS, FKP, MAC ve YLDZ ölçüm teknikleriyle gerçekleştirilmiştir. 2. uygulama olarak PPP-GPS ölçümleri, 7 farklı frekans ve genlikteki salınımlarda gerçekleştirilmiştir. 3. uygulama KPP-GPS tekniği için sarsma tablası üzerine monte edilmiş GPS verilerinin statik modda toplanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. 4. ve sonuncu uygulama ise TPS ölçümleridir. Bu amaçla sarsma tablası üzerine reflektör monte edilmiş LEİCA TPS1200 marka robotik total stationla reflektöre farklı frekans ve genliklerdeki salınımlarda 11 çeşit ölçüm yapılmıştır. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi ilk 4 veri grubu RTK-GPS ölçümleri ikinci 7 testlik ölçüm grubu PPP-GPS ölçümlerini, üçüncü veri grubu KPP-GPS ölçümlerini ve son 11 ölçümlük veri grubu ise TPS ölçümlerini göstermektedir. Ölçümler öncesinde sarsma tablası yaklaşık olarak kuzeye yönlendirilmiş ve koordinat değişimlerinin tek bir doğrultuda olması sağlanmaya çalışılmıştır. Hesaplanan genlik değerleri sarsma tablasının orta noktası referans alınarak hesaplanmıştır, bu nedenle belirlenen hareket hesaplanan genliklerin 2 katı olarak düşünülebilir.



Şekil 5.2 Test 5 LVDT referans ve ölçüm verisi

Çizelge 5. 1 Test 5 uygulama prosedürü

GNSS	Sarsma Tablası			Saat
	Hareketsiz	Hareketli (5 Hz)	Hareketsiz	
VRS 20 Hz	4 dakika	2 dakika	4 dakika	11.00-11.10
FKP 20 Hz	4 dakika	2 dakika	4 dakika	11.10-11.20
MAC 20 Hz	4 dakika	2 dakika	4 dakika	11.20-11.30
YLDZ 20Hz	4 dakika	2 dakika	4 dakika	11.30-11.40
GNSS	Sarsma Tablası			Saat
	Hareketsiz	Hareketli (0.2-5 Hz)	Hareketsiz	
PPP1 20Hz	4 dakika	2 dakika	-	11.55-12.01
PPP2 20Hz	-	2 dakika	-	12.01-12.03
PPP3 20Hz	-	2 dakika	-	12.03-12.05
PPP4 20Hz	-	2 dakika	-	12.05-12.07
PPP5 20Hz	-	2 dakika	-	12.07-12.09
PPP6 20Hz	-	2 dakika	-	12.09-12.11
PPP7 20Hz	-	2 dakika	4 dakika	12.11-12.17
GNSS	Sarsma Tablası			Saat
	Hareketsiz	Hareketli (0.25 Hz)	Hareketsiz	
KPP/PPP 1 Hz	30 dakika	10 dakika	5 dakika	13.00-13.45
Total Station	Sarsma Tablası			Saat
	Hareketsiz	Hareketli (0.25-0.5 Hz)	Hareketsiz	
TPS1 1 Hz	1 dakika	1 dakika	-	14.20-14.22
TPS2 1 Hz	1 dakika	1 dakika	-	14.22-14.23
TPS3 1 Hz	1 dakika	1 dakika	-	14.23-14.25
TPS4 1 Hz	1 dakika	1 dakika	-	14.25-14.27
TPS5-6 1 Hz	1 dakika	1 dakika	-	14.27-14.29
TPS7-8 1 Hz	1 dakika	1 dakika	-	14.29-14.31
TPS9-10 1 Hz	1 dakika	1 dakika	-	14.31-14.33
TPS11 1 Hz	1 dakika	1 dakika	1 dakika	14.33-14.36

### 5.2.1 RTK Ölçümleri Test Prosedürü

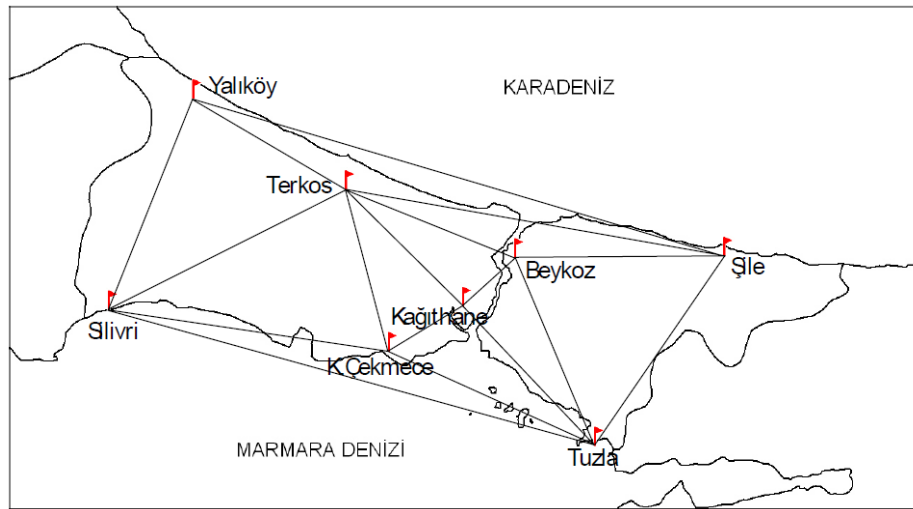
GPS ölçümlerine başlandığında ilk olarak RTK gerçek zamanlı konum belirleme tekniği kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Bölüm 3.5.2.7 de anlatıldığı üzere RTK konum belirleme yöntemi için farklı teknikler kullanılmaktadır ve bu tekniklerden hangisinin daha etkili sonuç verdiğini gözlemleyebilmek amacıyla RTK test prosedürü her bir yöntem için ayrı ayrı uygulanmıştır.

Ölçümlere VRS RTK ölçme yöntemiyle başlanmıştır ve ilk ve son 4 dakikası hareketsiz 2 dakikası hareketli olmak üzere toplam 10 dakika boyunca veri toplanmıştır. Tasarlanan ilk değerlerde sarsma tablasının hareket ettiği süre boyunca 5 Hz frekansıyla 20 mm genliğinde salınım yapılması istenmiştir. Bu ilk değerler sarsma tablasının salınım yapabilme kapasitesine göre değişmiştir. LVDT sonuçlarına ilişkin gerçek değerler Bölüm 5.3.1'de verilecektir. Ölçüm boyunca 20 Hz örnekleme frekansıyla veri aktarımı yapılmıştır. Daha sonra aynı prosedür sırasıyla FKP ve MAC ölçüm yöntemleri içinde uygulanmıştır. Bu üç yöntem boyunca İSKİ UKBS ağına bağlanılarak Ağ-RTK çözümleri son uygulamada ise YLDZ referans istasyonuna bağlanılarak Klasik-RTK çözümleri alınmıştır.

### 5.2.1.1 İSKİ UKBS Ağı

İSKİ-UKBS referans istasyonları ağı, öncelikle İSKİ'nin, İstanbul Büyükşehir Belediyesine ait birimlerin mekânsal tasarım, afet yönetimi, planlama ve kaynakların verimli olarak kullanılmasında gerekli coğrafi koordinat bilgisinin gerçek zamanda, ekonomik, hızlı ve duyarlı olarak elde edilmesi amacıyla kurulmuştur.

UKBS sistemi sekiz tane sabit referans istasyonundan oluşmaktadır (Şekil 5.3). İstasyonların yerlerinin belirlenmesinde İstanbul ili ve yakın çevresini kapsamı, iletişim altyapısının hazır olması ve tesis yerlerinin İSKİ işletmesi olması kriterleri göz önüne alınmıştır. Bunun yanında tasarımda istasyonlar arası mesafelerin ortalama 60 km olmasına dikkat edilmiştir (Gülal [103]).



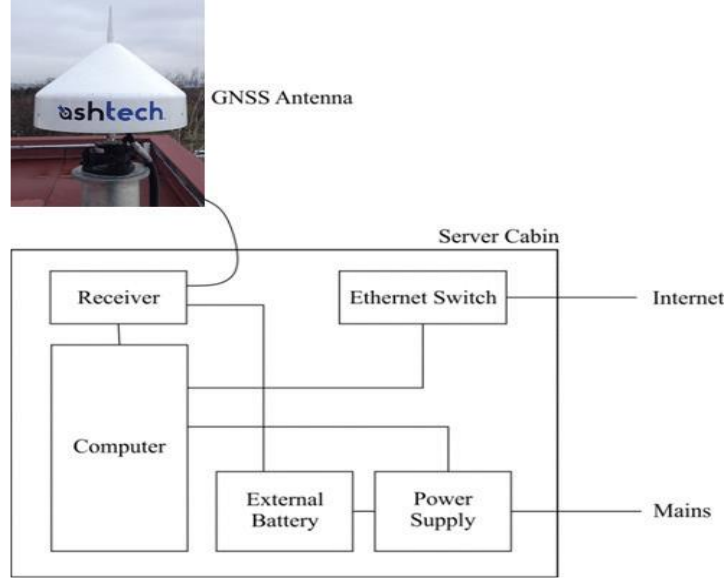
Şekil 5.3 UKBS referans istasyonları ağı [103]

İSKİ-UKBS sabit referans istasyonlarının hassas koordinatlarının iç doğruluğu ortalama 2 mm, dış doğruluğu ise ortalama 2 cm'dir. Bu sonuçlara göre UKBS ağı RTK uygulamalarında kadastro, mühendislik ölçmeleri navigasyon gibi çalışmalarda kullanılabilir doğruluktur (Gülal [103]).

#### **5.2.1.2 YLDZ Referans İstasyonu**

İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesi (YLDZ) ve Afyon, Afyon Kocatepe Üniversitesi (AFKU) referans istasyonları kendi üniversiteleri tarafından desteklenen iki araştırma projesini bir parçası olarak kurulmuştur. Bu iki istasyon, Türkiye'nin Güney Batı GNSS Geo-Sensör Ağı (GGNTR) referans istasyonlarının ilk düğümleri olarak planlanmıştır. Bu iki aktif istasyonun temel amacı yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi gibi RTK ve DGPS uygulamaları için GNSS düzeltmesi yaymak ve bu bölgelerdeki mühendislik uygulamaları için GNSS veri kaynağı olmaktır. Bu proje kapsamında yapılmış olan YLDZ istasyonu tarafından toplanan GNSS verileri sürekli olarak işlenip ve analiz edilmektedir bunun yanında kullanıcılar için otomatik olarak bir web sitesinde yayınlanmaktadır (Gülal vd. [104]).

Yıldız Teknik Üniversitesi GPS Referans İstasyonu (YLDZ) Temmuz 2012'den bu yana faaliyet göstermektedir. İstasyon İstanbul'da İnşaat Fakültesinin çatısına kurulmuştur (Şekil 5.4 ). İstasyonun çevresinde sinyal kalitesini etkileyecek herhangi bir fiziksel engel bulunmamaktadır. YLDZ referans istasyonunda Spectra Precision Ashtech Proflex 800 GNSS Alıcısı ve Aero Antenna AT 1675-120 SPKE Choke Ring GNSS Anteni kullanılmıştır. Proflex 800 konum belirlemede etkili ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Alıcının Z-Blade GNSS merkezli teknolojisi hızlı ve kararlı RTK çözümleri sunmak için (herhangi bir kümelenme olmadan) mevcut tüm GNSS sinyallerini eşit olarak kullanmaktadır. AT1675-120 Choke ring anteni her türlü kaynaktan gelebilecek çok yolluluk (multipath) sinyal hatasını çok iyi bir şekilde elimine edebilecek yeterlilik ve donanıma sahiptir. Bu nedenle cm altı (mm) hassasiyette ölçüm doğruluğu sağlamaktadır. YLDZ istasyonu Klasik RTK yöntemini kullanmaktadır (Gülal vd. [104]).



Şekil 5.4 Yıldız Teknik Üniversitesi GPS referans istasyonu (YLDZ) [104]

## 5.2.2 PPP Ölçümleri Test Prosedürü

GPS ölçümlerine PPP hassas konum belirleme tekniği ile veri toplayarak devam edilmiştir. Bölüm 3.5.1.1’de anlatıldığı üzere PPP yöntemi Real Time Kinematik (RTK) gibi yöntemlerden farklı olarak sabit istasyona ve eş zamanlı gözleme gereksinim duymamaktadır. Bu nedenle 20 Hz’lik örnekleme frekansı ile dört dakika hareketsiz ikişer dakikası hareketli olmak üzere toplamda 25 dakika statik modda RNX veri toplanmıştır. Daha sonra bu veriler online yazılım programlarının PPP modülleriyle analiz edilmiştir. Bu yazılımlardan GIPSY-OASIS yazılımını kullanan APPS ve NRCAN yazılımını kullanan CSRS-PPP yazılımının sonuçlarının tutarlı olduğu tespit edilmiştir. CSRS-PPP yazılımı ile elde edilen test verileri coğrafi koordinatlardan UTM Gauss-Kruger koordinatlara dönüştürülmüştür.

PPP ölçümlerinde sarsma tablasının hareketli olduğu ikişer dakikalık 7 farklı frekans ve genlikte uygulama yapılmıştır. Bu 7 farklı uygulamada sarsma tablasının 0.2 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz ve son olarak 5 Hz’lik frekanslarla salınım yapması istenmiştir. Bu uygulamaların LVDT sonuçlarına ilişkin gerçek değerler Bölüm 5.3.2’de verilecektir.

### 5.2.2.1 CSRS-PPP ONLINE SERVİSİ

Uygulamada kullanılan PPP ölçümlerinin değerlendirilmesi için Geodetic Survey Division of Natural Resource Canada (NRCAN) tarafından kurulmuş olan CSRS-PPP online servisi



kullanılmıştır. Bu servis 2003 yılında hizmete girmiş ve ücretsiz olarak hizmet sunan dünyada en yaygın olarak kullanılan servislerden birisidir. Online Servis, çift frekanslı alıcıyla toplanan verilerin mevcut ve kullanılabilir olması durumunda L1 ve L2 faz ve taşıyıcı faz ölçümlerini kullanarak yüksek doğruluk olanağı sunmaktadır. Fakat tek frekanslı veri olması veya diğerinin kullanılamaması halinde sadece L1 kod çözümünü uygulamaktadır.

Kullanıcıların uygulaması gereken prosedür servisin web sayfasını kullanarak değerlendirilmek istenen RINEX formatındaki veri dosyasını sisteme yüklemek, statik ve ya kinematik olarak değerlendirmek istediği ölçme modunu, referans sistemini seçmek ve sonuçların gönderilebilmesi için bir email adresini girmektir [105].

Servise girdikten sonra verileri değerlendirebilmek için sisteme üyelik yapılarak online proses sayfasına girilmesi gerekmektedir. Daha sonra PPP sayfasına ulaşılarak veriler RINEX dosyası ASCII formatında veya zip (.zip), gzip (.gz), (.Z) UNIX sıkıştırma formatlarında sisteme yüklenmelidir. Çözüm için ölçüm tipi statik veya kinematik olarak ve referans sistem ise NAD83 veya ITRF olarak seçilmelidir. Veriler değerlendirildikten sonra sonuç dosyası mail adresine iletilmektedir. Sonuç dosyası olarak .pos, .sum uzantılı sonuç verileri ve tüm sonuç verilerinin daha anlaşılır grafiklerle gösterildiği .pdf uzantılı dosya gönderilir. Bu dosyada genel olarak ölçüm süreleri, yaklaşık koordinatlar, istasyon bilgileri, uydu hareketlerini gösteren grafik, yaklaşık nokta düzeltmelerini gösteren grafik, troposferik gecikme grafiği, enlem, boylam ve elipsoidal yüksekliğin zamana göre değişim grafikleri, istasyon saat hataları grafiği, başlangıç tamsayı belirsizliği (ambiguity) grafiği, kod ve taşıyıcı faz gözlemleri grafikleridir. İstasyon kesin Kartezyen koordinatları (NAD83 veya ITRF referans sisteminde) .sum uzantılı dosyadan alınmaktadır [106].

### **5.2.3 KPP Ölçümleri Test Prosedürü**

GPS ölçümlerine KPP kinematik konum belirleme tekniği ile veri toplayarak devam edilmiştir. Bölüm 3.5.2.5 de anlatıldığı üzere KPP yöntemi için hareketli alıcının dışında koordinatları bilinen referans istasyonunda sürekli gözlem yapan sabit alıcılar da gereklidir. Bu nedenle saniyede bir ölçü olacak şekilde 1 Hz'lik veri statik modda ilk 30 ve son 5 dakikası hareketsiz, 10 dakikası hareketli olmak üzere toplamda 45 dakika boyunca

toplanmıştır. Kinematik Post Process için toplanan RNX veri GAMIT/GLOBK yazılımının TRACK modülünde değerlendirilmek üzere depolanmıştır.

Koordinatları bilinen referans istasyonunda sürekli gözlem yapan sabit alıcılardan biri İnşaat Fakültesi çatısında kurulu olan Bölüm 5.2.1.2'de anlatılan YLDZ alıcısı olarak seçilmiş, iki adet Thales marka GPS alıcısı ise sarsma tablasının yakınlara kurularak saniyelik veri toplanması istenmiştir.

Tasarlanan ilk değerlerde sarsma tablasının hareket ettiği süre boyunca 0.25 Hz frekansla 20 mm genişliğinde salınım yapılması istenmiştir. Bu ilk değerler sarsma tablasının salınım yapabilme kapasitesine göre değişmiştir ve LVDT sonuçlarına ilişkin gerçek değerler Bölüm 5.3.3'de verilecektir.

### **5.2.3.1 GAMIT/GLOBK Yazılımı – TRACK Değerlendirme Modülü**

GAMIT/GLOBK, MIT'de geliştirilen kapsamlı bir yazılım paketi olup temel olarak GAMIT ve GLOBK olmak üzere iki ayrı akademik yazılım sunmaktadır. GAMIT yazılımı pseudorange değerlerini ve taşıyıcı dalga faz ölçümlerini kullanarak üç boyutlu koordinatların, atmosferik gecikmelerin, uydu yörüngelerinin ve Dünya dönüklük parametrelerinin kestirimini yapabilmektedir (Tiryakioğlu vd. [107]). Yazılımının veri değerlendirirken kullandığı modeller ay ve güneş yörünge bilgileri, atmosferik modeller, IGS istasyonlarına ait alıcı yükseklik ve tipi okyanus ve atmosferik yükleme, gelgit gibi bütün bilgiler yazılımın kütüphanesinde tanımlı olarak yer almaktadır [108].

TRACK GAMIT yazılımının Kinematik GPS değerlendirme modülüdür. Yöntem GPS noktasının hareket ettiği ölçüm tipleri için kullanılmaktadır. Bu tür pek çok programın aksine, sistem işleme başlamadan önce tüm verileri okur. Bu modülde kullanılan sabit istasyonların hareketli alıcıya olan mesafeleri 10 km'den düşükse hassas çözümler elde edilebilmektedir. Kısa ara mesafeler (<10 km) için, iyonosferik gecikme 0 sıfır olarak alınarak L1 ve L2 belirsizlikleri ayrı ayrı çözülebilmektedir. Konumlama için L1 ve L2 ayrı ayrı kullanılabilir buda rastlantısal gürültüleri azaltmaktadır [109].

TRACK modülü, L1-L2'yi çözmek için Melbourne-Wubena Wide Lane gözlem eşitliklerini kullanır ve daha sonra L1 ve L2 döngülerini ayrı ayrı belirleyebilmek için bir dizi teknik kombinasyon kullanmaktadır [109].

#### **5.2.4 TPS Ölçümleri Test Prosedürü**

Robotik Total Stationların Yapı Sağlığı İzlenmesi çalışmalarında kullanılıp kullanılmayacağını tespit edebilmek amacıyla sarsma tablası üzerine reflektör monte edilip çeşitli genlik ve frekanslarda hareket ettirilerek Leica TPS1200 marka Total Stationla mesafe ve açı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hedef robotik Total Stationa tanımlanarak hedefi otomatik olarak yakalayabilmesi ve ölçümlerin operatörsüz olarak gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Sarsma Tablası farklı frekans ve genliklerde hareket ettirilerek Total Stationın salınımı yakalayıp yakalayamadığı test edilmiştir. Bu amaçla 0.25 Hz ve 0.50 Hz frekansları arasında toplamda 8 farklı frekans ve genlikle TPS ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm verileri polar 1 Hz örnekleme frekansı ile toplanmıştır. Bu uygulamaların LVDT sonuçlarına ilişkin gerçek değerler Bölüm 5.3.4’de verilecektir.

#### **5.3 Verilerin Düzenlenmesi ve Zaman Serileri Analizi ile Değerlendirilmesi**

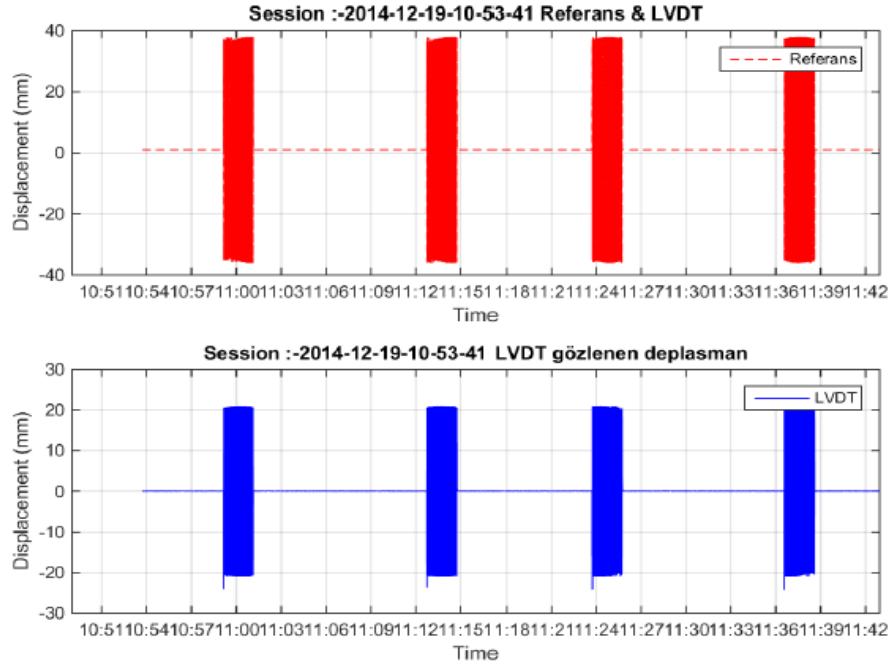
Saha testleriyle elde edilen verilerin yorumlanabilmesi amacıyla uygulamaların her birine Bölüm 4’te anlatılan zaman serileri analizi işlemleri uygulanmıştır. Bu amaçla ilk olarak verilerin koordinat dönüşümleri MATLAB programıyla hazırlanmış bir dönüşüm programı ile coğrafi koordinatlardan UTM Gauss Kruger koordinatlara dönüştürülmüş ve Office Microsoft Excel programına aktararak koordinatların zamana bağlı grafikleri oluşturulmuştur. Sarsma tablasının hareketli olduğu zamandaki veriler ayrı olarak değerlendirilerek tablanın orta noktasının koordinatları referans değeri olarak alınmış ve tüm noktaların bu değere göre koordinat farkları oluşturulmuştur. Daha sonra bu veriler MATLAB programına aktarılmış ve Bölüm 4,3’te anlatılan Hızlı Fourier Dönüşümü uygulayabilmek amacıyla bir program oluşturulmuştur. Oluşturulan programın doğruluğu genlik ve frekansı bilinen bir test veri setiyle kontrol edilerek doğruluğu teyit edildikten sonra her bir uygulama türü için bu prosedür uygulanmıştır.

Zaman serileri kuzey ve doğu yönlerindeki hareketlere göre ayrı ayrı oluşturulmuştur. Fakat ölçümler öncesinde sarsma tablası kuzeye yönlendirildiği için hesaplanan kuzey yönlü genlik ve frekans değerlerinin sonuç doğruluğuna etki etmeyecek kadar küçük

olduğu tespit edildiğinden yalnız doğu yönlü ölçüm sonuçlarına ilişkin sonuçlar verilmiştir.

### 5.3.1 RTK Ölçüm Verileri

RTK verileri 20 Hz örnekleme aralığıyla toplanmıştır ve veri kaybı yaşanmaması için NMEA formatındaki veriler direk olarak bilgisayara aktarılmıştır. VRS, FKP, MAC ve YLDZ istasyonlarında verilerin her biri için coğrafi koordinatlardan, UTM Gauss Kruger koordinatlara dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Her bir yöntem için ayrı ayrı olarak Bölüm 3'te anlatılan zaman serileri işlemleri uygulanmıştır. Sırasıyla VRS, FKP, MAC ve YLDZ yöntemlerine ilişkin LVDT referans ve gözlenen deplasman değerleri Şekil 5.5'de gösterilmiştir.

