



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GÖZLEM ARALIĞININ GPS, GLONASS,
GALILEO VE BEIDOU STATİK PPP
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Abbas Qader SHAKOR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

**Ağustos-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖZLEM ARALIĞININ GPS, GLONASS, GALİLEO VE BEİDOU STATİK PPP ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Abbas Qader SHAKOR

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ

2022, 60 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT
Doç. Dr. Sermet ÖĞÜTCÜ
Doç. Dr. Salih ALÇAY**

GNSS gözlem aralıkları, belirli uygulamalar için düşük aralıktan yüksek aralığa (1-300 saniye gibi) ayarlanabilir. Bu çalışmada, 1-s, 5-s, 15-s ve 30-s örnekleme aralıklarının statik PPP (Precise Point Positioning)' nin yakınsama süresi ve konumlandırma doğruluğu üzerindeki etkisi 26 IGS-MGEX (International GNSS Service-Multi-GNSS Experiment) kullanılarak araştırılmıştır. İstasyonların 2020 yılında DOY (Day of Year) 95-116 arası üç haftalık dönem için 1-saniye gözlem aralıklı verileri seçilmiştir. Altı farklı GNSS sistemi -GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou-2, BeiDou-3 ve çoklu-GNSS kullanılarak statik PPP sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar, daha düşük gözlem aralıklarının, her bir GNSS için PPP yakınsama süresini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte, daha düşük gözlem aralıklarının, her bir GNSS için PPP konum belirleme doğruluğunu biraz düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca uydu saati enterpolasyon hatasının yörünge enterpolasyon hatası ile karşılaştırıldığında daha düşük gözlem aralıkları için konum doğruluğunun azalmasında daha etken olduğu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: BeiDou, High-rate, Galileo, GLONASS, GPS, MGEX, PPP

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATING THE EFFECT OF OBSERVATION INTERVAL ON GPS, GLONASS, GALILEO AND BEIDOU STATIC PPP

Abbas Qader SHAKOR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Sermet ÖĞÜTCÜ

2022, 62 Pages

Jury

**Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT
Assoc. Prof. Dr. Sermet OGUTCU
Assoc. Prof. Dr. Salih ALCAY**

GNSS observation intervals can be tuned from low rate to high rate (such as 300sec to 1sec) for the specific applications. In this study, the effect of 1-s, 5-s, 15-s, and 30-s sampling rates on convergence time and positioning accuracy of static PPP is investigated using 26 IGS-MGEX (International GNSS Service-Multi-GNSS Experiment) stations' high-rate data for three-week period (DOY: 95-116) in 2020. Six different GNSS constellations – namely, GPS-only, GLONASS-only, Galileo-only, BeiDou-2-only, BeiDou-3-only, and multi-GNSS (GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou-2/BeiDou-3) – are processed for static PPP. The results show that higher observation intervals accelerates the PPP convergence time significantly for each GNSS constellation. However, the result of positioning accuracy indicates that higher observation intervals slightly degrades the PPP converged positioning accuracy for each GNSS constellation. The results demonstrate that satellite clock interpolation error is mainly responsible for the accuracy degradation of the higher observation intervals compared with the orbit interpolation error.

Keywords: BeiDou, High-rate, Galileo, GLONASS, GPS, MGEX, PPP

ÖNSÖZ

Öncelikle, bizi bol bilgiyle kutsayan ve doğru yolda ilerlememize rehberlik eden Allah'ıma hamt ve şükürler olsun.

Doç. Dr. Salih Sermet Öğütçü danışmanıma yüksek lisans eğitimim süresince yol göstermesi, desteği ve teşviki için sonsuz teşekkürlerimi sunmaktayım. Bu tezin her aşamasında sabır ve hoşgörü göstererek bilgi, deneyim ve motivasyonu bana destek olmuştur.

Abbas Qader SHAKOR
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ	iv
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	14
1.1. Araştırmanın Amacı.....	15
2. GNSS SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ	17
2.1. GNSS' in Bölümleri.....	18
2.2. GNSS Sistemlerin Karşılaştırılması.....	24
2.3. GNSS Gözlemleri	24
2.3.1. Kod gözlemleri (Code pseudorange)	24
2.3.2. Taşıyıcı faz (Carrier phase).....	26
3. IGS ANALİZ MERKEZLERİ	27
3.1. IGS Organizasyonu.....	27
3.1.1. GFZ-MGEX.....	31
3.1.2. MGEX.....	31
4. HASSAS NOKTA KONUM BELİRLEME (PPP)	33
4.1. İyonosferden Bağımsız GNSS PPP Modeli.....	34
5. PPP'DE HATA KAYNAKLARI VE İŞLEME STRATEJİLERİ	36
5.1. Geleneksel Hata Kaynakları	36
5.1.1. Uydu yörüngesi ve saat hataları.....	36
5.1.1.1. GPS Hassas Ürünleri	37
5.1.1.2. GLONASS Hassas Ürünleri	37
5.1.2. İyonosferik Gecikme.....	38
5.1.3. Troposferik Gecikme	38
5.1.4. Alıcı anten faz merkezi	38
5.1.5. Alıcı saat ofseti	39
5.1.6. Multipath ve ölçüm gürültüsü.....	39
5.2. Özel Hata Kaynakları.....	39

5.2.1. Uydu ve alıcı anten faz merkez ofsetleri	40
5.2.2. Faz dönme etkisi (Phase wind up)	41
5.2.3. Görelilik etkisi	41
5.2.4. Dünya gelgiti.....	41
5.2.5. Okyanus gelgiti	42
5.2.6. Atmosfer yüklemesi.....	43
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	47
7.1. Yakınsama Süresinin Sonuçları	47
7.2. Konumlama Doğruluğunun Sonuçları	50
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
9. KAYNAKLAR	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$\epsilon_{P,IF}^{s,j}$: Code measurement noise
$\epsilon_{\emptyset,IF}^{s,j}$: Carrier phase measurement noise
$\emptyset_{IF,r}^{s,j}$: IF combinations of carrier phase
$\lambda_{IF}^{s,j}$: IF wavelength
λ_{IF}	: IF wavelength
λ_{WL}	: Wide-lane Wavelength
Δt_r	: Relativistic Effect
Δt_p	: Gravity Delay Error
c	: Speed of light (M/S)
dt_r	: Receiver clock offset (s)
$dt^{s,j}$: Satellite clock offset (s)
d_{trop}	: Tropospheric delay (M)
e_{\odot}	: unit vector pointing from the satellite to the Sun
\hat{e}_y	: perpendicular to the Sun and nadir direction
\hat{e}_z	: vector orients towards to the Earth
\hat{e}_z	: completes the right-handed coordinate system
$f1$: Frequencies (1.57542 GHz)
$f2$: Frequencies (1.2276 GHz)
G	: Gravitational Constant
$HD_{P,r,IF}$: Receiver hardware delay (M)
$HD_{P,IF}^{s,j}$: Satellite hardware delay (M)
$HD_{\emptyset,r,IF}$: IF carrier phase receiver hardware delay (M)
$HD_{\emptyset,IF}^{s,j}$: IF carrier phase satellite hardware (M)
M	: The Mass Of The Earth
\widetilde{N}_{IF}	: Float Ambiguity
$N_{r,IF}^{s,j}$: IF carrier phase initial ambiguity
$N1$: First Frequencies Float Ambiguities

N_2	: Second Frequencies Float Ambiguities
$P_{IF,r}^{s,j}$: IF combinations of code
ρ	: Pseudo range (M)
\vec{R}	: Satellite Position In The Inertial System
r	: satellite position in ECEF
r^s	: Distance Between The Satellite And The Earth Center
r_r	: Distance Between The Receiver And The Earth Center
r_r^s	: Distance From The Receiver To The Satellite
\vec{V}	: Satellite Velocity In The Inertial System

Kısaltmalar

AC	: Analysis Center
APC	: Antenna Phase Center
BDT	: BEIDOU Time
BEIDOU	: Chinese Global Navigation Satellite System
C/A	: Coarse / Acquisition
CDMA	: Code Division Multiple Access
cm	: Centimeter
CODE	: Switzerland (both IGS and MGEX ACs).
DCB	: Differential Code Bias
E	: East (Topocentric Coordinates)
ECEF	: Earth Centered-Earth Fixed
EKF	: Extended Kalman Filter
ESA	: Germany (IGS AC).
FDMA	: Frequency Division Multiple Access
GA	: Geoscience Australia
GALILEO	: European Global Navigation Satellite System
GFZ	: Germany (both IGS and MGEX ACs).
GLONASS	: Russian Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPS	: Global Position System
GREC	: GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU Constellations
ICB	: Inter Channel Bias

IERS	: International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGS	: International GNSS Service
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
JPL	: Jet Propulsion Laboratory USA (IGS AC).
MGEX	: Multi-GNSS Experiment
MIT	: Massachusetts Institute of Technology
N	: North (Topocentric Coordinates)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NRCan	: Natural Resources Canada, Canada (IGS AC).
PCO	: Antenna Phase Center Offset
PCV	: Antenna Phase Center Variation
POD	: Precise Orbit Determination
PPP	: Precise Point Positioning
RMSE	: Root mean square error
RTK	: Real Time Kinematic
U	: Up (Topocentric Coordinates)
UTC	: Coordinated Universal Time
WUHAN	: Wuhan University, China (MGEX AC).

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. GNSS Sistemlerinin Temel Özellikleri (Bahadur, 2017).....	24
Çizelge 3.1. IGS GPS uydu ürünleri (URL-2).....	29
Çizelge 3.2. MGEX ürünlerini analiz merkezleri.....	30
Çizelge 3.3. IGS analiz merkezleri.....	31
Çizelge 5.1. NGA tarafından verilen uydu anteni faz kayması değerleri.....	41
Çizelge 6.1. Statik PPP değerlendirme stratejisi	46
Çizelge 7.1. 30 saniyelik gözlem aralığı için ortalama yakınsama süreleri (birim: dakika)	47
Çizelge 7.2. ECEF koordinat sisteminde her bir GNSS sisteminin yörünge hızı	50
Çizelge 7.3. GPS-PPP karesel ortalama hata değerleri	50
Çizelge 7.4. GLONASS-PPP karesel ortalama hata değerleri	51
Çizelge 7.5. Galileo-PPP karesel ortalama hata değerleri	51
Çizelge 7.6. BeiDou-2 PPP karesel ortalama hata değerleri	51
Çizelge 7.7. BeiDou-3 PPP karesel ortalama hata değerleri	51
Çizelge 7.8. GREC2C3 PPP karesel ortalama hata değerleri.....	52
Çizelge 7.9. Yörünge enterpolasyon hataları (Birim: mm)	53
Çizelge 7.10. Saat enterpolasyon hataları (Birim: mm)	53

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. GNSS'in bölümleri (Jeffrey, 2010).....	17
Şekil 2.2. Sinyal seyahat süresinin belirlenmesi (Sanz Subirana ve ark 2013).....	25
Şekil 3.1. MGEX istasyonlarının dağılımı (URL-4)	28
Şekil 3.2. IGS izleme istasyonları (URL-4)	30
Şekil 5.1. Uydu anteni faz merkezi ofseti(Héroux ve Kouba, 2001).....	40
Şekil 6.1. Seçilen yüksek oranlı IGS-MGEX istasyonlarının coğrafi dağılımı.....	44
Şekil 7.1. 30 saniyelik örneklem aralığına göre 15 saniye, 5 saniye ve 1 saniye örneklem oranlarının yakınsama süresindeki kuzey bileşenine ait iyileştirmeleri (Birim: %).....	48
Şekil 7.2. 30 saniyelik örneklem aralığına göre 15 saniye, 5 saniye ve 1 saniye örneklem oranlarının yakınsama süresindeki doğu bileşenine ait iyileştirmeleri (Birim: %).....	48
Şekil 7.3. 30 saniyelik örneklem aralığına göre 15 saniye, 5 saniye ve 1 saniye örneklem oranlarının yakınsama süresindeki doğu bileşenine ait iyileştirmeleri (Birim: %).....	49

1. GİRİŞ

Hassas konum belirleme (PPP), özellikle son on yıldır yoğun ilgi görmektedir. PPP yöntemi, atmosferik ve iyonosferik çalışmalar (Ma ve Verhagen 2020; Wang ve ark. 2020) deformasyon izleme, tektonik ve deprem aktiviteleri (Mendoza ve ark. 2012, Paziewski ve ark. 2018; Alçay ve ark. 2019), jeofizik çalışmalar (Geng ve ark. 2017) ve zaman aktarımı (Ge ve ark. 2020) gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

IGS (International GNSS Service) ve diğer bazı kuruluşların hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerini üretmeye başlamasından bu yana, desimetre ile santimetre düzeyinde doğruluklarla PPP sonuçları elde edilmektedir. PPP yöntemi, hassas uydu yörünge ve saat düzeltmeleri ile tek veya çok frekanslı tek bir GNSS alıcısıyla kod (pseudorange) ve taşıyıcı faz gözlemlerinin (carrier phase) kullanıldığı mutlak konum belirleme yaklaşımıdır. Görelî konumlandırmaya kıyasla PPP'nin en önemli ve güçlü yönlerinden biri statik ve kinematik yöntem için tek bir alıcı kullanılarak mm ile cm düzeyinde konum doğruluğunun elde edilmesidir. Bu önemli avantaja karşı yöntemin bazı olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunların en önemlisi olan yakınsama süresi, PPP için hâlâ geliştirilmesi gereken bir konudur. Santimetre düzeyinde üç boyutlu konum doğruluğu elde etmek için yaklaşık 30 dakikalık gözlem süresi gereklidir (Liu ve ark. 2019). Yakınsama süresi, tam sayı belirsizlik çözümünün sabitlemesi (ambiguity resolution) (Laurichesse ve Blot 2016), çoklu GNSS gözlemlerinin yapılması (Psychas ve ark. 2020; Ögütçü 2020) ve iyonosferden bağımsız modellerin kullanılmasıyla iyileştirilmektedir (Zhang ve ark. 2013; Aggrey ve Bisnath 2019).

Düşük gözlem aralıklı (1 Hz veya daha yüksek frekanslı) GNSS konum belirleme, GNSS alıcılarının teknolojik olarak gelişmesiyle mümkün hâle gelmiştir. Yüksek frekanslı GNSS konumlandırma, GPS sismolojisinde (Xu ve ark. 2013), yapı sağlığı izleme çalışmalarında (Yiğit ve ark. 2021) ve dinamik yer değiştirmelerin tespitinde (Paziewski ve ark. 2018) etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Uydu yörünge ve saat hataları, görelî konum belirleme yönteminin aksine PPP yönteminde doğrudan istasyon koordinatlarına etki etmektedir. Gözlem örnekleme aralığı hassas uydu yörünge ve saat aralıklarından daha düşükse uydu yörünge ve saat enterpolasyonu zorunlu olmaktadır.

Uydu yörünge enterpolasyon hatası genellikle ihmal edilebilir boyutlardadır. Yousif ve El-Rabbany (2007), 15 dakika aralıklı IGS Final uydu yörüngesini kullanarak

GPS yörüngesinin enterpolasyon hatasını araştırmıştır. GPS yörünge enterpolasyonunun, milimetre altı seviye enterpolasyon hatasıyla elde edilebileceği sonucuna ulaşmıştır (Yousif ve El-Rabbany 2007).

Zheng ve Zhang (2020); GPS, GLONASS ve BeiDou (BDS-2) gerçek zamanlı yayın efemerisinin yörünge enterpolasyon hatasını analiz etmiştir. Yörünge enterpolasyon hatasının GPS, GLONASS ve BeiDou uydu sistemleri için 1-4 m'den daha az olduğunu ortaya koymuşlardır. GNSS saat hatalarında ise kısa bir süre içinde bile öngörülemeyen saat değişiklikleri olabilmektedir. Bu nedenle, yörünge enterpolasyonunun aksine saat hataları için yüksek dereceden polinom enterpolasyonu verimli bir şekilde kullanılamamaktadır. Gürültü karakteristiği nedeniyle, genellikle saat hatalarının enterpolasyonu için doğrusal enterpolasyon yöntemi kullanılmaktadır (Montenbruck ve ark. 2005).

