T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GNSS HASSAS NOKTA KONUMLAMA TEKNİĞİNİN DÜŞEY YÖNLÜ YAPISAL TİTREŞİMLERİN ÖLÇÜLMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ERALP GÜRLEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GNSS HASSAS NOKTA KONUMLAMA TEKNİĞİNİN DÜŞEY YÖNLÜ YAPISAL TİTREŞİMLERİN ÖLÇÜLMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ERALP GÜRLEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. CEMAL ÖZER YİĞİT

GEBZE
2017

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

THE INVESTIGATION OF THE USE OF GNSS PRECISE POINT POSITINING TECHNIQUE IN MEASURING VERTICAL STRUCTURAL VIBRATIONS

ERALP GÜRLEK

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

ASSOC. PROF. DR. CEMAL ÖZER YİĞİT

GEBZE

2017

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/06/2017 tarih ve 2017/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 12/07/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Eralp GÜRLEK'in tez çalışması Harita Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç.Dr. Cemal Özer YİĞİT

ÜYE : Doç.Dr. Burak AKPINAR

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. İrfan SAYIM

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
…..…/…..…/..…… tarih ve ……/…….. sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Son yirmi yıldır, yapıların dinamik davranışlarının GNSS ile ölçülmesi ve diğer sensörlerle birlikte yapı sağlığı izlemelerinde kullanılması popüler bir araştırma konusu olmuştur. Uzun asma köprü, viyadük, yüksek bina ve gökdelenlerin deprem ve rüzgar yükü gibi etkiler karşısındaki davranışlarında gerçek zamanlı kinematik ya da post-proses kinematik yöntem kullanılmıştır. Uluslararası GNSS (Global Navigation Satellite System) Servisi (IGS) vd. GNSS araştırma birimlerinin ürettiği yüksek doğruluklu yörünge ve saat bilgileri sayesinde, tek alıcıyla yüksek hassasiyet ve doğrulukta Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) yöntemi kullanılarak koordinat bilgisi elde edilebilmektedir. GNSS-PPP yöntemindeki bu gelişmeler doğrultusunda bağıl (göreli) konum belirleme yerine kullanılabileceği alanların test edilmesi ve performansının ortaya konulması gereksinimi doğmuştur.

Bu tez çalışmasında, tek GNSS alıcısı ile kinematik modda yüksek frekanslı düşey titreşimlerin Hassas Nokta Konumlama (PPP) ile ölçülebilirliğinin, yapı sağlığı izlemelerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, PPP ve bağıl konum belirleme yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma için düşey yönlü serbest sönümlü titreşim üreten uzunluk, kalınlık ve genişliğe sahip 3 farklı özellikte esnek çelik çubuklar kullanılmıştır. Her üç çubuk da kullanılarak bir dizi salınım deneyi yapılmıştır. PPP yönteminin ve bağıl yöntemin karşılaştırılması için zaman, konum ve frekans alanında, 0.94 ile 2.90 Hz arasında değişen farklı titreşim frekanslarına sahip dört durum seçilmiştir. Ayrıca, kinematik PPP çözümü üzerinde ultra rapid ve final hassas yörünge ürününün etkileri, düşey salınımın saptanması açısından incelenmiştir. Sonuçlar, yüksek frekanslı bir kinematik PPP yönteminin, uzun/orta/kısa menzilli asma köprülerin ve karayolu viyadüklerinin dinamik hareketlerini değerlendirmek amacıyla düşey titreşimlerin temel frekansını algılayabileceğini açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hassas Nokta Konumlama (PPP), Bağıl GNSS, Yüksek Frekanslı GNSS, Düşey Titreşim, Yapı Sağlığı İzlemeleri.

SUMMARY

For the past two decades, the dynamic behavior of structures has been measured by GNSS, and it has become a popular research topic to be used in Structural Health Monitoring with other sensors. In the behavior of long suspension bridge, viaduct, high building and skyscrapers against the effects such as earthquake and wind load, real-time kinematic or post-process kinematic method is used. Position can be obtained using Precise Point Positioning (PPP) method with high precision and accuracy with single receiver thanks to high accuracy orbit and clock information produced by GNSS research units, such as International GNSS (Global Navigation Satellite System) Service (IGS) and etc. The need for testing and performance of areas where GNSS-PPP can be used instead of relative positioning in the course of these developments has arisen.

In this thesis study, the possibility of measuring high frequency vertical vibrations by using Precision Point Positioning (PPP) in kinematic mode with single GNSS receiver has been investigated in structural health monitoring. For this purpose, PPP and relative positioning techniques were compared. For this comparison, three different types of flexible steel bars with length, thickness and width producing vertical direction free damped vibration were used. A series of oscillation experiments were performed using each of the three bars. For comparison of the PPP method and the relative method, four cases were selected with different vibration frequencies ranging from 0.94 to 2.90 Hz. In addition, the effects of the ultra rapid and final precision orbit product on the kinematic PPP solution have been examined in terms of detection of vertical oscillation. The results demonstrate that a high frequency kinematic PPP method can detect the fundamental frequency of vertical vibrations in order to evaluate the dynamic movements of long/medium/short range suspended bridges and road viaducts.

Key Words: Precise Point Positioning (PPP), Relative GNSS, High-Rate GNSS, Vertical Vibration, Structural Health Monitoring.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın yolunu açan danışmanım Doç. Dr. Cemal Özer YİĞİT'e,

Daha sonra da vermiş oldukları desteklerinden dolayı ailemin her bir üyesine en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLOLAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve İçeriği	2
2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)	4
2.1. Küresel Konumlama Sistemi (GPS)	5
2.2. Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)	5
2.3. Beidou (Compass) Uydu Konumlandırma Sistemi	6
2.4. Galileo Konumlandırma Sistemi	6
2.5. Hint Bölgesel Uydu Konumlandırma Sistemi (IRNSS)	7
2.6. Quasi-Zenith Uydu Sistemi (QZSS)	7
3. HASSAS NOKTA KONUMLAMA (PPP)	9
3.1. PPP'de Hata Kaynakları	11
3.1.1. Uydu Kaynaklı Hatalar	12
3.1.1.1. Uydu Yörünge Hataları	12
3.1.1.2. Uydu Saat Hataları	14
3.1.1.3. Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları	14
3.1.1.4. Uydu Anteni Faz Dönmesi (Phase Wind Up)	15
3.1.1.5. Göreceli Etki	17
3.1.1.6. Yeryuvarı Dönme Parametreleri (Sagnac Effect)	18
3.1.2. Alıcı Kaynaklı Hatalar	19
3.1.2.1. Alıcı Saat Hataları	19
3.1.2.2. Alıcı Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları (Phase Center Variation)	19
3.1.2.3. Sinyal Yansıma Hatası (Multipath)	21

3.1.3. Jeodinamik Hareketlerden Kaynaklı Hatalar 22
3.1.3.1. Katı Yeryuvarı Gelgiti (Solid Earth Tides) 22
3.1.3.2. Okyanus Yüklemesi (Ocean Loading) 23
3.1.3.3. Kutup Gelgiti 24
3.1.4. Atmosferik Modelleme 25
3.1.4.1. Atmosfer Yükleme 25
3.1.4.2. İyonosfer Etkisi 25
3.1.4.3. Troposfer Etkisi 27
3.2. Geleneksel GPS-PPP Matematik Modeli 29
4. YAPI SAĞLIĞI İZLEMELERİ 32
4.1. Yapı Sağlığı İzlemenin Önemi 32
4.2. Yapı Sağlığı İzlemesinde Kullanılan Sensörler 34
4.2.1. GNSS Alıcısı 34
4.2.2. Eğim Sensörü 36
4.2.3. İvme Sensörü 37
4.2.4. Total Station ve Hassas Nivo 38
5. GNSS-PPP DEĞERLENDİRME YAZILIMLARI 39
5.1. İnternet Tabanlı GNSS Değerlendirme Servisleri 39
5.2. Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) Web Tabanlı Yazılımı 41
5.3. Verilerin CSRS-PPP ile Proses Edilmesi 43
6. UYGULAMA 45
6.1. Similasyon Çubukları Düzeneği 45
6.2. GNSS Veri Toplama 46
6.3. GNSS İşleme Stratejileri 47
6.4 Deney Sonuçları 50
6.4.1. Uzun Çubuk Deneyi (Durum 1) 52
6.4.2. Uzun Çubuk Deneyi (Durum 2) 54
6.4.3. Orta Çubuk Deneyi (Durum 3) 55
6.4.4. Kısa Çubuk Deneyi (Durum 4) 55
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 57
KAYNAKLAR 59
ÖZGEÇMİŞ 68

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
k	:	Alıcı birim vektörü uydusu
x, y, z	:	Yerel alıcı birim vektörler
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	:	Uydu ünitesi koordinat birim vektörleri
$\Delta\Phi$	:	Faz dönmesi düzeltmesi
D, D'	:	Uydu ve alıcı etkili dipol vektörler
Δt_r	:	Görecelik düzeltmesi
R	:	Uydu anlık konum vektörü
V	:	Uydu anlık hız vektörü
c	:	Işık hızı
Δt_p	:	Yerçekimi gecikme hatası
G	:	Yerçekimi sabiti
M	:	Dünya'nın kütlesi
r^s	:	Uydu ile Dünya arasındaki mesafe
r_r	:	Alıcı ile Dünya arasındaki mesafe
r_r^s	:	Alıcıdan uyduya olan mesafe
Ω_e	:	Dünya'nın açısal dönme hızı(WGS-84)
A_e	:	Uydudan alıcıya sinyal yolculuk ederken yeryüzünün merkezinden ışık ışınına yarıçap vektörü tarafından süpürülen toplam alan
$\Delta\vec{r}$	:	Kartezyen koordinat sisteminde yer değiştirme bölge vektörü
GM	:	Dünya'nın yerçekimi parametreleri
GM_j	:	Ay (j=2) ve Güneş'in (j=3) yer çekimi parametreleri
r	:	İstasyon merkezli durum vektörü
R_j	:	Ay'ın (j=2) ve Güneş'in (j=3) yer merkezli durum vektörü
$\hat{r}$	:	İstasyon yer merkezli birim durum vektörü
$\widehat{R_j}$	:	Ay'ın (j=2) ve Güneş'in (j=3) yer merkezli birim durum vektörü
l_2	:	Nominal 2. derece Love sayısı (0.609)
h_2	:	Nominal 2. derece Shida sayısı (0.085)
Φ	:	Nokta enlemi

λ	:	Nokta boylamı
θ_g	:	Greenwich yıldız zamanı
Δr	:	Milimetre birimde atmosfer yükleme yer değiştirme
p	:	Standart değerden (101.3 KPA); bölge basınç farkı
p'	:	İstasyondan 2000 km içinde basınç bozukluğu
ρ	:	Alıcı ile uydu arasındaki gerçek uzunluğu
dt	:	Saat hataları
d_{trop}	:	Troposferik düzeltme
N	:	Faz başlangıç belirsizliği
zpd	:	Zenit yolu gecikmesi (zenit path delay)
d^z_{kuru}, $d^z_{ıslak}$	:	Zenit yolu gecikmesi için kuru ve ıslak bileşenler
Map	:	Oransal fonksiyon/katsayı (mapping function)
N_i	:	L_i ile ölçülen pseudorange mesafe
Φ_i	:	L_i ile ölçülen taşıyıcı faz
ρ	:	Gerçek geometrik aralığı
dt	:	Alıcı saat hatası
dT	:	Uydu saat hatası
d_{orb}	:	Uydu yörünge hatası
d_{trop}	:	Troposferik gecikme
d_{ion/L_i}	:	Üzerindeki iyonosferik gecikme olduğu L_i
λ_i	:	Dalga boyunda olduğu L_i
N_i	:	L_i (cycle) üzerinde tamsayı faz belirsizlik olduğu
d_{mult/P_i}	:	L_i (m) üzerinde mesafe içinde sinyal yansıma (multipath) etkisi
d_{mult/Φ_i}	:	L_i(m) taşıyıcı faz içindeki sinyal yansıma (multipath) etksi
ε	:	Ölçüm gürültüsü
P'_{IF}	:	Metre biriminde düzeltilmiş serbest-iyonosfer kod gözlemi
Φ'_{IF}	:	Metre biriminde düzeltilmiş serbest -iyonosfer faz gözlemi
N'_{IF}	:	Uzunluk biriminde birleştirilmiş tam sayı belirsizliği
ε'_{IF}	:	Kalıntı hataları, sinyal yansıma ve sinyal gürültüyü içeren gürültü terimi
Hz	:	Hertz
km	:	Kilometre

sn	:	Saniye
AB	:	Avrupa Birliği
ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
APC	:	Antenna Phase Center (Anten Faz Merkezi)
ARP	:	Antenna Reference Point (Anten Referans Noktası)
C/A	:	Course/Acquisition, Clear Access
CDMA	:	Code Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
CODE	:	Center for Orbit Determination in Europe
CORS	:	Continuously Operating Reference Station
CSRS-PPP	:	Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning
DGNSS	:	Diferansiyel GNSS
EMU	:	Ultra-Rapid Ürünler
ESA	:	Europen Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)
FDMA	:	Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
FFT	:	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
GBAS	:	Ground Based Augmentation System
GLONASS	:	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLObal Navigation Satellite System)
GNSS	:	Global Navigation Satellite Systems
GPS	:	Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
IERS	:	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGS	:	International GNSS Service (Uluslararası GNSS Servisi)
IRNSS	:	Indian Regional Navigational Satellite Sysyem
ISRO	:	Indian Space Research Organisation (Hindistan Uzay Araştırma Organizasyonu)
ITRF	:	International Terrestrial Reference Frame
JPL	:	Jet Propulsion Laboratory (Jet Motorları Laboratuvarı)
LGO	:	Leica Geo Office
MTSAT	:	Multi-Functional Transport Satellite
NAD83	:	North American Datum 1983 (Kuzey Amerika Datumu 1983)
PCO	:	Phase Center Offset (Faz Merkezi Kayıklığı)
PPP	:	Precise Point Positioning (Hassas Nokta Konumlama)
PPP-RTK	:	Precise Point Positioning-Real Time Kinematic

PCV	:	Phase Center Variation (Faz Merkezi Varyasyonu)
QZSS	:	Quasi-Zenith Satellite System
RINEX	:	Receiver Independent Exchange Format
RMS	:	Root Mean Square
RTK	:	Real Time Kinematic
SBAS	:	Satellite Based Augmentation System
SBR	:	Su Buharı Radyometresi
SDOF	:	Single Degree of Freedom
SHM	:	Structural Health Monitoring (Yapı Sağlığı İzleme)
SPP	:	Single Point Positioning
TEC	:	Total Electron Content (Toplam Elektron Yoğunluğu)
WAAS	:	Wide Area Augmentation System (Geniş Alan Güçlendirme Sistemi)
WGS-84	:	World Geodetic System 1984 (Dünya Jeodezik Sistemi 1984)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	GNSS uyduları.	4
3.1:	Uydu yörünge hatası.	13
3.2:	Uydu anteni faz merkezi ve uydu ağırlık merkezi.	15
3.3:	Uydu anteni panellerinin dönmesi.	16
3.4:	Sagnac etkisi.	18
3.5:	GNSS alıcı anteni faz merkezi kayıklığı.	20
3.6:	Sinyal yansıma hatası.	21
3.7:	Katı yeryuvarı gelgiti.	22
3.8:	Yeryuvarı dönme ekseninin 1900-2007 yılları arasında izlediği yol, kutup gezinme hareketi.	24
3.9:	İyonosfer ve troposfer etkisi.	26
4.1:	Hiper Pro GNSS alıcısı.	35
4.2:	Nivel 220 eğim sensörü.	37
4.3:	Total station ve hassas nivo.	38
5.1:	CSRS-PPP çalışma prensibi.	43
5.2:	CSRS-PPP kullanıcı giriş sayfası.	43
5.3:	CSRS-PPP' ye RINEX verilerin yüklenmesi ve prosess seçenekleri.	44
5.4:	".sum" uzantılı dosyanın ITRF sonuç koordinatları bölümü.	44
6.1:	Deney düzeneğinin şematik görünüşü.	46
6.2:	Deney yapılan bölgeden bir görünüm.	48
6.3:	Deneyde kullanılan similasyon çubukları.	48
6.4:	Bağıl yöntem ve PPP yönteminden elde edilen düşey yer değiştirmeler.	51
6.5:	Durum 1 için Bağıl ve PPP yöntemlerinin zaman serileri ve FFT spektrumları.	53
6.6:	Bağıl yöntem ve PPP yöntemleri arasındaki farkların histogramı (IGS-Final ve EMU).	53
6.7:	Durum 2 için Bağıl ve PPP yöntemlerinin zaman serileri ve FFT spektrumları.	54

6.8: Durum 3 için Bağıl ve PPP yöntemlerinin zaman serileri ve FFT spektrumları. 55
6.9: Durum 4 için Bağıl ve PPP yöntemlerinin zaman serileri ve FFT spektrumları. 56

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
2.1:	GNSS sistemlerinin karşılaştırılması.	8
4.1:	Hiper Pro GNSS alıcısının özellikleri.	36
5.1:	İnternet tabanlı GNSS değerlendirme servisleri.	40
6.1:	Çubukların uzunluk, genişlik, kalınlık ölçüleri ve doğal frekansları	46
6.2:	CSRS-PPP ile değerlendirmede kullanılan proses seçenekleri.	50
6.3:	Bu çalışmada incelenen dört durumun özellikleri.	52

1. GİRİŞ

Yüksek frekanslı kinematik GNSS yöntemi, rüzgâr, deprem ve trafik v.b. yükler tarafından tetiklenen mühendislik yapılarının dinamik yer değiştirmelerini ölçmek için yaygın olarak kullanılır. Yapılardaki bağıl yer değiştirmeleri ölçmek için 1-10 Hz ve hatta 1-100 Hz oranlarındaki yüksek frekanslı GNSS alıcıları çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır. Bağıl GNSS yöntemi ile dinamik deplasman ölçmleri, biri yapı üzerinde diğeri yakındaki bir referans istasyonunda olmak üzere iki GNSS alıcısı gerçekleştirilir. Bu yöntemin konum belirleme doğruluğu sinyal kalitesi, uydu sayı ve geometrisi ile alıcı etrafındaki çevresel faktörler gibi etkenlere bağlı olarak santimetre seviyesindedir.

Bir köprü tabliyesinin yanal hareketi, çoğunlukla rüzgâr yükleri düşey hareketleri ise taşıt trafiği yüklerinin değişmesinden kaynaklanır [Kaloop, 2010]. Şimdiye kadar, uzun mesafeli süspansiyon ve kablolu köprülerin dinamik yer değiştirmelerini ölçmek için hassas bağıl GNSS konumlandırma yönteminin teknik fizibilitesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır [Nakamura, 2000], [Xu et al., 2002], [Roberts et al., 2004], [Erdoğan vd., 2007], Meng et al., 2007], [Yi et al., 2013]. Orta uzunlukta süspansiyon [Meo et al., 2006], [Yu et al., 2014] ve kısa açıklıklı köprülerle [Moschas and Stiros 2011, 2014], [Psimoulis and Stiros, 2013] ilgili araştırmalar da bu çalışmalar arasındadır.

Hassas nokta konumlandırma (PPP), tek bir GPS/GNSS alıcısının konumunu her hangi eş zamanlı bir referans alıcısı verisi olmaksızın yüksek doğrulukla hesaplayabilen güçlü bir yöntemdir [Zumberge et al., 1997], [Kouba and Heroux, 2001]. Bağıl yöntemle karşılaştırıldığında, PPP yönteminde referans alıcıya ihtiyaç duyulmaması bir avantajdır. Bununla birlikte, PPP yöntemi, hasass uydu yörünge bilgisi ve uydu saat düzeltmeleri, mutlak anten faz merkezi ofseti, alıcılar ve uydular için “phase wind-up”, katı yeryuvarı gelgitlerinden, okyanus gelgit yüklemesi gibi bilgilere ve düzeltmelere hassas konum bilgisi üretmek için ihtiyaç duyar. Buna ek olarak, bağıl konumlamanın aksine, geleneksel PPP yöntemi ile faz başlangıç belirsizliği bilinmeyen olarak alındığından (yani faz başlangıç belirsizliği kesirli bir sayı) santimetre düzeyinde konum doğruluğuna ulaşmak için biraz daha uzun ölçü toplamaya gerek vardır. Bu nedenle, bazı araştırmacılar faz başlangıç belirsizliğinden kaynaklı yakınsama süresini kısaltmak ve konum doğruluğunu iyileştirmek için faz başlangıç belirsiziliğini kesirli değilde tam sayı olarak belirlemek için yöntemler

geliştirmiştir [Ge et al., 2008], [Laurichesse et al., 2009], [Collins et al., 2010], [Geng et al., 2010]. Bağıl konumlandırma ile PPP'nin karşılaştırması, [Rizos et al., 2012] tarafından yapılmıştır.

Yüksek frekanstaki PPP'nin GPS sismolojisi için güçlü ve etkili bir yöntem olduğu gösterilmiştir [Kouba, 2003], [Collins et al., 2009], [Avallone et al., 2011]. Deprem erken uyarı sistemi [Li et al., 2013], hava ve deniz ortamları [Gao ve et al., 2005], [Zhang and Andersen, 2006], [Geng et al., 2010], [Alkan ve Ökalın, 2013], [El-Diyabet, 2016] kinematik nesneler ve yapısal sağlığı izlemeleri [Yigit, 2016] alanlarındaki çalışmalarda da PPP yönteminin etkinliği araştırılmıştır.

[Xu et al., 2013], sarsma tablası tarafından üretilen sismik dalga hareketlerini ölçmek için yüksek frekanslı kinematik PPP'yi değerlendirmiştir. Bu çalışmada, yüksek frekanslı kinematik PPP'nin kısa süreli (birkaç dakikalık) salınımlarda 2-4 mm'lik doğrulukta yatay yer değiştirmeleri, cm doğruluğu seviyesinde düşey yer değiştirmeleri belirleyebildiğini göstermiştir. Buna ek olarak, [Moschas et al., 2014], yaklaşık 3.3 Hz'lik bir frekansta yatay yarı-statik ve harmonik salınımları izleyerek iki salınım olayında 10 Hz PPP'nin performansını değerlendirmiştir. Araştırmacılar, PPP sonuçlarını bir ivmeölçer, robotic total station ve diferansiyel GPS'den elde edilenlerle karşılaştırmışlardır.

Çok yakın bir zamanda [Yigit, 2016], kinematik PPP yönteminin hem yatay hem de düşeydeki dinamik hareketleri izleyebilme ve tespit edebilme performasını birinci ve ikinci doğal frekanslarla salınım yapabilen model çubuğu ile test etmiştir. Kinematik PPP sonuçlarını bağıl kinematik yöntem ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmış ve yüksek frekanslı PPP yönteminin, kısa bir süre içerisinde santimetre altı seviyesinde doğrulukta hem yatay hem de düşey yer değiştirme dalga şekillerini yakalayabileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada düşey salınım, yatay olarak salınan esnek çubuğun eğilmesi sonucu dolaylı olarak elde edilmiştir [Yigit and Gurlek, 2017].

1.1. Tezin Amacı ve İçeriği

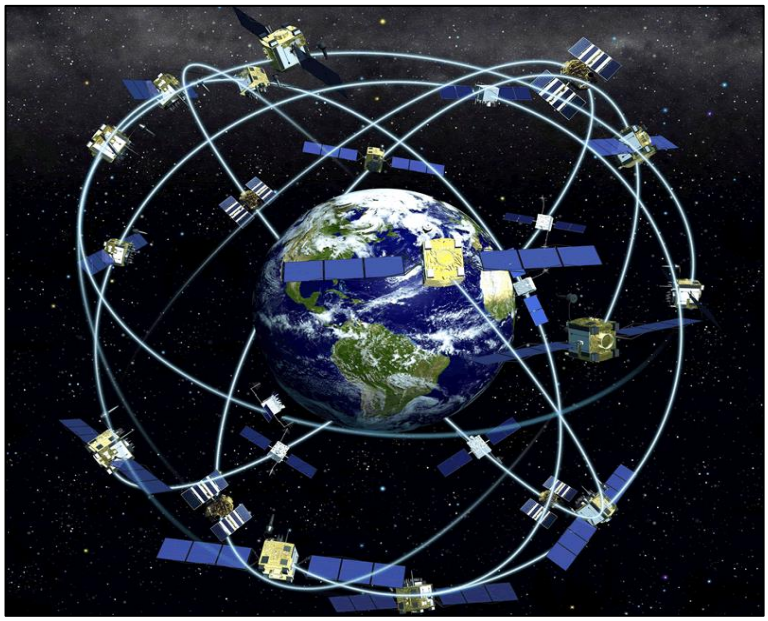
Bu çalışmanın temel hedefi, yüksek frekanslı kinematik PPP yönteminin düşey yönlü titreşen asma köprü, viyadük v.b. yapıların izlenmesinde ve dinamik hareketlerinin elde edilmesinde bağıl yöntem yerine kullanılabilirliğini araştırmak ve ortaya çıkarmaktır.