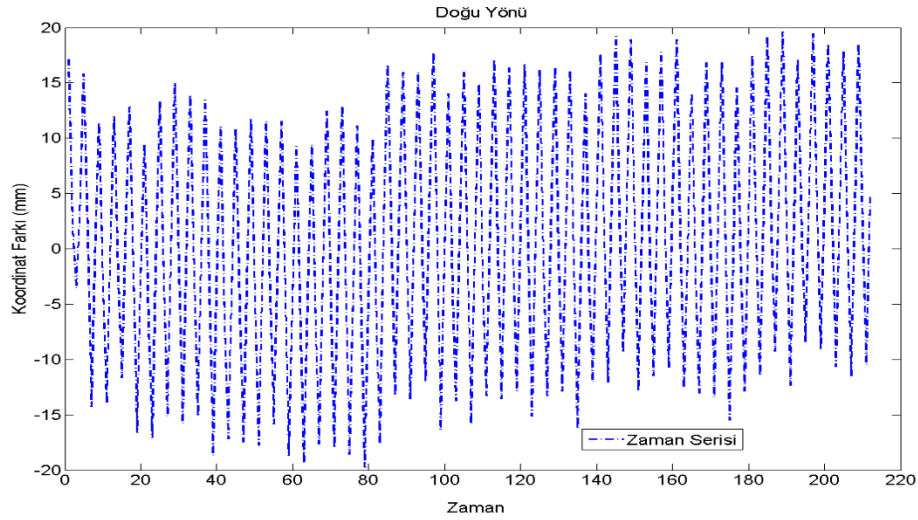


Şekil 5.5 RTK-GPS yöntemi LVDT gözlemleri

#### 5.3.1.1 VRS Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

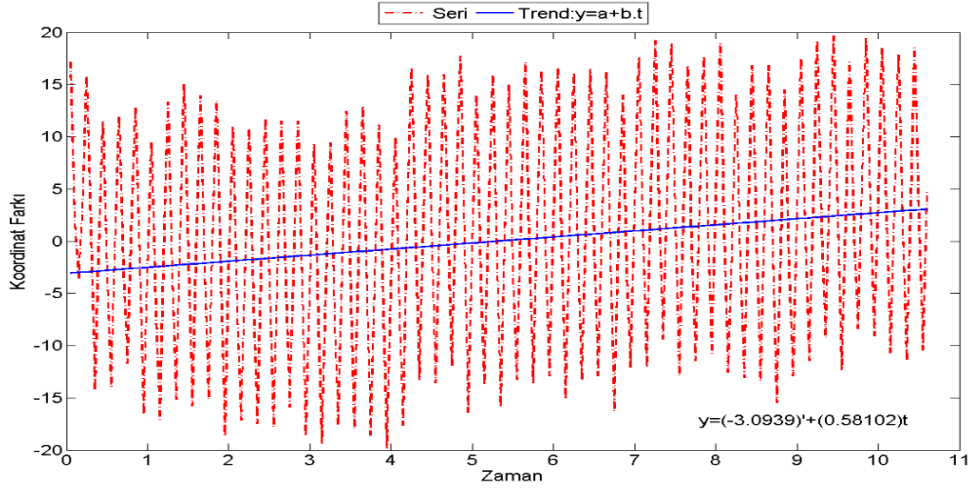
Zaman serilerinin analizinde ilk olarak serilerin zamana bağlı grafiklerinin oluşturulması gerektiğinden UTM Gauss Kruger koordinatlarına dönüştürülmüş VRS GPS verisi analiz edilmiştir. Sarsma tablasının orta noktasının koordinatları referans değeri alınarak tüm noktaların bu değere göre koordinat farkları oluşturulmuş ve oluşan zaman serisinin incelemesi yapılmıştır. Kuzey ve doğu yönlerindeki hareketlere göre ayrı ayrı iki zaman

serisi oluşturulmuştur. Fakat ölçümler öncesinde sarsma tablası kuzeye yönlendirildiği için hesaplanan kuzey yönlü genlik ve frekans değerlerinin sonuç doğruluğuna etki etmeyecek kadar küçük olduğu tespit edildiğinden yalnız doğu yönlü ölçüm sonuçlarına ilişkin sonuçlar verilmiştir. Sarsma tablasının hareketli olduğu zamana ilişkin GPS verisinin doğu yönlü koordinat farklarının zamana bağlı grafiği Şekil 5.6’da verilmiştir.

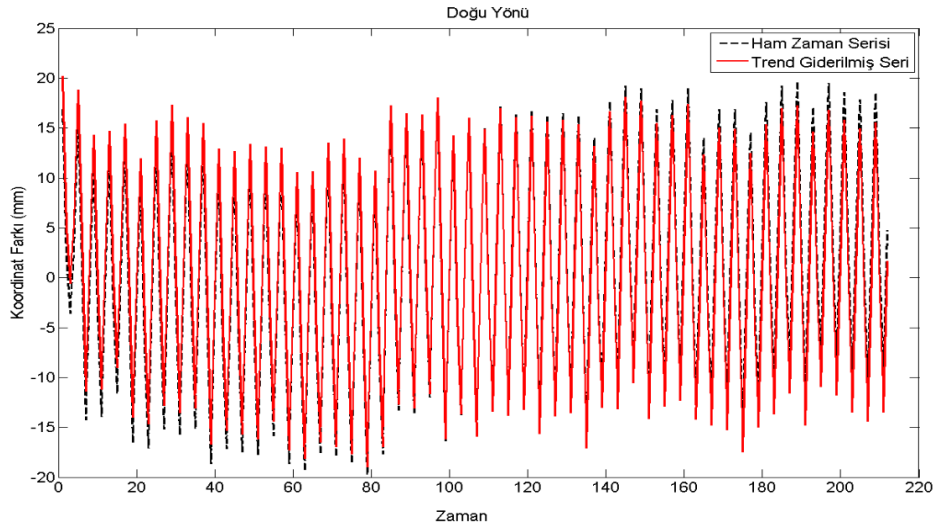


Şekil 5.6 VRS yöntemi doğu yönündeki zaman serisi

Serinin zamana bağlı grafiğinin oluşturulmasından sonra bu serileri Bölüm 4.1’de anlatılan trend bileşeninin belirlenerek seriden giderilmesi işlemi uygulanmıştır. Bu bileşenin seriden ayrıştırılması için Bölüm 4.1.3’de anlatılan en küçük kareler yöntemi ile zamana bağlı olarak uydurulan bir doğru  $Y_t = a + b_t$  denklemi ile elde edilmiştir. Denklemin katsayıları Bölüm 4.1.2’de anlatılan regresyon analizi ile hesaplanmıştır. 4.6l eşitliği yardımıyla VRS ölçüm yöntemine ait katsayılar  $a = -3.0939$  mm ve  $b = 0.58102$  mm olarak belirlenmiş ve serinin trendi Şekil 5.7’deki şekilde belirlenmiştir.  $Y_t$  ile belirlenen trendin ölçümlerden çıkarılmasıyla trend giderilmiş serisinin grafiği oluşturulmuştur(Şekil 5.8 ).

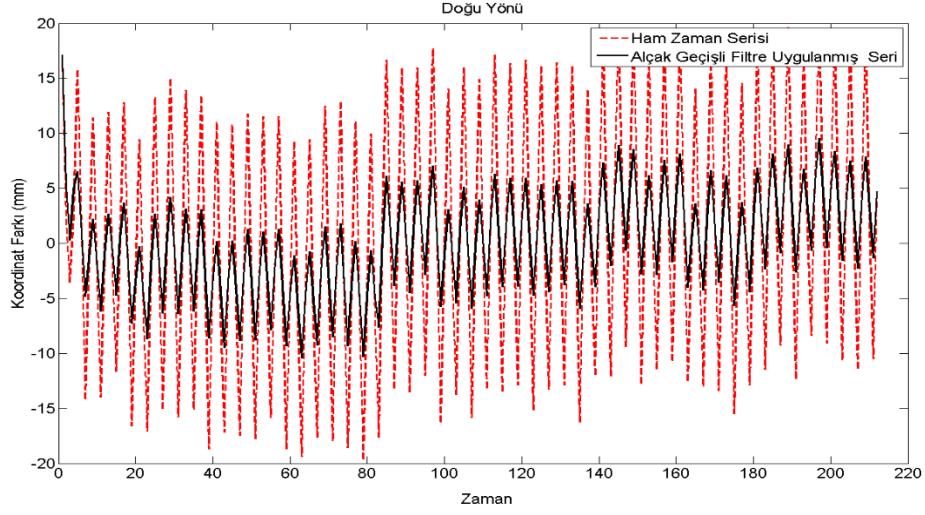


Şekil 5.7 VRS yöntemi doğu yönündeki zaman serisi lineer trend bileşeni



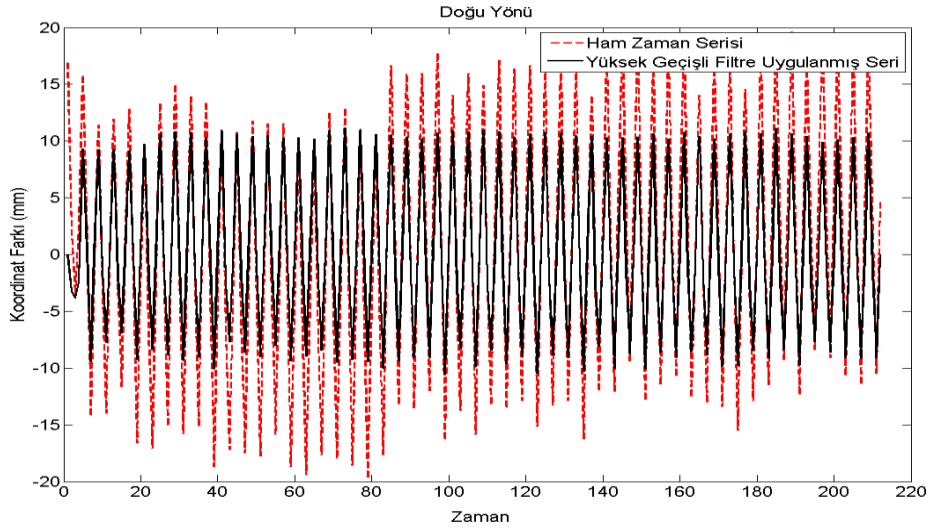
Şekil 5.8 VRS yöntemi doğu yönündeki trend giderilmiş zaman serisi

Trend bileşeninin ölçümlerden giderilmesinden sonra Bölüm 4.2.1'de anlatılan sinyallerin zaman bölgesinde filtrelenmesi işlemleri uygulanmıştır. Doğu yönündeki verilerin zaman serilerinde var olan alçak-frekansların belirlenebilmesi için kayan ağırlıklı ortalamalar yöntemi ile 3. dereceden alçak-geçişli bir filtreleme uygulanmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 VRS yöntemi doğu yönü alçak geçişli filtre uygulanmış seri

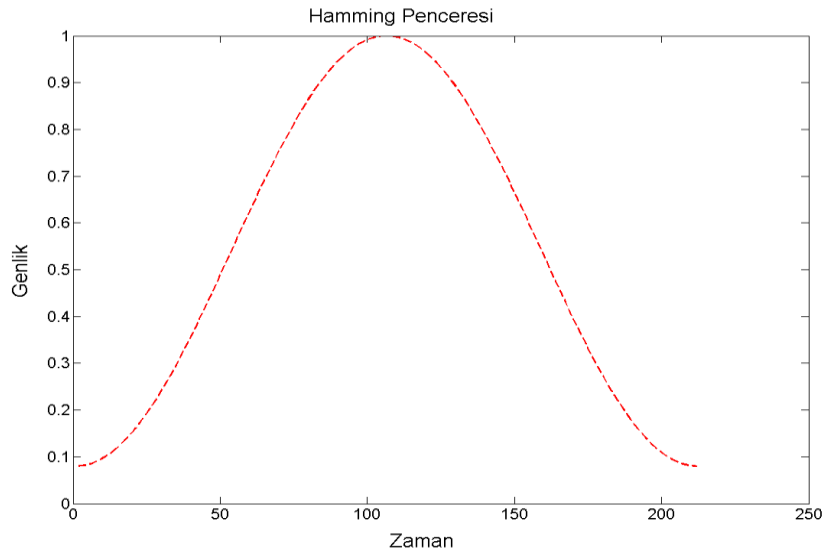
Zaman serisinin yüksek frekanslarının da belirlenebilmesi için doğu yönündeki farkların zaman serilerine 1. dereceden fark alma yöntemi uygulanmış ve böylece serilerin Bölüm 4.2.1’de anlatılan yüksek geçişli bir filtreden geçişi sağlanmıştır (Şekil 5.10). Zaman serilerinde yapılan bu filtreler ile serilerde var olan gürültü bileşenleri giderilmiştir.



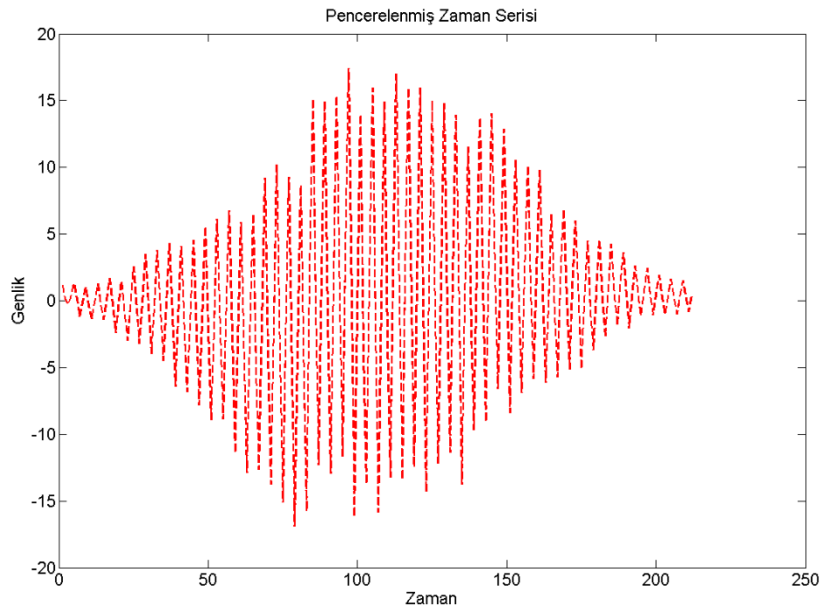
Şekil 5.10 VRS yöntemi doğu yönü yüksek geçişli filtre uygulanmış seri

Zaman serilerinin frekans bölgesine geçişlerini sağlamak üzere yapılan Hızlı Fourier Dönüşümü öncesinde sinyallerin Bölüm 4.3.1’de anlatıldığı gibi HFD sonucu meydana gelen spektral sızmanın etkisini azaltmak için pencerelemesi gerekmektedir. Bu

nedenle filtreleme işlemlerinden sonra doğu yönündeki farkların zaman serileri, HFD öncesi 4.10 eşitliği ile tanımlanan Hanning Fonksiyonu ile çarpılmıştır (Şekil 5.11, 5.12) .



Şekil 5.11 VRS yöntemi doğu yönündeki seriye uygulanan Hanning Penceresi



Şekil 5.12 VRS yöntemi doğu yönü pencerelenmiş zaman serisi

Serilere pencereleme işleminin de yapılmasıyla zaman serilerinin frekans bölgesindeki analizlerine geçilmiştir. Çünkü yapısal dinamik davranışların incelenmesinde sadece zaman alanındaki genlik-zaman ilişkisini yansıtan serileri incelemek yeterli olmamaktadır. Doğal frekanslarının belirlenmesi sinyalin içerdiği frekans bilgisi ile

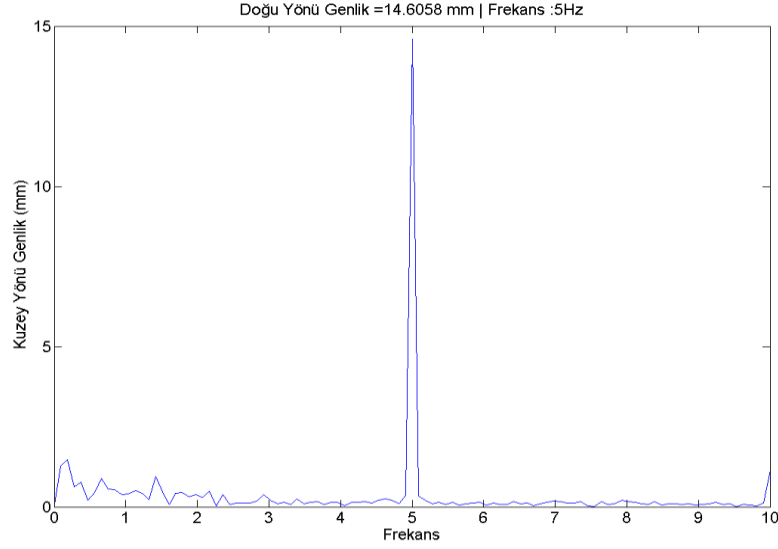


mümkün olmaktadır. Bir zaman-genlik gösterimini seride periyodik bir yapının olup olmadığını sezgisel olarak gösterebilmektedir fakat bu periyodik hareketin genlik ve frekansının sayısal olarak belirlenmesi harmonik analiz veya frekans bölgesinde spektral analiz yapılmasını gerektirmektedir. Bu amaçla, pencerelenmiş zaman serilerinin frekans spektrumları Bölüm 4.32’de anlatılan Hızlı Fourier dönüşümü yöntemi ile frekans alanında incelenmiştir. Bu amaçla zaman serilerine 4.14 eşitliği uygulanmış ve HFD gerçekleştirilmiştir. Daha sonra da HFD sonucu elde edilen karmaşık sayılardan 4.18, 4.19 ve 4.20 eşitliği ile güç spektrumları ve genlikleri hesaplanmıştır. GPS ile toplanan verilerin  $f_s$  örnekleme frekansı 20 Hz olarak seçilmiştir. Bunun nedeni bölüm 4.3.2 de anlatılan Nyquist kriterinin gerektirdiği  $f_s/2$  değeri olan 10Hz e kadar olan salınımları belirleyebilmektir. Analizlerde dikkate alınan frekans aralığı ise VRS -RTK teknikleri için 0 - 10 Hz arasındadır. Böylece, frekans bölgesinde yapılan analizlerle sarsma tablasıyla yaratılmaya çalışılan titreşimler frekans bileşenleri ile tanımlanmaya çalışılmıştır. Şekil 5.13’de 0 – 10 Hz arasındaki frekanslar ve karşılık gelen genlik değerleri görülebilmektedir.

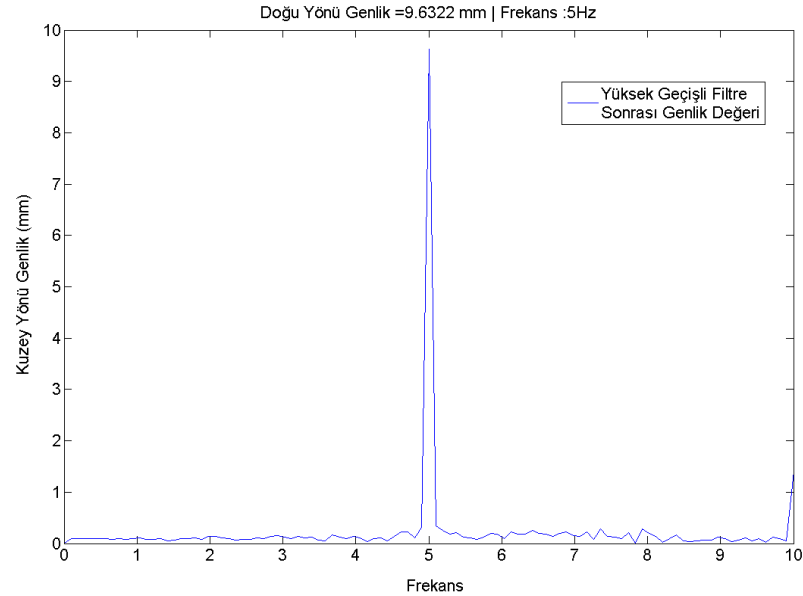
Sarsma tablasının hassas konum geribildirimini sağlayan LVDT sensöründen alınan RTK-VRS ölçümlerine ait verilere de birebir aynı prosedürler uygulanarak (LVDT verileri için örnekleme frekansı 50 Hz’dir) genlik ve frekansları belirlenmiştir. LVDT ölçüm doğruluğu çok yüksek olduğu için bu sonuçlardan hesaplanan frekans ve genlik değerleri doğru kabul edilerek GPS ölçümlerinden hesaplanan genlik ve frekanslarla karşılaştırılmış ve ölçüm yöntemlerinin frekans ve genliği ne ölçüde tespit edebildikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

FFT sonucu genlik ve frekanslar incelendiğinde filtreleme ve pencereleme işlemlerinin gerçek frekans değerini etkilemediğini fakat genlik değerinde farklılıklar meydana getirdiği görülmektedir. Bunun nedeni filtreleme algoritmalarının test verisini bastırması ve beklenen genliğin altında bir değer oluşturmasıdır. Filtreleme ve pencereleme algoritmalarının hem GPS hem de LVDT verilerine uygulanmasıyla elde edilen genlik ve frekans farklarının uygulanmadığı durumlardaki farklara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Her bir filtreleme ve pencereleme sonrası elde edilen farklar Ek-A’da yer almaktadır. Sonuçların daha gerçekçi olması adına bu ve bundan sonraki uygulamalar için frekans ve genlikler belirlenirken pencereleme ve filtreleme algoritmaları

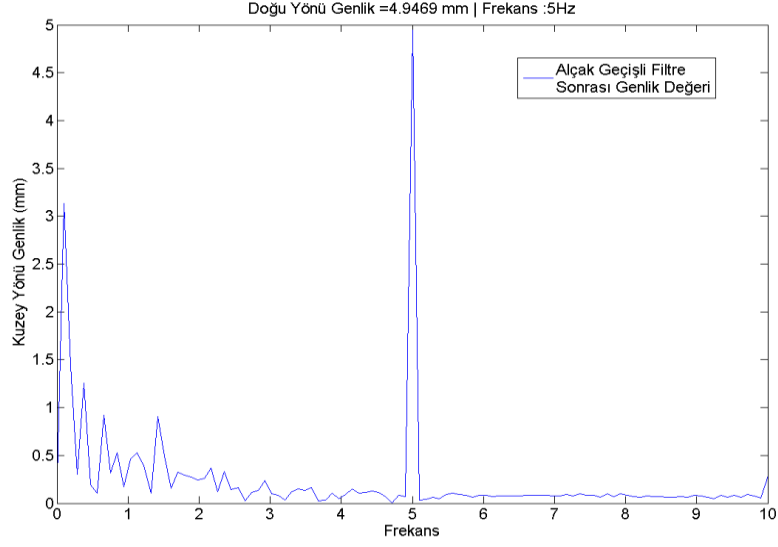
uygulanmamıştır. Bu algoritmaların genlik değerini ne kadar değiştirdiğini belirleyebilmek adına yüksek geçiş, alçak geçiş filtreleme ve Hanning pencereleme fonksiyonları verilere ayrı ayrı uygulanarak genlik ve frekans değerleri hesaplanmıştır. Bunun sonucunda Şekil 5.14, 5.15 ve Şekil 5.16'ya bakılırsa serilerin genliklerinde yüksek geçişli filtreleme ile yaklaşık 5 mm, 3. dereceden alçak geçişli filtreleme ile yaklaşık 10 mm ve Hanning Pencereleme ile yaklaşık 7 mm'lik bir azalma olduğu görülmektedir.



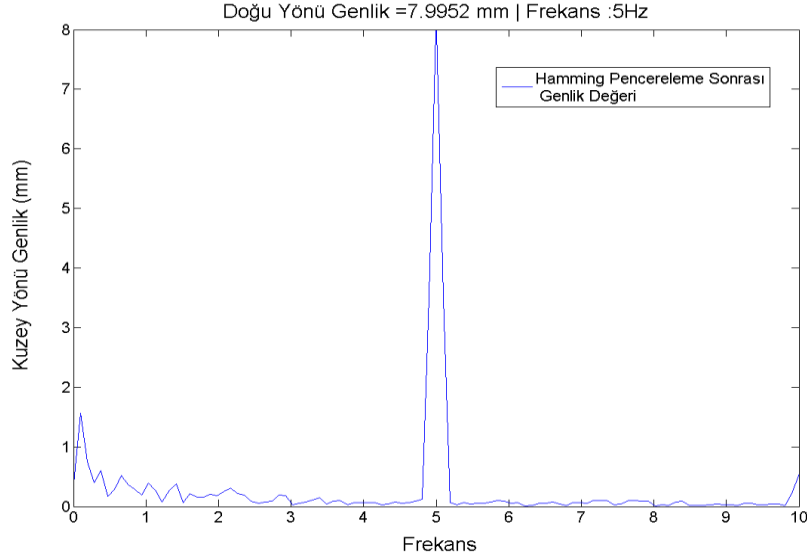
Şekil 5.13 VRS yöntemi filtre ve pencerelemesiz genlik ve frekans değerleri



Şekil 5.14 VRS Yöntemi yüksek geçişli filtre uygulanmış genlik ve frekans değerleri



Şekil 5.15 VRS yöntemi alçak geçişli filtre uygulanmış genlik ve frekans değerleri

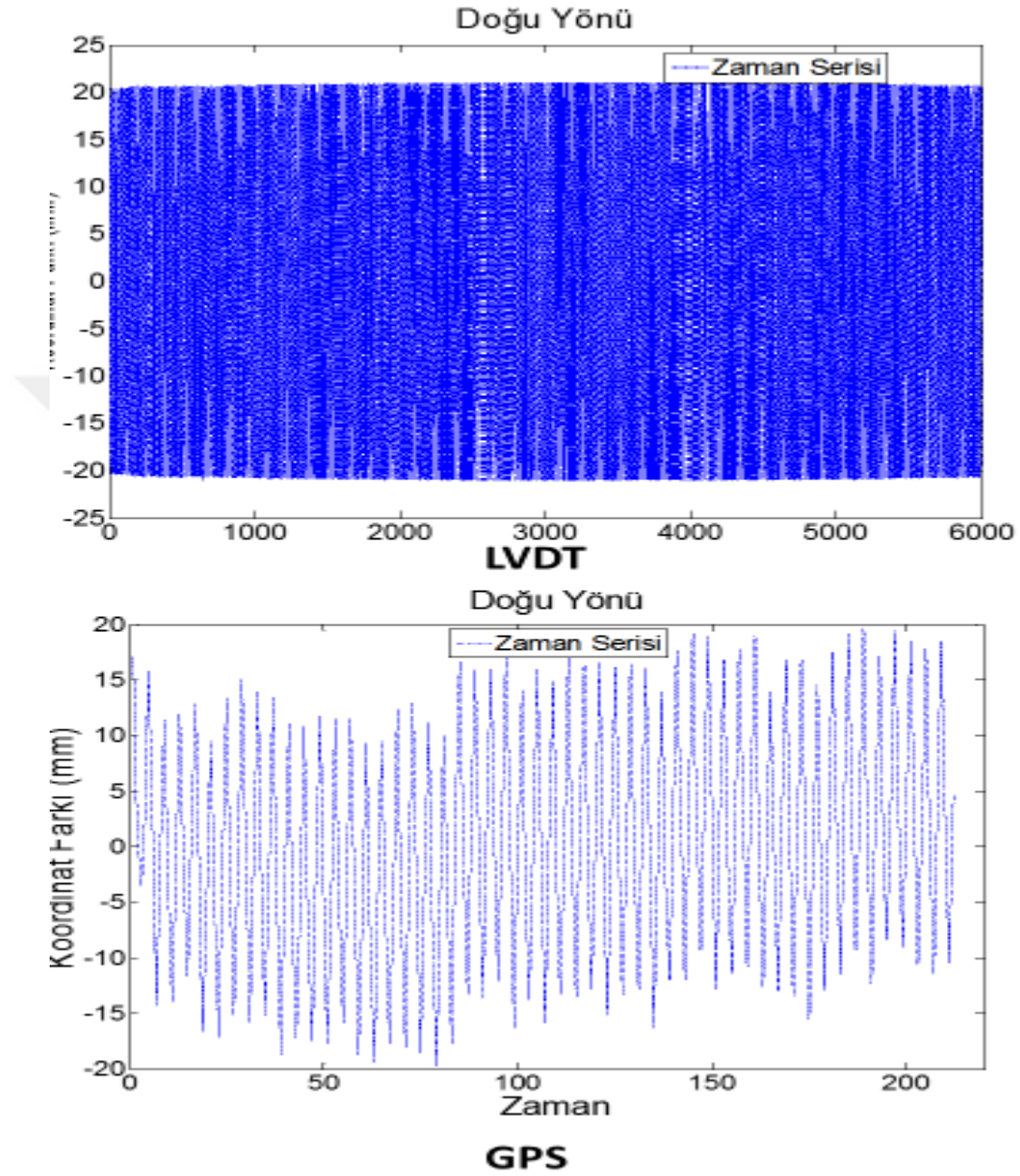


Şekil 5.16 VRS yöntemi Hanning pencereleme uygulanmış genlik ve frekans değerleri

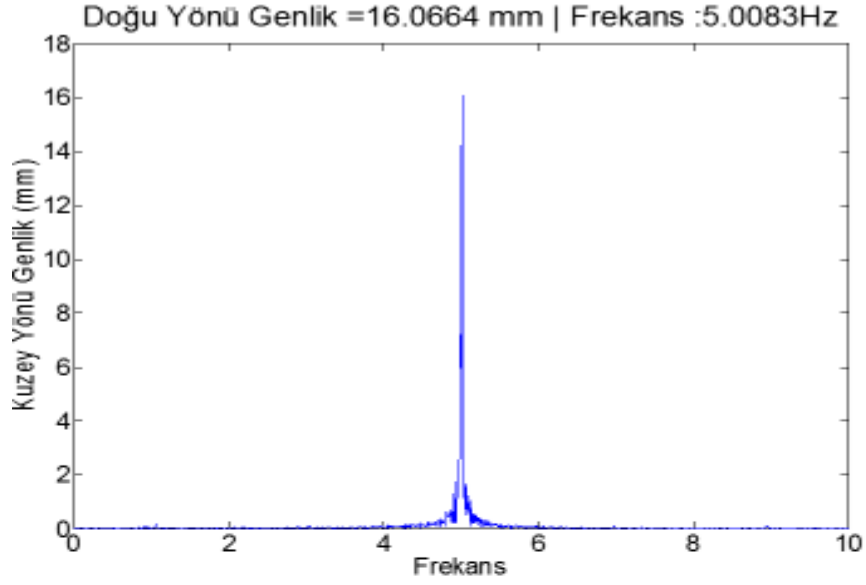
Şekil 5.13 incelendiğinde 0-3 Hz düşük frekans bölgesinde sızramaların olduğu görülmektedir. Bu frekans bölgesindeki hareketliliğin sebebi GPS sinyalinin çok yolluluk hatasından veya sinyallerdeki gürültülerden kaynaklandığı öngörülebilmektedir çünkü Şekil (5.14) incelendiğinde yüksek geçişli filtre ile bu dalgalanmanın bastırıldığı görülebilmektedir.