1.1. Araştırmanın Amacı

PPP, GNSS kullanıcıları arasında yaklaşık son on senedir popüler bir yöntem olmuştur ve hassas ölçmeler, atmosferin izlenmesi ve modellenmesi, tektonik hareketlerin izlenmesi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, uzun yakınsama süresi hâlâ PPP'nin en büyük kısıtlamalarından biridir. Son yıllarda yeni GNSS sistemlerinin ortaya çıkması bu kısıtlamaların ortadan kaldırılması için iyi bir fırsat sunmaktadır. Literatürde daha yüksek örnekleme aralığının PPP konum belirleme doğruluğu ve yakınsama süresi üzerindeki etkisine ilişkin derinlemesine bir araştırma yapılmamıştır. Bu çalışmada statik PPP yöntemi ile GPS, GLONASS, BeiDou ve çoklu-GNSS kullanılarak gözlem aralığının, yakınsama süresi ve konumlandırma doğruluğu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı, altı farklı GNSS stratejisi kullanarak 1-s, 5-s, 15-s ve 30-s gözlem aralıklarının PPP yakınsama süresi ve konum belirleme doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmaktır.

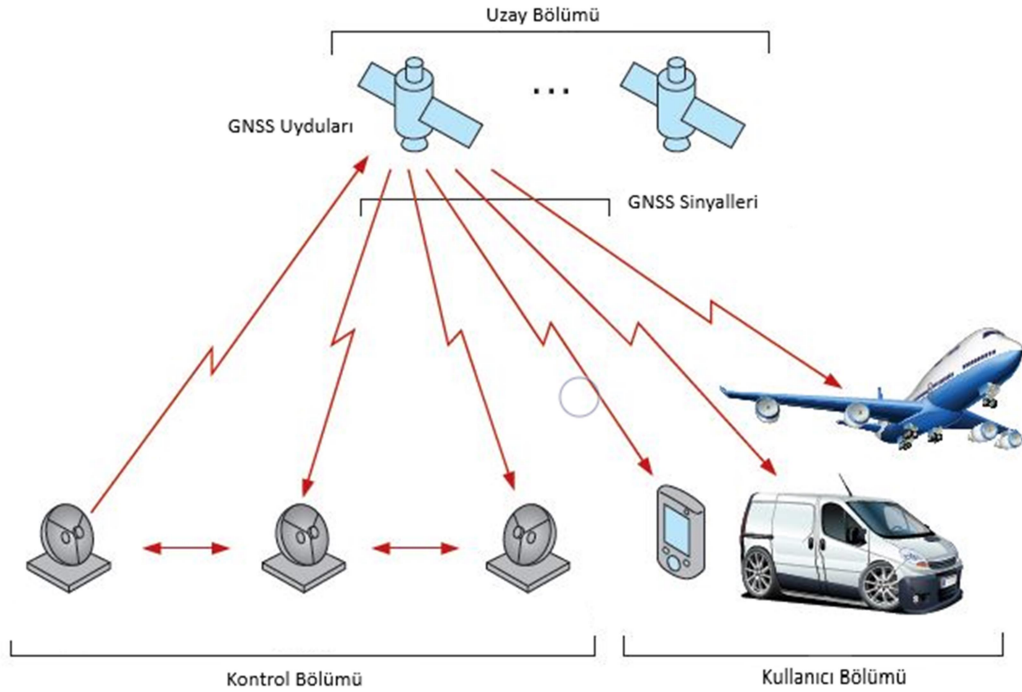
GNSS gözlem aralıkları, farklı uygulamalar için düşük aralıktan yüksek aralığa (300 saniye ila 1 saniye gibi) değişebilmektedir. Bu çalışmada, 26 tane IGS-MGEX (International GNSS Service-Multi-GNSS Experiment) istasyonu kullanılarak 1-s, 5-s, 15-s ve 30-s örnekleme aralıklarında statik PPP'nin yakınsama süresi ve konum belirleme doğruluğu üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Bunun için, IGS-MGEX istasyonlarının 2020'deki üç haftalık dönem için yüksek gözlem aralıklı, yalnız GPS, yalnız GLONASS, yalnız Galileo, yalnız BeiDou-2, yalnız BeiDou-3 ve çoklu GNSS

(GPS /GLONASS /Galileo /BeiDou-2 /BeiDou-3) olarak altı farklı GNSS stratejisi için statik PPP çözümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yakınsama süreleri dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



2. GNSS SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS), dünya üzerinde sürekli konum belirlemeye imkân sağlayan bir uydu navigasyon sistemini (örneğin GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou) ifade eden genel bir terimdir. Bir GNSS sistemi, uyduları içeren uzay bölümü, sistemin düzgün çalışmasından sorumlu olan kontrol bölümü (yer bölümü olarak da anılır) ile kullanıcılara konum, hız ve hassas zaman bilgisi sağlayan GNSS alıcılarını içeren kullanıcı bölümü şeklinde üç ana bölümden oluşur (Şekil 2.1) (Sanz Subirana ve ark 2013).



Şekil 2.1. GNSS'in bölümleri (Jeffrey, 2010)

GNSS, kullanıcıların küresel bir kapsama alanında üç boyutlu (3B) konumlarını belirlemelerini sağlayan sinyalleri sürekli olarak ileten, dünya yörüngesinde dönen uyduları içermektedir.

Uzun yıllar boyunca tam olarak çalışan tek GNSS sistemi, ABD Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) iken, Rus Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GLONASS) Aralık 2011'de tam olarak çalışır hâle getirilmiştir. Çin BeiDou sistemi 2020 yılında, Avrupa Galileo sistemi ise 2018 yılından beridir tam faaliyet kapasitesine geçmiş bulunmaktadır.

GNSS ile konum belirleme ilkesi, kullanıcının koordinatları bilinen en az dört GNSS uydusuna ait pseudorange gözlemleriyle temel bir geometrik problemin çözülmesine dayanmaktadır. Bu mesafeler ve uydu koordinatları, uydular tarafından iletilen sinyaller ve navigasyon verileri kullanılarak kullanıcının alıcısı tarafından belirlenir; elde edilen kullanıcı koordinatları birkaç metrelik bir doğrulukla hesaplanabilir. Bununla birlikte, daha gelişmiş teknikler kullanılarak santimetre düzeyinde konum bilgisi elde edilebilir.

Bir GNSS'te gözlemlenebilir temel ölçü, bir sinyalin uydudan (verici) alıcıya gitmesi için gereken süredir. Işık hızıyla çarpılan bu yolculuk süresi, uydu alıcı arasındaki sözde aralık ölçüsünü verir.

2.1. GNSS' in Bölümleri

2.1.1. Uzay Bölümü

Uzay bölümünün ana işlevleri, kod ve taşıyıcı faz sinyallerini oluşturmak ve iletmek, kontrol bölümü tarafından yüklenen navigasyon mesajını depolamak ve yayınlamaktır. Bu aktarımlar, uydulardaki oldukça kararlı atomik saatler tarafından kontrol edilir. GNSS uzay bölümleri, kullanıcıların herhangi bir zamanda dünya üzerindeki herhangi bir noktadan aynı anda en az dört uyduya gözlem yapabilmelerini sağlamak için yeterli sayıda uydudan oluşur (Sanz Subirana ve ark. 2013).

2.1.1.1. Uydu Sistemleri

Uydular kendilerini yörüngede tutmak, kontrol bölümü ile iletişim kurmak ve alıcılara sinyal göndermek için çeşitli yapı ve mekanizmalara sahiptir. Uydu saatleri, GNSS sistemlerinin kritik bileşenlerinden biridir. Bu nedenle uydular çok yüksek kararlılığa sahip atomik saatler (rubidyum, sezyum, hidrojen) ile donatılmıştır. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou sistemleri için uyduların özel bir açıklaması aşağıda sunulmuştur.

GPS uyduları, Dünya'yı çevreleyen altı eşit aralıklı yörünge düzleminde yer almaktadır. GPS uyduları, yeryuvarının hemen hemen her noktasından en az dört uydunun görülebilmesini sağlar. GPS uyduları, ekvatora göre 20.200 km yükseklikte ve 55° eğimde bir Orta Dünya Yörüngesine (MEO) yerleştirilmiştir. Yörüngeler neredeyse daireseldir; eksantrikliği 0,02'den az, yarı ana eksen 26.560 km ve nominal periyodu 11 saat 58 dakika ve 2 saniyedir (12 yıldız saat) ve geometri her yıldız gününde tekrarlanır.

GLONASS sistemi, her düzlemde eşit aralıklı sekiz uydu ile üç yörünge düzleminde yer alan 24 MEO uydusundan oluşur. Yörüngeler kabaca daireseldir; yaklaşık 64.8° eğimlidir ve 19.100 km yükseklikte, nominal periyodu 11 saat 15 dakika ve 44 saniye olup geometri her sekiz yıldız gününde bir tekrarlanır. Finansman sorunları nedeniyle 1996'da 24 olan uydu sayısı 2001'de 6'ya düşmüştür. Ağustos 2001'de Rus hükümeti uydu sistemini kurtarmayı ve sistemi modernleştirmeyi taahhüt ederek yeni finansmanı onaylamıştır. Böylece toplam 24 operasyonel uydu ve 2 uydusu bakımda olmak üzere Aralık 2011'de tekrar kullanıma sunulmuş ve tam uydu sistemi restore edilmiştir.

Tam Operasyonel Yetenek (FOC) aşamasında planlanan Galileo sistemi, 23.222 km yükseklikte ve yörünge eksantrikliği 0,002 olan 27 operasyonel ve 3 yedek MEO uydusundan oluşmaktadır. Ekvatora göre 56° lik bir açıyla eğimli üç yörünge düzleminde ve her birinde on uydu bulunmaktadır. Uydular her bir düzlemin etrafına yayılacak ve 10 yıldız günü içeren her 17 devirde bir geometriyi tekrarlayarak dünya yörüngesi yaklaşık 14 saat 4 dakika ve 45 saniye sürecektir. Bu uydu sistemi, nominal operasyon altında herhangi bir zamanda dünya yüzeyinin herhangi bir noktasından en az altı uyduyu ufuk çizgisi üzerinde 10° 'den fazla bir yükseklik ile garanti etmektedir.

BeiDou (Compass) uydu sistemi (Faz III), dairesel bir yörüngede 5 Geostationary Orbit (GEO) uydu ve 30 GEO olmayan uydu dâhil olmak üzere toplam 35 uydudan oluşacaktır. GEO olmayan uydular arasında yaklaşık 55° eğime sahip 3 Eğik Jeosenkron Uydu Yörüngesi (IGSO) ve yaklaşık 55° eğime sahip üç yörünge düzleminde 21.528 km yükseklikte yörüngede dönen 27 MEO uydusu bulunmaktadır. Yaklaşık 12 saat 53 dakikalık yörünge periyodu, her 7 yıldız gününde bir tekrar etmektedir. Yaklaşık 35.786 km yükseklikte yörüngede dönen GEO uyduları sırasıyla $58,75^\circ$ E, 80° E, $110,5^\circ$ E, 140° E, 160° E konumlarına yerleştirilmiştir. Aşama III'ten önceki Aşama II, Çin ve çevresindeki bölgeleri kapsayan 4 MEO, 5 GEO ve 5 IGSO uydusunu içermektedir. 10 uydu ile ilk Faz II işletim hizmeti 27 Aralık 2011'de başlamıştır.

2.1.1.2. GPS Uyduları

GPS uyduları bloklara ayrılmıştır. Her blok, genellikle belirli bir zaman aralığında fırlatılan bir dizi uydudan oluşmaktadır. Farklı blokların kısa bir açıklaması aşağıda verilmiştir.

Blok I uyduları, Navigasyon Geliştirme Uydularıdır. 1978 ve 1985 yılları arasında bu türden on bir uydu fırlatılmıştır. Seçici Kullanılabilirlik (S/A) kısıtlaması o zamanlar henüz uygulanmamıştır. Yaklaşık 845 kg ağırlığında ve bazılarının 10 yıl sürmesine rağmen planlanan ortalama ömürleri 4,5 yıldır. Kontrol merkezi ile herhangi bir temas kurmadan 3 veya 4 gün boyunca konumlandırma hizmeti verebilmekteydi.

Blok II ve IIA uyduları ise operasyonel uydulardır. Bunlar, 1989'dan itibaren fırlatılan ve birçoğu hâlen faaliyette olan toplam 28 uydudan oluşmaktadır. Her biri yaklaşık 1.500 kg ağırlığında ve 7.5 yıllık planlanmış ortalama ömürleri vardır. 1990 yılından bu yana, karşılıklı iletişim yeteneğine sahip geliştirilmiş bir versiyon olan Block IIA (gelişmiş) kullanılmaktadır. Kontrol bölümü ile iletişim kurmadan 180 gün boyunca konumlandırma hizmeti verebilirler. Ancak normal çalışma modunda günlük olarak iletişim kurmaları gerekmektedir. GPS uydu sistemi, Mart 1994'te 24 Blok II/IIA uydularının yörüngelerinde faaliyet göstermesiyle Tam Operasyonel Kabiliyete (FOC) ulaşmıştır ancak FOC 17 Temmuz 1995'e kadar ilan edilmemiştir (Sanz Subirana ve ark 2013).

Blok IIR uyduları, yedek operasyonel uydulardır. Bu uydular, kademeli olarak bozuldukları veya amaçlanan tasarım ömürlerini aştıkları için II/IIA serisinin yerini alacak şekilde üretilmiştir. Her biri yaklaşık 2.000 kg ağırlığındadır ve planlanan ortalama ömürleri 10 yıldır. Bu uydular, yörüngelerini otonom olarak belirleme ve kendi navigasyon mesajlarını üretme yeteneğine sahiptir. Aralarındaki mesafeleri ölçebilir ve gözlemleri diğer uydulara veya kontrol bölümüne iletebilirler. Bu kategorideki bir uydu, tamamen geliştirildiğinde, kontrol bölümünden herhangi bir destek almadan ve efemeris doğruluğunda herhangi bir bozulma olmadan yaklaşık altı ay boyunca faaliyet gösterebilmelidir.

Blok IIR-M uyduları, modernize uydulardır. IIR-M serisi uydular, IIR serisinin yükseltilmiş versiyonlarıdır ve GPS uydu sisteminin omurgasını tamamlarlar. Bunlara yeni bir askeri sinyal ve daha sağlam sivil sinyal L2C dâhildir. İlk Block IIR-M uydusu 26 Eylül 2005'te fırlatılmıştır.

IIF, takip operasyonel uydularını Engelleyen ilk uydu (SVN62) 28 Mayıs 2010'da fırlatılmıştır. IIF uyduları, can güvenliği uygulamaları için korunan bir frekans bandında üçüncü bir sivil sinyalin (L5) eklenmesiyle IIR-M serisinin yeteneklerini genişletmektedir. Teorik olarak ortalama ömürleri yaklaşık 15 yıldır ve ataletsel navigasyon sistemlerine sahiptirler.

Blok III Uyduları ise birlikte çalışabilirliği geliştirerek navigasyon yeteneklerinde önemli gelişmeler sağlayacaktır. Ayrıca L1 bandında (L1C) dördüncü sivil sinyali sağlayacaklardır.

GPS uyduları yörünge düzlemindeki konumları, NASA referans numaraları, atanan Sözde Rastgele Gürültü (PRN) kodları, Uzay Aracı Numaraları (SVN) vb. farklı şekillerde tanımlanır.

2.1.1.3. GLONASS uyduları

GLONASS (Urgan) uydularının ilk prototipleri Ekim 1982'de yörüngeye yerleştirilmiştir ve 1982-1985 yılları arasında 18 tane uydu fırlatılmıştır. Bu prototip uydular Blok-I olarak adlandırılmıştır.

