

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU-GNSS HASSAS NOKTA KONUMLAMA YAZILIMI
GELİŞTİRİLMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ: GTU-APAS

SİNAN BİRİNCİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

GEBZE
2021

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU-GNSS HASSAS NOKTA
KONUMLAMA YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ
VE PERFORMANS ANALİZİ: GTU-APAS

SİNAN BİRİNCİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

DANIŞMANI
PROF. DR. MEHMET HALİS SAKA

GEBZE
2021

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**MULTI-GNSS PRECISE POINT POSITIONING
SOFTWARE DEVELOPMENT AND
PERFORMANCE ANALYSIS: GTU-APAS**

SİNAN BİRİNCİ

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**

**DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
GEODESY AND GEOGRAPHICAL INFORMATION TECHNOLOGIES PROGRAM**

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. MEHMET HALİS SAKA

GEBZE

2021

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

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/06/2021 tarih ve 2021/24 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17/06/2021 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Sinan BİRİNCİ'nin tez çalışması Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mehmet Halis SAKA

ÜYE

: Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Reha Metin ALKAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) günümüzde birçok alanda etkin şekilde kullanılmaktadır. Özellikle konum belirleme amaçlı çalışmalar için elverişli ve avantajlıdır. 1990’lardan beri kullanılan mutlak konum belirleme yöntemi olan hassas nokta konumlama (Precise Point Positioning, PPP) tekniği bu alanda kritik bir yere sahiptir. PPP yönteminde, Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS) tarafından farklı analiz merkezleri aracılığıyla hesaplanan yörünge ve saat ürünlerini kullanılarak, referans bir alıcıya ihtiyaç olmaksızın, santimetre doğruluğunda konum elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında, çift frekanslı alıcılardan elde edilen kod ve faz ölçüleri ile hem GPS PPP hem de çoklu-GNSS PPP uygulamaları yapılmıştır. Değerlendirme metodolojisi kapsamında, öncelikle hata kaynaklarını uygun şekilde düzelten ve matematiksel modeller ile parametre kestirimi yapan, MATLAB tabanlı GTU-APAS (Gebze Technical University-Automatic PPP Analysis Software) adında bir PPP yazılımı geliştirilmiştir. PPP yönteminde güncel çalışmalar, kısa süreli ölçülerle daha doğru sonuçlara ulaşılması yönünde devam etmektedir. Literatür incelendiğinde yakınsama süresinin kısalmasına çoklu-GNSS kullanımı önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Buna bağlı olarak hem uydu sayısının artması hem de yeni sinyallerin sistemlere entegre olmasıyla, PPP çalışmalarında doğruluk ve yakınsama süresi açısından analizler ve incelemeler yapılmaktadır. Bu çalışma ile de geliştirilen yazılım kullanılarak hem GPS PPP performansı hem de GLONASS, Galileo ve BeiDou sistemlerinin GPS ile farklı kombinasyonları değerlendirilerek performansları incelenmiştir. Seçilen 24 saatlik verilerin GTU-APAS yazılımıyla GPS-PPP çözümünden ortalama yakınsama süresi ve karesel ortalama hatası sırasıyla 28.9 dk. ve 3.45 cm olarak bulunmuştur. Ayrıca 3 saatlik çoklu-GNSS çözümlerinde ise yakınsama süresi belirgin şekilde azalmış ve ortalama hata kıstasına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hassas Nokta Konumlama (PPP), Yakınsama Süresi, Doğruluk, Çoklu-GNSS, GTU-APAS.

SUMMARY

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are used effectively in many areas today. It is particularly convenient and advantageous for studies for position determination. The Precise Point Positioning (PPP) technique, an absolute positioning method used since the 1990s, has a critical place in this area. In the PPP method, centimeter accuracy can be obtained without the need for a reference receiver, by using the orbit and clock products calculated by the International GNSS Service (IGS) through different analysis centers. In the thesis, both GPS PPP and multi-GNSS PPP applications were made with code and phase measurements obtained from dual-frequency receivers. Within the scope of the evaluation methodology, a PPP software named GTU-APAS (Gebze Technical University-Automatic PPP Analysis Software) is based on MATLAB, which firstly corrects the error sources and makes parameter estimation with the mathematical models was developed. Current studies in the PPP method continue to achieve more accurate results with short-term measurements. The use of multi-GNSS contributed significantly to the reduction of convergence time when the literature was examined. Accordingly, with the increase in the number of satellites and the integration of new signals into the systems, analyzes and examinations are made in terms of accuracy and convergence time in PPP studies. In this study, using the developed software, both GPS PPP performance and different combinations of GLONASS, Galileo and BeiDou systems with GPS were evaluated and their performances were examined. The mean convergence time and root mean square error of the selected 24-hour data from the GPS-PPP solution with GTU-APAS software were found to be 28.9 minutes and 3.45 cm, respectively. In addition, in 3-hour multi-GNSS solutions, the convergence time was significantly reduced and showed better results according to the average error criterion.

Key Words: Precise Point Positioning (PPP), Convergence Time, Accuracy, Multi-GNSS, GTU-APAS.

TEŞEKKÜR

Öncelikli olarak uzun, yorucu ve meşakkatli bir yolculuğun sonunda tez çalışmamı hayırlısıyla tamamlamayı bana nasip eden Allah’a şükrederim.

Tez çalışmam boyunca bana herhangi bir problemi anlamanın en iyi yolunun onu kodlamak olduğunu aşıl原因, birikimi ve tecrübesiyle önüme ışık tutan değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Halis SAKA’ya, kıymetli bilgileri ile fikirlerinden faydalandığım Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU’na,

Lisans eğitimimden meslek hayatıma kadar hep yollarımızın kesiştiği, birçok derdi, sevinci paylaştığım değerli arkadaşım Furkan SOĞUKKUYU’ya,

Destekleriyle, yardımlarıyla her zaman yanımda olan Hüseyin DUMAN’a, Elif Özlem YILMAZ’a, Hasan TONBUL’a, Süleyman ŞİŞMAN’a, adını yazamadığım tüm arkadaşlarıma ve GTÜ Harita Mühendisliği Bölümü hocalarıma,

Küçüklüğümde bugüne sevincimde benimle sevinen, üzüldüğümde benimle üzülen, zor zamanımda dualarını esirgemeyen, arkamda koca bir dağ olduğunu hissettiren annem, babam, kız kardeşim, dedem ve babaanneme,

Ve son olarak hayatımın en güzel sebebi olan, can sevdiğim Elif Nisa’ya gönülden şükranlarımı sunar,

Teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	1
1.2. Tezin Amacı	5
1.3. Hipotez	6
2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)	7
2.1. GPS	7
2.2. GLONASS	9
2.3. Galileo	11
2.4. BeiDou	13
2.5. QZSS	14
2.6. IRNSS (NavIC)	15
3. PPP TEKNİĞİNDEKİ HATA KAYNAKLARI VE DÜZELTME MODELLERİ	17
3.1. Ana Hata Kaynakları	17
3.1.1. Uydu Yörünge ve Saat Hataları	17
3.1.2. Alıcı Saat Hatası	21
3.1.3. İyonosferik Gecikme	22
3.1.4. Troposferik Gecikme	23
3.1.5. Çok Yolluluk (Multipath) Etkisi	29
3.2. Özel Hata Kaynakları	29
3.2.1. Görelilik Etkisi	29
3.2.2. Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklığı	30

3.2.3. Alıcı Anteni Faz Merkezi Kayıklığı ve Değişimleri	32
3.2.4. Uydu Faz Dönmesi (Wind-Up) Etkisi	33
3.2.5. Faz Sıçraması (Cycle Slip)	34
3.2.6. Alıcı Saati Sıçraması Etkisi	36
3.2.6. Katı Yeryuvarı Gelgiti	37
3.2.7. Okyanus Yükleme	39
3.2.8. Kutup Gelgiti	39
4. PPP TEKNİĞİNDE MATEMATİKSEL MODELLER	40
4.1. Kalman Filtresi	40
4.1.1. Genişletilmiş Kalman Filtresi	41
4.1.2. Uyarlı Robust Kalman Filtreleme Tekniği	44
4.2. Çoklu-GNSS PPP Fonksiyonel Modeli	47
4.3. Çoklu-GNSS PPP Stokastik Modeli	54
4.3.1. Ölçülerin Stokastik Modeli	54
4.3.2. Parametrelerin Stokastik Modeli	56
5. UYGULAMA VE ANALİZLER	59
5.1. Geliştirilen Yazılımın Tanıtılması	59
5.2. Verinin ve Ürünlerin Elde Edilmesi	61
5.3. GPS PPP Değerlendirme Sonuçları	66
5.4. Çoklu-GNSS PPP Değerlendirme Sonuçları	74
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	90

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
f_0	: Temel frekans
$t^{sat}(yayın)$	: Sinyalin uydudan çıkış zamanı (Uydu saat hatası ile)
$t_{rcv}(kayıt)$	: Sinyalin alıcıya ulaştığı zaman
Δt	: Sinyalin seyahat süresi
c	: Işık hızı
$T(yayın)$	: Sinyalin uydudan çıktığı zaman
ω_E	: Dünyanın dönme hızı
r_{sun}	: Güneş'in ECEF koordinatları
r^{sat}	: Uydunun koordinat vektörü
v^{sat}	: Uydunun hız vektörü
I	: İyonosferik gecikme
Tr	: Troposferik gecikme
ZHD	: Zenit hidrostatik gecikme
ZWD	: Zenit ıslak gecikme
$m_d(e)$	: Kuru kısım izdüşüm fonksiyonu
$m_w(e)$	: Islak kısım izdüşüm fonksiyonu
e	: Uydunun yükseklik açısı
ϕ	: Enlem
P	: Basınç
T	: Sıcaklık
RH	: Bağıl Nem
R	: Kuru havanın gaz sabiti
H	: Ortometrik yükseklik
g	: Standart gravite ivmesi
μ	: Dünya'nın yerçekimi sabiti
f_i	: L_i taşıyıcı fazının frekansı

λ_i	:	L_i taşıyıcı fazının dalga boyu
ρ	:	Uydu ile alıcı anteni arasındaki geometrik mesafe
dt	:	Alicı saat hatası
dT	:	Uydu saat hatası
ε	:	Ölçülerin gürültüsü
P_{IF}	:	İyonosferden bağımsız kod ölçüsü
L_{IF}	:	İyonosferden bağımsız faz ölçüsü
λ_{IF}	:	İyonosferden bağımsız kombinasyonun dalga boyu
X^s, Y^s, Z^s	:	Uydunun koordinatları
X_r, Y_r, Z_r	:	Alicının kesin koordinatları
$\hat{R}_j, R_j$	:	Jeosentrik birim vektör ve vektörün büyüklüğü (j=2 için Ay, j=3 için Güneş)
$\hat{r}, r$	:	İstasyonun birim vektörü ve bu vektörün büyüklüğü
R_e	:	Dünya'nın ekvator yarıçapı
h_2, l_2	:	Nominal ikinci derece Love ve Shida sayıları
$\hat{x}_k^-$	:	k zamanına predikte edilmiş durum vektörü
$\hat{z}_k^-$	:	k zamanında $\hat{x}_k^-$ durum vektörüne göre elde edilen ölçü vektörü
$\hat{x}_k$	:	k zamanında filtrelenmiş durum vektörü
Φ_k	:	k zamanı için dönüşüm matrisi
A	:	Katsayılar matrisi
P_k^-	:	k zamanına predikte edilmiş kovaryans matrisi
P_k	:	k zamanındaki filtrelenmiş kovaryans matrisi
R_k	:	k zamanında ölçülerin gürültü kovaryans matrisi
Q_k	:	k zamanında sistem gürültüsünün kovaryans matrisi
d	:	Öncül düzeltme vektörü (inovasyon vektörü)
Q_{dd}	:	İnovasyon matrisinin kovaryans matrisi
K_k	:	k zamanındaki kazanç (Gain) matrisi
α_k	:	Uyar Faktörü
$\bar{R}_k$	:	Eşdeğer varyans matrisi

v_i, Q_{vi}	:	Ölçülerin düzeltmesi ve varyans değeri
$\bar{v}_i$	:	Standartlaştırılmış düzeltme
$\hat{\sigma}_0^2$	:	Birim ağırlıklı ölçünün varyansı
$\sigma_{P,0}^2, \sigma_{L,0}^2$	:	Kod ve faz ölçülerinin öncül varyansı
ACs	:	Analysis Centers
ANTEX	:	Antenna Exchange
APPS	:	Automatic Precise Positioning Service
ARNS	:	Aeronautical Radio Navigation Service
ARP	:	Antenna Reference Point
C/A	:	Coarse/Acquisition
CDDIS	:	Crustal Dynamics Data Information System
CDMA	:	Code Division Multiple Access
CNES/CLS	:	Centre National d'Etudes Spatiales and Collecte Localisation Satellites
CODE	:	Center for Orbit Determination in Europe
CSRS-PPP	:	Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning
ECEF	:	Earth-Centered, Earth-Fixed
ESA	:	European Space Agency
FDMA	:	Frequency Division Multiple Access
FOC	:	Full Operational Capability
GAPS	:	GNSS Analysis and Positioning Software
GDOP	:	Geometric Dilution of Precision
GEO	:	Geostationary Earth Orbit
GF	:	Geometry-Free
GFZ	:	Deutsches GeoForschungs Zentrum
GLONASS	:	GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GMF	:	Global Mapping Function
GNSS	:	Global Navigation Satellite Systems
GPS	:	Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
GTU-APAS	:	Gebze Technical University-Automatic PPP Analysis Software
IAC	:	Information and Analysis Center
IFB	:	Inter-Frequency Bias

IGG III	:	Institute of Geodesy and Geophysics III
IGS	:	International GNSS Service
IGSO	:	Inclined Geosynchronous Orbit
IOV	:	In-Orbit Validation
IRNSS	:	Indian Regional Navigation Satellite System
ISB	:	Inter-System Bias
ISRO	:	Indian Space Research Organisation
ITRF	:	International Terrestrial Reference Frame
JAXA	:	Japan Aerospace Exploration Agency
KOH	:	Karesel Ortalama Hata
LEO	:	Low Earth Orbiting
MEO	:	Medium Earth Orbit
MGEX	:	Multi-GNSS Experiment
MW	:	Melbourne-Wübbena
NMF	:	Niell Mapping Function
PCO	:	Phase Centre Offset
PCV	:	Phase Center Variations
PNT	:	Positioning, Navigation, and Timing
PPP	:	Precise Point Positioning
PRN	:	Pseudo-Random Noise
QZSS	:	Quasi-Zenith Satellite System
RINEX	:	Receiver Independent Exchange
RTK	:	Real Time Kinematic
SBAS	:	Satellite Based Augmentation System, SBAS
SHAO	:	Shanghai Astronomical Observatory
SINEX	:	Software Independent Exchange
STEC	:	Slant Total Electron Content
TEC	:	Total Electron Content
TUM	:	Technische Universität München
VMF	:	Vienna Mapping Function
WHU	:	Wuhan University

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: GPS yörünge düzlemleri ve güncel uyduları.	7
2.2: Galileo yörünge düzlemleri ve güncel uyduları.	12
2.3: QZSS IGSO uyduları ve yörünge düzlemleri.	15
2.4: NavIC uyduları ve yörünge düzlemleri.	16
3.1: IGS MGEX istasyonları.	19
3.2: ISTA istasyonunun UNB3m modelinde yükseklik açısına göre troposferik gecikme değerleri.	28
3.3: Uydunun kütle merkezi ile anten faz merkezinin alıcıya göre geometrisi.	30
3.4: GNSS anteni yapısı.	32
3.5: Faz Sıçramasının Düzeltilmesi: a) Faz Sıçraması düzeltilmeden önceki kombinasyonlar, b) Faz Sıçraması düzeltildikten sonraki kombinasyonlar.	36
3.6: TUBİ istasyonu için katı yeryuvarı gelgit etkisi.	38
4.1: Kalman filtresinin işleyişinin genel gösterimi.	41
4.2: Genişletilmiş Kalman filtresinin genel yapısı.	41
4.3: Genişletilmiş Kalman filtresi denklemleri ve adımları.	43
4.4: a) Cholesky Ayırıştırma tekniği uygulanmamış PPP çözümü, b) Cholesky Ayırıştırma tekniği uygulanmış PPP çözümü.	44
5.1: GTU-APAS yazılımının genel işleyiş prosedürü.	59
5.2: Uygulamada kullanılan IGS istasyonları.	61
5.3: 01.01.2021 ALIC istasyonundaki GPS-PPP ile elde edilen kuzey, doğu ve yukarı bileşenlerinin hataları.	63
5.4: 01.01.2021 ALIC istasyonunda elde edilen alıcı saat hatası.	64
5.5: 01.01.2021 ALIC istasyonu için elde edilen zenit troposferik gecikme ile IGS'den yayınlanan zenit troposferik gecikmenin karşılaştırılması.	64
5.6: 01.01.2021-07.01.2021: a) ALIC istasyonunda 7 gün boyunca görülen uydu sayısı, b) ALIC istasyonunun 7 gün için GDOP değerleri.	65
5.7: ALIC istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.	67

5.8:	ZAMB istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.	68
5.9:	PTBB istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.	69
5.10:	POL2 istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.	70
5.11:	MDO1 istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.	71
5.12:	ALIC istasyonunun oklu-GNSS değerlendirme sonuçları.	75
5.13:	ZAMB istasyonunun oklu-GNSS değerlendirme sonuçları.	75
5.14:	PTBB istasyonunun oklu-GNSS değerlendirme sonuçları.	76
5.15:	POL2 istasyonunun oklu-GNSS değerlendirme sonuçları.	76
5.16:	MDO1 istasyonunun oklu-GNSS değerlendirme sonuçları.	77

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: GPS sinyalleri.	9
2.2: GLONASS uydularının frekans kanal değerleri.	10
2.3: GLONASS sinyalleri.	11
2.4: Galileo sinyalleri.	13
2.5: BDS uydu çeşitleri ve sayıları.	13
2.6: BDS sinyalleri.	14
2.7: QZSS sinyalleri.	15
3.1: IGS'in GPS ve GLONASS ürünlerinin özellikleri.	18
3.2: MGEX Analiz Merkezleri ve sağlanan ürünler.	19
3.3: UNB3m modelinde kullanılan parametreler.	24
3.4: Kuru kısım için Niell İzdüşüm Fonksiyonunda kullanılan katsayılar.	26
3.5: Islak kısım için Niell İzdüşüm Fonksiyonunda kullanılan katsayılar.	28
3.6: Saat sıçraması tipleri.	37
5.1: Uygulamada kullanılan IGS istasyonlarının genel bilgileri.	61
5.2: Genel Değerlendirme Stratejisi.	62
5.3: Sistem gürültüsüne ait kovaryans matrisi elemanlarının spektral yoğunlukları.	63
5.4: GPS PPP ile değerlendirilen istasyonların istatistiksel sonuçları.	72
5.5: Çoklu-GNSS PPP ile değerlendirilen istasyonların istatistiksel sonuçları.	77
5.6: Çoklu-GNSS PPP ile değerlendirilen istasyonların yakınsama süreleri.	77

1. GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS), yörüngeleri belli uydulardan yapılan ölçmelerle; alıcının koordinat, hız ve zaman bilgilerinin küresel olarak elde edilmesini sağlamaktadır. Anlık olarak, her türlü hava koşulunda, devamlı şekilde, gerekli uydu sayısı ve uygun uydu geometrisi ile sözü edilen üç boyutlu konum ve hız bilgisi ölçme anı için hesaplanabilmektedir [Hofmann-Wellenhof et al., 2008], [Kaplan and Hegarty, 2017].

GNSS alanında farklı uydu sistemleri ile konumlama, navigasyon ve zamanlama (Positioning, Navigation, and Timing, PNT) hizmeti kullanıcılara sunulmaktadır. Bunların ilki olan, Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS) ve devamında geliştirilen GLONASS (GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Galileo ve BeiDou sistemleri küresel anlamda GNSS' i oluşturmaktadır. Bölgesel ölçekte ise, QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) ve IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite Systems) sistemi bulunmaktadır. Bunun yanı sıra doğruluk, kullanılabilirlik ve güvenlik amaçlı olarak Uydu Tabanlı Destekleyici Sistemler (Satellite Based Augmentation System, SBAS) de GNSS kapsamında ele alınmaktadır. Bu gelişmeler paralelinde yeni tasarım uydularla birlikte yeni sinyal konfigürasyonları ve uydu sayısındaki artış göz önünde bulundurulduğunda, GNSS' in hem navigasyon hem de diğer çalışma alanlarına daha etkin ölçüde katkı sağlaması beklenmektedir [Montenbruck et al., 2014].

GNSS'in etkin kullanımı, GPS'in 90'lı yıllar itibariyle tamamlanmasıyla başladığı kabul edilir. Kullanım alanları, askeri amaçlar başta olmak üzere tektonik ve jeodezik çalışmalar, sivil navigasyon ihtiyaçlarının karşılanması, doğru deprem tahminleri yapabilmek, heyelan ve yanardağ aktivitelerinin araştırılması, buz kütlelerinin hareketlerinin izlenmesi, hassas tarım çalışmaları olarak sıralanabilir. Ayrıca, konum belirleme dışında, atmosfere ilişkin troposferin fiziksel parametrelerinin tahmin edilmesi ile daha doğru hava durumu tahminleri yapılabilmektedir. İyonosferdeki değişimlerin GNSS sinyallerindeki etkilerinin yorumlanması ile de deprem analizleri gerçekleştirebilmektedir [Larson et al., 1997],

[Jakowski et al., 2005], [Bellone et al., 2016], [Langley et al., 2017], [Nykiel et al., 2019].

Uydularla konum belirleme temel olarak bağıl ve mutlak konum belirleme olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bağıl konum belirleme; konumu hassas olarak bilinen en az bir referans (sabit) nokta ile konumu hesaplanmak istenen noktada yapılan eş zamanlı ölçümler ile rölatif olarak konum hesaplama yöntemidir. Mutlak konum belirleme yöntemi ise; herhangi bir referans nokta kullanılmadan, yani tek alıcıyla, konumun belirlenmesidir. Bu yöntem, özellikle hassas yörünge ve saat bilgilerinin Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS) tarafından üretilmeye başlanmasıyla birlikte, yeni bir konseptte ele alınmış ve 1997 itibarıyla hassas nokta konumlama (Precise Point Positioning, PPP) ismiyle GNSS alanında yeni bir dönem başlamasını sağlamıştır. Yöntem kısaca, çift frekanslı bir alıcıdan elde edilen kod ve faz ölçülerinin kendi aralarında iyonosferden bağımsız kombinasyonları kullanılarak geleneksel PPP yöntemi şeklinde ifade edilmiştir [Zumberge et al., 1997]. Bu çalışmanın devamında, Kouba and Héroux, PPP çözümünde etkili olan sistematik hata kaynaklarını ele almış; atmosferik etkiler olan troposferik ve iyonosferik gecikme, uyduya bağlı olan uydu yörünge ve saat hatası, uydu faz dönmesi, uydu faz merkezi kayıklığı ve değişimleri, alıcıya bağlı olan alıcı saat hatası ve alıcı faz merkezi kayıklığı ve değişimleri, jeodinamik hata kaynakları olarak katı yeryuvarı gelgiti, okyanus yüklemesi, kutup gezinmesi gibi sistematik hata kaynaklarının nasıl modelleneceği, nasıl elimine edileceği, nasıl azaltılacağı ve dengeleme prosedürlerini ayrıntılı bir şekilde vererek, PPP tekniği ile statik veya kinematik olarak, santimetre ile desimetre arası konum doğruluğuna ulaşılabilceğini yaptıkları detaylı çalışmaları ile açıklamışlardır [Kouba and Héroux, 2001].

Bu başlangıç sürecinin devamında, PPP yöntemi özellikle sağladığı esnek kullanım ve avantajlı durumları da düşünüldüğünde, bağıl konumlamaya göre üstünlükleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Bunların en önemlisi, bağıl konum belirleme yönteminde, eş uyduların gözlenmesi gerekliliğinin referans alıcıyla olan mesafeyi sınırlandırmasıdır. Bu durum, IGS noktalarının konumlarının hesabı gibi, PPP yöntemini küresel ölçekte ön plana çıkarmaktadır. Bu şekilde, BERNESE ve GipsyX/RTGx gibi akademik yazılımlarda PPP çözüm yöntemi belli bir süreçte gelişmiş ve ön plana çıkmıştır. Bu kapsamda, alçak yörünge uyduları (Low Earth Orbiting, LEO) gibi sistemlerinin konum belirlemelerinde PPP yöntemi alternatif

olarak yerini almıştır [Rizos, 2002], [Bisnath and Gao, 2009], [Dach et al., 2015], [Bertiger et al., 2020].

PPP algoritmaları ile ilgili çalışmalar temel olarak iki ana ekseninde toplanmaktadır. Bunlardan biri sistematik etkilerin modellenmesi, diğeri ise başlangıç faz bilinmeyenlerinin çözümüdür. Başlangıç faz bilinmeyenlerinin çözümü veya yakınsama süresi ile ilişkili olarak geliştirilen algoritma bazlı çalışmaların yanı sıra, deneysel sonuçları etkileyen faktörlerin analizi pek çok çalışmada irdelenmiştir [Gao and Chen, 2004], [Ge et al., 2008], [Laurichesse et al., 2009], [Collins et al., 2010]. Yakınsama sürelerinin uzun olması yöntem için bir dezavantaj oluşturduğu, bunun da uzun ölçme sürelerine ihtiyaç duyulduğu sonucunu doğurduğu belirtilmelidir. Yakınsama süresinde uyduların sayısı ve geometrisi, ölçülerin kalitesi, ortamın koşulları gibi faktörlerin önemli derecede etkili olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir. [Bisnath and Gao, 2009], [Kouba, 2015]. [Choy et al., 2017].

Genel yaklaşımla, konum doğruluğu için bir desimetre seçilen limit değerin altında doğruluğa ulaşmak için geçen süre, yakınsama süresi olarak ele alınır. Bu süre statik konumlandırmada yaklaşık otuz dakika ile birkaç saat civarındadır [Bisnath and Gao, 2009]. Seepersad and Bisnath, ilk yakınsama periyodunun performansını doğrudan etkileyen faktörlerin başında pseudorange ölçülerinin kalitesinin geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yöntemin doğruluğunu uydu saat ve yörünge ürünlerinin hassasiyeti, yapılan modellemeler ki başta zenitten olan troposferik gecikmenin değerlendirme süreci, kod ile faz ölçülerinin gürültüsü ve çok yolluluk gibi parametreler etkilemektedir. Bu çalışmada ayrıca geleneksel GPS PPP yöntemiyle 300 IGS istasyonuna ait 24 saatlik yedi günlük verinin değerlendirilmesi sonucunda; statik değerlendirme de yatay bileşenin doğruluğu 7 mm, düşey bileşenin doğruluğu ise 13 mm olarak, kinematik değerlendirme de ise yatay bileşenin doğruluğu 46 mm, düşey bileşenin doğruluğu ise 72 mm olarak elde edilmiştir [Seepersad and Bisnath, 2014]. Geleneksel PPP tekniğinin başlangıç faz belirsizliklerini tam sayı olarak çözmemesi, uzun süreli statik PPP çalışmalarında bir dezavantaj teşkil etmez. Ancak bu faz belirsizliklerinin tam sayı olarak çözülmesi yakınsama süresini ve konum doğruluğunu iyileştirdiği düşünüldüğünde; kısa süreli ve kinematik PPP yöntemine önemli yarar sağladığı vurgulanmalıdır. [Choy et al., 2017].

Çoklu GNSS PPP yönteminin kullanımı, bu sistemler için hassas yörünge ve saat bilgilerinin hesaplanması ve yayınlanmasıyla gündeme gelmiştir. IGS, büyük sayıda katılımcıdan oluşan birçok amaca yönelik hizmet eden bir kuruluş olarak, bu konuda

da öncülük etmektedir. Kurulu küresel ağı ile gözlem verilerini toplayıp, arşivleyip kullanıcılara sunmaktadır. Bu veriler farklı analiz merkezlerinde (Analysis Centres, ACs) işlenerek yüksek doğrulukta ürünlere dönüştürülmektedir [Dow et al., 2009]. Analiz merkezlerinin yayınladığı ürünlere GPS in yanında GLONASS için de yörünge ve saat ürünleri eklenmeye başlamasından sonra GPS ve GLONASS' in birlikte kullanılarak PPP için yakınsama süresi ve konum doğruluğu üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır [Cai and Gao, 2007]. Bu süreçte, birçok çalışmada GPS ve GLONASS sistemlerinin iyonosferden bağımsız ölçüleri birlikte kullanılarak PPP uygulaması gerçekleştirilmiş ve statik konumlandırmada yakınsama süresi GPS PPP yöntemine göre kısaldığı, konum doğruluğunun ise önemli derecede artmadığı, kinematik değerlendirme de ise konum doğruluğunun 3 koordinat bileşeni için de %50'den fazla iyileştiği sonucuna varılmıştır [Cai and Gao, 2013]. GPS ve GLONASS sistemlerinin birlikte kullanılması kısa süreli gözlemlerin PPP doğruluğuna da olumlu katkılar sağlamıştır. Ayrıca bu iki sistemin birlikte kullanımı yerleşmenin çok olduğu kentsel alanlar ve kıyı bölgeleri, dar kanallar, arazi dezavantajı olan sular gibi uydu görünürlüğünün düşük olduğu yerlerde fayda sağlamaktadır [Yigit et al., 2014], [Alkan et al., 2015], [Alkan et al., 2017].

Galileo, BeiDou, QZSS gibi uydu sistemlerinin ve yeni sinyallerin artık operasyonel anlamda kullanılmaya başlanmasıyla; IGS, MGEX (Multi-GNSS Experiment) projesini temellerini atarak, çoklu-GNSS ağını oluşturma çalışmalarını IGS noktalarındaki alıcıların yenilenmesiyle ve yeni istasyonlar ile gerçekleştirmiştir. Bunun sonucunda sadece GPS ve GLONASS için değil diğer uydu sistemleri için de hassas ürünler ve verilerin sağlanması amaçlanmıştır [Chris Rizos et al., 2013]. Bu gelişmeler beraberinde bu uydu sistemlerinin tekli, ikili, üçlü ve dördümlü kombinasyonları ile doğruluk ve yakınsama süresine ilişkin çalışmaların önünü açmıştır. Cai et al., bu duruma ilişkin yaptıkları çalışmada, 3 saatlik veriler kullanarak statik ve kinematik PPP performansını araştırmışlardır. Hem statik hem de kinematik metotlarda GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu kombinasyonlarının konum doğruluğuna ve yakınsama süresine önemli katkılar yaptığı görülmüştür [Cai et al., 2015]. Sistemlerin artması farklı sinyallerin kullanılması değerlendirme aşamasında daha komplike bir hal almış olsa da doğruluk, yakınsama süresi, güvenilirlik, uydu sayısı, sinyal kalitesi açısından önemli gelişmeler sağlayarak fazlaca uygulama alanı için fırsat oluşturmuştur [Li et al., 2015]. IGS MGEX projesi kapsamında günden güne MGEX ağı büyüyerek gelişmeye devam etmiştir. Çoklu-GNSS ürünlerinin

performansı incelendiğinde QZSS, Galileo ve BeiDou ürünleri GPS ve GLONASS ürünlerinin gerisinde kalsa da bu sistemler PPP çalışmalarında, atmosferik ve diğer farklı araştırmalarda aktif olarak kullanılmaktadır [Montenbruck et al., 2017].

Uydu yörünge ve saat ürünlerinin ortak bir sistemde farklı analiz merkezleri tarafından yayınlanmaktadır. Bu durum çoklu-GNSS çalışmasını barındıran açık kaynak kodlu yazılımların gelişmesini sağlamıştır. Bu yazılımlar PPP performansı analizleri, troposferin incelenmesi, sistemler arası hataların araştırılması gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. GAMP [Zhou et al., 2018] yazılımı RTKLIB'in geliştirilmiş versiyonu olarak kullanıcılara sunulmuştur. PPPH [Bahadur and Nohutcu, 2018] MATLAB tabanlı çoklu GNSS PPP yazılımıdır. MG-APP [Xiao et al., 2020] ve PPPLib [C. Chen and Chang, 2021] yazılımları farklı özellikler katılarak güncel geliştirilen yazılımlardır. Ayrıca internet tabanlı çevrimiçi PPP servisleri de bulunmaktadır. Örnek olarak APPS, GAPS, CSRS-PPP ve Magic-PPP servisleri verilebilir. Bu servislere ilgili ölçü dosyası gönderildiğinde belli koordinat sisteminde PPP çözümlerini mail ile geri bildirmektedirler. [Q. Guo, 2015].