Yüksek frekanslı kinematik PPP yönteminin performansının değerlendirlmesi amacıyla 3 farklı özellikteki esnek çelik çubuklarla bir dizi titreşim deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen 10 Hz frekanslı GNSS verileri hem ulta rapid hem de final uydu yörünge bilgileri kullanılarak kinematik PPP yöntemiyle değerlendirilmiştir. Ayrıca yöntemin performansının değerlendirilmesi için GNSS verileri bağıl yöntemle de değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar hem frekans alanında hem de zaman alanında karşılaştırılarak PPP yönteminin hassasiyetinin bağıl yöntemin hassasiyetine yaklaşıp yaklaşmadığı detaylı olarak incelenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde GNSS sistemleri kısaca anlatılmış; üçüncü bölümünde PPP yöntemi, hata kaynakları ve matematik modelinden bahsedilmiş; dördüncü bölümde yapı sağlığı izlemeleri hakkında bilgi verilmiş; beşinci bölümde kısaca GNSS değelerndirme yazılımları ile ilgili bilgiler verilmiş; altıncı bölümde esnek çubuk deneyi, sonuçları ve değerlendirmeleri yapılmış ve nihai olarak yedinci bölümde tezden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)

GNSS terimi, küresel uydu navigasyon sistemleri için kullanılır. GNSS uydularıyla uzaydan yollanan sinyaller yeryüzündeki GNSS alıcılarına ulaşır. Böylece GNSS alıcısı aracılığıyla bir noktanın enlem, boylam ve yüksekliği hesaplanabilir [Web 1, 2017].



Şekil 2.1: GNSS uyduları.

1978 yılında ilk GPS uydusunun yörüngeye yerleştirilmesinden sonra bu alandaki çalışmalar hızla sürmüş ve bunun sonucunda yeni sinyaller ve farklı ülkelere ait Rus GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Avrupa Birliği (AB) Galileo ve Çin Beidou gibi uydu sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerden GLONASS etkin olarak kullanılırken, GALILEO ve Beidou sistemleri yakın bir gelecekte faaliyete geçecektir. Bu nedenle, bu sistemlerin ve ileride geliştirilmesi olası diğer küresel sistemler ile bölgesel ve genişletici tüm uydu sistemleri için Küresel Uydu Navigasyon Sistemleri (GNSS) tanımı kullanılmaya başlanmıştır [Kahveci, 2009]. Günümüzde yeni nesil uyduların yörüngelere yerleştirilmesi ile moderniszasyon süreci devam eden GPS ve GLONASS sistemlerinin yanı sıra Beido, Galileo, QZSS, IRNSS, SBAS ve de GBAS uydu takımları ile sürekli genişleyerek Multi-GNSS kavramı ortaya çıkmıştır. Küresel

konum belirleme sistemi olarak Amerika GPS'i, Rusya GLONASS'ı, Avrupa Birliği Galileo'yu, Çin Beidou'yu kurmuştur. Bölgesel sistem olarak Japonya QZSS'i ve Hindistan IRNSS'i kurmuştur. Küresel ve bölgesel uydu sistemlerini kuran devletler, destekleyici sistemler olarak da uydu bazlı (Satellite Based Augmentation System-SBAS) ve yer bazlı (Ground Based Augmentation System-GBAS) sistemleri oluşturmuşlardır. Küresel ve bölgesel uydu sistemlerinin çoğalmasıyla, alıcı daha fazla uydu gördüğü için, tek GNSS alıcıyla yapılan PPP yöntemindeki konum belirleme hassasiyeti artmıştır. Bu durumda yöntemin mühendislik çalışmalarındaki kullanılabilirliği yaygınlaşmıştır. GNSS uyduları şekil 2.1'de gösterilmiştir [Web 2, 2017].

2.1. Küresel Konumlama Sistemi (GPS)

Uzay tabanlı uydu navigasyon sistemi olan GPS, yeryüzünün herhangi bir noktasında, dört veya daha fazla uydu ile her hava koşulunda konum ve zaman bilgileri sağlar. GPS, düzenli olarak sinyal yollayan uydulardan oluşur. Bu sistem, uydularla alıcı arasındaki mesafeyi ölçer ve yeryüzündeki alıcının konumunu belirler. Küresel çapta olan sistemlerin ilkidir. Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı'na ait bir sistemdir, yörüngelerinde sürekli olarak hareket eden uydulardan oluşur. Bir GPS alıcısına sahip herkesin kullanımına açıktır. Uydular radyo sinyali gönderirler. Yeryüzündeki GPS alıcıları da bu sinyalleri alarak konum belirlemeyi gerçekleştirir [Web 3, 2017].

2.2. Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)

GLONASS Rusya tarafından geliştirilen küresel uydu konumlandırma sistemidir. GLONASS, Sovyetler Birliği'nde 1976 yılında çalışmaya başlamıştır. Sistemin gelişmesi, zaman içinde uydu takımlarına yapılan roket eklemeleriyle 1995 yılında tamamlanabilmiştir. Bu sistem, gerçek zamanlı uydu verileri kullanılarak yeryüzünde alıcının konumunu bir koordinat sisteminde belirleyebilmektedir. Sovyetler Birliği'nin ekonomik gerilemesinden dolayı 2001 yılına kadar 7 uydu çalışır durumdaydı. 2011 yılı Ekim ayında, toplam 24 uydudan oluşan bir uydu ağı ile GPS

gibi etkili bir şekilde etkili bir şekilde kullanılan küresel konumlama sistemi olma özelliği kazanmıştır [Web 4, 2017].

2.3. Beidou (Compass) Uydu Konumlandırma Sistemi

Çin'in kullandığı uydu navigasyon sistemidir. 2000 yılından bu yana testler yapılmaktadır. Tam ölçekli bir küresel navigasyon sistemi de yapım aşamasındadır. Beidou, iki ayrı uydu takımından meydana gelmektedir. Beiduou-1 olarak bilinen ilk Beidou sistemi, sadece üç uydudan oluştuğu için dar bir alana hizmet vermektedir ve sınırlı uygulamaları vardır. Çin'e ve çevresindeki bölgelere 2000 yılından bu yana konumlandırma hizmeti sunmaktadır.

Sistemin ikinci aşaması, COMPASS veya Beidou-2 adında, 35 uydudan oluşan küresel navigasyon uydu sistemi olarak tasarlanmıştır. 2011 yılı başında yapım çalışması başlamıştır. 2011 yılı sonunda Çin'de 10 uydu aktif hale gelmiştir. 2012 yılı sonunda da Asya-Pasifik bölgesinde çalışmaya başlamıştır. 2020 yılında tamamlanması planlanmaktadır. Böylece dünya çapında hizmet vermesi beklenmektedir. [Web 5, 2017].

2.4. Galileo Konumlandırma Sistemi

Galileo, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ordusunun denetimi altındaki GPS ile Rusya'ya ait GLONASS'a karşılık gelmek üzere Avrupa Birliğinin oluşturduğu uydu navigasyon sistemidir. Galileo tasarısı, 1999 yılında Almanya, Fransa, İtalya ve İngiltere'den gelen dört ayrı önerinin incelenmesiyle gündeme gelmiştir. 26 Mayıs 2003 tarihinde Avrupa Birliği ve Avrupa Uzay Ajansı tasarıyı resmen üstlenmiştir. Gönderilmesi planlanan 30 uydudan ilki olan Giove uydusu, 28 Aralık 2005 tarihinde Kazakistan'daki Baykonur Uzay Üssü'nden fırlatılmıştır. 30 uyduluk Galileo sistemi (27 operasyonel ve 3 etkin yedek uydu) 2019 yılında tamamlanacaktır.

GPS sistemi ABD ordusunun kullanımındadır. Savaş zamanında uyduların yeri değiştirilebilmekte veya uydular kullanım dışı bırakılabilmektedir. Avrupa Birliği ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) Galileo'da böyle bir uygulama yapmama kararı almıştır. [Web 6, 2017].

2.5. Hint Bölgesel Uydu Konumlandırma Sistemi (IRNSS)

Bir özerk bölge uydu konumlandırma sistemi olan IRNSS, Hindistan hükümetinin kontrolünde, Hindistan Uzay Araştırmaları Örgütü (ISRO) tarafından yürütülmektedir. IRNSS'nin iki hizmeti vardır. Bunlar, yetkili (askeri) kullanıcılara şifreli standart konumlandırma hizmeti ve sivil kullanıma açık sınırlı hizmettir.

ISRO, 2010 yılından bu yana planladığı ve yürüttüğü proje doğrultusunda bir uydu konumlandırma merkezi kurmuştur. 2011 yılında başlatılması düşünülen uydu sistemi ancak 2015 yılından sonra faaliyete geçmiştir. Bugün Hindistan genelinde 21 istasyon ağı bulunmaktadır. Bunlar, konumlandırma için yörüngedeki uyduları izlemekte ve veri toplamaktadır [Web 7, 2017].

2.6. Quasi-Zenith Uydu Sistemi (QZSS)

Uydu tabanlı konum ve zamanlama sistemi olan QZSS, Japonya için programlanmıştır. 11 Eylül 2010 tarihinde birinci uydu olarak "Michibiki" uzaya gönderilmiştir. 2013 yılının mart ayında uydu sayısı üçten dörde yükselmiştir. Hedeflerinde ise 2017 yılı sonuna kadar üç ek uydu yapımının başlatılması vardır.

Quasi-Zenith, taşınabilir cihaz uygulamaları sağlayan iletişim tabanlı servislerde (video, ses ve veri servisi) kullanılmaktadır. Ayrıca konumlama için kullanılan servisleri de vardır. QZSS, kendi konumlandırma servisine sınırlı bir doğruluk verebildiği gibi bazı özellikleri yüzünden tek başına kullanılması da yeterli olmamaktadır. Bu yüzden, küresel konumlandırma sistemini (GNSS) destekleme ve güçlendirme (yararlanılan bölgede yüksek doğruluklu konum elde etme) servisi olarak kabul edilmektedir. Japonya'nın şu an geliştirme aşamasında olduğu konumlandırma hizmeti, uydu tabanlı güçlendirme sistemi olan Multi-Functional Transport Satellite (MTSAT) jeostatik yörünge uyduları ile daha yararlı bir duruma getirilebilir. MTSAT, ABD Federal Havacılık İdaresi güdümlü Geniş Alan Güçlendirme Sistemi (WAAS) ile benzer bir uydu tabanlı güçlendirme sistemidir. [Web 8, 2017]. Tablo 2.1'de GNSS sistemlerinin karşılaştırılması yer almaktadır [Web 9, 2017].

Tablo 2.1: GNSS sistemlerinin karşılaştırılması.

Sistem	**GPS**	**GLONASS**	**BeiDou**	**Galileo**	**IRNSS**
Sahibi	Amerika Birleşik Devletleri	Rusya Federasyonu	Çin	Avrupa Birliği	Hindistan
Kodlama	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Yörünge Rakımı	20180 km	19130 km	21150 km	23222	36000
Tam Periyot Süresi	11 sa 58 dk	11 sa 16 dk	12 sa 38 dk	14 sa 5 dk	23 sa 56 dk
Uydu Sayısı	31 (tasarımı ile en az 24 uydu)	28 (tasarımı ile en az 24 uydu) 24 işletimde, 2 uydu ana yüklenici tarafından kontrol altında ve 2'si uçuş testleri aşamasında	5 jeosenkron yörünge (GEO) uydusu, 30 orta yörünge (MEO) uydusu	8 yörüngede deneme yataklı uydu, bütçelenen 22 işletim uydusu	3 jeosenkron yörünge (GEO) uydusu, 4 jeosenkron yörünge uydusu
Frekans	1.57542 Ghz (L1 sinyali) 1.2276 Ghz (L2 sinyali)	1.602 Ghz (SP) 1.246 Ghz (SP)	1.561098 Ghz (B1) 1.589742 Ghz (B1-2) 1.20714 Ghz (B2) 1.26852 Ghz (B3)	1.164-1.215 Ghz (E5a ve E5b) 1.260-1.300 Ghz (E6) 1.559-1.592 Ghz (E2-L1-E11)	1.17645 Ghz (L5) 2.492028 Ghz (S1)
Durumu	İşletimde	İşletimde	15 uydu işletimde, planlanan 20 ek uydu	Hazırlık aşamasında	Başlatılan 4 uydu, 3 uydu daha yakın zamanda eklenecek

3. HASSAS NOKTA KONUMLAMA (PPP)

PPP yönteminin geçmişi 1976 yılına kadar gitmektedir. Ama asıl yaygınlaşmaya başlaması çift frekanslı alıcıların ortaya çıktığı 1990'lı yıllardır. 1976 yılında Anderle, doppler etkisinden yararlanarak uydu yörüngesini 2 metre doğruluk ile hesaplayabilmiştir. Çalışması yüksek bir doğruluk taşımamaktadır. Ancak PPP kavramının ilk kez ortaya çıkışına neden olmuştur. 1990'lı yıllarda hassas yörünge ve saat bilgilerine erişilebilmiştir. 1997 yılında çift frekanslı alıcıların çıkması ile iyonosferden kaynaklanan hatalar modellenebilmiştir. 2000 yılında da GPS uydu sinyalleri üzerindeki Selective Availability (Seçici Erişim) kaldırılmıştır [Xu et al, 2011].

Mutlak Konum Belirleme olan PPP, tek bir GNSS alıcısı kullanılarak cm gibi yüksek bir konum doğruluğunun elde edilmesini sağlayan yöntemdir. Bu yöntemle uyduların ölçümü sonrasında Uluslararası GNSS Servisi (IGS), Jet Propulsion Laboratory (JPL), Center for Orbit Determination in Europe (CODE) gibi servisler tarafından internet ortamında yayınladıkları hassas uydu yörünge ve saat bilgileri yardımı ile düzeltmeler yapılmaktadır.

PPP yönteminde gerekli olan uydu yörünge ve saat bilgileri küresel hizmet veren sabit GPS/GNSS referans istasyonları ağından sağlanmaktadır. Bu noktada PPP için gerekli olan hassas yörünge ve saat bilgilerinin en önemli kaynağı IGS'dir. Bunun dışında Satellite Based Augmentation System (SBAS) ile bütünleşmiş olan kamusal ya da ticari diğer referans istasyonu ağları da, yörünge ve saat bilgilerini sağlamaktadırlar [Ebner, 2008].

GNSS sitemlerinin modernizasyonu sonucunda GPS dışında GLONASS, GALİLEO, BEİDOU, QZSS ve IRNSS küresel ve bölgesel farklı uydu sistemlerinin olması, PPP yöntemi ile elde edilen koordinatların doğruluğunu arttırmıştır. Bu durum PPP yönteminin ilgi görmesine sebep olmuştur.

PPP yöntemiyle yapılan ölçüler anlık olarak düzeltme değerlerini almadığından ham verilerdir. Bu ölçü verileri büro hesaplamaları için, veri işleme ve analiz işlemini gerçekleştiren bilimsel ve akademik yazılımlar (Bernese, GIPSY-OASIS, WaPPP, gLAB vd.) ve internet tabanlı online PPP servisler (CSRS-PPP, GAPS, APPS, Magic-GNSS vd.) ile yapılmaktadır.

Uydularla konum belirleme yöntemleri; hesaplamada kullanılan gözlem verisine (kod veya faz), ölçü epok sayısına ve alıcı sayısına bağlı olarak tanımlanmıştır [Kahveci vd., 2011].

Tek nokta konumlama (Single Point Positioning) yönteminde tek frekanslı bir alıcı ile C/A kod kullanılarak konum belirlenir. Düşük maliyetli ve hassasiyet istenmeyen (metre mertebesinde) araç navigasyon hizmetinde ve cep telefonu uygulamalarında kullanılan bir yöntemdir. PPP yönteminde ise tek alıcı ile kod ve faz verileri kullanılarak konum belirlenir. Bu yüzden PPP yönteminde cm mertebesinde doğruluk elde edilmiştir. Hassasiyet gerektiren mühendislik hizmetlerinde kullanılabilmektedir.

Bağıl yöntem ise taşıyıcı faz ölçülerinin kullanıldığı geleneksel bir konum belirleme yöntemidir. Yüksek doğruluk ve duyarlık gerektiren hassas statik jeodezik uygulamalarda kullanılır. Bu yöntemde en az 2 adet GNSS alıcısının kullanılması gerekmektedir. Bu alıcılardan biri koordinatı bilinen noktada, diğeri koordinatı belirlenecek olan noktada olmalıdır. Bu konum belirleme yöntemi, koordinatı bilinen A noktası ile koordinatı bilinmeyen B noktası arasındaki b_{AB} vektörünün çözümüne dayalıdır ve hiyerarşik ağ çözüm yaklaşımı ilkesine göre kullanılmaktadır. Baz vektörünün çözülmesi ve ağ yaklaşımı yönteminde koordinatı bilinen ya da daha çok noktaya göre yeni noktaların konumlarının belirlenmesi, uydu ve alıcı kaynaklı hataların giderilmesini sağlamıştır. Bu gözlem yöntemi günümüzde hassas jeodezik ve jeodinamik uygulamalarda kullanılmaktadır. Konumu bilinen ve bilinmeyen noktalarda eş zamanlı gözlem yapılması zorunluluğu, aynı zamanda kullanılan alıcıların yüksek maliyetli, kaliteli jeodezik özellikli alıcılar olması bu yöntemin dezavantajlarıdır. [Kouba and Heroux, 2001], [Ebner, 2008], [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

Diferansiyel GNSS (DGNSS) ve RTK olarak adlandırılan diferansiyel konum belirlemelerin temelini bağıl konumlama ilkesi oluşturur. Ancak bu yöntemleri bağıl konumlamadan ayıran özellikler gerçek zamanlı olmaları ve düzeltme verisi hesabına dayanmalarıdır. DGNSS yöntemi Single Point Positioning (SPP)'nin doğruluğunu arttırmak için geliştirilmiş gerçek zamanlı bir konum belirlemedir. Kullanıcıların, bu yöntemde bir tek nokta ya da bir ağdan hesaplanan düzeltme bilgilerini almaları gerekmektedir. Düzeltme, referans istasyonunun/istasyonlarının bilinen doğru konumu ile ölçme anında kod ve/veya taşıyıcı faz gözlemlerinden hesaplanan

konumunun karşılaştırılması ile elde edilmektedir [Ebner, 2008], [Kaplan and Hegarty, 2006].

PPP yönteminin diferansiyel konum belirlemeye göre en önemli avantajı, koordinatı bilinen bir ya da daha fazla referans istasyonuna bu yöntemde gereksinim duyulmamasıdır. Buna karşın PPP yönteminde, kod ve taşıyıcı faz gözlemlerinin her ikisi birden gerekmektedir. Tam sayı belirsizliği çözümü için geçen yakınsama süresinin uzun olması PPP yönteminin önemli dezavantajlarından biridir Bu dezavantaj PPP'nin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımını sınırlandırmaktadır [Rizos et al., 2012].

3.1. PPP'de Hata Kaynakları

Hassas nokta konumlama uygulamalarında GNSS hata kaynaklarının azaltılması ve modellenmesi için, 1990'lı yılların başından itibaren IGS'nin büyük katkısı olmaktadır. IGS uluslararası standartlar geliştirmekte ve kullanıcılara yüksek doğruluk sağlayan veri ve ürünler (yörünge ve saat düzeltmeleri, anten faz merkezi değişimleri, gel-git etkileri, atmosferik parametreler, yer dönmesi vb. modeller) sunmaktadır. Bunlar aracılığıyla gerçek zamanlı uygulamaları ve büro hesaplamaları için hassas konum belirlemeyi gerçekleştirmektedir.

Diferansiyel yöntemde, milimetre seviyelerinde doğruluk elde edilebilmektedir. Bunun sebebi bazı hataların tamamen ya da kısmen iki istasyon arasında fark gözlemleri alınarak giderilebilmesidir. Bu yüzden, referans olan alıcı ya da istasyonlar kullanılmadan, bir alıcı kullanılan PPP yönteminde bütün hatalar (uydu saat, uydu yörünge, uydu anten faz merkezi kayıklığı vd.) santimetre düzeyinde doğruluk elde etmek için ele alınmalıdır. [Cai, 2009].

Hassas konum bilgisi gerektiren GNSS uygulamalarında (jeodezik ve jeodinamik amaçlı çalışmalar, deformasyon analizi vb. çalışmalar) bağıl konum belirleme ilkesi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde ölçülerin duyarlığı baz uzunluğuna ve ölçü süresine göre değişmektedir. Duyarlığın baz uzunluğuna göre tanımlanmasının temel nedeni, baz uzunluğu arttıkça kullanılan bağıl konumlama modelindeki başta yörünge ve atmosferik etkiler olmak üzere diğer fiziksel etkilere ait mekânsal korelasyonun azalmasıdır. Söz konusu hataların en önemlileri; yörünge, troposfer ve iyonosfer olarak sıralanabilir [Aktuğ ve Lenk, 2010].

IGS standartlarına göre 100 km'den küçük baz uzunlukları yerel, 500 km ile 1000 km arasındaki baz uzunlukları bölgesel, 1000 km'den büyük baz uzunlukları ise küresel baz olarak adlandırılmaktadır. Baz uzunluğunun 100 km'den küçük olduğu yerel ağlarda, faz gözlemleri kullanılarak bağıl konum belirleme ilkesi ile birçok hata kaynağı ve etki göz ardı edilebilmektedir [Kahveci, 2010]. Bu yüzden jeodezik, jeodinamik ve deformasyon analizi gibi çalışmalarda, bölgesel ve küresel düzeydeki ağ çözümlerinde ve PPP değerlendirme yöntemi uygulamalarında birçok hata kaynağı dikkate alınmalı ve modellenmelidir.

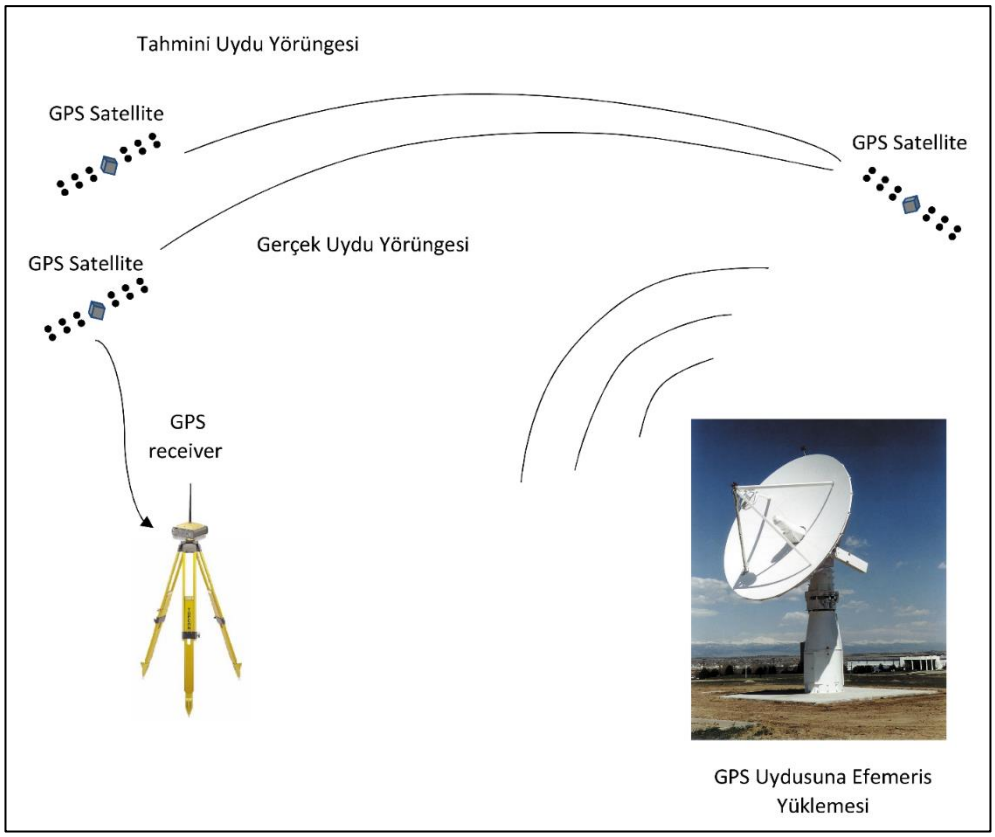
PPP yönteminde diğer yöntemlerden farklı olarak, göz önüne alınması gereken birçok etken vardır. Örneğin bağıl konum belirlemede, alıcı referans istasyonlarından yararlandığından etkenlerin neden olduğu hatalar ortadan kalkmaktadır. PPP yönteminde ise bütün etkenler değerlendirilerek ölçüye düzeltme olarak ilave edilmelidir. PPP yönteminde, uydu saat hatası, uydu anten faz merkezi kayıklığı, rölativistik etkiler, troposferik gecikme, gelgit etkisi, kutup gezinimi, okyanus yüklemesi gibi etkiler önem taşımaktadır.