Birinci nesil olan ilk gerçek GLONASS uyduları 1985 ve 1990 yılları arasında fırlatıldı. Bunlar Bloklar arasında farklı tasarım ömürleri olan farklı blok araçlara (Blok IIa, IIb ve IIv) ayrılırlar. Bu ömürler, Blok IIb'nin iki yıllık tasarımından Blok IIv' nin üç yıllık tasarımına kadar değişmekteydi ancak birçoğu bunu 4,5 yıla kadar aşmıştır. Bu uyduların tümü, yaklaşık 1.250 kg'lık bir kütle ile stabilize edilmiş üç eksenlidir ve sistem içinde yer değiştirmeye izin vermek için temel bir tahrik sistemi ile donatılmıştır. Önceki prototiplere kıyasla zaman ve frekans standartları iyileştirilmiş ve frekans kararlılığı artırılmıştır.

Glomass-M, '-M'nin modernize edilmiş veya değiştirilmiş hâli olan ikinci nesil uydulardır. 1990'dan itibaren geliştirilmiş olup ilk uydu 2001'de yörüngeye gönderilmiştir. Glomass-M uyduları, roket sistemindeki ve saat kararlılığındaki iyileştirmeler sayesinde yedi yıllık daha uzun bir tasarım ömrüne sahiptir. Bu, birinci nesil uzay aracının 2-3 yıllık ömrüne kıyasla kullanım ömründe büyük bir artıştır ancak yine de NAVSTAR-GPS'nin 10 yıllık ortalama ömrünün altındadır. Bu uyduların kütlesi yaklaşık 1.480 kg'dır. 2.4 m çapında, 3.7 m yüksekliğinde ve 7.2 m'lik çift güneş dizileri vardır. Ayrıca hassas yörünge belirleme ve jeodezik araştırma için köşe küp lazer reflektörleri de taşırlar. Bu uyduların dikkat çekici bir özelliği, sivil kullanıcıların iyonosferik kırılmayı elemine etmesine olanak tanıyan G2 bandına ikinci bir sivil sinyalin eklenmesidir.

Glomass-K (veya Urgan-K) olarak bilinen uydular üçüncü nesil uydulardır. 10-12 yıllık artırılmış bir kullanım ömrü tasarımına ve yalnızca 750 kg'lık bir azaltılmış ağırlığa sahiptirler (Soyuz-2-1a roketlerinde Plesetsk Cosmodrome'dan çiftler hâlinde fırlatılmalarına izin verir). Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA) tekniğini kullanan

G1 ve G2 bantlarındaki sivil sinyaller arasında yeni G3 bandındaki sivil uygulamalar için yeni Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA) sinyalini sağlarlar ve ayrıca şunları içerirler: Arama ve Kurtarma (SAR) özelliği. İlk Glonass-K uydusu 26 Şubat 2011'de fırlatılmıştır.

Glonass uydu sistemi, 4 Kasım'da (3. Yuvaya) fırlatılan uydunun Moskova saati ile 11:42'de operasyonel olarak ilan edilmesinden sonra 8 Aralık 2011'de FOC'a ulaştı. 24 işletimsel uydusu ile Glonass uydu sistemi, Dünya yüzeyinin tam kapsamını sağlamaktadır (Sanz Subirana ve ark 2013).

2.1.1.4. Galileo uyduları

2005 ve 2008 yılları arasında Galileo yörünge içi doğrulama (GIOVE) uyduları olarak GIOVE-A ve GIOVE-B adında iki deneysel uydu fırlatıldı. Görevleri; Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) ile Galileo frekanslarını güvence altına almak ve sürdürmek, Galileo operasyonel uydu sisteminde kullanılacak teknolojileri doğrulamak, MEO yörünge tipinde, çevreyi izlemek ve kullanıcı ekipmanının geliştirilebilmesi için Galileo sinyalleri üretmek gibi birkaç amaca hizmet etmekte. Her iki uydu da yörüngede yedek olarak bulunmaktadır ve görev hedeflerini güvence altına almak için paralel olarak inşa edildi ve her ikisi de tamamlayıcı yetenekler sağladı.

GIOVE-A, Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL) tarafından inşa edildi ve 28 Aralık 2005'te başarıyla fırlatıldı. Yaklaşık 600 kg'lık bir kütle ve iki adet yedekli küçük boyutlu rubidyum atomik saate ve günde 10 ns stabiliteye sahip olacak şekilde üretildi. GIOVE-B'nin piyasaya sürülmesinden önce ve sonra Galileo'nun yörünge içi doğrulamasının sürekliliğini sağlamak için 27 aylık nominal ömrü uzatıldı.

GIOVE-B, Astrium ve Thales Alenia Space tarafından inşa edildi ve 27 Nisan 2008'de başarıyla fırlatıldı. Kütle ve tahmini ömrü GIOVE-A'ninkine benzer ancak daha gelişmiş bir taşıma kapasitesine sahiptir. Günde 10 ns kararlılığa sahip iki küçük rubidyum atom saati ve daha yüksek kararlılığa sahip farklı bir atomik saat türü (günde 1 ns) olan iki pasif hidrojen maser saati vardır (Sanz Subirana ve ark 2013).

Galileo uydu sistemi iki ana aşamaya göre yapılandırılmıştır. Bu iki aşama Yörünge Doğrulama (IOV) ve Tam Fonksiyonel Çalışma Kabiliyeti (FOC) olarak isimlendirilmiştir.

IOV aşaması, bir çekirdek uydu sisteminin ve ilgili yer bölümünün kapsamlı yörünge içi/yer üstü testleri ve operasyonları yoluyla Galileo; uzay, yer ve kullanıcı

bölümlerini nitelendirmeyi amaçlamaktadır. Bu aşamada, dört operasyonel uydu, hâlihazırda yörüngede olan iki deneysel uyduyu (GIOVE-A ve GIOVE-B) tamamlar.

İlk iki operasyonel Galileo uydusu, 21 Ekim 2011'de bir Soyuz roketi tarafından fırlatıldı ve ilk yörünge düzlemine yerleştirildi. Sonraki iki uydu 12 Ekim 2012'de fırlatıldı ve ikinci yörünge düzlemine yerleştirildi. Her uydu yaklaşık 700 kg kütleyle sahiptir ve hassas navigasyon verileri yayınlamak için iki rubidyum ve iki pasif hidrojen maser saatini güçlü bir verici ile birleştirir.

Tam Fonksiyonel Çalışma Kabiliyeti (FOC) aşaması, uzay ve yer altyapılarının tamamlanmasını ve sistemin tam olarak kullanılabilir olmasını kapsamaktadır. Başlangıçta 4 adet IOV uydusu olmak üzere 18 uydunun çalışabilir olması planlanmıştır (Lou ve ark. 2020). Galileo uydu sistemi günümüzde 22 tanesi kullanılabilir olan 26 uydudan oluşmaktadır (Kuang ve ark. 2021).

2.1.1.5. BeiDou Uyduları

BeiDou uydularının jeostatik Beidou-G, jeosenkron Beidou-IGSO ve MEO Beidou-M şeklinde üç çeşidi vardır. Bunlar sekiz yıllık bir tasarım ömrüne sahiptir ve CASC (China Aerospace Science and Technology Corporation) tarafından inşa edilen üç eksenli stabilize DFH-3 (DongFangHong) platformunu temel alırlar.

Yörüngedeki ilk BeiDou Faz II uydusu, yerleşik yükü test etmek için 14 Nisan 2007'de başlatılan deneysel BeiDou-M uydusu olarak fırlatılmıştır. Aralık 2011'in sonlarına doğru Çin, 4 BeiDou-G ve 5 BeiDou-IGSO uydusunu yörüngeye yerleştirmiştir.

27 Aralık 2011'de, 10 yörüngeli uydu ile Beidou sistemi, Çin'e ve çevre bölgelerine (bölgesel hizmet) ilk Aşama II işletim hizmetini resmen sağlamaya başlamıştır. 2012 yılı sonu itibarıyla yörüngede 5 GEO, 4 MEO ve 5 IGSO navigasyon uydusu bulunmaktadır (BeiDou-SIS-ICD, 2012) (Sanz Subirana ve ark 2013). Bölgesel hizmet veren BDS-2'den sonra, BeiDou sistemini tamamlamak ve küresel hizmet sunmak amacıyla BDS-3 geliştirilmeye başlanmıştır. Haziran 2020'de son GEO uydusunun fırlatılmasıyla BeiDou uydu sayısı tamamlamıştır. BDS-3 24 MEO, 3 IGSO ve 3 GEO uydularından oluşmaktadır (CSNO, 2020).

2.2. GNSS Sistemlerin Karşılaştırılması

GPS, GLONASS, Galileo ve BDS temelde karşılaştırılabilir sistemlerdir ancak aralarında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 2.1’de bu sistemlerin bazı önemli özellikleri ve ana farklılıkları özetlenmiştir (Bahadur, 2017).

Çizelge 2.1. GNSS Sistemlerinin Temel Özellikleri (Bahadur, 2017)

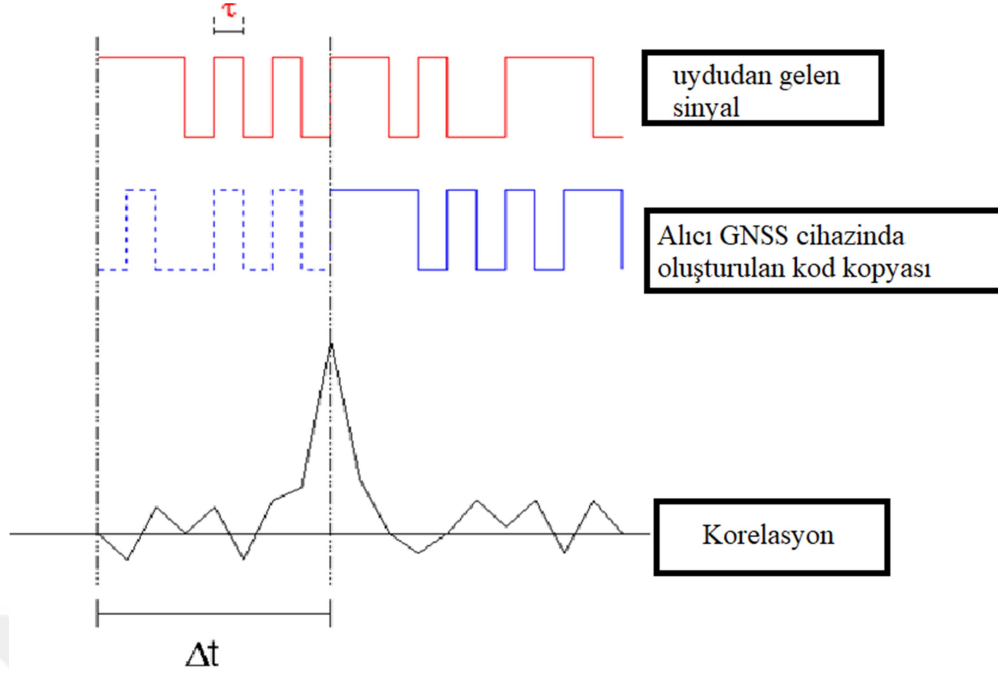
PAREMETRE	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
Ülke	ABD	Rusya	Avrupa	Çin
Uydu sayısı	31	24	30	35
Yörünge sayısı	6	3	3	3
Yörünge yarıçapı (km)	26508	25510	29601	27878
Eğim	55°	64:8°	56°	55°
Yörünge periyodu	11h58m	11h16m	14h04m	12h53m
Sinyal ayırma tekniği	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA
Sinyal frekansı (MHz)	L ₁ :1575.42 L ₂ :1227.60 L ₅ :1176.45	G ₁ :1602 G ₂ :1246 G ₃ :1202	E ₁ :1575.42 E _{5a} :1176.45 E _{5b} :1207.14 E ₆ :1278.75	B ₁ :1561.098 B ₂ :1207.14 B ₃ :1268.52
Koordinat sistemi	WGS-84	PZ-90	GTRF	CGCS
Zaman ölçeği	GPS Zamanı	GLONASS Zamanı	GST	BDT
Yeryüzünden yükseklik (km)	20200	19130	23222	MEO GEO/IGSO 21528 35786

2.3. GNSS Gözlemleri

Genel olarak GNSS gözlemleri, kod (Code Pseudorange) ve taşıyıcı faz (Carrier Phase) olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.3.1. Kod gözlemleri (Code pseudorange)

GNSS temel gözlemi, sinyalin uydu anteninin faz merkezinden (yayımla zamanında/ emission time) alıcının faz merkezine (alma zamanında/ reception time) ulaşması için gereken süre ΔT 'dir. Işık hızıyla çarpılan bu değer uydu-alıcı arasındaki kod gözlemini (pseudorange) verir. GNSS sinyalleri, kullanıcıların sinyal seyahat süresini (ΔT) hesaplamasını sağlamak için değişen kodlar içerir. Alıcı, uydudan alınan kodu (P) alıcıda oluşturulan bir kopyası ile ilişkilendirerek ΔT 'yi belirler. Böylece bu kopya maksimum korelasyon elde edilene kadarki sürede (ΔT) hareket ettirilir (URL-1).



Şekil 2.2. Sinyal seyahat süresinin belirlenmesi (Sanz Subirana ve ark 2013)

Uydu ile alıcı arasındaki saat senkronizasyonunun olmaması ve sinyal iletimi üzerindeki atmosferik etkiler nedeniyle gerçek uydu-alıcı uzaklığından önemli ölçüde sapılmaktadır. GNSS kod gözlemleri şu şekilde yazılabilir.

$$P_{IF,r}^{s,j} = \rho + c * (dt_r - dt^{s,j}) + d_{trop} + HD_{P,r,IF} - HD^{P,s,j,IF} + \epsilon_{P,IF}^{s,j} \quad (2.1)$$

Üst simge s ve j uydu ile GNSS sistemini göstermekte (G: GPS, R: GLONASS, E: Galileo ve C: BeiDou), alt simge r alıcıyı belirtmektedir. $P_{IF,r}^{s,j}$, kod gözlemlerinin IF kombinasyonlarıdır. ρ , metre biriminde yaklaşık uydu-alıcı mesafesidir. c saniyede metre biriminde ışık hızıdır. dt_r saniye biriminde alıcının saat hatasıdır. $dt^{s,j}$ saniye biriminde uydu saat hatasıdır. d_{trop} metre biriminde troposferik gecikmedir. $HD_{P,r,IF}$ metre biriminde IF alıcı donanım kod gecikmesidir (Kouba ve Héroux 2001). $HD^{P,s,j,IF}$ metre biriminde IF uydu donanım kod gecikmesidir. $\epsilon_{P,IF}^{s,j}$ IF kod ölçü gürültüsüdür (Xiao ve ark. 2019).

2.3.2. Taşıyıcı faz (Carrier phase)

Kod gözlemleri gibi, taşıyıcı faz da uydu ile alıcı arasındaki mesafeyi elde etmek için kullanılır. Taşıyıcı faz gözlemi, kod gözleminden çok daha doğrudur ancak faz başlangıç belirsizliği problemi vardır. GNSS taşıyıcı faz gözlemleri şu şekilde yazılabilir.

$$\phi_{IF,r}^{s,j} = \rho + c * (dt_r - dt^{s,j}) + d_{trop} + \lambda_{IF}^{s,j} * N_{r,IF}^{s,j} + HD_{\phi,r,IF} - HD_{\phi,s,j,IF} + \epsilon_{\phi,IF}^{s,j} \quad (2.2)$$

$\phi_{IF,r}^{s,j}$ taşıyıcı faz gözlemlerinin IF kombinasyonları ve $\lambda_{IF}^{s,j}$ IF dalga boyudur $N_{r,IF}^{s,j}$ IF taşıyıcı faz başlangıç belirsizliğidir, $\epsilon_{\phi,IF}^{s,j}$, IF fazın ölçüm gürültüsüdür (Leick ve ark 2015).