LVDT VRS yöntemine ilişkin zaman serileri grafiği GPS verilerinin zaman serileriyle karşılaştırılmıştır Şekil (5.17, 5.18). Her iki veri grubu için HFD dönüşümler sonucunda 5 Hz frekans tespit edilmiştir. LVDT sonuçlarına göre hareketin genliği 16.07 mm olarak

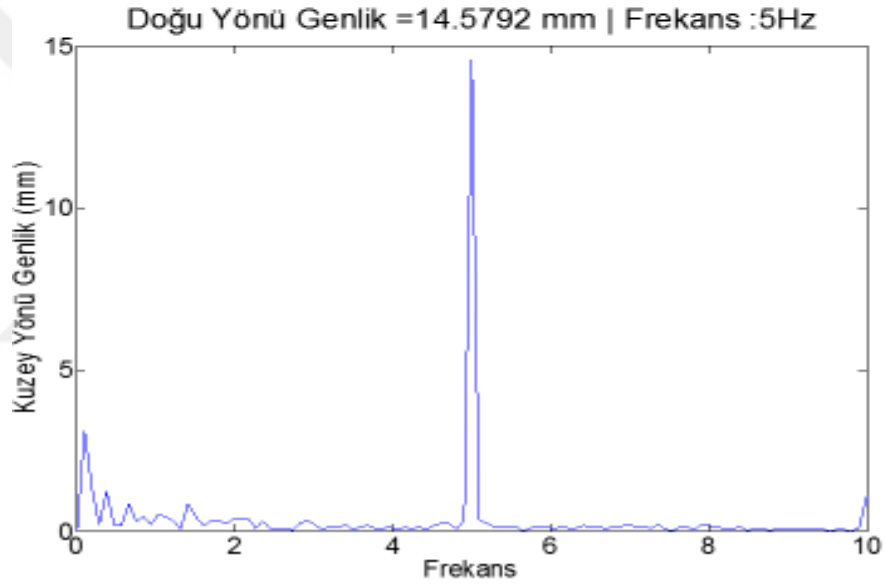
tespit edilmiş GPS verilerinin analizinde ise bu değer 14.61 mm olarak bulunmuştur ve bu değerler arasındaki fark 1.46 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere ilişkin sonuçlar Bölüm 5.3.1.5 de irdelenecektir.



Şekil 5. 17 VRS yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması



**LVDT**



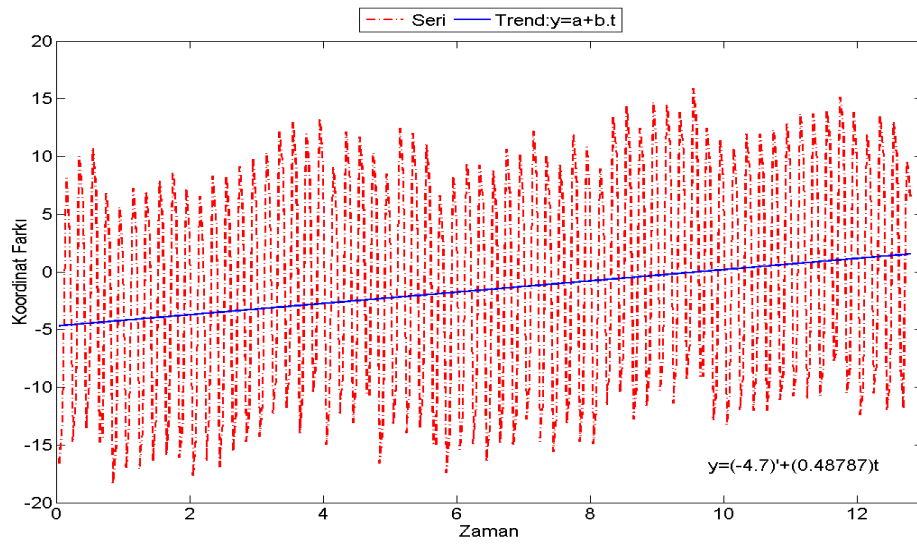
**GPS**

Şekil 5.18 VRS yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması

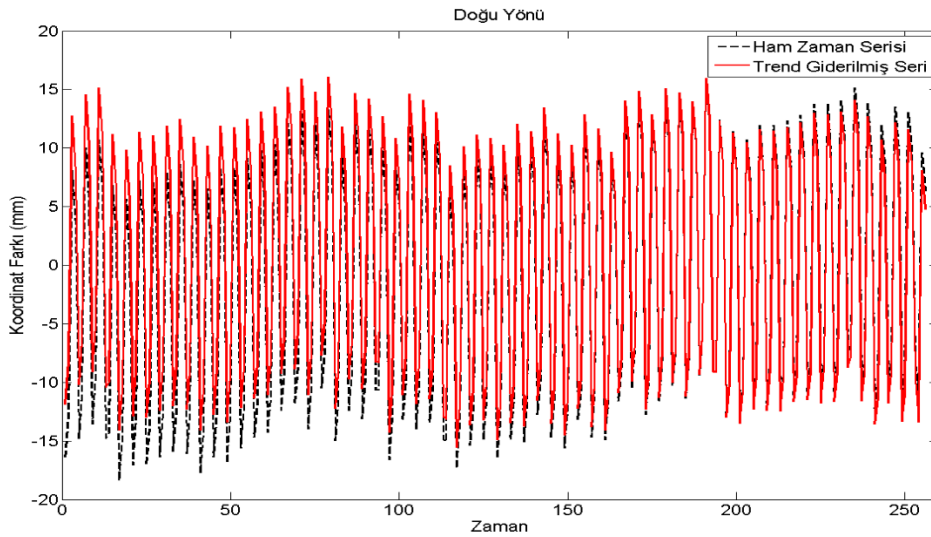
### 5.3.1.2 FKP Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

FKP ölçümlerine ilişkin GPS verilerine VRS yöntemiyle uygulanan prosedürle, zaman serileri analizi ve HFD işlemleri uygulanmış Bölüm 5.3.1.1'de örnekleriyle aktarıldığı üzere filtreleme ve pencereleme işlemlerinin genlik değerlerinin gerçekçiliğini değiştirmesi nedeniyle bu işlemler uygulanmadan genlik ve frekans değerlerinin belirlenmesi yapılmıştır.

FKP verilerine ilişkin zaman serileri oluşturulduktan sonra seriden trend bileşeninin ayrıştırılması için Bölüm 4.1.3’de anlatılan en küçük kareler yöntemi ile zamana bağlı olarak uydurulan bir doğru  $Y_t = a + bt$  denklemi ile elde edilmiştir. Denklemin katsayıları Bölüm 4.1.2’de anlatılan regresyon analizi ile hesaplanmıştır. 4.6 numaralı eşitlik yardımıyla VRS ölçüm yöntemine ait katsayılar  $a = -4.7$  mm ve  $b = 0.5$  mm olarak belirlenmiş ve serinin trendi Şekil 5.19’da gösterilmiştir.  $Y_t$  ile belirlenen trendin ölçümlerden çıkarılmasıyla trend giderilmiş seri grafiği oluşturulmuştur (Şekil 5.20).

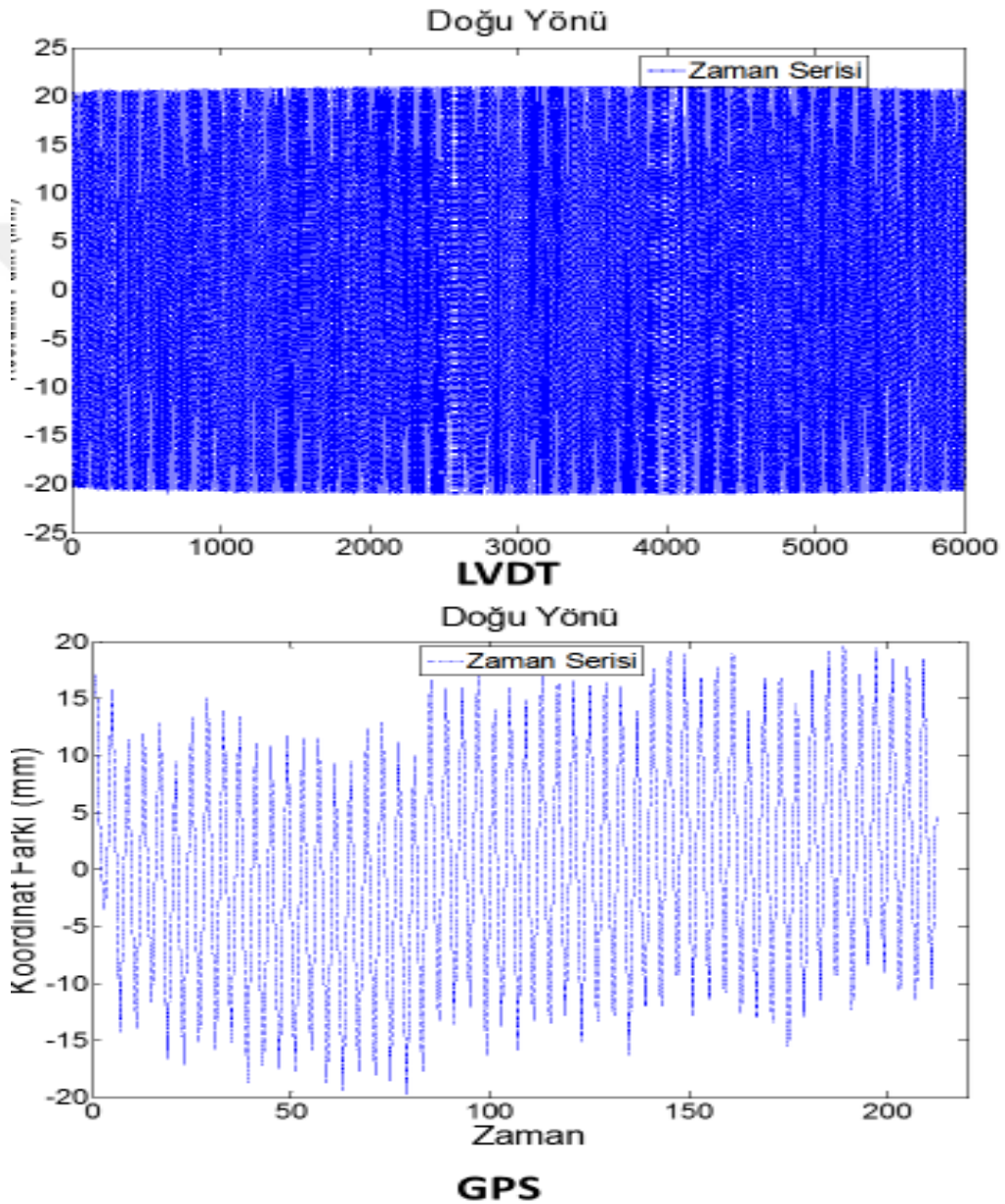


Şekil 5.19 FKP yöntemi Doğu yönündeki zaman serisi lineer trend bileşeni

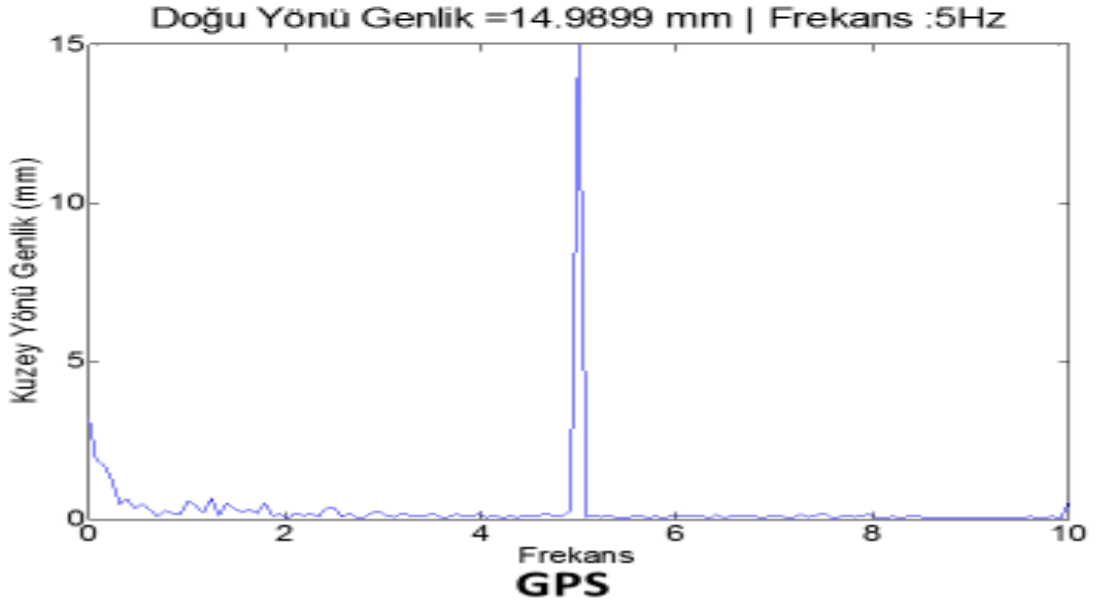
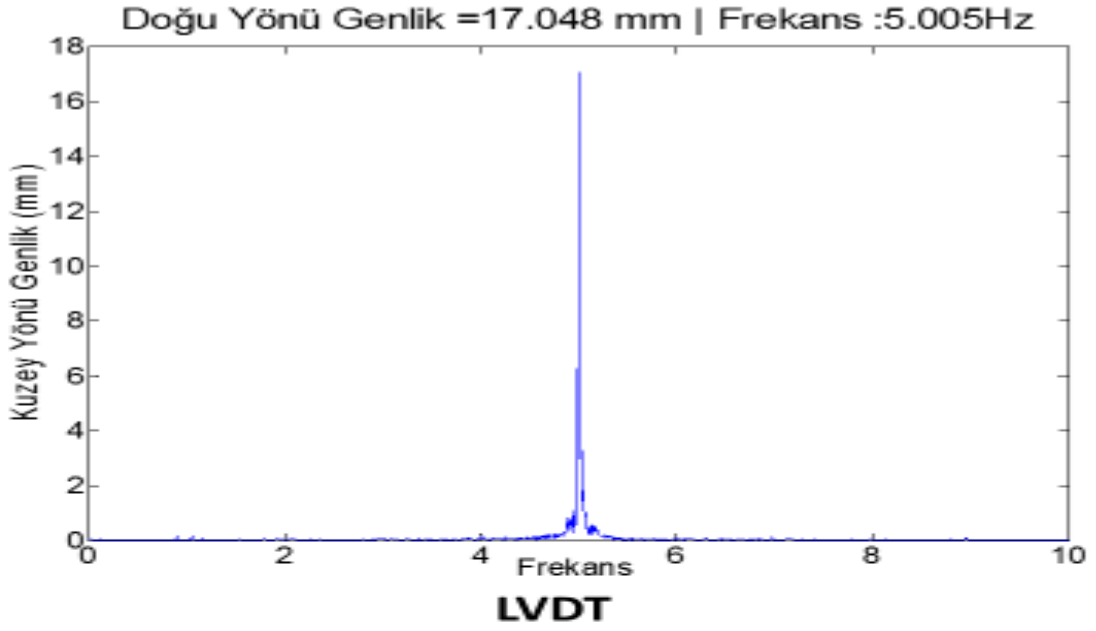


Şekil 5.20 FKP yöntemi doğu yönündeki trend giderilmiş zaman serisi

LVDT FKP yöntemine ilişkin zaman serileri grafiği GPS verilerinin zaman serileriyle karşılaştırılmıştır( Şekil 5.21). Her iki veri grubu için yapılan HFD sonucunda 5 Hz frekans tespit edilmiştir. LVDT sonuçlarına göre hareketin genliği 17 mm olarak tespit edilmiş GPS verilerinin analizinde ise bu değer 15 mm olarak bulunmuştur ve bu değerler arasındaki fark 2 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere ilişkin sonuçlar Bölüm 5.3.1.5’de irdelenecektir.



Şekil 5.21 FKP yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması



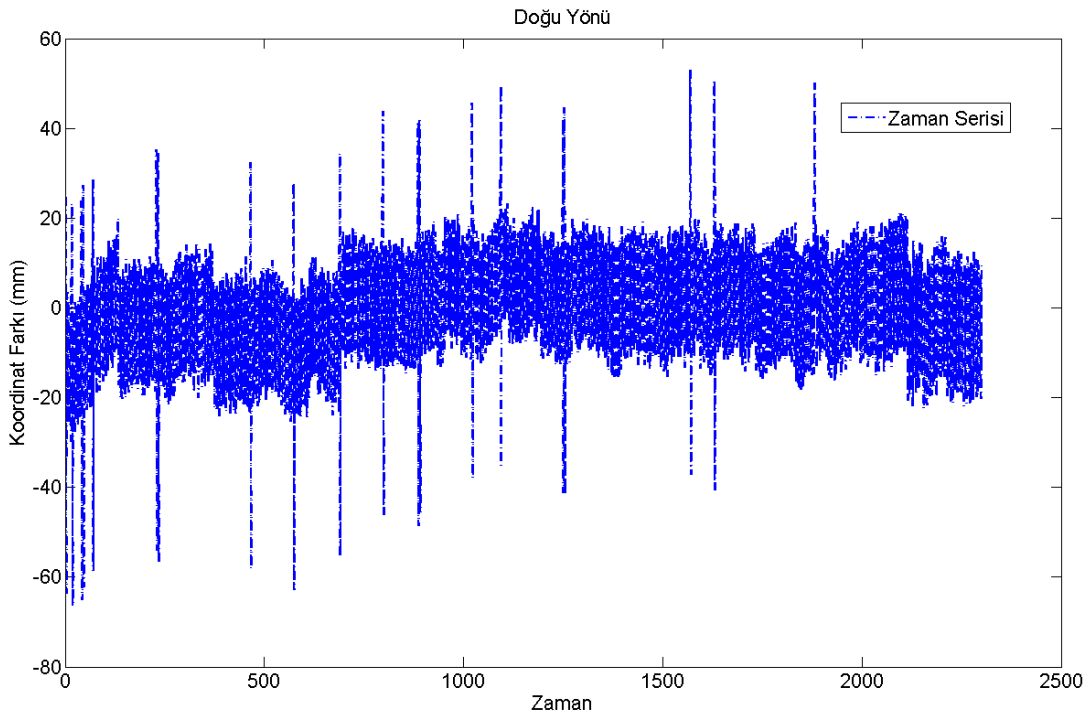
Şekil 5.22 FKP yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması

### 5.3.1.3 MAC Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

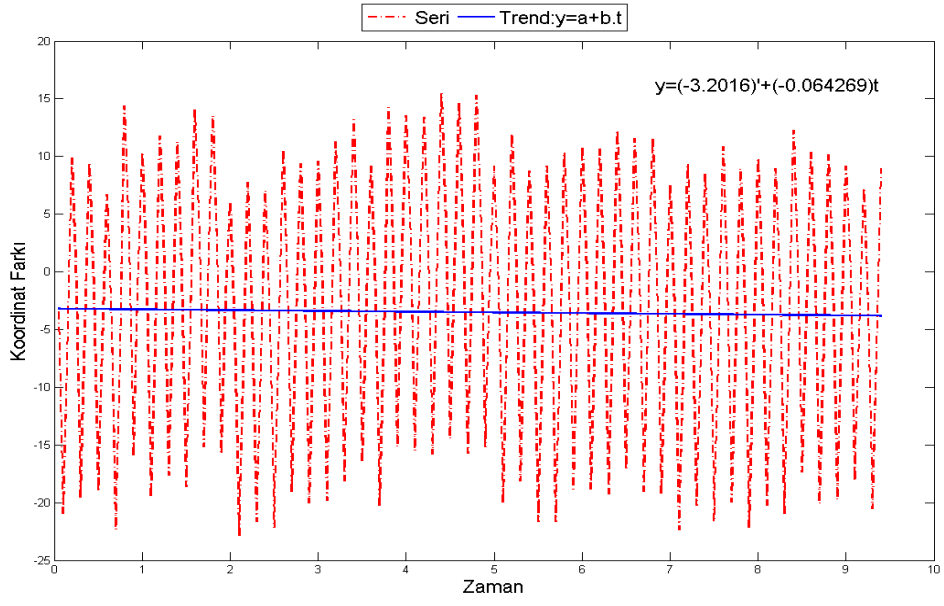
MAC ölçümlerine ilişkin GPS verilerine VRS yöntemiyle uygulanan prosedürle, zaman serileri analizi ve HFD işlemleri uygulanmış Bölüm 5.3.1.1 de örnekleriyle aktarıldığı üzere filtreleme ve pencereleme işlemlerinin genlik değerlerinin gerçekçiliğini değiştirmesi nedeniyle bu işlemler uygulanmadan genlik ve frekans değerlerinin belirlenmesi yapılmıştır.