Bu açıdan GNSS'de hata kaynakları genel olarak uydu kaynaklı hatalar, alıcı kaynaklı hatalar ve jeodinamik hareketlerden kaynaklı hatalar şeklinde sınıflandırılabilir.

3.1.1. Uydu Kaynaklı Hatalar

3.1.1.1. Uydu Yörünge Hataları

Bir uydu yörünge hatasının tanımı, doğru uydu konumu ve onun hesaplama değeri arasındaki farklılık şeklinde yapılabilir. Bu farklılık genellikle "yol boyunca", "çapraz-yol" ve "radyal" olmak üç yörüngede tarif edilir. Uydu yörünge hatası PPP'de direkt etkilidir. Ufuk çizgisinde uydu gözlemleri yapılamadığı için yükseklik bileşeninde konum doğruluğu biraz zayıftır. Bununla birlikte, doğu bileşenindeki (boylam) konumlandırma hassasiyeti uydu yörüngelerinin tasarımı ve uyduların hareketi nedeniyle kuzey bileşenindekinden (enlem) daha da zayıftır [Rizos, 1999].



Şekil 3.1: Uydu yörünge hatası.

Uydulardan gönderilen navigasyon mesajları içinde uyduların konumlarını bildiren efemeris veri setleri vardır. Bunlar almanak verisi, yayın (broadcast) efemeris ve hassas efemeristir. Almanak verisi, uyduların konumlarını birkaç kilometre doğrulukla kabaca sağlamaktadır [Ebner, 2008]. Kepler öğelerini içeren yayın efemerisi, uydu konumları için yaklaşık 1,6 m doğrulukla kullanıcılarına gönderilmektedir. [GLONASS ICD, 2002].

PPP tekniğinde alıcının konumunu belirlemek için alıcı ile uydu arasındaki mesafe hesaplanırken uydu konumları hassas olarak bilinmelidir. Uydulardan gönderilen navigasyon mesajlarında yer alan konum bilgileri (efemeris), uydunun yörüngesinde doğru hareket ettiği varsayımından yola çıkılarak hesaplanan verilerdir. Uyduların ölçüm zamanında gerçekte nerede oldukları yaklaşık 15 gün sonra internetten yayımlanan ve ortalama hatası 2,5 cm civarında olan hassas efemeris kullanılarak elde edilir. Şekil 3.1'de uydu yörünge hatası gösterilmiştir.

3.1.1.2. Uydu Saat Hataları

GPS uydularında doğru zaman sinyalleri üretmek için yüksek sabit ve hassas atomik saatler bulunur. Yerleşik atom saatleri istikrarlı çalışmaktadırlar; ancak yerleşik osilatörün GPS zamanıyla senkronizasyonunu sürdürememektedirler. Uydu saat hatası GPS zamanı ve atom saati arasındaki sapmadan kaynaklanır. Atomik saatler iyi performans gösterdiklerinden, osilatör sürekli ayarlanamayabilir. Bu yüzden yerleşik atom saatleri sürüklenmeye bırakılmıştır. Ana kontrol istasyonu bunların performanslarını yakından izlemektedir. Yerleşik atomik saatler, ana kontrol istasyonu tarafından GPS sistem zamanının ± 1 mikrosaniye hatasında tutulması için ayarlanır [Roulston, 2001].

Fark alınmamış (undifferenced) PPP çözümlerinde, uydu yörünge ve saat hatalarının kesin bilgisi büyük önem taşır. [Witchayangkoon, 2000]'e göre, uydu yörüngesi ve saat hataları tam olarak bilinmiyorsa, PPP yöntemi kullanılarak yüksek doğruluklu nokta konumlandırma gerçekleştirmek çok zordur. İlgili çözümlerin, yayınlanan navigasyon mesajı tarafından sağlanan saat hatalarını kabaca düzelten standart konumlandırma çözümleriyle aynı "sınıf" içinde olmaları bu zorluğun nedenini ortaya koymaktadır. Bu yüzden, PPP'de uydunun yörünge saati hatasını olabildiğince doğru bir şekilde düzeltmek ve böylece mümkün olan en yüksek nokta konumlandırma hassasiyetini elde etmek gereklidir [Choy, 2009].

PPP yaklaşımında, uydu yörünge ve saat kayıklıkları, IGS hassas uydu düzeltme ürünleri kullanılarak giderilebilir. IGS hassas uydu yörünge ve saat düzeltmeleri çeşitli biçimlerde gelir. Bunlar final, hızlı (rapid) ve ultra hızlı (ultra rapid) biçimindedir.

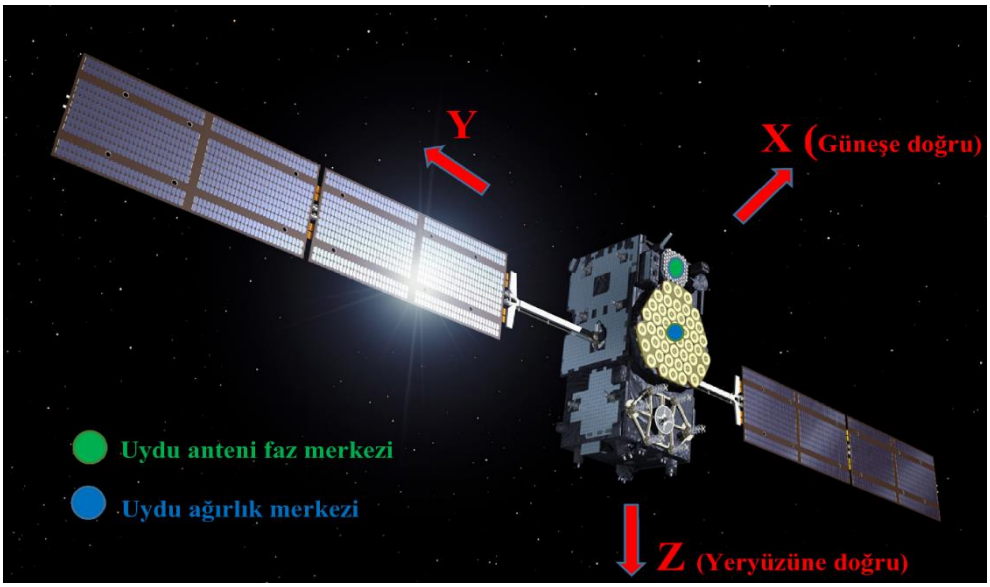
3.1.1.3. Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları

Ölçüler, uydunun anten kısmından yayınlanır; ama hassas efemeris verisinde yer alan uydu koordinatları uyduların ağırlık merkezi koordinatlarıdır [Zhu et al., 2003].

Uydu anteninin faz merkezi kayıklığı, uydu ağırlık merkezi ile antenin faz merkezi arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Bu yüzden uydu anteni faz merkezi hatasına PPP'de dikkat edilmelidir. Hassas uydu yörünge ve saat ürünlerinin hesabında, uydulara etki eden kuvvetlerin modellendirilmeleri uydu ağırlık merkezine göre yapılmaktadır. Öte yandan PPP'de kullanılan kod ve taşıyıcı faz gözlemleri ise anten faz merkezine göre yapılmaktadır. Uydu anteninin faz merkezi değerleri uydu

sabit koordinat sisteminde verilmektedir. Koordinat sisteminin merkezi uyduların kütle merkezidir. Z ekseni dünyanın merkezine doğru, Y ekseni güneş panelleri ekseni doğrultusunda, X ekseni de sağ el kuralını tanımlamakta ve uydu, dünya, güneş aynı düzlemde yer almaktadır. [Kouba and Heroux, 2001].

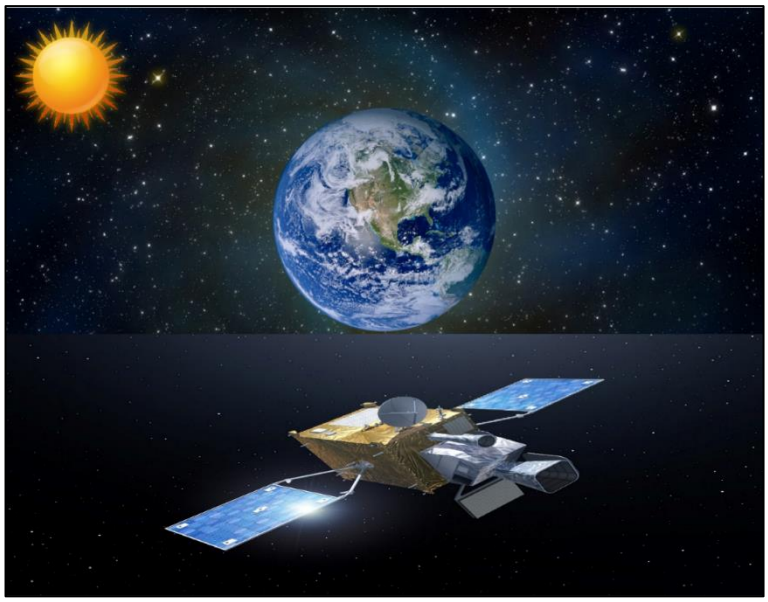
Tüm uydu tiplerinin uydu anten faz merkez kayıklıklarını dikkate alması gerekmez. GPS Blok IIR uyduları ve daha sonra tasarlanmış uydular iki merkez tutarlığından dolayı faz merkez kayıklık düzeltmelerini uygulamaya gerek duymazlar [Leick, 2004]. Şekil 3.2'de uydu anteni faz merkezi ve uydu ağırlık merkezi gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Uydu anteni faz merkezi ve uydu ağırlık merkezi.

3.1.1.4. Uydu Anteni Faz Dönmesi (Phase Wind Up)

Her GPS veya GLONASS uydusu tarafından L1 ve L2 üzerinden iletilen navigasyon sinyalleri dairesel olarak sağ-el şeklinde polarize olur. Bu nedenle alıcı taşıyıcı faz gözlemlerinin uydu ve alıcı antenlerinin birbirlerine doğru yönlenmeleri gerekmektedir. Uydu ve alıcı antenlerin göreceli rotasyonu, gözlenen taşıyıcı fazı yaklaşık bir dalga boyu değiştirebilir. Buna uydu faz dönmesi denir [Wu et al.,1993]. Şekil 3.3'te uydu anteni panellerinin dönmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Uydu anteni panellerinin dönmesi.

Uydu ya da alıcı anteninin kendi düşey ekseninde bir tam tur dönmesi bir tam dalga boyu kayma meydana getirir. Alıcı anteni hareket edebilen değilse; kendi düşey ekseni etrafında dönemez. Uydu antenlerinde yer alan güneş panellerinin güneşe dönmesi gerekmektedir. Güneş panelleri güneşe yönlendirilirken uydu küçük hareketler yapar. Uyduların karanlıkta kaldığı dönemlerde uydunun güneş panelleri yeniden konumlanmaktadır. Böylece yarım saatten kısa sürede, uydu tam bir dönüş yapmaktadır. Bu durum faz dönmesine neden olmaktadır [Kahveci, 2010].

Uydu faz dönmesi, diferansiyel konumlandırma için 100 km'lik baz uzunluklarında ihmal edilebilir. Örneğin, 4000 km'lik bir baz uzunluğunda bu etkinin yaklaşık 4 cm'lik bir hataya neden olduğu belirlenmiştir [Kouba, 2009].

Uydu faz dönmesi etkisi diferansiyel konumlandırmada birkaç yüz kilometrelik bazlarda ihmal edilebilse de, PPP yönteminde bu etki bir dalga boyunun yarısına ulaşabileceği için büyük önem taşımaktadır [Kouba and Heroux, 2001]. Faz dönmesi düzeltmesi aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla yapılabilir [Wu at al., 1993]:

$$D = x - k(k.x) + kxy \tag{3.1}$$

$$D' = \bar{x} - k(k.\bar{x}) - kx\bar{y} \tag{3.2}$$

$$\Delta\Phi = sign(k.(D'xD))\cos^{-1}(D'.\frac{D}{|D'||D|}) \tag{3.3}$$

- k : Alıcı birim vektörü uydusu,
- x, y, z : Yerel alıcı birim vektörler,
- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$: Uydu ünitesi koordinat birim vektörleri,
- $\Delta\Phi$: Faz dönmesi düzeltmesi,
- D, D' : Uydu ve alıcı etkili dipol vektörler.

3.1.1.5. Göreceli Etki

Bir uydudan bir alıcıya gelen sinyalin yolculuk zaman ölçümü, uydu konumlandırma ilkesini meydana getirir. Göreceliğin ortaya çıkmasının nedeni, yerçekimi potansiyeli ile alıcı saati ve uydu saatinin hareket eden hız farkıdır. Bu fark ölçülen zamanı etkiler. Bu nedenle göreceli düzeltmeye PPP yönteminde önem verilmelidir. Uydu saatleri, özel görecelik ve genel görecelik olmak üzere iki göreceli etki ile karşı karşıyadırlar. Özel görecelik teorisine göre, sabit bir hızda hareket eden uydu saati, göreli hareketin zaman dilatasyonu etkisinden dolayı yeryüzündeki saatten daha yavaş görünür [Tao, 2008]. Bu göreceli etki düzeltmesi aşağıdaki gibi uygulanabilir [GPS ICD, 2000]:

$$\Delta t_r = -\frac{2\vec{R}.V^{\rightarrow}}{c^2} \tag{3.4}$$

- Δt_r : Görecelik düzeltmesi,
- R : Uydu anlık konum vektörü,
- V : Uydu anlık hız vektörü,
- c : Işık hızı.

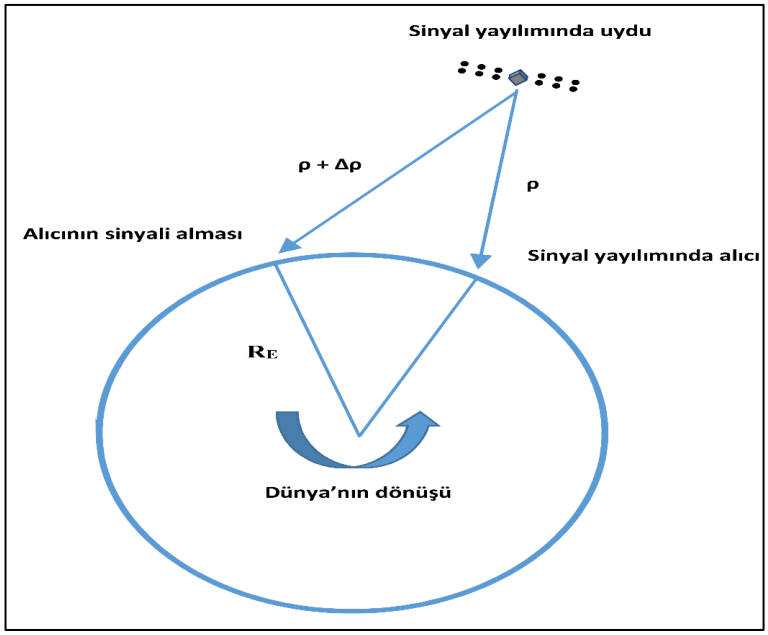
Genel göreceliğe göre ise, uydu saati yerçekimindeki farklılıklardan dolayı yeryüzündeki saatten daha hızlı çalışıyor gibi görünür. Bu etki için düzeltme aşağıdaki denklemde verilmiştir [Rothacher and Beutler, 2002]:

$$\Delta t_p = \frac{2GM}{c^2} \ln\left(\frac{r^s + r_r + r_r^s}{r^s + r_r - r_r^s}\right) \tag{3.5}$$

- Δt_p : Yerçekimi gecikme hatası,
- G : Yerçekimi sabiti,
- M : Dünya'nın kütlesi,
- r^s : Uydu ile Dünya arasındaki mesafe,
- r_r : Alıcı ile Dünya arasındaki mesafe,
- r_r^s : Alıcıdan uyduya olan mesafe.

3.1.1.6. Yeryuvarı Dönme Parametreleri (Sagnac Effect)

Yeryuvarının kendi ekseni çevresindeki dönme hareketinden dolayı uydudan yayınlanan sinyal alıcıya ulaşıncaya kadar, yeryüzündeki bu alıcı 500 m/s hıza ulaşır. Dünyanın hareketinden kaynaklanan bu hataya sagnac etkisi denir. Sagnac etkisi 30 m'lik konum hatasına neden olabilir. Bu durumun, uyduların koordinatına düzeltme olarak eklenmesi gerekir [Ebner, 2008], [Ashby and Weiss, 1999]. Sagnac etkisi şekil 3.4'te gösterilmiştir [Ebner, 2008], [Kaplan and Hegarty, 2006].



Şekil 3.4: Sagnac etkisi.

Sagnac etkisi, uydudan alıcıya sinyal yayılması sırasında yeryüzünün merkezinden ışık ışınına yarıçap vektörü tarafından süpürülen orantısal alandır [Parkinson and Ashby, 1996].

$$\Delta t_s = +\frac{2\Omega_e . A_e}{c^2} \tag{3.6}$$

Ω_e dünyanın açısal dönme hızı (WGS-84) ve A_e uydudan alıcıya sinyal yolculuk ederken yeryüzünün merkezinden ışık ışınına yarıçap vektörü tarafından süpürülen toplam alandır.

3.1.2. Alıcı Kaynaklı Hatalar

3.1.2.1. Alıcı Saat Hataları

GNSS alıcı saatlerinin çoğunda maliyeti aşağı çekmek amacıyla bir kuarts kristal osilatör kullanılmaktadır. Ancak bunlar hem ortam sıcaklık değişiminden çabuk etkilenmekte hem de GNSS uydu saatlerinde kullanılan atomik saatler kadar uzun süre istikrarlı kalmamaktadırlar. Bu durum ise uydu ve alıcı arasındaki mesafenin hatalı hesaplanmasına neden olmaktadır. Bu yüzden uydu zaman ölçeğine göre sapmaların (drift) sık sık karşılaştırılması gerekmektedir [Martin,2013], [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

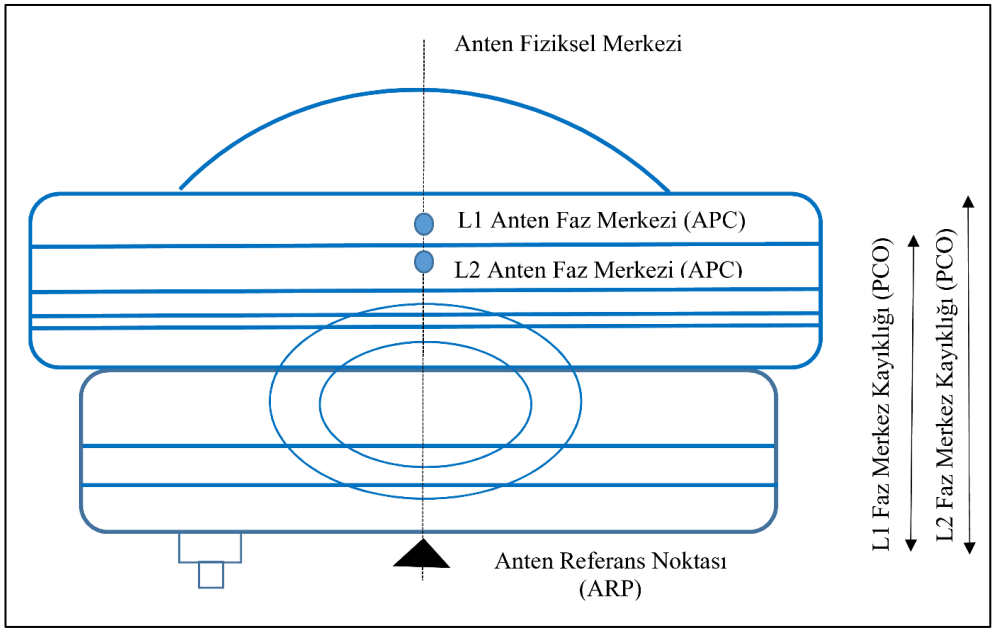
Standart PPP yaklaşımında uydular arasındaki saat ofsetleri giderilebilmektedir. Bu alıcı konumu ile birlikte bir stokastik parametre olarak kestirilmektedir [Martin,2013], [Kouba, 2009].

Alıcı saat hatası, hassas nokta konumlamada genellikle üç koordinat bileşeni ile bilinmeyen parametreler olarak tahmin edilmektedir. Alıcı saat hatasını hesaplamak amacıyla ek uydular gözlenmelidir. Bunun yanı sıra alıcı saat hatası, uydular arasındaki gözlemlerin farklılaşmalarına göre azaltılabilir.

3.1.2.2. Alıcı Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları (Phase Center Variation)

Uydularda L1 ve L2 taşıyıcı sinyallerinin faz merkezi aynıyken, alıcı antenlerinde farklıdır. GPS/GNSS uydu sinyalleri her doğrultudan geldiği için alıcı

anteni faz merkezi konumu da bu doğrultulara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu doğrultu bağımlılığına "alıcı anteni faz merkezi değişimleri Phase Center Variotions (PCV)" denilmektedir. Bu değişimler, uydu antenlerine göre alıcı antenlerinde daha karmaşık bir sistem içerir. Bunun nedeni sözü edilen değişimlerin kullanılan anten modeline göre farklılık göstermesidir. Özellikle aynı ağda farklı model antenler kullanılarak yapılan ölçümlerde, bu etki daha da önem kazanır. Bu etki dikkate alınmadığı zaman, baz uzunluğundan bağımsız olarak genellikle istasyon yüksekliğinde 10 cm'ye varan hatalar meydana gelmektedir. Ağda aynı model antenler kullanılarak ölçüm yapıldığında ise, bu etki kendini ölçek faktörü olarak göstermekte ve büyüklüğü de yaklaşık 0.015 ppm olarak verilmektedir [Kahveci, 2010], [Hugentobler et al., 2001]. GNSS alıcı anteni faz merkezi kayıklığı şekil 3.5'te gösterilmiştir [Web 10, 2017].

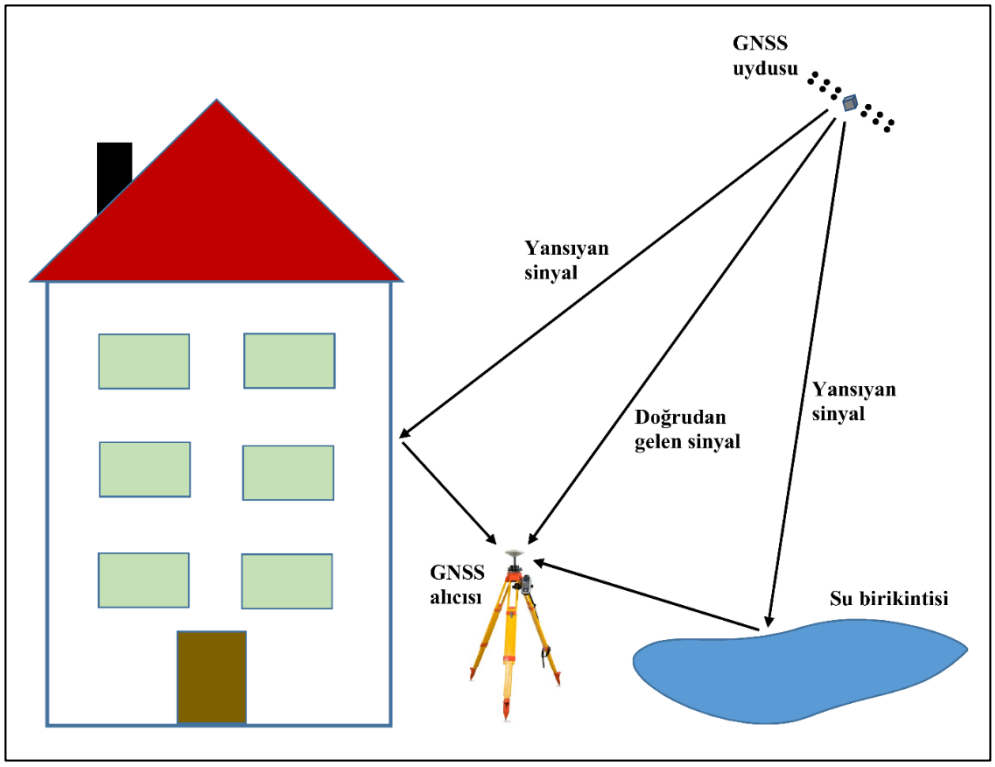


Şekil 3.5: GNSS alıcı anteni faz merkezi kayıklığı.

GNSS ağında değişik tip ve model antenler kullanılıyorsa ve troposferik parametreler de hesaplanacaksa, mutlak faz merkezi değişimlerini içeren faz merkezi dosyaları kullanılmalıdır. Hassas nokta belirleme çözümlerinde, bu hatalar sonuçları doğrudan etkiledikleri için, özellikle yükseklik bileşeni açısından dikkate alınmaları gerekmektedir [Mutlu, 2011].