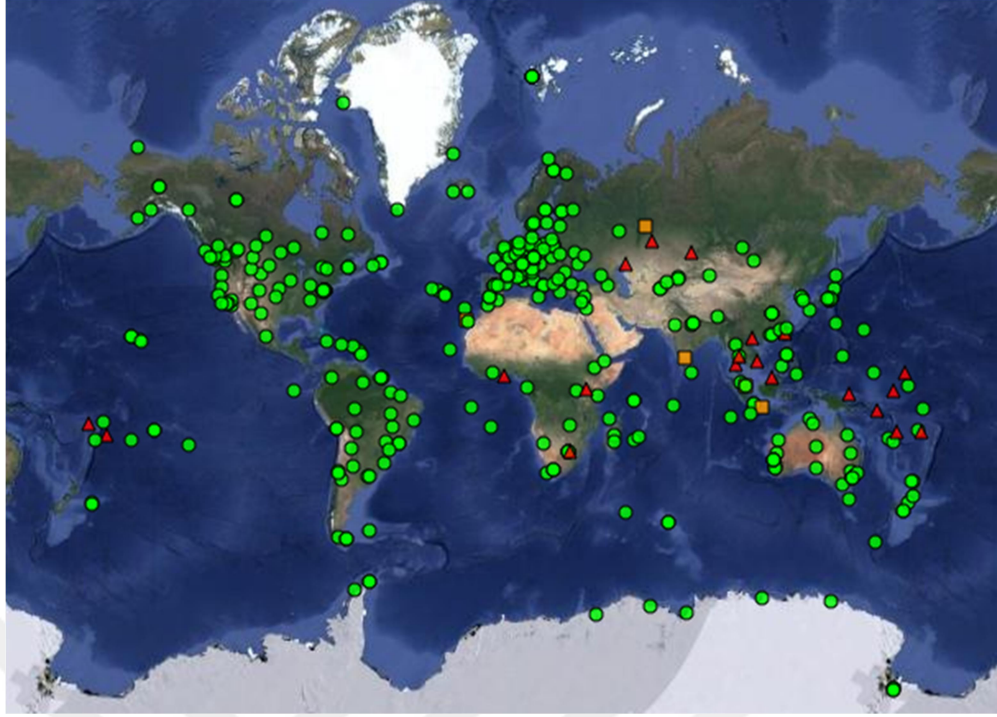
3. IGS ANALİZ MERKEZLERİ

PPP tekniği ile yüksek doğrulukta konum bilgisi elde etmenin temeli, IGS gibi kuruluşların son derece hassas uydu yörünge ve saat düzeltme ürünlerinin kullanılmasıdır.

3.1. IGS Organizasyonu

Uluslararası GNSS Hizmeti (International GNSS Service IGS), 80 ülkede dünya çapında 200'den fazla acenteden oluşan gönüllü bir federasyon ve çeşitli uygulamaları desteklemek için kaynakları ve verileri bir araya toplayan 370'ten fazla izleme istasyonundan oluşan küresel bir ağdır. IGS, 1993 yılında Uluslararası Jeodezi Birliği (IAG) tarafından resmen tanındı ve resmi olarak 1 Ocak 1994'te rutin faaliyetlerine başladı. Hâlihazırda IGS, yer bilimleri araştırmaları, çok disiplinli uygulamalar ve eğitimi desteklemek için en yüksek kalitede GNSS verileri ve ürünleri sağlamaktadır. IGS, ITRF' in iyileştirilmesine katkıda bulunmakta ve tektonik plakaların hareketini izlemeye, deniz seviyesi değişimlerini değerlendirmeye, hassas zaman aktarımı gerçekleştirmeye ve LEO uyduları için doğru yörüngeleri belirlemeye yardımcı olmaktadır (Choy 2009).

IGS, bilimsel ve mühendislik topluluklarına hassas uydu yörüngesi, saat ürünleri ve ayrıca veriler sağlamak adına GNSS için küresel bir izleme istasyonu ağını sürdüren 200'den fazla bireysel kurum ve kuruluştan oluşan gönüllü bir kuruluştur. Yakın zamana kadar sadece GPS ve GLONASS hassas yörünge ve saat ürünleri yayınlanmaktaydı. Galileo ve BeiDou gibi uydu sistemlerinin gelişimi ile IGS, bu yeni sistemler için de veri ve hassas uydu yörünge ve saat ürünleri sağlamak amacıyla Çoklu GNSS Deneyimini (MGEX) başlattı. Bu amaçla, gönüllü kurum ve kuruluşların katkılarıyla dünya çapında yeni bir çoklu GNSS izleme istasyonları ağı kuruldu. Şekil 3.1'de 2016 itibarıyla MGEX istasyon dağılımını ve desteklenen uydu sistemleri verilmektedir.



Şekil 3.1. MGEX istasyonlarının dağılımı (URL-4)

IGS, 1994 yılından bu yana CODE (Center for Orbit Determination in Europe), GFZ (GeoForschungsZentrum) ve JPL (Jet Propulsion Laboratory) dâhil olmak üzere çeşitli analiz merkezlerinin ayrı ürünleri birleştirerek oluşturulan hassas GPS uydu ürünlerini rutin olarak sağlamaktadır. Ürünler daha iyi doğruluk, daha kısa gecikme süresi ve daha fazla çeşitliliğe sahip olacak şekilde gelişmektedir. Çizelge 3.1’de IGS tarafından yayınlanan GPS uydu ürünlerinin kalitesinin bir özeti verilmektedir. Son ürün en yüksek doğruluğa sahiptir ancak 12 ila 18 günlük bir gecikmeyle yayınlanmaktadır. Hızlı ürünler ise son ürünlere göre birkaç on saatlik daha kısa gecikme süresine sahiptir. Ancak saat örnekleme aralıkları hızlı ürünlerde 30 saniyeden 5 dakikaya çıkarılmıştır. 24 saatlik Ultra-hızlı (gözlemlenen yarı) ürünler, sadece birkaç saatlik gecikme süresinde yayınlanmaktadır ancak bunların doğruluğu daha düşük ve örnekleme aralığı 15 dakikaya kadardır. Son olarak, 24 saatlik Ultra-hızlı (kestirilen yarı) ürünler gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilir ve uygu yörüngeleri yaklaşık 5 cm civarında yeterince yüksek bir doğrulukta elde edilebilir ancak saat bilgisi 3 ns civarındadır ve çoğu jeodezik uygulamalar için oldukça düşüktür (Geng 2011).

PPP yönteminde, kullanılan gözlem aralığı, uydu yörünge ve saat ürünlerinin zamansal çözünürlüğünden daha yüksek ise, GNSS ölçülerinin gözlem aralığındaki değerlerinin bulunabilmesi için enterpolasyon yapılması gerekir.

Çizelge 3.1. IGS GPS uydu ürünleri (URL-2)

Ürünler		Doğruluk	Gecikme	Güncelleme	Örnek Aralığı
Broadcast	Yörüngeler	~100 cm	real time	—	günlük
	Uydu Saatleri	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultra-hızlı (kestirilen yarı)	Yörüngeler	~5 cm	real time	03, 09, 15, 21 UTC	15 dk
	Uydu Saatleri	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultra-hızlı (gözlemlenen yarı)	Yörüngeler	~3 cm	3 – 9 saat	03, 09, 15, 21 UTC	15 dk
	Uydu Saatleri	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Hızlı	Yörüngeler	~2.5 cm	17 – 41 saat	her gün 17 UTC	15 dk
	Uydu ve İstasyon Saatleri	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 dk
Son ürün	Yörüngeler	~2.5 cm	12 – 18 gün	her Perşembe	15 dk
	Uydu ve İstasyon Saatleri	~75 ps RMS ~20 ps SDev			Uydu : 30s İstasyon: 5 dk

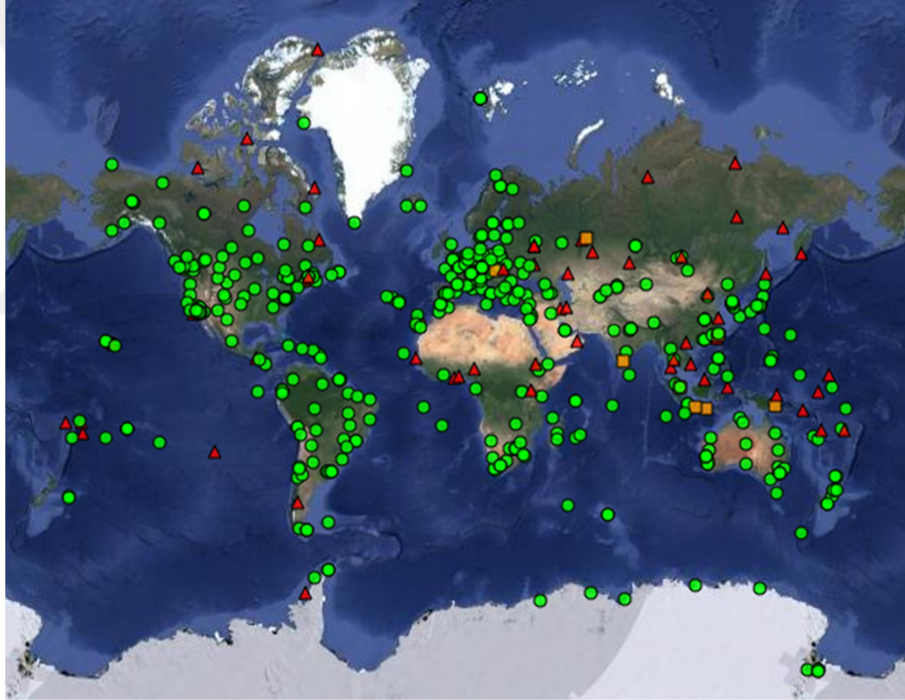
MGEX istasyonlarının gözlemlerini kullanarak çoklu GNSS hassas yörünge ve saat ürünleri aşağıda verilen beş analiz merkezi tarafından hesaplanmaktadır (URL-3):

- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Collecte Localisation Satellites (CLS)
- Center for Orbit Determination in Europe (CODE)
- GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
- Information and Analysis Center (IAC)
- Shanghai Observatory (SHAO)
- Wuhan University

Haziran 2020 itibarıyla bu analiz merkezleri tarafından sağlanan ürünlere genel bir bakış Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.2. MGEX ürünlerini analiz merkezleri

Kurum	Kısaltma	Ülke / Bölge
Natural Resources Canada	EMR	Kanada
Wuhan University	WHU	Çin
Geodetic Observatory Pecny	GOP-RIGTC	Çek Cumhuriyeti
Space geodesy team of the CNES	GRG	Fransa
European Space Agency/ESOC	ESA/ESOC	Almanya
GeoForschungsZentrum	GFZ	Almanya
Center for Orbit Determination in Europe	CODE	İsviçre



Şekil 3.2. IGS izleme istasyonları (URL-4)

Sürekli çalışan GNSS istasyonlarından gelen veriler, dört küresel veri merkezinde ve altı bölgesel veri merkezinde arşivlenmektedir. Bu on analiz merkezi, GNSS verilerini düzenli olarak değerlendirir ve resmi IGS birleşik ürünlerini üreten Analiz Merkezi Koordinatörüne (ACC) ürünlerle birlikte katkıda bulunur. Şu anda, IGS ACC işlevleri, GA (Geoscience Australia) ve MIT (Massachusetts Institute of Technology) tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu IGS analiz merkezleri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. IGS analiz merkezleri

Kurum	Kısaltma	Ülke / Bölge
Natural Resources Canada	EMR	Kanada
Wuhan University	WHU	Çin
Geodetic Observatory Pecny	GOP-RIGTC	Çek Cumhuriyeti
Space geodesy team of the CNES	GRG	Fransa
European Space Agency/ESOC	ESA/ESOC	Almanya
GeoForschungsZentrum	GFZ	Almanya
Center for Orbit Determination in Europe	CODE	İsviçre
Jet Propulsion Laboratory	JPL	ABD
Massachusetts Institute of Technology	MIT	ABD
NOAA/National Geodetic Survey	NGS	ABD
Scripps Institution of Oceanography	SIO	ABD
U.S. Naval Observatory	USNO	ABD

Merkez Büro, Uluslararası Yönetim Kurulu tarafından belirlenen politikalara göre IGS' in günlük yönetiminden sorumludur.

IGS verileri internet üzerinden kullanıcılara ücretsiz olarak sunulmaktadır. Alıcıdan Bağımsız Değişim (Receiver-Independent Exchange RINEX) formatında GPS ve GLONASS ham uydu gözlemlerini sağlamanın yanı sıra, IGS çok çeşitli jeodezik ve jeofizik araştırma ve uygulamaları desteklemek için çeşitli ürünlere ve disiplinler arası uygulamalara katkıda bulunur.

3.1.1. GFZ-MGEX

IGS analiz merkezi, uyduların tutarlı ve kesin yörüngelerini ve saat düzeltmelerini üretir. Bu analiz merkezinden biri olan GFZ, küresel navigasyon uydu sistemleri GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou ve QZSS uydularının yörünge ve saat bilgilerini gerçek zamanlı ve post-process olarak üretmektedir.

3.1.2. MGEX

IGS MGEX, 2016 yılında mevcut tüm GNSS sinyallerinin (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS ve NavIC) izlenmesini, derlenmesini ve analizini sağlamak amacıyla deneysel bir aşama olan "pilot proje" olarak ilan edildi. MGEX sürekli gözlem yapan GNSS istasyonları, çok frekanslı ve çoklu-GNSS veri toplama yeteneğine

sahiptir. Tüm uydu sistemleri için hassas uydu yörünge verileri ile IGS' in ürün portföyünü genişleten veriler sağlamaktadır. Bu ürünlerin çoğu neredeyse gerçek zamanlı olarak mevcuttur ve bir dizi farklı PPP hizmetinde kullanılmaktadır.



4. HASSAS NOKTA KONUM BELİRLEME (PPP)

IGS ve diğer bazı kuruluşların hassas yörünge ve uydu saat düzeltmelerini ortaya koymasıyla, referans (base) ve gezici (rover) istasyonlarının eş zamanlı gözlem yapmalarına gerek kalmadan tek bir alıcıyla yüksek duyarlıklı konum belirleme yapılabilmektedir. Kod ve taşıyıcı faz gözlemleri kullanan bu yöntem, “hassas nokta konum belirleme” olarak bilinir. Çift frekanslı alıcılara iyonosferden bağımsız kod ve taşıyıcı faz gözlemleri kullanılarak PPP yöntemi Zumberge tarafından 1997’de ortaya konulmuş, Kouba ve Heroux bilim insanları tarafından 2000’de geliştirilmiştir. 1997’de seçimli doğruluk erişimi (SA: Selective Availability) döneminde, IGS hassas yörünge ve uydu saati düzeltmeleri üretmiştir ancak SA nedeniyle bu düzeltmeleri kısa aralıklarla, doğrulukta ciddi bir bozulma olmadan enterpolasyon yapmak imkânsız olmuştur (Abdel-Salam 2005).

Zumberge, IGS ağının bir alt kümesini kullanarak yörünge ve saat verilerini küçük aralıklarla hesaplamak için bir yöntem bulmuştur. Daha sonra bu hassas verileri, troposferik gecikme gibi diğer parametrelerle birlikte alıcı koordinatlarını hesaplamak için post process yöntemiyle kullanmıştır. Saat ve yörünge için sırasıyla 30 ve 900 saniye aralıklarla hassas veriler kullanmıştır. Bu tekniğe dayalı olarak iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çift frekanslı alıcılara iyonosferden bağımsız kod ve taşıyıcı faz gözlemlerini kullanan PPP tekniği ayrıntılı olarak ilk defa Kouba ve Heroux (2000)’ de anlatılmıştır (Abdel-Salam 2005).