1.2. Tezin Amacı

PPP tekniğinde ilave bir referans istasyona ihtiyaç duyulmadan cm seviyelerinde doğruluğun elde edilmesi mümkündür. Ancak bu teknikte fark alınmamış ölçülerin kullanılması birçok sistematik hata kaynağını beraberinde getirmektedir. Bu tezin amacı aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Bu sistematik hata kaynaklarını uygun şekilde modellemek ve yöntem üzerindeki karakterini incelemek
- PPP matematiksel modelleri (fonksiyonel ve stokastik) analiz etmek
- GPS ile başlayarak bir PPP yazılımının geliştirilmesi
- Yazılım ile farklı parametrelerin bu tekniği nasıl etkilediğini bağımsız bir şekilde araştırmak
- Diğer uydu sistemlerinin de (GLONASS, Galileo, BeiDou) GPS ile birlikte kullanılmasıyla çoklu-GNSS PPP performansını incelemek

Bu tez toplam 6 bölümden oluşmaktadırdır. Birinci bölümde tez konusunun literatürdeki yeri araştırılmış ve tezin amacı belirtilmiştir. İkinci bölümde GNSS hakkında güncel bilgilerden bahsedilmiş ve küresel navigasyon sistemleri tanıtılmıştır. nc bölümde tezin temelini teşkil eden PPP hata kaynakları detaylıca incelenmiş ve nasıl modelleneneceği anlatılmıştır. Drdnce bölümde ise PPP tekniğinde matematiksel modeller oklu-GNSS üzerinden irdelenerek ölçülerin ve parametrelerin PPP'deki rolü analiz edilmiştir. Beşinci bölümde MATLAB tabanlı geliştirilen GTU-APAS yazılımı tanıtılmış ve Dünya zerine dağılmış beş istasyon için tekli ve oklu PPP zmleri ile yazılımın performansı incelenmiştir. Altıncı bölümde elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilerek tez çalışmasının literatüre sağladığı katkıdan bahsedilmiştir.

1.3. Hipotez

PPP yöntemi 1990'lı yıllardan bu yana GNSS uygulamalarında kullanılan ve çok popüler olan bir yöntemdir. Gerek konumsal çalışmalar gerekse de atmosferik uygulamalar gibi farklı alanlarda kullanımı yaygındır. Ancak yöntemin aleyhinde olan başlıca unsur yakınsama süresidir. Yukarıda belirtilen amaçlar ışığında bu tez

- Sistematik hata kaynaklarının tam olarak modellenmesi PPP çözümlerinde daha sağlam ve hassas sonuçlar vereceği,
- Stokastik modellemenin sonuçlar üzerinde önemli etkiye sebep olacağı,
- Farklı uydu sistemlerinin GPS ile kıyaslanabileceği,
- Çoklu-GNSS PPP ile yakınsama süresinin iyileşeceği,

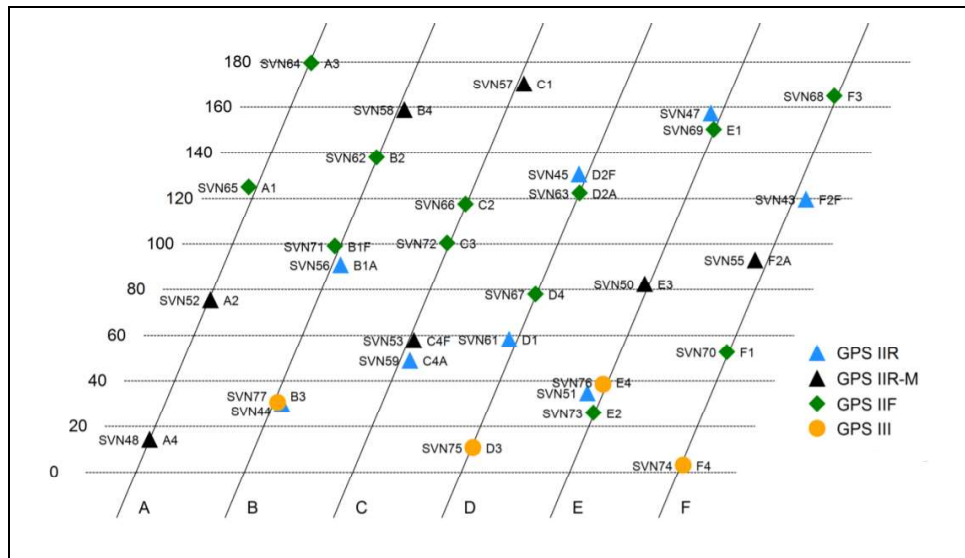
hipotezleri üzerine kurulmuştur.

2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)

2.1. GPS

GPS, ABD Savunma Bakanlığı (DoD) tarafından geliştirilen ve işletilen, 1970 yılında başlanılıp, 1995 yılında tam olarak kullanıma hazır hale geldiği ilan edilen küresel navigasyon uydu sistemidir. Tüm alanlarda (hava, deniz, kara) 24 saat boyunca her türlü hava koşulunda sinyal alımına uygun bir alıcı bulunduğu takdirde konum, hız ve zaman bilgisini anlık olarak sunabilen bir sistemdir [Web 1, 2021]. Nominal olarak düzlem eğimi 55° olan 6 farklı yörünge düzlemine sahiptir ve yörüngelerindeki uyduların yerden yüksekliği yaklaşık olarak 20180 km'dir. İlk uydunun yörüngeye oturmasının başlangıcından (1978) günümüze (Şubat 2021) toplam 77 tane uydu fırlatılmıştır ve güncel olarak 31 tanesi aktif olarak kullanılmaktadır. Sezyum ve/veya rubidyum atomik saatleriyle tasarlanmış olan bu uydular yetenekleri ve görev sürelerine göre;

Blok (Block) I, Blok II/IIA, Blok IIR/IIR-M, Blok IIF ve GPS III olmak üzere toplam 5 gruba ayrılmaktadırlar [Hegarty, 2017]. Misyon tamamlama ilkesine göre çalışmakta olan bu uydulardan günümüzde Blok I ve Blok II/IIA uyduları kullanılmamaktadır. Aktif olarak kullanılan uydular Şekil 2.1'de verilmektedir [Web 1, 2021].



Şekil 2.1: GPS yörünge düzlemleri ve güncel uyduları.

GPS sinyalleri incelendiğinde ilk olarak sinyal modernizasyonundan önce de kullanılan Link (L1) ve Link (L2) adında iki taşıyıcı frekansın açıklanması gerekir. L1 ve L2 frekansları $f_0 = 10.23$ MHz temel frekanstan türetilen GPS için temel teşkil eden ve sinyallerinin iletildiği L bandındaki iki frekanstır. Bu sabit frekanslarda üretilen taşıyıcı faz, her uydu için benzersiz olan Sözde Rasgele Gürültü (Pseudo-Random Noise, PRN) kodu ve navigasyon mesajı ile modüle edilmiştir. L1 frekansında iki tane PRN kod çeşidi bulunmaktadır. Bunlar: C/A (Coarse/Acquisition) kodu ve P (Precise) kodudur. C/A kodu 1.023 Mchips/s ($f_0/10$) çip oranına sahiptir ve dalga boyu yaklaşık olarak 293.1 m'dir. P kodu 10.23 Mchips/s (f_0) çip oranına sahiptir ve dalga boyu 29.31 m'dir. L2 frekansında ise genellikle navigasyon mesajıyla birlikte sadece P kodu bulunmaktadır. Uydulardan iletilen sinyalin frekansı aynı olmasına rağmen, PRN kodunun her uydu için farklı olması sinyalleri ayırt edilebilir ve algılanabilir hale getirmektedir. Bu şekilde aynı frekansta birçok uydudan birbirine karışmadan sinyal gönderilmesi yöntemine kod bölmeli çoklu erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) denilmektedir [Kaplan and Hegarty, 2017].

GPS sinyal modernizasyonu ile birçok fayda beraberinde gelmiştir. Bunları yedi başlık altında toplayacak olursak:

- Sivil kullanıcılar için sağlam çift frekanslı iyonosfer düzeltme yeteneği,
- Daha iyi sivil kodlar,
- Faz ölçüleri ile başlangıç tam sayı bilinmeyen çözümünün geliştirilmesi
- Havacılık Radyo Navigasyon Servisi (ARNS) için çift frekansta sinyal
- Çok yolluluk etkisini azaltmak için gelişmeler
- Sinyal bozma (jamming) ortamında askeri gereksinimleri sağlayabilme
- Diğer GNSS sistemleri ile uyumluluk ve çalışabilirlik

diye sıralanabilir [Grewal et al., 2020]. Bu modernizasyonuyla GPS, eski sinyalleri olan L1 bandındaki C/A ve P, L2 bandındaki P koduna ek olarak yeni L2C, L5, L1 ve L2 bandında askeri M kodu ve L1C sinyalleri eklenmiştir. İlk olarak L2 taşıyıcı frekansında C/A kodunun açılması düşünülüyordu ancak ek avantajlar sağlayacağı anlaşıldığından yeni bir sinyal olan L2C sinyali 21 Eylül 2005 tarihinde Block IIR-M uydusunun yörüngesine fırlatılmasıyla tanıtılıp, kullanılmaya başlanmıştır. L1 ve L2C sinyalleri birçok kullanıcı için yeterli seviyede görülse de havacılık gibi önemli bir

alanda L2 frekans bandı kabul edilemeyecek dezavantajlara sahip olmasından dolayı yeni bir sivil GPS frekansı olan Link (L5), modernizasyonun üçüncü sinyali olarak kullanılmaya başlanmıştır. M kodu L1 ve L2 taşıyıcı frekanslarıyla iletilen askeri amaçla kullanılan bir koddur. 2005 yılında GPS Block IIR-M uyduları ile kullanılmaya başlanmıştır. L1C sinyali 23 Kasım 2018 tarihinde ilk GPS III uydusunun fırlatılmasıyla sistemin güncel sinyal grubuna eklenmiştir. C/A koduna göre daha yüksek performansa sahiptir. Bu sinyalin diğer GNSS sistemleriyle birlikte çalışmasını sağlamak için iş birlikleri sürmektedir [Grewal et al., 2020]. GPS sinyal yapısına ilişkin detaylı bilgilendirme Tablo 2.1’de verilmiştir [Subirana et al., 2013].

Tablo 2.1: GPS sinyalleri.

GPS Bandı	Taşıyıcı Frekans (MHz)	PRN Kodu	Kod Hızı (Mcps)	Veri Hızı (bps)	Servis
L1	1575.42	C/A	1.023	50	Sivil
		P	10.23	50	Askeri
		M	5.115	N/A	Askeri
		L1C-I	1.023	50	Sivil
		L1C-Q	1.023		Sivil
L2	1227.60	P	10.23	50	Askeri
		L2C M	1.023	25	Sivil
		L2C L	1.023		Sivil
		M	1.023	N/A	Askeri
L5	1176.45	L5-I	10.23	50	Sivil
		L5-Q	10.23		Sivil

2.2. GLONASS

GLONASS, Rusya Federasyonu tarafından GPS’in muadili olarak geliştirilen bir navigasyon sistemidir. İlk olarak alçak yörüngeli bir navigasyon sisteminden sonra daha yüksek yörüngeli bir sistem olan GLONASS’ın geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur ve 1982 yılında ilk yüksek yörüngeli uydu fırlatılmış, 1993 yılında resmi olarak faaliyete geçmiş, 1995 yılında ise tam kapasite (nominal 24 uydu) kullanıma sunulmuştur. 1990 yılında sistemin gelişmesinin sektöre uğramasından sonra, yeni bir program ile 2002 ve 2012 yıllarında tekrar üzerindeki çalışmalar yoğunlaştırılarak GLONASS’ın performansı, kullanılabilirliği ve rekabetçiliğinin artırılması amaçlanmıştır. Ekvator ile arasında 64,8° eğim olan, 3 yörünge düzlemine sahip, yerden yüksekliği yaklaşık olarak 19100 km ve yörünge periyodu yaklaşık 11 saat 15

dakika 44 saniye olan 24 uydudan oluşturulmasında karar kılınan bir sitemdir. Nisan 2021 tarihi itibarıyla güncel olarak takımyıldızında toplam 27 uydu bulunmaktadır. Bunlardan 23 tanesi operasyonel olarak çalışmakta olup, 1 tanesi bakımda, 1 tanesi yedek ve geri kalan 2 tanesi uçuş testleri aşamasındadır [Web 2, 2021].

35 yılı aşkın süredir faaliyet gösteren bu sistem, ilk olarak *GLONASS* adını verdikleri uydu jenerasyonu ile başlamıştır. Ardından 2003'ten sonra *GLONASS-M* uyduları ve 2011 de *GLONASS-K* serisi uyduları kullanıma girmiştir. Her yeni uydu türüyle uydu ömrü, performans, yetenek, sistem gücü bir adım daha artırılarak devam ettirilmiştir. Bu uydularda da GPS uydularındaki gibi sezyum ve/veya rubidyum saatleri bulunmaktadır [Revnivkykh et al., 2017].

Sinyal yapısı incelendiğinde, GPS'in sinyal yapısında kullanılan teknik olan CDMA'nın aksine bir durum söz konusudur. Her iki sistemde L bandında frekans kullanmalarına rağmen GLONASS her uydusundan çıkan sinyal için farklı frekans kullanmaktadır. Frekans bölmeli çoklu erişim (Frequency Division Multiple Access, FDMA) adı verilen bu teknikte bant kanallara bölünerek farklı frekanslar elde edilmektedir [Grewal et al., 2020]. Her bir uydu için L1 ve L2 bandındaki frekans değerleri f_{L1} ve f_{L2}

$$\begin{aligned} f_{L1}(k) &= (1602.0 + k 0.5625) \text{MHz} \\ f_{L2}(k) &= (1246.0 + k 0.4375) \text{MHz} \end{aligned} \quad (2.1)$$

eşitlikleriyle hesaplanır. Burada k kanal numarasıdır ve -7'den 6'ya kadar değerler almaktadır. Uydu numarasına göre k değerleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir [Web 2, 2021].

Tablo 2.2: GLONASS uydularının frekans kanal değerleri.

Düzlem 1	Uydu Numarası (Slot)	1	2	3	4	5	6	7	8
	Frekans Kanalı (k)	1	-4	5	6	1	-4	5	6
Düzlem 2	Uydu Numarası (Slot)	9	10	11	12	13	14	15	16
	Frekans Kanalı (k)	-2	-7	0	-1	-2	-7	0	-1
Düzlem 3	Uydu Numarası (Slot)	17	18	19	20	21	22	23	24
	Frekans Kanalı (k)	4	-3	3	2	4	-3	3	2

GPS ile benzer şekilde GLONASS sisteminde de C/A, P kodu ve navigasyon mesajı uydularının taşıyıcı frekanslarına modüle edilmiştir. İlk olarak C/A kodu sadece L1’de bulunmaktaydı. *GLONASS-M* uydularının L2 bandı da C/A kodu bulunmaktadır. P kodu ise her iki taşıyıcı frekansta bulunmaktadır. GPS’ten farkı ise, GLONASS ta PRN kodu aynıdır, frekanslar farklıdır ve uydular bu şekilde ayırt edilmektedirler [Subirana et al., 2013].

FDMA tekniğindeki uydular için kullanılan farklı frekanslardan ötürü alıcıda bazı hataların meydana gelmesi, gereken bant genişliği gibi dezavantajlardan sonra 2011 yılında *GLONASS-K1* uydusu ile CDMA sinyal yapısına sahip olan L3 (1202.25 MHz) test sinyali kullanıma sunulmuştur [Grewal et al., 2020]. Ardından *GLONASS-K2* uydularıyla hem FDMA L1 ve L2 hem de yeni CDMA sinyalleri L1, L2 ve L3 sinyalleri kullanıma girmiştir ve GLONASS uydularının sinyal yapısı Tablo 2.3’te gösterilmiştir [Revnivkyh et al., 2017].

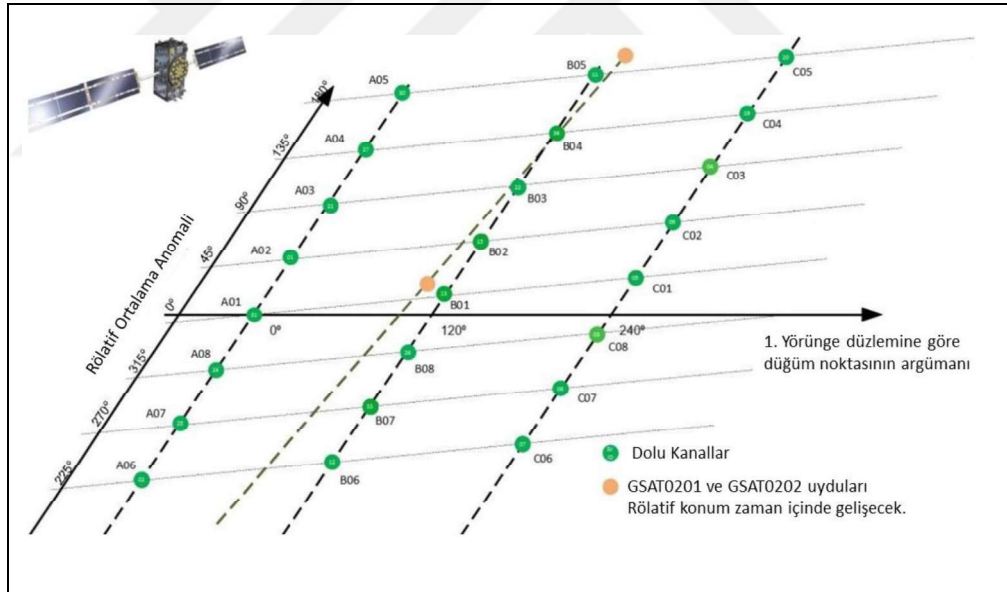
Tablo 2.3: GLONASS sinyalleri.

Teknik	Sinyal	Frekans (MHz)
FDMA	L1OF	1598.0625 ... 1605.375
	L1SF	1598.0625 ... 1605.375
	L2OF	1242.9375 ... 1248.625
	L2SF	1242.9375 ... 1248.625
CDMA	L1OCM	1575.42
	L1SC	1600.995
	L1OC	1600.995
	L2SC	1248.06
	L2OC	1248.06
	L3OC	1202.025
	L5OCM	1176.45

2.3. Galileo

Avrupa’nın küresel uydu navigasyon sistemi olan Galileo, Avrupa Birliği ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilmiştir. Diğer denk sistemler gibi bağımsız, 24 saat her türlü hava koşulunda konum, hız, zaman bilgisi sağlayan ve

onlarla uyumlu çalışabilecek bir şekilde tasarlanmıştır. Ekvator ile arasında 56° eğim olan 3 yörünge düzleminde, yerden yüksekliği yaklaşık 23222 km olan ve periyodu 14 saat 4 dakika 42 saniye olan 30 uydudan oluşturulması planlanmıştır. Galileo sisteminin ilk hamlesi 2003 yılının sonlarına doğru olmuştur ve adım adım uydu sistemlerini geliştirmişlerdir. 2005 ve 2008 yıllarında iki tane GIOVE uydusu ile sinyaller, frekanslar, saatler gibi temel gereksinimler test edilmiştir. Ardından ilk operasyonel uyduları olan Galileo yörünge içi doğrulama (In-Orbit Validation, IOV) uyduları ikili şekilde 2011 ve 2012 yıllarının Ekim aylarında fırlatılmıştır. Yapılan çalışmalardan sonra 2013 yılının 12 Mart günü sadece Galileo uyduları ile bir noktanın konum tespiti yapılmıştır ve bu yıl boyunca IOV uydularıyla başarılı bir şekilde bu çalışmalar devam ettirilmiştir. Ardından devam eden yıllarda tam operasyonel olan FOC (Full Operational Capability, FOC) uyduları fırlatılmıştır [Falcone et al., 2017]. Nisan 2021 tarihi itibarıyla bulunan 26 uydudan 22 tanesi kullanılabilir durumdadır. Bu uyduların yörünge durumu da Şekil 2.2’de gösterilmiştir [Web 3, 2021].



Şekil 2.2: Galileo yörünge düzlemleri ve güncel uyduları.

Sistemin sinyal yapısına bakıldığında, Galileo L bandında 3 farklı frekansta (E1, E5 ve E6) navigasyon sinyalleri ile Dünya çapında hizmet vermektedir. Ayrıca bu sinyaller de kendi aralarında bazı bileşenlere ayrılmaktadır. Güncel kullanılmakta olan Galileo sisteminin sinyal yapısı Tablo 2.4’te gösterilmektedir [Kaplan and Hegarty, 2017].

Tablo 2.4: Galileo sinyalleri.

Sinyal	E1	E5a	E5b	E6
Frekans (MHz)	1575.42	1176.45	1207.14	1278.75
Servis	Açık	Açık	Açık	Ticari
Bileşenler	E1-B Data, E1-C Pilot	E5a-I, E5a-q	E5b-I, E5b-Q	E6-B, E6-C

2.4. BeiDou

BeiDou Navigasyon Uydu Sistemi (BDS), Çin tarafından geliştirilip işletilen bağımsız bir sistemdir. Planlanması 1980'lere dayanan bu sistemin gelişimi 3 adımda özetlenmektedir. İlk olarak BDS-1 olarak adlandırılan adımda 2000 yılında iki uydu ve 2003 yılında bir uydu daha fırlatarak 3 uydula sistemin başlatılmasını ve geliştirilmesini sağlamışlardır. Ardından 2004 yılında BDS-2 adımına geçilmiştir. Bölgesel bir sistem kurulan bu adımda farklı yörüngeler kullanılmıştır. 2007 yılında BDS-2'nin ilk uydusu olan orta yörünge (Medium Earth Orbit, MEO) uydusu sistemi başlatmıştır. Ardından 2012 yılına kadar yer sabit yörüngede (Geostationary Earth Orbit, GEO) 5 uydu, eğimli yer senkronize yörüngede (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) 5 uydu ve MEO'da 4 uydu olmak üzere toplam 14 uydu ile Asya Pasifik ve Çin bölgelerinde tam operasyonel olarak kullanıma sunulmuştur. Son adım olan BDS-3 için 2020 yılı hedefi 5 GEO, 27 MEO ve 3 IGSO uydularından oluşan bir takımyıldızı ile küresel anlamda hizmet sağlamak olarak açıklanmıştır [Yuanxi Yang et al., 2017]. Nisan 2021 tarihi ile BDS'nin güncel uydu sayıları Tablo 2.5'te verilmiştir [Web 4, 2021]. BDS'nin sinyal yapısına bakıldığında GPS, Galileo ve yeni GLONASS sinyalleri gibi CDMA tekniğini kullanmaktadır. L bandı üzerinde B1, B2 ve B3 olmak üzere 3 farklı taşıyıcı frekans kullanılmaktadır. Ancak sinyal yapısı BDS-2 ve BDS-3 için farklılık göstermektedir. Bu sinyal yapısı Tablo 2.6'da ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir [Subirana et al., 2013].

Tablo 2.5: BDS uydu çeşitleri ve sayıları.

	GEO Uyduları	MEO Uyduları	IGSO Uyduları	Toplam
BDS-2	5	3	7	15
BDS-3	2	24	3	29

Tablo 2.6: BDS sinyalleri.

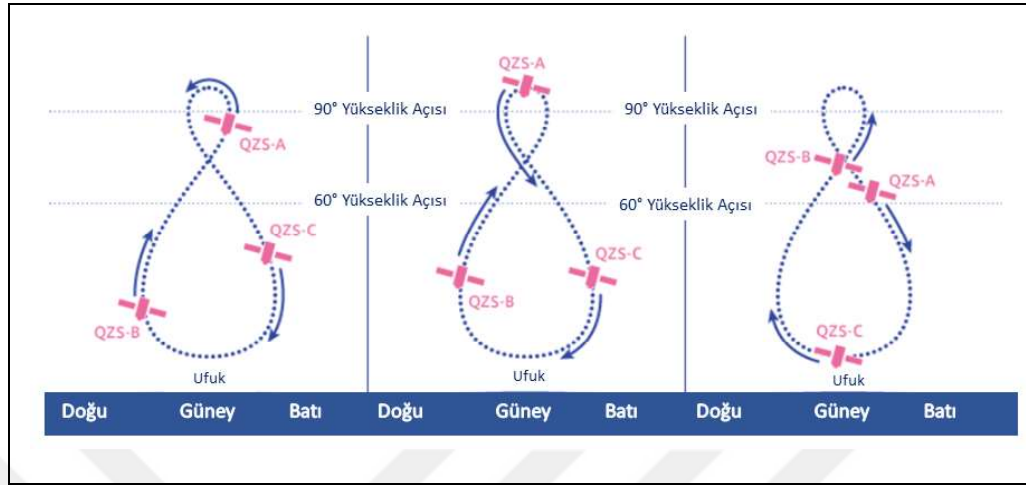
Sistem	Bant	Taşıyıcı Frekans (MHz)	PRN Kodu	Servis
BDS-3	B1	1575.42	B1-C D	Açık
			B1-C P	Açık
			B1	İzne Tabi
	B2	1191.795	B2-a D	Açık
			B2-a P	
			B2-b D	
			B2-b P	
	B3	1268.52	B3	İzne Tabi
			B3-A D	
			B3-A P	
BDS-2	B1	1561.098	B1-I	Açık
			B1-Q	İzne Tabi
	B2	1207.14	B2-I	Açık
			B2-Q	İzne Tabi
	B3	1268.52	B3	İzne Tabi

2.5. QZSS

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) Japonya tarafından geliştirilen küresel özellik kazanmamış, bölgesel bir navigasyon sistemidir. Japonya bölgesinde bazı alanlardaki çevresel şartlardan ötürü büyük yükseklik açısında görünür uydu azaldığından GPS navigasyon performansı olumsuz şekilde etkilenmekteydi. Bu yüzden GPS ile birlikte kullanılabilir, onu devam ettirip geliştirebilecek bölgesel QZSS projesine 2003 yılında başlanmıştır. Planlaması uyduların periyodu yaklaşık 23 saat 56 dakika olacak şekilde, Japonya üzerinde büyük yükseklik açısında örneğin 60°'lik yükseklik açısında en az bir QZSS uydusu görünebilecek şekilde yapılmıştır. İlk uydu Eylül 2010'da fırlatılarak, ardından yapılan testler sonucunda sisteme katılması başarıyla sağlanmıştır. 2023 hedefi olarak da 7 tane uydu ile diğer sistemlerden bağımsız şekilde navigasyon çözümünü hedeflediklerini duyurmuşlardır [Kogure et al., 2017]. Nisan 2021 tarihinde mevcut 4 QZSS uydusu aktif olarak çalışmaktadır [Web 5, 2021]. Bu 4 uydunun 3 tanesi IGSO, 1 tanesi GEO uydusudur ve IGSO uydularının Tokyo yakınlarındaki yörünge hareketi Şekil 2.3'te gösterilmiştir [Web 6, 2021].

QZSS'nin sinyal yapısı ile GPS'e benzeyen ve birlikte işlem göreceği şekilde tasarlanmıştır. L1, L2, L5 ve E6 olarak 4 farklı bantta sinyal kullanmaktadır. Ayrıca

L1 ve E6 bandında destekleyici sinyal de sağlamaktadır ve bu sinyal yapısı Tablo 2.7’de gösterilmektedir [Kogure et al., 2017]



Şekil 2.3: QZSS IGSO uyduları ve yörünge düzlemleri.

Tablo 2.7: QZSS sinyalleri.

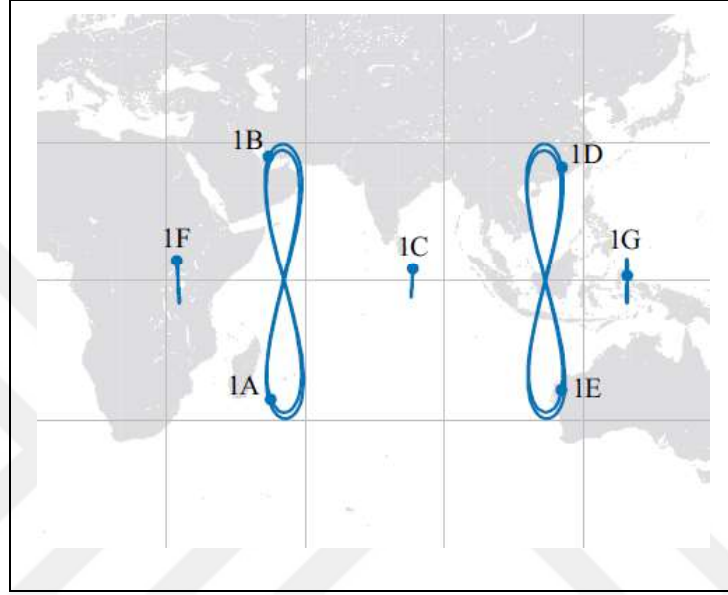
Bant	Frekans (MHz)	Sinyal	Kategori
L1	1575.42	L1-C/A	GPS ile uyumlu
		L1C	GPS ile uyumlu
		L1-SAIF	Destekleyici Sinyal
L2	1227.60	L2C	GPS ile uyumlu
L5	1176.45	L5	GPS ile uyumlu
E6	1278.75	LEX	Destekleyici Sinyal

2.6. IRNSS (NavIC)

IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) operasyonel ismiyle NavIC, Hindistan Uzay Araştırma Organizasyonu (ISRO) tarafından bağımsız bir navigasyon sistemi kurmak için ortaya çıkan bir girişimdir. Kendi sınırlarıyla birlikte yaklaşık 1500 km dışını da içine alan bölgesel bir sistemdir [Kogure et al., 2017]. 2013 yılından başlamak üzere bugüne kadar toplam 9 uydu fırlatılmıştır. Bir tanesinin yörüngesine oturamaması ve 1 tanesinin osilatöründe çıkan sorundan ötürü güncel olarak operasyonel 7 uydusu bulunmaktadır [Web 7, 2021].

IRNSS’nin sinyal yapısına bakıldığında L ve S bandında iki frekans kullanılmaktadır. Diğer sistemler ile kıyaslandığında en genç sistem olarak nitelendirilebilecek olan IRNSS, L bandında birçok sistemin L1 ve L2 frekansını

tamamen kullanmaları hasebiyle L5 (1176.45 MHz) bandını kullanmaktadır. Bu diğer sistemlerle de uyumlu olmasını sağlamıştır. İkinci frekans konumlandırma için şart olduğundan navigasyon için yeni tanıtılan ve daha boş olan S bandı (2492.028 MHz) ikinci sinyal olarak seçilmiştir. Ayrıca S bandı L bandına göre iyonosferdeki problemlerden daha az etkilendiğinden bir avantaj da sağlamaktadır. Şekil 2.4'te NavIC uydularına ait yörüngeler gösterilmektedir. [Kogure et al., 2017].



Şekil 2.4: NavIC uyduları ve yörünge düzlemleri.

3. PPP TEKNİĞİNDEKİ HATA KAYNAKLARI VE DÜZELTME MODELLERİ

PPP tekniğinde hassas uydu yörünge ve saat ürünleri ile kod ve faz ölçüleri kullanılmaktadır. Bu yöntem çok esnek ve kolay uygulanabilir görünse de ölçülerin farklarının alınmayışından dolayı hata kaynaklarının sonuçlar üzerindeki etkilerine tamamen açıktır. Hata kaynakları uygun şekilde modellenerek düzeltilmezse PPP yöntemi beklenmedik şekilde kötü sonuçlar verebilir. Bu yüzden tüm bu hata kaynakları incelenerek gerekli şekilde düzeltilmelidir. Bu bölümde PPP hata kaynakları ana ve özel olmak üzere iki bölümde sınıflandırılarak modellemeleri detaylı olarak anlatılmıştır.