3.1.2.3. Sinyal Yansıma Hatası (Multipath)

Alıcı antenin çevresindeki nesnelerden yansıyan sinyaller, sinyal yansıma (multipath) hatasına neden olmaktadır. Bu durum GPS veya GLONASS uydularından alıcıya doğrudan gelen sinyalleri bozar ve böylece kod doğruluğunu ve taşıyıcı faz ölçümlerini düşürür [Weill, 2003]. Alıcı teknolojileri hızla gelişmektedir. Buna rağmen, uydudan alıcıya gelen sinyaller yüksek yapılarda; dağlık, ağaçlık ve ormanlık gibi alanlarda kırılmalara uğrarlar. Uydulardan yayınlanan sinyallerin yeryüzünde herhangi bir noktada kurulu olan antene bir veya daha fazla yol izleyerek ve esas sinyale karışarak ulaşmasına sinyal yansıma (multipath) etkisi denir [Tiryakioğlu, 2005]. Şekil 3.6'da sinyal yansıma hatası gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Sinyal yansıma hatası.

Bu kırılmalar nedeniyle sinyal yansıma hatası, konumlandırma ve navigasyonda hâlâ ana hata kaynağı olarak kalmaktadır. Teorik olarak maksimum sinyal yansıma hatası yaklaşık kod çip uzunluğunun yarısıdır: P (Y) kodu için 15 metre ve C/A kodu için 150 metredir. Faz gözlemde çok yollu etki dalga boyunun dörtte birini aşmaz; yaklaşık L1 ve L3 için 5-6 cm'dir [Shen, 2002].

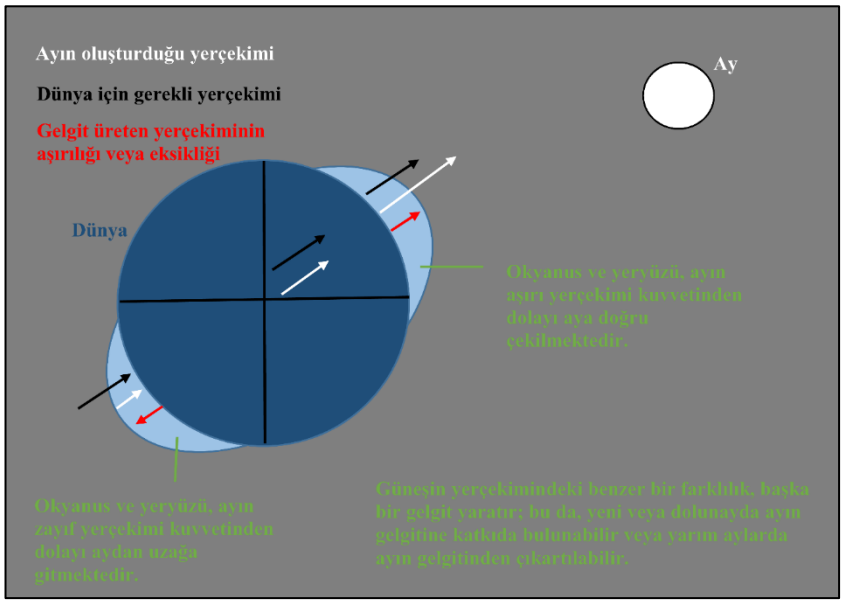
Sinyal yansıma etkisini azaltmak için, ölçüm yapılacak yerin doğru seçilmesi

gerekir. Ancak bazı zorunlu durumlarda bu seçim pek mümkün değildir. Bu nedenle farklı anten donanımları kullanılarak sinyal etkisi azaltılabilir. Bunun için de alıcı antende choke ring anten tipi kullanılır. Bir de farklı alıcı yazılımları ile sinyal azaltma etkisi giderilebilir. Ayrıca, uydu yükseklik açısının 10°-20° arasında seçilmesi, sinyal yansıma etkisini azaltacak etmenlerden biridir.

3.1.3. Jeodinamik Hareketlerden Kaynaklı Hatalar

3.1.3.1. Katı Yeryuvarı Gelgiti (Solid Earth Tides)

Güneş'in ve Ay'ın neden olduğu yerçekimi kuvveti, dünya üzerinde düşey ve yatay yönlü periyodik deformasyonlar meydana getirir. Bu durum, Love ve Shida sayıları ile karakterize edilen küresel derece ve sıra küresel harmoniklerle anlatılabilir. İstasyon enlemi, gelgit frekansı ve yıldız zamanına bağlı olan gelgit etkileri, yükseklik bileşeninde yaklaşık 30 cm'ye, yatay bileşende ise 5 cm'ye ulaşabilir [Kouba and Heroux, 2001].



Şekil 3.7: Katı yeryuvarı gelgiti.

Katı yeryuvarı gelgitinin neden olduğu yer değiştirme, sabit ve periyodik kısım olmak üzere iki parçaya bölünebilir. Periyodik kısım bir gün boyunca yapılan statik ölçümle belirli oranda azaltılabilirken, sabit kısım orta enlem bölgesinde 12 cm'ye kadar ulaşabilir [Kouba and Heroux, 2001]. Şekil 3.7'de katı yeryuvarı gelgiti

gösterilmiştir [Web 11, 2017].

Sabit ve periyodik yer değiştirme düzeltmeleri için eşitlik [IERS, 1989]:

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^{3} \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ \left[3l_2\left(\widehat{R}_j.\hat{r}\right)\right]\widehat{R}_j + \left[3\left(\frac{h_2}{2} - l_2\right)\left(\widehat{R}_j.\hat{r}\right)^2 - \frac{h_2}{2}\right]\hat{r} \right\} + \left[-0.025m.\sin\emptyset.\cos\emptyset.\sin(\theta_s + \lambda)\right].\hat{r} \tag{3.7}$$

- $\Delta\vec{r}$: Kartezyen koordinat sisteminde yer değiştirme bölge vektörü,
- GM : Dünya'nın yerçekimi parametreleri,
- GM_j : Ay'ın (j=2) ve Güneş'in (j=3) yer çekimi parametreleri,
- r : İstasyon merkezli durum vektörü,
- R_j : Ay'ın (j=2) ve Güneş'in (j=3) yer merkezli durum vektörü,
- $\hat{r}$: İstasyon yer merkezli birim durum vektörü,
- $\widehat{R}_j$: Ay'ın (j=2) ve Güneş'in (j=3) yer merkezli birim durum vektörü,
- l_2 : Nominal 2. derece Love sayısı (0.609),
- h_2 : Nominal 2. derece Shida sayısı (0.085),
- Φ : Nokta enlemi,
- λ : Nokta boylamı,
- θ_g : Greenwich yıldız zamanıdır.

PPP yönteminde, katı yeryuvarı gelgiti etkisinin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Bu etki önemsenmediği zaman sistematik hatalar meydana gelmektedir. PPP uygulamalarında bu etkinin göz ardı edilmesi durumunda, uzun süreli statik ölçüler yapılsa bile mutlak konumda radyal doğrultuda 12 cm'ye, kuzey doğrultusunda ise 5 cm'ye ulaşan sistematik hataların ortaya çıkma olasılığı vardır. Ancak bağıl konum belirleme yöntemi ile yapılan uygulamalarda 100 km'den küçük baz uzunluklarında, bu etki bazın her iki ucunda aynı kabul edilebileceğinden, büyük oranda giderilmektedir [Kouba and Heroux, 2001], [Kouba, 2009].

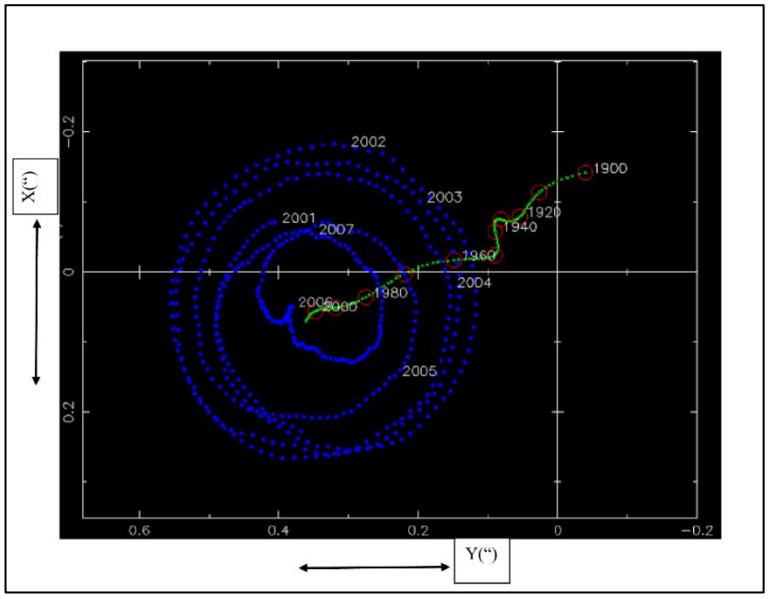
3.1.3.2. Okyanus Yüklemesi (Ocean Loading)

Katı yeryuvarı gelgitlerine benzer şekilde, yerçekimi kuvveti ile deniz suyu dağıtılırken deniz tabanında ve kıyı bölgelerinde yer kabuğuna yük binmektedir. Bu

durum da, deniz tabanında deformasyona ve kıyı bölgelerinde yer değiştirmelere neden olmaktadır. Okyanus yüklemesi, katı yeryuvarı gelgitlerinden daha küçük büyüklükteki günlük veya yarı günlük periyotlar halinde gösterilir. Bu etkilere, duyarlılığı yüksek olması gereken kinematik yöntemle konum belirlemede ve saatten kısa süreli statik ölçmelere dayalı konum belirlemede önem verilmelidir. Diğer taraftan okyanus kıyısından karaya doğru 1000 km ve daha uzakta bulunan istasyonların konum bilgisi hesabında ve 24 saatlik uzun süreli statik gözlemlerde bu etki dikkate alınmaz [Kouba and Heroux, 2001].

3.1.3.3. Kutup Gelgiti

Ay ve Güneş, çekim güçleriyle yeryuvarını etkilemektedirler. Bu dış güçlerin yanı sıra yeryuvarının elastik yapısı, atmosfer ve okyanusların katı yeryuvarına etkileri nedenleriyle Dünya'nın dönme ekseninde değişimler olmaktadır. Yeryuvarı merkezkaç kuvveti potansiyelindeki küçük değişimler nedeniyle dönme ekseninin (ya da anlık kutbun) katı yeryüzüne göre hareketi "kutup gezinmesi (Polar Motion)" olarak tanımlanmaktadır. Bu hareket periyodik deformasyonlara neden olduğu gibi, Ay'ın ve Güneş'in çekim etkileri de istasyon koordinatlarında periyodik değişimler meydana getirmektedir. [Kahveci, 2010], [Herring, 1988].



Şekil 3.8: Yeryuvarı dönme ekseninin 1900-2007 yılları arasında izlediği yol, kutup gezinme hareketi.

Kutup Gelgiti (Polar Tides) etkisinin değişimi çok yavaş olduğu için, diğer gelgit (okyanus ve katı yeryuvarı) etkilerinde olduğu gibi uzun süreli gözlem yapılarak bu etki giderilememektedir. Bu nedenle 1900-1905 yılları arasındaki ortalama kutup hareketi, kutup gezinmesi gözlemleri için başlangıç sayılmaktadır. Günümüzde kutup gezinmesi hareketi yeryüzünde yaklaşık 1-1,5 cm büyüklüğe karşılık gelmektedir. Kutup gelgiti etkisinin de yükseklik bileşeninde en fazla 25 mm'ye, yatay doğrultuda ise en fazla 7 mm'ye ulaşabildiği belirlenmiştir [Kahveci, 2010], [Kouba, 2009], [Kleusberg and Teunissen, 1998], [Montenbruck and Gill, 2000]. Şekil 3.8'de yeryuvarı dönme ekseninin 1900-2007 yılları arasında izlediği yol, kutup gezinme hareketi gösterilmiştir [Kahveci, 2010].

3.1.4. Atmosferik Modelleme

3.1.4.1. Atmosfer Yükleme

Atmosferik kütlenin yer ve zaman değişimlerinden atmosfer yüklemesi ortaya çıkar. Atmosfer yüklemesinin, okyanus ve katı yeryuvarı gelgitleri üzerinde dolaylı bir etkisi vardır. Bu durum, yeryüzünde derformasyona neden olur [Witchayangkoon, 2000]. Sonuçta, atmosfer yüklemesinin yol açtığı yer değiştirme, dikey bileşende 20 mm'ye, yatay bileşende 3 mm'ye ulaşabilir [Petrov and Boy, 2004]. Bu yer değiştirme, yüksek enlem bölgeler ile karşılaştırıldığında orta enlem bölgelerde daha büyük bir değere sahip coğrafi konumun bir fonksiyonudur [IERS, 1996]. Basitten karmaşığa doğru değişken çok sayıda atmosfer yükleme yer değiştirme modelleri bulunmaktadır. Bunlardan biri olan basit model aşağıda verilmiştir [Rabbel and Schuh, 1986]:

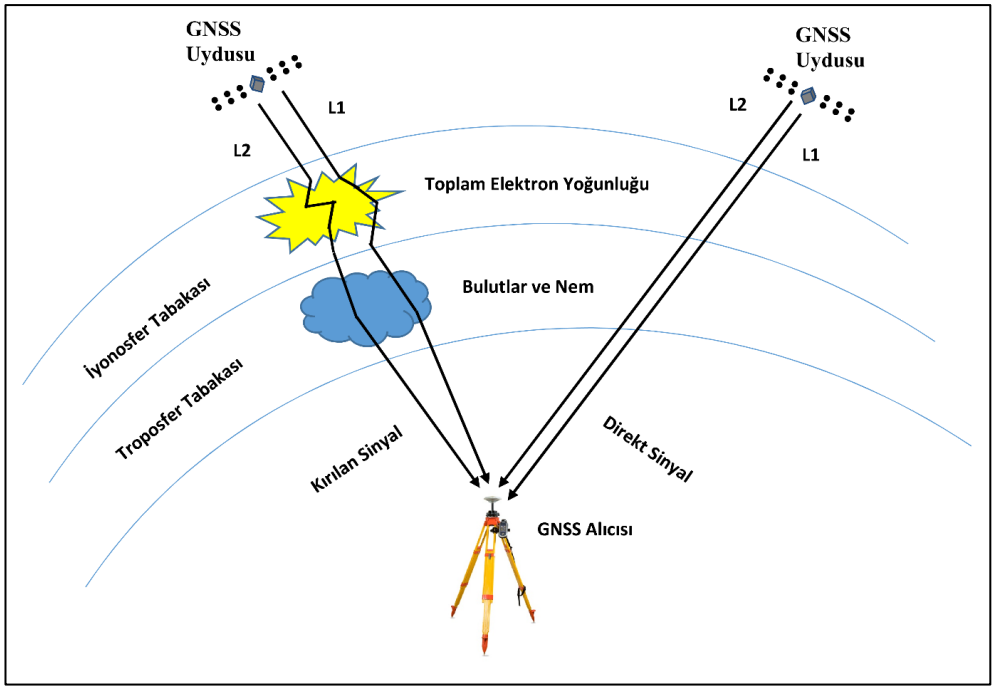
$$\Delta r = -0.35p - 0.55p' \tag{3.8}$$

- Δr : Milimetre birimde atmosfer yükleme yer değiştirme,
- p : Standart değerden (101.3 KPA) bölge basınç farkı,
- p' : İstasyondan 2000 km içinde basınç bozukluğudur.

3.1.4.2. İyonosfer Etkisi

İyonosfer; yeryüzünden yaklaşık 60 km ile 1100 km arasında yer alan atmosferin

iyonlaşmış bölümüdür. Güneş ışınları ile iyonize olmuş gazlardan oluşur, serbest elekronlar ve pozitif yüklü iyonlar içerir. İyonosfer, radyo dalga yayılımı bakımından önemli bir atmosfer katmanıdır. Sinyal yayılımı ve ortamın elektriksel özellikleri, serbest elektronlar ve pozitif yüklü iyon parçalarından büyük ölçüde etkilenmektedir. İyonesferin yapısı ve maksimum elektron miktarı; zaman, coğrafi konum, güneş ışınımı, dünyanın magnetik alanı ve yerkabuğu hareketleri ile yakından ilgilidir. İyonosferin konumuna göre değişen kırılma indisi, uydu sinyalleri için taşıyıcı frekansların fonksiyonudur [Web 12, 2009].



Şekil 3.9: İyonosfer ve troposfer etkisi.

Uydulardan yeryüzündeki alıcılara gönderilen sinyaller, iyonosfer katmanında frekansın fonksiyonu olan kırılmaya uğrarlar. Bu durum, uydu sistemleri (konum belirleme, kısa dalga haberleşme, iletişim sinyalleri vb.) için düzeltilmesi gereken temel hatalardan biridir. İyonosferin radyo dalgalarına etkisi, iyonosferdeki serbest elektron yoğunluğuna bağlıdır. İyonosferdeki iyonlaşma miktarı güneş ışınımı ile ilgilidir. Güneş ışınımı ile elektronlar moleküllerinden ayrılarak serbest hale geçerler. Serbest elektron miktarı en yüksek seviyeye yerel saate göre 14:00 civarında ulaşır. Geceleri ise elektronlar iyonlar ile birleştiğinden serbest elektron yoğunluğu azalır. İyonosferdeki gecikme, gündüz ve geceye bağlı olarak 1-20 m arasında değişiklik göstermektedir. Bu günlük değişimlerin yanı sıra iyonosferde mevsimsel değişimler

de meydana gelmektedir [Arslan 2004], [Web 12, 2009]. Gerçekleşen bu olaylar sonucunda ortaya çıkan serbest elektronlar GPS/GNSS sinyalleri üzerinde kod ölçülerini geciktirici, taşıyıcı faz ölçülerini ise hızlandırıcı bir etki gösterir. Bu etki toplamda GPS/GNSS sinyalinin uydudan alıcıya olan mesafesi ölçüsünde 3-15 m arasında değişme meydana getirir. Hassas konum belirleme çalışmalarında bu hatanın modellenmesi gerekmektedir [Erkan vd., 2010]. Şekil 3.9 iyonosfer ve troposfer etkisini göstermektedir.

İyonosfer saçıcı bir ortam olduğundan GPS'nin çift sinyal özelliğinden yararlanılarak, sinyal kombinasyonu ile "toplam elektron yoğunluğu (TEC)" modellenebilmektedir. TEC değerleri, küresel ya da bölgesel (yerel) iyonosfer yapısı hakkında bilgiler içermektedir. Bölgesel TEC haritalarının elde edilmesi için fark alınmamış taşıyıcı faz verisine Taylor açılımı uygulanmaktadır. Küresel iyonosfer etkilerinin modellenmesinde ise, bölgesel nitelikteki Taylor açılımı yetersiz kaldığı için küresel harmonik açılım kullanılmaktadır [Arslan, 2004], [Dach et al., 2007].

GNSS ölçülerinde kullanılmak üzere birçok iyonosfer matematiksel model bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında faz ve kodların lineer kombinasyonu olan ve İonosphere-Free olarak adlandırılan model kullanılmıştır. L1 ve L2 dalgalarının frekans farklılığından dolayı iyonosfer üzerindeki etkisi de farklı olacaktır. Bu farklılıkların kombine edilmesi için iyonosfer kaynaklı hatalardan arındırılmış matematiksel model aşağıda oluşturulmuştur:

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 . P_1 - f_2^2 . P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho - cdt + d_{trop} \tag{3.9}$$

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 . \emptyset_1 - f_2^2 . \emptyset_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho - cdt + d_{trop} + \frac{cf_1 . N_1 - cf_2 . N_2}{f_1^2 - f_2^2} \tag{3.10}$$

Yukarıdaki formülde ρ alıcı ile uydu arasındaki gerçek uzunluğu, c ışık hızını, dt saat hatalarını, d_{trop} ise troposferik düzeltmeyi göstermektedir. N ise faz başlangıç belirsizliği yani ambiguity'yi ifade etmektedir.

3.1.4.3. Troposfer Etkisi

Troposfer, Dünya yüzeyinden yaklaşık 40 km yukarıdaki atmosfer tabakasıdır

[Hofmann, 2001]. İyonosferden farkı, dağıtıcı ortam olmamasıdır. Bu yüzden etkisi L1 ve L2 verilerinin gözlem kombinasyonları ile ortadan kaldırılamaz. Troposferik gecikme büyüklüğü; uydu yükseklik açısı, alıcı (istasyon) yüksekliği, atmosferik basınç, sıcaklık ve su buhar basıncı gibi birçok etkene bağlıdır. Troposfer, kuru ve ıslak olmak üzere iki bileşene ayrılmıştır.

Kuru bileşene troposferin daha yüksek kısmı neden olmakta ve toplam troposfer hatasının yaklaşık % 90'ını açıklamaktadır. Oysa ıslak bileşene troposferin daha düşük kısmı neden olmakta ve toplam troposferik gecikmenin yaklaşık % 10'unu almaktadır. Ayrıca, kuru troposferik gecikme kolayca modellenebilir. Ama ıslak troposferik gecikmenin sıvı suyun düzensiz değişiminden, uzaydaki su buharından ve troposferdeki zamandan dolayı modellenmesi zordur [Misra and Enge, 2001].

Troposfer tabakası saçıcı olmayan bir ortam olduğundan sinyal frekansına bağlı değildir. Troposfer tabakasında uygulanan çift frekans kombinasyonu ile bu etki giderilemez. Bu nedenle ıslak bileşen, dolayısıyla toplam troposferik gecikme modellendirilerek giderilir. Bu modellerin en yaygınları; yüzey modelleri (Hopfield ve Saastamoinen modelleri), radyosond profilleri, su buharı radyometresi (SBR) ve standart atmosfer modeli olan troposferik parametre kestirimidir. L1 ve L2 frekansları için troposferik gecikme aynı değildir. Ayrıca troposferin, yükseklik bileşenine etkisi daha fazladır [Arslan, 2004], [Mekik, 1999], [Brunner and Welsch, 1993], [Dodson, 1995].

Troposferik etkinin radyo sinyal yayılımı üzerindeki etkisini formüle etmek amacıyla birçok troposferik düzeltme modeli geliştirilmiştir. Bunların yanı sıra yükseklik açısının bir fonksiyonu olarak sinyal gecikmesinin tanımlandığı, birçok farklı oransal model fonksiyon (mapping function) bulunmaktadır.

Uydu ile alıcı arasında seyahat eden sinyalin yükseklik açısı 15°'nin altında olduğu durumlarda troposferik gecikme çok büyük boyutlara ulaşmakta ve modellenmesi daha da zorlaşmaktadır. Troposferik gecikmenin zenitteki değeri (uydunun yükseklik açısındaki değerine eşlenmiş durumu, kısaca sinyalin başucu doğrultusundaki gecikme değeri) 2.2 m civarında olurken, yatayda yani yükseklik açısının 0°'ye yakın olduğu durumlarda 25-85 m arasında değişebilmektedir. Bu nedenle GPS/GNSS ölçme çalışmalarında troposferden ve sinyal yolu eğriliğinden fazla etkilenilmemesi için gözlemlerin 15°'nin altına inen uydu yükseklik açı değeri ile yapılmaması önerilmektedir [Mekik, 1999].

Niell'in [Niell, 1996]'daki çalışmasında görüldüğü gibi, uydular zenit

doğrultusunda değilken troposferde öngörülen sinyal yolu uzunluğunun artışını gösteren bir oransal fonksiyon ve katsayı belirlenmesi gerekmektedir. Buna göre troposferik düzeltme (d_{trop}), (3.11) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır [Ebner, 2008], [Niell, 1996].

$$d_{trop} = zpd\ \chi\ Map = d^{z}_{kuru}\ \chi\ Map + d^{z}_{ıslak}\ \chi\ Map \tag{3.11}$$

- d_{trop} : Troposferik düzeltme,
- zpd : Zenit yolu gecikmesi (zenit path delay),
- $d^{z}_{kuru}, d^{z}_{ıslak}$: Zenit yolu gecikmesi için kuru ve ıslak bileşenler,
- Map : Oransal fonksiyon/katsayı (mapping function).

3.2. Geleneksel GPS-PPP Matematik Modeli

Geleneksel PPP modellerinde, L1 ve L2 taşıyıcı faz gözlemleri ölçüsünde L1 ve L2'den gelen kod gözlemleri arasındaki serbest-iyonosfer kombinasyonu da kullanılır. PPP'de iyonosferik hata etkisini azaltmak amacıyla, serbest-iyonosfer, kod-kod ve faz-faz gözlem kombinasyonları, çok tercih edilir. Bir alıcı ve uydu arasında L1 ve L2 ile ilgili kod pseudorange mesafesi ve taşıyıcı faz gözlemleri, aşağıdaki denklem ile gösterilir:

$$P_i = \rho + c * dt - c * dT + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion/P_i} + d_{mult/P_i} + \varepsilon_{P_i} \tag{3.12}$$

$$\Phi_i = \rho + c * dt - c * dT + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion/\Phi_i} + \lambda_i * N_i + d_{mult/_{\Phi_i}} + \varepsilon_{\Phi_i} \tag{3.13}$$

Bu denklemde yer alan semboller ve anlamları aşağıda belirtilmiştir:

- N_i : L_i ile ölçülen pseudorange mesafe (m),
- Φ_i : L_i ile ölçülen taşıyıcı faz,
- ρ : Gerçek geometrik aralığı (m),
- c : Işık hızı (m/s),

- dt : Alıcı saat hatası (s),
- dT : Uydu saat hatası (s),
- d_{orb} : Uydu yörünge hatası (m),
- d_{trop} : Troposferik gecikme (m),
- d_{ion/L_i} : Üzerindeki iyonosferik gecikme olduğu L_i(m),
- λ_i : Dalga boyunda olduğu L_i(m/cycle),
- N_i : L_i (cycle) üzerinde tamsayı faz belirsizlik olduğu,
- d_{mult/P_i} : L_i (m) üzerinde mesafe içinde sinyal yansıma (multipath) etkisi,
- $d_{mult/_{\Phi_i}}$: L_i(m) taşıyıcı faz içindeki sinyal yansıma (multipath) etksi,
- ε : Ölçüm gürültüsü (m).