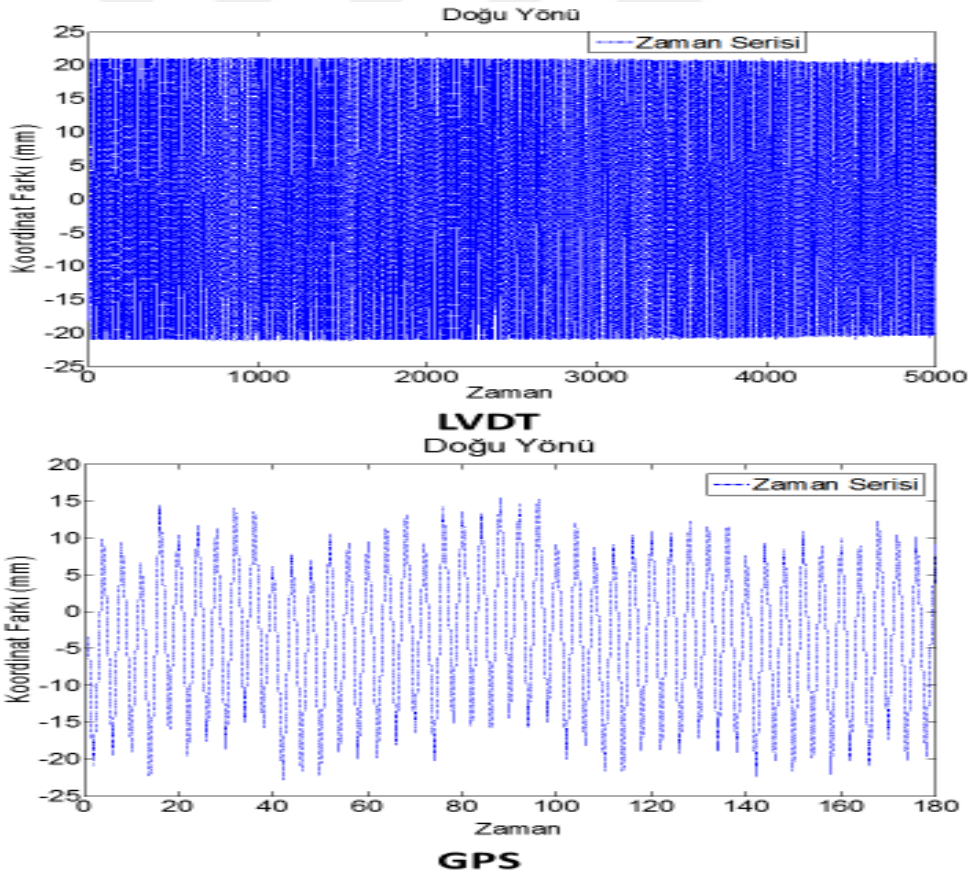
MAC zaman serilerine ilişkin grafik Şekil 5.23’de gösterilmiştir. MAC GPS ölçümlerine ilişkin veriler Şekil 5.23’de görüldüğü gibi çok fazla gürültü barındırdığı için genlik değerleri beklenildiğinden küçük çıkmaktadır. Bu verilere ilişkin sonuçlar Ek-B’da verilmiştir. Bu nedenle bu veriler için verilerin temiz olduğu son 200 verilik kısım değerlendirmeye alınmıştır. Oluşturulan bu zaman serisinin trend bileşeni katsayıları  $a = -3.20$  mm ve  $b = 0.06$  mm olarak belirlenmiş ve serinin trendi Şekil 5.24’deki şekilde belirlenmiştir. Yt ile belirlenen trendin ölçümlerden çıkarılmasıyla trend giderilmiş seri grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 5.23 MAC yöntemi ham zaman serisi

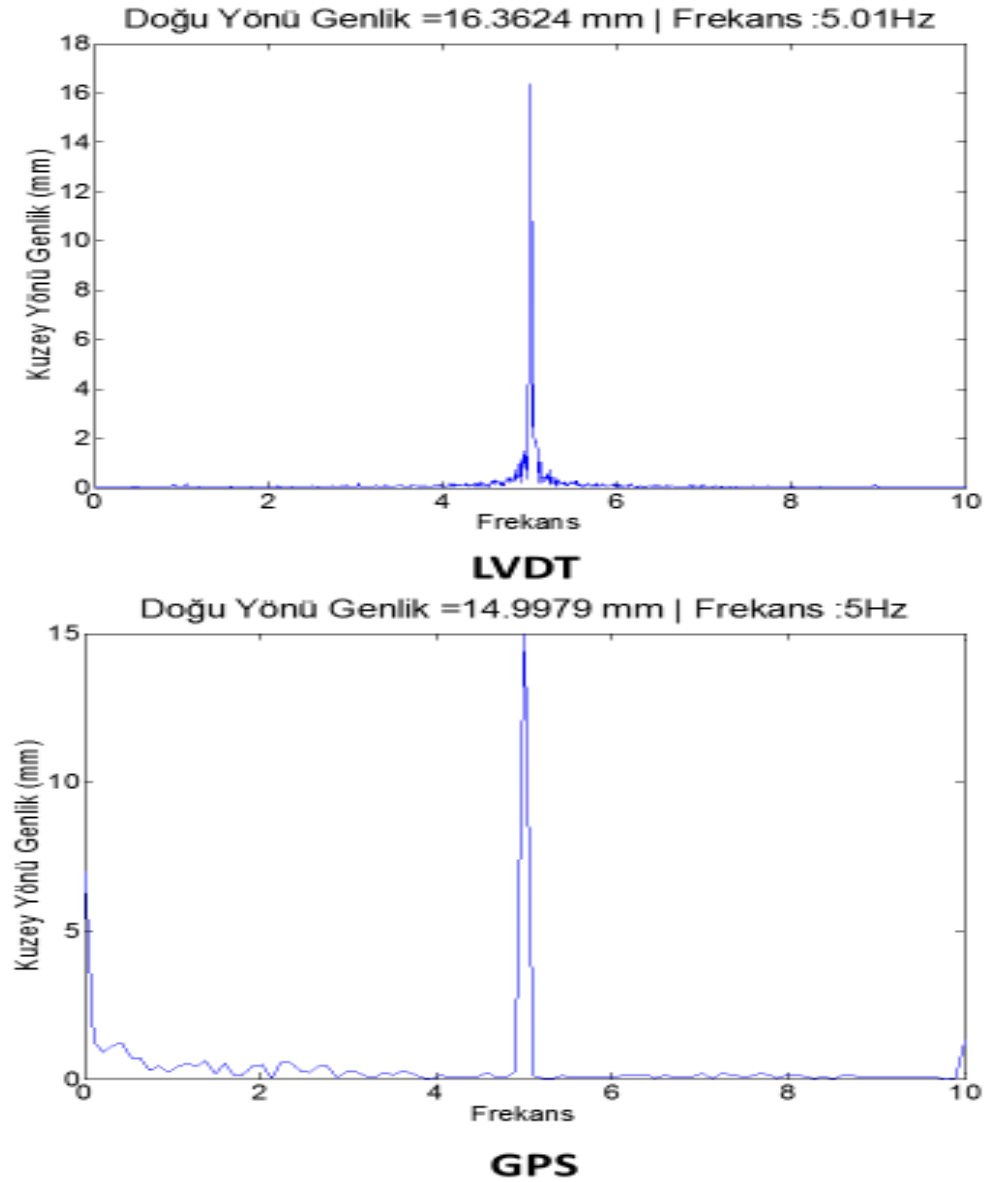


Şekil 5.24 MAC yöntemi doğu yönündeki zaman serisi lineer trend bileşeni



Şekil 5.25 MAC Yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması

LVDT MAC yöntemine ilişkin zaman serileri grafiği GPS verilerinin zaman serileriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 5.26). Her iki veri grubu için HFD dönüşümler sonucunda 5 Hz frekans tespit edilmiştir. LVDT sonuçlarına göre hareketin genliği 16.36 mm olarak tespit edilmiş GPS verilerinin analizinde ise bu değer 15 mm olarak bulunmuştur ve bu değerler arasındaki fark 1.4 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere ilişkin sonuçlar 5.3.1.5 de irdelenecektir.

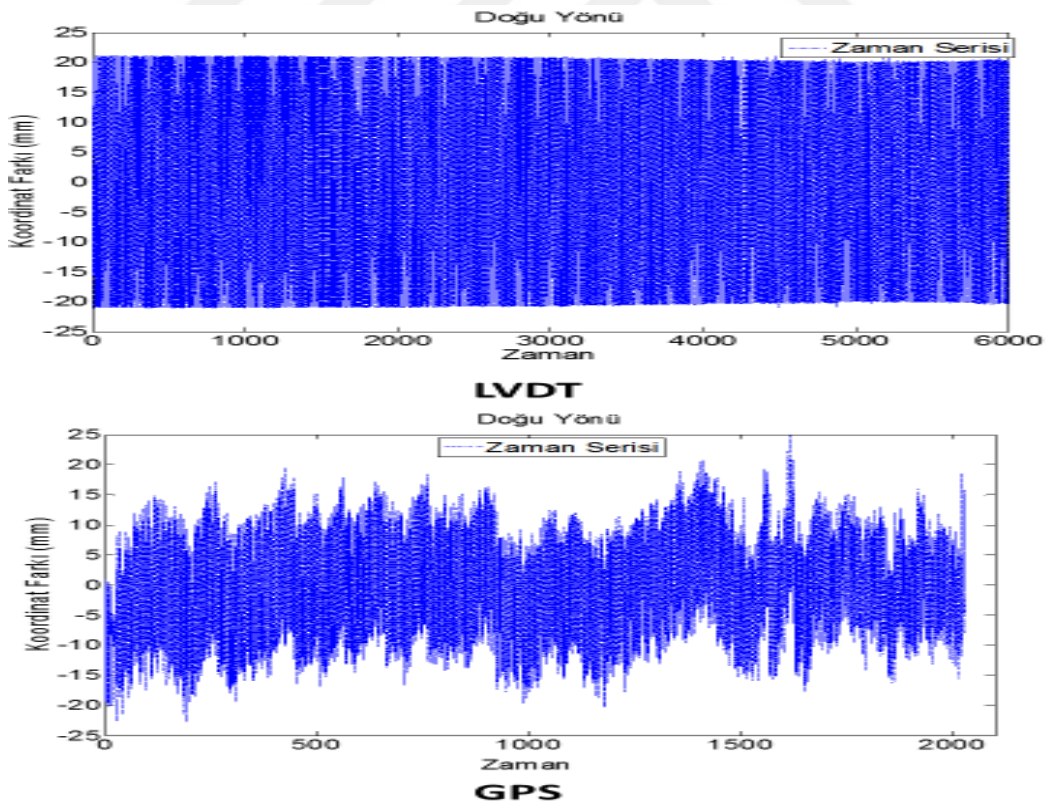


Şekil 5.26 MAC Yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması

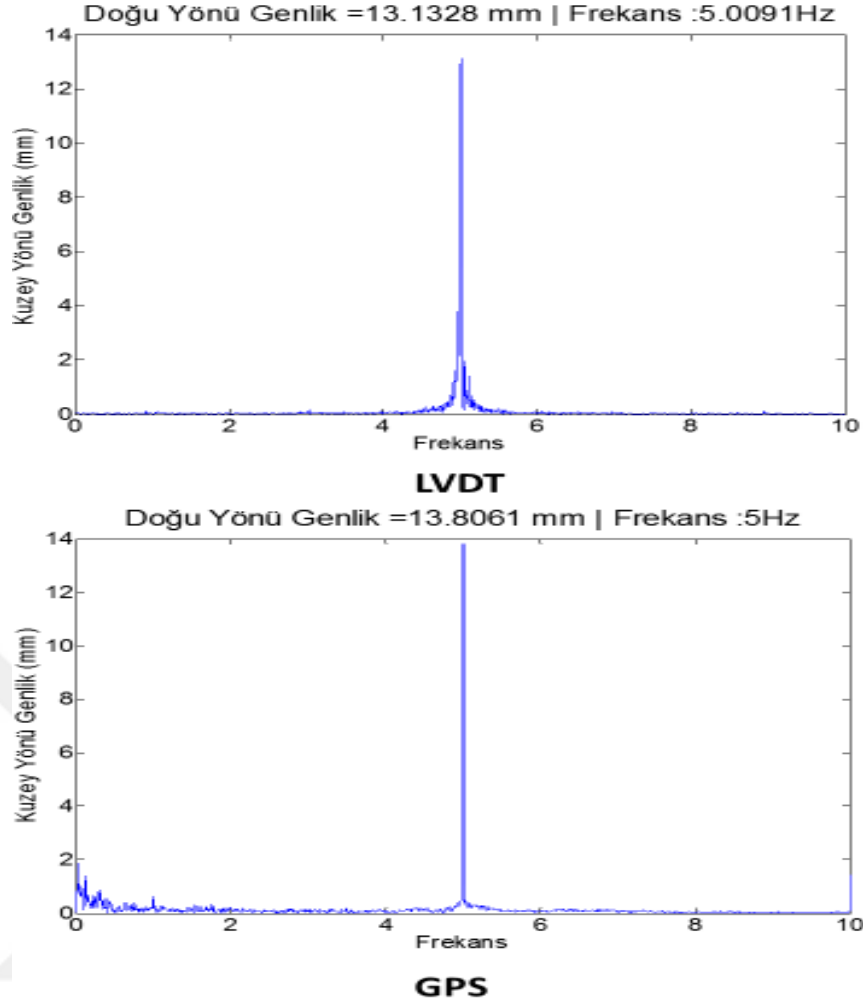
#### 5.3.1.4 YLDZ Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

YLDZ istasyonuna ait bilgiler Bölüm 5.2.1.2’de verilmiştir. YLDZ istasyonunun uygulamanın yapıldığı alana çok yakın olması nedeniyle daha yüksek doğrulukta ölçüm sonuçları beklenmektedir. Ölçümlere ilişkin GPS verilerine VRS yöntemiyle uygulanan prosedürle, zaman serileri analizi ve HFD işlemleri uygulanmış, Bölüm 5.3.1.1’de örnekleriyle aktarıldığı üzere filtreleme ve pencereleme işlemlerinin genlik değerlerinin gerçekçiliğini değiştirmesi nedeniyle bu işlemler uygulanmadan genlik ve frekans değerlerinin belirlenmesi yapılmıştır.

LVDT YLDZ yöntemine ilişkin zaman serileri grafiği GPS verilerinin zaman serileriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 5.27). Her iki veri grubu için HFD dönüşümler sonucunda 5 Hz frekans tespit edilmiştir. LVDT sonuçlarına göre hareketin genliği 13.1 mm olarak tespit edilmiş GPS verilerinin analizinde ise bu değer 13.8 mm olarak bulunmuştur ve bu değerler arasındaki fark -0.7 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.28). Bu değerlere ilişkin sonuçlar Bölüm 5.3.1.5 de irdelenecektir.



Şekil 5.27 YLDZ Yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.28 YLDZ Yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması

### 5.3.1.5 RTK GPS Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Uygulamanın RTK GPS ölçümleri aşamasında 4 farklı ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Her bir ölçümün Bölüm 3.5.2.7’de anlatıldığı üzere farklı teknikleri ve üstünlükleri vardır. GPS ölçülerinin LVDT ölçümleriyle karşılaştırılması sonucunda elde edilen farklar yardımıyla bu yöntemlerin mühendislik yapılarının davranışlarının gözlenmesinde kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Tüm ölçüm yöntemlerinde frekans değerleri yüksek doğrulukla tespit edilebilmiştir. Genliklerinin belirlenmesi noktasında ölçüm yöntemleri kendi içlerinde tutarlı değerler vermiştir. LVDT ölçümlerine en yakın sonucun ise YLDZ istasyonuna bağlanılarak yapılan ölçümler olduğu görülmektedir. Test ölçümleriyle yapılan değerlendirmelerde verilerin kendi içindeki iç doğrulukları cm altı hassasiyetle belirlenebildiği için sonuç doğruluğu oldukça yüksektir. Bölüm 5.2.1.2’de anlatılan YLDZ

istasyonuna bağlanılarak yapılan ölçüm sonuçlarının yüksek doğrulukta olmasının nedeni bu istasyonun uygulamanın yapıldığı noktaya çok yakın bir mesafede olup düzeltmelerin yüksek doğrulukla alınmasıdır. YLDZ istasyonu yüksek doğrulukla veri üretmek cm altı hassasiyette RTK ölçüm sonucu vermektedir (Gülal vd. [104]). LVDT ve GPS ölçümlerinin karşılaştırılmasıyla hesaplanan genlik değerleri arasındaki farklar Çizelge 5.2’de görülmektedir.

10-20 katlı yüksek bir binanın doğal frekansı maksimum 0.5 - 1 Hz aralığındadır [110]. 15 Temmuz Şehitler Köprüsü gibi asma köprüler için ise maksimum doğal frekans 1.2 Hz’dir (Hediye [12]). 20 Hz örnekleme frekansı ile belirlenmiş, 5 Hz’lik frekanstaki salınımların RTK ölçüm yöntemleriyle yüksek doğrulukla belirlenmesi, RTK-GPS yönteminin yapısal davranışların gözlenmesinde etkin olarak kullanılabilceğini göstermiştir.

Ayrıca şiddetli depremler esnasında yüksek yapılar ve köprüler gibi büyük mühendislik yapılarının gözlemlenen yüzey titreşimleri 1 Hz’lik örnekleme frekansı ile belirlenebilmektedir. 2002 Denali, 2003 Alaska, 2003 San Simeon ve 2004 Sumatra, Endonezya depremleri, 1 Hz’lik örnekleme frekansı ile belirlenmiştir [20]. Bu çalışmada yapılan RTK uygulamalarının sonuçları göstermiştir ki 5 Hz frekanstaki bir deprem anı RTK-GPS yöntemiyle belirlenebilmektedir.

Çizelge 5. 2 RTK ölçüm sonuçları özetler tablosu

GNSS Türü	GPS Sonuçları		LVDT Sonuçları		Farklar	
	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)
VRS 20Hz	14.6	5.00	16.1	5.01	1.5	0.01
FKP 20Hz	15.0	5.00	17.0	5.01	2.0	0.00
MAC 20Hz	15.0	5.00	16.4	5.01	1.4	0.00
YLDZ 20Hz	13.8	5.00	13.1	5.01	-0.7	0.01

RTK ölçümleri sırasında salınımlara başlamadan ve salınımlar bittikten sonraki dörder dakika boyunca GPS ile durağan durumda veri toplanmıştır. Sarsma tablasının hareketsiz olduğu bu süreye ilişkin veriler zaman serileri analiziyle belirlenerek genlik ve frekans değerleri hesaplanmıştır. Bu verilere ilişkin grafikler Ek-C'de yer almaktadır. Burada salınımın beklenen frekans ve genlik değeri 0'dır. Bu değerlerde sıfırdan sapmalar, ölçümüm durağan konumundaki hataları olarak belirlenmiştir ve referans değeri olarak alınabilir. Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere hareket esnasında hesaplanan genlik ve frekans değerleri arasındaki farklar bu referans değerlerinden küçük veya çok yakın olduğu için bu farklar anlamsızdır.

Çizelge 5. 3 Hareketsiz zamana ait genlik ve frekans değerleri

<b>HAREKETSİZ ZAMANLARDAKİ ÖLÇÜMLERE AİT GENLİK VE FREKANS DEĞERLERİ</b>				
<b>GNSS TÜRÜ</b>	<b>GENLİK(mm)</b>	<b>ORTALAMA GENLİK (mm)</b>	<b>FREKANS (Hz)</b>	<b>ORTALAMA FREKANS(Hz)</b>
<b>VRS (20Hz)</b>	1.5	1.5	0.02	0.02
<b>FKP (20Hz)</b>	2.0	2.0	0.04	0.04
<b>MAC (20Hz)</b>	2.1	2.1	0.01	0.01
<b>YLDZ (20Hz)</b>	1.2	1.2	0.00	0.00
<b>PPP1(20Hz)</b>	5.4	4.8	0.01	0.02
<b>PPP3(20Hz)</b>	4.1	4.8	0.02	0.02
<b>KPP(1Hz)</b>	2.0	2.0	0.01	0.01
<b>TPS1 (1 Hz)</b>	1.6	1.6	0.03	0.03
<b>TPS2 (1 Hz)</b>	1.6	1.6	0.03	0.03

RTK uygulaması kapsamında son olarak örnekleme frekansını düşürerek, azalan verilere aynı prosedürler uygulanmıştır. Burada amaç örnekleme frekansının düşürülmesiyle herhangi bir veri kaybı olup olmadığını, ölçüm sonuçlarının etkilenip etkilenmediğini belirlemektir. Nyquist kriteri gereğince belirlenmek istenen 5 Hz'lik frekansın 2 katı bir

örnekleme frekansı (10 Hz) ile zaman serileri işlemleri yapılmıştır. Bu uygulamalara ilişkin sonuç grafikleri Ek-D’de yer almaktadır ve bu verilerden hesaplanan genlik ve frekans değerleri çizelge 5.4’de yer almaktadır. Bu sonuçlar incelendiği zaman 20 Hz örnekleme frekansından 10 Hz örnekleme frekansına düştüğünde herhangi bir veri kaybı yaşanmayıp 5 Hz’lik hareketin LVDT sonuçlarına göre hesaplanan farklarında bir kötüleşme olmadığı tespit edilmiştir.

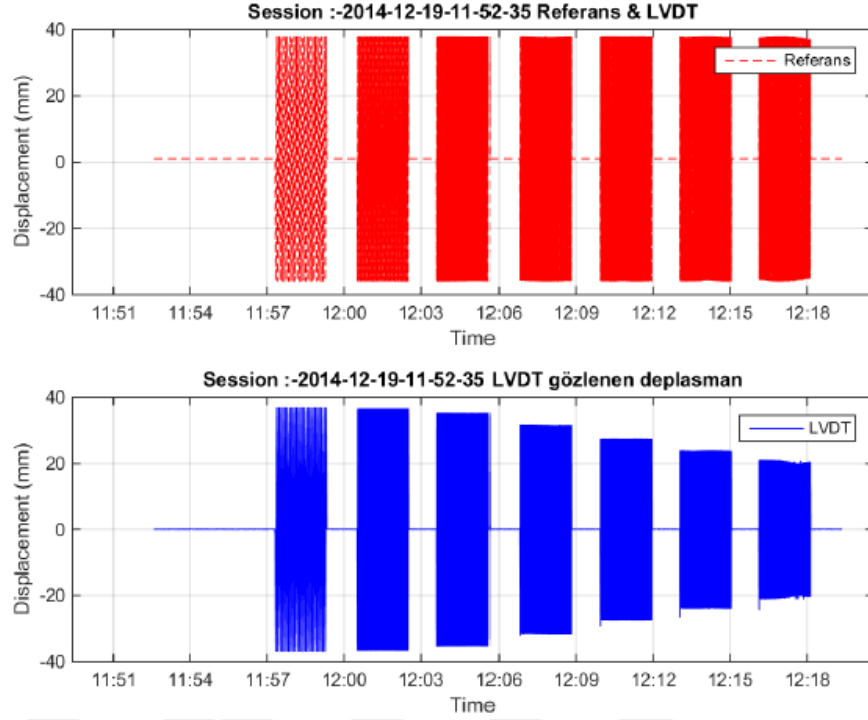
Çizelge 5. 4 10 Hz örnekleme frekansı için genlik ve frekans değerleri

		GPS		LVDT		FARKLAR	
	GNSS TÜRÜ	GENLİK (mm)	FREKANS (Hz)	GENLİK (mm)	FREKANS (Hz)	GENLİK (mm)	FREKANS (Hz)
<b><u>10 Hz</u></b> <b><u>Örnekleme</u></b> <b><u>Frekansı</u></b> <b><u>İçin</u></b> <b><u>Sonuçlar</u></b>	<b>VRS (10Hz)</b>	17.10	5	16.10	5	1	0
	<b>FKP (10Hz)</b>	18.20	5	17.00	5	1.2	0
	<b>MAC (10Hz)</b>	18.10	5	16.40	5	1.7	0
	<b>YLDZ (10Hz)</b>	14.31	5	13.10	5	1.2	0

### 5.3.2 PPP Ölçümleri Verileri

Bölüm 5.2.2’de test prosedürü anlatılan PPP uygulamasında sarsma tablasının hareketli olduğu ikişer dakikalık 7 farklı frekans ve genlikteki veri toplanmıştır. Bu 7 farklı uygulamada sarsma tablasının 0.2 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz ve son olarak 5 Hz’lik frekanslarla salınım yapması istenmiştir. Bu uygulamaların LVDT sonuçlarına bakıldığında frekansın arttırılmasıyla başlangıçta referans olarak alınan genliğin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.29). Bunun nedeni sarsma tablasının maksimum hareket sağlayabileceği frekans-genlik kapasitesidir.

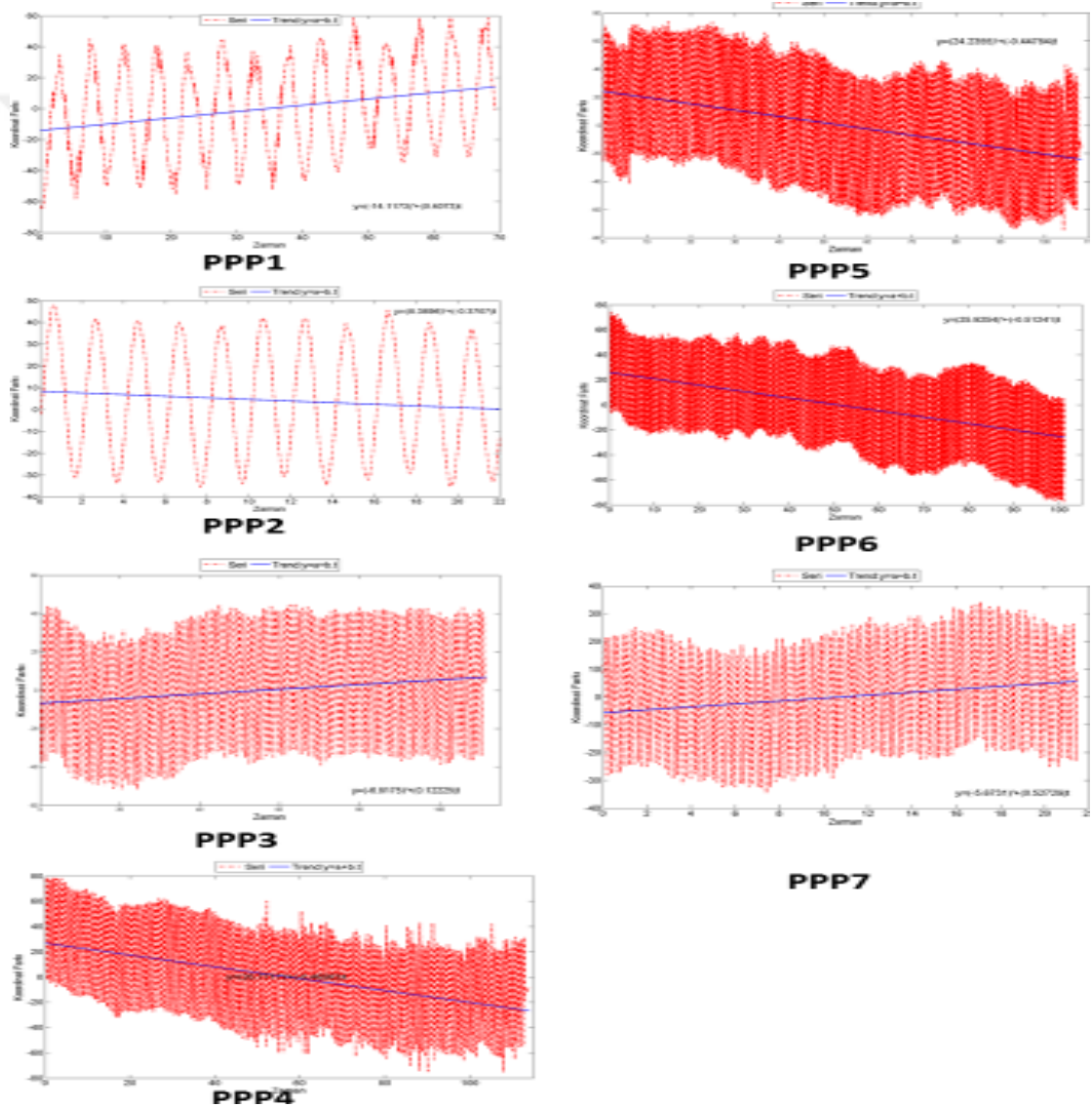




Şekil 5.29 PPP yöntemi testleri farklı frekanslara bağlı olarak azalan genlik değerleri GPS ölçümlerinin zaman serilerinin analizinde ilk olarak serilerin zamana bağlı grafiklerinin oluşturulması gerektiğinden UTM Gauss Kruger koordinatlarına dönüştürülmüş VRS GPS verisi analiz edilmiştir. Sarsma tablasının orta noktasının koordinatları referans değeri alınarak tüm noktaların bu değere göre koordinat farkları oluşturulmuş ve oluşan zaman serisinin incelemesi yapılmıştır. Sarsma tablasının hareketli olduğu zamana ilişkin GPS verisinin doğu yönlü koordinat farklarının zamana bağlı grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra bu serileri Bölüm 4.1’de anlatılan trend bileşeninin belirlenerek seriden giderilmesi işlemi uygulanmıştır. Bu bileşenlerin seriden ayrıştırılması için Bölüm 4.1.3’de anlatılan en küçük kareler yöntemi ile zamana bağlı olarak uydurulan bir doğru  $Y_t = a + b_t$  denklemleri ile elde edilmiştir. Denklem katsayıları 4.1.2’de anlatılan regresyon analizi ile hesaplanmıştır. Serilerin trend bileşenlerinin grafikleri belirlenmiştir (Şekil 5.30) . 7 farklı salınımdaki PPP ölçümüne ilişkin hesaplanan katsayılar 5.5 numaralı çizelgede verilmiştir.  $Y_t$  ile belirlenen trendin ölçümlerden çıkarılmasıyla trend giderilmiş seri grafikleri oluşturulmuştur.