Herhangi bir konum belirleme yönteminde olduğu gibi PPP yöntemi de GNSS gözlemleri, düzeltme modelleri ve dengeleme prosedürü şeklinde üç bileşenden oluşur. Temel gözlemler, genellikle iyonosferden bağımsız bir gözlem oluşturmak için kombine edilen ham kod ve taşıyıcı faz gözlemleridir. Düzeltme modelleri, istenmeyen etkileri ortadan kaldırmak veya azaltmak için dikkate alınmalı ve gözlemlere, uydu saatine, uydu yörüngesine ve alıcı koordinatlarına uygulanmalıdır. Dengeleme prosedürü, değişen alıcı kinematik durumuna uyum sağlayan sıralı bir filtre şeklinde uygulanır.

PPP tekniğinin en önemli özelliği, yayınlanan uydu koordinatlarının ve uydu saat düzeltmeleri ile hem kod hem de taşıyıcı faz gözlemlerinin kullanılmasıdır. PPP’deki diğer iyileştirmeler; alıcı hatalarını, uydu hatalarını, görelilik etkilerini, yayılma etkilerini ve yer değiştirme etkilerini hesaba katan çift frekanslı kod ve taşıyıcı faz gözlemlerinin kullanımını içerir. Temel gözlemler, fark alınmamış (zero differenced) kod ve taşıyıcı faz gözlemleridir.

PPP yöntemi iki aşamalı bir prosedürdür. İlk olarak bir analiz merkezi tarafından küresel bir ağdan, hassas GNSS ürünleri hesaplanır. Daha sonra GNSS gözlemleri bu ürünler kullanılarak değerlendirilir. Bu şekilde PPP, küresel izleme istasyonları ağı tarafından sağlanan düzeltmeleri kullanan GNSS hizmetine dayalı bir konum belirleme yöntemi olarak yorumlanabilir (Abdel-Salam 2005).

4.1. İyonosferden Bağımsız GNSS PPP Modeli

Genel olarak, birinci dereceden iyonosfer etkisini ortadan kaldırmak amacıyla geleneksel PPP için iyonosferden bağımsız kod ve taşıyıcı faz gözlemleri kullanılır. Denklemler kod ve faz gözlemleri için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{IF,r}^{s,j} = \rho + c * (dt_r - dt^{s,j}) + d_{trop} + HD_{P,r,IF} - HD^{P,s,j,IF} + \epsilon_{P,IF}^{s,j} \quad (4.1)$$

$$\phi_{IF,r}^{s,j} = \rho + c * (dt_r - dt^{s,j}) + d_{trop} + \lambda_{IF}^{s,j} * N_{r,IF}^{s,j} + HD_{\phi,r,IF} - HD^{\phi,s,j,IF} + \epsilon_{\phi,IF}^{s,j} \quad (4.2)$$

Burada, s ve j uydu ve GNSS endeksini (G: GPS, R: GLONASS E: Galileo ve C: Beidou), r alıcıyı temsil etmektedir, $P_{IF,r}^{s,j}$ ve $\phi_{IF,r}^{s,j}$ kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız bileşimidir, ρ metre cinsinden geometrik uzaklık, c saniye cinsinden ışık hızıdır, dt_r saniye cinsinden alıcı saati (hatası) ofsetidir, $dt^{s,j}$ saniye cinsinden uydu saati ofsetidir, d_{trop} metre cinsinden troposferik gecikmedir, $\lambda_{IF}^{s,j}$ iyonosfer içermeyen dalga boyu, $N_{IF}^{s,j}$ iyonosfer içermeyen başlangıç faz belirsizliği, $HD_{P,r,IF}$ ve $HD_{\phi,r,IF}$ metre cinsinden iyonosfer içermeyen kod ve faz alıcı donanım gecikmesidir, $HD^{P,s,j,IF}$ ve $HD^{\phi,s,j,IF}$ iyonosfer içermeyen kod ve faz uydu donanım gecikmesidir, $\epsilon_{P,IF}^{s,j}$ ve $\epsilon_{\phi,IF}^{s,j}$ iyonosfer içermeyen kod ve faz ölçümleri için olan gürültüdür. Genel olarak, analiz merkezlerinden birindeki hızlı yörünge ve saat ürünleri, uydu yörünge ve saat hatalarını gidermek için kullanılır (Kouba ve Héroux 2001). IGS analiz merkezine göre pseudorange iyonosfer içermeyen kod uydu donanım gecikmesi ($HD^{P,s,j,IF}$) uydu offset $dt^{s,j}$ saatinin içine asimile edilir. Saat parametreleri pseudorange ölçümleri kullanılarak tahmin edildiği için alıcı saat tahmini, alıcı pseudorange donanım gecikmesinin $HD_{P,r,IF}$ iyonosferik içermeyen kombinasyonunu emer. Kalibre edilmemiş iyonosferden bağımsız alıcı ve uydu taşıyıcı faz gecikmeleri ($HD_{\phi,r,IF}$ and $HD^{\phi,s,j,IF}$) tahmin edilen faz başlangıç belirsizlik parametresine asimile

edilir. Sonuç olarak faz başlangıç belirsizliğinin tam sayı özelliği kaybolur (Xiao ve ark 2019).

İyonosferden bağımsız kod ve taşıyıcı faz gözlemleri parametreleri şu şekilde yazılabilir:

$$P_{IF,r}^{s,j} = (f_1^2 * P1^{s,j} - f_2^2 * P2^{s,j}) / (f_1^2 - f_2^2) \quad (4.3)$$

$$\phi_{IF,r}^{s,j} = (f_1^2 * \phi 1^{s,j} - f_2^2 * \phi 2^{s,j}) / (f_1^2 - f_2^2) \quad (4.4)$$

Burada f_1 ve f_2 iki taşıyıcı faz Hertz frekanslarını temsil eder. $P1$, $P2$, $\phi 1$ ve $\phi 2$ iki frekans da metreyle ölçülen pseudorange ve taşıyıcı fazıdır. İyonosferden bağımsız dalga boyu ve iyonosferden bağımsız faz başlangıç belirsizlik parametreleri şu şekilde yazılabilir:

$$\lambda_{IF}^{s,j} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} * \lambda_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} * \lambda_2 \quad (4.5)$$

$$N_{IF}^{s,j} = \frac{f_1^2 * N1^{s,j}}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{f_2^2 * N2^{s,j}}{f_1^2 - f_2^2} \quad (4.6)$$

$N_1^{s,j}$ ve $N_2^{s,j}$ gözlemlenen her bir uyduya göre iki frekansta faz başlangıç tam sayı belirsizlikleridir. Denklem 4.6'da görüldüğü gibi iyonosferden bağımsız faz başlangıç belirsizliği sadece bir float (gerçek değer bilinmeyen) olarak tahmin edilebilir. İyonosferden bağımsız faz başlangıç belirsizliği genellikle iyonosferden bağımsız faz başlangıç belirsizliği nedeniyle PPP belirsizliğini düzeltmek için wide-lane and narrow-lane belirsizliği olarak ayrıştırılır (Xiao ve ark 2019). Statik PPP'de, bilinmeyen parametre vektörü şu şekilde ifade edilebilir:

$$X = [\bar{x}, dt_r, Z_{wet}, Grad_{ns}, Grad_{ew}, N_{r,IF}^{s,j}] \quad (4.7)$$

Burada \bar{x} , başlangıç konuma göre alıcı konum değişim vektörüdür, Z_{wet} troposferik zenit ıslak gecikmesidir, $Grad_{ns}$ ve $Grad_{ew}$ kuzey-güney ve doğu-batı troposferik değişimi göstermektedir.

5. PPP'DE HATA KAYNAKLARI VE İŞLEME STRATEJİLERİ

Yüksek konum doğruluğu elde etmek ve hassas nokta konumlandırma için kilit konu, uzay bölümü, sinyal yayılımı, yer ortamı ve alıcı bölümünde yer alan tüm potansiyel hataların nasıl azaltılacağıdır. Göreli GPS konumlamada milimetre düzeyinde doğruluğun elde edilebilmesinin nedeni, iki istasyon arasındaki gözlemlerin farklılaştırılmasıyla bazı hataların tamamen veya kısmen giderilebilmesidir. Ancak bu teknik, yalnızca tek bir alıcıdan gelen gözlemlerin mevcut olması nedeniyle PPP'de kullanılamaz. Bu nedenle, santimetre düzeyinde doğruluk elde etmek için tüm hatalar PPP'de ele alınmalıdır.

Potansiyel hata kaynakları bu bölümde geleneksel hata kaynakları ve diğer hata kaynakları olarak iki gruba ayrılmıştır. Geleneksel hata kaynakları, uydu yörüngesi ve saat hataları, iyonosferik gecikme hatası, troposferik gecikme hatası, alıcı saat hatası, sinyal yansıma hatası ve ölçüm gürültüsü gibi genellikle GNSS konumlandırmada ele alınması gereken hatalardan oluşmaktadır. Diğer hata kaynakları ise uydu ve alıcı anten faz merkezi hataları, faz dönüklüğü, dünya gelgiti, okyanus gelgit yüklemesi, atmosfer yüklemesi gibi PPP'de dikkate alınması gereken diğer hata kaynaklarını içerir. Bu hataların çoğu modelleme yoluyla bir dereceye kadar azaltılabilir. Alıcı saat hatası ve troposferik gecikme, bilinmeyen parametreler olarak tahmin edilebilirken iyonosferik gecikme hatası, iyonosferden bağımsız gözlem kombinasyonları oluşturularak azaltılabilir.

5.1. Geleneksel Hata Kaynakları

Geleneksel hata kaynakları, standart konumlandırma hizmetini ve daha az ölçüde göreli sistemlerini etkiler. Bu hatalar uydu yörüngesi ve saati, troposfer ve iyonosferik gecikme, görelilik, alıcı ve uydu faz kayması, sinyal yansıma hatası ve gürültüyü içerir.

5.1.1. Uydu yörüngesi ve saat hataları

Bir uydu yörünge hatası, gerçek uydu konumu ile hesaplama değeri arasındaki uyuşmazlık olarak tanımlanabilir. Bu tutarsızlık genellikle üç yörünge bileşeninde ifade edilir: yol boyunca (along-track), çapraz yol (cross-track) ve radyal (radial). Her şeyden önce, yükseklik bileşenindeki konum doğruluğu, esas olarak ufkun altında hiçbir uydu gözlemlenmediği için nispeten zayıftır. Buna ek olarak, doğu (boylam) bileşenindeki

konumlandırma doğruluğu, uydu yörüngelerinin tasarımı ve uyduların hareketi nedeniyle kuzey bileşenine göre biraz daha zayıftır. Bir uydu saat hatası; saat ofseti, sapma ve sapma oranı ile açıklanabilir (Cai 2009).

5.1.1.1. GPS Hassas Ürünleri

IGS'nin sağladığı ürünler arasında hassas uydu efemerisleri, uydu ve istasyon saatleri bilgileri ve IGS izleme istasyonlarının jeosentrik koordinatları, yer dönme parametreleri ve atmosferik parametreler bulunur. 1994 yılından bu yana IGS kullanıcılara hassas uydu yörünge ve saat düzeltme ürünleri sunmaktadır. Bugün, GPS kullanıcıları için ultra hızlı, hızlı ve son hassas ürünler de dâhil olmak üzere farklı doğruluk ve gecikme sürelerine sahip bir dizi IGS ürünü mevcuttur.

IGS'e ek olarak, Jet Propulsion Laboratory (JPL) ve Natural Resources Canada (NRCan) gibi diğer kuruluşlar da kullanıcılara hassas GPS ürünleri sunmaktadır. JPL, gerçek zamana yakın hassas uydu yörünge ve saat ürünleri ile gerçek zamanlı internet tabanlı Global Diferansiyel GPS düzeltmeleri sağlayabilir.

5.1.1.2. GLONASS Hassas Ürünleri

Uluslararası GLONASS Deneyi (IGEX-98), 19 Ekim 1998 ve 19 Nisan 1999 tarihleri arasında gerçekleştirilen jeodezik ve jeodinamik uygulamalar için küresel bir GLONASS gözlem ve analiz kampanyasıdır. Ana hedefi küresel olarak dağıtılmış istasyonlarda gözlem toplamak ve hassas GLONASS uydu yörüngelerini belirlemektir. IGEX-98, 19 adet çift frekanslı ve 13 adet tek frekanslı alıcı ile donatılmış 52 istasyondan oluşan küresel bir gözlem ağına sahiptir. IGEX-98 kampanyasından sonra, IGS ile karşılaştırılabilir bir altyapı kurulmuştur. IGEX-98, tüm operasyonel GLONASS uydularının kesin yörüngelerini oluşturmuştur (Cai 2009).

Uluslararası GLONASS Servis Pilot Projesi (International GLONASS Service IGLOS), GLONASS uydu sistemini IGS' in işleyişine entegre etme temel amacı olan IGEX-98'in devam projesidir. IGLOS Pilot Projesi, çift frekanslı GPS/GLONASS alıcılarına sahip yaklaşık 50 izleme istasyonundan oluşan küresel bir ağa sahiptir. GLONASS verileri sürekli olarak toplanmış ve IGS Global Veri Merkezlerinde RINEX formatında arşivlenmiştir. GPS ve GLONASS gözlemleri aynı anda işlenmiş ve böylece her iki sistem için üretilen hassas yörünge ürünleri aynı referans çerçevesinde olmuştur (Cai 2009).

5.1.2. İyonosferik Gecikme

İyonosfer, atmosfer tabakasının dünya yüzeyinden yaklaşık 50 ila 1000 km yükseklikteki bölgesidir. Bu katmanda güneşin ultraviyole ışığı, atomları ve molekülleri iyonize eder. Sonuç olarak, foto iyonizasyon işlemi sırasında nötr atmosferik parçacıklardan elektronlar ve iyonlar üretilir (Liao 2001). İyonosfer tabakasındaki serbest elektronlar; kırılma, yansıma ve absorpsiyon dâhil olmak üzere mikrodalga sinyallerinin yayılması üzerinde ciddi etkiler uygular. GNSS sinyalleri iyonosferden geçerken sinyallerin iletim hızı değişir (kod ölçümleri hızlanırken faz ölçümleri yavaşlar) ve bu nedenle kullanıcı ile uydu arasındaki ölçülen mesafe iyonosferik gecikme nedeniyle bozulur. Başucu noktasında yüzlerce metreye ulaşabilen iyonosfer gecikme hatası, GPS Seçici Kullanılabilirliğinin (Selective Availability SA) kaldırılmasından bu yana en büyük hata kaynağı hâline gelmiştir. Uydu konumlandırma ve navigasyonda daha yüksek bir doğruluk elde etmek için iyonosferik etki dikkate alınmalıdır.

5.1.3. Troposferik Gecikme

Troposfer, Dünya yüzeyinden yaklaşık 40 km'ye kadar olan atmosfer tabakasıdır (Hofmann-Wellenhof ve ark. 2012). İyonosferden farklı olarak, yayılmayan bir ortamdır ve bu nedenle etkisi L1 ve L2 verilerinden gözlem kombinasyonu ile ortadan kaldırılamaz. Troposferik gecikmenin büyüklüğü; uydu yükseklik açısı, istasyonun yüksekliği, atmosfer basıncı, sıcaklık ve su buharı basıncı gibi birçok faktöre bağlıdır. Genellikle kuru ve ıslak bileşenlere ayrılır. Birincisi, troposferin daha yüksek kısmından kaynaklanır ve toplam troposferik gecikmenin yaklaşık %90'ını oluştururken ikincisi, troposferin alt kısmından kaynaklanır ve toplam troposferik gecikmenin yaklaşık %10'unu oluşturur. Ayrıca kuru troposferik gecikme kolayca modellenebilir ancak troposferdeki sıvı su ve su buharının uzay ve zaman içindeki düzensiz değişimi nedeniyle ıslak troposferik gecikmenin modellenmesi zordur. Islak troposferik bileşen, toplam troposferik etkinin yaklaşık %10'unu temsil etse de dengeleme ile bilinmeyen parametre olarak çözülmek zorundadır (Cai 2009).