Uzunluk biriminde geleneksel PPP modeli, iyonosfer-serbest kod ve faz gözlem kombinasyonları olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir [Shen, 2002]:

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 * P_1 - f_2^2 * P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c * (dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + d_{mult/P_{IF}} + \varepsilon_{P_{IF}} \tag{3.14}$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2 * \Phi_1 - f_2^2 * \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c * (dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + \frac{c * f_1 * N_1 - c * f_2 * N_2}{f_1^2 - f_2^2} + d_{mult/\Phi_{IF}} + \varepsilon_{\Phi_{IF}} \tag{3.15}$$

GPS hassas yörünge ve saat verileri, GPS gözlemleri ile konum belirlenmeden önce, uydu ve yörünge saat hatalarını azaltmak için uygulanır. İyonosferik kırılmadan kaynaklanan sapmalar, birleşik serbest-iyonosfer L1 ve L2 kod ve faz ölçülerinin kombinasyonu yapılarak ortadan kaldırılır. Hassas uydu yörünge ve saat düzeltmeleri uygulandıktan sonra, serbest-iyonosfer kod ve faz gözlem kombinasyonları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P'_{IF} = \rho + c * dt + d_{trop} + \varepsilon'_{P_{IF}} \tag{3.16}$$

$$\Phi'_{IF} = \rho + c * dt + d_{trop} + N'_{IF} + \varepsilon'_{\Phi_{IF}} \tag{3.17}$$

Burada;

- P'_{IF} : Metre biriminde düzeltilmiş serbest-iyonosfer kod gözlemi,
- Φ'_{IF} : Metre biriminde düzeltilmiş serbest -iyonosfer faz gözlemi,
- N'_{IF} : Uzunluk biriminde birleştirilmiş tam sayı belirsizliği,
- ε'_{IF} : Kalıntı hataları, sinyal yansıma ve sinyal gürültüyü içeren gürültü terimidir.

Geleneksel modelde bilinmeyen parametreler, 3 koordinat bileşeni, bir alıcı saat kayıklığı, bir ıslak zenit troposferik gecikme bileşeni ve her gözlenen uydu ile ilişkili birleşik tam sayı belirsizlik parametreleridir. Geleneksel gözlem modelinin matematiksel ifadesi açısından bazı özellikleri vardır [Shen, 2002]. Öncelikle, serbest-iyonosfer kombinasyonları, toplam iyonosferik etkiden % 0,1'den az olarak hesaplanan, yüksek mertebedeki iyonosferik etkiyi uzaklaştıramaz. Ayrıca, birleşik tam sayı belirsizlik terimi, serbest iyonosfer kombinasyonundan sonra ortaya çıkan tamsayı karakteristiği, yayılan tek bir değer gibi tahmin edilebilir. Bir de şunu eklemek gerekir ki, iyonosfer-bağımsız kombinasyonundan sonraki gürültü, orijinal kod ve faz ölçmelerinin gürültülerinden üç kat daha fazladır.

4. YAPI SAĞLIĞI İZLEMELERİ

Günümüz dünyası, betonarme yapıların büyük bir hızla yükseldiği geniş bir şantiye alanına dönmüştür. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, inşaat sektörü muazzam başarılara imza atmaktadır. Dünyanın her yerinde gökdelenler, yüksek binalar, kuleler her geçen gün çoğalmaktadır. Bu durum, yeni sorumlulukları, hesaplamaları, çözüm arayışlarını da beraberinde getirmektedir. Asma köprülerin ve yüksek yapıların, diğer mühendislik yapılarında olduğu gibi deprem yükünü karşılayacak şekilde projelendirilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra bu çok yüksek yapıların, dinamik bir yük oluşturan rüzgâr yükünü karşılayacak şekilde tasarlanması ve yapılması da artık üzerinde durulması gereken çok önemli bir konu haline gelmiştir. Daha az malzeme ile daha uzun yapıların inşası, mühendislik yapılarının yatay rüzgâr yüküne karşı daha duyarlı olmaları şartını ortaya çıkarmıştır. Yüksek yapıyı etkileyen yatay yükün oluşturacağı sonuçların değerlendirilmesi; mühendislerin sorunları ortadan kaldırması, yapıyı dayanıklı hale getirecek çözümler üretmesi gereken çalışmaları başlatmıştır [Liu, 1991].

Yapı sağlığının, sağlamlığının ve bütünlüğünün değerlendirilmesi yönünde en önemli parametrelerden biri, farklı sensörlerle elde edilen ölçmeler sonucunda yapıların doğal frekanslarının belirlenmesidir. Mühendislik yapılarının, farklı özellikleri olan sensörlerle farklı yükler altındaki tepkilerinin izlenmesindeki önemi; yapıların doğal frekanslarının ve sönümleme oranlarının hesaplanmasında, proje kabullerinin kontrol ve kalibrasyonunda, analitik modellerin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesinde ortaya çıkmaktadır [Yiğit, 2010].

4.1. Yapı Sağlığı İzlemenin Önemi

Günümüzde pek çok alanda çalışmalar birlikte yapılmaktadır. Her alanın kendine özgü ölçme, inceleme ve değerlendirme sistemleri diğer yakın ve bağlantılı alanlarda kullanılabilmektedir. Bu katkıların değeri bilimler arası çalışmalarda son derece önemlidir. Ancak sistemlerin bu yararlı katkılarının yanı sıra eksiklikleri de bulunmaktadır. Bu yüzden araştırma ve inceleme altındaki yapı ya da sistem her seferinde tam manasıyla değerlendirilememektedir. Yine de ölçme sistemlerinin birlikte kullanılması ve analiz sistemlerinin karşılaştırılması ile görülen eksiklikler giderilmeye çalışılmaktadır. Sonuçta incelenen yapı ya da sistemle ilgili daha geçerli

ve doğru bilgiler elde edilmektedir. Bu da mühendislik sistemlerinin tasarımında önemli gelişmelerin yolunu açmaktadır. [Yiğit, 2010].

Yapı sağlığının ve sağlamlığının izlenmesinin amacı; yapısal tepkileri ölçmek, ayrıca deprem, rüzgâr vb. gibi şiddetli yükler ve gitgide artan çevresel bozulmalar yüzünden oluşan hasarları doğru bir biçimde belirlemek ve değerlendirmektir. Yapısal tepkiler, yapıyı etkileyen güçlerle birlikte yapının durumunu da ortaya koyarlar. Yapının yükler altındaki tepkilerinin belirlenmesi ve incelenmesi çalışmaları ile birlikte yapı sağlığı ve sağlamlığı izlemeleri yapının durumunu açığa çıkarır. Mekanik, uzay ve denizcilik alanlarının yanı sıra inşaat alanında da yapı sağlığı izlemelerinden büyük ölçüde yararlanılmaktadır. Yapı sağlığı izlemeleri sözü edilen alanların mühendislerine geniş bir çalışma ortamı sunmaktadır [Yiğit, 2010].

Yapı sağlıklarının izlenmesi, inşaat mühendisliği yönünden, yapıların kontrolü ve sürekliliği adına son derece verimli ve etkili bir araçtır. Bir alt yapı hizmeti durumundaki mühendislik yapıları, büyük maliyetlerle meydana gelir, insanlığa yüksek bir yaşam kalitesi sunar ve yaşamı kolaylaştırır. Ne var ki bu yapılar, zaman içerisinde çevresel etkilerle ve yüklerle karşılaşır ve yıpranır [Yiğit, 2010].

Yapı sağlığı izlemesinden; zamana karşı koyamayan yapısal bozulmalarda olduğu gibi deprem, kasırga ve tayfun gibi şiddetli yükler nedeniyle ortaya çıkan yapısal hasarların belirlenmesinde de yararlanılabilir. Yapı sağlığı izlemesi dışındaki geleneksel ayrıntılı değerlendirmelerin maliyeti yüksek olabilir. Ayrıca bu değerlendirmeler zaman kaybı da yaşatabilir [Yiğit, 2010].

Yüksek binalar, gökdelenler, kuleler, köprüler, viyadükler vb. yapılar, rüzgâr ve deprem gibi çevresel faktörlerle kısa zaman içinde aniden değişen dinamik yüklerle karşılaştıkları zaman belirli sınırlar içinde kalma koşulu ile tepki verirler [Yiğit, 2010].

Bu dinamik tepkilerin ölçülmesi ve yükler altındaki dinamik hareketlerin belirlenmesi ve incelenmesi ile:

- Yapıların tasarım aşamasındaki kabullerinin ne kadar doğru ve gerçekçi alındığının kontrolü sağlanır.
- Yeni tasarım projelerinin ve kabullerinin ne derece sağlıklı olduğu test edilebilir.
- Farklı yapı ve karakterdeki dinamik yükler altında bulunan yapının verdiği tepkiler ile yapının yük-tepki ilişkisi daha iyi anlaşılır.

- Çok kuvvetli bir fırtına veya deprem gibi hasar verici olaylar yaşandıktan sonra yapının sağlık durumunun değerlendirilmesi ve ne gibi önlemler alınacağı aydınlatılmış olur.
- Uzun dönemli yapısal bozulma ve kötüleşmelerin izlenmesi ve değerlendirilmesi gerçekleştirilir.

4.2. Yapı Sağlığı İzlemesinde Kullanılan Sensörler

Yapı sağlığı izlemelerinde kullanılan sensörler; GNSS alıcısı, eğim sensörü, ivme sensörü, total station, nivo vb. aletlerdir. Bu aletlerin bazıları hakkında aşağıda açıklama yapılmıştır.

4.2.1. GNSS Alıcısı

Herhangi bir yer ve zamanda, her türlü hava koşulunda, küresel bir koordinat sisteminde, yüksek duyarlıkta, ekonomik olarak, anında ve sürekli konum, hız (hareketli objeler için) ve zaman belirlemesine olanak veren bir radyo navigasyon sistemidir [Kahveci ve Yıldız 2001].

Klasik jeodezik ölçme teknikleri ile karşılaştırıldığında GPS'in daha iyi ve eksik olduğu yönler aşağıda olduğu gibi belirtilebilir:

- Noktalar arası görüş zorunluluğu ortadan kalkmıştır. GNSS alıcı anteninin uydu sinyalini izleyebilmesi için gökyüzünü görmesi yeterlidir.
- Nokta yeri seçiminde noktaların en yüksek yerlerde olması gerekmemektedir. İhtiyaç duyulan ve GNSS ölçüsünün yapılmasına imkân tanıyan her yerde nokta tesisi yapılabilmektedir.
- GNSS ölçülerinin yapılması genellikle hava şartlarından bağımsızdır.
- Gece ve gündüz (24 saat) ölçüm yapılabilmektedir.
- GNSS ölçülerinin yapılışındaki hız, aletlerin kullanım kolaylığı ve ölçü hatalarının olmaması (anten yüksekliği ölçümü hariç) yönlerinden bakılınca ekonomik bir sistemdir.
- Üç boyutlu nokta koordinatları elde edilmektedir.
- Elde edilen jeodezik doğruluklar, klasik jeodezik yöntemlerle elde edilenlere eşit ya da onlardan daha iyidir [Kahveci ve Yıldız, 2001].

GNSS alıcıları, yapıların hem statik hem de dinamik deplasman değerlerinin doğrudan ölçülmesinde en etkili araçlardandır. Bu zamana kadar pek çok yüksek mühendislik yapısının deprem ve rüzgâr yüklerine tepkileri GPS ile ölçülmüştür [Lovse et al., 1995], [Hristopulos et al., 2007], [Çelebi ve Şanlı, 2002], [Tamura et al., 2002], [Brownjon et al., 2004], [Li et al., 2006-a], [Park et al., 2008], [Breuer et al., 2008]. [Tamura et al., 2002], GPS ile 2 Hz'den düşük ve 2 cm'den büyük olan titreşim genliklerinin belirlenebileceğini söylemişlerdir. [Chan et al., 2006-a], GPS'in hem yatay hem de düşey yöndeki dinamik ölçme doğruluğunu değerlendiren bir simülasyon çalışması yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda, 1 Hz ve daha düşük frekanslı titreşimlerin yatayda 5 mm'den düşeyde de 10 mm'den düşük genlikli olmaması koşuluyla GPS ile deplasmanların güvenilir bir şekilde ölçülebileceği sonucuna ulaşmışlardır. Bu tez çalışmasında, bağıl kinematik GNSS ölçmelerinde Şekil 4.1'deki Topcon™ marka Hiper seri GNSS alıcıları kullanılmıştır.

Şekil 4.1: Hiper Pro GNSS alıcısı.

GNSS alıcısı diğer sensörlerle karşılaştırılmış ve GNSS alıcısının diğer sensörlere göre olumlu ve olumsuz tarafları olduğu anlaşılmıştır. GPS ölçüleri, alıcı çevresindeki sinyal yansıması meydana getiren yansıtıcı yüzeylerden etkilenmektedir. Bu durum yapıların sabit rüzgâr yükünün etkisi ile oluşan quasi-statik tepkimelerinin yanlış belirlenmesine neden olmaktadır [Li, 2006]. Böyle olduğunda GPS

ölçülerindeki sinyal yansıma etkisi uygun sinyal filtreleme modelleri ile giderilmelidir. Sinyallerin yansıma etkisinden arındırılması için, ölçmenin yapıldığı günü izleyen gün ve günlerde aynı ölçme zaman diliminde fazladan bir ölçme işlemi gerekmektedir. Yansıma hatası yüzünden, yapıların quasi-statik deplasmanlarının ortaya konmasında GPS'in etkinliği azalmaktadır. Yapıların yükler altındaki daha yüksek frekanslarının takibi ve tam ölçekli bir izleme ve analizin gerçekleşmesi için GPS'in yanı sıra ivme vb. sensörleri de kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır [Li et al., 2006-a], [Ogaja et al., 2003], [Brownjohn et al., 2004]. Tablo 4.1'de Hiper Pro GNSS alıcısına ait detaylı bilgi verilmiştir.

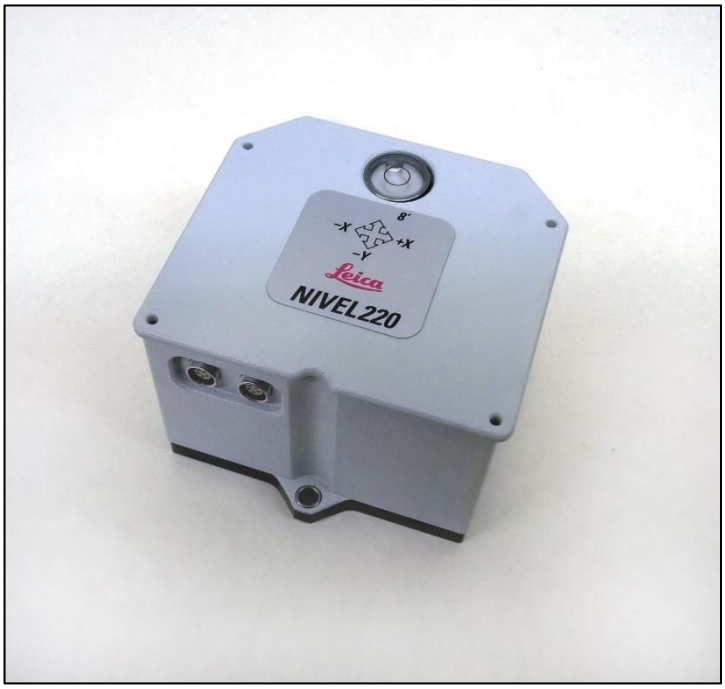
Tablo 4.1: Hiper Pro GNSS alıcısının özellikleri.

İzleme Özellikleri	İzleme kanalları İzlenen sinyaller	Standart: 40 L_1 GPS (20 GPS L_1+L_2) Seçim: 20 GPS L_1+L_2 (GD), GPS L_1+GLONASS (GG), 20 GPS L_1+L_2+GLONASS (GGD) L_1/L_2 C/A ve P Code & Carrier ve GLONASS
Ölçme Özellikleri	Statik, Hızlı Statik GZK	Yatay: 3 mm+0.5 ppm (x baz uzunluğu) Düşey: 5 mm+0.5 ppm (x baz uzunluğu) Yatay: 10 mm+1.0 ppm Düşey: 15 mm+1.0 ppm
Hafıza& Kayıt	Ham data kayıt Veri tipi	1 Hz'den 20 Hz L_1 ve L_2, GPS ve GLONASS Kod ve taşıyıcı faz
Veri giriş/çıkış	Gerçek zamanlı veri çıktıları Diğer çıktılar Çıktı oranı	RTCM SC104 sürüm 2.1, 2.2, 2.3, CMR, CMR+ NMEA 0183 sürüm 2.2 TPS format 1 Hz'den 20 Hz'e kadar
GNSS Anten Özellikeri	GNSS Anteni Anten Tipi Yer Düzlemi	Birleşik Merkez-tepe UHF anteni Düz bir yer düzlemi üzerinde anten

4.2.2. Eğim Sensörü

Hem eğimi hem yönü eş zamanlı ölçen iki eksenli, yüksek duyarlılıkta bir

sensördür. Sensör, elektro-optik bir prensibe göre çalışmaktadır. Yatay bir yüzey olan sıvı yüzeyi ile eğime sahip olan yüzey arasındaki açının ölçülmesine dayanmaktadır. Bu elektro-optik açı ölçme sistemi tarafından ölçülen açı, uygulanan yönteme göre dijital veya analog çıkış sinyaline dönüştürülmektedir [Leica Geosystem, 2007]. Şekil 4.2'de Nivel 220 eğim sensörü gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Nivel 220 eğim sensörü.

4.2.3. İvme Sensörü

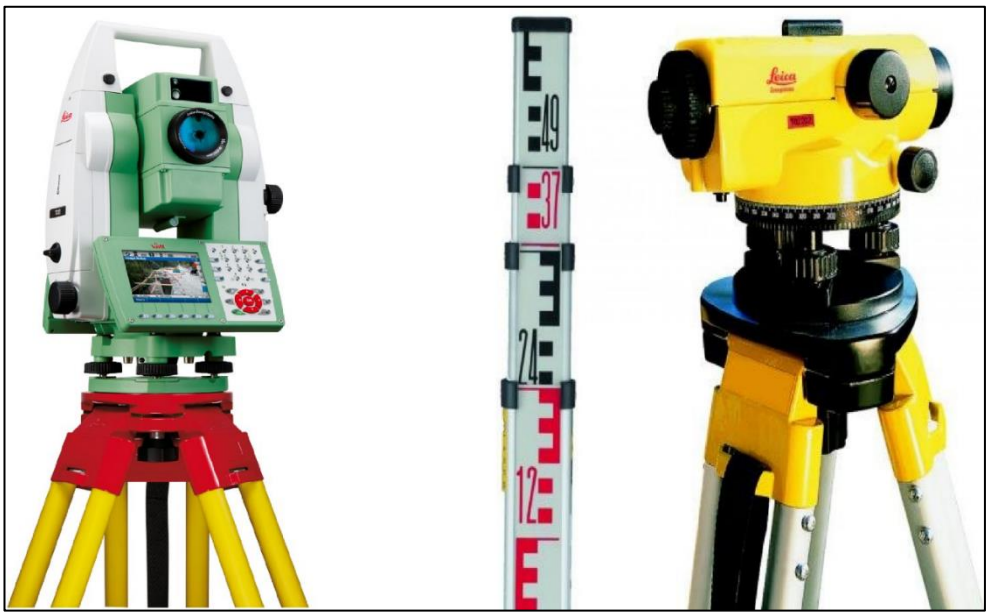
Pek çok mühendislik yapısının yükler altındaki dinamik davranışlarının ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde geçerliliğini kanıtlamış geoteknik bir ölçme aracıdır. Yapı sağlıklarının izlenmesinde ve değerlendirilmesinde de çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İvme sensörü ile ivmelenme değişimleri doğrudan ölçülebilmektedir. İvme değerinden deplasman değerine geçiş ise, çift katlı entegral almayı ve entegral sabitlerinin doğru belirlenmesini gerektirmektedir. İvme sensörü ölçmelerinden, yapıda meydana gelen quasi-statik ve statik deplasmanlar, hız ve deplasmana ilişkin entegral sabitleri bilinmediği için ortaya çıkarılamaz [Li, 2006], [Roberts et al., 2000], [Roberts et al., 2004].

4.2.4. Total Station ve Hassas Nivo

GPS ve geoteknik sensörlerle, yapı hareketlerinin belirlenmesi üzerine ve robotik total station, hassas nivo vb. gibi jeodezik ölçme aletlerinin dinamik hareketleri izleme performansı hakkında da araştırma çalışmaları yapılmıştır [Gikas et al., 2008, 2009], [Danisch et al., 2008], [Psimoulis and Stiros, 2007], [Psimoulis and Stiros, 2008].

Total station aleti ile deformasyon ölçmelerinde uzunluklar ve kenar ölçmeleri hesaplanmaktadır. Günümüzde, total station aletleri kullanım kolaylığı, ölçüm sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği, zaman tasarrufu yönlerinden tasarım, araştırma, üretim ve kalite kontrol uygulamalarında maliyet azaltıcı bir özellik kazanmıştır. Otomatik total station, otomatik hedef tanıma ve izleme özelliği taşımaktadır.

Nokta yükseklikleri; geliştirilen modern tasarımlı, ergonomik yapılı, kullanımı basit ve hassas otomatik dijital nivolar ile yüksek doğrulukta belirlenebilmektedir. Hassas nivolar, deformasyon ölçmelerinde sıkça kullanılmaktadır. Şekil 4.3'te total station ve hassas nivo gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Total station ve hassas nivo.

5. GNSS-PPP DEĞERLENDİRME YAZILIMLARI

Son zamanlarda klasik değerlendirme yöntemlerine bir seçenek olarak internet tabanlı GNSS konumlama servisleri geliştirilmiştir. Bu servisler, web sayfaları aracılığıyla yüklenen GNSS verilerini otomatik olarak değerlendirmektedir. Arazide toplanmış GNSS verileri, RINEX gibi standart formatlara dönüştürüldükten sonra söz konusu servislere yüklenerek, gözlem noktalarının yer merkezli koordinatları oldukça kolay ve hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir [Ghoddousi-Fard and Dare, 2006], [Ebner and Featherstone, 2008], [Tsakiri, 2008], [Subaşı ve Alkan, 2011], [Gakstatter, 2013].

Son 10 yılda hizmet vermeye başlayan internet tabanlı konumlama (değerlendirme) servisleri, ticari ve bilimsel yazılımlara önemli bir seçenek olarak görülmektedir. Servislerin önemli özelliği ücretsiz olmalarıdır. Bunların önemli bir kısmı, arka planda bilinen bilimsel yazılımlara (Bernese, Gamit, Pages vb.) dayanırken, belirli bir kısmı da doğrudan internet üzerinden hizmet üretme amacıyla geliştirilmiş yazılımlardır. İkinci grubun gelişmesinde uydu jeodezisinde veri işleme ve yörünge iyileştirme çalışmaları büyük rol oynamaktadır. GNSS uydularının yörünge ve saat bilgilerindeki doğruluk artışı, konum belirlemede yeni yaklaşımlar ve değerlendirme yöntemleri ortaya çıkarmıştır. International GNSS Service (IGS) ve benzeri kuruluşlar yüksek duyarlıklı yörünge bilgileri üretmekte ve bunları kullanıcılara sunmaktadırlar. Genellikle gözlem sonrası veri işlem (postprocess) uygulamaları kullanılarak üretilen sonuçlar, bilimsel araştırmalar ve mühendislik uygulamalarında belli doğruluk beklentilerini karşılayacak düzeydedir [Zumberge et al., 1997], [Kouba and Héroux, 2001], [Kouba, 2009].

PPP yöntemi ile konum belirleyebilmek için kullanıcılar farklı yazılım seçeneklerine sahiptir. Bunları üçe ayırabiliriz: ticari amaçlı yazılımlar, bilimsel ve akademik yazılımlar ve internet tabanlı GNSS değerlendirme servisleri. Burada, internet tabanlı GNSS değerlendirme servislerinden Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) incelenecektir.