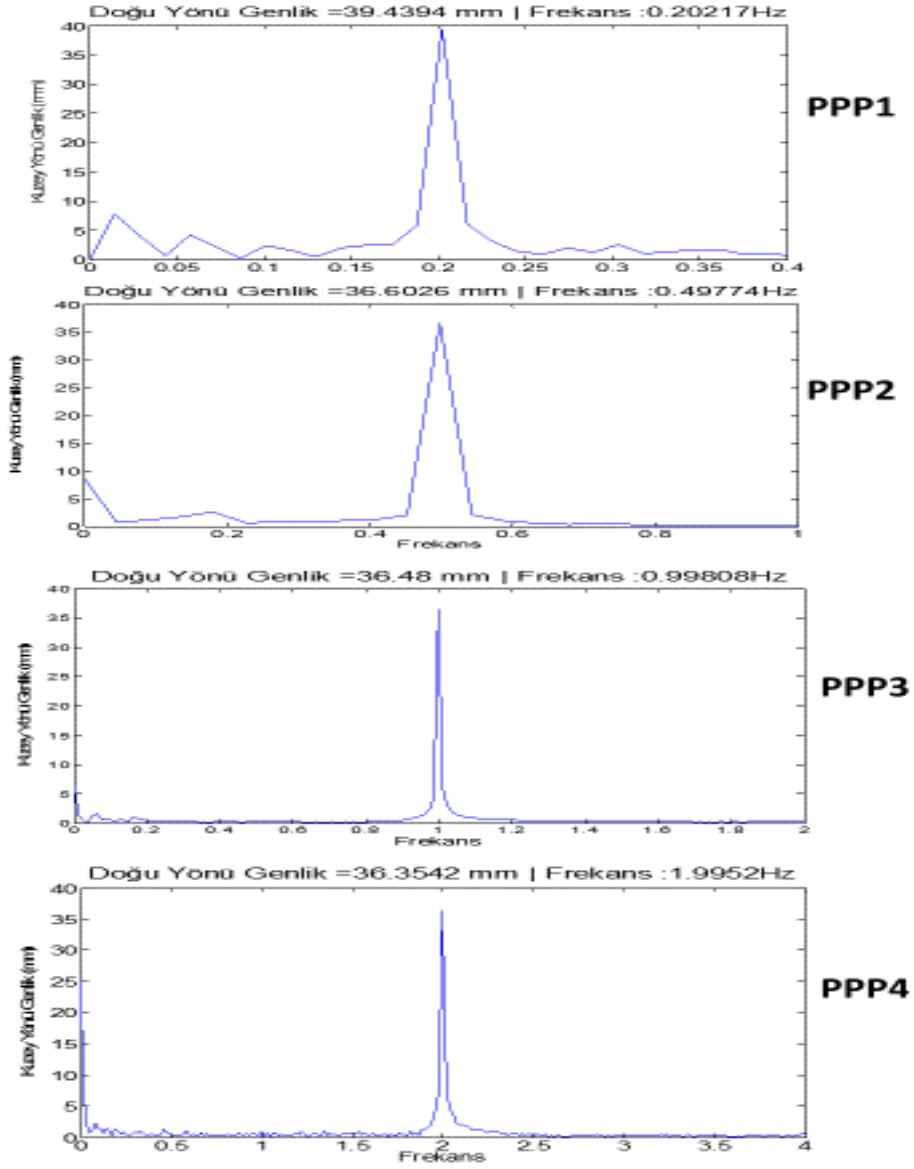
Çizelge 5. 5 PPP ölçümleri trend fonksiyonu katsayıları

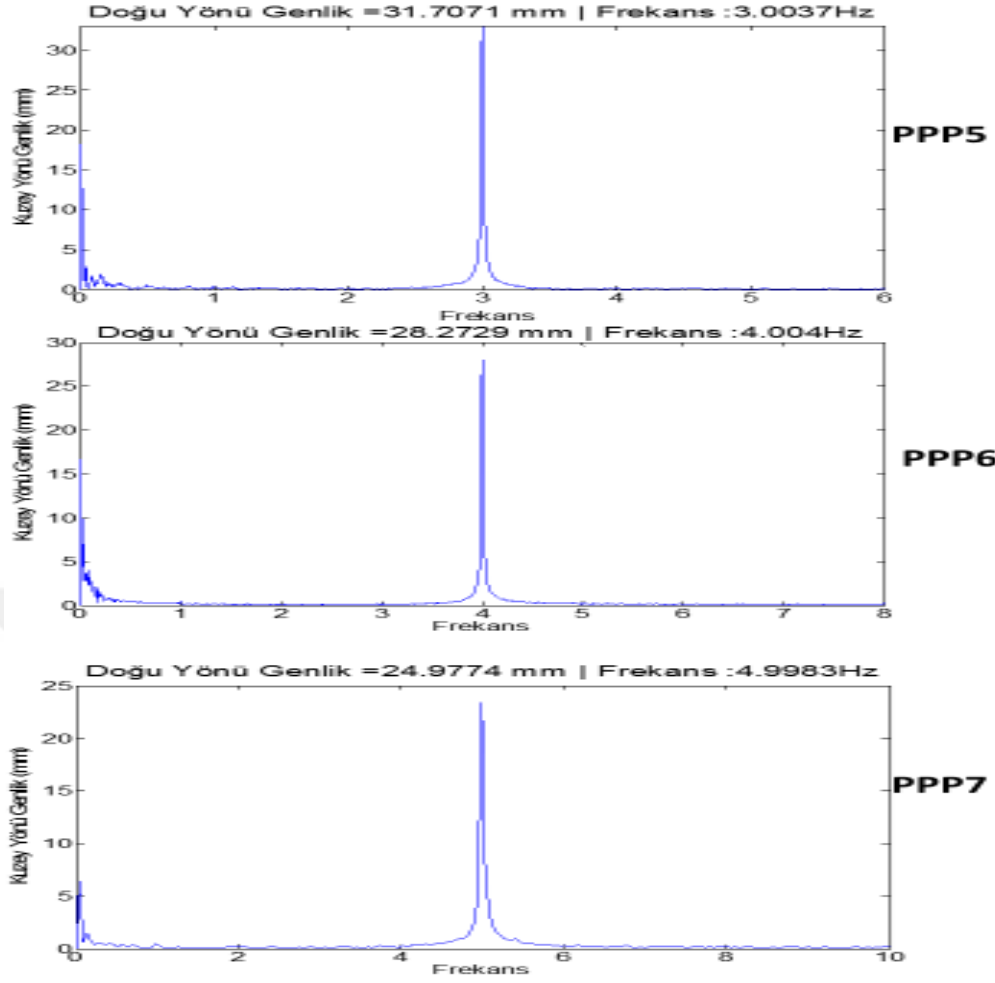
	Katsayılar	
	A	b
PPP1	-14.1	0.4
PPP2	8.4	-0.4
PPP3	-6.8	0.1
PPP4	-4.25	-0.25
PPP5	5.4	-0.4
PPP6	4.2	-0.5
PPP7	-5.7	0.5



Şekil 5.30 PPP yöntemi doğu yönündeki zaman serilerinin lineer trend bileşenleri

Ölçümlere ilişkin GPS-PPP verilerine RTK yöntemlerine uygulanan prosedürle, zaman serileri analizi ve HFD işlemleri uygulanmış Bölüm 5.3.1.1’de örnekleriyle aktarıldığı üzere filtreleme ve pencereleme işlemlerinin genlik değerlerinin gerçekçiliğini değiştirmesi nedeniyle bu işlemler uygulanmadan PPP test verilerinin yedisinde genlik ve frekans değerlerinin belirlenmesi yapılmıştır( Şekil 5.31) .





Şekil 5.31 PPP yöntemi GPS ölçümlerinin genlik ve frekans değerleri

PPP GPS yöntemine ilişkin zaman serilerinin grafikleri LVDT verilerinin zaman serileriyle karşılaştırılmıştır. Her iki veri grubundaki ölçümler için HFD dönüşümler sonucunda 5 Hz'lik frekanslar tespit edilmiştir. LVDT sonuçlarına göre hareketin genlikleri ise Çizelge 5.6'da verilmiştir. LVDT sonuçlarına göre hesaplanan frekans ve genlik grafikleri Ek-E' de verilmiştir.

Çizelge 5. 6 PPP ölçümleri sonuçların özet tablosu

GNSS Türü	GPS Sonuçları		LVDT Sonuçları		Farklar	
	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)
PPP1	39.4	0.20	36.4	0.20	3.0	0.00
PPP2	36.6	0.50	33.6	0.50	3.0	0.00
PPP3	36.5	1.00	32.8	1.00	3.7	0.00
PPP4	36.4	2.00	31.7	2.00	4.7	0.00
PPP5	31.7	3.00	26.8	3.00	4.9	0.00
PPP6	28.3	4.00	23.4	4.00	4.9	0.00
PPP7	25.0	5.00	20.1	5.00	4.9	0.00

PPP-GPS yöntemiyle yapılan farklı salınımdaki tüm ölçüm yöntemlerinde frekans değerleri yüksek doğrulukla tespit edilebilmesine rağmen titreşimlerin genliklerinin belirlenmesi noktasında LVDT ölçümlerine göre farklar tespit edilmiştir. Test ölçümleriyle yapılan değerlendirmelerde verilerin kendi içindeki iç doğrulukları cm altı hassasiyetle belirlenebildiği için sonuç doğruluğu oldukça yüksektir. Ayrıca PPP ölçümleri sırasında salınımlara başlamadan ve salınımlar bittikten sonra GPS ile durağan durumda veri toplanmıştır. Sarsma tablasının hareketsiz olduğu bu süreye ilişkin veriler zaman serileri analiziyle belirlenerek genlik ve frekans değerleri hesaplanmıştır. Bu verilere ilişkin grafikler Ek-C'de yer almaktadır. Burada salınının beklenen frekans ve genlik değeri 0'dır. Bu değerlerde sıfırdan sapmalar ölçümün durağan konumundaki hataları olarak belirlenmiştir ve referans değeri olarak alınabilir. Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere PPP ölçümlerine ait durağan zamanların ortalama genliği 4.8 mm ve frekansı 0.02 Hz olarak bulunmuştur. Bu değerler ile hareket esnasında hesaplanan genlik ve frekans değerleri arasındaki farklar birbirine çok yakın olduğu için bu farklar anlamsızdır.

10 - 20 katlı yüksek bir binanın doğal frekansı maksimum 0.5 - 1 Hz aralığındadır (Arnold [110] ). 15 Temmuz Şehitler Köprüsü gibi asma köprüler için ise maksimum doğal frekans 1,2 Hz'dir (Erdoğan[12] ). 20 Hz örnekleme frekansı ile belirlenmiş, 5 Hz'lik frekanstaki

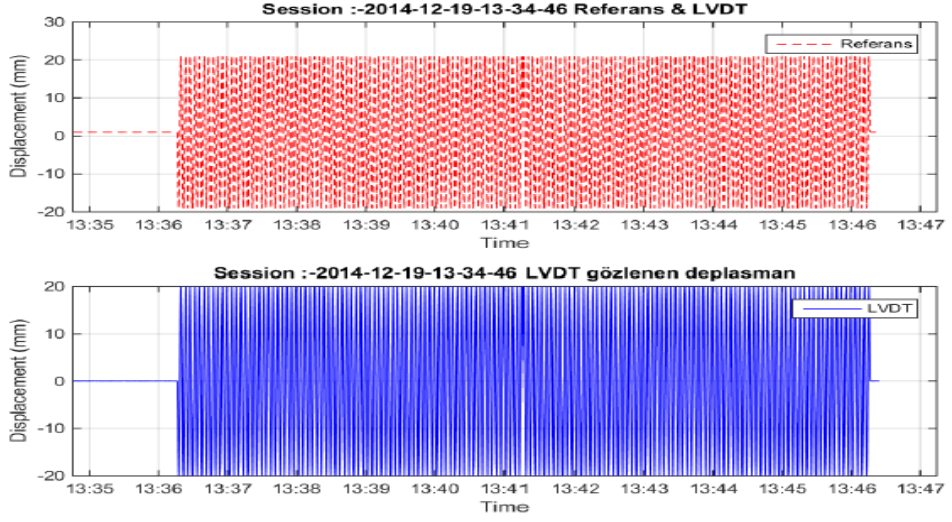
salınımların PPP ölçüm yöntemleriyle yüksek doğrulukla belirlenmesi, PPP-GPS yönteminin yapısal davranışların gözlenmesinde etkin olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Ayrıca şiddetli depremler esnasında yüksek yapılar ve köprüler gibi büyük mühendislik yapılarının gözlemlenen yüzey titreşimleri 1 Hz'lik örnekleme frekansı ile belirlenebilmektedir. 2002 Denali, 2003 Alaska, 2003 San Simeon ve 2004 Sumatra, Endonezya depremleri, 1 Hz'lik örnekleme frekansı ile belirlenmiştir [20]. Bu çalışmada yapılan PPP uygulamalarının sonuçları göstermiştir ki 5 Hz frekanstaki bir deprem anı PPP-GPS yöntemiyle belirlenebilmektedir. Bu nedenle yapısal titreşimlerin izlenmesinde ve deprem gibi bir afet anındaki hareketin tespiti için PPP yönteminin etkin bir şekilde kullanılabileceği söylenilebilmektedir.

PPP ölçümleri sonucunda GPS verileriyle LVDT verilerinin karşılaştırılması sonucu hesaplanan farkların VRS ölçüm yöntemindeki sonuçlara göre 7-8 mm daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin PPP uygulamasının gözlem süresinin kısa olması belirtilebilir.

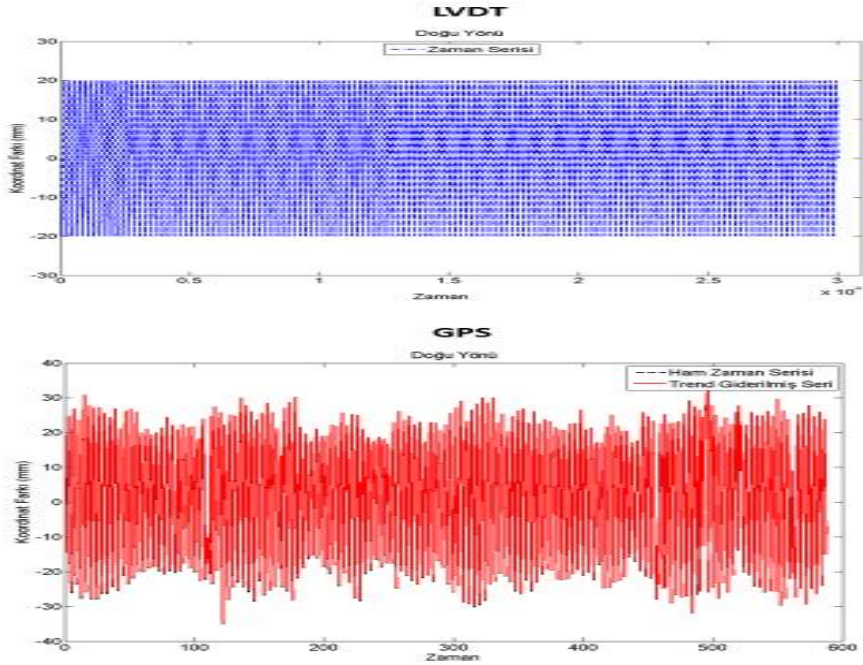
### **5.3.3 KPP Ölçümü Verileri**

Bölüm 5.2.3'de test prosedürü anlatılan KPP uygulamasında 1 Hz'lik veri statik modda toplanmış, aynı zamana ilişkin YLDZ referans istasyonlarının ve sarsma tablasının yakınına kurulan iki adet Thales marka GPS alıcısının 1 Hz'lik RNX verileri de alınarak GAMIT/GLOBK yazılımının TRACK modülü ile değerlendirilmiştir. Bu teste ilişkin LVDT verisini grafiği Şekil 5.32'de verilmiştir.



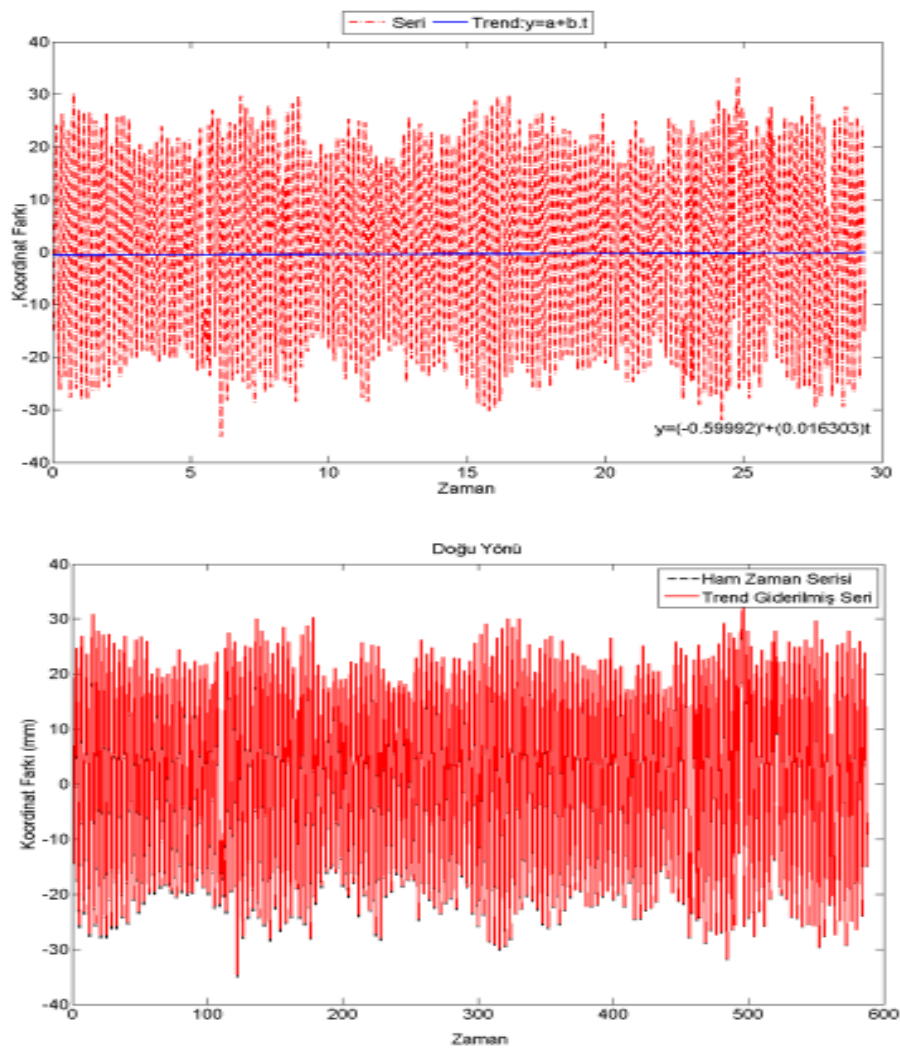
Şekil 5.32 KPP yöntemi LVDT referans ve test verileri grafiği

KPP-GPS verisi için sarsma tablasının orta noktasının koordinatları referans değeri alınarak tüm noktaların bu değere göre koordinat farkları oluşturulmuş ve sarsma tablasının hareketli olduğu zamana ilişkin GPS verisinin doğu yönlü koordinat farklarının zamana bağlı grafikleri oluşturularak LVDT verileriyle elde edilen zaman serisiyle karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 5.33).



Şekil 5. 33 KPP yöntemi LVDT zaman serisi ve GPS zaman serilerinin karşılaştırılması

Daha sonra bu serilere Bölüm 4.1’de anlatılan trend bileşenin belirlenmesi ve seriden giderilmesi işlemi uygulanmıştır. Bu bileşenlerin seriden ayrıştırılması için Bölüm 4.1.3’de anlatılan en küçük kareler yöntemi ile zamana bağlı olarak uydurulan bir doğru  $Y_t = a + b.t$  denklemleri ile elde edilmiştir. Denklem katsayıları Bölüm 4.1.2’de anlatılan regresyon analizi ile hesaplanmıştır. Serilerin trend bileşenlerinin grafikleri belirlenmiştir. 4.6 numaralı eşitlik yardımıyla KPP ölçüm yöntemine ait katsayılar  $a = -0,6$  mm ve  $b = 0.0$  mm olarak belirlenmiş ve  $Y_t$  ile belirlenen trendin ölçümlerden çıkarılmasıyla trend giderilmiş seri grafiği oluşturulmuştur (Şekil 5.34).

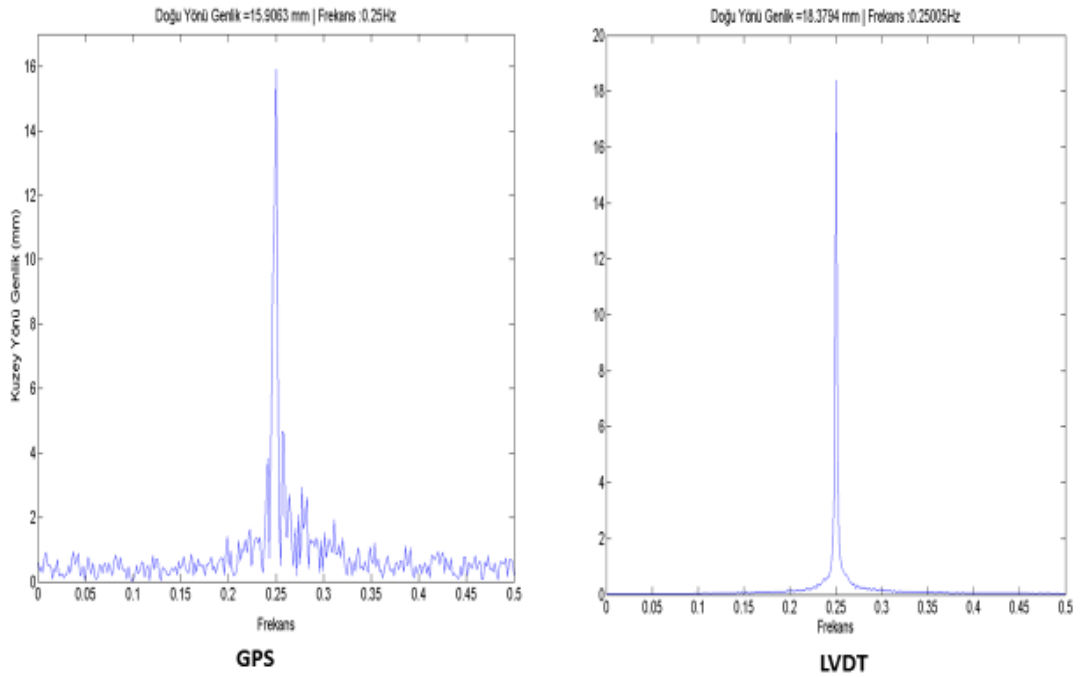


Şekil 5.34 KPP yöntemi trend bileşeni belirlenmiş ve trend giderilmiş seri grafikleri

Ölçümlere ilişkin GPS verilerine RTK-GPS yöntemine uygulanan prosedürle, zaman serileri analizi ve HFD işlemleri uygulanmış genlik ve frekans değerlerinin belirlenmesi



yapılmıştır. LVDT YLDZ yöntemine ilişkin zaman serileri grafiği GPS verilerinin zaman serileriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 5.35). Her iki veri grubu için HFD sonucunda 5 Hz frekans tespit edilmiştir. LVDT sonuçlarına göre hareketin genliği 18.4 mm olarak tespit edilmiş GPS verilerinin analizinde ise bu değer 15.9 mm olarak bulunmuştur ve bu değerler arasındaki fark 2.5 mm olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.7). Ayrıca KPP ölçümleri sırasında salınımlara başlamadan ve salınımlar bittikten sonra GPS ile durağan durumda veri toplanmıştır. Sarsma tablasının hareketsiz olduğu bu süreye ilişkin veriler zaman serileri analiziyle belirlenerek genlik ve frekans değerleri hesaplanmıştır. Bu verilere ilişkin grafikler Ek-C'de yer almaktadır. Burada salınımın beklenen frekans ve genlik değeri 0'dır. Bu değerlerde sıfırdan sapmalar, ölçümün durağan konumundaki hataları olarak belirlenmiştir ve referans değeri olarak alınabilir. Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere KPP ölçümlerine ait durağan zamanların genliği 2 mm ve frekansı 0.01 Hz olarak bulunmuştur. Bu değerler ile hareket esnasında hesaplanan genlik ve frekans değeri arasındaki farklar çok yakın olduğu için ölçüm sonucu hesaplanan bu farklar anlamsızdır.