5.1.4. Alıcı anten faz merkezi

GPS alıcılarının ölçümleri, antenin elektronik merkezine göre yapılır. Bir alıcının Anten Faz Merkezi, GPS kullanıcılarının başvurabileceği fiziksel bir işaret değildir. Ayrıca, gelen GPS sinyallerinin yüksekliğine ve azimuta göre değişir ve bu

varyasyon anten üretiminin bir fonksiyonudur. Sonuç olarak her GPS anteni, uydunun yükseklik açısı ve azimut nedeniyle değişken bir ögeye ek olarak bir ofset değerine sahip olacaktır. Bu hata düzeltilmelidir, aksi takdirde bir desimetreye ulaşabilen bir hata olarak ölçümleri etkileyebilir. Antenin elektronik merkezini belirlemek için alıcı antenlerin kalibrasyonu çeşitli yöntemlerle oluşturulur. Bu yöntemler arasında bağıl, robot ve oda kalibrasyonları bulunmaktadır. Şu anda, 5 derecelik bir yükselme açısı aralığındaki sapma ve varyasyon, IGS ve ABD Ulusal Jeodezi Araştırması'ndan (NGS) edinilebilir. GPS kullanıcıları, herhangi bir rastgele yükseklikte karşılık gelen değerleri elde etmek için mevcut anten faz merkezi varyasyon değerlerini enterpolasyon yapabilir (Abdel-Salam 2005).

5.1.5. Alıcı saat ofseti

Alıcı saati, küçük boyut, az güç tüketimi ve düşük fiyat avantajları nedeniyle genellikle kuvars kristal osilatörlerle donatılmıştır. Kuvars saatin nispeten zayıf stabilitesi nedeniyle alıcı saat kısa bir süre içinde sürüklenir, bu da alıcı saat ofsetinin zaman içinde hızlı bir şekilde değişmesine neden olur. Bu nedenle alıcı saat ofseti, hassas nokta konumlandırmada üç koordinat bileşeniyle birlikte genellikle bilinmeyen bir parametre olarak tahmin edilir (Abdel-Salam 2005).

5.1.6. Multipath ve ölçüm gürültüsü

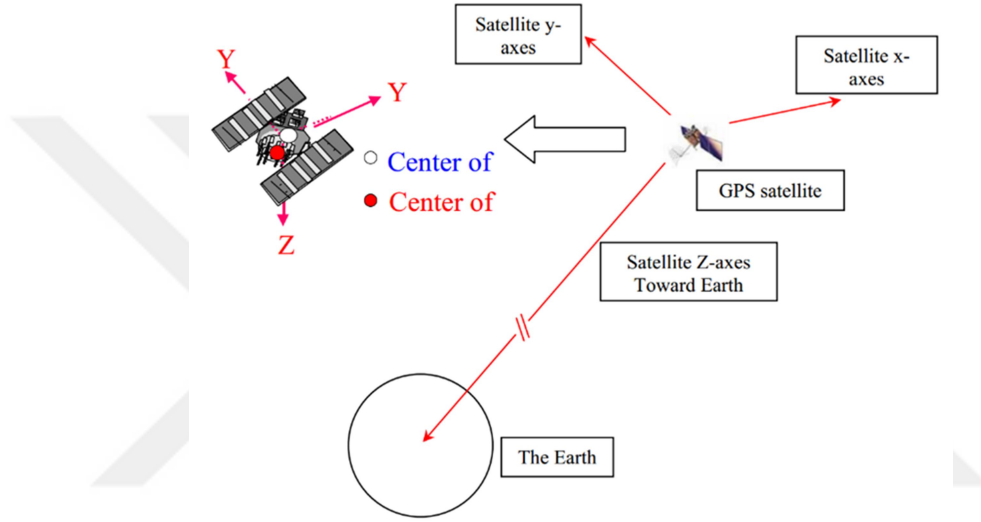
Multipath, bir istasyonun yakınındaki nesnelere yansıyan sinyallerden kaynaklanır. Multipath, GNSS uydularından yayınlanan kod ve taşıyıcı faz sinyallerinin doğruluğunu düşürür (Weill, 2003). Alıcı teknolojisinin hızlı gelişimine rağmen multipath hassas konumlandırma için hata kaynağı olmaya devam etmektedir. Teorik olarak maksimum multipath hatası kod çip uzunluğunun yaklaşık yarısı kadardır: C/A kodu için 150 m ve P(Y) kodu için 15 m faz gözlemindeki multipath etkisi, dalga boyunun dörtte birini geçmez; L1 ve L2 için yaklaşık 5-6 cm'dir (Cai 2009).

5.2. Özel Hata Kaynakları

Kısa ve orta bazlar kullanılarak yapılan görel konum belirleme işleminde dikkate alınmayan bazı hata kaynakları mevcuttur. Ancak PPP de bu hataların dikkate alınması gerekir, aksi takdirde beklenen doğruluğa ulaşamaz. Aşağıdaki bölümde bu hatalar açıklanmaktadır.

5.2.1. Uydu ve alıcı anten faz merkez ofsetleri

GPS uyduları, sinyallerini yayımlayan yerleşik anten taşır; bu nedenle tüm ölçümler, anten elektronik faz merkezi ile ilgilidir. Bu, yayın efemerisleri için geçerlidir. Bu durumdan farklı olarak IGS son yörünge ürünleri anten kütle merkezini referans olarak kabul eder. IGS, uydu yörüngesini tahmin etmek için dinamik modelleme kullanır; bu nedenle elde edilen yörünge verileri, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi antenin elektronik fazını değil, kütle merkezini ifade eder (Héroux ve Kouba, 2001).



Şekil 5.1. Uydu anteni faz merkezi ofseti(Héroux ve Kouba, 2001).

İki merkez arasındaki ayırım esas olarak uydu tasarımına bağlıdır. Bu ayırma iki yönde yer almaktadır. İlk yön, uydu kütle merkezinden ve dünyadan geçen bir vektörün yönü olan Z'dir; ikincisi, güneşi ve uydunun kütle merkezini birleştiren vektörün yönüdür. Bu kayma için bilinen değerler belirsizdir ancak saat ürün tutarlılığı adına, Çizelge 5.1'de gösterildiği gibi her uydu veya uydu bloğu için iyonosfer içermeyen frekansta birkaç standartlaştırılmış değer kullanılır.

Çizelge 5.1. NGA tarafından verilen uydu anteni faz kayması değerleri

Block	PRN	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)
II	Hepsi	0.2794	0.0000	0.9519
IIA	Hepsi	0.2794	0.0000	0.9519
IIR	PRN 11	0.0019	0.0011	1.5141
IIR	PRN 13	0.0024	0.0025	1.6140
IIR	PRN 14	0.0018	0.0002	1.6137
IIR	PRN 16	-0.0098	0.0060	1.6630
IIR	PRN 18	-0.0098	0.0060	1.5923
IIR	PRN 19	-0.0100	0.0064	1.5620
IIR	PRN 20	0.0022	0.0014	1.6140
IIR	PRN 21	0.0023	-0.0006	1.5840
IIR	PRN 22	0.0018	-0.0009	0.0598
IIR	PRN 23	0.0088	0.0035	0.0004
IIR	PRN 28	0.0018	0.0007	1.5131

5.2.2. Faz dönme etkisi (Phase wind up)

GNSS sinyalleri sağ dairesel polarizedir (RCP). Bu tip sinyalin bir özelliği, uydu ve alıcı antenleri arasındaki herhangi bir bağıl dönüşün, görüş hattı mesafesinde bir değişiklik olarak yorumlanmasıdır. Bu nedenle, GPS taşıyıcı faz gözlemleri kullanılırken gözlem periyodu sırasındaki herhangi bir görelî oryantasyon hesaba katılmalıdır. Faz dönme etkisi bir faz döngüsüne ulaşabilir. Statik PPP ölçümlerinde de mevcuttur çünkü uydu anteni, güneş panellerinin sürekli olarak Güneş'e doğru yeniden yönlendirilmesi nedeniyle her zaman yavaş dönüş durumundadır. Bir tutulma durumunda hızlı faz dönme hatası meydana gelebilir (Abdel-Salam 2005).

5.2.3. Görelilik etkisi

Uydu konumlandırmanın prensibi, sinyalin bir uydudan bir alıcıya seyahat süresinin ölçülmesine dayanmaktadır. Uydu saati ile alıcı saatinin yer çekimi potansiyeli ve hareket hızı farkı nedeniyle, ikisi arasında zaman farkı oluşur. Uydu saatleri, özel görelilik ve genel görelilik olarak iki görelî etkiye tabidir. Özel görelilik kuramına göre, sabit bir hızla hareket eden uydu saati, görelî hareketlerinin zaman genişlemesi etkisinden dolayı yerdeki saatten daha yavaş görünür. Genel görelilik kuramına göre ise gravite değeri arttıkça zaman yavaşlamaktadır (Cai 2009).

5.2.4. Dünya gelgiti

Dünya katı bir cisim olmadığı için, gök cisimlerinin uyguladığı dış kuvvetlere esnek bir cisim olarak tepki verir. Dünya gelgitlerine güneş ve ay tarafından uygulanan

yer çekimi kuvveti neden olur. Dünya üzerinde periyodik deformasyona neden olacak ve Love numarası ve Shida sayısı ile karakterize edilen küresel derece ve düzen harmonileri ile temsil edilebilen dikey ve yatay yer değiştirmeleri modellenebilmektedirler. İstasyon enlemine, gelgit frekansına ve yıldız zamanına bağlı olan dünya gelgitlerinin etkisi, yükseklik bileşeninde yaklaşık 30 cm ve yatay düzlemde 5 cm'ye ulaşabilir (Kouba ve Héroux 2001). Katı Dünya gelgitinin neden olduğu yer değiştirme, kalıcı bir parça ve periyodik bir parçaya bölünebilir. Orta enlem bölgesinde 12 cm'ye ulaşabilen kalıcı kısım kalırken, tüm bir günün statik konumlandırmasında periyodik kısmın büyük ölçüde ortalaması alınabilir (Kouba ve Héroux 2001). Uzun bir gözlem süresinde bile, dünya gelgit düzeltmesinin ihmal edilmesi, yükseklik bileşeninde 12,5 cm'ye ve nokta konumlandırmada yatay düzlemde 5 cm'ye kadar konumlandırma hatasına neden olacaktır. Hem kalıcı hem de periyodik yer değiştirme düzeltmelerini içeren denklem aşağıda verilmiştir (Cai 2009).

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

(5.1) denkleminde;

$\Delta \vec{r}$	Kartezyen koordinat sisteminde yer değiştirme vektörüdür;
GM	Dünyanın yer çekimi parametreleridir;
GM_j	Ay (j=2) ve güneş (j=3)'ün yer çekimi parametreleridir;
r	istasyonun yer merkezli durum vektörleridir;
R_j	Ay (j=2) ve güneş (j=3)'ün yer merkezli durum vektörleridir
\hat{r}	istasyonun yer merkezli birim durum vektörleridir;
\hat{R}_j	Ay (j=2) ve güneş (j=3)'ün yer merkezli birim durum vektörleridir
l_2	nominal ikinci derece Love sayısıdır (0.609);
h_2	nominal Shida boyutsuz sayısıdır (0.085);
ϕ	enlem
λ	boylam
θ_g	Greenwich Ortalama Yıldız Saatidir.

5.2.5. Okyanus gelgiti

Ay ve güneşin katı dünya üzerindeki etkisine benzer şekilde, okyanuslardaki su da yer çekimi kuvveti nedeniyle sürekli bir dağılım hâlinindedir. Bu yeniden dağılım, kıyı alanına bir yük bindirmekte bu da düşeyde 5 cm, yatayda 2 cm'ye ulaşabilen bir yüzey yer değiştirmesine neden olmaktadır. Günlük ve yarı günlük yer değiştirme ile karakterizedir. McCarthy (1996) tarafından verilen okyanus yükleme modeli Denklem

5.2'de gösterilmektedir. Okyanus kıyılarından uzakta bulunan GNSS istasyonlarında bu hatanın etkisinin ihmal edilebilir olduğu varsayılır (Abdel-Salam 2005).

$$\Delta x = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}) \quad (5.2)$$

Burada :

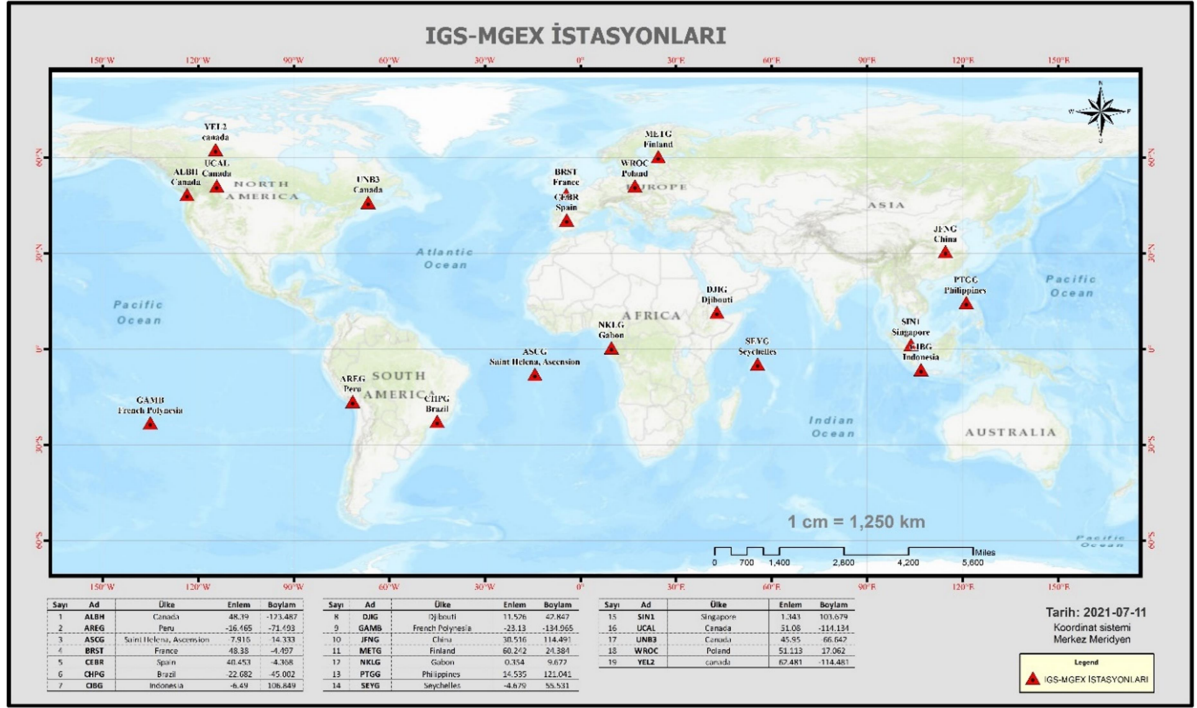
- Δx - okyanus yüklemesi nedeniyle yer değiştirme
- j - $M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm$ ve Ssa olarak bilinen 11 gelgit dalgasını temsil eder
- f_j - ay düğümünün boylamına bağlıdır (1-3 mm hassasiyette $f_j = 1$)
- u_j - ay düğümünün boylamına bağlıdır (1-3 mm hassasiyette $u_j = 0$)
- ω_j - $t=0h$ anındaki açısal hız
- χ_j - $t=0h$ anında astronomik argümanlar
- u_j - ay düğümünün boylamına bağlıdır (1-3 mm hassasiyette $u_j = 0$)
- A_{cj} - istasyona özgü genlik
- Φ_{cj} - istasyona özel aşama

5.2.6. Atmosfer yüklemesi

Dünya yüzeyinin üzerindeki atmosfer kolonu ağırlığı, dünya yüzeyinde bir yüke neden olur. Bu yük, atmosfer basıncının değişimine göre değişir ve çeşitli dikey ve yatay yer değiştirmelere neden olur. Petrov ve Boy'a (2003) göre bu yer değiştirmeler düşey bileşen için 20 mm ve yatay bileşen için 3 mm kadar büyük olabilir. Atmosfer basıncı yükleme yer değiştirmesi, coğrafi konumun bir fonksiyonudur. Yüksek enlem ile karşılaştırıldığında orta enlem konumları için büyük bir değere sahiptir.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma için 26 adet yüksek hızlı IGS MGEX istasyonu seçilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Seçilen yüksek oranlı IGS-MGEX istasyonlarının coğrafi dağılımı

Yüksek frekanslı (1-Hz) IGS-MGEX istasyonları seçilirken tüm istasyonların GPS-GLONASS-Galileo verilerini toplayabildiğinden ve Asya-Pasifik bölgesinde bulunan tüm istasyonların (toplam sekiz istasyon) BDS-2 verilerini toplayabildiğinden emin olmak için bir kontrol yapılmıştır. BDS-3 tam operasyonel kabiliyeti (FOC) 31 Temmuz 2020'de tamamlandığı için (Zhu ve ark. 2021) sınırlı sayıda yüksek hızlı IGS-MGEX alıcısı, mevcut tüm BDS-3 uydularının verilerini izleyebilmektedir. Alıcıların marka, donanım, yazılım ve sürümü, BDS-3 takımyıldızının veri izleme yeteneklerinin performansını etkilemektedir (Cao ve ark 2021). Bu nedenle, BDS-3 statik PPP işlemi için, yirmi altı yüksek hızlı IGS-MGEX istasyonundan diğer istasyonlara göre çok daha fazla BDS-3 uydusunu takip edebilen beş istasyon (AREG, KRGG, NKLG, PTGG ve YEL2) kullanılmıştır. Bu istasyonlardan toplanan ortalama BDS-3 uydu sayısı her epok

için ortalama yedi olarak hesaplanmıştır. Bu beş istasyon sadece BDS-3 ve çoklu GNSS PPP işlemleri için kullanılmıştır.