3.1. Ana Hata Kaynakları

3.1.1. Uydu Yörünge ve Saat Hataları

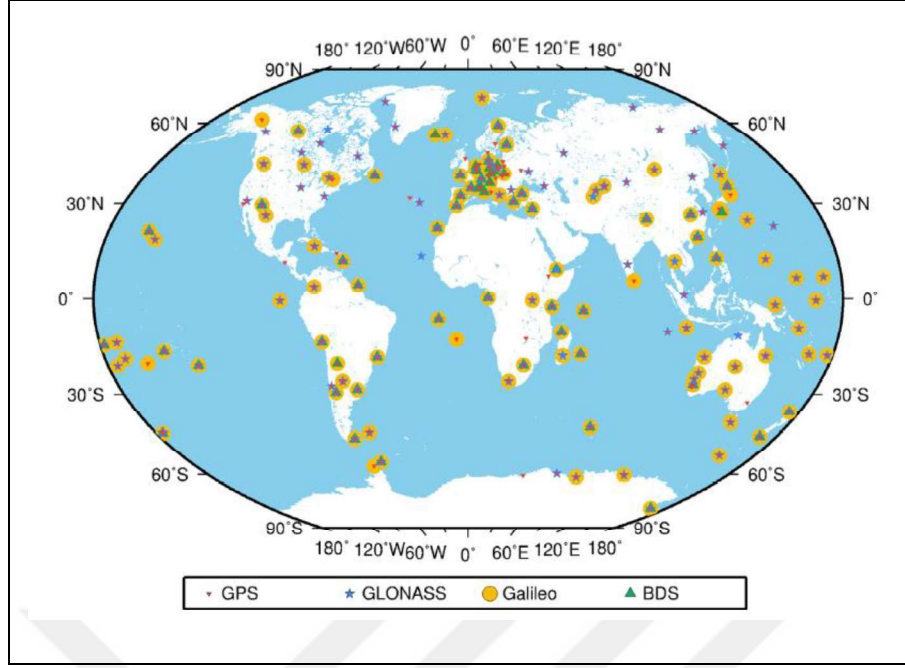
Yeryüzünde herhangi bir GNSS alıcısı ile tek bir konumlandırma sistemi düşünüldüğünde (örneğin GPS) anlık olarak konum hesaplaması en az 4 uydu ile yapılabilmektedir. Uydudan gelen sinyallere modüle edilen yayın (broadcast) navigasyon mesajında bulunan Kepler parametreleri ile uydunun konumu ve yine bu navigasyon mesajı ile uydunun ilgili sistem zamanına göre hatası hesaplanır. Bu parametreler kontrol bölümünün izleme istasyonlarındaki veriler kullanılarak ana kontrol istasyonu tarafından hesaplanıp uydulara iletilmektedir [Hofmann-Wellenhof et al., 2008], [Langley et al., 2017]. Yayın yörüngesi yerine doğruluğu daha yüksek olan hassas (precise) yörünge ve saat ürünleri düşünüldüğünde ilk olarak Uluslararası GNSS Servisi'nin (International GNSS Service, IGS) tanıtılması gerekmektedir. IGS, Ocak 1994'te kurulan, birçok gönüllü kuruluştan oluşan, misyonu çok geniş bir konfederasyondur. Yeryüzünde bulunan global ağındaki istasyonlar ile sürekli olarak gözlem verileri toplanıp, arşivlenip ve ücretsiz bir şekilde kullanıcıya sunulmaktadır. Bu veriler yörünge, saat ve diğer birçok ürünü üretmek için analiz edilmektedir. Ürünlerin sağladığı birçok fayda bulunmaktadır. Kısaca açıklamak gerekirse; Uluslararası Karasal Referans Çerçevesi'nin (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) iyileştirilmesinin desteklenmesi, uyduların yörüngelerinin ve saat

hatalarının hassas olarak belirlenmesi, Dünyamızın hareketinin ve deformasyonlarının incelenmesi, iyonosfer ve troposferin izlenmesi vb. olarak özetlenebilir [Dow et al., 2009]. Tablo 3.1’de GPS’in uydu ve saat ürünleri, doğrulukları, yayınlanma zamanları ve örneklem aralığı ile GLONASS uyduları için sağlanan final yörünge bilgileri gösterilmiştir [Web 8, 2021].

Tablo 3.1: IGS’in GPS ve GLONASS ürünlerinin özellikleri.

Sistem	Ürünün Türü		Doğruluk	Gecikme	Örneklem Aralığı
GPS	Broadcast (Yayın)	Yörünge	~100 cm	Gerçek Zamanlı	Günlük
		Saat	~5 ns KOH		
	Ultra-Rapid (kestirilen)	Yörünge	~5 cm	Gerçek Zamanlı	15 dakika
		Saat	~3 ns KOH		
	Ultra-Rapid (hesaplanan)	Yörünge	~3 cm	3 - 9 saat	15 dakika
		Saat	~150 ps KOH		
	Rapid	Yörünge	~2,5 cm	17 - 41 saat	15 dakika
		Saat	~75 ps KOH		5 dakika
	Final	Yörünge	~2.5 cm	12 - 18 gün	15 dakika
		Saat	~75 ps KOH		30 saniye
GLONASS	Final	Yörünge	~3 cm	12 - 18 gün	15 dakika

IGS’in sağladığı bu ürünlere bakıldığında günümüzdeki diğer uydu sistemleri paralelinde yetersiz olduğu görülmektedir. GPS ve GLONASS’ın yanı sıra Avrupa Birliğine ait Galileo, Çin’e ait olan BeiDou ve diğer bölgesel ağların başında gelen Japonya’ya ait QZSS ve Hindistan’ın ilk olarak 2013’te fırlattığı uydula başlayan IRNSS için farklı ve daha geniş ürünler sağlamak, güncelliği ve gelişimi devam ettirmek açısından önemlidir. Bu yüzden IGS bünyesinde, çoklu-GNSS terimi ışığında MGEX (Multi-GNSS Experiment) projesi başlatılarak, GPS ve GLONASS için kullanılan eski ağa paralel ulusal ajanslar, üniversiteler ve gönüllü kuruluşların destek ve katkılarıyla MGEX ağı oluşturulmuştur. MGEX, birçok alanda yeni uydu sistemlerinin kullanılabilirliğini artırmak, farkındalığını sağlamak için bir köprü görevi görmektedir [Montenbruck et al., 2014]. Bu süreçte, MGEX ağı büyüyerek ve mevcut noktalardaki alıcıların yenilenmesiyle gelişmeye devam etmektedir. Şekil 3.1’de 2019 yılında Dünya üzerinde sabit istasyonlardaki çoklu-GNSS’in mevcut potansiyel durumu gösterilmiştir [X. Chen et al., 2019].



Şekil 3.1: IGS MGEX istasyonları.

Galileo, BeiDou ve QZSS uydularının hassas yörünge ve saat ürünlerinin standardı, GPS ve GLONASS sistemlerinin gerisinden gelmiş olsa da pek çok alanda kullanılabilirliği sağlanarak belli bir temel oluşturulmuştur. Çoklu-GNSS ile beraberinde gelen yeni sinyaller, yeni uydular birçok çalışmada ve uygulamada kullanılmaya başlanmıştır [Li et al., 2015], [C. Chen and Chang, 2021]. MGEX istasyonlarındaki gözlem verileri ile yeni uydular için yörünge, saat ve diğer ürünleri MGEX Analiz Merkezleri (Analysis Centers, ACs) tarafından sağlanarak kullanıcılara sunulmaktadır. [Montenbruck et al., 2017].

Tablo 3.2: MGEX Analiz Merkezleri ve sağlanan ürünler.

Ülke	Enstitü	Kısaltma	Sistem	Yörünge	Saat
Almanya	GFZ	gbm	GRCEJ	5 dakika	30 saniye
Çin	WHU	wum	GRCEJ	15 dakika	30 saniye
Rusya	IAC	iac	GRCEJ	5 dakika	30 saniye
Çin	SHAO	sha	GRCE	5 dakika	5 dakika
Fransa	CNES/CLS	cnt	GRCE	5 dakika	5 saniye
İsviçre	CODE	com	GRCEJ	5 dakika	30 saniye
Japonya	JAXA	jax	GRJ	5 dakika	30 saniye
Almanya	TUM	tum	GEJ	5 dakika	5 dakika
G:GPS, R:GLONASS, E:Galileo, C:BeiDou, J:QZSS					

MGEX'in gelişimi ve devamlılığı için çoklu-GNSS ürünlerini sağlayan güncel olarak 8 tane ACs bulunmaktadır. Bunların içerdiği sistemler, yörünge ve saat örneklem aralığı gibi temel özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. [Shen et al., 2021].

Bir gözlem dosyasında gözlem aralığı 30 s, 15 s, 5 s, 1 s ve daha düşük (yüksek frekanslı) olacak veriler elde edilebilmektedir. Değerlendirme aşamasında epok-epok çözümlerde uydu koordinatlarının ve saat hatalarının ilgili zamanda yeterli doğrulukla hesaplanması gerekmektedir. Tablo 3.2'de verilen yörünge ve saat ürünlerinin örneklem aralığı ile gözlemlerin örneklemine karşılık bu değerlerin hesabı için bir enterpolasyon yönteminin kullanılması gereklidir. Genellikle uydu koordinatları için dokuzuncu dereceden bir Lagrange enterpolasyonu ile istenilen doğrulukta yörünge bilgisi hesaplanır. Saat hatasının hesabında ise yüksek dereceden bir enterpolasyon önerilmez, bunun yerine doğrusal enterpolasyon yeterli görülür [Remondi, 1989]; [Montenbruck and MacLeod, 2017].

Uydu koordinatları hesaplanmasında, sinyalin uydudan çıktığı zaman ile alıcıda alındığı zaman kavramları önem teşkil etmektedir. Çünkü gözlem dosyası incelendiğinde zaman etiketi gelen sinyalin alıcıda alındığı zamana aittir. Ancak sinyal uydudan bu zamanda çıkmamıştır. Bu sinyal yaklaşık olarak 20000 km yolu 0.07 s gibi bir sürede kat ederek alıcıyı gelmektedir. Uydunun koordinatı da hesaplanırken bu durum göz önüne alınmalıdır. Ayrıca uydudan çıkan sinyal Dünya'ya gelene kadar Dünya dönüşüne devam etmektedir. Bu yüzden uydudan çıkış anında hesaplanan koordinatlar seyahat süresine göre döndürülmelidir. Bu durumu iki aşamada özetleyecek olursak [Subirana et al., 2013]

- Sinyalin çıkış anındaki uydunun koordinatlarının hesabı

$$t^{sat}(yayın) = t_{rcv}(kayıt) - \Delta t \quad (3.1)$$

Burada $t^{sat}(yayın)$ sinyalin uydudan çıkış zamanı, $t_{rcv}(kayıt)$ sinyalin alıcı ulaştığı zaman ve Δt ise sinyalin seyahat süredir. Sinyalin seyahat süresi

$$\Delta t = P / c \quad (3.2)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. P pseudorange kod ölçüsü ve c ışık hızıdır. Son olarak

$$T(yayın) = t^{sat}(yayın) - dT = t_{rcv}(kayıt) - \Delta t - dT \quad (3.3)$$

$t^{sat}(yayın)$ anındaki uydu saat hatası olan dT enterpolasyon ile elde edildikten sonra denklemde kullanılarak sinyalin uydudan çıktığı zaman hesaplanır. Bu değere göre final ürünündeki koordinatlar zaman etiketlerine göre kullanılıp enterpolasyon işlemiyle $T(yayın)$ anındaki uydu koordinatları hesaplanır.

- Uydu Koordinatlarının Döndürülmesi

$$r^{sat} = R_3(\omega_E \Delta t) \cdot \tilde{r}^{sat} \quad (3.4)$$

Burada ω_E Dünyanın dönme hızını $R_3[\theta]$ z eksenini etrafında θ açısının dönüşünü ifade eder. $R_3[\theta]$ matrisi Denklem 3.5'teki gibi yazılabilir.

$$R_3[\theta] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Δt için Denklem 3.2'deki değer de kullanılabilir ya da alıcının yaklaşık koordinatları $r_{0,rcv}$ ve $T(yayın)$ anındaki uydu koordinatları $\tilde{r}^{sat}$ ile Denklem 3.6'daki gibi de hesaplanabilir.

$$\Delta t = \frac{\|\tilde{r}^{sat} - r_{0,rcv}\|}{c} \quad (3.6)$$

3.1.2. Alıcı Saat Hatası

Uydu saat hatalarına karşın alıcı saat hataları, PPP kapsamında herhangi bir şekilde hesaplanıp yayınlanması mümkün olmayacağından, çözüm algoritması içerisinde bilinmeyen olarak ele alınmaları zaruridir. Bu nedenle, alıcıların sinyal kalitesi ve ne şekilde modellenmeleri gerektiği ele alınmalıdır.

Uydularda kullanılan saatler (sinyal üreticiler, osilatörler) ile alıcılarda kullanılan saatler birbirinden farklıdır. Alıcılarda uydulara nispeten daha ucuz, daha hafif, daha az güç tüketen kuvars osilatörler kullanılmaktadır. Uydulardaki atomik saatlere (sezyum/rubidyum) kıyasla stabilitesi küçük olan bu donanımlarda sistem zamanıyla olan farklar, daha büyük ve düzensizdir [Cai, 2009]. Modellenmesi güç olan bu hata, PPP çözümünde bilinmeyen olarak kestirilmektedir.

3.1.3. İyonosferik Gecikme

İyonosfer yeryüzüne yaklaşık olarak 70 km ile 1000 km uzaklıkta bulunan, Güneş'in radyasyon ve gaz yoğunluğuyla ilişkili olarak iyon ve elektronların bulunduğu atmosferin bir katmanıdır [Seeber, 2003]. Troposferin aksine saçıcı olan bu katmandaki gecikme frekansın bir fonksiyonu olarak faz ölçüleri için

$$I = \left(I_g^{(1)} + \frac{1}{2} I_g^{(2)} + \frac{1}{3} I_g^{(3)} \right) \quad (3.7)$$

kod ölçüleri için

$$I = \left(I_g^{(1)} + I_g^{(2)} + I_g^{(3)} \right) \quad (3.8)$$

eşitlikleri ile ifade edilmektedir [Elmas et al., 2011], [Cai et al., 2019]. Eşitliklerde $I_g^{(1)}, I_g^{(2)}, I_g^{(3)}$ sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü derece iyonosferik gecikme, I ise toplam iyonosferik gecikme olarak adlandırabilir. İyonosfer katmanında bulunan iyon ve elektronların karakteri nedeniyle bu etki kod ölçülerinde yavaşlatıcı (artı işaretli), faz ölçülerinde ise hızlandırıcı (eksi işaretli) bir davranış göstermektedir. İyonosferik etkinin %99.9'unu oluşturan birinci derece iyonosferik etki;

$$I_g^{(1)} = \frac{40.309}{f_{(i)}^2} STEC \quad (3.9)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada *STEC*, uydu ile istasyon arasındaki yoldaki toplam elektron içeriği (Total Electron Content, TEC), $f_{(i)}$ ilgili taşıyıcı fazın frekansı olmaktadır. İyonosferin aktivitesi ile jeomanyetik fırtına indeksi olan Kp indeksi doğrudan ilişkilidir. 0 ile 9 arasında değerler alan bu indeks için genellikle 4 değerinden küçük olduğu durumlarda ikinci ve üçüncü dereceden iyonosferik etki mm seviyelerindeyken, 4'ten büyük olduğu durumlarda bu etki cm seviyelerine çıkmaktadır. Genellikle PPP çalışmalarında göz ardı edilen ikinci ve üçüncü derece iyonosferik etki, atmosferin çok aktif olduğu zamanlarda yüksek hassasiyet gerektiren çalışmalar için dikkate alınmalıdır [Bassiri and Hajj, 1993], [Elmas et al., 2011], [Marques et al., 2011], [Cai et al., 2019]. Birinci derece iyonosferik etki, çift frekanslı GNSS aletlerinde iyonosferden-bağımsız ölçü kombinasyonu ile giderilmektedir.

3.1.4. Troposferik Gecikme

Atmosfer tabakalarından yeryüzüne en yakın ve kalınlığı yaklaşık olarak ekvatorlarda 20 km, kutuplarda 10 km olan troposfer, PPP için önemli hata kaynaklarından biridir. Elektromanyetik bir dalga olan GNSS sinyalleri bu tabakada kırılmaya uğraması ile sinyalde gecikme meydana gelmektedir. İyonosfer katmanındaki gibi frekansa bağlı olmayan bu gecikme, zenit yolu boyunca hidrostatik (kuru) ve ıslak bileşen olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Alıcının bulunduğu konuma göre, uydulardan gelen sinyallerdeki gecikmeyi hesaplamak için, uydu yükseklik açısına bağlı olan izdüşüm fonksiyonları zenitteki gecikmeyle ilişkili olarak kullanılır [Davis et al., 1985]. Troposferik gecikme Denklem 3.10 ile ifade edilmektedir.

$$Tr = ZHD.m_d(e) + ZWD.m_w(e) \quad (3.10)$$

Burada Tr , ZHD , ZWD , $m_d(e)$, $m_w(e)$ sırasıyla troposferik gecikme, zenit hidrostatik (kuru) gecikme, zenit ıslak gecikme, kuru kısım için izdüşüm fonksiyonu, ıslak kısım için izdüşüm fonksiyonu ve e ise uydunun yükseklik açısını ifade etmektedir.

ZHD , troposferik gecikmenin yaklaşık %90'ını oluşturmakta ve modellenmesi ZWD ile kıyaslandığında daha kolay olan bileşendir. ZHD 'i hesaplamak için en bilinen ve kullanılan modeller olarak Saastamoinen ve Davis'in ortaya koyduğu

modeller örnek verilebilir. Özellikle Saastamoinen modeli enlem, yükseklik ve basınç değerlerine bağlı olarak sonuç verdiği için birçok yazılımda kullanılmaktadır [Saastamoinen, 1972], [Davis et al., 1985]. *ZWD* ise troposferik gecikmenin yaklaşık %10'unu oluşturur ve içerisinde su buharının sürekli değişmesi nedeniyle modellenmesi daha karmaşık ve zordur [Hopfield, 1969]. Ayrıca bu kısım tam olarak modellenemediği için PPP çözümünde modellenemeyen kısmı bilinmeyen olarak kabul edilip, kestirim yapılarak hesaplanır.

Bu çalışmada, *ZHD* ve *ZWD* 'i hesaplamak için New Brunswick Üniversitesi tarafından geliştirilen, izdüşüm fonksiyonu için Niell İzdüşüm Fonksiyonu (Niell Mapping Function, NMF) kullanan ve hibrit bir model olarak bilinen UNB3m modeli kullanılmıştır. Bu model, Saastamoinen modelinin geliştirilmesiyle, Tablo 3.3' te ortalama ve genlik değerleri verilen beş farklı enlemdaki meteorolojik parametreler ile daha hassas bir şekilde atmosferik modellemeyi sağlamaktadır [R. F. Leandro et al., 2008], [Niell, 1996].

Tablo 3.3: UNB3m modelinde kullanılan parametreler.

<i>Ortalama</i>					
ϕ	15°	30°	45°	60°	75°
P (mbar)	1013.25	1017.25	1015.75	1011.75	1013
T (K)	299.65	294.15	283.15	272.15	263.65
RH (%)	75.0	80.0	76.0	77.5	82.5
β (K m ⁻¹)	6.30E-3	6.05E-3	5.58E-3	5.39E-3	4.53E-3
λ (birimsiz)	2.77	3.15	2.57	1.81	1.55
<i>Genlik</i>					
ϕ	15°	30°	45°	60°	75°
P (mbar)	0	-3.75	-2.25	-1.75	-0.5
T (K)	0	7	11	15	14.5
RH (%)	0	0	-1	-2.5	2.5
β (K m ⁻¹)	0	0.25E-3	0.32E-3	0.81E-3	0.62E-3
λ (birimsiz)	0	0.33	0.46	0.74	0.30

Tablo 3.3'te ϕ , P , T , RH , β , λ sırasıyla enlem, basınç, sıcaklık, bağıl nem, yükseklikle hava sıcaklığının düşme hızı, su buharı basıncı yükseklik faktörü olarak isimlendirilmektedir. Tablo değerleri için, noktanın enlem değeri 15°'den küçükse 15°'deki değerler, 75°'den büyükse 75°'deki değerler, 15° ile 75° arasında bir değer ise doğrusal enterpolasyon ile her bir parametre için ortalama ve genlik değerleri hesaplanır. Ardından;

$$X_{\varphi, DoY} = Ort_{\varphi} - Gen_{\varphi} \cdot \cos\left(\left(DoY - 28\right) \cdot \frac{2\pi}{365.25}\right) \quad (3.11)$$

denklemini yardımıyla enlem ve zamana bağlı olarak her parametrenin hesabı yapılır. Burada $X_{\varphi, DoY}$ tablodaki her bir parametrenin kullanılacak değeri, $Ort_{\varphi}, Gen_{\varphi}, DoY$ sırasıyla ortalama değeri, genlik değeri ve yılın günü olarak ifade edilmektedir. Enlem değeri eksi (güney yarımküre) olursa Denklem 3.11’de genlik terimi ters işaretli alınır [R. F. Leandro et al., 2008]. Tüm bu parametreler yardımıyla ZHD ve ZWD

$$ZHD = \frac{10^{-6} k_1 R}{g_m} P_0 \left(1 - \frac{\beta H}{T_0}\right)^{\frac{g}{R\beta}} \quad (3.12)$$

$$ZWD = \frac{10^{-6} (T_m k_2' + k_3) R}{g_m \lambda' - \beta R} \frac{e_0}{T_0} \left(1 - \frac{\beta H}{T_0}\right)^{\left(\frac{\lambda' g}{R\beta}\right)^{-1}} \quad (3.13)$$

eşitlikleri ile ifade edilmektedir. Bu denklemlerde bulunan;

- R kuru havanın gaz sabiti ($287.054 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- H noktanın ortometrik yüksekliği (elipsoidal yükseklik de kullanılabilir.)
- P_0, T_0, β, λ değerleri Tablo 3.3 ve Denklem 3.11 kullanılarak hesaplanır. Su buharı basıncı olan e_0 , Leandro et al. çalışmasındaki denklemler ile hesaplanabilir [R. Leandro et al., 2006].
- g_m noktanın bulunduğu yerçekimi ivmesidir ve ms^{-2} biriminde

$$g_m = 9.784(1 - 2.66 \times 10^{-3} \cos(2\varphi) - 2.8 \times 10^{-7} H) \quad (3.14)$$

- g standart gravite ivmesidir (9.80665 ms^{-2})
- T_m su buharının ortalama sıcaklığı

$$T_m = (T_0 - \beta H) \left(1 - \frac{\beta R}{g_m \lambda'}\right) \quad (3.15)$$

$$\lambda' = \lambda + 1 \quad (3.16)$$

- k_1, k'_2, k_3 kırılma sabitleri, değerleri sırasıyla $77.60 \text{ K mbar}^{-1}$, 16.6 K mbar^{-1} , $377.600 \text{ K}^2 \text{ mbar}^{-1}$ 'dir [R. F. Leandro et al., 2008], [R. Leandro et al., 2006].

Uyduların yükseklik açısına bağlı olarak, troposfer katmanında sinyalin aldığı yol değişir. Özellikle düşük yükseklik açısına sahip uydulardan gelen sinyaller için troposferik etkiyi çok hassas bir şekilde modellemek gerekir. Eğer iyi modellenmezse, özellikle yükseklik bileşeninde büyük miktarda hataya sebep olmaktadır. Bu yüzden zenitten olan gecikmelerden eğik troposferik gecikmeyi bulmak için, NMF, Global İzdüşüm Fonksiyonu (Global Mapping Function, GMF), Viyana İzdüşüm Fonksiyonu (Vienna Mapping Function, VMF) gibi çeşitli modeller kullanılmaktadır. UNB3m modelinde kullanılan izdüşüm fonksiyonu olan NMF'de, kuru kısım ve ıslak kısım için izdüşüm değerlerinin elde edilmesinde Tablo 3.4 ve Tablo 3.5' te verilen katsayılar kullanılır. Bu katsayılar beş farklı enlem değerine göre kuru kısım için; ortalama, genlik değerleri ve ilave olarak yükseklik düzeltmesi katsayılarından oluşurken, ıslak kısım için ortalama katsayılarından oluşmaktadır [Niell, 1996], [Boehm et al., 2006a], [Boehm et al., 2006b], [R. F. Leandro et al., 2008].

Tablo 3.4: Kuru kısım için Niell İzdüşüm Fonksiyonunda kullanılan katsayılar.

Katsayılar	Enlem				
	15°	30°	45°	60°	75°
	Ortalama				
$a_{h,ort}$	1.2769934E-03	1.2683230E-03	1.2465397E-03	1.2196049E-03	1.2045996E-03
$b_{h,ort}$	2.9153695E-03	2.9152299E-03	2.9288445E-03	2.9022565E-03	2.9024912E-03
$c_{h,ort}$	6.2610505E-02	6.2837393E-02	6.3721774E-02	6.3824265E-02	6.4258455E-02
	Genlik				
$a_{h,gen}$	0	1.2709626E-05	2.6523662E-05	3.4000452E-05	4.1202191E-05
$b_{h,gen}$	0	2.1414979E-05	3.0160779E-05	7.2562722E-05	1.1723375E-04
$c_{h,gen}$	0	9.0128400E-05	4.3497037E-05	8.4795348E-04	1.7037206E-03
	Yükseklik Düzeltmesi				
$a_{h,yük}$			2.53E-05		
$b_{h,yük}$			5.49E-03		
$c_{h,yük}$			1.14E-03		

Tablo 3.4’de verilen katsayılar, hidrostatik kısma ait izdüşüm fonksiyonunu elde etmek için $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ enlem değerlerindeki a, b, c katsayılarının ortalama ve genlik değerleridir. Bu katsayılar yeryüzündeki farklı noktalarda elde edilen veriler kullanılarak Niell tarafından hesaplanmıştır. Ayrıca nokta yüksekliğine bağlı olarak da $a_{h,yük}, b_{h,yük}, c_{h,yük}$ katsayıları da verilmiştir [Niell, 1996]. Değişken olarak, noktanın konumu (enlem değeri), zaman (yılın günü), noktanın ortometrik yüksekliği (elipsoidal yükseklik de kullanılabilir) ve uydunun yükseklik açısı kullanılarak kuru kısım için izdüşüm fonksiyonu

$$m_d(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin(e) + \frac{a}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}}} - \left(\frac{1}{\sin(e)} - \frac{1 + \frac{a_{h,yük}}{1 + \frac{b_{h,yük}}{1+c_{h,yük}}}}{\sin(e) + \frac{a_{h,yük}}{\sin(e) + \frac{b_{h,yük}}{\sin(e) + c_{h,yük}}}} \right) \cdot h \quad (3.17)$$

formülü ile elde edilir [Niell, 1996], [Subirana et al., 2013]. Burada h ve e sırasıyla noktanın yüksekliği ve uydunun yükseklik açısı, a, b, c katsayıları ise enlem değerine göre Tablo 3.4’teki ortalama ve genlik değerlerinden enterpole ettikten sonra

$$a(\varphi, DoY) = a_{h,ort}(\varphi) - a_{h,gen}(\varphi) \cdot \cos\left(2\pi \frac{(DoY - DoY_0)}{365.25}\right) \quad (3.18)$$

$$b(\varphi, DoY) = b_{h,ort}(\varphi) - b_{h,gen}(\varphi) \cdot \cos\left(2\pi \frac{(DoY - DoY_0)}{365.25}\right) \quad (3.19)$$

$$c(\varphi, DoY) = c_{h,ort}(\varphi) - c_{h,gen}(\varphi) \cdot \cos\left(2\pi \frac{(DoY - DoY_0)}{365.25}\right) \quad (3.20)$$

denklemleriyle elde edilir. Bu denklemlerde $a_{h,ort}, b_{h,ort}, c_{h,ort}$ ortalama değerler, $a_{h,gen}, b_{h,gen}, c_{h,gen}$ genlik değerleri, DoY yılın günü, DoY_0 kuzey kutbu için 28 güney kutbu için 211’dir [Leick et al., 2015].

Islak kısım için izdüşüm fonksiyonun elde edilmesinde, Tablo 3.5’teki değerler kullanılarak enlem bilgisine göre doğrusal enterpolasyon ile a, b, c katsayıları elde

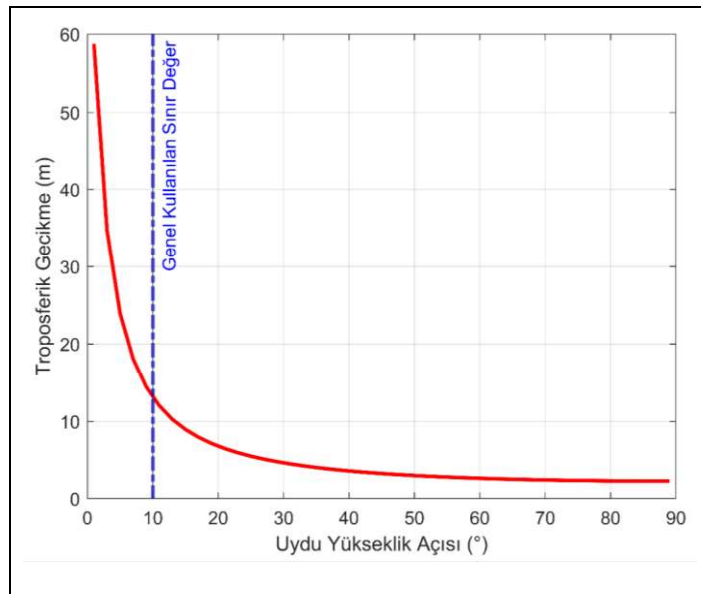
edilir ve Denklem 3.21 ile e uydunun yükseklik açısına göre gerekli değer hesaplanır [Marini, 1972].

Tablo 3.5: Islak kısım için Niell İzdüşüm Fonksiyonunda kullanılan katsayılar.

Katsayılar	Enlem				
	15°	30°	45°	60°	75°
$a_{w,ort}$	5.8021897E-04	5.6794847E-04	5.8118019E-04	5.9727542E-04	6.1641693E-04
$b_{w,ort}$	1.4275268E-03	1.5138625E-03	1.4572752E-03	1.5007428E-03	1.7599082E-03
$c_{w,ort}$	4.3472961E-02	4.6729510E-02	4.3908931E-02	4.4626982E-02	5.4736038E-02

$$m_w(e) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{c}{a}} \frac{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}} \quad (3.21)$$

Örnek olarak, Şekil 3.2’de IGS istasyonlarından olan ISTA istasyonunun yılın ilk günü için UNB3m modelinin yükseklik açısına göre troposferik gecikme değerleri gösterilmektedir. Bu grafik incelendiğinde özellikle 10°’den küçük yükseklik açısına sahip uydulardan gelen sinyaller için troposferik gecikme değeri çok büyümeaktadır.



Şekil 3.2: ISTA istasyonunun UNB3m modelinde yükseklik açısına göre troposferik gecikme değerleri.

3.1.5. Çok Yolluluk (Multipath) Etkisi

GNSS alıcısının bulunduğu konumdaki çevresel koşullar, gelen sinyalin yansıma sonrası antene ulaşması nedeniyle uygulamalarda hatalara neden olmaktadır. Bu durum, çok yolluluk etkisi olarak adlandırılır. Kod ölçüleri için 100 m'ye ulaşan bu hatalar, faz ölçülerinde milimetreden santimetreye kadar ulaşabilmektedir. Noktanın konumuna bağlı olması sebebiyle fark olarak bile giderilemeyen bir hata kaynağıdır. Modellenemeyen bu hata kaynağının etkisini azaltmak için birkaç seçenekten söz edilebilir. Bu seçenekler; alıcının konumu, anten tipi, alıcı tipi, ölçüleri sonradan değerlendirme (post-processing) durumlarına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle anten tipi göz önünde bulundurulduğunda çok yolluluk etkisini azaltan Choke Ring antenler geliştirilmiştir. Ayrıca uyduların değerlendirilmesinde yükseklik kesme açısına göre bir sınır getirilmesi çok yolluluk etkisinin azaltılması açısından önerilmektedir [Braasch, 2017]. Bu çalışma kapsamında, Choke Ring antenlere sahip noktaların verilerinin değerlendirilmiş olması, noktaların çevresel etkiler açısından temiz sayılabilir olması da dikkate alınarak, bu etkiye ilişkin detaylı çalışma ve modellemelere gidilmemiştir.

3.2. Özel Hata Kaynakları

3.2.1. Görelilik Etkisi

Yeryüzü ile uydu yörüngeleri, potansiyel teori kapsamında ele alındığında, osilatörler üzerinde farklı çekim kuvvetlerinin etkisinin olduğu açıkça bilinmektedir. Uydularda yerçekimi etkisinin daha az olması, alıcı saatine göre daha hızlı çalışmalarına neden olur. Ayrıca, özel görelilik kuramı düşünüldüğünde alıcıya göre daha yüksek hızla hareket eden uyduların saatleri daha yavaş çalışmaktadır. Görelilik etkisi aşağıdaki formülle ifade edilebilir [Ashby, 2003].

$$\Delta t_{rel} = -2 \frac{r^{sat} \cdot v^{sat}}{c^2} \quad (3.22)$$

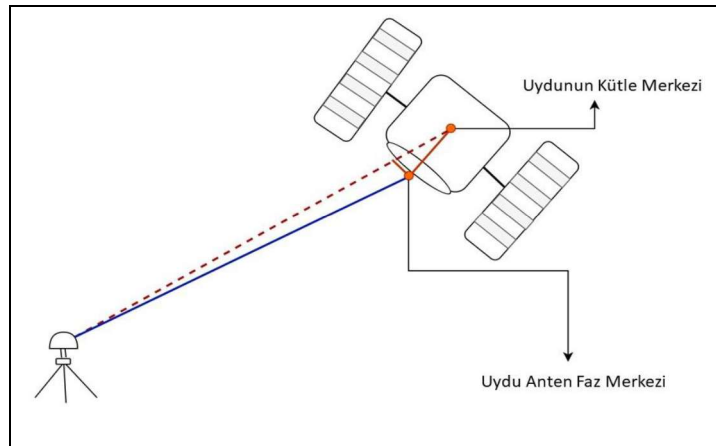
Burada r^{sat} , v^{sat} , c sırasıyla uydunun konumu, hızı ve ışık hızıdır. Ayrıca Dünya'nın gravite alanı GNSS sinyallerinde yayılımı geciktirmektedir. 2 cm den küçük olan bu ikincil görelilik etkisi aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir [Ashby, 2003].

$$\Delta\rho_{rel} = \frac{2\mu}{c^2} \ln \left(\frac{|\vec{r}_{sat}| + |\vec{r}_{rcv}| + |\vec{r}_{sat} - \vec{r}_{rcv}|}{|\vec{r}_{sat}| + |\vec{r}_{rcv}| - |\vec{r}_{sat} - \vec{r}_{rcv}|} \right) \quad (3.23)$$

Burada $\vec{r}_{sat}$, $\vec{r}_{rcv}$ sırasıyla uydunun ve alıcının konum vektörleri, μ ise Dünya'nın yerçekimi sabitidir. Bu iki etki hassas PPP çalışmalarında düzeltilmelidir.