5.1. İnternet Tabanlı GNSS Değerlendirme Servisleri

Ticari ve akademik yazılımlar tüm kullanıcılara açık değildir. Bunlardan yararlanmak belli koşullar altında lisans anlaşmaları gerektirmektedir. Kod

gözlemlerine dayalı mutlak ve taşıyıcı faz gözlemlerini kullanan bağıl konum belirleme yöntemi, her iki gruptaki yazılımların standart çözümleridir. Üçüncü bölümde açıklanan PPP değerlendirme yönteminde ise hem kod hem de faz gözlemleri kullanılmaktadır. Değişik yöntemlerle toplansa da gözlem noktalarında (statik veya kinematik) koordinat bilgisi elde edebilmek için mutluka bir yazılım gerekmektedir. Bir alıcıya ve internet erişimine sahip olmak dışında ek bir maliyet ya da donanım gerektirmemesi, internet tabanlı GNSS değerlendirme servislerinin oluşmasına yol açmıştır.

İnternet tabanlı GNSS servislerinin kullanımı basittir ve ek yazılım bilgisi gerektirmemektedir. Alıcılardan elde edilen veriler RINEX vb. formatlara dönüştürülerek servislerin internet adreslerine gönderilmektedir. Servislere göre değişmekle birlikte, anten markası, anten yüksekliği gibi önemli ayrıntılar da gerektiğinde bilgi olarak eklenebilmektedir. Yükleme işleminden sonra başlatılan değerlendirmeye ilişkin sonuç raporu, kısa sürede kullanıcının e-posta adresine ulaştırılmaktadır. Söz konusu servisler üzerinden gerçekleştirilen çözümler, konum belirleme yöntemine bağlı olarak IGS'yi veya bazı ülkeler için Sürekli Gözlem Yapan Referans İstasyonları (CORS) ağlarına ait sabit istasyon noktalarını referans nokta olarak kabul etmektedir. İstenilen noktanın gözlem verileri ve koordinatları, belirli ölçüler oranında otomatik olarak değerlendirmeye katılmaktadır. Nokta koordinatları bu referans istasyonlar aracılığıyla hesaplanmaktadır. Hesaplanması istenen noktanın ölçüleri ve e-posta adresine gelen çözümler dışında kullanıcının bilgisayarında fazladan yazılım veya veri bulunmaması önemli bir kolaylıktır. Ticari yazılımlar kullanılmaması maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Yazılımın kullanımının basit olması, öğrenmek için çok zaman harcanmaması avantaj oluşturmaktadır.

Tablo 5.1: İnternet tabanlı GNSS değerlendirme servisleri.

SERVİS/ ÖLÇME TEKNİĞİ	Statik	Rapid Statik	PPP Statik	PPP Kinematik
AUSPOS	+	-	-	-
TRİMBLE	+	-	-	-
OPUS	+	+	-	-
SCOUT	+	-	-	-
CSRS	-	-	+	+
APPS	-	-	+	+
MAGIC	-	-	+	+
GAPS	-	-	+	-

Farklı ülkeler ve kuruluşlar tarafından birçok İnternet Tabanlı GNSS Değerlendirme Servisi kullanıcılara hizmet vermektedir. Günümüzde ücretsiz olarak hizmet veren servislerden en çok bilinenleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Bu servisler, statik ve PPP yöntemine göre sınıflandırılmıştır.

Yukarıda listelenen servisler, konumlama (değerlendirme) işlemini bilimsel ve akademik yazılımlar üzerinden yapmaktadır. Ancak bu servisler bilimsel yazılımlara göre sınırlı seçim yeteneğine sahiptir. Gözlem noktalarında koordinat üretimine yönelik en uygun çözümler, literatürde genel kabul görmüş parametreler değerlendirilerek elde edilmektedir. Atmosferik modelleme, deformasyon analizi, duyarlı jeodezik ağ çalışmaları vb. özel amaçlı çalışmalar bu tür servislerde yapılamamaktadır [Bahadur ve Üstün, 2014].

5.2. Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) Web Tabanlı Yazılımı

NRCAN-PPP, tüm GNSS kullanıcılarına, kendi GNSS ham gözlem verilerinden daha iyi konum doğruluğu hesaplama olanağı sağlayan ücretsiz bir online post-processing (sonradan işleme) servisidir. NRCAN-PPP, tek veya çift frekanslı alıcılardan toplanan hem statik hem de kinematik ham GNSS verilerini (GLONASS, 1650 haftasından başlayarak) işlemek üzere kullanılabilir.

CSRS-PPP, 2003 yılından başlayarak sadece IGS ürünlerinden yararlanmaktaydı. Günümüzde ise IGS ve NRCAN ürünlerinin karışımını kullanmaktadır. NRCAN ürünlerine, hızlı bir erişim sağlamak için IGS küresel izleme ağı verileri kullanılarak hesaplanan 30 saniyelik GNSS uydu yörünge ve saat verileri gerekmektedir [Donahue et al., 2012]. Ham veriler online olarak gönderilince, kullanıcılar NAD83 veya ITRF referans sisteminde düzeltilmiş koordinatları e-posta yoluyla almaktadırlar. CSRS-PPP kullanılan GNSS gözlem oturumu için zaman sınırlaması yoktur [El-Mowafy, 2009; 2011]. PPP'de statik veya kinematik modda tahmini (kestirimi) yapılan parametreler; durum pozisyonları, istasyon saat durumları, yerel troposferik zenith gecikmeleri ve taşıyıcı faz belirsizlikleridir. En iyi konum çözümleri, IGS hassas uydu yörüngesi ve saat ürünlerinden elde edilen, yatay koordinatlarda birkaç santimetreyi bulan, dikey koordinatlarda ise 10 santimetreden az olan (root mean square-RMS) doğruluklardır. NRCAN PPP ile tüm fiziksel olaylarda bu doğruluklar kullanılarak, doğru modeller elde edilebilir. PPP algoritmaları, model

ve teknik özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi için [Kouba and Héroux, 2001]'den yararlanılabilir. PPP çıkışları (output) iki formda üretilir. Bunlar, kısa ve detaylı özet raporları ile grafiksel zaman serileri çizimleridir. CSRS-PPP özet raporu, üç bölümden oluşur [Web 13, 2014].

Bölüm 1, işleme sırasında kullanılan giriş, çıkış ve iç dosya adlarını belirten bir dosya özetidir.

Bölüm 2, CSRS-PPP sitesinde merkezi tutulan, iç dosyalardan çıkarılan işleme parametreleridir. Raporda;

- cycle slip (kayma döngüsü filtre eşikleri),
- uydu anten faz merkezi kayıklıkları,
- kullanıcı anteni faz merkezi kayıklığı,
- CSRS, ITRF ve NAD83 arasında dönüşüm parametreleri, referans çerçevesi,
- okyanus yüklemesi katsayıları,
- yüzey meteorolojik veriler

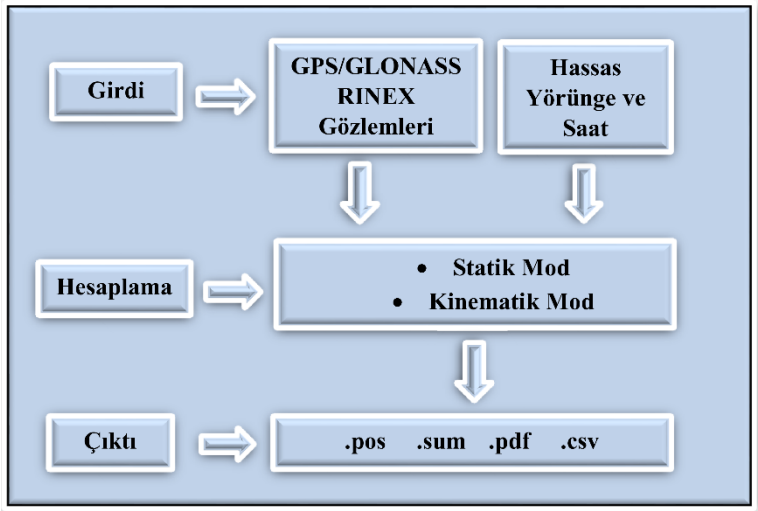
bulunur.

Bölüm 3;

- işleme seçeneklerini,
- gözlem oturumunu,
- koordinat tahminlerini,
- koordinat farklarını,
- alıcı saat tahminlerini,
- gözlem kalıntılarını

raporlayan bir işleme oturum özetidir.

Şekil 5.1'de CSRS-PPP çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 5.1: CSRS-PPP çalışma prensibi.

5.3. Verilerin CSRS-PPP ile Proses Edilmesi

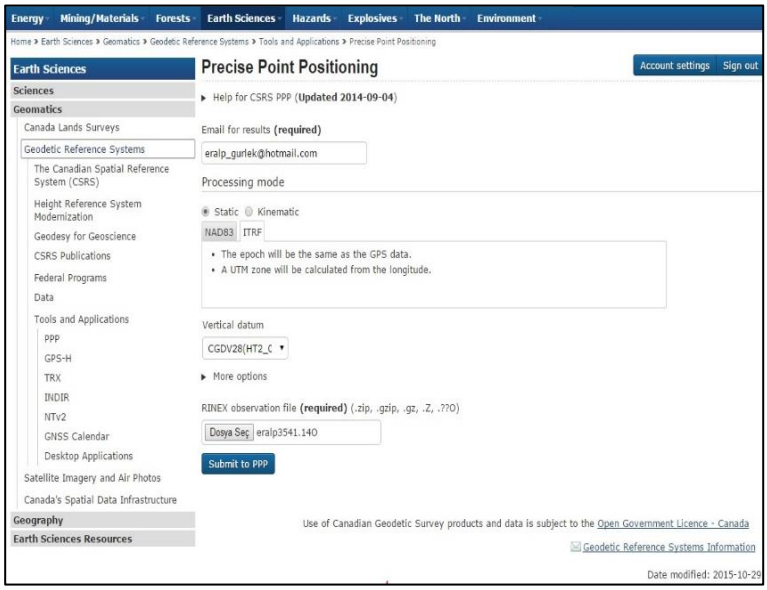
Noktalara ait RINEX veri setleri hazırlandıktan sonra verilerin proses etme işlemine geçilir. Veriler, NRCAN tarafından kayıtlı kullanıcılara sunulan CSRS-PPP web-tabanlı online yazılımı kullanılarak proses edilmektedir. [Web 14, 2016] web adresine girilmektedir. Ana sayfa açıldıktan sonra sırayla şu sekmelere basılır: Earth Sciences > Geomatics > Geodetic Reference Systems > Tools and Applications > Precise Point Positioning.

Şekil 5.2: CSRS-PPP kullanıcı giriş sayfası.

Son açılan sayfada, sağ üst taraftan Sign'in sekmesine tıklanır. Bu kısımda giriş ve ücretsiz bir şekilde hesap açma vardır. 'New User: Create an account!' tıklanarak

kolay bir şekilde yeni bir hesap açılabilir. Kayıtlı kullanıcılar, email adresleri ve hesap açılırken aldıkları şifre ile giriş yapabilirler. Şekil 5.2'de CSRS-PPP kullanıcı giriş sayfası gösterilmiştir.

CSRS-PPP, kullanıcılarına GNSS ham gözlem verilerini, yüksek doğrulukta hesaplamaya olanak sağlayan online bir uygulamadır. Kullanıcılar, statik veya kinematik modda çalışan tek veya çift frekanslı alıcılardan alınmış olan RINEX gözlem verilerini, internet üzerinden göndererek ITRF koordinat sisteminde konum bilgilerini elde edebilirler. Şekil 5.3'te CSRS-PPP'ye RINEX verilerin yüklenmesi ve prosess seçenekleri, Şekil 5.4'te prosess sonrası gönderilen ".sum" uzantılı dosyanın ITRF sonuç koordinatları bölümü gösterilmiştir.



Şekil 5.3: CSRS-PPP'ye RINEX verilerin yüklenmesi ve prosess seçenekleri.

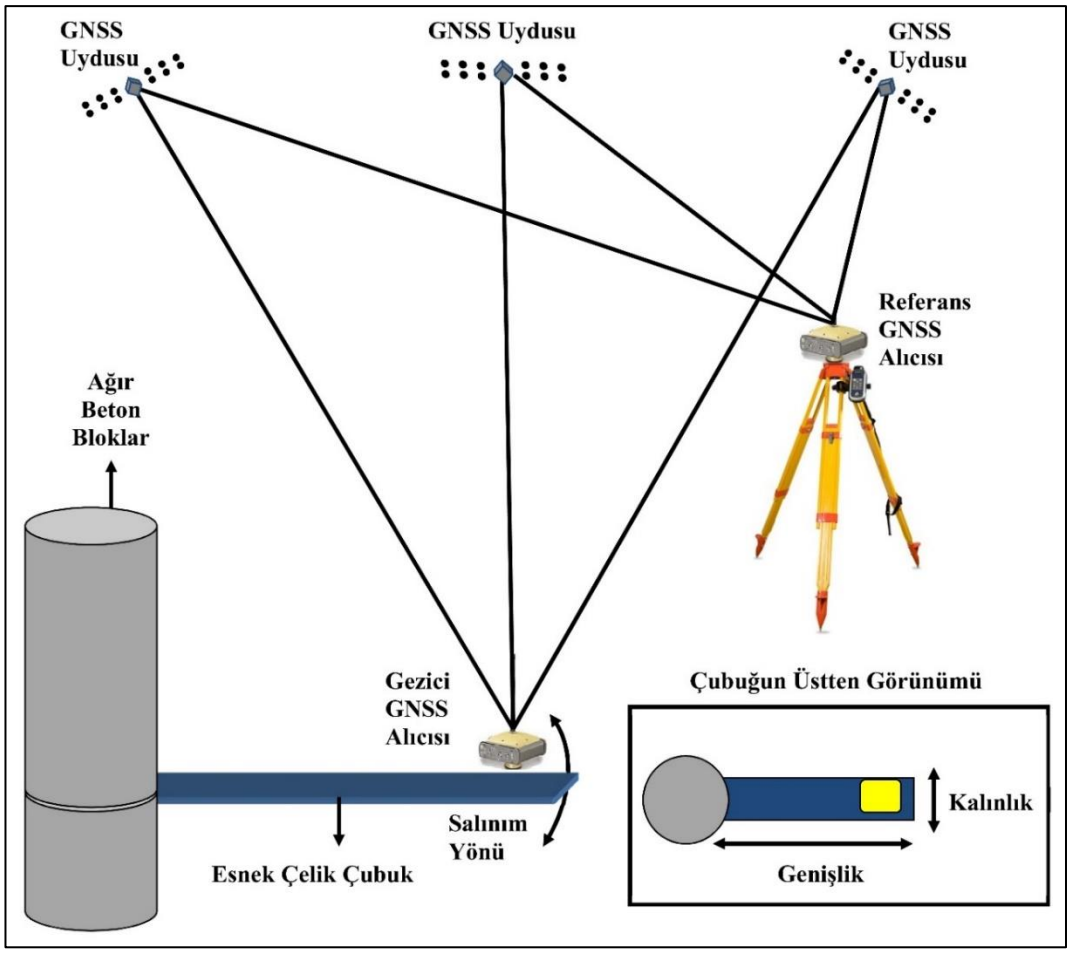
```
3.3 Coordinate estimates (Epoch: 2014)
 CARTESIAN            NAD83(CSRS )      ITRF (IGb08)   95% Sigma(m)  NAD-
ITR(m)
          X (m)       4208786.2531      4208785.0402      0.0100      1.2129
          Y (m)       2334861.4391      2334863.0229      0.0081     -1.5838
          Z (m)       4171303.2660      4171304.2085      0.0091     -0.9425
```

Şekil 5.4: ".sum" uzantılı dosyanın ITRF sonuç koordinatları bölümü.

6. UYGULAMA

6.1. Similasyon Çubukları Düzeneği

Bu çalışmada, yüksek frekanslı kinematik PPP yönteminin düşey titreşimleri belirleme performansını değerlendirmek amacıyla üç adet esnek çelik çubuk sinusoidal bir hareket üretmek için kullanılmıştır. Şekil 6.1, tez çalışması için tasarlanan esnek çubukları yerleştirilme planınına ilişkin yandan ve üstten bakışa göre göstermektedir. Kullanılan çubuklar farklı uzunluk, genişlik ve kalınlıklara sahiptir. Çubukların farklı seçilmesinin temel sebebi farklı frekanslarda titreşen veri üretmek ve böylelikle kinematik PPP yönteminin farklı frekanslardaki titreşimleri belirleme performansını incelenmektir. Bu çubuklar, uzun, orta ve kısa uzunluklu konsol kirişlerini temsil etmektedir. Çubukların temel (ilk) doğal frekansları farklıdır; çünkü salınım frekansı, elemanın geometrisine (uzunluk, genişlik, kalınlık ve Young modülü) bağlıdır [Chopra, 1995]. Tablo 6.1, çubukların geometrik özelliklerini ve temel doğal titreşim frekanslarını göstermektedir. Temel doğal frekanslar GNSS alıcısının ağırlığı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan çubuklar, tek serbestlik dereceli (Single Degree of Freedom-SDOF) bir sistemdir. Çubuğun bir ucu ağır beton bloklar arasında olmak suretiyle sabitlenmiş ve diğer ucu serbest bırakılmıştır. Çubuğun serbet ucu tarafına GNSS alıcısı sabitlenebilmektedir. Çubuğun sabit ucunun salınım sırasında sabit kalması için olması gerekenden daha fazla beton bloklar arasına konulmuştur. Bu çubuğun salınım sırasında sabit ucunun sabitlik şartının sağlanması için uygulanmıştır. Fakat bu uygulama çubuğun Tablo 6.1'de verilen uzunluklardan daha kısa kalmasına sebep olmuştur. Bu nedenle, tüm deneylerde çubuğun açıklık uzunluğu, Tablo 6.1'de verilen uzunluktan daha kısadır. Bu durum, başlangıçta hesaplananlardan daha yüksek salınım frekansları meydana getirmiştir.



Şekil 6.1: Deney düzeneğinin şematik görünüşü.

Tablo 6.1: Çubukların uzunluk, genişlik, kalınlık ölçüleri ve doğal frekansları.

Çubuk İsmi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Hesaplanan temel doğal frekans (Hz)
Uzun	1356	38	4.5	0.838
Orta	891	45	3.8	1.420
Kısa	427	94	2.2	2.894

6.2. GNSS Veri Toplama

Çubuklar, deney sırasında kaymamaları için ağır bir beton blok üzerine sabitlenerek GNSS anteni çubukların serbest ucuna bağlanmıştır. Referans GNSS anteni, gezici GNSS anteninden 15 m uzağa kurulmuştur; çünkü kinematik bağıl konumlamaya dayalı bir koordinatın doğruluğu, istasyonların baz uzunlukları ile ilişkilidir. Baz uzunluğu arttıkça GNSS sinyallerini etkileyen hata kaynakları arasında korelasyon düşeceğinden doğruluk da azalacaktır. Bu nedenle, sinyal çok yolluluk

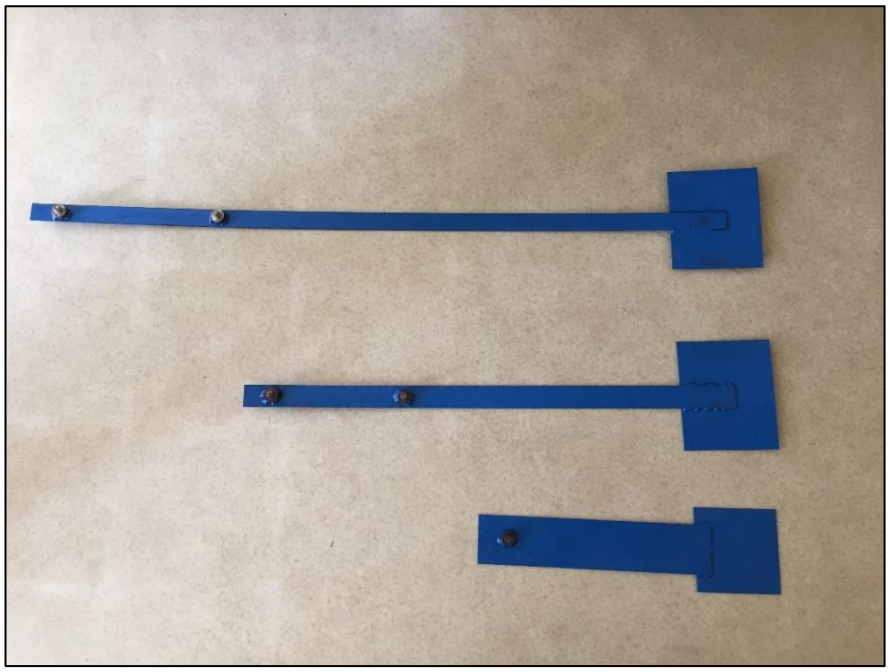
hatası (multipath) haricindeki GNSS hatalarının çoğu elemine edilerek gezici alıcının koordinatları daha hassas ve doğru belirlenebilmektedir. Şekil 6.2, deney sırasında çekilen bir fotoğrafı göstermektedir.

Çubuk deneyi, 2015 yılının kasım ayında Gebze Teknik Üniversitesi Kampüsü'nde gerçekleştirilmiş ve yaklaşık 60 dakika sürmüştür. Bu çalışmada bağıl konum belirleme yöntemi referans çözüm olarak kabul edilmiştir. Tamsayı belirsizliliği daha hızlı yakınsasın diye çubuk yaklaşık 20 dakika hareketsiz bırakılmıştır. GNSS verileri (GPS ve GLONASS), kinematik inceleme modunda iki adet çift frekanslı Topcon™ Hiper Pro GNSS alıcıları kullanılarak toplanmış ve 10 Hz (0.1 s) örnekleme frekansında kaydedilmiştir. Kinematik modda GNSS alıcısının katalog doğruluğu düşeyde 15 mm+1 ppm (x baz uzunluğu)'dir. Deney, açık gökyüzü şartlarında gerçekleştirilmiştir. Ağır beton blok GNSS alıcısına yakın olduğu için sinyal çok yolluluğa sebep olabilir. Uydu yükseklik açısı 10°'dir. Deney, sakin hava koşulunda yapılmıştır. Deney sırasında ortalama sekiz GPS ve yedi GLONASS uydusundan veri alınabilmiştir.

6.3. GNSS İşleme Stratejileri

Bazı araştırmacılar, ani yer değiştirmelerini izlemek ve mühendislik yapılarının doğal salınım frekansını saptamak amacıyla gerçek zamanlı kinematik veya post-proses kinematik (bağıl konumlama) yönteminin uygulanabilirliğini göstermişlerdir [Çelebi, 2000], [Chan et al., 2006], [Nickitopoulou et al., 2006], [Psimoulis et al., 2008], [Psimoulis and Stiros, 2008], [Yigit et al., 2010]. Bu çalışmalarda, mühendislik yapılarının yer değiştirmesi ve doğal frekansı, çift frekanslı GNSS alıcıları verilerene dayalı bağıl kinematik bir yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada PPP yönteminin performansının değerlendirilmesinde bağıl yöntem ile elde edilen çözüm referans olarak seçilmiştir. Post-proses kinematik GNSS çözümü Leica Geo Office (LGO) 3.0 yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Değerlendirmede, iyonosferin etkisini ortadan kaldırmak amacıyla standart bir L1+L2 çözümü benimsenmiştir. Ayrıca, troposferik gecikme hatasını düzeltmek üzere Hopfield troposferik modeli kullanılmıştır. GNSS değelendirmesi nihai hassas yörünge (SP3) efemeris verisi ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.2: Deney yapılan bölgeden bir görünüm.



Şekil 6.3: Deneyde kullanılan similasyon çubukları.

Çubuğun üzerine sabitlenen gezici alıcıya ait GNSS verileri, kinematik PPP modunda CSRS-PPP yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Günümüzde, diğer çevrimiçi (online) post-processing hizmetlerinin (ör. APPS, MagicGNSS) aksine, CSRS-PPP, yüksek örnekleme oranlı (yüksek frekanslı) (>1 Hz) GNSS verilerini değerlendirebilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılan GNSS verilerinin

örnekleme oranı 10 Hz olduğu için GNSS-PPP sonuçları CSRS-PPP yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. CSRS-PPP, tüm GPS ve GLONASS kullanıcılarının tek başına ve çift frekanslı GPS+GLONASS alıcı verilerinden konumlarını hesaplamalarını sağlayan ücretsiz bir çevrimiçi post-processing hizmetidir. CSRS-PPP, RINEX verinin sunucuya yükleme anına bağlı olarak farklı GNSS yörünge ve saat ürünlerini (EMU, hızlı ve IGS Final) kullanmaktadır [Mireault et al., 2008]. Taşıyıcı faz belirsizlikleri, statik modda genellikle 30 dakikada, kinematik modda ise yaklaşık bir saat içinde çözülmektedir. Faz belirsizlikleri çözüldükten sonra tüm parametreler, tüm gözlem oturumu boyunca tüm parametreler için optimum tahminleri etkili bir şekilde iyileştirmek için geri döndürerek tekrar değerlendirilebilir. Bu durum, özellikle kinematik modun optimum yörüngeyi düzeltmesi açısından önemlidir [Heroux et al., 2006]. Bu çalışmada kullanılan işlem seçenekleri Tablo 6.2'de verilmektedir. CSRS-PPP yazılımı hakkında daha ayrıntılı bilgi için [Tetreault et al., 2005]'e başvurulabilir.