Her PPP işlemi için 2020 yılında üç haftalık bir süre (DOY: 95-116) seçilmiştir. Her RINEX dosyasının epok ve frekans doluluğu, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Harita Mühendisliği bölümü tarafından geliştirilmiş olan bir yazılım kullanılarak kontrol edilmiştir. %99 epok ve %95 frekans doluluğunun altındaki RINEX dosyaları değerlendirme işlemine alınmamıştır. Bu sayede, yüksek frekans veri (1-s) bütünlüğü olabildiğince korunmuş ve çeşitli gözlem aralıkları arasında veri kaybının etkisi ortadan kaldırılmıştır. Sonuç olarak, tüm RINEX verilerinin %12'si PPP işlemeye dâhil edilmemiştir. PPP süreçleri, NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından geliştirilen GipsyX yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bertiger ve ark. 2020). Altı farklı PPP işleme stratejisi, GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E), BDS-2 (C2), BDS-3 (C3) ve çoklu GNSS (GREC2C3) olacak şekilde, her istasyon ve periyot için işlenmiştir. GFZ-MGEX yörünge ve saat ürünleri PPP işlemleri için kullanılmıştır. Yörünge ve saat ürünlerinin zamansal çözünürlüğü sırasıyla 300-s ve 30-s'dir.

Yakınsama süresi ve konumlandırma doğruluğu, her PPP stratejisi için 1-s, 5-s, 15-s ve 30-s örnekleme oranları kullanılarak hesaplanmıştır. Yakınsama süresi, filtrelemenin her 1 saatte bir yeniden başlatılmasıyla hesaplanmıştır, bu amaçla her gün ve her istasyon için 1 saatlik gözlem uzunluğunda 24 bağımsız veri seti işlenmiştir. Yakınsama süresi kriteri, sonraki ardışık 10 dönem için kuzey, doğu ve yukarı bileşenlerin hatasının 0.1 m'den az olduğu zaman olarak belirlemiştir. Konum doğruluğu ise 2 saatlik birbiri ile örtüşmeyen (örneğin 0-2, 2-4, 4-6 gibi) 24 saatlik veri setleri kullanılarak analiz edilmiştir. Dolayısı ile bir gün için 12 farklı veri seti doğruluk analizi için kullanılmıştır. IGS-MGEX istasyonlarının referans koordinatları, IGS haftalık çözümlerinden alınmıştır. Statik PPP değerlendirme stratejileri Çizelge 6.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.1. Statik PPP değerlendirme stratejisi

Dengeleme Modeli	Kalman filtreleme
Epok Aralığı	1-s, 5-s, 15-s, ve 30-s
Filtre	İleri filtreleme ve geri yumuşatma
Uydu Yükseklik Açısı	7°
Yörünge ve Saat Enterpolasyonu Lagrange model	Yörünge: 11 th derece (Neville's interpolation algorithm) Saat: 1 th derece
Ağırlık Stratejisi	Faz başlangıç doğruluğu: 0.01m for GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou-2 MEO ve BeiDou-3 MEO (IGSO ve GEO için 0.015 m ve 0.02 m). Kod başlangıç doğruluğu: 1 m for GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou-2 MEO, and BeiDou-3 MEO (IGSO ve GEO için 1.5 m ve 2 m) Uydu yükseklik açısına bağlı: $1/\sqrt{\sin(E)}$
Uydu Faz Merkezi	Güncel IGS14.atx
Alıcı Faz Merkezi	GPS ve GLONASS için güncel IGS14.atx dosyası kullanıldı. Galileo ve BeiDou sinyalleri için GPS referans alındı.
İyonosferik Etki	Birinci derece iyonosfer içermeyen lineer kombinasyon ile kaldırılmıştır.
Faz Belirsizlikleri	Float
Frekanslar-Arası Hata (IFB)	GPS C1-P1 kod hatası, güncel DCB dosyası kullanılarak düzeltilmiştir.
Troposfer	GPT2 model
Zenit Islak Gecikme Tahmini	Raslantısal yürüyüş 0.05 mm km/sqrt(sec).
Yatay Gecikme Gradyanları Tahmini	Raslantısal yürüyüş 0.05 mm km/sqrt(sec).
Faz Bükülmesi	Düzeltilmiştir
Katı yeryüzü, okyanus yükleme yükü ve kutup gelgit etkisi	IERS conventions, 2010
Görelilik Düzeltmeleri	Periyodik saat düzeltmeleri ve yerçekimi bükülmesi (shapiro gecikmesi) uygulanmıştır.
Sinyal Sıçraması	Geometriden bağımsız + Hatch- Melbourne-Wubben kombinasyonu ile tespit edilmiştir.
Alıcı Saat Sıçraması	Düzeltilmiştir

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, her bir PPP stratejisi için yakınsama süresi ve konumlama doğruluğu değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarını kolay yorumlamak amacıyla her bir PPP stratejisi adına 30 saniyelik örnekleme aralığı için her koordinat bileşeninin ortalama yakınsama süresi verilmiştir. Daha sonra 30 saniye örnekleme aralığına göre, 1-s, 5-s ve 15-s örnekleme aralıklarındaki yakınsama süresindeki katkılar verilmiştir. Konum doğruluğundaki kaba hata değer kriteri, herhangi bir koordinat bileşeninin (kuzey, doğu ve yukarı) hatası için 30 cm olarak belirlenmiştir ve kaba hatalar statik PPP için karesel ortalama hata değeri hesaplamasından çıkarılmıştır.

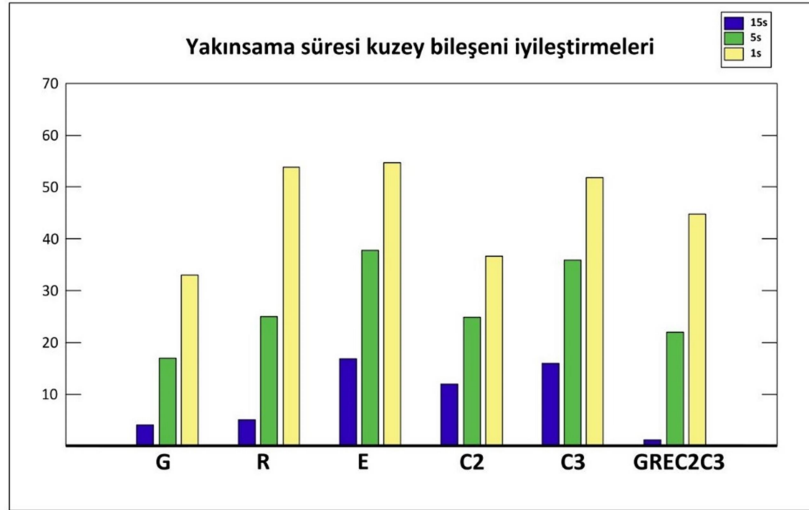
7.1. Yakınsama Süresinin Sonuçları

Çizelge 7.1, 1 saatlik gözlem uzunluğundaki bağımsız veri setleri kullanılarak 30 saniyelik gözlem aralığı için her bir PPP stratejisinin ortalama yakınsama süresini vermektedir.

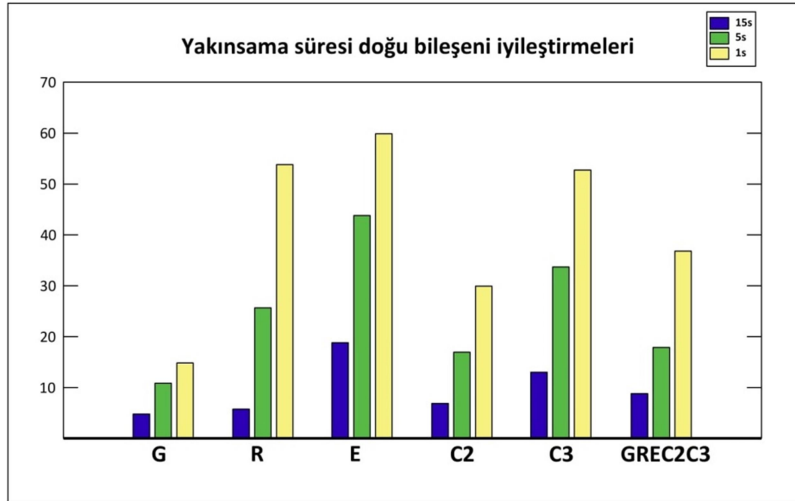
Çizelge 7.1. 30 saniyelik gözlem aralığı için ortalama yakınsama süreleri (birim: dakika)

GNSS	30 sn aralık için ortalama yakınsama süreleri		
	kuzey	doğu	yukarı
GPS	10.3	23.2	22.1
GLONASS	16.6	27.1	24.0
Galileo	12.5	25.6	24.9
BDS-2	15.0	29.3	23.2
BDS-3	13.5	20.4	20.7
Multi-GNSS	4.3	9.4	9.4

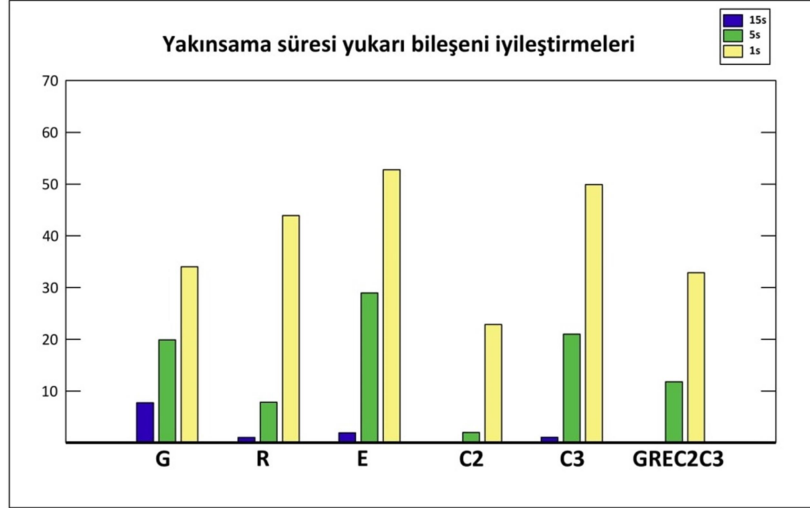
Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi çoklu GNSS (GREC2C3) kombinasyonu, diğer sistemlerle karşılaştırıldığında yakınsama süresini önemli ölçüde hızlandırmıştır. Bu çalışmada kullanılan GNSS istasyon sayısı GPS, GLONASS ve Galileo PPP için aynıdır (26) ancak BDS-2 (sekiz) ve BDS-3/çoklu-GNSS (beş) için farklıdır. Bu nedenle GPS, GLONASS ve Galileo dışındaki PPP işleme stratejileri arasında istatistiksel olarak bir karşılaştırma yapılamamaktadır. Bu çalışmada gözlem aralığının etkisine odaklanıldığından bu çalışmanın amacını olumsuz yönde etkilememiştir. Şekil 7.1, her bir PPP için 30 saniyelik gözlem aralığına göre, 15 saniyelik, 5 saniyelik ve 1 saniyelik örnekleme oranları kullanılarak yakınsama süresinin kuzey, doğu ve yukarı bileşenlerindeki iyileştirmeleri göstermektedir.



Şekil 7.1. 30 saniyelik örneklem aralığına göre 15 saniye, 5 saniye ve 1 saniye örnekleme oranlarının yakınsama süresindeki kuzey bileşenine ait iyileştirmeleri (Birim: %)



Şekil 7.2. 30 saniyelik örneklem aralığına göre 15 saniye, 5 saniye ve 1 saniye örnekleme oranlarının yakınsama süresindeki doğu bileşenine ait iyileştirmeleri (Birim: %)



Şekil 7.3. 30 saniyelik örneklem aralığına göre 15 saniye, 5 saniye ve 1 saniye örnekleme oranlarının yakınsama süresindeki doğu bileşenine ait iyileştirmeleri (Birim: %)

Şekil 7.1-7.3'ten, 5-s ve 1-s örnekleme oranlarının, her bir PPP stratejisi için her bir koordinat bileşenindeki yakınsama süresini önemli ölçüde hızlandırdığı görülmüştür. C2, C3 ve GREC2C3 PPP stratejileri için yakınsama süresi üzerindeki 15 saniyelik örnekleme aralığı etkisi; G, R ve E PPP stratejilerine kıyasla önemli ölçüde daha düşüktür. 1 saniyelik örnekleme aralığı kullanılarak yakınsama süresindeki en büyük katkı, her bir koordinat bileşeninde Galileo için görülmektedir. BDS-3 yörüngesi, test süresi boyunca GEO uydularını içermediğinden, yüksek hızlı örnekleme aralığı kullanılarak değerlendirilen BDS-3'ün, 30-s örnekleme aralığına göre yakınsama süresindeki katkıları, BDS-3, zaman içerisinde uydu geometrisinde daha büyük değişiklikler göstermesi nedeniyle BDS-2'den çok daha büyüktür. GNSS yörünge hızı yakınsama süresini etkileyen faktörlerden biri olduğundan, her bir GNSS sisteminin ortalama yörünge hızı test süresi için hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7.2'de verilmiştir. ECEF koordinat sisteminde uydu yörünge hızı, iki yakın zaman aralığı için (0.0001 saniye) hesaplanmıştır.

Çizelge 7.2. ECEF koordinat sisteminde her bir GNSS sisteminin yörünge hızı

Uydular	Uydu Yörünge Hızı (km/sec)
GPS	2.97
GLONASS	3.37
Galileo	2.75
BDS-2 MEO	2.87
BDS-2 IGSO	2.12
BDS-3 MEO	2.86
BDS-3 IGSO	2.21

Çizelge 7.2'de görüldüğü gibi GLONASS, diğer uydu sistemleri arasında en yüksek yörünge hızına sahip olan uydu sistemidir. Galileo sisteminin yörünge hızı GPS ve GLONASS'tan daha düşük olduğu için, yüksek örnekleme aralığı kullanılarak yakınsama süresindeki en yüksek Galileo katkısı sadece yörünge hızı ile açıklanamamaktadır ve daha fazla araştırmaya gereksinim vardır. Yüksek hızlı örnekleme aralığının yakınsama süresine en düşük katkısı C2 ve GREC2C3 PPP stratejileri için gözlenmiştir.