3.2.2. Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklığı

IGS sonuç (final) ürünlerinden olan uydu koordinatlarını kullanırken, bu koordinatların uydunun kütle merkezinde olduğu bilinmelidir. Uydudan alıcıya gelen sinyal uydunun anten faz merkezinden gönderilmektedir. Bu yüzden uydunun kütle merkezinden olan koordinatlarının anten faz merkezindeki değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Yayın efemerisi kullanılarak elde edilen uydu koordinatlarında bu düzeltmenin yapılmasına gerek yoktur. Çünkü yayın efemerisinden elde edilen koordinatlar uydunun faz merkezi koordinatlarıdır [Zhu et al., 2003]. Şekil 3.3'te uydunun bu iki merkezin yerdeki alıcıya göre olan geometrik ilişkisi verilmiştir. Şekil incelendiğinde mavi çizgi ölçünün olması gereken değeridir ve kayıklık değerlerine göre bu değer hesaplanmalıdır.



Şekil 3.3: Uydunun kütle merkezi ile anten faz merkezinin alıcıya göre geometrisi.

PPP uygulamalarında uydu kütle merkezinden anten faz merkezine olan kayıklığın düzeltilmesi için IGS tarafından ANTEX (Antenna Exchange) formatlı dosyalar 5 Kasım 2006 yılından itibaren yayınlanmaya başlamıştır. Uydu sabit koordinat çerçevesinde verilen bu kayıklığın, ilgili birim vektörleri kullanılarak Yer Merkezli Yer Sabit Koordinat Sistemine (Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF) çevrilerek uydunun anten faz merkezinin ECEF koordinatları hesaplanmalı ya da elde edilen bu kayıklık ölçüye yansıtılmalıdır. Uydunun anten faz merkezi koordinatları aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir [Subirana et al., 2013].

$$\hat{k} = -\frac{r^{sat(MC)}}{\|r^{sat(MC)}\|} \quad \hat{e} = \frac{r_{sun} - r^{sat(MC)}}{\|r_{sun} - r^{sat(MC)}\|} \quad (3.24)$$

$$\hat{j} = \hat{k} \times \hat{e} \quad \hat{i} = \hat{j} \times \hat{k} \quad (3.25)$$

- $\hat{k}$ Uydunun kütle merkezinden Dünya'nın merkezine olan birim vektör
- $r^{sat(MC)}$ Uydunun kütle merkezinin ECEF koordinatları
- $\hat{e}$ Uydunun kütle merkezinden Güneş'e olan birim vektör
- r_{sun} Güneş'in ECEF koordinatları
- $\hat{j}$ Uydudan Dünya'ya ve Güneş'e olan birim vektörlerin çapraz çarpımı
- $\hat{i}$ Sağ-el sistemini tamamlayan vektör

Uydu-sabit sistemdeki anten faz merkezi kayıklığı Denklem 3.24 ve Denklem 3.25'te hesaplanan vektörler yardımıyla elde edilen aşağıdaki R dönüşüm matrisi kullanılarak ECEF sistemine dönüştürülür.

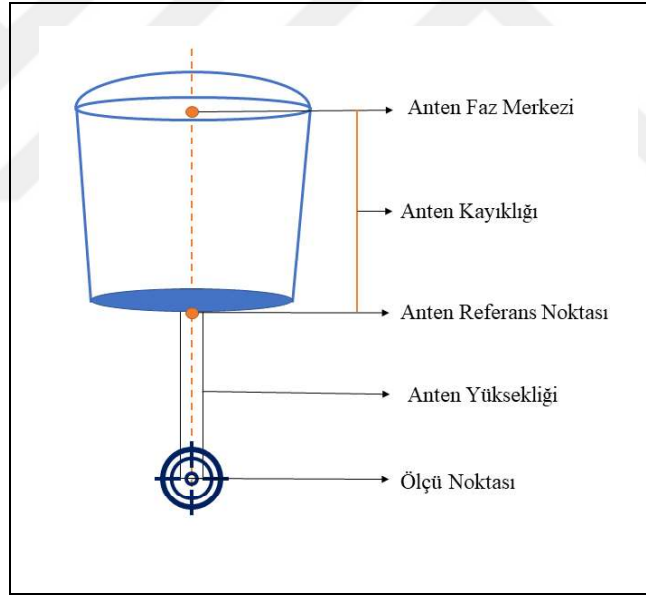
$$R = \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$r^{sat(APC)} = r^{sat(MC)} + R \cdot \Delta_{APC} \quad (3.27)$$

Burada; $r^{sat(APC)}$ uydunun faz merkezi koordinatları, Δ_{APC} uydu-sabit faz merkezi kayıklığıdır.

3.2.3. Alıcı Anteni Faz Merkezi Kayıklığı ve Değişimleri

Uydudan gelen sinyallerin alıcıdaki kayıt konumu olarak kabul edilen elektriksel faz merkezi, tam anlamıyla ulaşılabilecek bir nokta olmadığından ötürü alıcıda antenin tabanı ile dikey ekseninin kesiştiği nokta olan bir anten referans noktası (Antenna Reference Point, ARP) tanımlanmaktadır. Gelen sinyaller için yükseklik, azimut ve frekans değerleri farklı olacağından dolayı her sinyalin farklı bir elektriksel faz merkezi bulunmaktadır. Burada ortalama alınan bir elektriksel faz merkezi ile ARP arasındaki kayıklık alıcı anten faz merkezi kayıklığı (Phase Centre Offset, PCO) olarak açıklanmaktadır. Farklı marka alıcılar için ARP'ye göre lokal sistemde üç boyutlu olarak tanımlanan bu kayıklıklar, IGS anten dosyasında frekansa bağlı olarak sunulmaktadır [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. Şekil 3.4'te bir GNSS alıcı anteninin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.4: GNSS anteni yapısı.

Ek olarak ortalama elektriksel faz merkezi ile anlık faz merkezi arasında; yükseklik, azimut ve frekansa bağlı anten faz merkezi değişimlerinin (Phase Center Variations, PCV) dikkate alınması gerekir. Ayrıca antenin ARP'den noktaya olan kendi yüksekliği de göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2.4. Uydu Faz Dönmesi (Wind-Up) Etkisi

Uydular yeryüzündeki alıcılardan farklı olarak, enerji sağlayabilmek için panellerini sürekli olarak Güneş'e doğru yönlendirirler. Bu durum, uydu alıcı arasındaki geometrinin değişmesine yol açar. Uydu faz dönmesi olarak adlandırılan bu etki; maksimum seviyede bir tam dalgaya ulaşabilmektedir. Rölatif çözümlerde elimine edilebilmesine rağmen, PPP uygulamalarında dikkate alınması gerekir. Bu hatanın ihmal edilmesi konum ve saat hatasında dm seviyesinde hatalara yol açmaktadır. [Kouba, 2015]. Uydu anteni faz dönmesi etkisinin hesaplanması aşağıda formüllerle ifade edilebilir [Wu et al., 1993].

$$\Delta\Phi = \delta\phi + 2N\pi \quad (3.28)$$

$$\delta\phi = \text{sign}(\rho(\vec{d}' \times \vec{d})) \arccos\left(\frac{\vec{d}' \cdot \vec{d}}{|\vec{d}'||\vec{d}|}\right) \quad (3.29)$$

$$N = \text{int}\left[\frac{\Delta\Phi_{prev} - \delta\phi}{2\pi}\right] \quad (3.30)$$

Burada, $\Delta\Phi$ uydu faz dönme etkisi, $\Delta\Phi_{prev}$ bir önceki epoktan gelen faz dönme etkisi, N tam kısım, $\delta\phi$ dalganın kesirli kısmı, ρ uydu ile alıcı arasındaki birim vektör, $\vec{d}'$ ve $\vec{d}$ uydu ve alıcının efektif dipolleridir ve aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir.

$$\begin{aligned} d' &= \hat{a}' - \hat{\rho}(\hat{\rho} \cdot \hat{a}') - \hat{\rho} \times \hat{b}' \\ d &= \hat{a} - \hat{\rho}(\hat{\rho} \cdot \hat{a}) + \hat{\rho} \times \hat{b} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Burada, $\hat{a}'$, $\hat{b}'$ uyduya ilişkin hareketli koordinat sisteminin (satellite-fixed) birim vektörleridir ve Denklem 3.25'te belirtilen $\hat{i}$, $\hat{j}$ birim vektörleri ile aynı olmak üzere tanımlanır. $\hat{a}$, $\hat{b}$ alıcının lokal koordinat sistemindeki birim vektörleridir ve sırasıyla doğu ve kuzey yönlerini temsil ederler. N başlangıçta sıfır olarak başlatılır ve uydu

dönmesi sürekli bir hareket olduğundan her epok için hesaplanır [Subirana et al., 2013].

3.2.5. Faz Sıçraması (Cycle Slip)

GNSS taşıyıcı faz ölçülerinde, uydu ve alıcıya ilişkin donanım kaynaklı veya ölçülere bağlı çevresel koşullardan dolayı anlık sıçramalar meydana gelebilmektedir. Bu sıçramalar, PPP çözümlerinde faz ölçüleri için önemli bir hata kaynağıdır ve çözüme doğrudan etki ederler. PPP yönteminde başlangıç ölçmesine ilişkin tam sayı belirsizliği bilinmeyen olan N sabittir ve faz ölçüsü sürekli olarak kaydedilmektedir. Meydana gelebilecek bir faz sıçraması N ' in bu özelliğini kaybettirir. Bunun yanı sıra faz ölçüsündeki süreklilik özelliği de bozulur. Bundan dolayı PPP algoritmasında faz sıçraması için iki durum düşünülebilir. İlk olarak faz sıçraması olduğunda, N değeri değişir ve değişen bu N için yeni bir bilinmeyen modele ilave edilir. İkinci olarak çözüme başlamadan ön değerlendirme adımında faz sıçramalarının olduğu epokların belirlenmesi ve bu faz sıçramalarının düzeltilmesidir. Birinci yöntem yakınsama süresini olumsuz etkilemesi ve oluşabilecek faz sıçramaları sayısına göre işlemi zorlaştıracağından ikinci yöntemin seçilmesi daha uygun görülmektedir [Cai et al., 2013]. Faz sıçramalarının tespit edilip düzeltilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan en önemlilerinden biri MW (Melbourne-Wübbena) kombinasyonu ile geometriden bağımsız (Geometry-Free, GF) doğrusal kombinasyon kullanılarak yapılan TurboEdit algoritmasıdır [Blewitt, 1990]. MW doğrusal kombinasyonu geometrik ve iyonosferik etkiden bağımsız olması, gürültüsünün düşük olmasından dolayı sıçramaların belirlenmesinde etkilidir. Bu kombinasyon kullanarak wide-line tam sayı belirsizliği bilinmeyeni aşağıdaki gibi hesaplanır [Cai et al., 2013].

$$MW = \frac{f_1 \cdot \lambda_1 \Phi_1 - f_2 \cdot \lambda_2 \Phi_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 \cdot P_1 + f_2 \cdot P_2}{f_1 + f_2} \quad (3.32)$$

$$N_{WL} = \frac{MW}{\lambda_{WL}} = \Phi_1 - \Phi_2 - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{\lambda_{WL} (f_1 + f_2)} \quad (3.33)$$

$$L_4 = \lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2 \quad (3.34)$$

Burada Denklem 3.32' deki MW değeri, MW doğrusal kombinasyonunu, L_4 ise geometriden bağımsız kombinasyon olmak üzere, $\lambda_{WL} = c / (f_1 - f_2)$ ve N_{WL} sırasıyla wide-lane kombinasyonun dalga boyu ve tam sayı belirsizliği bilinmeyenidir. $\Phi_1, \Phi_2, f_1, f_2, P_1, P_2$ sırasıyla L1 ve L2 sinyalleri için taşıyıcı fazları, frekansları ve pseudorange kod ölçülerini ifade etmektedir. Eğer bir $t-1$ epogundan t epoguna geçerken bir faz sıçraması meydana gelmişse, bu yöntemle göre

$$\Delta N_1(t) - \Delta N_2(t) = N_{WL}(t-1) - N_{WL}(t) \quad (3.35)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada $\Delta N_1, \Delta N_2$ sırasıyla L1 ve L2 faz ölçülerindeki faz sıçramalarıdır. İki faz ölçüsünde aynı büyüklükte bir faz sıçraması meydana geldiğinde bu kombinasyon ile bulunması mümkün olmayacaktır. Ayrıca iki farklı ölçüde oluşabilecek sıçramayı düzeltebilmek için tek bir kombinasyon yeterli değildir. Bu yüzden ek olarak geometriden bağımsız doğrusal kombinasyonu da kullanılarak sıçramaların tespit edilip düzeltilmesi gerçekleştirilebilir. Geometriden bağımsız kombinasyon iyonosferden kaynaklı hatalardan etkilenmesinden ötürü bazı durumlarda yanlış sıçrama tespitlerine sebep olabilir. Bu kombinasyonun bir dezavantajı da sıçramalar dalga boyuyla çarpıldığından bazı sıçramalara karşı duyarsız olmasıdır. Örneğin GPS L1 sinyalinde 77 ve katlarında bir sıçrama ile GPS L2 sinyalinde 60 ve katlarında bir sıçrama olması durumunda bu kombinasyon ile tespit edilemez. Bu kombinasyon ile faz sıçraması aşağıdaki gibi araştırabilir [Subirana et al., 2013], [Romero Sánchez, 2016].

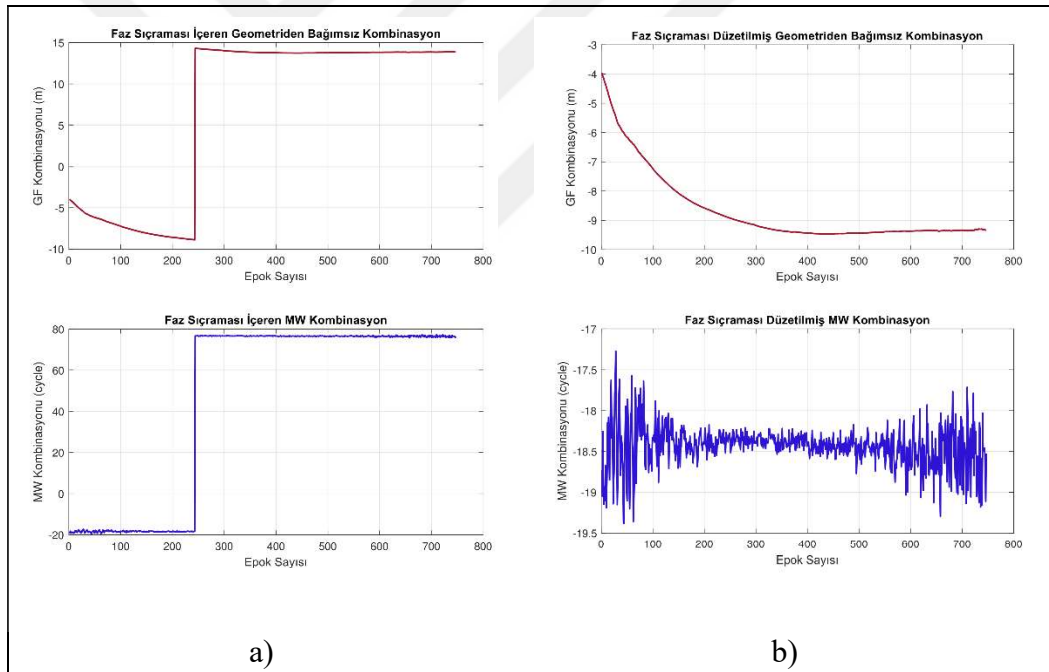
$$\begin{aligned} |L_4(t) - L_4^{predicte}(t)| &> th \\ th &= \frac{a_0}{1 + \exp(\frac{-\Delta t}{T_0})} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Burada $L_4, L_4^{predicte}$ sırasıyla t anındaki geometriden bağımsız kombinasyon, t anında ikinci dereceden bir polinom kullanılarak tahmin edilen geometriden bağımsız kombinasyon değeridir. th eşik değer, $a_0 = 0.08$ m, Δt epoklar arasındaki zaman farkı

ve $T_0 = 60$ s olarak kullanılabilir. Bu durumda faz sıçraması tespit edilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\lambda_1 \Delta N_1(t) - \lambda_2 \Delta N_2(t) = L_4(t-1) - L_4(t) \quad (3.37)$$

İki kombinasyondan elde edilen Denklem 3.35 (tam sayıya yuvarlatılarak) ve Denklem 3.37 kullanılarak sıçramalar tespit edilip düzeltilebilmektedir. Şekil 3.5'te IGS istasyonlarından NNOR istasyonunun 01.01.2019 tarihindeki verisi değerlendirilmiştir. PRN10 GPS uydusuna ait belli bir zaman aralığındaki iki farklı ölçü kombinasyonu hesaplanmıştır ve L1 sinyalinde 0, L2 sinyalinde ise 95 tam dalga olan sıçrama tespit edilmiştir. Bu örnek sonuç, tespit ve düzeltme işlemi de içererek Şekil 3.5 gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Faz Sıçramasının Düzeltilmesi: a) Faz Sıçraması düzeltilmeden önceki kombinasyonlar, b) Faz Sıçraması düzeltildikten sonraki kombinasyonlar.

3.2.6. Alıcı Saati Sıçraması Etkisi

GNSS alıcılarından uydu saatlerine kıyasla daha ucuz atomik saatler tercih edilmektedir. Bu alıcılar, saat hatasının çok büyük olmasını engellemek için GPS zamanı ile uyumlu çalışırlar. Bu belli bir algoritma yaklaşımıyla yapılır. Bunun için

bilinen iki yaklaşım söz konusudur. Bunlardan birincisi, stokastik yaklaşım olarak adlandırılabilir. Bu yaklaşımda alıcı ofseti belli bir gürültü kapsamında sürekli düzeltilir. İkincisinde ise, belli bir değeri aşması halinde kontrol edilir. Burada yaygın olarak kullanılan metotta saat hatası büyüklüğünün 1 milisaniyenin üzerine çıktığında saat sıçramasının meydana geldiği kabul edilir. 1 milisaniye ve katları şeklinde olması, ölçüleri aynı büyüklükte etkilemesi ve periyodik olması bu hata için ayırt edici özelliklerdir [Kim and Langley, 2001]. Saat sıçraması ile ortaya çıkan fark zaman etiketini, kod ve faz ölçülerini farklı şekilde etkiler. Bu etki tipleri Tablo 3.6’da gösterilmiştir [F. Guo and Zhang, 2014a].

Tablo 3.6: Saat sıçraması tipleri.

Tip	Zaman (Saat) Etiket	Kod Ölçüsü	Faz Ölçüsü
1	+	-	-
2	+	+	-
3	-	+	-
4	-	+	+

Tip 1 ve Tip 4 saat sıçramaları kod ve faz ölçüsünde aynı işarete sahip olmasından dolayı düzeltilmesine gerek yoktur. Ancak Tip 2 ve Tip 3 saat sıçramaları kod ve faz ölçüsünde farklı şekilde etkilediği için diferansiyel çözümlerde fark olarak giderilse de PPP çözümlerinden dikkate alınmalıdır. Bu etkinin nasıl giderileceği hakkında detaylı çalışma için F. Guo and Zhang kaynağından faydalanılabilir [F. Guo and Zhang, 2014a].

3.2.6. Katı Yeryuvarı Gelgiti

Katı yeryuvarı, tam anlamıyla katı değildir ve elastik bir yapıya sahiptir. Ay’ın, Güneş’in ve diğer birçok gezegenin gravite etkisine maruz kalması sebebiyle sürekli olarak bir şekil değişimine maruz kalır. Katı yeryuvarı gelgiti olarak adlandırılabilen bu değişim, alıcının konumunda yatay ve düşey değişimlere sebep olur. Sistematik olarak ele alınabilecek olan bu değişimler, küresel harmonik fonksiyonlar esas alınarak modellenebilirler (Denklem 3.38). Bu etki yatayda 5 cm ve düşeyde 30 cm seviyelerine kadar ulaşmaktadır [Kouba and Héroux, 2001], [McCarthy and Petit, 2004].

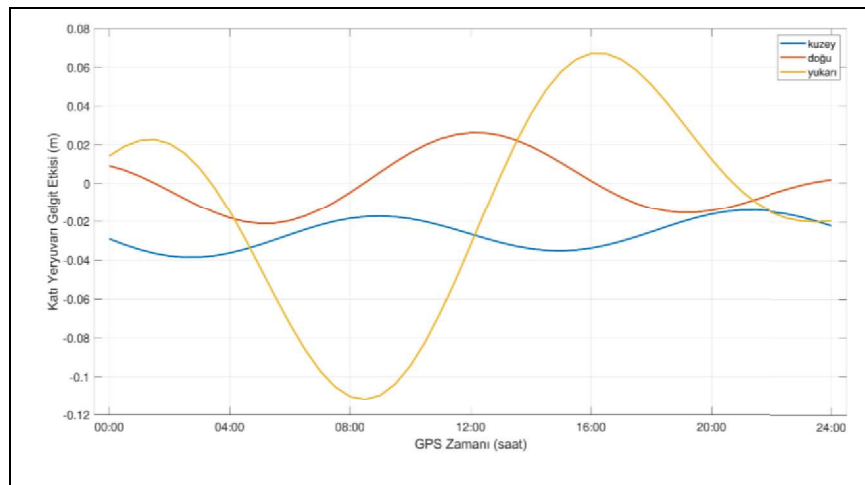
$$\Delta \vec{r}_{sol} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_E R_j^3} \left\{ h_2 \hat{r} \left(\frac{3}{2} (\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) [\hat{R}_j - (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \hat{r}] \right\} \quad (3.38)$$

- GM_j Güneş ve Ay'ın yerçekimi parametresi (j=2 için Ay, j=3 için Güneş)
- GM_E Dünya'nın yerçekimi parametresi
- $\hat{R}_j, R_j$ Jeosentrik birim vektör ve vektörün büyüklüğü (j=2 için Ay, j=3 için Güneş)
- $\hat{r}, r$ İstasyonun birim vektörü ve bu vektörün büyüklüğü
- R_e Dünya'nın ekvator yarıçapı
- h_2, l_2 Nominal ikinci derece Love ve Shida sayıları

İstasyonun enlemine (φ) bağlı olan Love ve Shida sayıları aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir. Ayrıca daha detaylı bilgi için McCarthy and Petit çalışmasından faydalanılabilir [McCarthy and Petit, 2004].

$$\begin{aligned} h_2 &= 0.6078 - 0.0006 \left[(3 \sin^2 \varphi - 1) / 2 \right] \\ l_2 &= 0.0847 + 0.0002 \left[(3 \sin^2 \varphi - 1) / 2 \right] \end{aligned} \quad (3.39)$$

Örnek olarak Şekil 3.6'da 01.02.2020 tarihinde IGS istasyonlarından biri olan TUBI istasyonuna etki eden katı yeryuvarı gelgit etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.6: TUBI istasyonu için katı yeryuvarı gelgit etkisi.

3.2.7. Okyanus Yüklemesi

Okyanuslarda oluşan gelgitlerin yerkabuğuna yapmış olduğu baskı sonucu yeryüzünde meydana gelen dolaylı etki, okyanus yüklemesi olarak açıklanmaktadır. Katı yeryuvarı gelgit etkisine benzetilebilecek olan bu etki ona kıyasla yerkabuğunda daha küçük değişimlere sebep olur ve daha yereldir. Yerel olan bu yükleme etkisi, okyanus kıyısından 1000 km ve daha uzaktaki alanlar ve 24 saatlik statik değerlendirmeler için ihmal edilebilir. Ancak okyanusa yakın bir noktalarda yapılan statik veya kinematik değerlendirmelerde bu etki göz önünde bulundurularak düzeltilmelidir [Kouba, 2015]. Bu çalışma kapsamında ele alınan veri setlerinin konumu da düşünülerek bu etki dikkate alınmamıştır.

3.2.8. Kutup Gelgiti

Dünyanın dönme eksenin yeryuvarına göre küçük hareketleri (gezinme) olan kutup hareketi, merkezkaç potansiyelinde ufak değişikliklere neden olmaktadır. Bunun sonucunda periyodik deformasyonlar meydana gelmektedir. Katı yeryuvarı gelgiti ve okyanus yüklemesi etkisinden farklı karaktere sahip olan kutup gelgiti yavaş yavaş bir değişime sahiptir ve iki aydan fazla gözlem yapıldığında dikkate alınması gerekmektedir. Yatayda yaklaşık 7 mm ve düşeyde yaklaşık 25 mm maksimum yer değiştirmeye ulaşabilmektedir [Subirana et al., 2013], [Kouba, 2015].

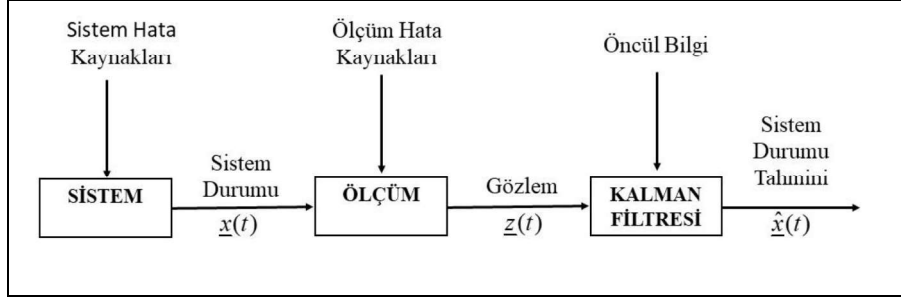
4. PPP TEKNİĞİNDE MATEMATİKSEL MODELLER

PPP tekniğinde hassas ve güvenilir sonuçlar alabilmek için Bölüm 3'te anlatılan hata kaynaklarının dikkate alınması önem arz etmektedir. Ancak bu hata kaynaklarını düzeltmek tek başına yeterli olmaz. Çünkü sonuçların tahmininde kullanılan matematiksel modellemenin de doğru tasarlanması gerekir. PPP yönteminde parametre kestiriminde, parametrelerin değişim dinamiği de göz önüne alınarak genellikle Kalman filtresi kullanılır. Kalman filtresinin performansı ölçülerin fonksiyonel ve stokastik modelleri ile parametrelerin stokastik modellemesine büyük ölçüde bağlıdır. Bu bölümde, PPP tekniğinde Kalman filtresi yöntemi ile fonksiyonel ve stokastik modellerin tezde kullanıldığı şekliyle verilmesi ve detaylarının incelenmesi amaçlanmıştır.

4.1. Kalman Filtresi

1960 yılında Rudolf Emil Kalman yayınladığı makale ile istatistiksel olarak kestirim (tahmin) alanında büyük bir keşif yapmış ve karmaşık dinamik sistemler için yıllar boyunca kullanılan ve üzerine yeni katkılar sağlamak için araştırmalar yapılmaya devam edilen filtreleme algoritmasını tanıtmıştır [Kalman, 1960], [Grewal and Andrews, 2008].

Geçmiş, şimdiki ve gelecek zaman hakkında durum tahmini sağlayan bu filtreleme tekniği bir dizi matematiksel denklemlerden oluşmaktadır. Bu teknik minimum varyanslı (varyans-kovaryans matrisinin izinin minimum olması), yansız (unbiased) ve lineerdir. Bu özellikler göz önüne alındığında çok güçlü bir değerlendirme tekniği olan Kalman filtresi en küçük kareler metodunun özel bir formasyonudur ve özyinelemeli (recursive) olarak en uygun (optimum) çözümü sağlayıp, zamana bağlı olarak uygulanmaktadır [Bierman, 1977], [Welch and Bishop, 1995]. Doğrusal bir sistemin durum vektörü, sisteme ait bir ölçüm, bu ölçümün ve sistemin hatasını tanımlayan istatistiksel model ve ilk durum bilgisi verildiğinde gerekli değerlendirmeler ile tahmin edebilmektedir. Şekil 4.1'de Kalman Filtresinin temel işleyişi gösterilmiştir. [Gelb, 1974].

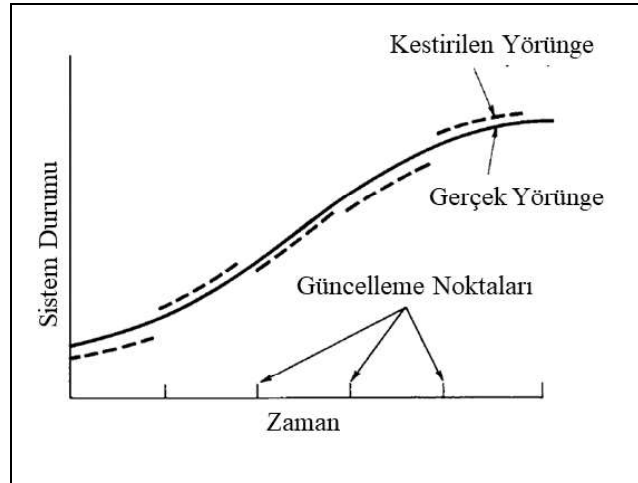


Şekil 4.1: Kalman filtresinin işleyişinin genel gösterimi.

Gürültülü bir ölçümün zaman içinde kesikli (ayrık) bir dizi olduğunu düşünen R.E. Kalman, zaman değişkenli bir durum-uzay ortamında ortaya konulan bu çoklu giriş çoklu çıkış algoritması ile özellikle ölçülerin doğrusal olmadığı navigasyon konuları için tam anlamıyla bir çıkış kapısı olmuştur. [Brown and Hwang, 2012].

4.1.1. Genişletilmiş Kalman Filtresi

Genişletilmiş Kalman Filtresi, kestirim yapılarak zamana bağlı ölçüler ile kendini sürekli güncelleyen bir filtreleme tekniğidir. Her kestirim anı için önem teşkil eden ölçüler ile filtrenin devamlılığını sağlanmaktadır ve bu işleyiş Şekil 4.2’de açık bir şekilde gösterilmektedir [Brown and Hwang, 2012].



Şekil 4.2: Genişletilmiş Kalman filtresinin genel yapısı.

Doğrusal olmayan sistemlerde uygulanan bu filtreleme tekniği ile doğrusallaştırma yapılır ve değerlendirme aşaması uygun şekilde devam eder. Modele

ve ölçülere ait genel kullanılan eşitlikler aşağıda sıralanmıştır [Welch and Bishop, 1995], [Grewal and Andrews, 2008], [Brown and Hwang, 2012].

- Doğrusal olmayan dinamik model ve ölçü modeli

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (4.1)$$

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (4.2)$$

Burada x durum vektörü, z ölçü vektörü (x ile ilişkili), f ve h doğrusal olmayan fonksiyonlar, k zaman belirteci, u deterministik fonksiyon, w ve v sırasıyla çapraz korelasyonu olmayan durum ve ölçü vektörlerine ait beyaz gürültülerdir. Bu durum ve ölçü vektörü yaklaşık olarak beyaz gürültü olmadan da değerlendirebilir.

Doğrusal olmayan uygulama eşitlikleri adımı, ilk olarak durum ve ölçü vektörlerinin prediksyon (kestirim) değerlerinin hesabı verilmektedir.