Şekil 5.35 KPP yöntemi LVDT ve GPS frekans-genlik değerlerinin karşılaştırılması

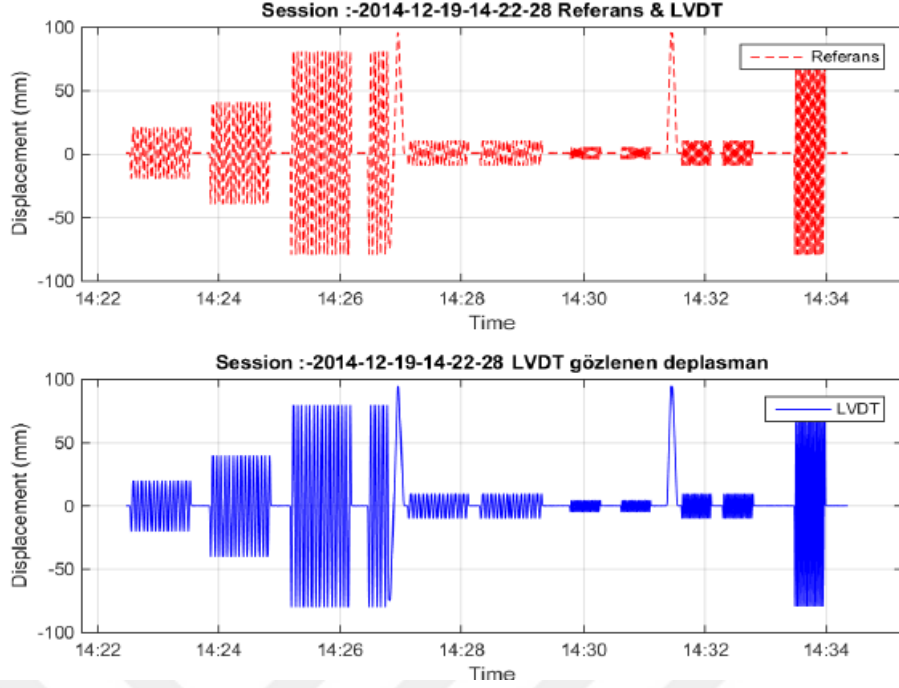
Çizelge 5. 7 KPP ölçümleri sonuçların özet tablosu

GNSS-TÜRÜ	GPS SONUÇLARI		LVDT SONUÇLARI		FARKLAR	
	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)
KPP 1Hz	15,9	0,25	18,4	0,25	2,5	0,00

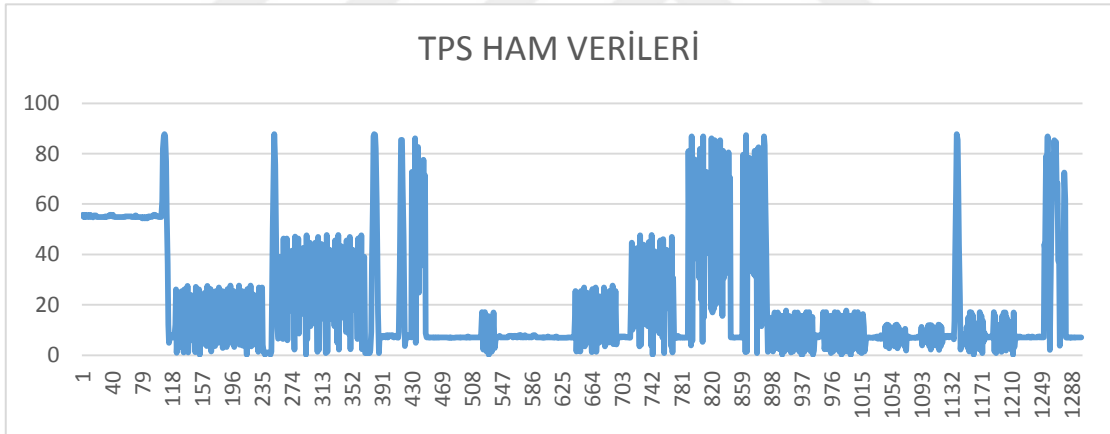
KPP ölçümleri sonucunda GPS verileriyle LVDT verilerinin karşılaştırılması sonucu hesaplanan farkın PPP ölçüm yöntemindeki sonuçlara göre 3 - 4 mm daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni PPP gözlem süresinin kısa olması ve KPP çözümlerinde kullanılan sabit istasyonların uygulama alanına çok yakın olması olarak yorumlanabilir.

#### 5.3.4 TPS Ölçümleri Verileri

Bölüm 5.2.4’de test prosedürü anlatılan TPS uygulamasında, reflektör sarsma tablası üzerinde salınım yaparken Leica TPS1200 robotik total station ile veri toplanmıştır. Yapılan ölçümlerde 0.25 Hz ve 0.50 Hz frekansları arasında toplamda 8 farklı frekans ve genlikle TPS ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm verileri Polar 1 Hz örnekleme frekansı ile toplanmıştır. Bu teste ilişkin LVDT verisini grafiği Şekil 5.36’da verilmiştir. Ham TPS verisi ise Şekil 5.37’de verilmiştir. Bu verilere bakılacak olursa 5-6, 7-8 ve 9-10 numaralı ölçülerin aynı frekans ve genlikte olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu veriler tek bir veriymiş gibi analiz edilmiştir. Ham TPS verisine bakıldığında ilk 4 uygulama test sırasında karşılaşılan bir problem nedeniyle tekrar edilmiş, ikinci veriler değerlendirmede kullanılmıştır.



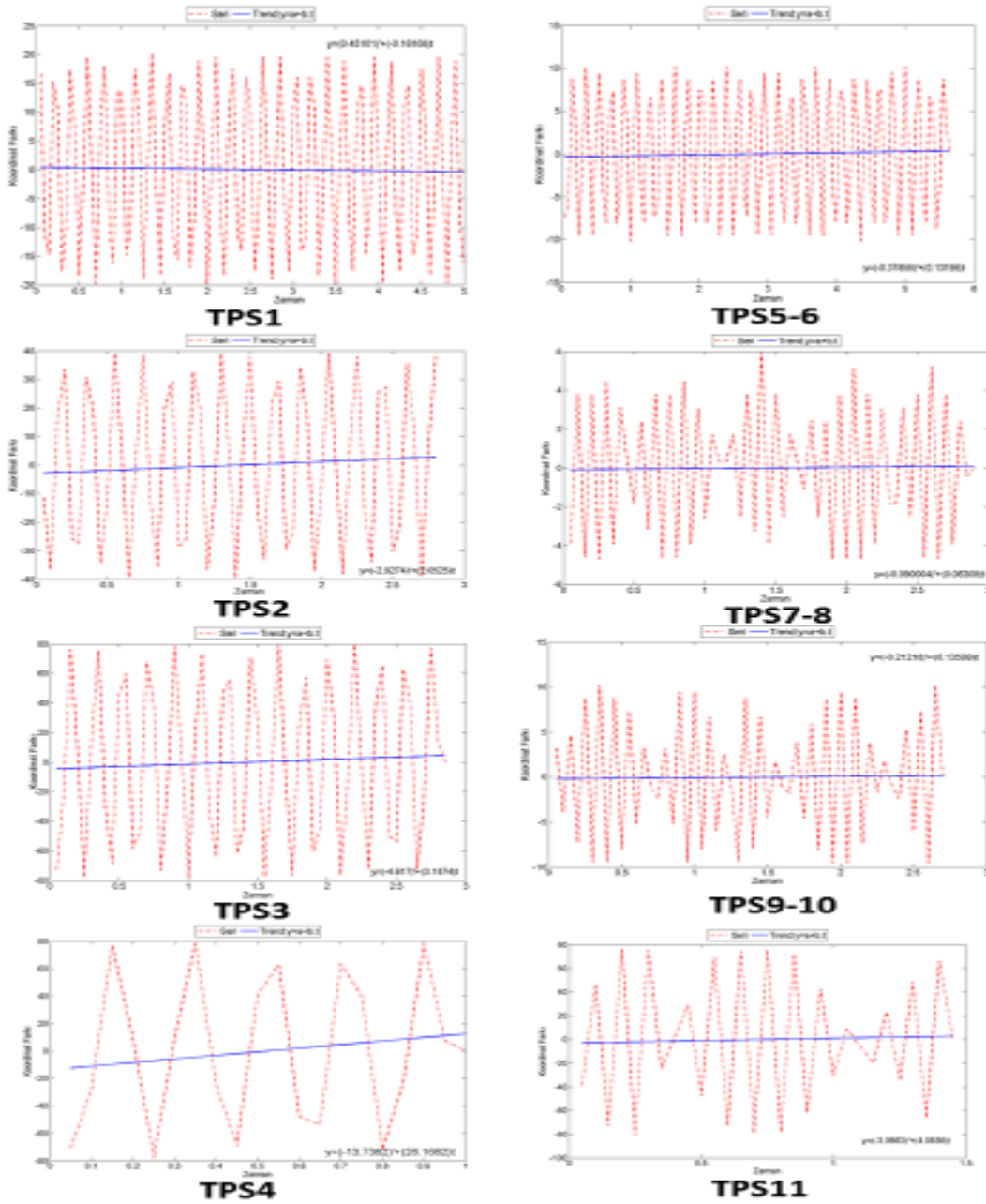
Şekil 5.36 TPS yöntemi LVDT referans ve test veri setleri grafiği



Şekil 5.37 TPS ham veriler grafiği

Sarsma tablasının orta noktasının koordinatları referans değeri alınarak tüm noktaların bu değere göre koordinat farkları oluşturulmuş ve oluşan zaman serilerinin incelemesi yapılmıştır. Sarsma tablasının hareketli olduğu zamana ilişkin TPS verisinin koordinat farklarının zamana bağlı grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra bu serileri Bölüm 4.1’de anlatılan trend bileşeninin belirlenerek seriden giderilmesi işlemi uygulanmıştır. Bu bileşenlerin seriden ayrıştırılması için Bölüm 4.1.3’de anlatılan en küçük kareler yöntemi ile zamana bağlı olarak uydurulan bir doğru  $Y_t = a + b_t$  denklemleri ile elde edilmiştir.

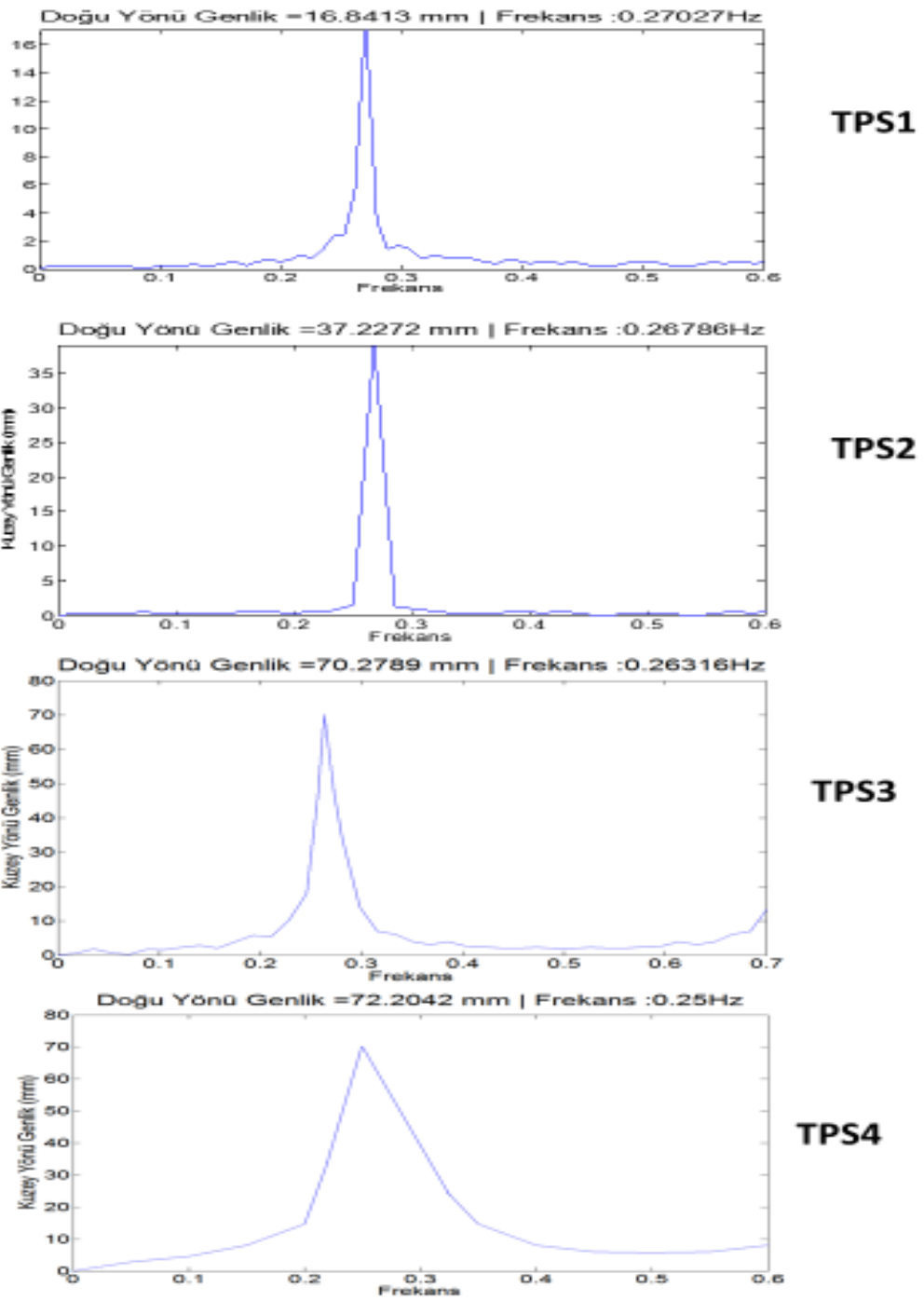
Denklemin katsayıları Bölüm 4.1.2’de anlatılan regresyon analizi ile hesaplanmıştır. Oluşturulan trend grafikleri Şekil 5.38’de yer almaktadır.



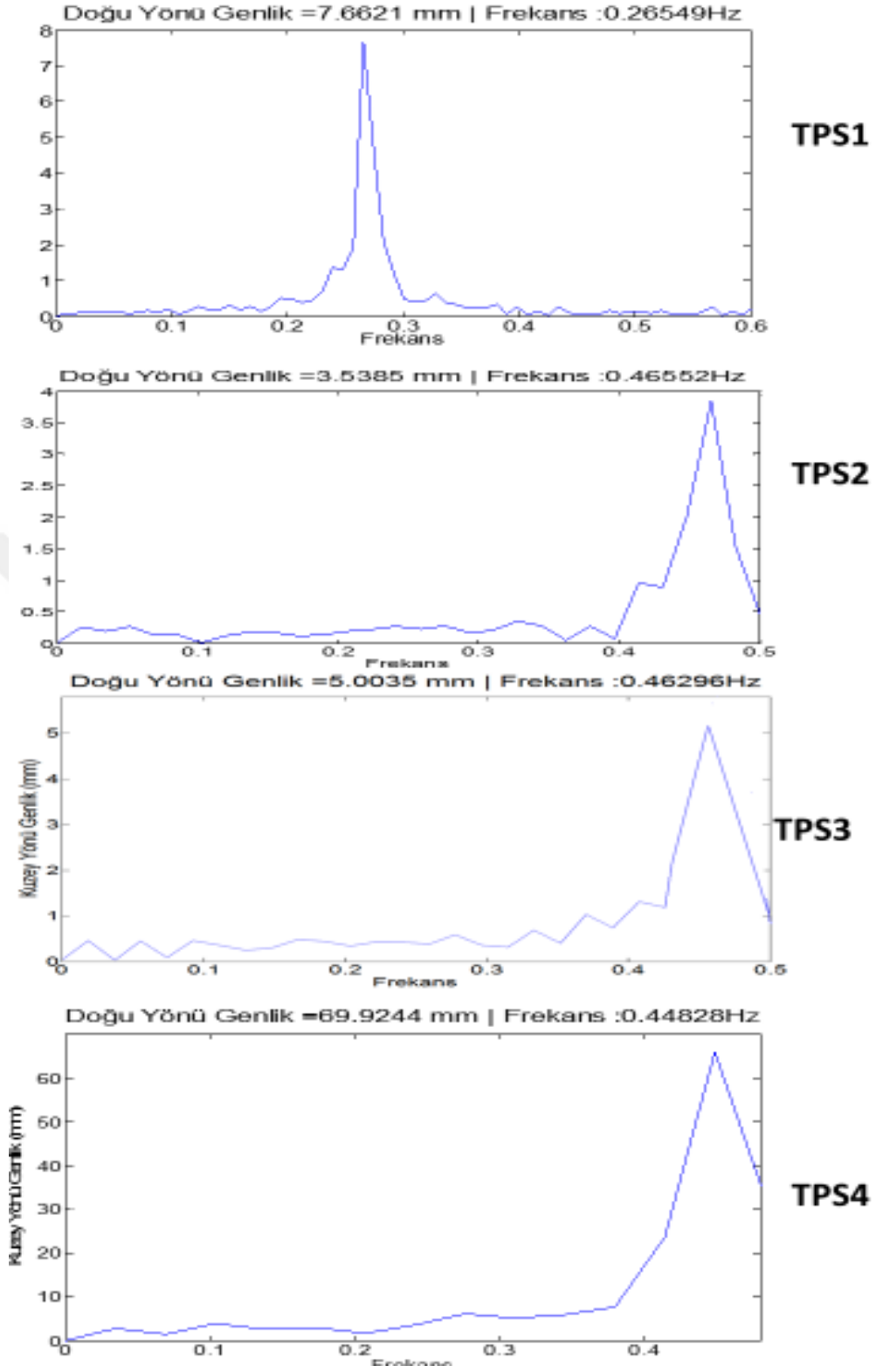
Şekil 5.38 TPS yöntemi zaman serilerinin lineer trend bileşenleri

Ölçümlere ilişkin TPS verilerine GPS verilerine uygulanan prosedürle, zaman serileri analizi ve HFD işlemleri uygulanmış genlik ve frekans değerlerinin belirlenmesi yapılmıştır. LVDT zaman serileri grafiği TPS verilerinin zaman serileriyle karşılaştırılmıştır. Her iki veri grubu için HFD dönüşümler sonucunda frekanslar aynı olarak tespit edilmiştir. GPS sonuçlarına ilişkin TPS grafikleri Şekil 5.39’da verilmiştir. TPS ölçümlerine

ilişkin LVDT sonuçları ve farklar Çizelge 5.8’de verilmiştir. LVDT sonuçlarına ilişkin grafikler ise Ek-F’de yer almaktadır.



Şekil 5.39 TPS yöntemi GPS ölçümlerinin genlik ve frekans değerleri



Şekil 5.39 TPS yöntemi GPS ölçümlerinin genlik ve frekans değerleri (devamı)

Çizelge 5. 8 TPS ölçümleri sonuçların özet tablosu

Ölçüm-Türü	GPS SONUÇLARI		LVDT SONUÇLARI		FARKLAR	
	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)	GENLİK (mm)	Frekans (Hz)
TPS1	16.8	0.27	15.9	0.26	-0.9	-0,01
TPS2	37.2	0.26	36.1	0.25	-1.1	-0,01
TPS3	70.3	0.26	71.6	0.25	1.3	-0,01
TPS4	72.2	0.25	73.4	0.26	1.2	0,01
TPS5-6	7.7	0.26	8.7	0.25	1.0	-0,01
TPS7-8	3.5	0.46	4.5	0.50	1.0	0,04
TPS9-10	5.0	0.46	6.0	0.50	1.0	0,04
TPS11	70.0	0.45	72.0	0.50	2,0	0,05

TPS yöntemiyle yapılan farklı salınımdaki tüm ölçüm yöntemlerinde frekans değerleri yüksek doğrulukla tespit edilebilmesine rağmen titreşimlerin genliklerinin belirlenmesi noktasında LVDT ölçümlerine göre farklar tespit edilmiştir. Test ölçümleriyle yapılan değerlendirmelerde verilerin kendi içindeki iç doğrulukları cm altı hassasiyetle belirlenebildiği için sonuç doğruluğu oldukça yüksektir. Ayrıca TPS ölçümleri sırasında salınımlara başlamadan ve salınımlar bittikten sonra GPS ile durağan durumda veri toplanmıştır. Sarsma tablasının hareketsiz olduğu bu süreye ilişkin veriler zaman serileri analiziyle belirlenerek genlik ve frekans değerleri hesaplanmıştır. Bu verilere ilişkin grafikler Ek-C'de yer almaktadır. Burada salınının beklenen frekans ve genlik değeri 0'dır. Bu değerlerde sıfırdan sapmalar, ölçümüm durağan konumundaki hataları olarak belirlenmiştir ve referans değeri olarak alınabilir. Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere TPS ölçümlerine ait durağan zamanların ortalama genliği 1.6 mm ve frekansı 0.03 Hz olarak bulunmuştur. Bu değerler ile hareket esnasında hesaplanan genlik ve frekans değerleri arasındaki farklar birbirine çok yakın olduğu için bu farklar anlamsızdır.

10 - 20 katlı yüksek bir binanın doğal frekansı maksimum 0.5 - 1 Hz aralığındadır. (Arnold [110]). 15 Temmuz Şehitler Köprüsü gibi asma köprüler için ise maksimum doğal frekans 1.2 Hz'dir. Nyquist kriterine göre örnekleme hareketin maksimum frekansının iki katı olarak seçilmelidir. Ancak, ölçme uygulamada kullandığımız robotik total stationın örnekleme frekansı 1 Hz olduğundan, 0.5 Hz frekans değerinden daha büyük frekans değerlerini veya hareketlerini belirlemek mümkün olmayacaktır. Bu nedenle yapılacak analizlerde yapıların ilk modları ve frekansları elde edilmiş olacaktır. Yüksek yapılarda ilk

mod toplam tepkinin yaklaşık %90'ını içerdiği için, bu yapıların maksimum frekansı 0.5 Hz kabul edilebilir. Böylece, TPS yönteminin mühendislik yapılarının hareketlerini belirlemede dikkate değer bir bilgi kaybı olmaksızın yeterli olabileceği söylenebilir.

Fakat yapılan ölçümler göstermiştir ki bu yöntem küçük frekans ve küçük genlikler için doğru sonuçlar vermektedir. Bu nedenle küçük frekanstaki yapısal titreşimlerin belirlenmesinde kullanılabilmesine karşın deprem anı gibi yüksek frekansların tespit edildiği çalışmalarda etkin bir şekilde kullanılamamaktadır.





### SONUÇ VE ÖNERİLER

Büyük mühendislik yapıları rüzgâr kuvveti, sıcaklık değişimleri ve trafik yükü gibi büyüklüklerin değişimlerden, deprem gibi doğal afetlerin yarattığı yüksek frekanstaki salınımlardan etkilenerek bu değişimlere farklı büyüklük ve şekillerde tepki göstermektedirler. Örnekleme frekansı yüksek olan uygun jeodezik ölçüm donanımları kullanılarak, yapılarda meydana gelen bu tepkiler doğru ve ayrıntılı olarak tanımlanabilmektedir. Ölçülen gözlem verilerinin zamana bağlı grafiklerinin elde edilmesiyle ve ayrıca frekans bölgesinde analizlerinin yapılmasıyla yapı davranışları hakkında genel bir bilgi elde edilmektedir. Edinilen bu bilgiler sonucunda mühendislik yapılarının hasar tespiti yapılarak kalan ömürleri tespit edilip, gerekli güçlendirmeler tamamlanarak olası bir afet durumunda en az kaybın verilmesini sağlanabilmektedir.

Mühendislik yapılarının davranışlarının izlenmesi çalışmalarında jeodezik ölçüm yöntemlerinin etkin olarak kullanılıp kullanılmayacağını tespit edebilmek için Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüs alanında bir dizi saha testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, yapısal deformasyonların belirlenmesinde güncel olarak kullanılan Küresel Konum Belirleme Tekniği (GPS)'in kullanımıyla sarsma tablası üzerinde gerçekleştirilen farklı testlerin sonuçları incelenmiştir. Çalışmada üç farklı çeşit GPS uygulaması ve kapsamlı bir TPS uygulaması olmak üzere toplamda 4 farklı yöntemle sarsma tablası testi gerçekleştirilmiştir. TPS ölçümleri ve GPS ölçümlerinden, RTK- GPS ölçümleri, (VRS-FKP-MAC-YLDZ), PPP-GPS ölçümleri, KPP-GPS ölçümleri kullanılarak farklı frekans ve genlikteki salınımların sonuçları kendi içlerinde ve birbirleri arasında karşılaştırılmıştır. Bu uygulamayla yapı dinamiklerinden olan doğal frekanslar belirlenmiş

ve GPS yöntemlerinin yapı dinamik parametrelerini belirleme kabiliyetleri açısından avantaj ve dezavantajları katkıları ve eksikliklerinin bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Her bir çalışma sonucunda elde edilen araştırma sonuçları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

4 Farklı ölçüm tekniğiyle elde edilen, birçok farklı salınımına ilişkin verilerden anlamlı sonuçlar elde edebilmek ve bu sonuçları yorumlayabilmek amacıyla bu verilerin zaman bölgesinde incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla tüm veri setlerine zaman serileri analizi uygulanmış; trend bileşeni analizi, regresyon analizi, filtreleme işlemleri yapılmış, sonuç grafiklerinden salınımın özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Zaman serileri analizi sonucu elde edilen grafiklerden hareketlerin salınımına ilişkin bir ön bilgi elde edilebilse de, salınımın sayısal büyüklükleri için kesin bir bilgi elde edilememektedir. Doğal frekanslarının belirlenmesi sinyalin içerdiği frekans bilgisi ile mümkün olmaktadır. Bir zaman-genlik gösterimini seride periyodik bir yapının olup olmadığını sezgisel olarak gösterebilmektedir fakat bu periyodik hareketin genlik ve frekansının sayısal olarak belirlenmesi harmonik analiz veya frekans bölgesinde spektral analiz yapılmasını gerektirmektedir. Bu amaçla zaman serileri oluşturulmuş veri setlerine Hızlı Fourier Dönüşümü yapılarak hareketlere ilişkin genlik ve frekans değerleri belirlenir HFD öncesi zaman serilerine Hanning Pencereleme fonksiyonu uygulanır. Fakat test verilerine uygulanan Filtreleme ve Pencereleme algoritmaları sinyallerdeki gürültüleri gidererek frekans sonuçlarını netleştirirse de, salınımı bastırarak hareketin genliğini düşürmekte, sonuç gerçekliğini azaltmaktadır. Bu filtre ve pencereleme fonksiyonları çeşitli veri setlerine ayrı ayrı uygulandığında, serilerin genliklerinde yüksek geçişli filtreleme ile yaklaşık 5 mm, 3. dereceden alçak geçişli filtreleme ile yaklaşık 10 mm ve Hanning Pencereleme ile yaklaşık 7 mm'lik bir azalma olduğu görülmektedir. Sonuçların daha gerçekçi olması adına sonuç analizinde kullanılan frekans ve genlik değerleri belirlenirken pencereleme ve filtreleme algoritmaları uygulanmamıştır.