IGS-Final ürünleri, son gözlemden yaklaşık 13 gün sonra üretilmekte ve kullanıcıyla paylaşılmakta; ancak EMU ürünleri saatlik olarak üretilir ve son gözlemden 90 dakika sonra kullanılabilir. Bir araştırma merkezi veya IGS tarafından üretilen final (nihai) ürünlerin doğruluğu, ultra-rapid (aşırı hızlı) veya rapid (hızlı) ürünlerden daha iyidir. PPP'den elde edilen konumun doğruluğu, kullanılan ürünlerin doğruluğuna büyük ölçüde bağlıdır. Bu çalışmada, ultra-rapid ve final hassas yörünge ürününün PPP ile elde edilen yüksek frekanslı düşey yer değiştirme tahminlerine etkisi değerlendirilmek üzere salınım deneyleri tamamlandıktan 2 saat sonra ve 13 gün sonra olmak üzere iki kez CSRS-PPP yazılımına yüklemesi yapılmıştır. CSRS-PPP ile elde edilen koordinatlar ITRF sisteminde yer merkezli Kartezyen koordinatları olup yapısal sağlık izleme uygulamalarında doğrudan kullanılamaz [Yigit, 2016]. Yatay konum ve yükseklik bileşenlerinin yerel bir toposentrik Kartezyen koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Bu nedenle, hem CSRS-PPP hem de LGO 3.0 yazılımından tahmin edilen nokta koordinatları, yer merkezli Kartezyen'den yerel toposentrik Kartezyen sisteme [Yigit, 2016]'da açıklanan bilgilere göre dönüştürülmüştür.

Tablo 6.2: CSRS-PPP ile değerlendirmede kullanılan proses seçenekleri.

Mod	Kinematik
Proses Edilen Uydular	GPS + GLONASS
GNSS Çeşidi	Kod&Faz
Gözlemlenen Frekans	L1, L2
Uydu Yörüngeleri	EMU ve IGS-Final
Uydu Ürün Girdileri	CLK-RINEX
İyonosferik Model	L1&l2
Troposferik Modeller	Hidrostatik için Davis (GPT) Islak bileşen için Hopf (GPT) Mapping fonksiyonu GMF
Troposfer Zenit Gecikmesi (TZD)	Tahmin edilmiş.
Saat Enterpolasyonu	Evet
Parametre Yumuşatma	Evet
Referans Yüzey	ITRF

6.4 Deney Sonuçları

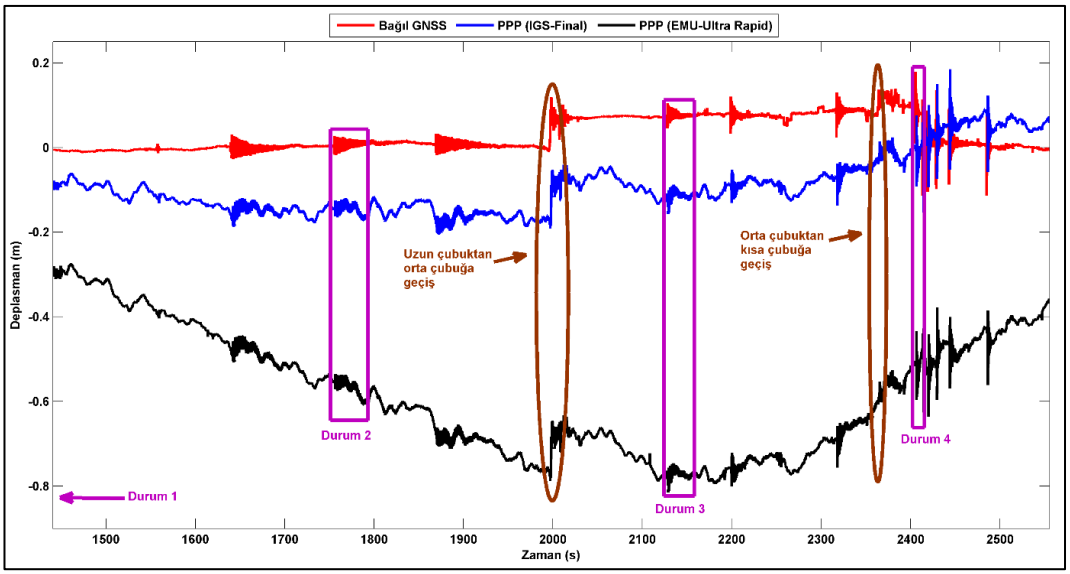
Bu bölüm, uzun, orta ve kısa çubuklarla üretilen düşey salınımların GNSS ile ölçülmesi, verilerin post-proses kinematik PPP ve post-proses kinematik bağıl yöntemle değerlendirilmesi ve sonuçların karşılaştırmalı bir yaklaşımla yorumlanmasını içermektedir. PPP yönteminin performansının değerlendirilmesi amacıyla her bir çubuk kullanılarak birçok salınım deneyi gerçekleştirilmiş ve içlerinden 4 farklı frekans ve genliğe sahip salınım deneyi ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmada ayrıca IGS-Final ve EMU ürünlerinin yüksek frekanslı GNSS verisinin Kinematik PPP ile çözülmesinde anlamlı bir değişim sergileyip sergilemediği de araştırılmıştır.

Belirli bir frekans ve genliğe sahip olan sinüsoidal salınımlar şu şekilde üretilmiştir: Çubuğun GNSS anteni sabitlenmiş serbest ucu denge konumdan yaklaşık 20 ila 100 mm arasında elle aşağı doğru itilip daha sonra serbestçe salınmaya bırakılmıştır. Böylelikle çubuk temel doğal frekansında salınım hareketi göstermiştir. Daha önce de vurgulandığı üzere, farklı frekanslarda çeşitli salınım karakterleri elde etmek için uzun, orta ve kısa olmak üzere üç çubuk kullanılmıştır. Gezici GNSS alıcısı önce uzun çubuğa, sonra orta çubuğa ve daha sonra da kısa çubuğa bağlanmıştır. GNSS alıcısının bir çubuktan diğerine aktarılması, taşıyıcı faz verilerinde herhangi bir tam sayı döngüsü süreksizliğine neden olmaması için dikkatle gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.4, 3 serbest sönümlü salınım deneyini göstermektedir. Şekilde kırmızı

renk bağıl GNSS çözümünü, mavi renk IGS-Final uydu yörünge bilgisi ve uydu saat hataları kullanılarak elde edilmiş PPP çözümünü, siyah renk EMU uydu yörünge bilgisi ve uydu saat hataları bilgileri kullanılarak PPP çözümünden elde edilmiş düşey yönlü zaman serilerini göstermektedir. Bağıl çözümden türetilmiş zaman serisinin çok tutarlı olduğu, PPP'den türetilmiş zaman serilerinin ise yapısal titreşimler dışında düşük frekanslı bir hareket sergilediği açıkça görülmektedir. PPP'den türetilen zaman serilerindeki bu dalgalanmalar, faz belirsizliği çözümünün daha tam olarak yakınsamamış olmasından kaynaklanmaktadır. Yakınsama için daha fazla zaman gerekmektedir [Cai, 2009]. Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada, GNSS gözlemi ilk 20 dakikası hareketsiz olan 60 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Çubuğun hareketsiz olduğu gözlem süresinin uzatılması, PPP'nin yakınsama süresini azaltabilir. Bununla birlikte, bu çalışmanın ana odağı, kısa bir zaman zarfında (örneğin 4-40 s) dinamik düşey hareket üzerine olduğu için, yakınsama sürecinin neden olduğu uzun süreli dalgalanma ve koordinat kayması (ofset) önemli değildir. Bu nedenle, her bir durumda ofset değeri ve trendler bileşeni çubukların dinamik hareketlerine odaklanmak için hem bağıl GNSS çözümünden hem de PPP çözümlerinden türetilen zaman serilerinden uzaklaştırılmıştır.

Bu çalışmada, Şekil 6.4'te dikdörtgen ile gösterilen dört farklı salınım durumu, doğal frekans ve başlangıç genliği gibi titreşim özelliklerine göre seçilmiştir. Tablo 6.3'te, bu seçilen 4 durumun süre, başlangıç deplasmanı ve frekansı açısından özellikleri gösterilmiştir.



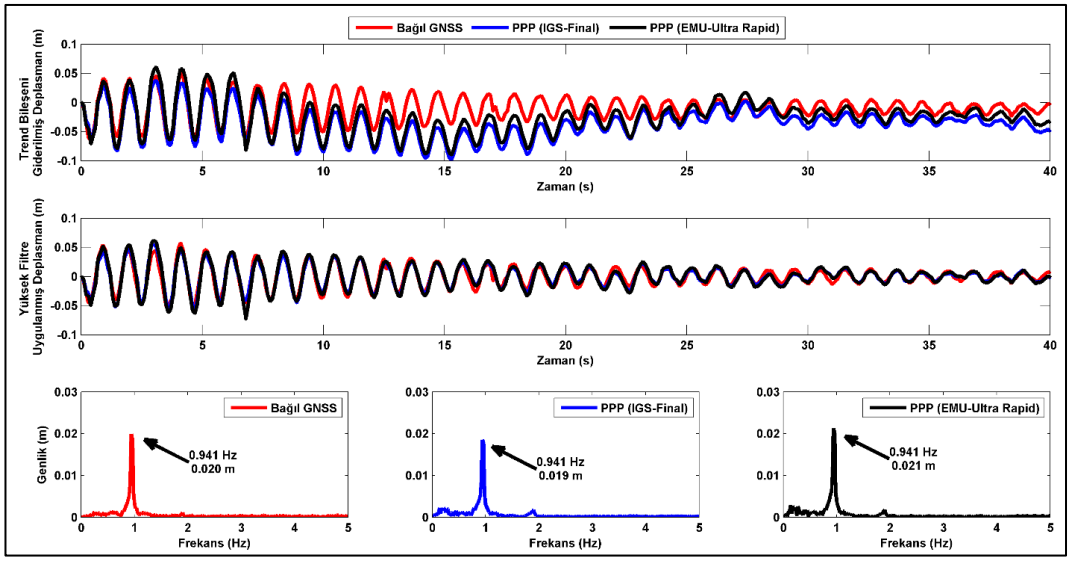
Şekil 6.4: Bağıl yöntem ve PPP yönteminden elde edilen düşey yer değiştirmeler.

Tablo 6.3: Bu çalışmada incelenen dört durumun özellikleri.

Durum No	Süre	Başlangıç Deplasmanı	Ölçülen Frekans
Durum 1	40 s	5.1 cm	0.941 Hz
Durum 2	35 s	2 cm	1.529 Hz
Durum 3	31 s	2 cm	1.980 Hz
Durum 4	4 s	8 cm	2.903 Hz

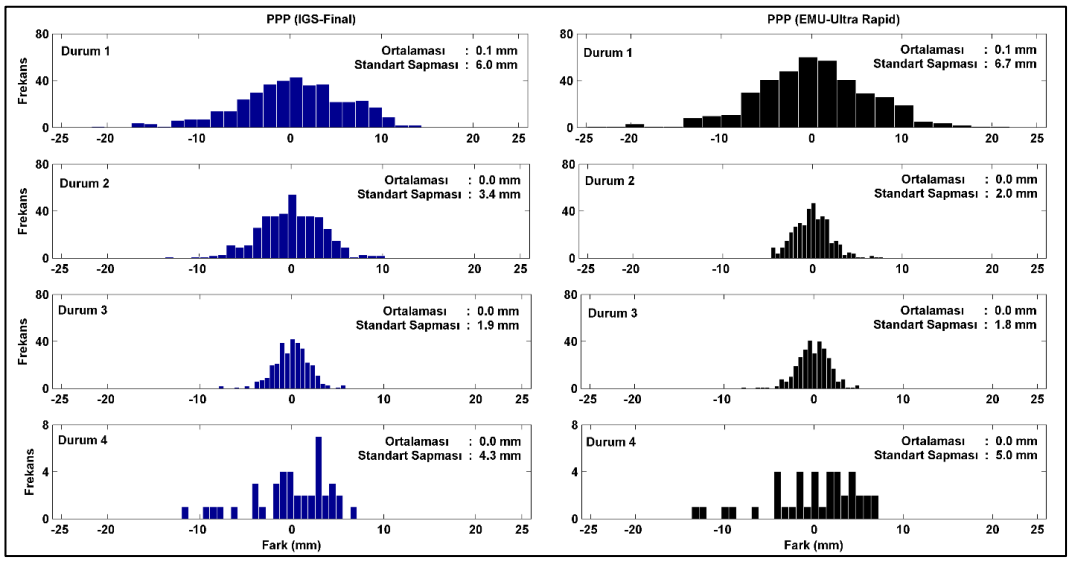
6.4.1. Uzun Çubuk Deneyi (Durum 1)

Durum 1'de incelenen sinusoidal salınım, uzun çubuk kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 6.5, bağıl GNSS ve PPP çözümlerinden elde edilmiş düşey yönlü yer değiştirme zaman serileri ve bunların FFT (Fast Fourier Transform-Hızlı Fourier Dönüşümü) spektrumlarını göstermektedir. Salınımın başlangıç genliği yaklaşık 50 mm olup deney süresi yaklaşık 40 saniyedir. Yöntemlerin dinamik performanslarının karşılaştırılması amacıyla zaman serilerinde bulunan ofset değerleri ve trend bileşenleri uzaklaştırılmıştır. Şekil 6.5 üst çizimde, PPP zaman serilerinin bağıl yönteme göre düşük frekanslı dalgalanma gösterdiği görülmektedir. Bu dalgalanmaları gidermek için, 0.20 Hz'lik kesme frekansına sahip beşinci dereceden Butterworth yüksek geçiren bir filtre tasarlanmış ve hem PPP hem de bağıl yönteme uygulanmıştır. Böylece, yöntemlerin dinamik hareketleri yakalama kabiliyetlerine odaklanılmıştır. Bağıl yöntemle üretilmiş zaman serileri PPP yöntemiyle elde edilmiş zaman serileri gibi düşük frekanslı bir dalgalanmaya sahip olmamasına rağmen, filtrelemeden kaynaklanacak faz kayıklıklarının karşılaştırmada sorun oluşturmaması için hem PPP hem de bağıl yönteme bahsedilen yüksek geçirgen filtre uygulanmıştır. Böylelikle, aynı filtre uygulanmış veriler hem zaman alanında hem de frekans alanında karşılaştırılmıştır. Şekil 6.5, orta çizim filtre uygulanmış zaman serilerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, PPP'den türetilmiş yer değiştirme, bağıl yöntemle elde edilmiş yer değiştirme ile iyi bir uyum içindedir. Bu filtrelenmiş zaman serisine FFT uygulanıp frekans değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.5 alt çizim). Bu çalışmada, frekans alanında verilerin incelenmesi için salınım frekansını değerlendirmede FFT yöntemi kullanılmıştır. PPP çözümleri ve bağıl çözüm, sinyaldeki baskın Fourier frekansını temsil eden sıçrama frekansı ve sinyaldeki her frekansın kuvvetini belirten ortalama genliği açısından karşılaştırılmıştır. FFT spektrumları incelendiğinde yaklaşık 20 mm genlikte, 0.941 Hz'lik bir sıçrama elde edilmiştir. Dinamik hareketi yakalama kabiliyeti açısından FFT sonuçları benzerdir.



Şekil 6.5: Durum 1 için Bağıl ve PPP yöntemlerinin zaman serileri ve FFT spektrumları.

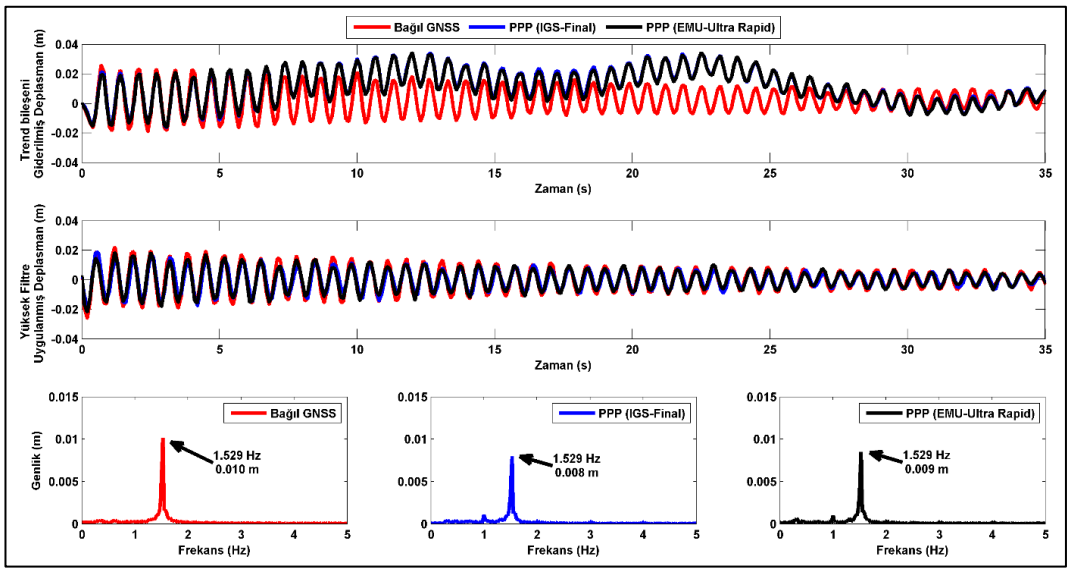
Şekil 6.6, bağıl yöntem ve PPP yönteminden elde edilen zaman serileri arasındaki farkların histogramlarını göstermektedir. Bu farklılıklar, her bir durum için, ofset ve doğrusal trend giderildikten ve yüksek geçirgen filtre uygulandıktan sonra elde edilmiş zaman serilerinden hesaplanmıştır. Dört durumda da farklar genellikle -10 ile 10 mm arasında değişmekte ve normal dağılım izlemektedir. IGS-Final ve EMU'ya dayalı PPP çözümleri ve göreceli konumlandırma karşılaştırıldığında, önemli bir fark görülmemiştir.



Şekil 6.6: Bağıl yöntem ve PPP yöntemleri arasındaki farkların histogramı (IGS-Final ve EMU).

6.4.2. Uzun Çubuk Deneyi (Durum 2)

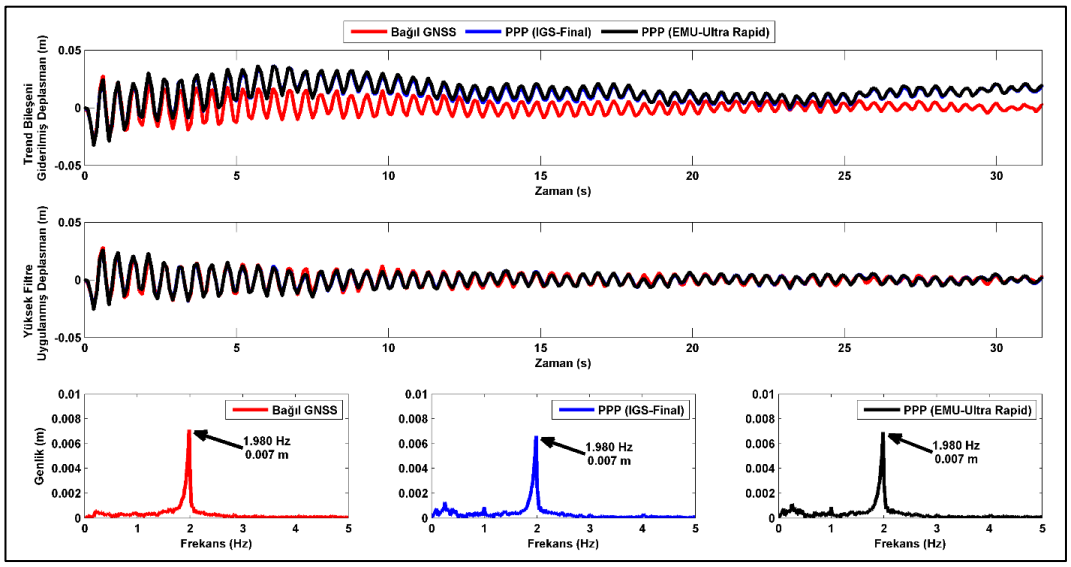
Bu deneyde yine uzun çubuk kullanılmıştır. Fakat daha yüksek frekanslı bir salınım üretmek için uzun çubuğun uzunluğu kısaltılmıştır. Kısaltma, çubuğun beton bloklar arasında kalan miktarının daha fazla olması ile sağlanmıştır. Bir başka deyişle, Durum 1'de uzun çubuğun beton bloklar arasındaki kalan kısmı Durum 2'ye göre daha azdı ve salınım sırasındaki serbet kısım daha uzundu. Şekil 6.7'de, bağıl GNSS ve PPP yönteminden elde edilmiş zaman serileri ve bunların FFT spektrumları görülmektedir. Bu deneyde, salınım başlangıç genliği yaklaşık 20 mm, ve incelenen zaman serisinin süresi 31 saniyedir. Ofset ve doğrusal trendler çıkarıldıktan sonra (Şekil 6.7 Alttaki grafiğe bakınız.), kesme frekansı 0.20 Hz olan beşinci dereceden Butterworth yüksek geçirgen bir filtre tasarlanmış ve durum 1'deki gibi üç zaman serisine de uygulanmıştır. Şekil 6.7 orta çizimden de görüldüğü gibi, PPP'den türetilmiş zaman serileri ile bağıl yöntemden türetilmiş zaman serileri yüksek oranda tutarlıdır. Üç yöntemden elde edilen FFT spektrumlarının sonuçları, birbirleri ile uyum içindedir ve yaklaşık 10 mm genlikte, tepe frekansı 1.529 Hz dir. Dinamik hareketleri yakalama kabiliyeti açısından FFT sonuçları da benzer çıkmıştır.



Şekil 6.7: Durum 2 için Bağıl ve PPP yöntemlerinin zaman serileri ve FFT spektrumları.

6.4.3. Orta Çubuk Deneyi (Durum 3)

Durum 3'te sinüzoidal salınım, orta uzunluklu çubuk kullanılarak üretilmiştir. GNSS alıcısı, çubuğun ucuna bağlanmıştır. Şekil 6.8, bağıl GNSS ve PPP'den türetilmiş zaman serilerini ve bunların FFT spektrumlarını göstermektedir. Salınım başlangıç genliği yaklaşık 20 mm, deney süresi 35 saniyedir. Karşılaştırmalar için, ofset ve doğrusal trend kaldırılmıştır (Şekil 6.8 alt çizim). Kesme frekansı 0.20 Hz olan beşinci dereceden Butterworth yüksek geçirgen bir filtre tasarlanmış ve önceki durumlarda olduğu gibi üç zaman serisine de uygulanmıştır. Şekil 6.8 orta çizimde görüldüğü üzere, her bir yöntem benzer hareketler göstermiştir. FFT spektrumlarına bakıldığında, sıçrama frekansı yaklaşık 7 mm genlikte 1.980 Hz olarak bulunmuştur. Dinamik hareketleri yakalama yeteneği açısından FFT sonuçları benzerdir.



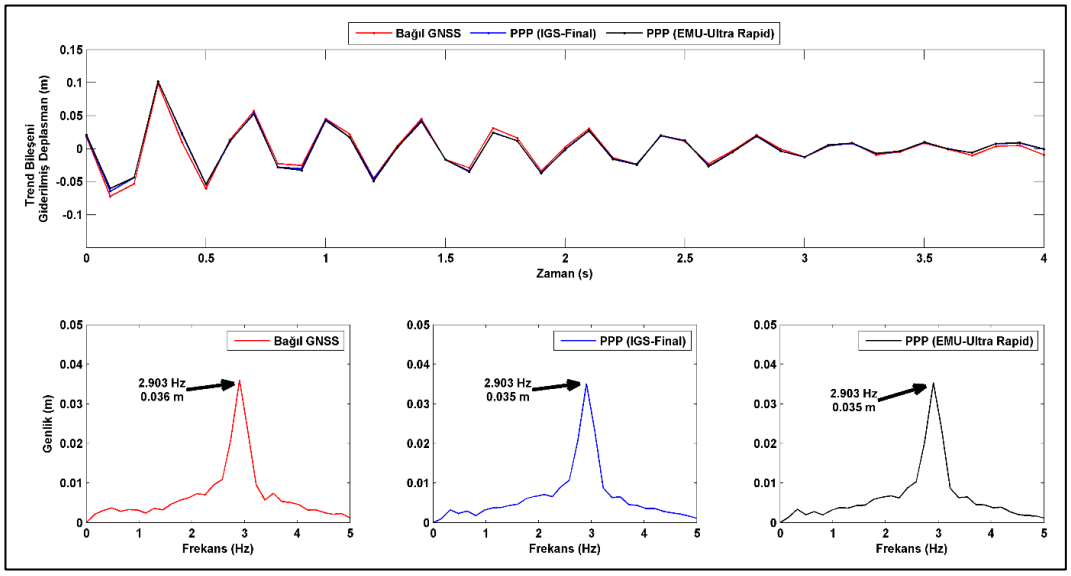
Şekil 6.8: Durum 3 için Bağıl ve PPP yöntemlerinin zaman serileri ve FFT spektrumları.