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, 0) \quad (4.3)$$

$$\hat{z}_k^- = h(\hat{x}_k^-) \quad (4.4)$$

Burada $\hat{x}_{k-1}$ $k-1$ zamanında filtrelenmiş durum vektörü $\hat{x}_k^-$ k zamanına predikte edilmiş durum vektörü, $\hat{z}_k^-$ k zamanında $\hat{x}_k^-$ durum vektörüne göre elde edilen ölçü vektörüdür. Ardından doğrusal yaklaşım ile Φ_{k-1} ve A_k dönüşüm ve katsayılar (dizayn) matrisi aşağıda verilen eşitliklerle bulunabilir.

$$\Phi_{k-1} \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{k-1}^-} \quad A_k \approx \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k^-} \quad (4.5)$$

- Predikte edilmiş kovaryans matrisinin hesabı

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (4.6)$$

- Kalman Kazanç (Gain) matrisinin hesabı

$$K_k = P_k^- A_k^T (A_k P_k^- A_k^T + R_k)^{-1} \quad (4.7)$$

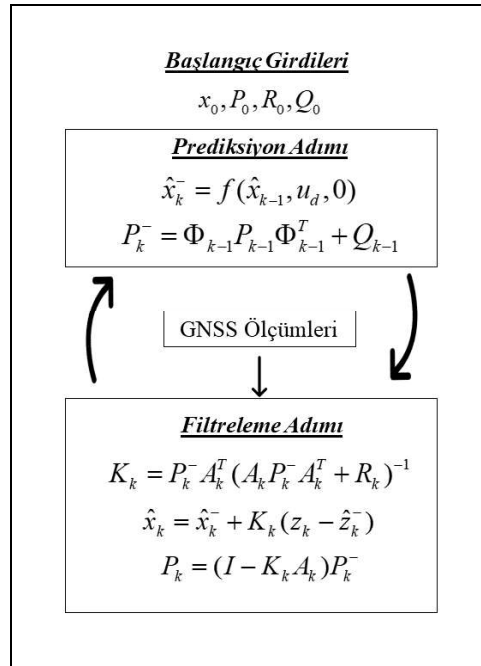
- Filtrelenmiş durum vektörünün hesabı

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{z}_k^-) \quad (4.8)$$

- Kestirilmiş durum vektörünün kovaryans matrisinin hesabı

$$P_k = (I - K_k A_k) P_k^- \quad (4.9)$$

Burada P_k^- k zamanındaki predikte edilmiş durum vektörünün kovaryans matrisi, P_k k zamanındaki filtrelenmiş kovaryans matrisi, R_k k zamanında ölçülerin gürültü kovaryans matrisi ve Q_{k-1} $k-1$ zamanında sistem gürültüsünün kovaryans matrisidir. Filtrenin işleyişi daha açık olarak Şekil 4.3'te özetlenmiştir [Witchayangkoon, 2000].

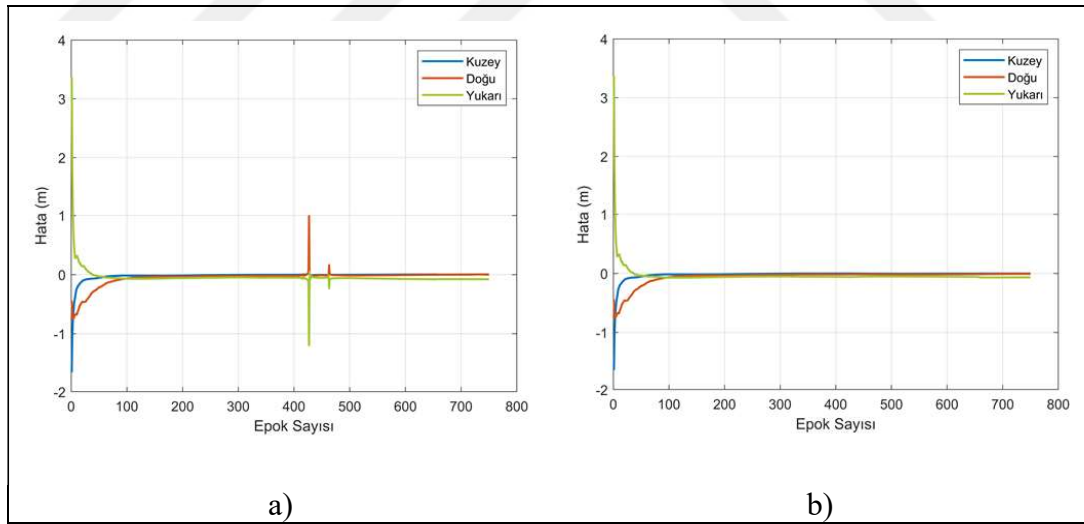


Şekil 4.3: Genişletilmiş Kalman filtresi denklemleri ve adımları.

P matrisi simetrik ve pozitif-tanımlıdır. Bu özelliği korumak amacıyla matematiksel tedbirlerin alınması şarttır. Aksi halde beklenmedik filtre performansının görülebilme olasılığı vardır. Bu sebeple bazı durumlarda P güncelleme matrisinin sadece simetrik formunu kullanmak olumsuz sonuçların önüne geçebilir [Brown and Hwang, 2012]. Bunun için yeni bir formda P matrisi hesaplanır ve bu forma Joseph Formu denilir.

$$P_k = (I - K_k A_k) P_k^- (I - K_k A_k)^T + K_k R K_k^T \quad (4.10)$$

Ancak bazen bu da işe yaramayabilir. Bu tez çalışmasında Joseph Formu uygulandıktan sonra da bazı durumlarda filtre performansının kötü olduğu sonuçlar alındı. Değerlendirmeler sonucu filtrelenmiş P matrisinin bazı varyans değerlerinin negatif çıktığı, pozitif tanımlı olmadığı görülmüştür. Algoritma işleme adımlarında yuvarlama hatasının buna sebep olacağı bazı kaynaklarda belirtilmiştir [Bierman, 1977], [Brown and Hwang, 2012]. Bunun için P matrisi Cholesky Ayırıştırma tekniğiyle yeniden oluşturularak bu sorunun önüne geçilmiştir. Şekil 4.4'te bu durumu anlatan bir PPP çözümü verilmiştir.



Şekil 4.4: a) Cholesky Ayırıştırma tekniği uygulanmamış PPP çözümü, b) Cholesky Ayırıştırma tekniği uygulanmış PPP çözümü.

4.1.2. Uyarlı Robust Kalman Filtreleme Tekniği

PPP uygulamalarında konum, hız ve diğer parametreleri kestirebilmek için kullanılan en ideal yöntem Kalman filtreleme yöntemidir. Ancak, bu filtreleme

teknikinden elde edilecek çözümün kalitesi birçok faktörden etkilenmektedir. Genişletilmiş Kalman Filtreleme tekniği, ilk belirsizliğin ve adım adım gidilen ölçümlerdeki hataların büyük olması veya olağandışı durumlardan oldukça etkilenmektedir ve bu da sonuçların ıraksamasına sebep olmaktadır [Brown and Hwang, 2012]. Ön değerlendirme aşamasında giderilebilecek tüm sistematik hatalar, atılacak tüm uyumsuz ölçüler ve uygulanabilecek tüm modeller yapılmış olsa da sistemde hala birtakım modellenemeyen veya atılamayan hatalı ölçülerin bulunabilmesi olağandır. Sistem gürültüsü, değerlendirme için öncül bilgiler, gözlemlerin öncül varyans değerlerinin doğruluğu da önemli parametrelerdendir. Filtreden gelecek konumun doğruluğu ve yakınsama süresi bu koşullardan etkilenecektir. Yani bir başka deyişle hem gözlemlerdeki hem de dinamik modeldeki hataların sonuçlara olumsuz şekilde yansması beklenir. [F. Guo and Zhang, 2014b], [Zhang et al., 2018]. Statik ve kinematik PPP çalışmalarında, dinamik ve gözlem modellerindeki hatalara karşı koyabilmek adına robust istatistik teknikleri kullanılarak, Uyarlı Robust Kalman Filtreleme (Adaptive Robust Kalman Filtering) tekniği geliştirilmiştir. Genişletilmiş Kalman filtresinde, ölçülere ait varyans (ölçüler arası korelasyon: 0) değerleri sabit kaldığı esas alınır. Uyarlı Robust Kalman filtresinde ise hem bu ölçülerin varyans değerleri düzeltme değerlerine göre yeniden oluşturularak eşdeğer bir varyans kovaryans matrisi oluşturulur hem de belli bir uyar faktörüne göre Kazanç matrisini yeniden elde edilir [F. Guo and Zhang, 2014b].

- Uyar Faktörü (α_k) Fonksiyonel Modeli

$$\alpha_k = \begin{cases} 1 & |\bar{V}_{k,k-1}| \leq c_0 \\ \frac{c_0}{|\bar{V}_{k,k-1}|} \left(\frac{c_1 - |\bar{V}_{k,k-1}|}{c_1 - c_0} \right)^2 & c_0 < |\bar{V}_{k,k-1}| \leq c_1 \\ 0 & |\bar{V}_{k,k-1}| > c_1 \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\bar{V}_{k,k-1} = \frac{d^T d}{\sqrt{\text{tr}(Q_{dd})}} \quad (4.12)$$

Burada d öncül düzeltme vektörü (inovasyon), Q_{dd} onun kovaryans matrisi, $\bar{V}_{k,k-1}$ inovasyon vektörüne bağlı istatistiksel değer, c_0 ve c_1 kıyas değerleridir. Bu kıyas değerleri genellikle $c_0 = 1.5 \sim 3$ ve $c_1 = 3 \sim 8$ arasında değişmektedir. Buradan yeni kazanç matrisi Denklem 4.13'teki gibi oluşturulur.

$$\bar{K}_k = \frac{1}{\alpha_k} P_k^- A_k^T \left(\frac{1}{\alpha_k} A_k P_k^- A_k^T + \bar{R}_k \right)^{-1} \quad (4.13)$$

- Robust Eşdeğer Ağırlık Fonksiyon Modeli

Ölçümlerin ağırlık değerlerini içerdikleri hata miktarına göre uygun şekilde belirlemek için kullanılan fonksiyonların başında IGG (Institute of Geodesy and Geophysics) III fonksiyonu gelmektedir [Y. Yang et al., 2002].

$$\bar{R}_k = R_k \cdot \bar{P} \quad (4.14)$$

Burada $\bar{R}_k$ eşdeğer kovaryans matrisi, $\bar{P}$ IGG-III ağırlık fonksiyonunda elde edilen köşegen ağırlık matrisidir. $\bar{P}$ matrisinin köşegen elemanları olan P_i değerleri Denklem 4.15'teki gibi hesaplanır [Zhang et al., 2018].

$$P_i = \begin{cases} 1 & |\bar{v}_i| \leq k_0 \\ \frac{|\bar{v}_i|}{k_0} \left(\frac{k_1 - k_0}{k_1 - |\bar{v}_i|} \right)^2 & k_0 < |\bar{v}_i| \leq k_1 \\ \infty & |\bar{v}_i| > k_1 \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\bar{v}_i = \frac{v_i}{\sqrt{\hat{\sigma}_0^2 Q_{vi}}} \quad (4.16)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{d^T Q_{dd}^{-1} d}{n} \quad (4.17)$$

Burada $\bar{v}_i$ standartlaştırılmış düzeltme, v_i , Q_{vi} ölçülerin düzeltilmesi ve varyans değeri, $\hat{\sigma}_0^2$ birim ağırlıklı ölçünün varyans değeri, n ölçü sayısıdır k_0 ve k_1 kıyas değerleridir. Bu kıyas değerleri genellikle $k_0 = 1.0 \sim 2.5$ ve $k_1 = 3.5 \sim 8$ arasında değişmektedir. Ek olarak d ve Q_{dd} değerleri

$$d = z_k - h(\hat{x}_k^-) \quad (4.18)$$

$$Q_{dd} = R_k + A_k P_k^- A_k^T \quad (4.19)$$

eşitlikleriyle hesaplanabilir.

4.2. Çoklu-GNSS PPP Fonksiyonel Modeli

MGEX projesinin başlamasıyla Dünya genelinde IGS istasyonlarında GPS, GLONASS sistemlerinin yanına diğer uydu sistemleri de (Galileo, BeiDou, QZSS, NavIC) entegre olmuştur. Bu uydu sistemlerinin hem performansı hem de çalışmalara katkısı birçok uygulama alanında ilgi çekici olmuştur [Montenbruck et al., 2017]. Bu uygulama alanlarından bir tanesi de doğal olarak PPP yöntemidir. Son yıllarda uydu sistemlerinin tekli olarak PPP performansı ve ayrıca birbirleriyle farklı kombinasyonlarının performansı güncel bir çalışma alanıdır. Çoklu-GNSS PPP kod ve faz ölçüsü modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_{f,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + cdt_r^s - cdT^{s,j} + Tr^{s,j} + I_f^{s,j} + b_{f,r}^s - b_f^{s,j} + \varepsilon_{P_{f,r}^{s,j}} \quad (4.20)$$

$$L_{f,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + cdt_r^s - cdT^{s,j} + Tr^{s,j} - I_f^{s,j} + \lambda_f^s N_{f,r}^{s,j} + B_{f,r}^s - B_f^{s,j} + \varepsilon_{L_{f,r}^{s,j}} \quad (4.21)$$

- $P_{f,r}^{s,j}, L_{f,r}^{s,j}$ Kod ve faz ölçüleri (m)
- s Uydu Sistemi (G : GPS, R : GLONASS, E : Galileo, C : BeiDou)
- j Uydu numarası
- r Alıcı
- f Navigasyon sinyalinin frekansı

- $\rho_r^{s,j}$ Uydu ile alıcı anteni arasındaki geometrik mesafe (m)
- dt_r^s Alıcı saat hatası (s)
- $dT^{s,j}$ Uydu saat hatası (s)
- $T_r^{s,j}$ Uydu ile alıcı arasındaki eğik troposferik gecikme (m)
- $I_f^{s,j}$ Uydu ile alıcı arasındaki birinci dereceden iyonosferik gecikme (m)
- $b_{f,r}^s, b_f^{s,j}$ Alıcı ve uydu için donanım kaynaklı kod hatası (m)
- $B_{f,r}^s, B_f^{s,j}$ Alıcı ve uydu için donanım kaynaklı faz hatası (m)
- λ_f^s İlgili frekanstaki taşıyıcı dalga boyu (m)
- $N_f^{s,j}$ İlgili frekanstaki taşıyıcı tam sayı belirsizliği (cycle)
- $\varepsilon_{P_{f,r}^{s,j}}, \varepsilon_{L_{f,r}^{s,j}}$ Çok yolluluk etkisini de içeren kod ve faz ölçüleri için gürültü (m)
- c Işık hızı (m/s)

Denklem 4.20 ve Denklem 4.21’de verilen ölçü modelinde yer almayan ama düzeltilmesi gereken PPP için mutlak önem arz eden hata kaynakları olan katı yeryuvarı gelgiti, alıcı anten faz merkezi kayıklığı, değişimleri ve anten boyu, uydu anteni faz merkezi ve değişimleri, uydu faz dönmesi, görelilik etkisi, okyanus yüklemesi ve kutup gelgiti hatalarının ölçü denklemlerinde düzeltildiği varsayılmaktadır. Çift frekanslı bir alıcı için kod ve faz ölçülerinin iyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{IF}^j = \alpha_{IF} P_1^j + \beta_{IF} P_2^j \quad (4.22)$$

$$L_{IF}^j = \alpha_{IF} L_1^j + \beta_{IF} L_2^j \quad (4.23)$$

$$\alpha_{IF} = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \quad \beta_{IF} = \frac{-f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \quad (4.24)$$

Burada P_{IF}^j iyonosferden bağımsız kod ölçüsü, L_{IF}^j iyonosferden bağımsız faz ölçüsü, f_1 , L_1 sinyalinin frekansı, f_2 , L_2 sinyalinin frekansıdır. Bu kombinasyonda birinci dereceden iyonosferik etkinin kalkmasına karşın, kombinasyonla elde edilen gözlem

eşitliği için standart sapma önemli ölçüde büyükmektedir. Bir ölçünün standart sapması σ olduğu düşünöldüğünde iyonosferden bağımsız kombinasyondan sonraki standart sapması σ_{IF} Denklem 4.25'teki gibi hesaplanır [Hauschild, 2017].

$$\sigma_{IF} = \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}} \sigma \quad (4.25)$$

Genel ölçü denklemlerini iyonosferden bağımsız ölçü olarak yeniden yazarsak

$$P_{IF,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + cd\tilde{t}_r^s - cd\tilde{T}^{s,j} + Tr^{s,j} + \varepsilon_{P_{IF,r}^{s,j}} \quad (4.26)$$

$$L_{IF,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + cd\tilde{t}_r^s - cd\tilde{T}^{s,j} + Tr^{s,j} + \lambda_{IF}^s \tilde{N}_{IF}^{s,j} + \varepsilon_{L_{IF,r}^{s,j}} \quad (4.27)$$

Bu iki denklemde bulunan $cd\tilde{t}_r^s$ ve $cd\tilde{T}^{s,j}$ terimleri düzenlenmiş alıcı saat hatası ve uydu saat hatası olarak tanımlanmaktadır ve Denklem 4.28 ve 4.29'daki gibi ifade edilebilir. $cd\tilde{T}^{s,j}$ IGS tarafından sağlanan hassas saat ürünlerinde mevcuttur ve bu şekilde modellenerek kullanılabilir. $cd\tilde{t}_r^s$ ise PPP uygulamalarında bilinmeyen olarak kestirilir. Ek olarak $\lambda_{IF}^s \tilde{N}_{IF}^{s,j}$ belirsizlik parametresi Denklem 4.30'da göröldüğü üzere uydu ve alıcının donanım kaynaklı kod ve faz hatalarını içinde bulunduracak şekilde yazılır ve tam sayı özelliğini kaybederek geleneksel çözümlerde ondalık (reel) sayı olarak kestirilir [Shi and Gao, 2014].

$$cd\tilde{t}_r^s = cd\tilde{t}_r^s + b_{IF,r}^s \quad (4.28)$$

$$cd\tilde{T}^{s,j} = cd\tilde{T}^{s,j} + b_{IF}^{s,j} \quad (4.29)$$

$$\lambda_{IF}^s \tilde{N}_{IF}^{s,j} = \lambda_{IF}^s N_{IF}^{s,j} + (B_{IF,r}^s - b_{IF,r}^s) - (B_{IF}^{s,j} - b_{IF}^{s,j}) \quad (4.30)$$

Uydu donanım hataları hassas ürünler ile düzeltildiğinden, sadece alıcı donanım hatalarının dikkate alınması yaklaşımı yeterli olacaktır. Uydu sistemleri arasında GLONASS sinyal yapısı diğerlerinden daha farklıdır. Bu durum Bölüm 2'de

açıklanmıştır. GLONASS, yeni sinyalleri ile CDMA tekniğini kullanmaya başlamış olmasına rağmen yine de birçok uydu sinyalinde FDMA sinyal tekniği devam ettiğinden, her uydusu için farklı bir frekans üretmektedir [Revnivkyh et al., 2017]. Bunun sonucunda GLONASS alıcı kanallarında farklı donanım kaynaklı hatalar meydana gelmektedir ve bu sebepten ötürü donanım kaynaklı hatalar ortalama bir terim ve uyduya bağlı hata terimi şeklinde yazılır [Cai and Gao, 2013].

$$b_{f,r}^R = b_{f,avg}^R + \delta b_{f,r}^R \quad (4.31)$$

$$B_i^R = B_{f,avg}^R + \delta B_{f,r}^R \quad (4.32)$$

$$cd\tilde{t}_r^R = cdt_r^R + b_{IF,avg}^R \quad (4.33)$$

$$\lambda_{IF}^R \tilde{N}_{IF}^{R,j} = \lambda_{IF}^R N_{IF}^{R,j} + (B_{IF,avg}^R + \delta B_{IF,r}^R - b_{IF,avg}^R) - (B_{IF}^{R,j} - b_{IF}^{R,j}) \quad (4.34)$$

Burada $b_{f,avg}^R$ ve $\delta b_{f,r}^R$ sırasıyla kod ölçüleri için ortalama terim ve uyduya bağlı frekanslar arası hata (Inter-Frequency Bias, IFB), $B_{f,avg}^R$ ve $\delta B_{f,r}^R$ sırasıyla faz ölçüleri için ortalama terim ve uyduya bağlı frekanslar arası hata olarak tanımlanmaktadır. Alt indis olan f 'nin IF olması iyonosferden bağımsız ölçü olduğunu göstermektedir. Faz ölçülerindeki B_i^R terimi ve $b_{IF,avg}^R$ terimi tam sayı belirsizlik parametresine, $b_{f,avg}^R$ terimi alıcı saat hatasına eklenir. Kod ölçülerinde ise $b_{f,avg}^R$ terimi alıcı saat hatasına eklenirken $\delta b_{f,r}^R$ frekanslar arası hata terimi denklemde bilinmeyen olarak kalmaktadır. PPP uygulamalarında frekanslar arası kod hatası, her bir GLONASS uydusu için farklı bir bilinmeyen olarak kestirilmesi bir çözüm yoludur. Ancak genel dengeleme modeli düşünüldüğünde çok fazla bilinmeyen sayısı oluşacağından serbestlik derecesi hayli küçülecektir. Bu durum modelin performansını zayıflatır. Bu yüzden GLONASS kod gözlemlerine faz gözlemlerine kıyasla daha küçük ağırlık verilerek bu terim sistem için ihmal edilebilir duruma getirilir. Ancak bu terimin göz ardı edilmesinin neticesi olarak, çözüm sonucunda GLONASS kod ölçülerinin düzeltme değerlerinin daha büyük gelmesi beklenir. [Cai and Gao, 2013].

Denkleimde bulunan $Tr^{s,j}$ troposferik gecikme, hata kaynakları bölümünde anlatıldığı üzere iki bölümden oluşur (Denklem 3.10). Hidrostatik kısım uygun model ile hesaplanıp modele düzeltme olarak verilmektedir. Ancak ıslak kısım karakteri itibariyle sürekli bir değişkenlik göstermektedir. Bu sebepten dolayı zenit ıslak gecikmesi ZWD izdüşüm fonksiyonuna bağlı olarak modelde kestirilmektedir.

Modelde bulunan $cd\tilde{t}_r^s$ alıcı saat hatası her sistem için farklı olarak tanımlanmasının yerine referans bir sistem zamanının alınması daha ideal bir çözüm olarak görülmektedir. Referans saate göre sistemler arası hata (Inter-System Bias, ISB), GPS alıcı saati referans olarak alındığında aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir [J. Chen et al., 2015].

$$ISB_G^{sys} = cd\tilde{t}_{sys} - cd\tilde{t}_G \quad (4.35)$$

Burada ISB_G^{sys} GPS referans alındığında diğer sistemler ile arasındaki hata, sys indisi GPS haricindeki diğer sistemlerdir. Bu açıklamalar göz önüne alındığında kod ve faz ölçülerinin tüm sistemler için ölçü denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$GPS \quad \begin{cases} P_{IF,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + cd\tilde{t}_r^G + ZWD \cdot m_w(e)^{G,j} + \varepsilon_{P_{IF,r}^{G,j}} \\ L_{IF,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + cd\tilde{t}_r^G + ZWD \cdot m_w(e)^{G,j} + \lambda_{IF}^G \tilde{N}_{IF}^{G,j} + \varepsilon_{L_{IF,r}^{G,j}} \end{cases} \quad (4.36)$$

$$GLONASS \quad \begin{cases} P_{IF,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + cd\tilde{t}_r^G + ISB_G^R + ZWD \cdot m_w(e)^{R,j} + \varepsilon_{P_{IF,r}^{R,j}} \\ L_{IF,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + cd\tilde{t}_r^G + ISB_G^R + ZWD \cdot m_w(e)^{R,j} + \lambda_{IF}^R \tilde{N}_{IF}^{R,j} + \varepsilon_{L_{IF,r}^{R,j}} \end{cases} \quad (4.37)$$

$$Galileo \quad \begin{cases} P_{IF,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + cd\tilde{t}_r^G + ISB_G^E + ZWD \cdot m_w(e)^{E,j} + \varepsilon_{P_{IF,r}^{E,j}} \\ L_{IF,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + cd\tilde{t}_r^G + ISB_G^E + ZWD \cdot m_w(e)^{E,j} + \lambda_{IF}^E \tilde{N}_{IF}^{E,j} + \varepsilon_{L_{IF,r}^{E,j}} \end{cases} \quad (4.38)$$

$$BeiDou \quad \begin{cases} P_{IF,r}^{C,j} = \rho_r^{C,j} + cd\tilde{t}_r^G + ISB_G^C + ZWD \cdot m_w(e)^{C,j} + \varepsilon_{P_{IF,r}^{C,j}} \\ L_{IF,r}^{C,j} = \rho_r^{C,j} + cd\tilde{t}_r^G + ISB_G^C + ZWD \cdot m_w(e)^{C,j} + \lambda_{IF}^C \tilde{N}_{IF}^{C,j} + \varepsilon_{L_{IF,r}^{C,j}} \end{cases} \quad (4.39)$$

Burada ISB_G^R , ISB_G^E , ISB_G^C sırasıyla GLONASS, Galileo ve BeiDou sistemlerinin GPS sistem zamanına göre farklarıdır. Model son durumu itibariyle doğrusal değildir ve doğrusallaştırılması gerekmektedir. Alıcının yaklaşık koordinatları kullanılarak doğrusallaştırma sonucunda model artık bilinmeyenlerin hesaplanması için tam anlamıyla hazır hale gelir.

$$\rho_r^{s,j} = \sqrt{(X^{s,j} - X_r)^2 + (Y^{s,j} - Y_r)^2 + (Z^{s,j} - Z_r)^2} \quad (4.40)$$

$$\rho_r^{s,j} = \rho_{r,0}^{s,j} - \frac{X^{s,j} - X_{r,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}} \Delta X - \frac{Y^{s,j} - Y_{r,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}} \Delta Y - \frac{Z^{s,j} - Z_{r,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}} \Delta Z \quad (4.41)$$

Burada $\rho_{r,0}^{s,j}$ uydu ile alıcı arasındaki yaklaşık geometrik mesafe, $X^{s,j}, Y^{s,j}, Z^{s,j}$ uydunun koordinatları, $X_{r,0}, Y_{r,0}, Z_{r,0}$ alıcının yaklaşık koordinatları, X_r, Y_r, Z_r alıcının kesin koordinatları $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ alıcı koordinatları için bilinmeyenlerdir.

Ölçü denklemleri doğrusallaştırıldıktan sonra X bilinmeyen parametreleri aşağıdaki vektör ile ifade edilir.

$$X = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z \ cd\tilde{t}_r^G \ ISB_G^R \ ISB_G^E \ ISB_G^C \ ZWD \ \lambda_{IF}^G \tilde{N}_{IF}^{G,j} \ \dots \ \lambda_{IF}^R \tilde{N}_{IF}^{R,j} \ \dots \ \lambda_{IF}^E \tilde{N}_{IF}^{E,j} \ \dots \ \lambda_{IF}^C \tilde{N}_{IF}^{C,j} \ \dots] \quad (4.42)$$

Tüm sistemlerin ele alındığında n tane kod ölçüsü ve n tane faz ölçüsünden toplam $2n$ ölçünün olduğu varsayalım. Bu durumda serbestlik derecesi için bilinmeyen hesabı 3 koordinat bilinmeyi, 1 tane zenit ıslak gecikme, s tane sistem için s tane saat bilinmeyi ve n tane tam sayı belirsizlik parametresi olur. Buradan serbestlik derecesi

$$f = 2n - (3 + 1 + s + n) \quad (4.43)$$

şeklinde hesaplanır. Ölçü denklemleri Taylor serisi ile lineerleştirilirse; serinin lineer terimleri ölçü denklemleri için aşağıdaki gibi parametrelere karşın birinci türevler alınmak suretiyle elde edilir ve bu sonucunda kestirim için önem teşkil eden A katsayılar matrisi oluşturulur.

- Koordinat Bilinmeyenleri İçin Kısmi Türev:

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial \Delta X_r} = -\frac{X^{s,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}}; \quad \frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial \Delta Y_r} = -\frac{Y^{s,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}}; \quad \frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial \Delta Z_r} = -\frac{Z^{s,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}} \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial \Delta X_r} = -\frac{X^{s,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}}; \quad \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial \Delta Y_r} = -\frac{Y^{s,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}}; \quad \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial \Delta Z_r} = -\frac{Z^{s,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{s,j}} \quad (4.45)$$

- GPS alıcı saat hatası ve sistemler arası hatalar için kısmi türev

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial \tilde{cdt}_r^G} = 1; \quad \text{eğer } s = s \quad \frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial ISB_G^s} = 1; \quad s \neq s \quad \frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial ISB_G^s} = 0; \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial \tilde{cdt}_r^G} = 1; \quad \text{eğer } s = s \quad \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial ISB_G^s} = 1; \quad s \neq s \quad \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial ISB_G^s} = 0; \quad (4.46)$$

- Troposferik gecikme için kısmi türev

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial ZWD} = m_w(e)^{s,j} \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial ZWD} = m_w(e)^{s,j} \quad (4.48)$$

- Tam sayı bilinmeyenleri için kısmi türev

$$\text{eğer } s = s \quad \frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial \lambda_{IF}^s \tilde{N}_{IF}^{s,j}} = 0; \quad s \neq s \quad \frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial \lambda_{IF}^s \tilde{N}_{IF}^{s,j}} = 0; \quad (4.49)$$

$$\text{eğer } s = s \quad \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial \lambda_{IF}^s \tilde{N}_{IF}^{s,j}} = 1; \quad s \neq s \quad \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial \lambda_{IF}^s \tilde{N}_{IF}^{s,j}} = 0; \quad (4.50)$$

Tüm bu durumlar ışığında A katsayılar matrisi aşağıdaki gibi yazılır.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{X^{G,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{G,j}} - \frac{Y^{G,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{G,j}} - \frac{Z^{G,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{G,j}} & 1 & 0 & 0 & 0 & m_w(e)^{G,j} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \frac{X^{G,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{G,j}} - \frac{Y^{G,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{G,j}} - \frac{Z^{G,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{G,j}} & 1 & 0 & 0 & 0 & m_w(e)^{G,j} & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X^{R,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{R,j}} - \frac{Y^{R,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{R,j}} - \frac{Z^{R,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{R,j}} & 1 & 1 & 0 & 0 & m_w(e)^{R,j} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \frac{X^{R,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{R,j}} - \frac{Y^{R,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{R,j}} - \frac{Z^{R,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{R,j}} & 1 & 1 & 0 & 0 & m_w(e)^{R,j} & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X^{E,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{E,j}} - \frac{Y^{E,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{E,j}} - \frac{Z^{E,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{E,j}} & 1 & 0 & 1 & 0 & m_w(e)^{E,j} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \frac{X^{E,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{E,j}} - \frac{Y^{E,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{E,j}} - \frac{Z^{E,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{E,j}} & 1 & 0 & 1 & 0 & m_w(e)^{E,j} & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X^{C,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{C,j}} - \frac{Y^{C,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{C,j}} - \frac{Z^{C,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{C,j}} & 1 & 0 & 0 & 1 & m_w(e)^{C,j} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \frac{X^{C,j} - X_{R,0}}{\rho_{r,0}^{C,j}} - \frac{Y^{C,j} - Y_{R,0}}{\rho_{r,0}^{C,j}} - \frac{Z^{C,j} - Z_{R,0}}{\rho_{r,0}^{C,j}} & 1 & 0 & 0 & 1 & m_w(e)^{C,j} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

4.3. Çoklu-GNSS PPP Stokastik Modeli

4.3.1. Ölçülerin Stokastik Modeli

Ölçülerin modellenmesinden sonra dengeleme prosedürünün en önemli adımlarından olan stokastik modelin belirlenmesi uygulamanın performansı açısından büyük önem teşkil etmektedir. Modelde hangi ölçünün hangi ağırlıkla işleme katılacağı bu modelleme ile belirlenir. Ancak öncelikli olarak kod ve faz ölçülerinin standart sapmalarının iyonosferden bağımsız kombinasyon ile artacağı beklenen bir durumdur. Bu durum hata yayılma kuralı ile aşağıdaki denklemle açıklanabilir [Cai and Gao, 2013].

$$\sigma_{P_{IF,r}^s}^2 = \left(\frac{(f_1^s)^2}{(f_1^s)^2 - (f_2^s)^2} \right) \sigma_{P_{1,r}^s}^2 + \left(\frac{(f_2^s)^2}{(f_1^s)^2 - (f_2^s)^2} \right) \sigma_{P_{2,r}^s}^2 \quad (4.52)$$

$$\sigma_{L_{IF,r}^s}^2 = \left(\frac{(f_1^s)^2}{(f_1^s)^2 - (f_2^s)^2} \right) \sigma_{L_{1,r}^s}^2 + \left(\frac{(f_2^s)^2}{(f_1^s)^2 - (f_2^s)^2} \right) \sigma_{L_{2,r}^s}^2 \quad (4.53)$$

Burada $\sigma_{P_{IF,r}^s}^2$ ve $\sigma_{L_{IF,r}^s}^2$ sırasıyla iyonosferden bağımsız kod ve faz ölçülerinin varyans değerleri, $\sigma_{P_{1,r}^s}^2$, $\sigma_{P_{2,r}^s}^2$, $\sigma_{L_{1,r}^s}^2$, $\sigma_{L_{2,r}^s}^2$ sırasıyla L_1 sinyali ve L_2 sinyaline ait kod ve faz ölçülerinin varyans değerleridir. Uydudan alıcıya gelen sinyaller çok yolluluk ve gürültü açısında incelendiğinde uydunun yükseklik açısı ile doğrudan ilişkilidir. Yükseklik açısı azaldığında sinyaldeki çok yolluluk etkisi artacağı ve ölçünün kalitesinin azalacağı öngörülmektedir. Bu yüzden uydunun yükseklik açısına bağlı olarak ölçülerin varyans değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma_P^2 = \begin{cases} \frac{\sigma_{P,0}^2}{\sin(e)} & e > \beta \\ \frac{\sigma_{P,0}^2}{\sin^2(e)} & e < \beta \end{cases} ; \sigma_L^2 = \begin{cases} \frac{\sigma_{L,0}^2}{\sin(e)} & e > \beta \\ \frac{\sigma_{L,0}^2}{\sin^2(e)} & e < \beta \end{cases} \quad (4.54)$$

Burada $\sigma_{P,0}^2$, $\sigma_{L,0}^2$ kod ve faz ölçülerinin öncül varyans değerleridir, e uydu yükseklik açısı, β ise sınır değerdir ve genellikle 30° olarak alınır [Witchayangkoon, 2000].

$$R = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{P_{IF,r}^G}^2 & 0 & \dots \\ 0 & \sigma_{L_{IF,r}^G}^2 & \dots \\ \dots & \dots & \ddots \end{bmatrix} & & & \\ & \begin{bmatrix} \sigma_{P_{IF,r}^R}^2 & 0 & \dots \\ 0 & \sigma_{L_{IF,r}^R}^2 & \dots \\ \dots & \dots & \ddots \end{bmatrix} & & \\ & & \begin{bmatrix} \sigma_{P_{IF,r}^E}^2 & 0 & \dots \\ 0 & \sigma_{L_{IF,r}^E}^2 & \dots \\ \dots & \dots & \ddots \end{bmatrix} & \\ & & & \begin{bmatrix} \sigma_{P_{IF,r}^C}^2 & 0 & \dots \\ 0 & \sigma_{L_{IF,r}^C}^2 & \dots \\ \dots & \dots & \ddots \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Kod ölçülerinin kendi aralarında, faz ölçülerinin kendi aralarında ve kod-faz ölçülerinin arasında korelasyon olmadığı varsayıldığında ölçülerin varyans-kovaryans matrisi köşegen matris olarak Denklem 4.55'teki gibi yazılır.