RTK ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda GPS ve LVDT verilerine birebir aynı değerlendirme prosedürleri uygulanmış ve belirlenen frekans ve genlik değerleri arasındaki farklar hesaplanmıştır. Her iki ölçüm donanımıyla da tüm ölçümler için aynı frekans değerleri elde edilmiştir. Genlik değerleri arasındaki farklar ise, VRS için 1.5 mm, FKP için 2 mm, MAC için 1.4 mm ve YLDZ istasyonu için - 0.7 mm olarak belirlenmiştir. PPP-GPS yöntemiyle yapılan farklı salınımdaki tüm ölçüm yöntemlerinde frekans

değerleri yüksek doğrulukla tespit edilebilmesine rağmen titreşimlerin genliklerinin belirlenmesi noktasında LVDT ölçümlerine göre farklar tespit edilmiştir fakat test verileriyle yapılan bu değerlendirmelerde verilerin kendi iç doğrulukları cm altı hassasiyetle belirlenebildiği için bu farklar oldukça düşüktür. Ayrıca sarsma tablasının hareketsiz olduğu bu süreye ilişkin veriler zaman serileri analiziyle belirlenerek genlik ve frekans değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile hareket esnasında hesaplanan genlik ve frekans değerleri arasındaki farklar birbirine çok yakın olduğu için bu farkların anlamsız olduğu belirlenmiştir. RTK ölçümlerine ilişkin 20 Hz'lik verinin 10 Hz'lik veri şeklinde azaltılarak genlik ve frekansların incelenmesi sonucunda, 20 Hz örnekleme frekansından 10 Hz örnekleme frekansına düşüldüğünde herhangi bir veri kaybı yaşanmayıp 5Hz'lik hareketin LVDT sonuçlarına göre hesaplanan farklarında bir kötüleşme olmadığı tespit edilmiştir. Büyük mühendislik yapılarının doğal frekansları 0.5 - 1 Hz aralığındadır. 20 Hz ve ya 10 Hz örnekleme frekansıyla belirlenmiş, 5 Hz'lik frekanstaki salınımların RTK ölçüm yöntemleriyle yüksek doğrulukla belirlenmesi, RTK-GPS yönteminin yapısal davranışların gözlenmesinde etkin olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca şiddetli depremler esnasında yüksek yapılar ve köprüler gibi büyük mühendislik yapılarının gözlemlenen yüzey titreşimleri 1 Hz'lik örnekleme frekansıyla belirlenebilmektedir. Bu çalışmada yapılan RTK uygulamalarının sonuçları göstermiştir ki 5 Hz frekanstaki bir deprem anı RTK-GPS yöntemiyle belirlenebilmektedir. Bu nedenle yapısal titreşimlerin izlenmesinde ve deprem gibi bir afet anındaki hareketin tespitinde RTK GPS yöntemi etkin bir şekilde kullanılabilmektedir.

7 farklı genlik ve frekansla gerçekleştirilen PPP uygulamalarında sarsma tablasının 0.2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz ve son olarak 5 Hz'lik frekanslarla salınım yapması istenmiştir. Bu uygulamaların LVDT sonuçlarına bakıldığında frekansın arttırılmasıyla başlangıçta referans olarak alınan genliğin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni sarsma tablasının maksimum hareket sağlayabileceği frekans-genlik kapasitesi olduğu belirtilmiştir. GPS sonuçlarının CSRS-PPP yazılımının PPP modüllüyle değerlendirilmesi sonucunda belirlenen tüm frekansların LVDT sonuçlarıyla aynı olduğu genlik değerleri arasındaki farkların ise yaklaşık 4.5 mm olduğu belirlenmiştir. Test verileriyle yapılan bu değerlendirmelerde verilerin kendi iç doğrulukları cm altı hassasiyetle belirlenebildiği için bu farklar oldukça düşüktür. Bu değerler sarsma tablasının hareketsiz olduğu bu

süreye ilişkin veriler zaman serileri analiziyle belirlenerek genlik ve frekans (4.8 mm - 0.02 Hz) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile hareket esnasında hesaplanan genlik ve frekans değerleri arasındaki farklar birbirine çok yakın olduğu için bu farkların anlamsız olduğu belirlenmiştir. PPP yönteminin de RTK yönteminde olduğu gibi yüksek frekansları belirleyebildiği kanıtlandığı için mühendislik yapılarının izlenmesinde ve deprem anının belirlenmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceği söylenebilmektedir.

KPP uygulamasında 1 Hz'lik veri statik modda toplanmış, aynı zamana ilişkin YLDZ referans istasyonlarının ve sarsma tablasının yakınına kurulan iki adet Thales marka GPS alıcısının 1 Hz'lik RNX verileri de alınarak GAMIT/GLOBK yazılımının TRACK modülü ile değerlendirilmiştir. 0.25 Hz'lik frekans değeri doğru olarak belirlenirken LVDT ve GPS ölçümlerinin karşılaştırılmasıyla hesaplanan genlik değerleri arasındaki fark 2.5 mm olarak bulunmuştur. Bu değerler sarsma tablasının hareketsiz olduğu bu süreye ilişkin veriler zaman serileri analiziyle belirlenerek genlik ve frekans (2 mm - 0.01 Hz) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile hareket esnasında hesaplanan genlik ve frekans değerleri arasındaki farklar birbirine çok yakın olduğu için bu farkların anlamsız olduğu belirlenmiştir.

Son olarak 0.25 Hz ve 0.50 Hz frekansları arasında toplamda 8 farklı frekans ve genlikle TPS ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm verileri Polar 1 Hz örnekleme frekansıyla toplanmıştır. Tüm frekans değerleri doğru olarak belirlenmiş hesaplanan genlik değerleri arasındaki farklar kontrol edilmiştir. Büyük mühendislik yapıları için maksimum doğal frekans yaklaşık 1 Hz'dir. Nyquist kriterine göre örnekleme hareketin maksimum frekansının iki katı olarak seçilmelidir. Ancak, ölçme uygulamada kullandığımız robotik total stationın örnekleme frekansı 1 Hz olduğundan, 0.5 Hz frekans değerinden daha büyük frekans değerlerini veya hareketlerini belirlemek mümkün olmayacaktır. Bu nedenle yapılacak analizlerde yapıların ilk modları ve frekansları elde edilmiş olacaktır. Yüksek yapılarda ilk mod toplam tepkinin yaklaşık %90'ını içerdiği için, bu yapıların maksimum frekansı 0.5 Hz kabul edilebilir. Böylece, TPS yönteminin mühendislik yapılarının hareketlerini belirlemede dikkate eder bir bilgi kaybı olmaksızın yeterli olabileceği söylenebilir. Fakat yapılan ölçümler göstermiştir ki bu yöntem küçük frekans ve küçük genlikler için doğru sonuçlar vermektedir. Bu nedenle küçük frekanstaki yapısal

titreşimlerin belirlenmesinde kullanılabilmesine karşın deprem anı gibi yüksek frekansların tespit edildiği çalışmalarda etkin bir şekilde kullanılamamaktadır.

Yapılan bu uygulamaların sonucunda mühendislik yapıların izlenmesinde jeodezik ölçü yöntemlerinden RTK-GPS, PPP-GPS ve KPP-GPS yönteminin etkili bir şekilde kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Bu ölçüm yöntemlerinin sarsma tablası tarafından oluşturulan yüksek frekanslardaki salınımları bile doğru olarak tespit edebilmesi, deprem şiddeti altındaki yapının davranışlarının GPS ölçüm yöntemleriyle belirlenebileceğini kanıtlamıştır. GPS ölçüm yöntemlerinin yapı sağlığı izlenmesi çalışmalarında etkin olarak kullanılabilirliği, eşzamanlı veri alımı ve değerlendirilmesi sonucu anlık konum bilgisi sağlaması ile afet yönetim sistemine büyük katkı sağlayabileceği gösterilmiştir.

GPS ölçüm yöntemleriyle yapılan gözlemlerden daha hassas sonuçlar alabilmek için sinyal çok yolluluk hatası gibi gürültülerden arındırılması bunun için çeşitli sinyal filtreleme algoritmalarının kullanılması gerekmektedir. Diğer bir alternatif bu yöntemlerin eğim ölçer gibi çok az gürültü barındıran sensörlerle entegre ederek kullanılmasıdır. KPP ve PPP yöntemleriyle yapılan ölçümlerden daha yüksek doğruluklar elde edebilmek içinse gözlem süreleri arttırılmalıdır.

Robotik total station ile yapılan ölçümler sonucunda ise bu yöntemin mühendislik yapılarının davranışlarının izlenmesinde etkin olarak kullanılacak bir yöntem olduğu kanıtlanmakla birlikte, yöntemin düşük frekans ve genlik aralıklarında çalışabilme kapasitesi nedeniyle, deprem şiddeti altındaki yapının gözlenmesinde kullanılamayacağı belirtilmiştir.

GPS ve TPS ölçülerinin yapı dinamiklerini belirleme yönünden katkıları, eksiklikleri ve YSi çalışmalarındaki önemi bu proje ile ortaya konulmuştur. Frekans alanındaki sonuçlara göre, yapının ilk moda ait doğal frekansının belirlenmesi açısından GPS etkili sonuçlara sahiptir fakat GPS uydu bağımlı bir konum belirleme sistemi olması nedeniyle açık bir gök görüşü zorunludur ve buda büyük mühendislik yapılarının en üst noktasında GPS ölçmesi yapmayı gerektirir. GPS ile yalnızca yapının üst bölgesinde gerçekleşen modlara ait hareketler belirlenebilir ve frekanslar hesaplanabilir. Bu ve diğer problemlerin aşılabilmesi içinse GPS'in eğim ve ivme sensörü gibi donanımlarla birleştirilmesiyle

oluşacak bir hibrit ölçme sisteminin kullanılması gerekmektedir. Oluşturulacak böyle bir hibrit sistemle daha etkili sonuçlar alınacağı öngörülmektedir.



## KAYNAKLAR

---

- [1] Im, S.B., Hurlebaus, S. M. ve Kang, Y.J. M., (2013). "Summary Review of GPS Technology for Structural Health Monitoring", J. Struct. Eng. ,2013(139):1653-1664.
- [2] Del Grosso, A. E. (2014). "Structural Health Monitoring Standards", In IABSE Symposium Report 102( 6): 2991-2998 International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [3] Wells, D., Beck, N., Kleusberg, A., Krakiwsky, E. J., Lachapelle, G., Langley, R. B. Ve Delikaraoglu, D., (1987). "Guide to GPS Positioning", In Canadian GPS Assoc.
- [4] Bergland, G. D., (1969). "A Guide Tour of the Fast Fourier Transform", IEEE Spectrum, 6:41-55.
- [5] Housner, G., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F. ve Yao, J. T., (1997). "Structural Control: Past, Present, and Future", Journal of Engineering Mechanics, 123(9): 897-971.
- [6] Farrar, C. R. ve Worden, K. (2007). "An Introduction to Structural Health Monitoring", Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365(1851): 303-315.
- [7] Van der Auweraer, H. ve Peeters, B., (2003). "International Research Projects on Structural Health Monitoring: An Overview", Sage Publications, 2(4): 341–358.
- [8] ISIS CANADA, Guidelines for Structural Health Monitoring, Design Manual No. 2, September 2001.
- [9] Lovse, J. W., Teskey, W. F., Lachapelle, G. ve Cannon, M. E., (1995). "Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology", Journal of Surveying Engineering, 121(1): 35-40.
- [10] Uluişik, P., Erkaya, H., Hoşbaş, R., Soycan, M., Akpınar, B., Aykut, N. ve Poyraz, F.,(2005). "Yüksek Binaların Hareketliliğinin GPS İle İzlenmesi,2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu,İTÜ – İstanbul.

- [11] Mekik, Ç., Görmüş, K. ve Kutoğlu, H.,(2005), "Gerçek Zamanlı Kinematik (GZK) GPS ile Köprü Salınım ve Titreşimlerinin Belirlenmesi,2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu,İTÜ – İstanbul.
- [12] Erdoğan, H., (2006), Mühendislik Yapılarındaki Dinamik Davranışların Jeodezik Ölçmelerle Belirlenmesi,Doktora Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.
- [13] Erdoğan, H., Akpınar, B., Gülal, E. ve zumber, E., (2009). "Asma Köprülerin Titreşimlerinin GPS ile İzlenmesi", TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 11-15 Mayıs, Ankara.
- [14] Erdoğan, H. ve Gülal, E., (2009). "Boğaziçi Köprüsü hareketlerinin zaman dizileri analizi ile belirlenmesi", HKM, Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi (1):100.
- [15] Erdoğan, H., Akpınar, B.,Gülal, E. ve Ata, E. (2007). "Monitoring The Dynamic Behaviors Of The Bosphorus Bridge By GPS During Eurasia Marathon", Nonlinear Processes in Geophysics, 14(4): 513-523.
- [16] Yiğit, C. Ö., (2010). Yüksek Yapıların Farklı Sensörler ile Tam Ölçekli İzlenmesi ve Dinamik Parametrelerin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [17] Yiğit, C. O., Li, X., İnal, C., Ge, L. ve Yetkin, M. (2010). "Preliminary Evaluation of Precise Inclination Sensor and GPS for Monitoring Full-scale Dynamic Response of a Tall Reinforced Concrete Building", Journal of Applied Geodesy, 4(2) :103-113.
- [18] Yiğit, C. Ö. ve İnal, C. (2011). "Yüksek Bir Binanın Rüzgar Tepkisinin Farklı Sensörler ile Tam Ölçekli İzlenmesi ve Sensör Entegrasyonuna İlişkin Ön Analiz Sonuçları", HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 1: 30-40.
- [19] 115y250 Tübitak Projesi, <http://115y250.com>, 10 Kasım 2016.
- [20] Wang, G., Blume, F., Meertens, C., Ibanez, P. ve Schulze, M. (2012). "Performance of High-rate Kinematic GPS During Strong Shaking: Observations from Shake Table Tests and The 2010 Chile Earthquake", Journal of Geodetic Science, 2(1): 15-30.
- [21] Önen, Y. H., Dindar, A. A., Gülal, E., Gürkan, G., Gürkan, K. ve Akpınar, B., (2014). "Use of High-Frequency GNSS Sensors in Dynamic Motions", Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 25-29 Ağustos, İstanbul.
- [22] Ou, J. ve Li, H., (2010). "Structural Health Monitoring in Mainland China: Review and Future Trends", Structural Health Monitoring, 9(3): 219-231.
- [23] Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B. ve Shevitz, D. W.,(1996). "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review", Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS.
- [24] Boller, C. ve Buderath, M., (2007). "Fatigue in Aerostructures—Where Structural Health Monitoring Can Contribute to A Complex Subject", Phil. Trans. R. Soc. A , 365(1851): 561–587. (doi:10.1098/rsta.2006.1924)



- [25] Brownjohn, J. M. W., (2007). "Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure", *Phil. Trans. R. Soc.*, 365(1851): 589–622.
- [26] Celebi, M., (2000). "GPS in Pioneering Dynamic Monitoring of Long-period Structures.", *Soil. Dyn. Earthquake Eng.*, 20(5–8): 477–483.
- [27] Lee, J. J. ve Shinozuka, M., (2006). "A Vision-based System for Remote Sensing of Bridge Displacement." *NDT Int.*, 39(5): 425–431.
- [28] Park, G. ve Inman, D. J., (2007) "Structural Health Monitoring Using Piezoelectric Impedance Measurements". *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365(1851): 373–392.
- [29] Fujino, Y., Abe, M., Shibuya, H., Yanagihara, M., Sato, M., Nakamura, S. I. ve Sakamoto, Y. (2000). "Forced and Ambient Vibration Tests and Vibration Monitoring of Hakucho Suspension Bridge", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1696): 57-63.
- [30] Masri, S. F., Sheng, L.-H., Caffrey, J. P., Nigbor, R. L., Wahbeh, M. ve Abdel-Ghaffar, A. M. (2004). "Application of A Web-enabled Real-time Structural Health Monitoring System for Civil Infrastructure Systems", *Smart Mater. Struct.*, 13(6): 1269–1283.
- [31] Leica Geosystems (2007). *Nivel200 User Manual*, AG. Switzerland.
- [32] Teague, E. H., How, J. P., Lawson L. G., ve Parkinson, B. W. (1995). "GPS as a structural deformation sensor", *AIAA Guidance, Navigation and Control Conf.*, Baltimore, 787–795.
- [33] Wang, J., Tsujii, T., Rizos, C., Dai, L. ve Moore, M. (2001). "GPS and Pseudo-Satellites Integration for Precise Positioning", *Geomatics Res. Australasia*, 74: 103–117.
- [34] Norgard, P. (1996). "Deformation Survey of The Storebaelt Bridge—GPS Shows Its Merits", *Geomatics Info. Mag.*, 10(4): 37–39.
- [35] 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." *J. Struct. Eng.*, 132(8): 1242–1253.
- [36] Duff, K. ve Hyzak, M. (1997). "Structural Monitoring with GPS", *Public Roads*, 60(4).
- [37] Ogaja, C. ve Satirapod, C., (2007). "Analysis of High-frequency Multipath in 1-Hz GPS Kinematic Solutions." *GPS Solutions*, 11(4): 269–280.
- [38] Gili, J. A., Corominas, J. ve Rius, J., (2000). "Using Global Positioning System Techniques in Landslide Monitoring" ,*Eng. Geol.*, 55(3): 167–192
- [39] Rucker W., Hille F. ve Rohrmann R., *Guideline for Structural Health Monitoring, SAMCO Final Report F08b*, 2006.

- [40] Russian Federation, National Standard of the Russian Federation, GOST R 53778- 2010, Building and Structures, Technical Inspections and Monitoring Regulations (English translation), 2010.
- [41] Österreichisches Forschungsgesellschaft, RVS 13-03-01, Quality Assurance for Structural Maintenance, Surveillance, Checking and Assessment of Bridges and Tunnels, Monitoring of Bridges and other Engineering Structures (in German), 2012.
- [42] OU J., oral communication, 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, September 10-12, 2013.
- [43] ISO 14963:2003, Mechanical Vibration and Shock – Guidelines for dynamic tests and investigations on bridges and viaducts.
- [44] ISO 18649:2004, Mechanical Vibrations – Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges.
- [45] ISO 16587:2004, Mechanical Vibration and Shock – Performance parameters for condition monitoring of structures.
- [46] İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği, (2008). Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Boğaziçi Üniversitesi Çengelköy, İstanbul.
- [47] Foote, P.D., (2000). "Structural Health Monitoring: Tales from Europe", SHM-2000, 24–35.
- [48] Allen, G. ve Jarman, R. (1999). "Collaborative R&D: Manufacturing's New Tool" 3, Wiley.
- [49] Lau, C.K., Mak, W.P.N., Wong, K.Y., Chan, W.Y.K. ve Man, K.L.D., (2000). "Structural Health Monitoring of Three Cable-supported Bridges in Hong Kong", SHM-2000, 450–460.
- [50] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ve Wasle, E., (2007). GNSS–global Navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more: Springer Science & Business Media.
- [51] Global Positioning System, <http://www.gps.gov>, 10 Eylül 2016.
- [52] Polischuk, G. M., Kozlov, V. I., Ilitchov, V. V., Kozlov, A. G., Bartenev, V. A., Kossenko, V. E. Ve Tyulyakov, A. E. (2002). "The Global Navigation Satellite System GLONASS: Development and Usage in the 21st Century", Russian Aerospace Agency Moscow (RUSSIA).
- [53] Fairheller S. ve Clark R., (2006): "Other satellite navigation systems", Kaplan ED, Hegarty CJ (eds): Understanding GPS – principles and applications, 2nd edition, Artech House, Norwood: 595–634.
- [54] Global Navigation Satallite System, <https://www.glonass-iac.ru/en>, 10 Eylül 2016.
- [55] European GNSS Agency (GSA) , <https://www.gsa.europa.eu>, 10 Eylül 2016.
- [56] BeiDou Navigation Satellite System, <http://en.beidou.gov.cn>, 10 Eylül 2016.

- [57] Gülal, E., (2000). GNSS Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [58] Kahveci, M. ve Yıldız, F., (2001) “ Global Konum Belirleme Sistemi Teori-Uygulama”, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- [59] Hastaoğlu,K.,(2009).GPS Hızlı Statik Yöntem ile Heyelanların İzlenebilirliğinin Araştırılması :Sivas Koyun Hisar Heyelanı Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [60] Zumberge J.F., Heflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M. ve Webb F.H., (1997). “Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks”, J.Geophys. Res., 102(B3): 5005-5017.
- [61] Altamimi, Z., Collilieux, X. Ve Métivier, L., (2011). “ITRF2008: An Improved Solution of The International Terrestrial Reference Frame”, Journal of Geodesy 85(8): 457-473 .
- [62] Alçay, S., Yiğit, C. Ö. Ve Ceylan, A. (2013). “CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS Web Tabanlı Yazılımların Statik PPP Modüllerinin Karşılaştırılması”, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5(1):1-12.
- [63] Gao, Y. ve Shen, X., (2002). "A New Method for Carrier-Phase-Based Precise Point Positioning", Navigation, 49: 109-116.
- [64] Gürtürk, M., (2016), Hava GNSS Verilerinin Değerlendirilmesinde Hassas Kinematik Nokta Konumlama,Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.
- [65] Alkan, R.M. ve Kalkan Y., (2011). “Precise Point Positioning PPP (Hassas Nokta Konumlama) Tekniğinin Hidrografik Ölçmelerde Kullanılabilirliği”, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı 18-22 Nisan 2011, Ankara.
- [66] Píriz, R., Mozo, A., Navarro, P. Ve Rodríguez, D., (2008). “MagicGNSS: Precise GNSS Products Out of The Box”, Proc., ION GNSS 21st Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Institute of Navigation, Manassas, VA, 1242–1251.
- [67] Héroux, P., Caissy, M. ve Gallance, J., (1993). “Canadian Active Control System Data Acquisition and Validation”, Proc., 1993 IGS Workshop, Univ. of Berne, Berne, Switzerland, 49–58.
- [68] Alçay, S., Yiğit, C. Ö. Ve Ceylan, A. (2013). “CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS Web Tabanlı Yazılımların Statik PPP Modüllerinin Karşılaştırılması”, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5(1):1-12.
- [69] El-Rabbany, A., (2006). “Introduction to GPS-The Global Positioning System” Artech House, Boston, London.
- [70] Erdal, B., (2009). Rtk Gps Yönteminin Konumlama Hassasiyeti ve RTK GPS’e Etki Eden Hata Faktörler,Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

- [71] Gökalp, E., Güngör, O. (1999). "GPS'in Kent Bilgi Sistemi Uygulamalarındaki ve Önemi", Yerel Yönetimlerde Kent Bilgi Sistemi Uygulamaları Sempozyumu, 307-316, Trabzon.
- [72] Leick, A. (2004). GPS Satellite Surveying, Wiley, USA, 72.
- [73] Devenci, B., (2006). Kadastral Ölçmelerde Gerçek Zamanlı GPS (RTK GPS) Yöntemi İle Elektronik Ölçme Yönteminin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [74] Rizos, C., (1999), "Satellite Navigation and Positioning Group (SNAP): Principles and Practice of GPS surveying."
- [75] Hastaoğlu, K., (2009). GPS Hızlı Statik Yöntem ile Heyelanların İzlenebilirliğinin Araştırılması :Sivas Koyun Hisar Heyelanı Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [76] Aydın, Ö., (2004), GPS Tekniği Ders Notları, Y. T. Ü. Yayınları, İstanbul.
- [77] Eren, K. ve Uzel, T., (1995), GPS Ölçmeleri, Y.T.Ü. Matbaası, Yayın No: 301, İstanbul.
- [78] Taktak, F., Tiryakioğlu İ. ve Yılmaz İ. (2005). "GPS Kullanılan Elektromanyetik Dalgaların İnsan Sağlığına etkilerin İrdelenmesi", 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu 23-25 Kasım 2005, İTÜ, İstanbul.
- [79] Zengin, H. ve Yeşil, A. (2006). "Comparing the Performances of Real-Time Kinematic GPS and A Handheld GPS Receiver under Forest Cover", Tübitak Yayınları, 30:101-110.
- [80] Arslanoğlu, M. ve Mekik, Ç. (2003). "Gerçek Zamanlı Kinematik GPS Konumlarının Doğruluk Analizi ve Bir Uygulama", 9. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 549-558, Ankara.
- [81] Han, S. ve Rizos, C., (2000). "Airborne GPS Kinematic Positioning and Its Application to Oceanographic Mapping", Earth, planets and space, 52: 819-824.
- [82] Gao, Y., Li, Z. ve McLellan, J. F. (1997). "Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-level Positioning and Navigation", Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation , 1305-1313.
- [83] Yıldırım, Ö., Bakıcı, S. ve Mekik, Ç., (2011). "TUSAGAAKTİF (CORSTR) Sisteminin Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğüne Katkıları".
- [84] Arslan, N., Aydın C., Üstün, A., & Demirel, H., (2002). "Sanal Referans İstasyonu Sistemi (VRS)", Jeodezi ve Fotogrametri Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu 16-18 Ekim 2002, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- [85] Higgins, M. B., (2002). "Australia's Changing Surveying Infrastructure from Marks in the Ground to Virtual Reference Stations", FIG XXII International Congress, April 19-26 Washington DC, USA.

- [86] Aktuğ, B., (2011). "Ağ-RTK Hesap Teknikleri (VRS, FKP, MAC)", Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2011 Yılı Bilimsel Toplantısı, 23-25 Kasım 2011, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [87] Doğan, Ç., (2014), Yol Aplikasyonu Çalışmalarında CORS'UN Uygulanabilirliğinin Test Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [88] Eren, K., Uzel, T., Gülal, E., Yıldırım, O. ve Cingöz, A., (2009). "Results from a Comprehensive GNSS Test in the CORS-TR Network: Case Study" , Journal of Surveying Engineering, 135(1): 10-18.
- [89] Sincich, T.,(1996). Business Statistics By Example, Prentice- Hall International Editions, fifth edition, USA
- [90] Kara, T., (2009), Sabit GPS İstasyonlarında Zaman Serileri Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [91] Tülücü, K., (1996), "Uygulamalı Hidroloji", Ç.Ü. Ziraat Fakültesi, Genel Yayın No.138, Adana.
- [92] Karabörk, M.Ç. ve Kahya, E., (1999), "Sakarya Havzasındaki Aylık Akımların Çok Degiskenli Stokastik Modellemesi", J. Of Engineering and Enviromental Science, 23:133-147, Tübitak.
- [93] Yu, Y. S., Zou, S. ve Whittemore, D.,(1993). "Non-parametric Trend Analysis of Water Quality Data of Rivers in Kansas", Journal of Hydrology, 150:61-80.
- [94] Günel, A., (2003). "Regresyon Denkleminin Basarisını Ölçmede Kullanılan Belirleme katsayısı ve Kritigi", Doğu Üniversitesi Dergisi, 4(2): 133-140.
- [95] Ljung, L., (1999). "System Identification Theory for the User", Second Edition, Prentice Hall Ptr, Sweden.
- [96] Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. ve Lane, W. L., (1980). "Applied Modeling of Hydrologic Time Series", Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, 484.
- [97] Buttkus, B., (2000), Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics. Springer, 2 edition.
- [98] Polikar, R., (1996). "Wavelet Tutorial", Part I, Part II, Part III, Iowa State University, USA.
- [99] Korürek, M., (2000), "Biyomedikal Mühendisliğinde Özel Konular", Ders Notları, İTÜ, İstanbul.
- [100] Misiti, M. (1997). Wavelet Toolbox: For Use with MATLAB; User's Guide; Version 1. MathWorks.
- [101] Ertürk S. 2005. "Sayısal İşaret İşleme", Birsen Yayınevi Ltd. Sti. , 346 sf, ISBN: 975-511-309-6, İstanbul,
- [102] Allen, R. L. ve Mills, D. (2004). Signal Analysis: Time, Frequency, Scale, and Structure. John Wiley & Sons.
- [103] Gülal E.,(2009).İski Uydu Konum Belirleme Sistemi UKBS kurulması ve Deformasyon Ölçmeleri Projesi, teknik rapor, İstanbul.