6.4.4. Kısa Çubuk Deneyi (Durum 4)

Durum 4'te sinusoidal salınım, kısa çubuk kullanılarak üretilmiştir. Şekil 6.9, bağıl GNSS ve PPP yöntemiyle elde edilmiş zaman serilerini ve bunların FFT spektrumlarını göstermektedir. Salınım başlangıç genliği yaklaşık 80 mm, toplam zaman 4 saniyedir. Durum 4'ün süresinin çok kısa olması nedeniyle sadece ofset ve doğrusal trendler ortadan kaldırılmıştır (Şekil 6.9 Alttaki grafiğe bakınız.). Şekil 6.9'da gösterildiği gibi, PPP'den türetilen zaman serisi ile bağıl yöntemle elde edilmiş

zaman serisi uyumludur. Her üç çözümden elde edilen FFT spektrumu sonuçları, dinamik hareketleri yakalama kabiliyeti bakımından benzerdir; tepe frekansı yaklaşık 36 mm genlikte 2.903 Hz dir.

Diğer durumların aksine, 4. durumun süresi, hızlı sönümlenme nedeniyle çok kısa sürmüştür. Buna göre, FFT analizinde değerlendirilen veriler nispeten sınırlıdır ve kaçınılmaz olarak zirvedeki frekans çözünürlüğünün azalmasına neden olmuştur [Schaal and Larocca, 2009]. Veri örnekleme hızının artırılması tepe frekans çözünürlüğünü etkilemese de, zaman alanındaki veri kalitesini önemli ölçüde artıracaktır. Bu nedenle, yüksek frekanslı doğal titreşimlerle rijit yapılar için 50 veya 100 Hz GNSS alıcısı kullanmak daha iyidir [Yigit and Gurlek, 2017].



Şekil 6.9: Durum 4 için Bağıl ve PPP yöntemlerinin zaman serileri ve FFT spektrumları.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, son yıllarda çok popüler olan PPP-GNSS yönteminin yapı sağlığı izlemelerinde bağıl GNSS yöntemi yerine kullanılabilip kullanılamayacağı araştırılmıştır. Çalışma özellikle düşey yönlü dinamik salınım gösteren mühendislik yapılarında PPP-GNSS yönteminin kullanılabilirliğini test etmeyi hedeflemiş ve bu amaçla düşey yönde serbest sönümlü hareket yapan 3 farklı esnek çelik çubuk ile deneyler tasarlanmıştır. Deneylerde özellikle farklı frekans ve genlikli hareketler incelenmiştir. 0.94 Hz ile 2.90 Hz frekansları arasında salınım gösteren 4 farklı durum seçilerek incelenmiş, PPP yöntemi bağıl yöntemle karşılaştırılmıştır. Hem EMU-ultra rapid hemde IGS-final çözümleriyle elde edilen PPP zaman serilerinin bağıl yöntemle karşılaştırıldığında düşük frekanslı hareketler (sinyal değil) sergilediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada PPP yönteminin dinamik salınımları (yani yapıların doğal titreşim frekansları) yakalayabilme kabiliyeti incelendiğinden bu tür düşük frekanslı salınımlar, trendler ve ofset (kayıklık) değerleri önemsizdir. Bu yüzden, zaman serilerinden öncelikle ofset değerleri ve sonrasında trend değerleri giderilmiş ve düşük frekanslı hareketler Butterworth yüksek geçirgen filtre uygulanarak yok edilmiştir. Böylelikle yöntemlerin karşılaştırılması amacıyla yapılsal titreşimden kaynaklı dinamik hareketlere ve frekanslara odaklanılmıştır. Yüksek geçirgen filtre uygulaması sonrasında PPP yönteminin ve bağıl yöntemin her dört durum için de benzer hareketleri ve frekansları yakaladığı ve yöntemlerin uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Benzer şekilde, PPP ve bağıl yöntem arasındaki farkın genellikle ±10 mm'nin altında kalmıştır. Bu sonuçlar, yüksek frekanslı kinematik PPP yönteminin, uzun açıklıklı, orta açıklıklı ve kısa açıklıklı köprüler ile karayolu viyadükleri gibi mühendislik yapılarının düşey yönlü doğal frekanslarını bağıl yöntem gibi yakalayabileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, PPP yöntemi, referans GNSS verilerinin mevcut olmadığı durumlarda asma köprü vb. gibi yapıların izlenmesinde ve doğal frekansların tespit edilmesinde bağıl konumlama yöntemine potansiyel olarak ideal bir alternatif olarak kullanılabilir.

Bu çalışma aynı zamanda dinamik salınımı yakalama açısından IGS-Final ve EMU Ultra-Rapid ürünleri arasında önemli bir fark olmadığını da göstermiştir. Böylece, dinamik yükler tarafından uyarılan esnek ve rijit köprülerin düşey yönlü doğal frekansı, olayın meydana gelmesinden 90 dakika sonra Ultra Rapid ürünler de kullanılarak PPP yöntemiyle belirlenebilir. Mevcut çalışma, yapının davranışını daha

detaylı değerlendirmek için verilerin post-prosesi üzerine kurgulanmıştır. Bu sebeple, gerçek zamanlı yapı sağlığı izlemeleri için gerçek zamanlı olan RT-PPP yönteminin performansının test edilmesi iyi bir araştırma konusudur.

KAYNAKLAR

Aktuğ B., Lenk O., (2010), “Yeni gelişmeler ışığında ağ hiyerarşisi, ölçü süreleri ve duyarlık ölçütlerinin incelenmesi”, Harita Dergisi, 144, 40-50.

Alkan R. M., Öcalan T., (2013), “Usability of the GPS precise point positioning technique in marine applications”, J Navigation, 66, 579-588.

Arslan N., (2004), “GPS İle İyonosfer Toplam Elektron Yoğunluğu Değişimlerinin Koordinatlara Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Ashby N., Weiss M., (1999), “Global Positioning System Receivers and Relativity”, National Institute of Standards and Technology (NIST) Technical Note 1385, Boulder, CO.

Avallone A., Marzario M., Cirella A., Piatanesi A., Rovelli A., Di Alessandro C., D’Anastasio E., D’Agostino N., Giuliani R., Mattone M., (2011), “Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate_magnitude earthquakes: the case of the Mw 6.3 L’Aquila (central Italy) event. J Geophys Res.”, 116:B02305.

Bahadur B., Üstün A., (2014), “İnternet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri”, Hatita Dergisi, 152, 40-50.

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

Brownjohn J., Rizos C., Tan G. H., Pan T. C., (2004), “Real-time long-term monitoring of static and dynamic displacements of an office tower, combining RTK GPS and accelerometer data”, 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, UK, 28 June-1July.

Brunner F. K., ve Welsch W. U., (1993), “Effects of the troposphere on GPS measurements”, GPS World, 4, 42-46.

Cai C., (2009),“Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurement, Master Thesis, University of Calgary.

Chan W. S., Xu Y. L., Ding X. L., Xiong Y. L., Dai W. J., (2006-a), “Assessment of dynamic measurement accuracy of GPS in three directions”, Journal of Surveying Engineering, 132 (3), 108-117.

Collins P., Henton J., Mireault Y., Heroux P., Schmidt M., Dragert H., Bisnath S., (2009), “Precise point positioning for realtime determination of co-seismic crustal motion”, Proceeding of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), 2479-2488, Savannah (GA), 22-25 September.

Collins P., Bisnath S., Lahaye F., Heroux P., (2010), “Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing”, Navigation, 57, 123-135.

Chopra A. K., (1995), “Dynamics of Structures: Theory And Applications To Earthquake Engineering, 4th Edition, Englewood Cliffs (NJ), Prentice Hall.

Choy S. L., (2009), “An Investigation Into The Accuracy Of Single Frequency Precise Point Positioning (PPP)”, Doctoral Thesis, School of Mathematical and Geospatial Sciences College of Science, Engineering and Health RMIT University.

Çelebi M., (2000), “GPS in dynamic monitoring of long-period structures, Soil Dyn Earthquake Eng.”, 20, 477-483.

Çelebi M., Sanli A., (2002), “GPS in pioneering dynamic monitoring of long- period structures”, Earthquake Spectra, 18 (1), 47-61.

Dach R., Hugentobler U., Fridez P. ve Meindl M., (2007), “User Manual of Bernese GPS Software Version 5.0”, 1st Edition, Astronomical Institute, University of Bern.

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

Dodson A. H., (1995), “GPS for height determination”, Survey Review, 33, 256.

Ebner R., Featherstone W. E., (2008), “How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks?”, Journal of Applied Geodesy 2, 149-157.

Ebner R., (2008), “Validation and Application of Free-online and Commercial Post-processing PPP Ackages”, Master Thesis, Graz University of Technology.

El-Diasty M., (2016), “Development of real-time PPP-based GPS/INS integration system using IGS real-time service for hydrographic surveys”, J Surv Eng. 142, 1-8.

El-Mowafy A., (2009), “Alternative post-processing relative positioning approach based on precise point positioning”, Journal of Surveying Engineering, 135(2), 56- 65.

El-Mowafy A., (2011), “Analysis of web-based gnss post-processing services for static and kinematic positioning using short data spans”, Survey Review, 43(323), 535-549.

Erdoğan H., Akpınar B., Gülal E., Ata E., (2007), “Monitoring the dynamic behaviors of the Bosporus Bridge by GPS during Eurasia Marathon, Nonlinear Proc Geophys”, 14, 513-523.

Erkan Y., Aktuğ B., Lenk O., Parmaksız E., Mert İ., Bacanlı, H., (2010), “TUSAGA-Aktif (CORS-TR) Sistemi Atmosferik Çalışmalara Ait Ön Sonuçlar”, Uluslararası Katılımlı 1. Meteoroloji Sempozyumu, Ankara, 27-28 Mayıs 2010.

Gakstatter E., (2013), A comparison of free gps online post-processing services, GPS World, (10).

Gao Y., Wojciechowski A., Chen K., (2005), “Airborne kinematic positioning using precise point positioning methodology”, Geomatica, 59, 275-282.

Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J., (2008), “Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations”, J Geod 82, 389-399.

Geng J., Teferle F. N., Meng X., Dodson A. H., (2010), “Kinematic precise point positioning at remote marine platforms”, GPS Solut. 14, 343-350.

Ghoddousi-Fard R., Dare P., (2006), “Online GPS processing services: an ınitial study”, GPS Solutions, 10(1), 1220.

Gikas V., Daskalakis S., (2008), “Comparative testing and analysis of rts versus GPS for structural monitoring using calibration measurements upon sinusoidal excitation”, 13th Symp. on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon, 12-15 May.

Gikas V., Daskalakis S., (2009), “Contribution of combined RTS and TLS to dynamic monitoring of wind wnergy turbines”, 9th Int. Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria, 1-3 July.

GLONASS ICD (2002), “Global Navigation Satellite System GLONASS Interface Control Document”, Version 5.0, Moscow.

GPS ICD (2000), “Interface Control Document–Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces”, 1st Edition, ICD-GPS-200C.

Hernández-Pajares M., (2008), “Private Communication (Email)”, Research Group of Astronomy and Geomatics.

Herring T. A., (1988), “Precession and Nutation. The Interdiciplinary Role of Space Geodesy”, 1st Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Heroux P., Kouba J., Beck N., Lahaye F., Mireault Y., Tetreault P., Collins P., MacLeod K., Caissy M., (2006), “Space geodetic techniques and the CSRS evolution, status and possibilities, Geomatica”, 60, 137-150.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H. , Wasle E., (2008), “GNSS Global Navigation Satellite Systems”, 1st Edition, Springer Verlag Wien.

Hristopulos D. T., Mertikas S. P., Arhontakis I., Brownjohn J. M. W., (2007), “Using GPS for monitoring tall-building response to wind loading: filtering of abrubt changes and low-frequency noise, variography and spectral analysis of displacements”, GPS Solut 11, 85-95.

Hugentobler U., Sacher S., Fridez P., (2001), “Bernese GPS Software Version 4.2”, 1st Edition, Astronomical Institute University of Berne.

IERS (1989), “IERS Standards”, IERS Technical Note 3, Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, France.

IERS (1996), IERS Conventions, IERS Technical Note 21, Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, France.

Kahveci M., Yıldız F., (2009), “GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama”, Geliştirilmiş 4. Baskı, Nobel Yayın Dağıtım.

Kahveci M., (2010), “GPS/GLONASS gözlemlerin değerlendirme yöntelerinde son gelişmeler”, HKMO Jeodezi ve Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 102, 3-9.

Kahveci M., Karagöz H., Selbesoğlu M. O., (2011), “Statik ve RTK GNSS ölçüm ve hesaplamalarının karşılaştırılması”, Jeodezi-Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 104(1), 3-13.

Kaloop M. R., (2010), “Structural Health Monitoring Through Dynamic and Geometric Characteristics of Bridges Extracted From GPS Measurements”, PhD Thesis, China, Harbin Institute of Technology.

Kaplan E. D., Hegarty C. J., (2006), “Understanding GPS – Principles and Applications”, 2nd Edition, Artech House.

Kızılarslan M., (2014), “GPS-PPP ve GPS/GLONASS-PP Yöntemlerinin Konum Belirleme Performanslarının Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Kleusberg A., Teunissen, P. J. G.(Eds), (1998), “GPS for Geodesy”, Volume 60, Springer-Verlag.

Kouba J., Heroux P., (2001), “Precise point positioning using IGS orbit and clock products”, GPS Solutions, 5(2), 12-28.

Kouba J., (2003), “Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS”, Stud Geophys Geod, 47, 741-755.

Kouba J., (2009), “A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products”, 1st Edition, Geodetic Survey Division-Natural Resources Canada.

Laurichesse D., Mercier F., Berthias J. P., Broca P., Cerri L., (2009), “Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination”, Navigation, 56, 135-149.

Leica Geosystems, (2007), “Nivel 200 User Manual. AG.”.

Leick A., (2004), “GPS Satellite Surveying”, 3rd Edition, Wiley.

Li X., Ge L., Ambikairajah E., Rizos C., Tamura Y., Yoshida A., (2006-a), “Full-scale structural monitoring using an ıntegrated GPS and accelerometer system”, GPS Solut, 10, 233-247.

Li X., (2006), “Optimal Integrated Multi-sensor System for Full-Scale Structural Monitoring Based on Advanced Signal Processing”, Doctoral Thesis, The University of New South Wales.

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

Li X., Ge M., Zhang X., Zhang Y., Guo B., Wang R., Klotz J., Wickert J., (2013), “Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: application to earthquake early warning”, Geophys Res Lett, 40, 295-300.

Liu H., (1991), “Wind Engineering - A Handbook for Structural Engineers”, 1st Edition, Prenctice-Hall.

Lovse J. W., Teskey W. F., Lachapelle G., Cannon M. E., (1995), “Dynamic deformation monitoring of tall structure using GPS technology”, J Surv Eng ASCE 121 (1), 35-40.

Martin I., (2013), “GNSS Precise Point Positioning The Enhancement with GLONASS”, Doctoral Thesis, School of Civil Engineering and Geosciences.

Mekik Ç., (1999), “GPS’e atmosferin etkileri”, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Dergisi, 86, 14-20.

Meng X., Dodson A. H., Roberts G. W., (2007), “Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers”, Eng Struct, 29, 3178-3184.

Meo M., Zumpano G., Meng X., Cosser E., Roberts G., Dodson A., (2006), “Measurements of dynamic properties of a medium span suspension bridge by using the wavelet transforms”, Mech Syst Signal Process, 20, 1112-1133.

Mireault Y., Tetreault P., Lahaye F., Heroux P., Kouba J., (2008), “Online precise point positioning: a new, timely service from natural resources Canada”, GPS World, 19, 53-64.

Misra P., Enge P., (2001), “Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance”, 1st Edition, Ganga-Jumuna Press.

Moschas F., Stiros S., (2011), “Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer”, Eng Struct, 33, 10-17.

Montenbruck O., Gill E., (2000), Satellite Orbits, 1st Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Moschas F., Stiros S. C., (2014), “Three-dimensional dynamic deflections and natural frequencies of a stiff footbridge based on measurements of collocated sensors”, Struct Control Health Monit, 21, 23-42.

Moschas F., Avallone A., Saltogianni V., Stiros S. C., (2014), “Strong motion displacement waveforms using 10-Hz precise point positioning GPS: an assessment based on free oscillation experiments”, Earthquake Eng Struct Dyn, 43, 1853-1866.

Mutlu B.,(2011), “Tek Frekanslı GPS Alıcısı ile Hassas Konum Belirleme”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Nakamura S., (2000), “GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements”, J Struct Eng-ASCE, 126, 1413-1419.

Nickitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S., (2006), “Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations, and promises”, Eng Struct, 28, 1471-1482.

Ogaja C., Wang J., Rizos C., (2003), “Detection of wind-induced response by wavelet transformed GPS solutions”, J Surv Eng ASCE, 129 (3), 99-104.

Park H. S., Sohn H. G., Kim I. S., Park J. H., (2008), “Application of gps to monitoring of wind-ınduced responses of high-rise buildings, The structural Design of Tall and Special Buildings, 17, 117-132.

Parkinson B. W., Ashby N., (1996), “Introduction to Relativistic Effects on the Global Positioning System, in Global Positioning System: Theory and Applications”, 1st Edition, Progress Aeronautics and Astronautics.

Petrov L., Boy J. P., (2004), “Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations”, Journal of Geophysical Research, 109(B03405), 1-14.

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

Psimoulis P. A., Pytharouli S., Karambalis D., Stiros S. C., (2008), “Potential of global positioning system (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures”, J Sound Vib, 318, 606-623.

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

Psimoulis P. A., Stiros S. C., (2013), “Measuring deflections of a Shorth-Span railway bridge using a robotic total station”, J Bridge Eng, 18, 182-185.

Rabbel W., Schuh H., (1986), “The influence of atmospheric loading on VLBI experiments”, Journal of Geophysical Research, 59, 164-170.

Rizos B. C., (1999), “Satellite Ephemeris Bias, Principles and Practice of GPS Surveying”, 1st Edition, The University of New South Wales.

Rizos C., Janssen V., Roberts C., Grinter T., (2012), “GNSS: precise point positioning PPP versus DGNSS”, Geomat World, 18-20.

Roberts G. W., Meng X., Dodson A. H., (2000), “Structural dynamic and deflection monitoring using integrated GPS and triaxial accelerometers”, ION GPS 2000, Salt Lake City, UT, 19-22 September.

Roberts G. W., Meng, X., Dodson A. H., (2004), “Integrating a global positioning system and accelerometers to monitor the deflection of bridges”, J Surv Eng ASCE 130 (2), 65-72.

Rothacher M., Beutler G., (2002), “Advanced Aspects of Satellite Positioning”, Lecture Notes, The University of Calgary, Canada.

Roulston A., (2001), “An Evaluation of Predicted Ephemerides for High Precision Real-Time GPS Positioning”, Master Thesis, RMIT University.

Schaal R., Larocca A., (2009), “Measuring dynamic oscillations of a small span cable-stayed footbridge: case study using L1 GPS receivers”, J Surv Eng, 135, 33-37.

Shen X., (2002), “Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning”, Doctor of Philosophy Thesis, University of Calgary.

Subaşı K., Alkan R. M. (2011), “İnternet tabanlı GPS değerlendirme servislerinin doğruluk analizi: istanbul örneği”, 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye, 18-22 Nisan.

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

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

Tao W., (2008), “Near Real-time GPS PPP-inferred Water Vapor System Development and Evaluation”, Doctor of Philosophy Thesis, University of Calgary.

Tetreault P., Kouba J., Heroux P., Legree P., (2005), “CSRS-PPP: an internet service for GPS user access to the Canadian spatial reference frame”, Geomatica, 59, 17-28.

Tiryakioğlu İ., (2005), “GPS Sinyal Yansımasının(Multipath) Nokta Konumlarına Etkisinin Araştırlması”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Tsakiri M., (2008), “GPS processing using online services”, Journal of Surveying Engineering, 134(4), 115-125.

Web 1, (2017), https://tr.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCresel_uydu_seyr%C3%BCsefer_sistemi, (Erişim Tarihi: 26/01/2017).

Web 2, (2017), https://www.squaregps.com/wp-content/uploads/2015/10/space2.png, (Erişim Tarihi: 10/02/2017).

Web 3, (2017), https://tr.wikipedia.org/wiki/GPS, (Erişim Tarihi: 26/01/2017).

Web 4, (2017), https://tr.wikipedia.org/wiki/GLONASS, (Erişim Tarihi: 26/01/2017).

Web 5, (2017), https://tr.wikipedia.org/wiki/Beidou_uydu_konumland%C4%B1rma_sistemi, (Erişim Tarihi: 26/01/2017).

Web 6, (2017), https://tr.wikipedia.org/wiki/Galileo_konumland%C4%B1rma sistemi, (Erişim Tarihi: 26/01/2017).

Web 7, (2017), https://tr.wikipedia.org/wiki/Hint_B%C3%B6lgesel_Uydu_Konumland%C4%B1rma_Sistemi, (Erişim Tarihi: 26/01/2017).

Web 8, (2017), https://tr.wikipedia.org/wiki/QZSS, (Erişim Tarihi: 26/01/2017).

Web 9, (2017), https://tr.wikipedia.org/wiki/Küresel_uydu_seyrüsefer_sistemi, (Erişim Tarihi: 20/01/2017).

Web 10, (2017), http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090997713000515, (Erişim Tarihi: 27/01/2017).

Web 11, (2017), http://www.gly.uga.edu/railsback/Tides/TideBulges.jpeg, (Erişim Tarihi:27/01/2017).

Web 12, (2015), http://www.ionolab.org/, (Erişim Tarihi: 26/10/2016).

Web 13, (2017), http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/toolsoutils/ppp.php?locale=en, (Erişim Tarihi: 26/01/2017).

Web 14, (2016), http://www.nrcan.gc.ca/home, (Erişim Tarihi:12/12/2016).

Weill Lawrence R.,(2003), “İnnovation-multipath mitigation: How good can it get with new signals? The column explores a new multipath mitigation algorithm and describes its expected performance with the new GPS signals soon”, GPS World, (6), 106-113.

Witchayangkoon B., (2000), “Elements of GPS Precise Point Positioning” Doctor of Philosophy Thesis, University of Maine.

Wu J. T., Wu S. C., Hajj G. A., Bertiger W. I., Lichten S. M., (1993), “Effects of antenna orientation on GPS carrier phase”, Manuscripta Geodaetica, 18(2), 91-98.

Wübbena G., Schmitz M., Andreas B., (2005), “PPP-RTK: Precise Point Positioning using State-Space Representation in RTK networks”, Proceedings of ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, CA, 13-16 September.

Xu L., Guo J.J., Jiang J.J., (2002), “Time-frequency analysis of a suspension bridge based on GPS”, J Sound Vib, 254, 105-116.

Xu C., Wang J., Gao J., Wang J., Hu H., (2011), “Precise Point Positioning and its application in mining deformation monitoring”, Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 21, 499-505.

Xu P., Shi C., Fang R., Liu J., Niu X., Zhang Q., Yanagidani T., (2013), “High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units”, J Geod, 87, 361-372.

Yi T., Li H., Gu M., (2013), “Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge”, Measurement. 46, 420-432.

Yiğit C. Ö., (2010), “Yüksek Yapıların Farklı Sensörler ile Tam Ölçekli İzlenmesi ve Dinamik Parametrelerin İzlenmesi”, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Yigit C.O, Li, X., Inal, C., Ge, L., 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

Yigit C. O., (2016), “Experimental assessment of post processed kinematic precise point positioning method for structural health monitoring”, Geomat Nat Hazards Risk, 7, 363-380.

Yigit C. O., Gurlek E., (2017), “Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures”, Geomat Nat Hazards Risk, Online First.

Yu J., Meng X., Shao X., Yan B., Yang L., (2014), “Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode GNSS processing”, Eng Struct, 81, 432-443.

Zhang X., Andersen O. B., (2006), “Surface ice flow velocity and tide retrieval of the Amery ice shelf using precise point positioning”, J Geod, 80, 171-176.

Zhu S. Y., Massmann F. H., Yu Y., Reigber Ch., (2003), “Satellite antenna phasecenter off sets and scale errors”, Journal of Geodesy, 76, 668-672.

Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H., (1997), “Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks”, J Geophys Res, 102, 5005-5017.

ÖZGEÇMİŞ

Eralp GÜRLEK 1987 yılında Kütahya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kütahya'da tamamladı. 2012 yılında Selçuk Üniversitesi Harita Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2014 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılından beri Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığının taşra biriminde Harita Mühendisi olarak çalışmaktadır.