4.3.2. Parametrelerin Stokastik Modeli

Daha önceki bölümde anlatıldığı üzere Kalman filtresinin uygulanabilmesi için hem öncül bilgilere hem de epoklardaki ölçülere ihtiyaç vardır. Bu öncül bilgiler; durum vektörü için başlangıç değeri, ölçülere ait kovaryans matrisi, durum vektörüne ait kovaryans matrisidir. 3 tane koordinat bileşeni, bir tane GPS alıcı saat hatası, toplam kullanılan sistem sayısının bir eksiği kadar sistemler arası hata, 1 tane zenit ıslak gecikme ve tüm sistemlere ait toplam faz ölçüsü kadar tam sayı bilinmeyişi içeren durum vektörü Denklem 4.42'deki gibidir. İlk epok için sisteme ait olan durum vektöründe kullanılabilecek bilgiler gözlem dosyasından elde edilen noktanın yaklaşık koordinatlarıdır. Diğer değerlere ait bilgi olmadığından bu değerler 0 ile başlatılabilir. Yani ilk epoktan önceki gelen tüm bilgilerin bundan ibaret olduğu varsayılır. Ancak ilk epok için en küçük kareler yapılarak bir başlangıç durum vektörü de hesaplanabilir. Bu durum PPP performansını olumlu etkilemektedir [Bahadır, 2017].

Başlangıç epoğunun k olduğunu varsayarsak bu elimizdeki durum vektörü k zamanında predikte edilmiş durum vektörüdür. Durum vektörüne ait kovaryans matrisi filtrenin devamı için önem teşkil etmektedir. Bu yüzden başlangıç epoğunda durum vektörünün doğruluğu zayıf olması köşegen olan kovaryans matrisini büyük değerler almaya zorlar [Brown and Hwang, 2012]. Durum vektörünün başlangıç kovaryans matrisi Denklem 4.56'daki gibi oluşturulabilir.

$$P = diag \left(\underbrace{1e8 \quad 1e8 \quad 1e8}_{\sigma_X^2, \sigma_Y^2, \sigma_Z^2} \quad \underbrace{9e10}_{\sigma_{cdt}^2} \quad \underbrace{1e4 \quad 1e4 \quad 1e4}_{\sigma_{ISB^R}^2, \sigma_{ISB^E}^2, \sigma_{ISB^C}^2} \quad \underbrace{0.25}_{\sigma_{Tr}^2} \quad \underbrace{400}_{\sigma_N^2} \right) \quad (4.56)$$

Filtreleme adımını yeni ölçüler ile gerçekleştirdikten sonra $(k+1)$. epoğa geçerken sistem gürültüsünün kovaryans matrisinin (Q) uygun biçimde belirlenip değerlendirme sürecine entegre olması gerekir. Bunun için bilinmeyen parametreler beyaz gürültü (White Noise) veya rastgele yürüyüş (Random Walk) olarak

modellenebilmektedir. Beyaz gürültü ile bir parametre epoklar arasında birbirinden bağımsız olarak hesaplanır. Rastgele yürüyüş modellemesinde ise parametre zaman farkına göre belirli bir oranda arttığı kabul edilerek kestirim yapılır. Statik PPP uygulamasında hız ve ivme olmadığı varsayıldığında, Q matrisi aşağıdaki gibi belirlenebilir [Abdel-Salam, 2005].

- Koordinat bileşenleri için

$$Q_{cor} = \begin{bmatrix} \frac{q_\varphi \Delta t}{(R_m + h)^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{q_\lambda \Delta t}{(R_n + h)^2 \cos^2 \varphi} & 0 \\ 0 & 0 & q_h \Delta t \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Burada q_φ , q_λ , q_h noktanın sırasıyla enlem, boylam ve yükseklik bileşenlerinin spektral yoğunluğu, h elipsoidal yükseklik, R_m ve R_n meridyen ve çapraz eğrilik yarıçapı olmak üzere, Δt ise ölçüler arası zaman aralığıdır.

- Alıcı saat hatası, zenit troposferik gecikme ve sistemler arası hata bileşenleri için

$$Q_{clk} = [q_{dt} \Delta t] \quad (4.58)$$

$$Q_{trop} = [q_{trop} \Delta t] \quad (4.59)$$

$$Q_{ISB} = [q_{ISB} \Delta t] \quad (4.60)$$

olarak yazılabilir. Burada Q_{clk} , Q_{trop} , Q_{ISB} , q_{dt} , q_{trop} , q_{ISB} sırasıyla saat hatası, troposferik gecikme ve sistemler arası hataların sistem gürültüsünün kovaryans matrisi değerleri ve spektral yoğunluklarıdır.

Tam sayı bilinmeyenleri, uydu ile alıcı arasında herhangi bir faz kesikliği olmadığı sürece sabit kabul edilmektedir. Bu yüzden Q matrisindeki değeri 0 kabul

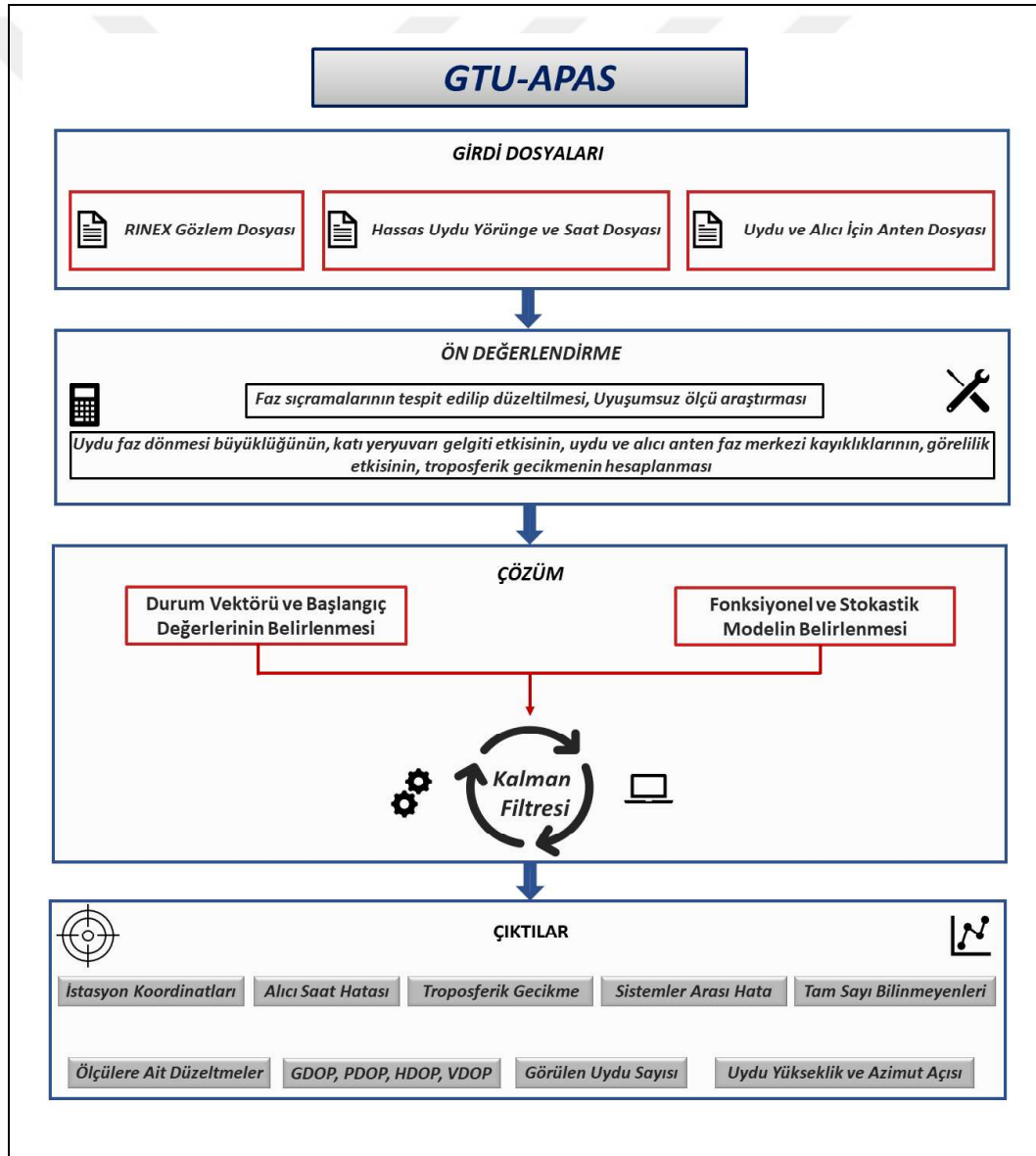
edilir. Aynı şekilde statik çözümlerde koordinat değişmeyip modelde sabit kabul edildiği gerçeğiyle filtre devam etmektedir. Parametrenin değişim hızı olan spektral yoğunluk 0 olacağından gürültü değeri statik konumlandırmada koordinat bileşeni için de 0 alınır. Böylece parametrelerin stokastik modellemesini oluşturan Q matrisi Denklem 4.61'deki gibi oluşturulabilir.

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{cor} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{clk} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{ISB} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{trop} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_N \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

5. UYGULAMA VE ANALİZLER

5.1. Geliştirilen Yazılımın Tanıtılması

Çalışmada hem tekli hem de çoklu uydu sistemlerinin farklı kombinasyonlarıyla PPP çözümü sunan bir yazılım geliştirilmiştir. GTU-APAS (Gebze Technical University-Automatic PPP Analysis Software) ismi verilen MATLAB tabanlı bu yazılım, birçok alt fonksiyon kodlarının birleşiminde oluşmaktadır. Yazılımın genel işleyiş şeması aşağıdaki şekilde verilmektedir.

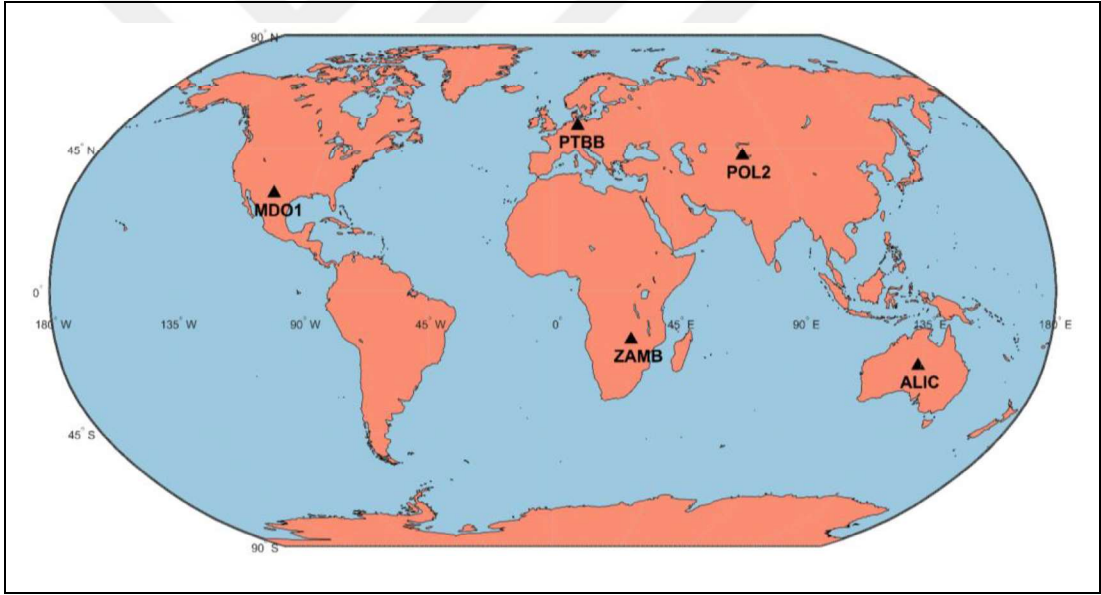


Şekil 5.1: GTU-APAS yazılımının genel işleyiş prosedürü.

Yazılım ilk olarak ilgili istasyon için gözlem dosyası olan Alıcıdan Bağımsız Değişim Formatlı (Receiver Independent Exchange, Rinex) dosya ve beraberinde ilgili tarihteki uyduların hassas yörünge ve saat hataları dosyalarını okuyarak kaydedilen epoklardaki ölçüleri ve uyduların yörünge ve saat hatalarını elde eder. Daha sonra da ölçü tarihine göre uygun anten dosyası okutularak uyduların faz merkezi kayıklıkları ile alıcıdaki antenin tipine göre uygun faz merkezi kayıklıkları ve değişimlerini elde eder. Ön değerlendirme aşamasında bir uydu için gözlem süresi belli bir kıstas süreden büyükse (30 epok) o ölçü grubu değerlendirmeye alınır. Sonrasında faz ölçüleri için en önemli hata kaynağı olan faz sıçraması tespit edilir ve uygun şekilde düzeltilir. Bu ölçü grubuna basit bir uyuşumsuz ölçü testi yapılarak ölçüler kaba hatalardan arındırılır. Ardından her bir uydu için sinyalin seyahat süresinin hesaplanması ile uyduların koordinatları elde edilir. Bir sonraki adımda şekilde verilen sistematik hata unsurları gerekli modellemeler ile sistemden çıkarılır. Bu hata kaynaklarının büyüklükleri uydu ile alıcı arasındaki ölçü türünde hesaplanarak modellenmektedir. Çözüm adımında ise fonksiyonel model yukarıda verilen modellemeler ile en uygun şekilde oluşturulur. Stokastik model de ise ölçülerin faz ve kod ölçüsünden oluşması ve bu ölçü türlerinin doğruluğu arasında fark olması nedeniyle bir ağırlıklandırma işlemi yapılmaktadır. Bu ağırlıklandırma da uydunun yükseklik açısı ve ölçü türlerinin standart sapmasına göre uygun şekilde hesaplanır. Ayrıca, farklı uydu sistemlerine de literatürde olduğu gibi farklı ağırlıklar verilerek sisteme katkısı doğruluklarına göre ayarlanmaktadır. Başlangıç epogunda mevcut bilginin çok kaliteli olmaması paralelinde ilk olarak durum vektörü ve bunun başlangıç kovaryans matrisi için bir yaklaşım yapılır. Ölçüler için oluşturulan kovaryans matrisi ve sistem gürültüsünün kovaryans matrisi ile filtreleme adımı çalıştırılır. Söz konusu bu matrislerin uyumlu bir şekilde oluşturulması Kalman filtresinin performansı ile doğrudan ilişkilidir. Çünkü parametre kestiriminde bu matrislerin yeri çok kritik öneme sahiptir. Bir parametre için yanlış modelleme bile filtreyi olumsuz hale getirebilir. Tüm bu durumlara dikkat edildiğinde şekilde verilen sonuç çıktıları elde edilir. GTU-APAS yazılımı ile elde edilen konumlama sonuçlarının analizi için istasyonların gerçek koordinatlarıyla karşılaştırma yapılmıştır. Bu istasyonların gerçek değerleri SINEX (Software Independent Exchange Format) dosyalarından elde edilmiştir. Bu şekilde gerekli analizler hem grafikler hem de istatistiksel tablolar yardımıyla verilmiştir.

5.2. Verinin ve Ürünlerin Elde Edilmesi

Uygulamada Şekil 5.2’de görüldüğü üzere 5 farklı IGS istasyonu kullanılarak yazılım test edilmiştir. Kullanılan bu istasyonlara ait genel bilgiler Tablo 5.1’de verilmektedir. PPP çözümünde 01.01.2021 ile 07.01.2021 tarihleri arasında (2138. ve 2139. GPS haftası) toplam 7 günlük veri kullanılmıştır. Bu veriler CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) üzerinden indirilmiştir [Web 9, 2021]. Çözüm için kullanılan yörünge ve saat ürünlerinde GFZ (Deutsches GeoForschungs Zentrum) tarafından sağlanan MGEX çoklu-GNSS ürünleri kullanılmıştır. Bu ürünler de verilerde olduğu gibi CDDIS üzerinden indirilmiştir [Web 10, 2021]. Ayrıca uydular ve alıcı anteni için kayıklık değerlerinin sağlandığı dosya da GPS haftasına göre alakalı olan tarih için indirilmiştir [Web 10, 2021].



Şekil 5.2: Uygulamada kullanılan IGS istasyonları.

Tablo 5.1: Uygulamada kullanılan IGS istasyonlarının genel bilgileri.

İstasyon	Yaklaşık Enlem(°)	Yaklaşık Boylam(°)	Alıcı	Anten
POL2	42.68	74.694	JAVAD TRE_3 DELTA - 4.0.02	TPSCR.G3 - NONE
ZAMB	-15.426	28.311	JAVAD TRE_3 DELTA - 4.0.02	AOAD/M T - NONE
ALIC	-23.67	133.886	SEPT POLARX5 - 5.4.0	LEIAR25.R3 - NONE
MDO1	30.681	-104.015	SEPT POLARX5 - 5.4.0	JAVRINGANT_DM - SCIS
PTBB	52.296	10.46	SEPT POLARX5TR - 5.4.0	LEIAR25.R4 - LEIT

Veri ve ürünler elde edildikten sonra istasyonların gerçek koordinatlarının olduğu SINEX dosyaları indirilerek kesin koordinatlar alınmıştır. Yazılımdan elde edilen koordinatlar ile kesin koordinatlar kıyaslanarak çözüm doğruluğu irdelenmiştir.

Çözüme ilişkin kullanılan strateji ve parametreler Tablo 5.2’de tekli ve çoklu GNSS PPP uygulamaları için özetlenmektedir. Ayrıca filtre için kullanılan sistem gürültüsü elemanlarının spektral yoğunlukları da Tablo 5.3’te verilmiştir.

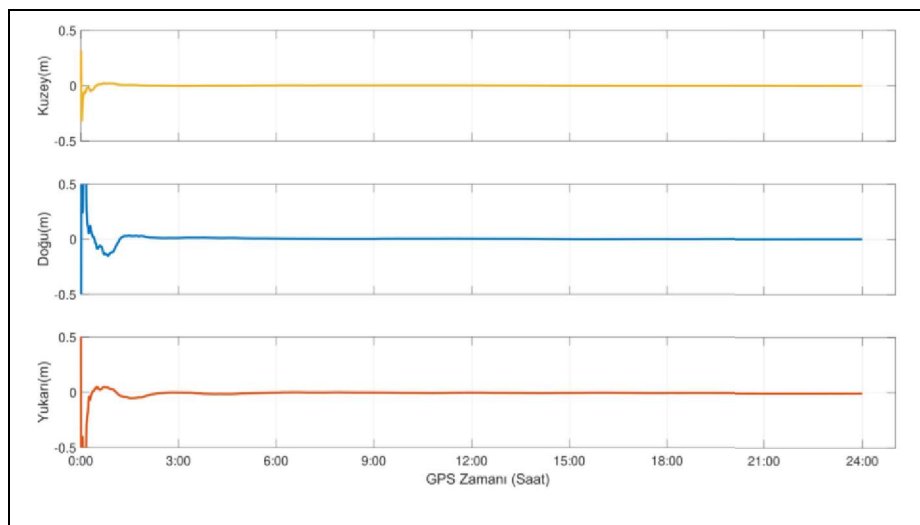
Tablo 5.2: Genel Değerlendirme Stratejisi.

Seçenekler	Değerlendirme Stratejisi
Ölçüler	(Çift Frekanslı İyonosferden Bağımsız Ölçü) GPS: L1 & L2, GLONASS: G1 & G2 Galileo: E1 & E5a, BeiDou: B1 & B3
Ölçülerin Standart Sapması	Faz ölçüleri için: 0.003m, Kod ölçüleri: 3m
Örnekleme Aralığı	30 s
Uydu Yükseklik Açısı Sınırı	10°
Uydu Yörünge Bilgileri	GFZ hassas yörünge
Uydu Saat Hatası Bilgileri	GFZ hassas saat hataları
Uydu ve Alıcı Anten Faz Merkezi Düzeltmeleri	igs14_2136.atx (IGS ANTEX)
İyonosferik Gecikme	İyonosferden Bağımsız Doğrusal Kombinasyon
Troposferik Gecikme	Kuru Kısım: UNB3m Modeli Islak Kısım: Rastgele Yürüyüş olarak kestirildi.
Görelilik Etkisi	Düzeltildi.
Katı Yeryuvarı Gelgiti	Düzeltildi.
Uydu Faz Dönmesi	Düzeltildi.
Okyanus Yükleme, Kutup Hareketi Alıcı Anten Faz Merkezi Değişimleri	Uygulanmadı.
Kestirim Yöntemi	Uyarlı Robust Kalman Filtresi
İstasyon Koordinatları	Statik (Sabit olarak kestirildi.)
Alıcı Saat Hatası	Beyaz Gürültü olarak kestirildi.
ISB	Rastgele Yürüyüş olarak kestirildi.
Faz Tam Sayı Bilinmeyenleri	Sabit olarak kestirildi.

Tablo 5.3: Sistem gürültüsüne ait kovaryans matrisi elemanlarının spektral yoğunlukları.

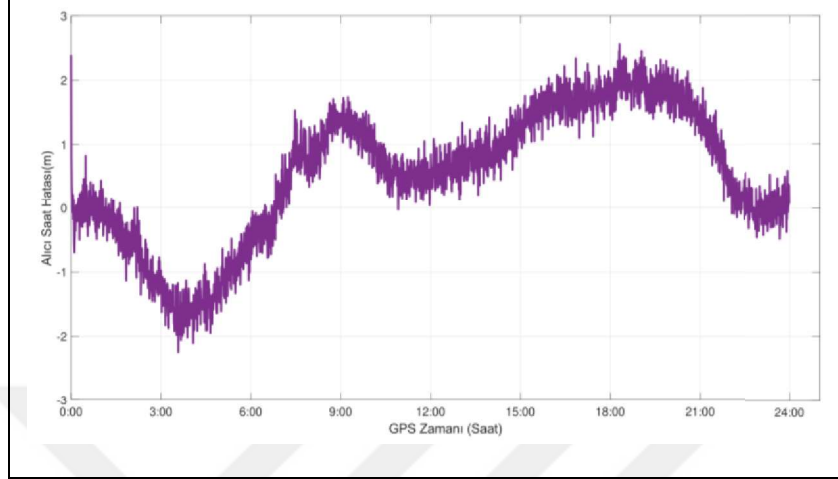
Koordinat Bileşenleri	Alicı Saat Hatası	Troposferik Gecikme	Sistemler Arası Hata	Tam Sayı Belirsizliği
0 m ² /s	1e5 m ² /s	1e-8 m ² /s	1e-7 m ² /s	0 m ² /s

Geliştirilen yazılım, Şekil 5.2’de verilen istasyonların verileri kullanılarak farklı senaryolar üzerinde test edilmiştir. Bu senaryolardan bahsetmeden önce yazılımın çıktı sonuçları olan koordinat değerleri, alıcı saat hatası, zenitten olan troposferik gecikme, görünür uydu sayısı, uydu geometrisinden kaynaklı hassasiyet kaybı (Geometric Dilution of Precision, GDOP) değerleri ALIC istasyonunun verileri üzerinde gösterilmektedir. Sonuç ürünler tanıtıldıktan sonra ilk olarak konumlama performansı her istasyon için 7 günlük veriler kullanılarak GPS PPP tekniğiyle analiz edilmiştir. Ardından yazılımın çoklu-GNSS PPP performansı her istasyonun 3 saatlik verilerinin sonuçları ile irdelenmiştir. Şekil 5.3’te ALIC istasyonuna ait kuzey, doğu ve yukarı bileşenlerin hataları gösterilmektedir. Yazılım ile 24 saatlik veri kullanılarak elde edilen bu sonuçlar ilk olarak kartezyen değerleri ile bulunmuştur. Bu kartezyen değerler ile istasyonun SINEX’ten elde edilen gerçek koordinatları kullanılarak toposentrik değerlere dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde, PPP tekniğindeki temel dezavantaj olan yakınsama süresinin ardından sonuçların beklenen şekilde gerçek değerler ile örtüştüğü açıkça görülmektedir.



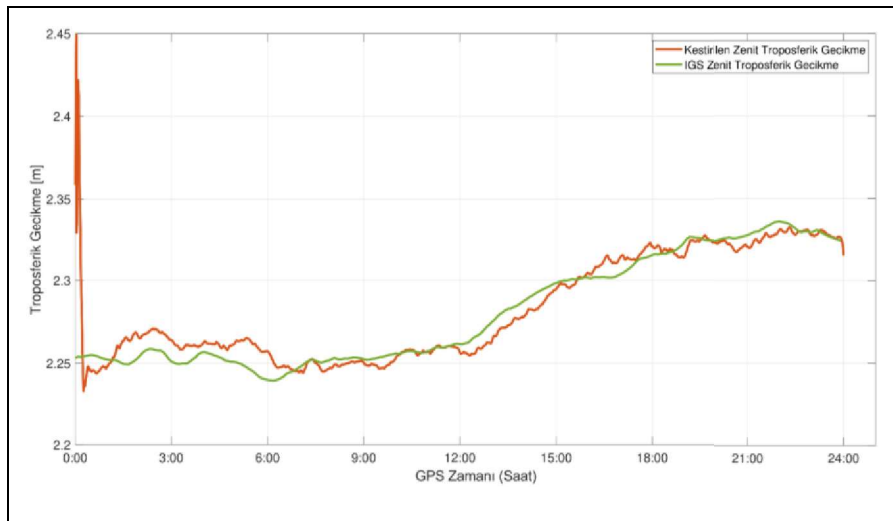
Şekil 5.3: 01.01.2021 ALIC istasyonundaki GPS-PPP ile elde edilen kuzey, doğu ve yukarı bileşenlerinin hataları.

PPP çözümlerinde alıcı saat hatası her epok için kestirilerek elde edilmektedir. Şekil 5.4 incelendiğinde ALIC istasyonunun 01.01.2021 tarihinde kestirilen alıcı saat hatası görülmektedir.



Şekil 5.4: 01.01.2021 ALIC istasyonunda elde edilen alıcı saat hatası.

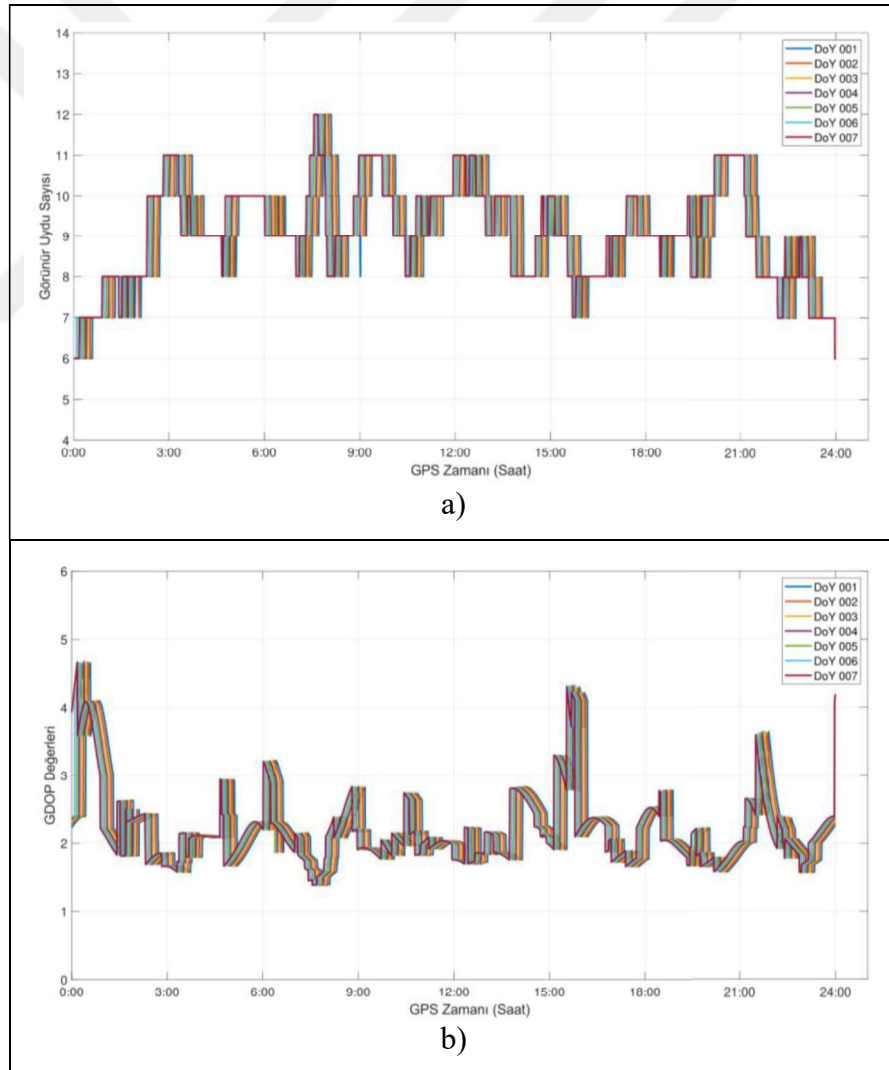
PPP çözümlerinden elde edilen sonuçlardan bir tanesi de zenit troposferik gecikmedir. Troposferik gecikmenin hassas bir şekilde modellenmesi özellikle ıslak kısımda bulunan su buharı miktarı ile hava durumu tahminlerinin daha hassas şekilde yapılmasını sağlamaktadır. Şekil 5.5 incelendiğinde ALIC istasyonunda GPS PPP tekniğiyle 01.01.2021 tarihinde elde edilen zenit troposferik gecikme ile bu istasyona ait aynı gün için IGS tarafından yayınlanan zenit gecikme değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.5: 01.01.2021 ALIC istasyonu için elde edilen zenit troposferik gecikme ile IGS'den yayınlanan zenit troposferik gecikmenin karşılaştırılması.

Şekil 5.5 daha detaylı bir biçimde incelendiğinde, PPP için gerekli yakınsama süresi geçtikten sonra değerlendirme sonucu elde edilen gecikmeler ile IGS tarafından yayınlanan gecikme değerleri birbirine çok yakındır ve aynı karakteri sergilediği görülmektedir. Yakınsama süresinden sonraki epoklar ele alındığında ve IGS’den elde edilen gecikme değerleri gerçek değer olarak düşünüldüğünde; değerlendirme sonucu çıkan zenit troposferik gecikmenin karesel ortalama hatası 7.5 mm, ortalama hata ise -0.5 mm olarak hesaplanmıştır.

PPP uygulamalarında daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere uydu sayısı ve uydu geometrisi yöntemin performans açısından çok önem arz etmektedir. Şekil 5.6’da ALIC istasyonundaki 7 günlük görülen uydu sayısı ve bu günlere ait GDOP değerleri verilmektedir.