- [104] Gülal, E. , Dindar, A.A. , Akpınar, B., Tiryakioğlu, İ. , Aykut, N. O. ve Erdoğan, H. (2015). "Analysis and Management of GNSS Reference Station Data", Technical Gazette 22(2):407-414.
- [105] Alkan, R. M. ve Kalkan, Y., (2011). "Precise Point Positioning – PPP (Hassas Nokta Konumlama) Tekniğinin Hidrografik lmelerde Kullanılabilirliği ", 13.Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- [106] zdemir, E. G., (2016). İnternet Tabanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP) Yazılımlarının İrdelenmesi ve Belirsizlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [107] Tiryakioğlu İ., (2012). GNSS lleri ile Güneybatı Anadolu'daki Blok Hareketleri Ve Gerilim Alanlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [108] Herring T. A.,King R. W., Floyd M. A. ve McClusky S. C., GAMIT Reference Manuel, [http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT\\_Ref.pdf](http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT_Ref.pdf) , 15 Kasım 2016.
- [109] Track Overview, <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm> , 15 Kasım 2016.
- [110] Arnold, C., (2006). Designing for Earthquakes A Manual for Architects, 111-137.

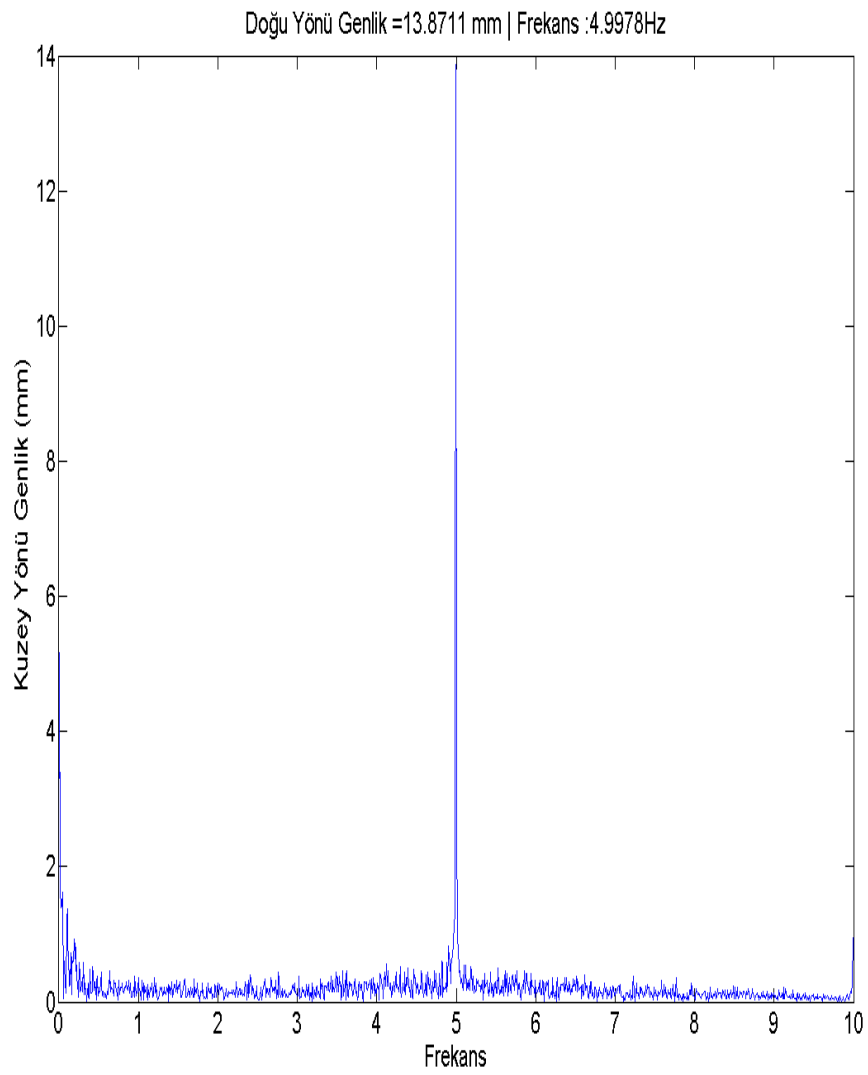
### Filtre ve Pencereleme Sonrası Ölçüm Sonuçları

GNSS TÜRÜ		GPS		LVDT		FARKLAR	
		GENLİK(mm)	FREKANS (Hz)	GENLİK (mm)	FREKANS (Hz)	GENLİK (mm)	FREKANS (Hz)
<b><u>YÜKSEK</u></b> <b><u>GEÇİŞ</u></b> <b><u>FİLTRELEME</u></b> <b><u>SONRASI</u></b>	VRS (20Hz)	9.63	5	2.05	5	7.5	0
	FKP (20Hz)	9.90	5	2.17	5	7.7	0
	MAC (20Hz)	9.90	5	2.09	5	7.8	0
	YLDZ (20Hz)	9.19	5	1.68	5	7.5	0
<b><u>ALÇAK</u></b> <b><u>GEÇİŞ</u></b> <b><u>FİLTRELEME</u></b> <b><u>SONRASI</u></b>	VRS (20Hz)	4.94	5	14.01	5	9.1	0
	FKP (20Hz)	5.08	5	14.87	5	9.8	0
	MAC (20Hz)	6.89	5	14.27	5	7.3	0
	YLDZ (20Hz)	4.60	5	14.45	5	9.8	0

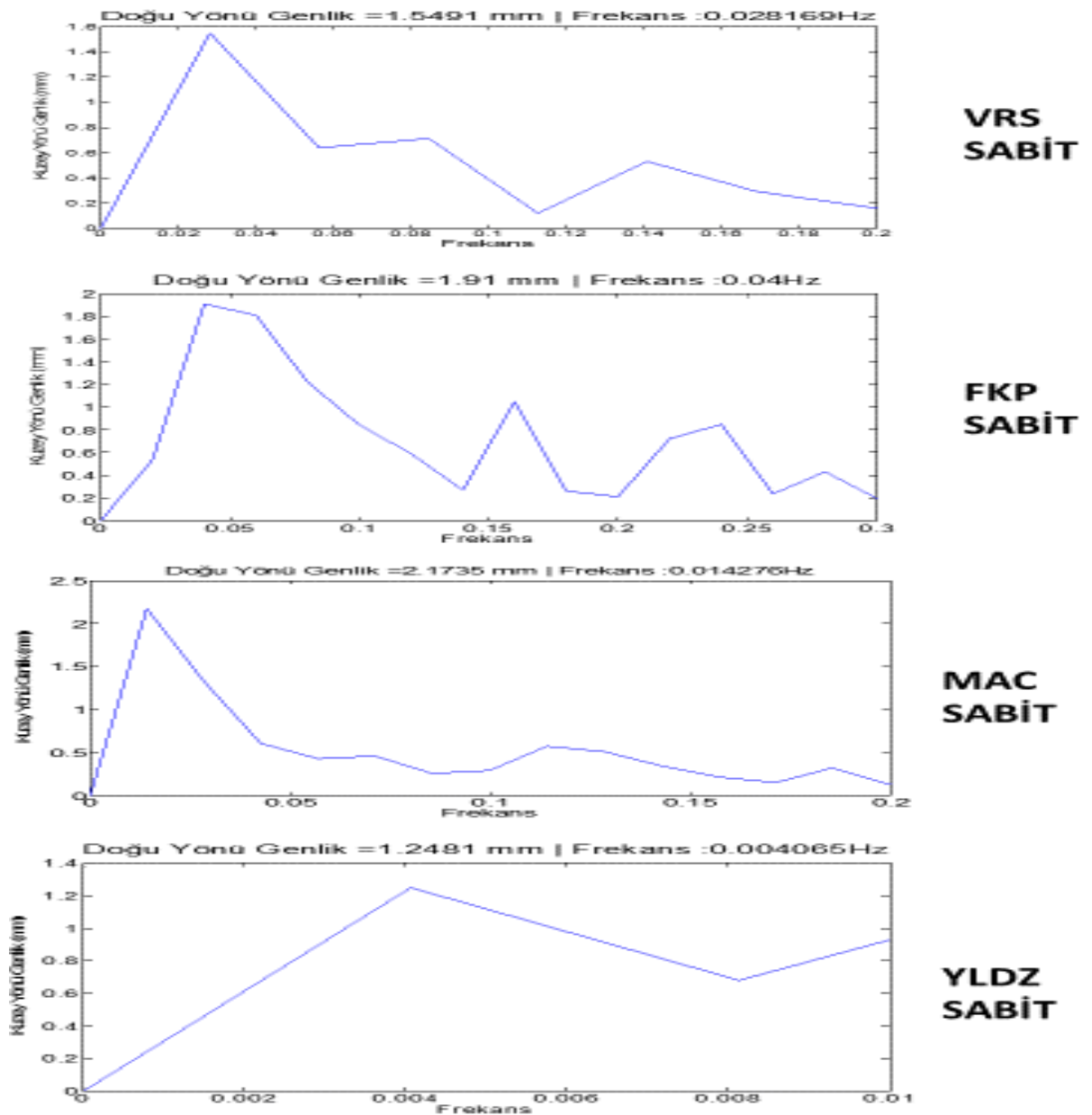
<b><u>HANNING</u></b> <b><u>PENCERELEME</u></b>  <b><u>SONRASI</u></b>	<b>VRS</b> <b>(20Hz)</b>	7.99	5	9.97	5	1.98	0
	<b>FKP</b> <b>(20Hz)</b>	8.12	5	10.29	5	2.17	0
	<b>MAC</b> <b>(20Hz)</b>	8.07	5	10.15	5	2.08	0
	<b>YLDZ</b> <b>(20Hz)</b>	7.76	5	9.24	5	1.48	0

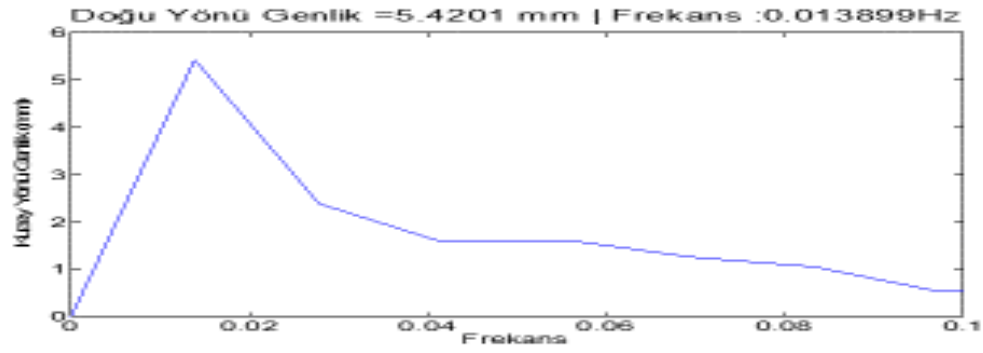




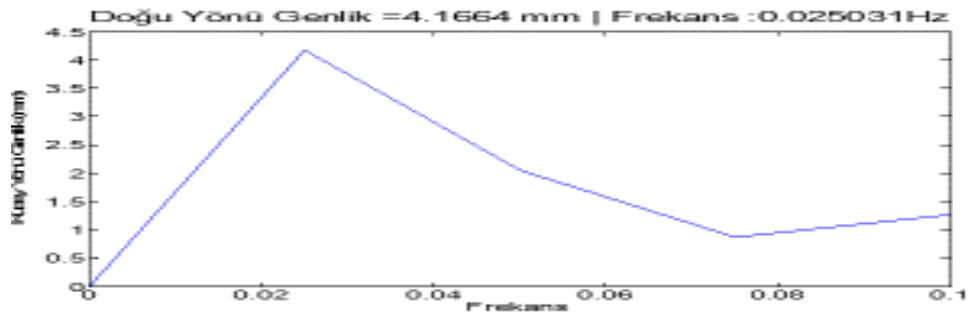
**MAC Yöntemi Gürültü İçeren Ham Verinin Genlik ve Frekans Değerleri**

## Sabit Zamanlara İlişkin Genlik ve Referans Değerleri

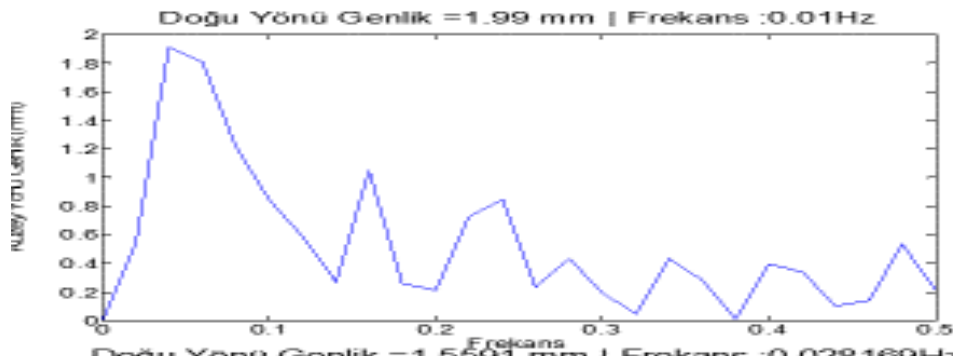




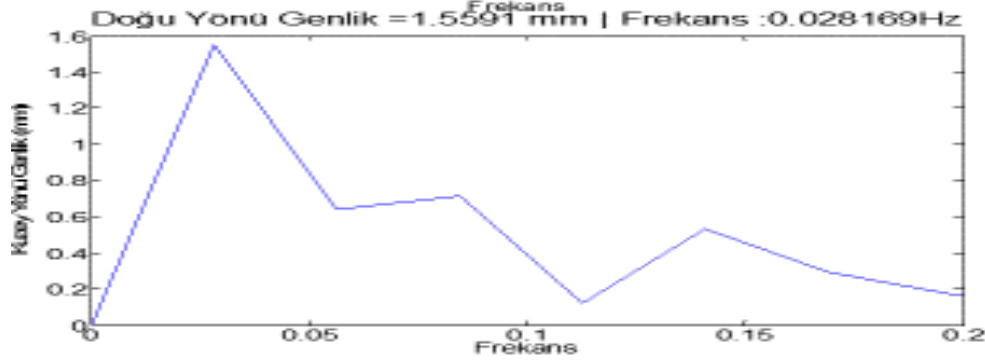
**PPP1  
Sabit**



**PPP3  
Sabit**

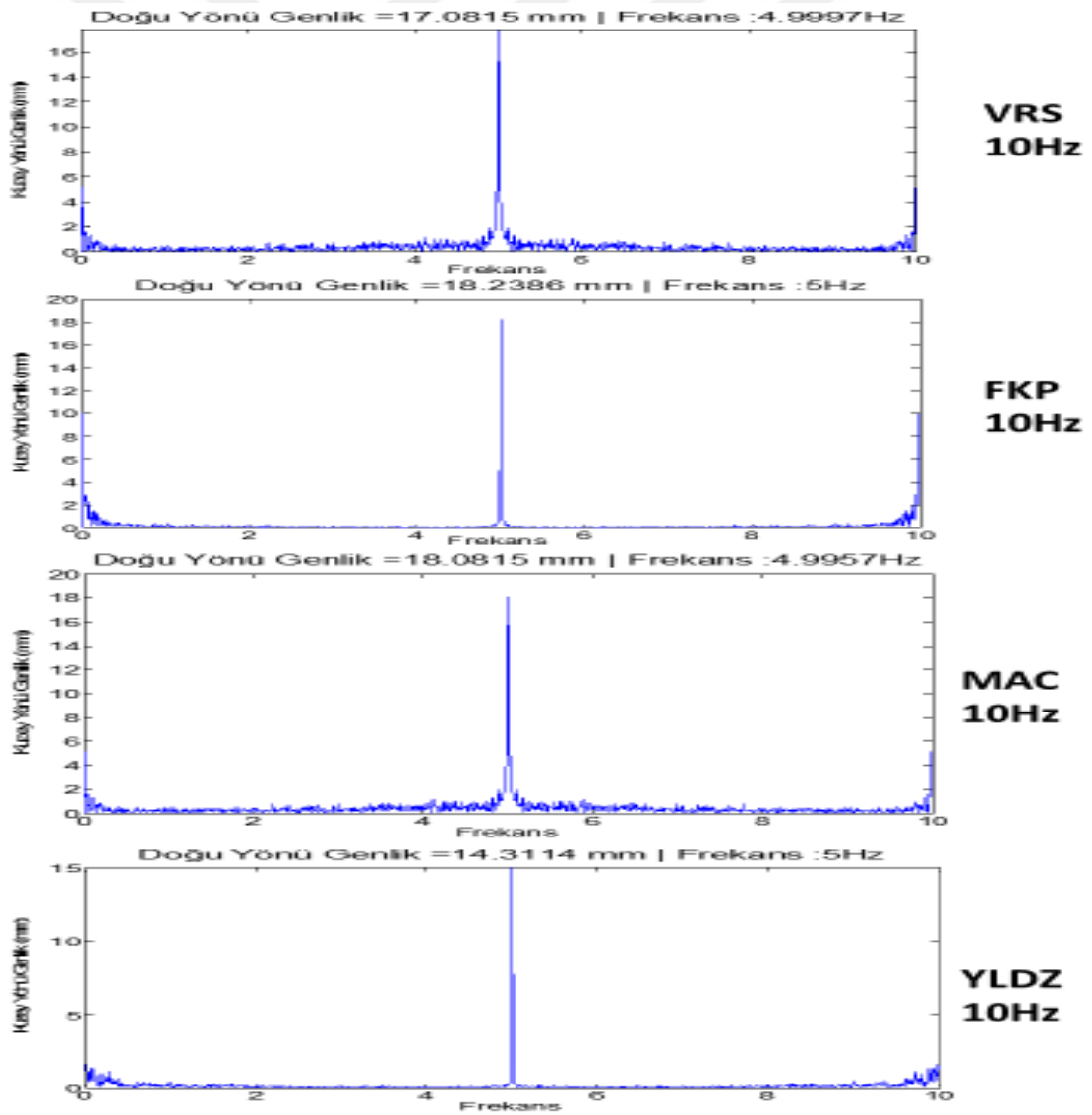


**KPP  
Sabit**

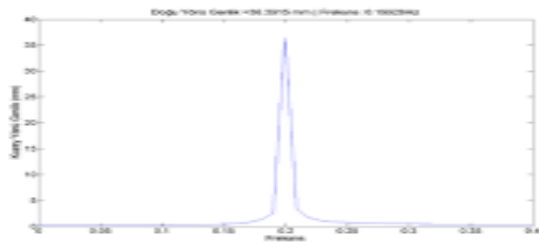


**TPS  
Sabit**

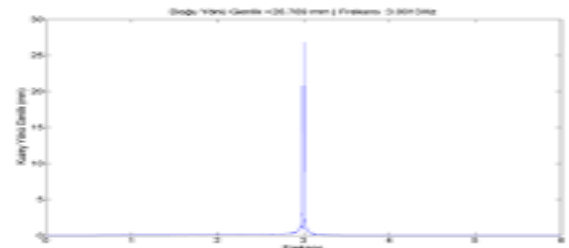
## 10 Hz Örnekleme Frekansı ile Hesaplanan RTK Ölçüm Sonuçları



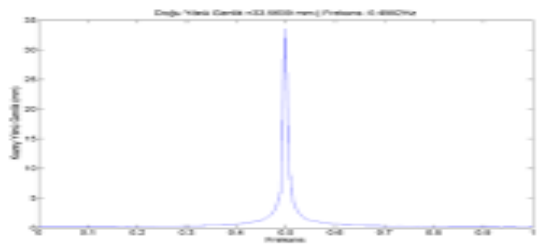
## PPP Ölçümleri LVDT Genlik ve Frekans Değerleri



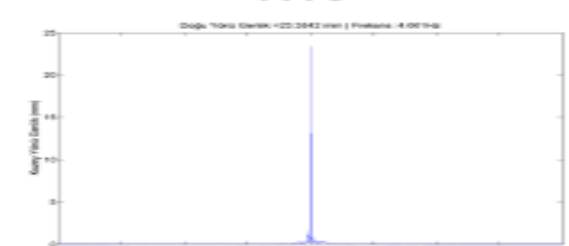
PPP1



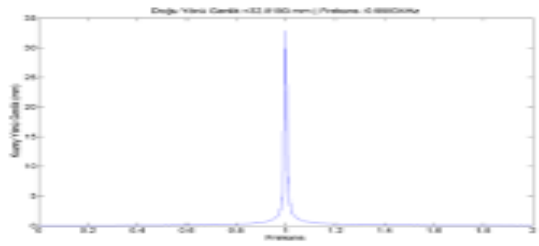
PPP5



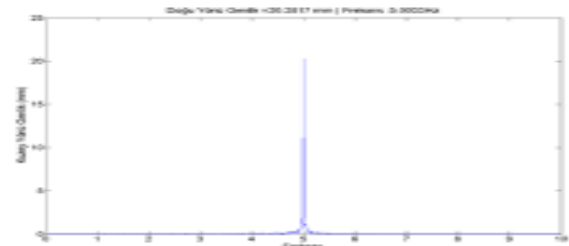
PPP2



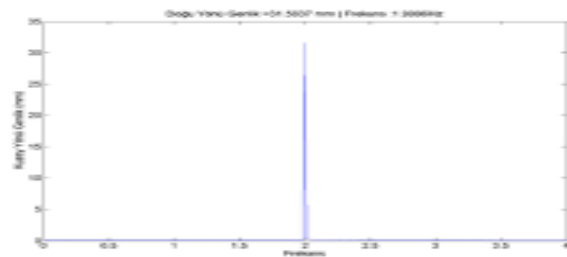
PPP6



PPP3

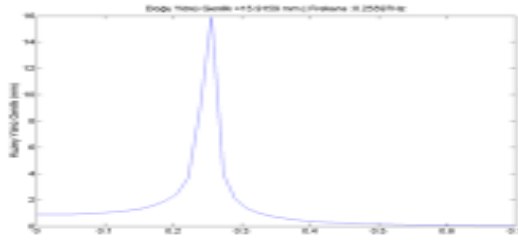
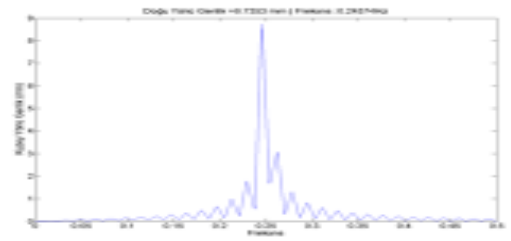
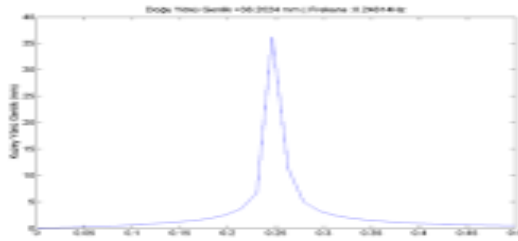
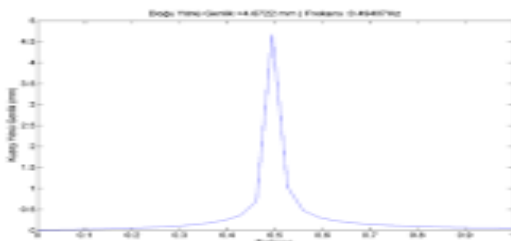
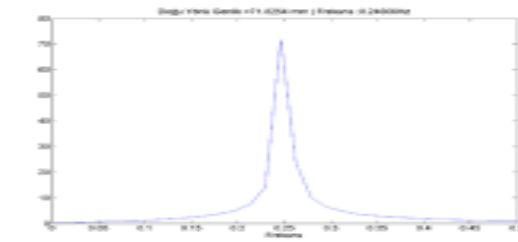
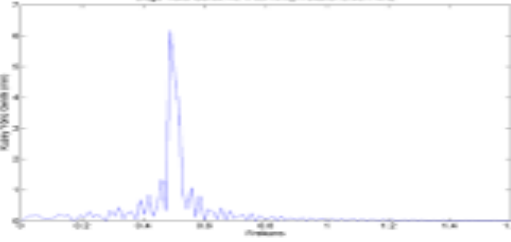
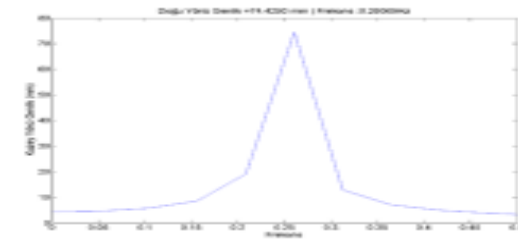
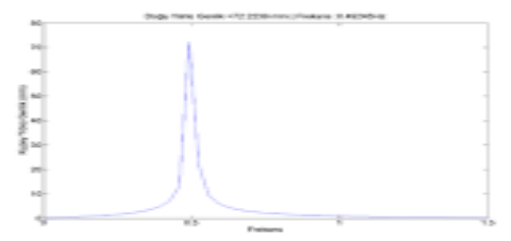


PPP7



PPP4

## TPS Ölçümleri LVDT Genlik ve Frekans Değerleri

**TPS1****TPS5-6****TPS2****TPS7-8****TPS3****TPS9-10****TPS4****TPS11**

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Güldane OKU  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 20.02.1991/Çanakkale  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : [guloku@yildiz.edu.tr](mailto:guloku@yildiz.edu.tr)

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Geomatik Müh.	İstanbul Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Mevlana Anadolu Lisesi	2009

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

## **YAYINLARI**

### **Bildiri**

1. Gülal E., Oku G., (2016). "Afet Yönetim Sistemi Kapsamında Yüksek Yapıların İzlenmesi", Geomed Sempozyumu, 23-27 Mayıs 2016, Antalya.
2. Oku G., Gülal E., (2016). "Mühendislik Yapılarının Davranışlarının Jeodezik Ölçmelerle İzlenmesi", 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu,19-21 Ekim 2016, İstanbul.
3. Alkan R.,Gülal E., İlçi V., Ozulu M., Alkan N., Köse Z., Aldoğan K., Tombus E., Sahin M., Yavaşoğlu H., Oku G, (2016). "Measurement of Dam Deformations: Case Study of Obruk Dam",EGU 17-22 Nisan 2016, Viyana.
4. Alkan R.,Gülal E., İlçi V., Ozulu M., Alkan N., Köse Z., Aldoğan K., Tombus E., Sahin M., Yavaşoğlu H., Oku G, (2016). "Obruk Barajı Deformasyon Ölçmeleri", 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 19-21 Ekim 2016, İstanbul.

### **ÖDÜLLERİ**

1. İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü,2013-2014 Öğretim Yılı Bölüm Birinciliği