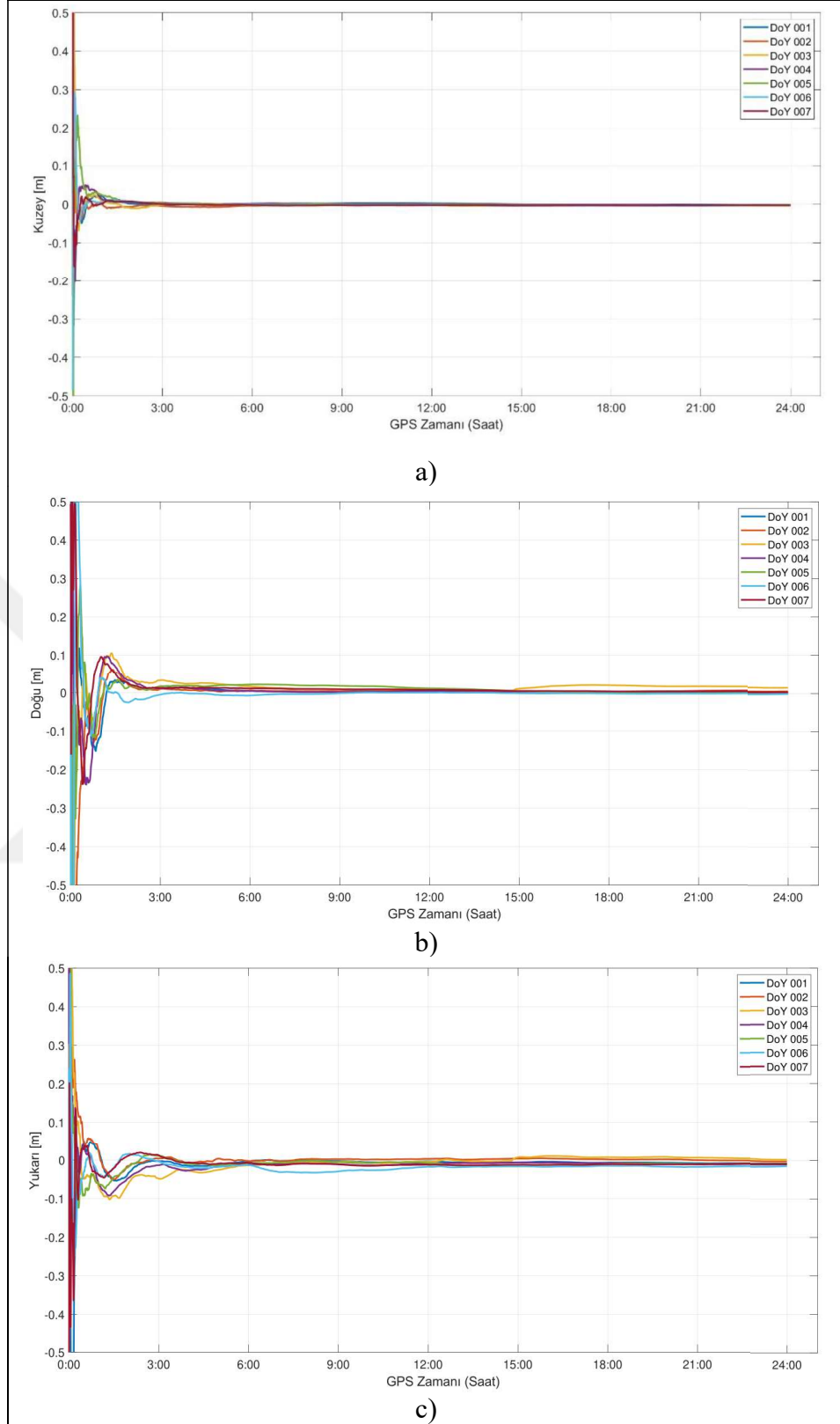


Şekil 5.6: 01.01.2021-07.01.2021: a) ALIC istasyonunda 7 gün boyunca görülen uydu sayısı, b) ALIC istasyonunun 7 gün için GDOP değerleri.

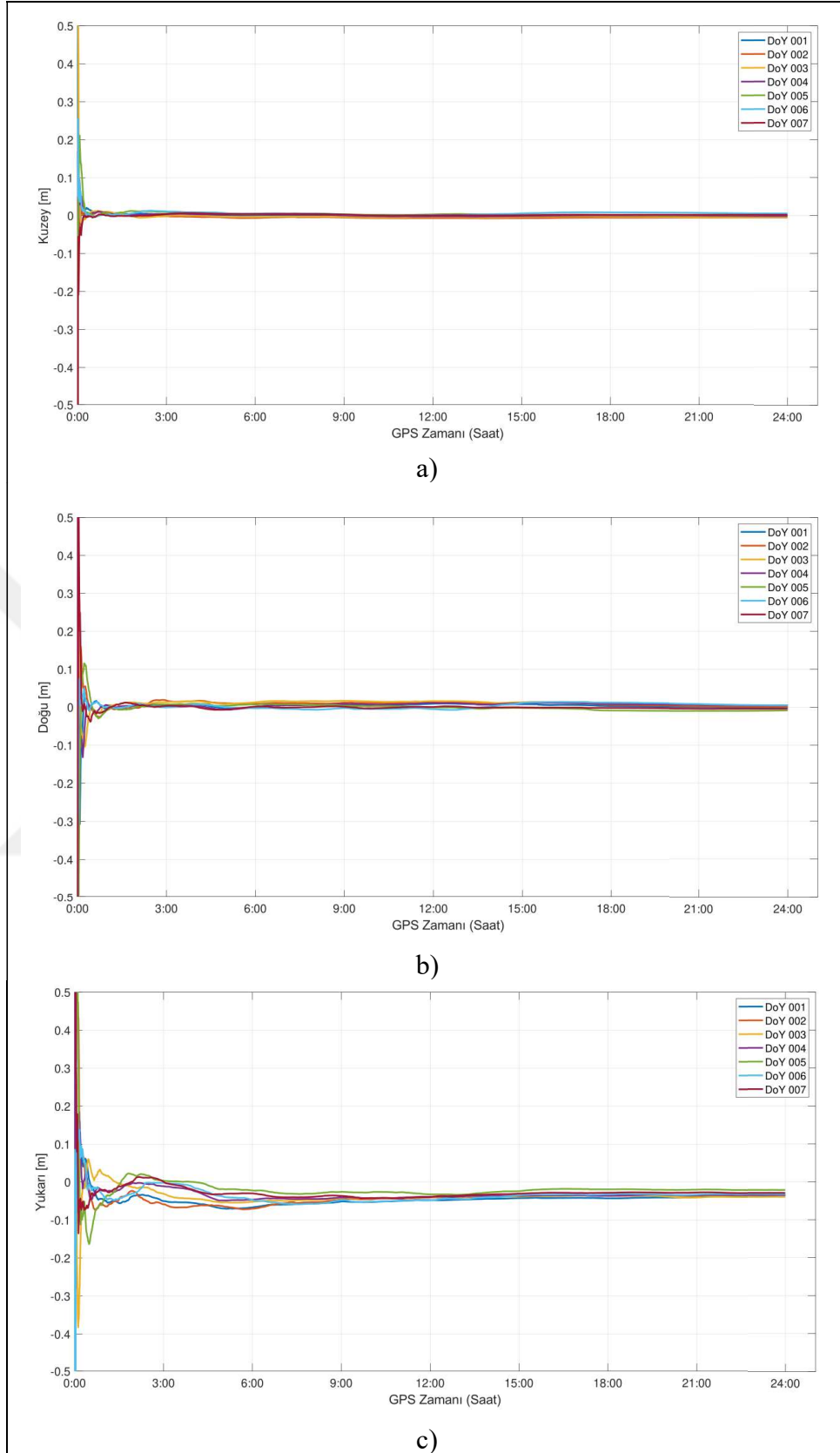
GDOP değeri, fonksiyonel modelde oluşturulan A katsayılar matrisinin kondisyonunu yansıtan önemli bir parametredir. Konumlama performansı için önceden bir tahmin yapabilmeyi sağlamaktadır. Öyle ki, GDOP değeri genellikle 30'dan büyük olduğu epoklarda çözüm doğruluğu çok azalmaktadır. Şekil 5.6 incelendiğinde, GDOP değerlerinin konumlandırma için uygun değerlerde olduğu görülmektedir. Ayrıca bu şekilde genel itibariyle uydu sayısı artığında GDOP değerleri azalmakta, tam tersi durumda ise GDOP değeri artmaktadır. Bazen bu durum tam olarak karşılanmayabilir. Çünkü uyduların birbirlerine göre geometrisi de önemli bir kısıttır. Ancak büyük çoğunlukla uydu sayısı ile ilişkilidir. Ek olarak, Şekil 5.6'da 7 günlük uydu sayısı ve GDOP değerleri birbiriyle uyumludur. GPS uydularının yörüngelerindeki bir devir periyodu yaklaşık 11 saat 56 dakika olduğu bilindiğine göre ardışık günler için aynı uydunun görülmeye başlama zamanı bir önceki günü göre 4 dakika erken olması beklenir. Şekil 5.6 bu durumu desteklemektedir.

5.3. GPS PPP Değerlendirme Sonuçları

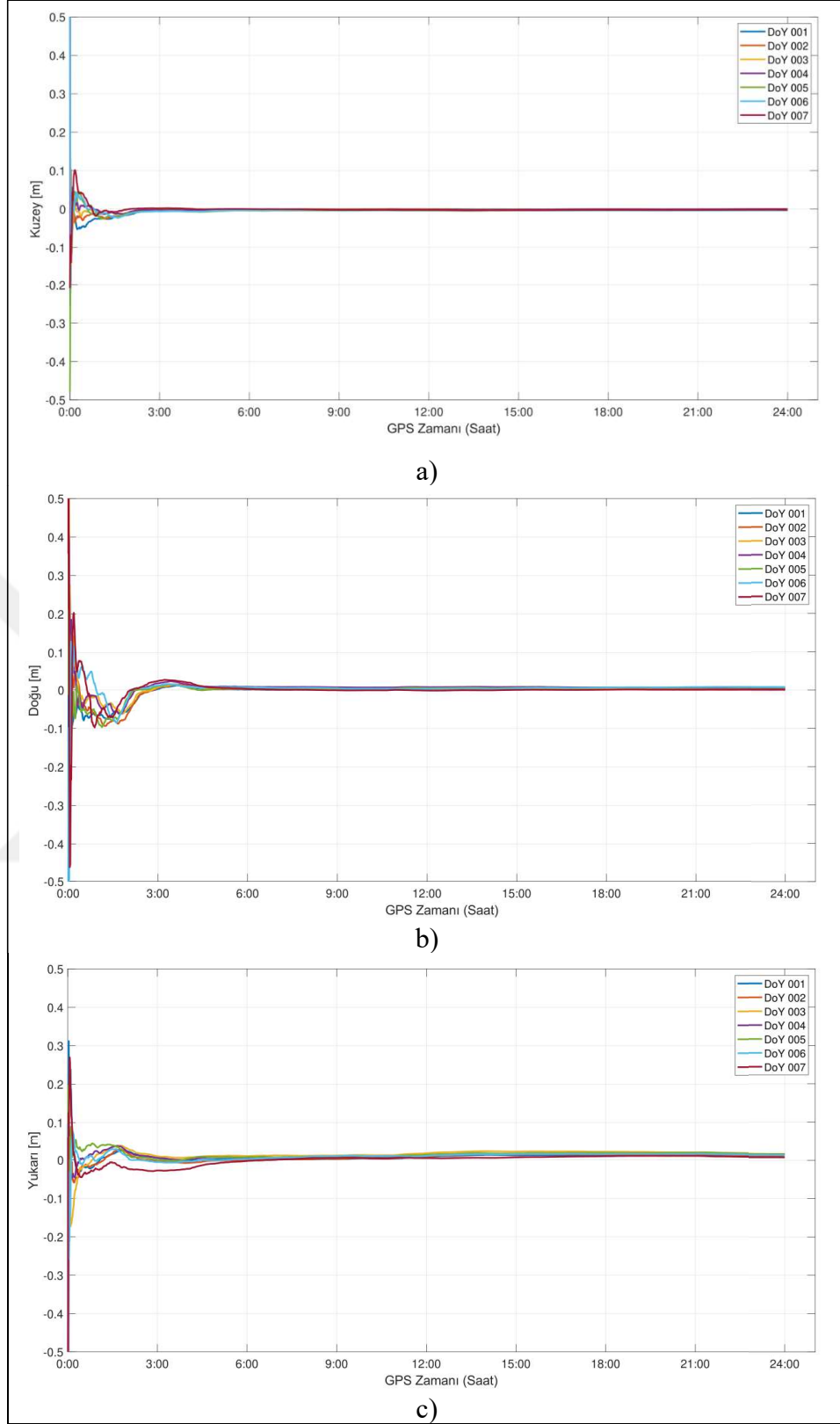
Verilerin değerlendirmeleri ilk olarak GTU-APAS yazılımıyla GPS PPP yöntemine göre yapılmıştır. Genel değerlendirme prosedürü Tablo 5.2'deki verilen stratejiye göre gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde istasyonların konum doğruluğunun performansı dikkatlice irdelenmiştir. Her istasyon için yazılımın 7 günlük değerlendirme sonuçları kuzey, doğu ve yukarı bileşen yönünde hatalar olmak üzere grafiklerle gösterilmiştir. Ayrıca, bu 35 farklı veriye ait istatistiksel bilgiler tablo halinde düzenlenerek sunulmuştur.



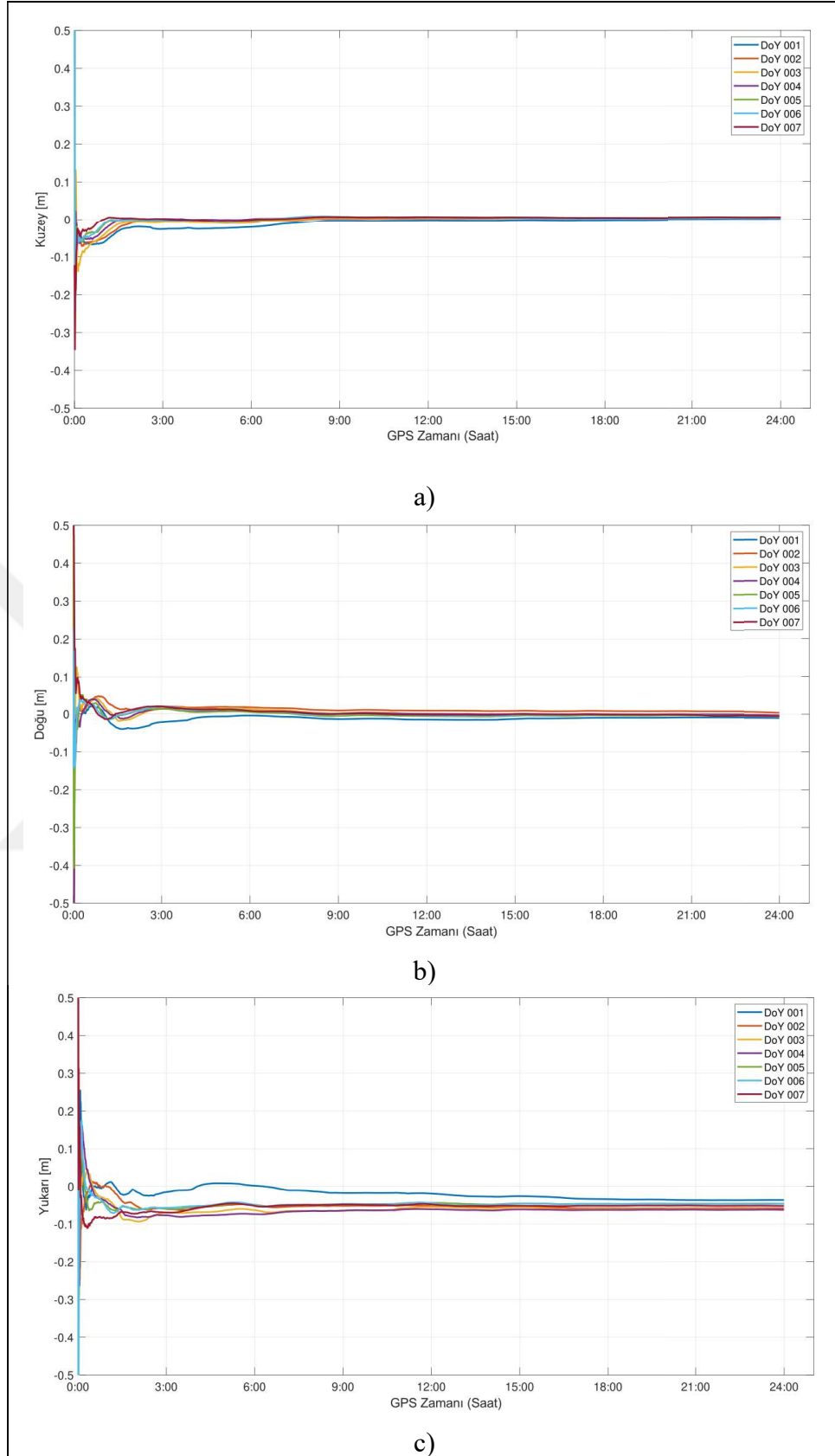
Şekil 5.7: ALIC istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.



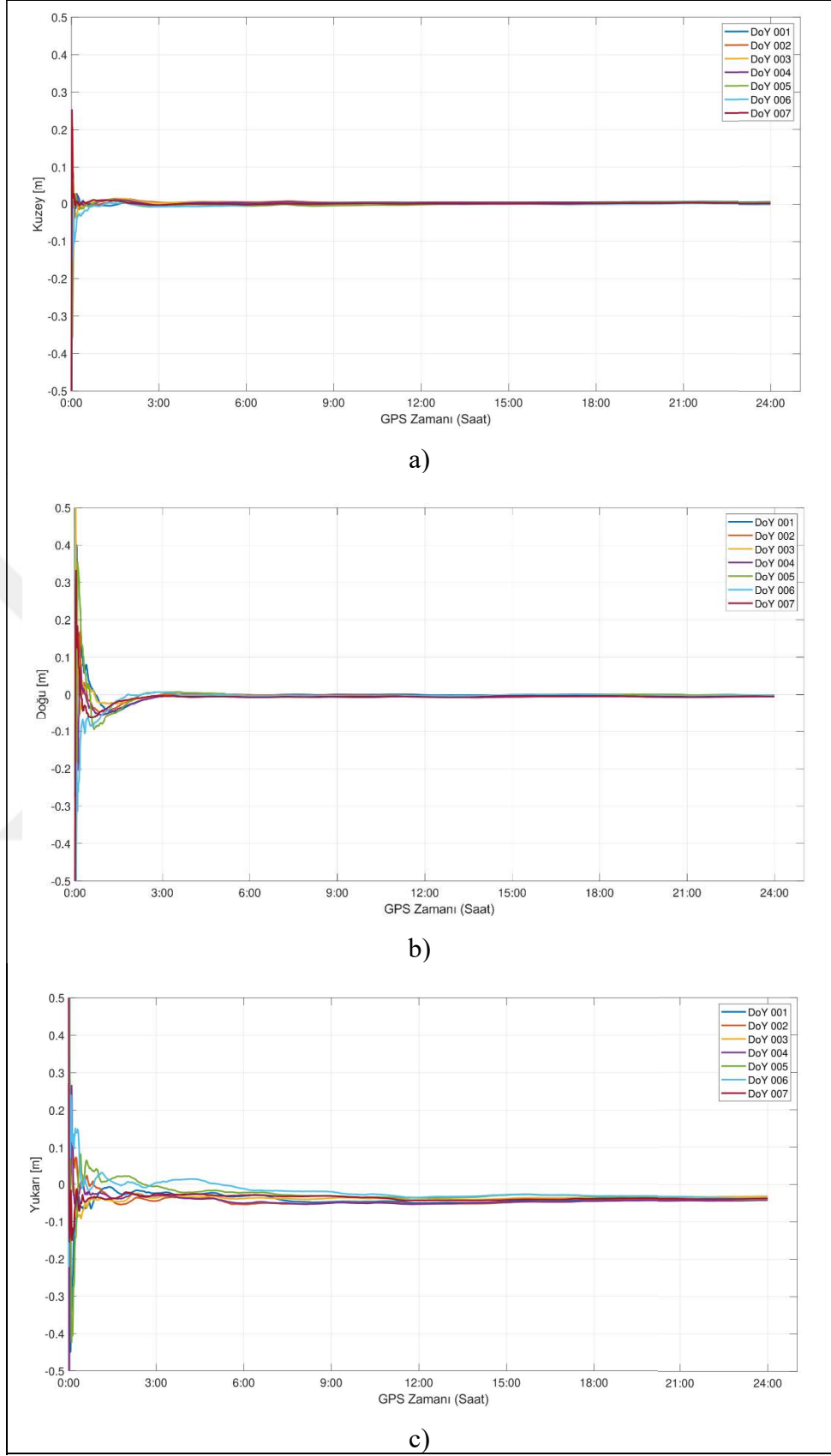
Şekil 5.8: ZAMB istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.



Şekil 5.9: PTBB istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.



Şekil 5.10: POL2 istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.



Şekil 5.11: MDO1 istasyonunun değerlendirme sonuçları: a) Kuzey yönünde hata, b) Doğu yönünde hata, c) Yukarı yönde hata.

Tablo 5.4: GPS PPP ile değeriendirilen istasyonların istatistiksel sonuçları.

İstasyon	Gün	Ortalama Hata (cm)				Karesel Ortama Hata (cm)				Yakınsama Süresi (dk)
		Kuzey	Doğu	Yukarı	3B	Kuzey	Doğu	Yukarı	3B	
ALIC	DoY1	0.05	0.36	-0.77	0.98	0.21	0.82	1.12	1.40	62.5
	DoY2	-0.27	0.52	-0.04	0.79	0.34	1.05	0.77	1.34	58.0
	DoY3	-0.28	1.53	-0.58	2.01	0.32	1.67	1.70	2.40	107.0
	DoY4	0.00	0.46	-1.23	1.35	0.20	0.83	1.51	1.73	94.0
	DoY5	-0.02	0.88	-1.08	1.77	0.40	1.31	1.53	2.05	53.5
	DoY6	-0.16	-0.30	-1.79	2.03	0.33	0.78	1.99	2.17	45.5
	DoY7	-0.20	0.88	-0.98	1.56	0.31	1.32	1.23	1.83	65.0
	Ort.	-0.12	0.62	-0.92	1.50	0.30	1.11	1.41	1.85	69.36
ZAMB	DoY1	0.07	0.40	-4.61	4.78	0.27	0.55	4.83	4.87	12.5
	DoY2	-0.47	0.80	-4.37	4.61	0.55	1.06	4.62	4.77	11.5
	DoY3	-0.28	1.09	-3.69	4.11	0.41	1.30	3.99	4.21	16.5
	DoY4	0.04	0.55	-3.43	3.54	0.24	0.75	3.59	3.68	14.0
	DoY5	0.37	-0.17	-2.06	2.44	0.46	0.69	2.43	2.57	39.5
	DoY6	0.54	0.32	-3.61	3.86	0.62	0.75	3.92	4.04	14.5
	DoY7	0.20	-0.15	-2.94	3.08	0.29	0.46	3.18	3.23	9.0
	Ort.	0.07	0.41	-3.53	3.78	0.40	0.79	3.79	3.91	16.79
PTBB	DoY1	-0.31	-0.27	0.71	1.41	0.85	1.85	1.00	2.27	10.0
	DoY2	-0.31	-0.28	0.71	1.57	0.59	1.99	1.22	2.41	8.0
	DoY3	-0.15	0.10	1.61	1.97	0.31	1.19	1.84	2.21	15.5
	DoY4	-0.13	0.44	1.23	1.76	0.30	1.40	1.44	2.03	10.5
	DoY5	-0.41	0.29	1.38	1.74	0.50	1.39	1.54	2.13	71.5
	DoY6	-0.36	0.49	1.03	1.65	0.59	1.49	1.25	2.03	15.0
	DoY7	-0.16	-0.02	0.13	1.22	0.23	1.36	1.13	1.79	54.0
	Ort.	-0.26	0.11	0.97	1.62	0.48	1.52	1.35	2.13	26.36
POL2	DoY1	-0.97	-1.21	-2.10	3.23	1.77	1.47	2.51	3.41	8.0
	DoY2	-0.24	1.12	-5.28	5.71	1.35	1.30	5.41	5.73	9.0
	DoY3	-0.14	0.31	-6.14	6.38	1.20	0.90	6.25	6.43	21.0
	DoY4	0.23	0.23	-6.40	6.61	1.00	0.69	6.53	6.65	14.5
	DoY5	0.19	-0.11	-4.83	5.01	0.91	0.82	4.89	5.04	9.0
	DoY6	0.14	0.12	-4.76	4.96	0.90	0.79	4.84	4.99	9.5
	DoY7	0.37	0.16	-5.39	5.46	0.55	0.72	5.45	5.53	29.0
	Ort.	-0.06	0.09	-4.99	5.34	1.10	0.96	5.13	5.40	14.29
MDO1	DoY1	0.27	-0.23	-3.94	4.13	0.39	1.08	4.06	4.22	17.5
	DoY2	0.36	-0.40	-4.41	4.67	0.43	0.98	4.59	4.71	12.0
	DoY3	0.24	-0.46	-3.69	3.78	0.40	0.73	3.75	3.85	6.5
	DoY4	0.24	-0.79	-4.44	4.65	0.34	1.26	4.51	4.70	9.0
	DoY5	-0.09	-0.40	-2.68	3.23	0.41	1.32	3.10	3.39	43.0
	DoY6	-0.20	-0.43	-2.11	2.69	0.37	1.29	2.64	2.96	23.0
	DoY7	0.05	-0.71	-3.64	3.79	0.23	1.14	3.69	3.87	12.0
	Ort.	0.12	-0.49	-3.56	3.85	0.37	1.11	3.76	3.96	17.57

Şekil 5.7 – 5.11 uygulama kapsamında seçilen noktaların değerlendirmeleri sonucu elde edilen lokal sistemdeki kuzey, doğu ve yukarı bileşenlerinin konumlandırma doğruluğunun performansını göstermektedir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere, PPP çalışmalarındaki genel yakınsama süresi problemi değerlendirmeye başlanılan ilk ölçüm zamanından itibaren başlamaktadır. Sistemde bulunan uydulara ait faz ölçülerinin tam sayı belirsizliği gerçek değerine yakınsayana kadar geçen süreden sonra, konumlama performansında herhangi bir olumsuz durumun olmadığı görülmektedir.

Literatürdeki PPP uygulamalarında yakınsama süresi, genellikle 3 boyutta konum doğruluğu için 10 cm sınır değerden küçük olduğu ve bu şartın belli bir süre devam etmesiyle belirlenmektedir. Bu çalışmada da yakınsama süresi için sınır değeri 3 boyut için 10 cm alınmıştır. Tablo 5.4'te verilen doğruluk ve karesel ortalama hata değerleri yakınsama gerçekleştikten sonraki epokları içine alacak şekilde hesaplanmıştır. Her bir istasyon için yakınsama değerleri incelendiğinde Bahadur and Nohutcu ve Xiao et al. çalışmalarında elde edilen GPS PPP yakınsama süreleri ile uyumlu olduğu görülmektedir [Bahadur and Nohutcu, 2018], [Xiao et al., 2020]. Ancak bu yakınsama sürelerinde ALIC istasyonuna ait süre diğer sürelerden biraz daha ayrılmaktadır. Bilindiği üzere yakınsama süresindeki en önemli faktörlerin başında uydu sayısı ve geometrisi gelmektedir. Şekil 5.6 incelendiğinde bu noktaya ait başlangıçtaki uydu sayılarının 6 veya 7 olduğu görülmektedir. Diğerlerine göre en az uydu sayısı ile değerlendirilmeye başlanan noktadır. Bu yüzden GDOP değeri de göz önüne alındığında en büyük yakınsama süresine sahip olması beklenen bir durum olduğu söylenebilir. Ayrıca 35 farklı veri değerlendirmesinde ortalama yakınsama süresi 28.9 dakika ve bu sürelerin %69'u 30 dakikadan küçük çıkmıştır. Ek olarak en az yakınsama süresi 6.5 en fazla 107 dakika çıkmıştır.

GNSS gözlem verisinin değerlendirme aşamasında, tekniğin doğası gereği yatay bileşenlerin düşey bileşenden daha doğru hesaplanması beklenen bir durumdur. Seepersad and Bisnath yaptığı çalışmada, GPS PPP tekniğiyle bu sonucu göstermiştir [Seepersad and Bisnath, 2014]. Bu çalışmada da Tablo 5.4 incelendiğinde verilerin %83'ünde yatay bileşen düşey bileşenden daha doğru elde edildiği sonucuna varılmaktadır. Tüm veriler düşünüldüğünde KOH'un maksimum, minimum ve ortalama değerleri yatay bileşen için sırasıyla 2.30 cm, 0.54 cm ve 1.26 cm, düşey bileşen için sırasıyla 6.53 cm, 0.77 cm, 3.09 cm olarak bulunmuştur. Tüm istasyonlar için 3 boyutta ortalama hata ile karesel ortalama hata değerleri birbiriyle çok yakın

çıkmiştir. Bu da çalışmanın temelini teşkil eden sistematik hata kaynaklarının uygun şekilde modellendiği yorumunu yapmamızı sağlamaktadır. İstasyonlar için 3 boyutlu KOH'un ortalaması 3.45 cm'dir. Bu sonuç benzer çalışmalarda yapılan GPS PPP tekniğiyle elde edilen KOH sonuçları ile uyushmaktadır [Bahadur and Nohutcu, 2018], [C. Chen and Chang, 2021]. PPP tekniği fark alınmadan kullanılan ölçülerle gerçekleştiğinden birçok hata kaynağı ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu hata kaynaklarının tam olarak modellenmemesi sonuçları olumsuz etkileyecektir. Bu durum neticesinde istasyonların doğruluk analizinde en iyi sonuç ALIC, en kötü sonuç POL2 istasyonunda çıkmıştır.

İyonosferin aktivitesinin durumunu gösteren indeks olan Kp indeksi bu 7 gün içinde en fazla olduğu günler 5. ve 6. günlerdir [Web 12, 2021]. Ancak çalışma incelendiğinde bu günler için konumlama performansında bariz bir farklılığa rastlanmamıştır. Bu elde edilen sonuç da Bahadur çalışmasında bulunan sonuç ile bağdaşmaktadır [Bahadur, 2017].

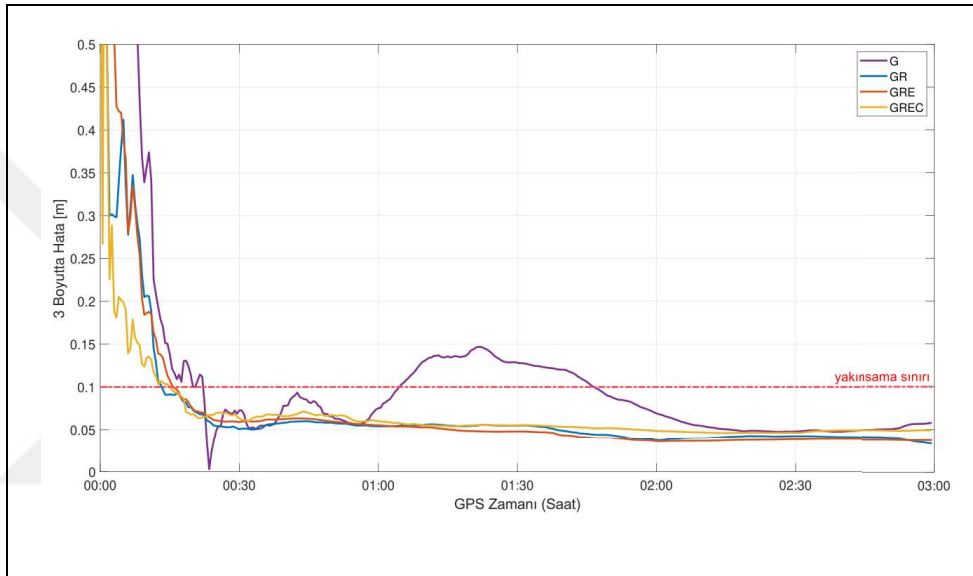
5.4. Çoklu-GNSS PPP Değerlendirme Sonuçları

GPS PPP sonuçlarının irdelenmesinden sonra çoklu-GNSS PPP tekniği 3 farklı uydu sistemi kombinasyonu oluşturularak, GPS PPP ile kıyaslanmıştır. İlk olarak GPS+GLONASS ikinci olarak GPS + GLONASS + Galileo ve son olarak GPS + GLONASS + Galileo + BeiDou kombinasyonları ile uygulamada seçilen her noktaya ait bir gün için değerlendirmeler yapılmıştır. 24 saatlik uzun süreli bir veride statik olarak çoklu-GNSS PPP sonuçlarının doğruluk açısından birbirlerine göre anlamlı farklar göstermediği bazı çalışmalarda vurgulanmıştır [Yigit et al., 2014], [Cai et al., 2015]. Bu sebeple değerlendirilen istasyondaki ilgili gün için ilk 3 saatlik gözlem verisi alınarak çözümler yapılmıştır. Önceki değerlendirmedeki gibi noktaların gerçek koordinatları SINEX dosyasından elde edilen koordinatlar olarak kabul edilmiştir. Çalışmada uydu sistemleri GPS: G, GLONASS: R, Galileo: E ve BeiDou: C ile gösterilmiştir. Tablo 5.2'deki değerlendirme stratejisi ile GTU-APAS programının çoklu-GNSS performansı analiz edilmiştir. Çalışmada uydu sistemlerinin birbirlerine göre ağırlıklarının uygun şekilde yapılması gerekir. GLONASS uydularının kullandığı frekans yapısı itibariyle kod ölçülerine daha az ağırlık verilmesi gerektiği Cai and Gao çalışmasında vurgulanmıştır [Cai and Gao, 2013]. Ek olarak Montenbruck et al. çalışmasında Galileo ve BeiDou ürünlerinin doğruluk açısından diğer iki sisteme göre

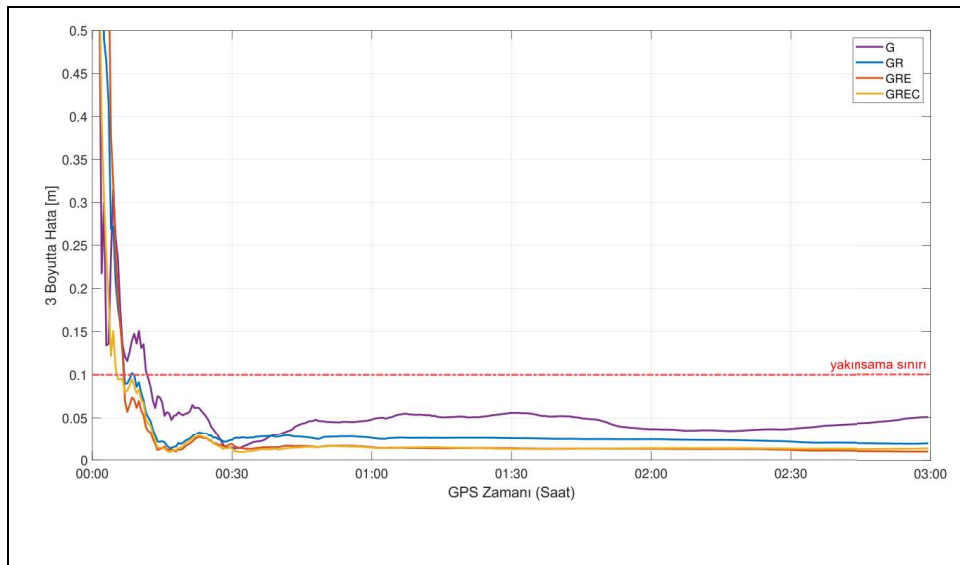
daha az doğruluğa sahip olduğunu söylemiştir [Montenbruck et al., 2017]. Bu bilgiler ışığında kod ölçülerinin ve faz ölçülerinin kendi aralarındaki ağırlıkları (P)

$$P = \begin{cases} \text{Kod ölçüleri } G : R : E : C = 3 / 1.5 / 1.5 / 1 \\ \text{Faz ölçüleri } G : R : E : C = 2 / 2 / 2 / 1 \end{cases}$$

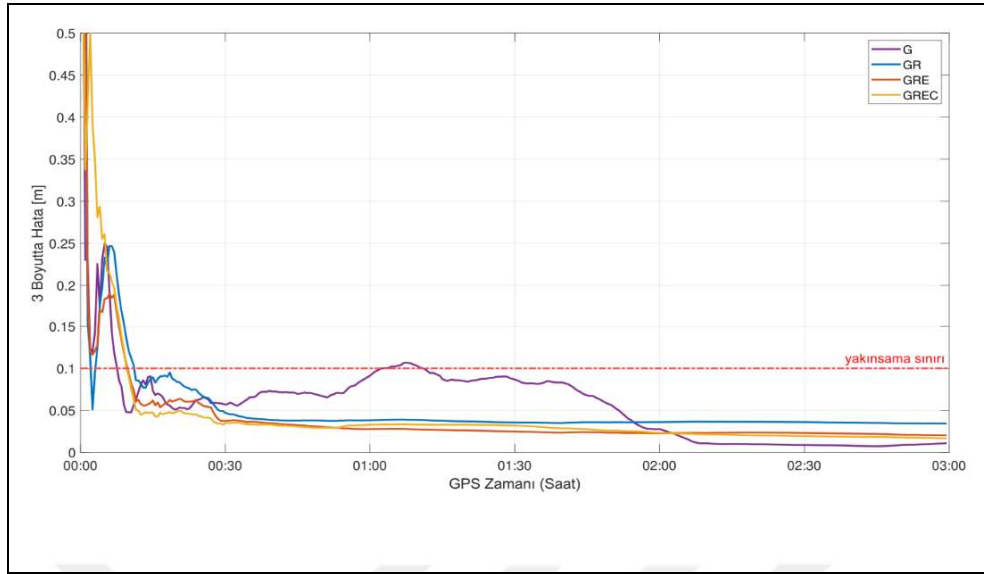
olarak seçilmiştir. Bu bilgiler ile beraber 5 istasyona ait çoklu GNSS çözümleri Şekil 5.12 – 5.16 ile gösterilmiştir.



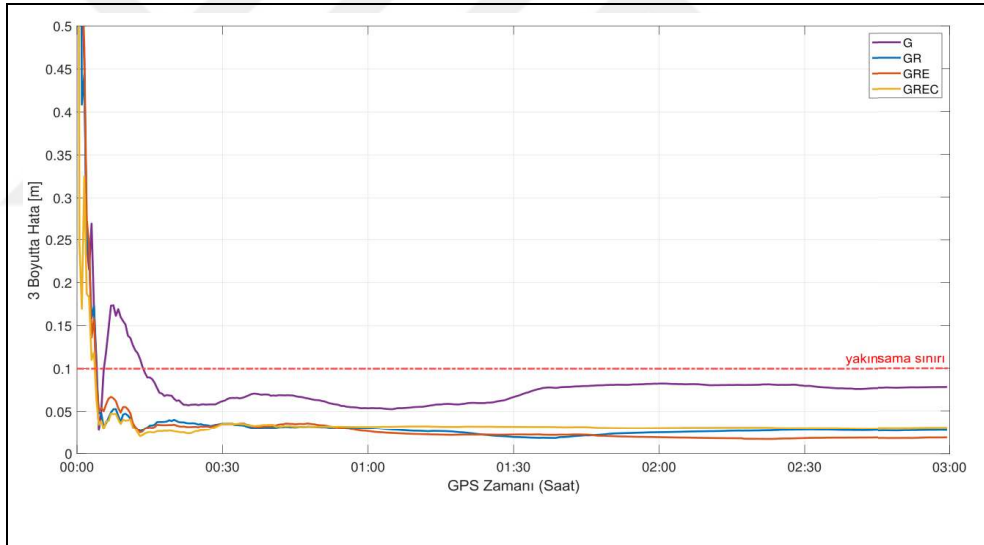
Şekil 5.12: ALIC istasyonunun Çoklu-GNSS değerlendirme sonuçları.



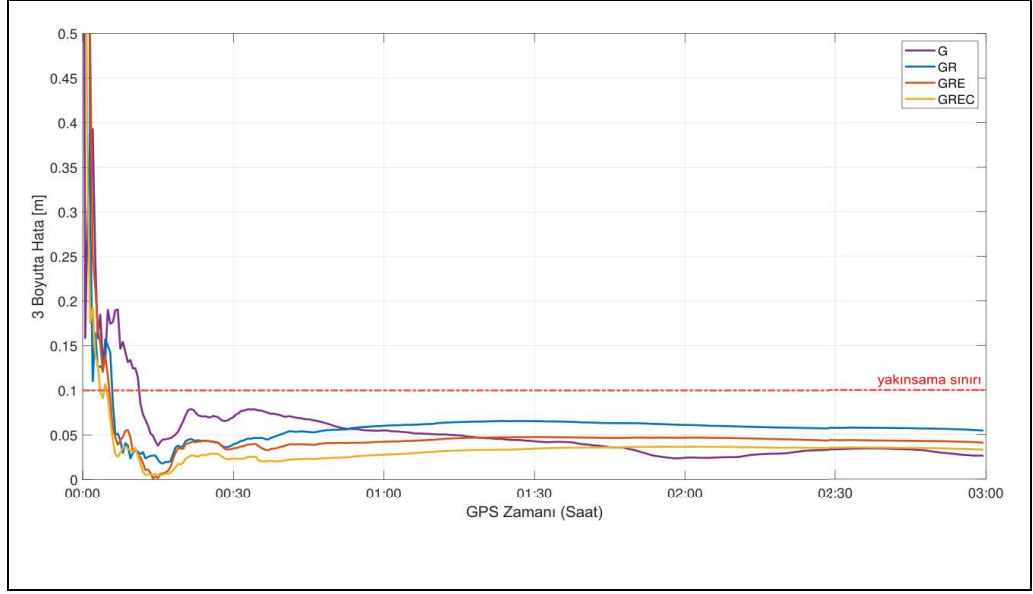
Şekil 5.13: ZAMB istasyonunun Çoklu-GNSS değerlendirme sonuçları.



Şekil 5.14: PTBB istasyonunun Çoklu-GNSS değerlendirme sonuçları.



Şekil 5.15: POL2 istasyonunun Çoklu-GNSS değerlendirme sonuçları.



Şekil 5.16: MDO1 istasyonunun Çoklu-GNSS değerlendirme sonuçları.

Tablo 5.5: Çoklu-GNSS PPP ile değerlendirilen istasyonların istatistiksel sonuçları

İstasyon	Gün	3B Ortalama Hata (cm)				3B Karesel Ortalama Hata (cm)			
		G	GR	GRE	GREC	G	GR	GRE	GREC
ALIC	DoY3	5.80	5.00	4.78	5.56	5.96	5.12	4.92	5.63
ZAMB	DoY1	4.40	2.52	1.52	1.68	4.53	2.65	1.75	2.15
PTBB	DoY5	3.89	4.12	2.95	2.88	5.18	4.32	3.18	3.02
POL2	DoY4	7.14	2.83	2.52	3.15	7.21	2.91	2.69	3.17
MDO1	DoY7	4.44	5.60	4.26	3.14	4.73	5.70	4.34	3.24
Ortalama		5.14	4.01	3.21	3.28	5.52	4.14	3.38	3.44

Tablo 5.6: Çoklu-GNSS PPP ile değerlendirilen istasyonların yakınsama süreleri.

İstasyon	Gün	Yakınsama Süresi (dk)			
		G	GR	GRE	GREC
ALIC	DoY3	107.0	14.0	16.5	16.0
ZAMB	DoY1	12.5	9.5	7.5	6.0
PTBB	DoY5	71.5	12.0	10.5	10.5
POL2	DoY4	14.5	4.5	4.5	4.5
MDO1	DoY7	12.0	6.5	6.0	5.5
Ortalama		43.5	9.3	9.0	8.5

GPS'in yanında diğer uydu sistemlerinin gelişmesiyle çoklu-GNSS PPP tekniği son yıllarda üzerinde çok çalışma yapılan bir alan haline almıştır. Uydu sayısının ve geometrisinin iyileşmesi, yeni frekansların gelmesi gibi durumlar değerlendirme sürecini daha karmaşık bir hale getirir de sağladığı avantajlar fazladır. Bu çalışmada

çoklu-GNSS sonuçları ile tekli GPS PPP sonuçları kıyaslanmıştır. Tablo 5.6'dan görüleceği üzere çoklu GNSS sonuçları ile yakınsama süresi GPS PPP'ye göre çok fazla kısalmaktadır. Ortalama yakınsama süresine bakıldığında en iyi süre dörtlü kombinasyona ait olduğu görülmektedir. Bu durum diğer çalışmalarla elde edilen sonuçlarla uyusmaktadır [Cai et al., 2015], [Bahadur and Nohutcu, 2018], [Xiao et al., 2020]. Ek olarak Tablo 5.5 irdelendiğinde, çoklu-GNSS ile konum doğruluğa GPS PPP'ye göre KOH'ın ortalamaları ile kıyaslandığında GPS+GLONASS ile %25, GPS+GLONASS+Galileo ile %39, GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou ile %38 iyileşmiştir. Üçlü kombinasyon ile dörtlü kombinasyon arasında doğruluk açısından önemli bir fark çıkmamıştır. Ancak ikili kombinasyonun ortalama doğruluğu üçlü ve dörtlü kombinasyona göre daha az çıkmıştır. Bu sonuçlar genel itibariyle literatürdeki çoklu GNSS çalışmaları bağdaşmaktadır. Sonuç olarak Çoklu-GNSS PPP tekniği ile 3 saatlik verilerde hem yakınsama süresinin azaldığı hem de konum doğruluğunun iyileştiği sonuçları elde edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

GNSS'in hızla gelişmesi ile yeni uyduların ve sinyallerin kullanıma sunulması, IGS tarafından bu uydulara ait yörünge ve saat ürünlerinin hassas bir şekilde yayınlanması PPP tekniği açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Özellikle bağıl konum belirleme tekniğine göre birçok avantaja sahip olan bu yöntemde, en büyük kısıt konum doğruluğunun beklenen seviyeye ulaşması için gereken yakınsama süresidir. Gereken yakınsama süresi sağlandıktan sonra uydu sayısı ve geometrisi ideal olduğu sürece konumlama performansı PPP için cm seviyelerinde olmaktadır. Belirtilmesi gereken bir diğer durum ise bu yöntemde sistematik hata kaynaklarının titizlikle modellenmesi gerektiğidir. Eğer sistematik hata kaynakları iyi bir şekilde PPP standartlarına göre modellenmezse, konumlama doğruluğu ve diğer kestirim sonuçları beklenen hassasiyetle elde edilmesi mümkün hale gelmez ve dolayısıyla sonuçlar kötüleşir. Ayrıca tekniğin fonksiyonel ve stokastik modelleme tarafı da bulunmaktadır. Matematiksel modellemeler kısmını oluşturan bu bölümde fonksiyonel model ile ölçüler bilinmeyen parametreler cinsinden ifade edilmekte, stokastik bölümde ise ölçülerin ağırlıklandırılması yapılmaktadır. Bu durumdan sonra parametre kestirimi için en ideal yöntemlerden birisi olan Kalman filtreleme yöntemi kullanılarak kestirim işlemi yapılmıştır. Elde edilen bu parametreler için kilit role sahip olan Kalman filtresinin hem ölçülere hem de bilinmeyenlere ait kısımları çok iyi bir şekilde yönetilmelidir. Bu çalışma kapsamında ilk olarak Genişletilmiş Kalman filtresi tekniği üzerinde durulmuştur. Ancak daha sonrasında bu tekniğin sistemdeki kalabilecek herhangi bir kaba hatadan, uyuşumsuz ölçülerden veya modelleme hatasından etkilendiği görülmüştür. Bu sebeple sözü edilen bu beklenmedik durumlara karşı daha dirençli bir teknik olan Uyarlı Robust Kalman Filtreleme tekniği kullanılmıştır. Tüm bu ifadeler toplandığında ise PPP'nin çalışma mekanizması oluşmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında öncelikli olarak sözü edilen hata kaynaklarının irdelenmesi ve gerekli matematiksel modellemeler üzerine çalışmalar yapılarak GTU-APAS (Gebze Technical University-Automatic PPP Analysis Software) adında MATLAB tabanlı bir PPP yazılımı geliştirilmiştir. Yazılıma PPP için gerekli gözlem dosyası ve gözlem tarihine ait ürünler girdi olarak verildikten sonra gözlem yapılan noktaya ait koordinatlar, alıcı saat hatası, zenit troposferik gecikme, sistemler arası hata (çoklu-GNSS çözümlerinde), görülen uydulara ait tam sayı belirsizlik

parametreleri epok-epok elde edilmektedir. Bu çıktı sonuçları özellikle PPP için önem teşkil eden yakınsama süresi ve doğruluk açısından irdelenmiş ve analiz edilmiştir. Bu sebeple yeryüzü üzerine dağılmış olan IGS istasyonlarından beş tanesi seçilmiş ve 7 günlük 24 saat olarak sunulan 30 saniye örneklem aralığına sahip gözlem verisi değerlendirilmiştir. İlk olarak GPS PPP tekniğiyle toplam 35 farklı veri belirlenen değerlendirme stratejisi doğrultusunda GTU-APAS yazılımı ile çözülmüştür. Noktaların hassas koordinatlarının yayınlandığı SINEX dosyasından elde koordinatlar referans değer (gerçek değer) olarak kabul edilerek yazılımdan elde edilen koordinatlar ile kıyaslanmıştır. Çözümlerin daha anlaşılır hale getirilebilmesi açısından gerçek değer ile yazılım ile hesaplanan değerler arasındaki farklar lokal (toposentrik) olarak ifade edilmiştir. GPS PPP elde edilen konumlama performansında genel olarak yatay bileşen düşey bileşenden daha iyi sonuçlar vermiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda PPP için elde edilen santimetre konumlama doğruluğu seviyesi bu çalışma ile de kanıtlanmıştır. Elde edilen karesel ortalama hatalar ve ortalama hata değerleri sonucu sistematik hataların gerekli şekilde modellendiği sonucuna varılabilmektedir. Yakınsama süresi açısından değerlendirmelerde tüm GPS PPP çözümlerinden elde edilen yakınsama sürelerinin ortalaması 28.9 dakika çıkmıştır. Bu durum da beklenen yakınsama sürelerinin elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca en kötü yakınsama süresine sahip ALIC istasyonundaki bu durumun başlangıç epoklarındaki uydu sayısı ve GDOP değerleriyle açıklanmıştır. Yakınsama süresi en kötü istasyon ALIC olmasına rağmen konumlama performansı açısından en iyi istasyon özelliğine sahiptir. Buradan yola çıkarak yakınsama süresinin kısa olması konumlama performansının iyi olacağı sonucunu doğurmadığı görülmüştür. İstasyonun bulunduğu coğrafi ve çevresel konumun bu durumlarda önem arz eden bir kıstas olduğu söylenebilir.

Çoklu-GNSS performansı açısından 5 farklı istasyonun 5 farklı günü ele alınmıştır. Tek bir sistemin değerlendirmesine göre farklı uydu sistemlerinin bir arada değerlendirilme algoritması biraz daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu sebeple, daha da üzerine gidilip derinlemesine incelenmesi gereken bir konu olduğu çalışmada açıkça görülmüştür. Farklı sistemlere uygun ağırlıklar verilerek 3 saatlik kısa çözümler yapılan çoklu-GNSS sonuçlarında özellikle uydu sayısının artması avantajı ile, tekli-GPS çözümlerine göre bariz bir şekilde yakınsama süresinin azaldığı görülmüştür. Ek olarak çoklu-GNSS çözümlerinin genel ortalama değerleri göz önüne alındığında doğruluk açısından tekli-GPS PPP çözümlerine göre daha iyi sonuçlar alınmıştır. Genel itibarıyla, yapılan diğer çalışmalarla bu sonuçların bağdaştığı görülmüştür.

Özellikle dörtlü uydu kombinasyonu ile elde edilen yakınsama sürelerine bakıldığında kısa süreli ölçüler için çoklu-GNSS PPP yönteminin çok yararlı bir teknik olduğu açıkça söylenebilir. Diğer bölgesel sistemlerin de gelişmeleri göz önüne alındığında çoklu-GNSS çalışmalarının daha da artacağı ve yeni sistemlerin de çözümlere etkisinin araştırılacağı beklenen bir durum olarak düşünülmektedir. Ayrıca statik verilerin işlendiği bu çalışmanın kinematik veriler kullanılarak ileride zenginleştirilmesi, uydulara eklenen yeni sinyallerin yazılıma entegre edilerek bu sinyallerin performansının araştırılması da planlanmaktadır.



KAYNAKLAR

- Abdel-Salam M. A., (2005), "Precise Point Positioning using un-differenced code and carrier phase observations", PhD Thesis, University of Calgary, Canada.
- Alkan R. M., İlçi V., Ozulu İ. M., Saka M. H., (2015), "A comparative study for accuracy assessment of PPP technique using GPS and GLONASS in urban areas", *Measurement*, 69, 1–8.
- Alkan R. M., Saka M. H., Ozulu İ. M., İlçi V., (2017), "Kinematic precise point positioning using GPS and GLONASS measurements in marine environments", *Measurement*, 109, 36–43.
- Ashby N., (2003), "Relativity in the Global Positioning System Imprint / Terms of Use", *Living Reviews in Relativity*, 6 (1), 1–42.
- Bahadur B., (2017), "Improving The Performance of Precise Point Positioning with Multi-Gnss", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- Bahadur B., Nohutcu M., (2018), "PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis", *GPS Solutions*, 22 (4), 113.
- Bassiri S., Hajj G. A., (1993), "Higher order ionospheric effects on the GPS observables and means of modeling them", *Advances in the Astronautical Sciences*, 82, 1071–1086.
- Bellone T., Dabove P., Manzano A. M., Taglioretti C., (2016), "Real-time monitoring for fast deformations using GNSS low-cost receivers", *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7 (2), 458–470.
- Bertiger W., Bar-Sever Y., Dorsey A., Haines B., Harvey N., Hemberger D., Heflin M., Lu W., Miller M., Moore A. W., Murphy D., Ries P., Romans L., Sibois A., Sibthorpe A., Szilagyi B., Vallisneri M., Willis P., (2020), "GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research", *Advances in Space Research*, 66 (3), 469–489.
- Bierman G. J., (1977), "Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation", 1st Edition, Academic Press.
- Bisnath S., Gao Y., (2009), "Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations". In: M.G. Sideris Editor, "Observing our Changing Earth", Springer.
- Blewitt G., (1990), "An Automatic Editing Algorithm for GPS data", *Geophysical Research Letters*, 17 (3), 199–202.

Boehm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H., (2006a), “Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data”, *Geophysical Research Letters*, 33 (7), L07304.

Boehm J., Werl B., Schuh H., (2006b), “Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111 (B2).

Braasch M. S., (2017), “Multipath”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “*Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*”, Springer, Cham.

Brown R. G., Hwang P. Y. C., (2012), “*Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with Matlab Exercises*”, 4th Edition, Wiley.

Cai C., (2009), “*Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurements*”, PhD Thesis, University of Calgary, Canada.

Cai C., Gao Y., (2007), “Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations”, *Journal of Global Positioning Systems*, 6 (1), 13–22.

Cai C., Gao Y., (2013), “Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning”, *GPS Solutions*, 17 (2), 223–236.

Cai C., Gao Y., Pan L., Zhu J., (2015), “Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo”, *Advances in Space Research*, 56 (1), 133–143.

Cai C., Liu G., Yi Z., Cui X., Kuang C., (2019), “Effect analysis of higher-order ionospheric corrections on quad-constellation GNSS PPP”, *Measurement Science and Technology*, 30 (2), 024001.

Cai C., Liu Z., Xia P., Dai W., (2013), “Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity”, *GPS Solutions*, 17 (2), 247–260.

Chen C., Chang G., (2021), “PPPLib: An open-source software for precise point positioning using GPS, BeiDou, Galileo, GLONASS, and QZSS with multi-frequency observations”, *GPS Solutions*, 25 (1), 18.

Chen J., Zhang Y., Wang J., Yang S., Dong D., Wang J., Qu W., Wu B., (2015), “A simplified and unified model of multi-GNSS precise point positioning”, *Advances in Space Research*, 55 (1), 125–134.

Chen X., Ge M., Marques H. A., Schuh H., (2019), “Evaluating the impact of higher-order ionospheric corrections on multi-GNSS ultra-rapid orbit determination”, *Journal of Geodesy*, 93 (9), 1347–1365.

Choy S., Bisnath S., Rizos C., (2017), “Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect”, *GPS Solutions*, 21 (1), 13–22.

Collins P., Bisnath S., Lahaye F., Héroux P., (2010), “Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing”, *Navigation*, 57 (2), 123–135.

Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P., (2015), “Bernese GNSS Software Version 5.2”, Publikation Digital AG.

Davis J. L., Herring T. A., Shapiro I. I., Rogers A. E. E., Elgered G., (1985), “Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length”, *Radio Science*, 20 (6), 1593–1607.

Dow J. M., Neilan R. E., Rizos C., (2009), “The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems”, *Journal of Geodesy*, 83 (3–4), 191–198.

Elmas Z. G., Aquino M., Marques H. A., Monico J. F. G., (2011), “Higher order ionospheric effects in GNSS positioning in the European region”, *Annales Geophysicae*, 29 (8), 1383–1399.

Falcone M., Hahn J., Burger T., (2017), “Galileo”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.

Gao Y., Chen K., (2004), “Performance Analysis of Precise Point Positioning Using Real-Time Orbit and Clock Products”, *Journal of Global Positioning Systems*, 3 (1&2), 95–100.

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”, *Journal of Geodesy*, 82 (7), 389–399.

Gelb A., (1974), “Applied Optimal Estimation”, The MIT Press.

Grewal M. S., Andrews A. P., (2008), “Kalman Filtering, Theory and Practise Using MATLAB”, 3rd Edition, Wiley.

Grewal M. S., Andrews A. P., Bartone C. G., (2020), “Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration”, 4th Edition, Wiley.

Guo F., Zhang X., (2014a), “Real-time clock jump compensation for precise point positioning”, *GPS Solutions*, 18 (1), 41–50.

Guo F., Zhang X., (2014b), “Adaptive robust Kalman filtering for precise point positioning”, *Measurement Science and Technology*, 25 (10), 105011.

Guo Q., (2015), “Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation”, *GPS Solutions*, 19 (4), 537–544.

Hauschild A., (2017), “Combinations of Observations”, In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.

Hegarty C. J., (2017), “The Global Positioning System (GPS)”, In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.

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

Hopfield H. S., (1969), “Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data”, *Journal of Geophysical Research*, 74 (18), 4487–4499.

Jakowski N., Wilken V., Schlueter S., Stankov S. M., Heise S., (2005), “Ionospheric space weather effects monitored by simultaneous ground and space based GNSS signals”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67 (12), 1074–1084.

Kalman R. E., (1960), “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”, *Journal of Basic Engineering*, 82 (1), 35–45.

Kaplan E. D., Hegarty C. J., (2017), “Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications”, 3rd Edition, Artech House.

Kim D., Langley R. B., (2001), “Instantaneous real-time cycle-slip correction of dual frequency GPS data”, *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, 255-264, Banff, Alberta, Canada, 5–8 June.

Kogure S., Ganeshan A. S., Montenbruck O., (2017), “Regional Systems”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.

Kouba J., (2015). “A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products”, Geodetic Survey Division Natural Resources, Ottawa, Canada.

Kouba J., Héroux P., (2001), “Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products”, *GPS Solutions*, 5 (2), 12–28.

Langley R. B., Teunissen P. J. G., Montenbruck O., (2017), “Introduction to GNSS”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.

Larson K. M., Freymueller J. T., Philipson S., (1997), “Global plate velocities from the Global Positioning System”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B5), 9961–9981.

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, Journal of the Institute of Navigation*, 56 (2), 135–149.

Leandro R. F., Langley R. B., Santos M. C., (2008), “UNB3m_pack: A neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques”, *GPS Solutions*, 12 (1), 65–70.

Leandro R., Santos M., Langley R. B., (2006), “UNB neutral atmosphere models: development and performance”, *Proceedings of the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 564-573, Monterey, CA, USA, 18-20 January.

Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D., (2015), “GPS Satellite Surveying”, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc.

Li X., Zhang X., Ren X., Fritsche M., Wickert J., Schuh H., (2015), “Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou”, *Scientific Reports*, 5 (1), 8328.

Marini J. W., (1972), “Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile”, *Radio Science*, 7 (2), 223–231.

Marques H. A., Monico J. F. G., Aquino M., (2011), “RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files”, *GPS Solutions*, 15 (3), 305–314.

McCarthy D. D., Petit G., (2004), “IERS Conventions (2003)”, Technical Report No: IERS Technical Note 32, IERS Convention Center, Frankfurt, Germany.

Montenbruck O., MacLeod K., (2017), “Annex A: Data Formats”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.

Montenbruck O., Steigenberger P., Khachikyan R., Weber G., Langley R., Mervart L., Hugentobler U., (2014), “IGS-MGEX: Preparing the Ground for Multi-Constellation GNSS Science”, *Inside GNSS*, 9(1), 42–49.

Montenbruck O., Steigenberger P., Prange L., Deng Z., Zhao Q., Perosanz F., Romero I., Noll C., Stürze A., Weber G., Schmid R., MacLeod K., Schaer S., (2017), “The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges”, *Advances in Space Research*, 59 (7), 1671–1697.

Niell A. E., (1996), “Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths”, *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 101 (2), 3227–3246.

Nykiel G., Figurski M., Baldysz Z., (2019), “Analysis of GNSS sensed precipitable water vapour and tropospheric gradients during the derecho event in Poland of 11th August 2017”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 193, 105082.

Remondi B. W., (1989), “Extending the National Geodetic Survey Standard GPS Orbit Formats”, Technical Report No: NOS 133 NGS 46, National Information Center, Rockville, Maryland, USA.

Revnivkykh S., Bolkunov A., Serdyukov A., Montenbruck O., (2017), “GLONASS”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.

Rizos C., (2002), “Network RTK Research and Implementation: A Geodetic Perspective”, Journal of Global Positioning Systems, 1 (2), 144–150.

Rizos Chris, Montenbruck O., Weber R., Weber G., Neilan R., Hugentobler U., (2013), “The IGS MGEX experiment as a milestone for a comprehensive multi-GNSS service”, Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting, Pacific PNT, 289-295, Honolulu, Hawaii, 23-25 April.

Romero Sánchez J., (2016), “Design and Implementation of Cycle Slip Detectors for Dual-frequency GNSS Signals”, MSc Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.

Saastamoinen J., (1972), “Contributions to the theory of atmospheric refraction”, Bulletin Géodésique, 105 (1), 279–298.

Seeber G., (2003), “Satellite Geodesy”, 2nd Edition, Walter de Gruyter.

Seepersad G., Bisnath S., (2014), “Challenges in Assessing PPP Performance”, Journal of Applied Geodesy, 8 (3), 205–222.

Shen P., Cheng F., Lu X., Xiao X., Ge Y., (2021), “An Investigation of Precise Orbit and Clock Products for BDS-3 from Different Analysis Centers”, Sensors, 21 (5), 1596.

Shi J., Gao Y., (2014), “A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods”, GPS Solutions, 18 (4), 519–528.

Subirana J. S., Zornoza J. M. J., Hernández-Pajares M., (2013), “Gnss Data Processing Volume I: Fundamentals And Algorithms”, ESA Communications.

Web 1, (2021), <https://www.navcen.uscg.gov>, (Erişim Tarihi: 21/04/2021).

Web 2, (2021), <https://www.glonass-iac.ru/en/index.ph>, (Erişim Tarihi: 23/04/2021).

Web 3, (2021), <https://www.gsc-europa.eu>, (Erişim Tarihi: 24/04/2021).

Web 4, (2021), <https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU>, (Erişim Tarihi: 25/04/2021).

Web 5, (2021), <https://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html>, (Erişim Tarihi: 25/04/2021).

Web 6, (2021), <https://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html>, (Erişim Tarihi: 25/04/2021).

Web 7, (2021), <https://en.wikipedia.org/wiki/IRNSS-1I>, (Erişim Tarihi: 26/04/2021).

Web 8, (2021), <https://www.igs.org/products>, (Erişim Tarihi: 18/04/2021).

Web 9, (2021), <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily>, (Erişim Tarihi: 14/05/2021).

Web 10, (2021), <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/mgex/>, (Erişim Tarihi: 14/05/2021).

Web 11, (2021), <http://ftp.aiub.unibe.ch/awg/>, (Erişim Tarihi: 14/05/2021).

Web 12, (2021), <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive.html>, (Erişim Tarihi: 01/06/2021).

Welch G., Bishop G., (1995), “An Introduction to the Kalman Filter”, Technical Report No: TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, USA.

Witchayangkoon B., (2000), “Elements of GPS Precise Point Positioning”, PhD Thesis, University of Maine, United States.

Wu J. T., Wu S. C., Hajj G. A., Bertiger W. I., Lichten S. M., (1993), “Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase Measurements”, *Manuscripta Geodaetica*, 18, 91–98.

Xiao G., Liu G., Ou J., Liu G., Wang S., Guo A., (2020), “MG-APP: an open-source software for multi-GNSS precise point positioning and application analysis”, *GPS Solutions*, 24 (3), 66.

Yang Y., Song L., Xu T., (2002), “Robust estimator for correlated observations based on bifactor equivalent weights”, *Journal of Geodesy*, 76 (6–7), 353–358.

Yang Yuanxi, Tang J., Montenbruck O., (2017), “Chinese Navigation Satellite Systems”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.

Yigit C. O., Gikas V., Alcay S., Ceylan A., (2014), “Performance evaluation of short to long term GPS, GLONASS and GPS/GLONASS post-processed PPP”, *Survey Review*, 46 (336), 155–166.

Zhang Q., Zhao L., Zhao L., Zhou J., (2018), “An Improved Robust Adaptive Kalman Filter for GNSS Precise Point Positioning”, *IEEE Sensors Journal*, 18 (10), 4176–4186.

Zhou F., Dong D., Li W., Jiang X., Wickert J., Schuh H., (2018), “GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations”, *GPS Solutions*, 22 (2), 33.

Zhu S. Y., Massmann F.-H., Yu Y., Reigber C., (2003), “Satellite antenna phase center offsets and scale errors in GPS solutions”, *Journal of Geodesy*, 76 (11–12), 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”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B3), 5005–5017.