7.2. Konumlama Doğruluğunun Sonuçları

Her gün ve her istasyon için 30 saniye, 15 saniye, 5 saniye ve 1 saniye örnekleme aralıkları için 2 saatlik gözlem uzunluğunda, 12 bağımsız kampanya ölçümleri kullanılarak, her statik PPP stratejisi için karesel ortalama hata değerleri Çizelge 7.3-7.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.3. GPS-PPP karesel ortalama hata değerleri

Örnekleme aralığı	GPS		
	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
30-s	0.9	2.9	3.3
15-s	0.9	3	3.3
5-s	1.0	3.4	3.4
1-s	1.2	3.8	3.8

Çizelge 7.4. GLONASS-PPP karesel ortalama hata değerleri

Örneklem aralığı	GLONASS		
	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
30-s	2.3	5.6	6.0
15-s	2.3	5.9	6.0
5-s	2.3	6.4	6.2
1-s	2.7	7.2	6.1

Çizelge 7.5. Galileo-PPP karesel ortalama hata değerleri

Örneklem aralığı	Galileo		
	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
30-s	1.4	2.9	3.6
15-s	1.4	3.0	3.6
5-s	1.4	3.0	3.6
1-s	1.5	3.3	4.0

Çizelge 7.6. BeiDou-2 PPP karesel ortalama hata değerleri

Örneklem aralığı	BeiDou-2		
	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
30-s	2.2	4.4	5.7
15-s	2.6	4.6	5.8
5-s	2.2	4.5	5.3
1-s	2.0	4.7	5.5

Çizelge 7.7. BeiDou-3 PPP karesel ortalama hata değerleri

Örneklem aralığı	BeiDou-3		
	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
30-s	2.9	5.8	6.3
15-s	2.9	5.8	6.2
5-s	2.8	5.4	6.2
1-s	2.8	5.6	6.3

Çizelge 7.8. GREC2C3 PPP karesel ortalama hata değerleri

Örneklem aralığı	Multi-GNSS (GREC2C3)		
	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
30-s	1.1	4.3	4.8
15-s	1.1	4.2	4.8
5-s	1.0	3.7	4.8
1-s	1.0	3.8	4.8

Çizelge 7.3-7.8’de verilen karesel ortalama hata sonuçlarında görüldüğü gibi, gözlem örnekleme aralıklarının yakınsanmış konumlandırma doğruluğu üzerindeki etkisi yakınsama süresine kıyasla oldukça küçüktür. BDS-2 ve çoklu-GNSS dışında yüksek hızlı örnekleme oranları, her PPP stratejisi için konumlandırma doğruluğunu biraz azaltmaktadır. 30-s örnekleme aralığına göre, doğruluktaki azalma 1-s örnekleme aralığı için çok daha belirgindir. Bunun dışında 30-s ve yüksek frekanstaki örnekleme oranları (15-s ve 5-s) arasında doğruluk açısından önemli bir değişiklik bulunmamıştır. GPS, GLONASS ve Galileo hariç, PPP stratejileri arasında istatistiksel olarak doğruluk karşılaştırması, BDS-2 (sekiz) ve BDS-3/multi-GNSS (beş) için kullanılan oldukça az sayıda GNSS istasyonu nedeniyle mümkün değildir.

Doğruluk kaybının nedenini analiz etmek için yörünge ve saat enterpolasyon hataları araştırılmıştır. GFZ MGEX GNSS saat ve yörünge ürünleri sırası ile 30-s ve 300-s aralığında gelmektedir. Saat ve yörünge ürünleri ile sırası ile 60-s ve 600-s olacak şekilde zamansal çözünürlüğü düşürülmüştür. Daha sonra bu 60-s ve 600-s zamansal çözünürlüğü sahip saat ve yörünge ürünleri enterpole edilerek 30-s (saat) ve 300-s (yörünge) olacak şekilde üretilmiştir. Bu enterpolasyon sonuçlarında elde edilen 30-s (saat) ve 300-s (yörünge) saat ve yörünge bilgileri GFZ MGEX ham 30-s (saat) ve 300-s (yörünge) saat ve yörünge bilgileri ile karşılaştırılmıştır. Böylece, ortaya çıkan farklar tamamen enterpolasyon hatalarını yansıtmaktadır. Yörünge enterpolasyonu için 11. dereceden Newton Neville enterpolasyonu kullanılmıştır. Saat enterpolasyonu için ise 1. dereceden doğrusal enterpolasyon kullanılmıştır. Bu enterpolasyon teknikleri ayrıca GipsyX yazılımında PPP değerlendirmeleri sırasında da kullanılmıştır. Çizelge 8.9 ve 8.10 da yörünge ve saat enterpolasyon hatalarından hesaplanan karesel ortalama hataları (RMSE) ve maksimum enterpolasyon hataları gösterilmiştir.

Çizelge 7.9. Yörünge enterpolasyon hataları (Birim: mm)

GNSS System	RMSE_ΔX	RMSE_ΔY	RMSE_ΔZ	Max_ΔX	Max_ΔY	Max_ΔZ
GPS	0.76	0.68	0.66	22.99	11.10	10.01
GLONASS	0.74	0.74	0.66	9.80	11.38	8.23
Galileo	0.66	0.71	0.69	9.80	10.72	10.03
BeiDou-2-MEO	0.76	0.81	0.51	7.96	12.36	5.27
BeiDou-3-MEO	0.75	0.65	0.72	13.51	10.69	11.95
BeiDou-2-IGSO	0.78	0.60	0.69	9.02	8.29	13.41
BeiDou-3-IGSO	0.65	0.60	0.75	7.94	6.10	9.26
BeiDou-2-GEO	0.70	0.70	0.58	8.73	8.66	4.68

Çizelge 7.9’da RMSE_ΔX, RMSE_ΔY ve RMSE_ΔZ, test süresi için sırasıyla X, Y ve Z ECEF bileşenlerinde her bir GNSS sistemi içindeki tüm uyduların yörünge enterpolasyon hatalarının ortalama RMSE değerleridir. Max_ΔX, Max_ΔY ve Max_ΔZ, test süresi için sırasıyla X, Y ve Z ECEF bileşenlerinde hesaplanan maksimum yörünge enterpolasyon hatalarıdır. Çizelge 7.9’da görüldüğü gibi, yörünge enterpolasyon hatalarının karesel ortalama hataları her GNSS sistemi için mm altı seviyesindedir. Her bir GNSS sistemi için maksimum yörünge enterpolasyon hataları üç boyutlu olarak birkaç cm düzeyinde görülmektedir.

Çizelge 7.10. Saat enterpolasyon hataları (Birim: mm)

GNSS System	RMSE_Δt ^s	Max_Δt ^s
GPS	13.6	150.0
GLONASS	14.1	115.0
Galileo	2.30	34.9
BeiDou-2-MEO	4.05	19.7
BeiDou-3-MEO	1.77	22.0
BeiDou-2-IGSO	6.18	29.2
BeiDou-3-IGSO	2.31	12.1
BeiDou-2-GEO	3.91	24.6

Çizelge 7.10’da RMSE_Δt^s ve Max_Δt^s, test periyodu için her GNSS sistemi içinde sırasıyla tüm uydular için ortalama saat enterpolasyon hatalarının karesel

ortalama hatası ve maksimum saat enterpolasyon hatalarını vermektedir. Beklendiği gibi, saat enterpolasyon hataları, her bir GNSS sistemi için yörünge enterpolasyon hatalarına kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir. Çizelge 7.10'da görüldüğü gibi, en büyük saat enterpolasyon hataları GLONASS uydularında gözlemlenmiştir ve bu, GLONASS PPP konum doğruluğundaki en büyük doğruluk kaybının 30-s ve 1-s örnekleme oranları arasında olduğunu açıklamaktadır. İkinci en büyük saat enterpolasyon hataları GPS için gözlemlenmiştir ve bu bulgu GPS konum doğruluğundaki 30-s'den 1-s'ye kadar ikinci en büyük doğruluk kaybının nedenlerinden olduğu düşünülmektedir. Galileo ve BDS-2 saat enterpolasyon hataları GPS ve Galileo'dan önemli ölçüde daha küçük olduğundan, Galileo ve BDS-2 sistemleri için 30-s'den 1-s'ye doğruluk kaybı GPS ve GLONASS ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha küçüktür. Doğruluk kaybının ağırlıklı olarak doğu bileşeninde toplandığı görülmektedir. Bu durum uyduların genellikle kuzey-güney bileşeninde doğu-batı bileşenine göre daha çok hareket alanının olduğuna yorumlanabilir.

BDS-3 ve çoklu GNSS PPP stratejileri için 30 saniyelik örnekleme aralığına göre 1 saniyelik örnekleme aralıklarında küçük doğruluk artışı görülmektedir. Saat enterpolasyon sonuçları ayrıca BDS-3 saat enterpolasyon hatalarının BDS-2 saat enterpolasyon hatalarından birkaç kat daha az olduğunu göstermektedir. Bu durum, BDS-3 uydularında kullanılan saatlerin stabilitesinin BDS-2 uydularında kullanılan saatlere göre daha yüksek olduğu sonucunu desteklemektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, statik PPP yakınsama süresi ve konumlandırma doğruluğunun 1-s, 5-s, 15-s ve 30-s epok örneklem aralıkları için ne oranda değiştiği analiz edilmiştir. Bu amaçla GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou-2, BeiDou-3 ve çoklu GNSS (GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou-2/BeiDou-3) statik PPP değerlendirmeleri yapılmıştır. Üç haftalık bir süre ve 26 IGS-MGEX istasyonu için statik PPP değerlendirmeleri 1-s, 5-s, 15-s ve 30-s örnekleme oranları kullanılarak yapılmıştır. Yakınsama süresi için, her gün ve her istasyon için 1 saatlik gözlem uzunluğundaki 24 bağımsız gözlem verisi kullanılmıştır. Konumlandırma doğruluğu, her gün ve her istasyon için 12 bağımsız, 2 saatlik gözlem verileri kullanılarak her statik PPP stratejisi için karesel ortalama hata değerleri hesaplanarak değerlendirilmiştir.

Yakınsama süresinin sonuçları, 5 saniyelik ve 1 saniyelik örnekleme oranlarının 30 saniyelik örnekleme oranına kıyasla her bir PPP stratejisi için yakınsama süresini önemli ölçüde hızlandırdığını göstermektedir. 15 saniyelik örnekleme hızının yakınsama süresine katkısı, 5 saniyelik ve 1 saniyelik örnekleme oranlarına kıyasla önemli ölçüde küçüktür. 15 saniyelik örnekleme aralığının yakınsama süresine katkısı (30-s örneklem aralığına göre), BDS-2 ve çoklu GNSS PPP stratejileri için %1'in altındadır. BDS-2 GNSS sistemi ağırlıklı olarak IGSO ve GEO uydularından oluştuğu için, BDS-2 uydu geometrisindeki kısa sürede meydana gelen değişiklikler diğer uydulara kıyasla önemli ölçüde küçüktür. Dolayısı ile bu durum, yüksek örneklem aralığının yakınsama süresine katkısını BDS-2 uyduları için düşürmektedir.

Konumlandırma doğruluğu sonuçları incelendiğinde; 15 saniyelik, 5 saniyelik ve 1 saniyelik örneklem aralıklarının, 30 saniyelik örneklem aralığına göre konumlandırma doğruluğuna bir katkısının olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca saat enterpolasyon hataları nedeniyle yüksek frekanstaki gözlemlerin konum doğruluğu genellikle daha düşük çıkmıştır. BDS-3 ve çoklu GNSS PPP stratejileri dışında, özellikle 1 saniyelik örnekleme oranının, daha düşük örnekleme aralıklarına nispeten konum doğruluğunu bozmaktadır. Sonuçlar, saat enterpolasyon hatalarının yüksek frekanstaki gözlemler için doğruluk kaybına neden olduğunu göstermektedir. 30-s'den 1-s örnekleme aralığındaki en büyük doğruluk kaybı, diğer GNSS'ler arasında, en büyük saat enterpolasyon hatalarına da sahip oldukları GPS ve GLONASS uydularında gözlenmektedir. BDS-3 ve çoklu GNSS PPP stratejileri için 30 saniyelik örnekleme aralığına göre 1 saniyelik örnekleme oranı kullanılarak hafif bir doğruluk artışı gözlemlenmiştir.

Bu alışma, yakınsama zamanını iyileştirmek için yüksek frekansta verilere sahip GNSS gözlemlerinin gerekli olduğu sonucuna varmaktadır. Ayrıca, yakınsamış filtrelemedeki konum doğruluğu için, doğruluk kaybını önlemek amacıyla örnekleme aralığının PPP için kullanılan saat ürününün zamansal znrlğnden daha düşük olmaması önerilmektedir.

Sonuç olarak gerçek-zamanlı uygulamalarda kritik olan yakınsama süresi hariç, konum doğruluğu için yüksek zamansal znrlkl epok aralıklarında veri almak statik GNSS PPP değerlendirmeleri için anlamlı değildir ve konum doğruluğu belirli bir seviyede bozulmaktadır. Ancak kinematik uygulamalarda, GNSS alıcısının bulunduğu platformun dinamizmine göre, epok aralığı uydu saat aralığından daha düşük olmak zorunda olabilir, bu durumda saat enterpolasyon hataları kaçınılmazdır.



9. KAYNAKLAR

Abdel-Salam, M. A. T. (2005). Precise point positioning using un-differenced code and carrier phase observations (Vol. 69, No. 04).

Aggrey, J., & Bisnath, S. (2019). Improving GNSS PPP convergence: The case of atmospheric-constrained, multi-GNSS PPP-AR. *Sensors*, 19(3), 587.

Alcay, S., Ogutcu, S., Kalayci, I., & Yigit, C. O. (2019). Displacement monitoring performance of relative positioning and Precise Point Positioning (PPP) methods using simulation apparatus. *Advances in Space Research*, 63(5), 1697-1707.

Bahadur, B. (2017). Improving The Performance Of Precise Point Positioning With Multi-Gnss.

Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., ... & Willis, P. (2020). GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in space research*, 66(3), 469-489.

Cai, C. (2009, August). Precise point positioning using dual-frequency GPS and GLONASS measurements. In *Masters Abstracts International* (Vol. 48, No. 03).

Cao, X., Shen, F., Zhang, S., & Li, J. (2021). Satellite availability and positioning performance of uncombined precise point positioning using BeiDou-2 and BeiDou-3 multi-frequency signals. *Advances in space research*, 67(4), 1303-1316.

Chen, K. (2004, September). Real-time precise point positioning and its potential applications. In *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)* (pp. 1844-1854).

Choy, S. An investigation into the accuracy of single frequency precise point positioning (PPP). Ph.D. Thesis, RMIT University, Australia, 2009.

CSNO, C. S. (2020, Haziran). BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2b (Version 1.0). China Satellite Navigation Office:
<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202008/P020200803544811195696.pdf> adresinden alındı.

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), 191-198.

Ge, Y., Ding, S., Qin, W., Zhou, F., Yang, X., & Wang, S. (2020). Performance of ionospheric-free PPP time transfer models with BDS-3 quad-frequency observations. *Measurement*, 160, 107836.

Geng, J. (2011). Rapid integer ambiguity resolution in GPS precise point positioning (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

Geng, J., Jiang, P., & Liu, J. (2017). Integrating GPS with GLONASS for high-rate seismogeodesy. *Geophysical research letters*, 44(7), 3139-3146.

Héroux, P., & Kouba, J. (2001). GPS precise point positioning using IGS orbit products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8), 573-578.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (2012). *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media.

Jeffrey, C. (2010). *An introduction to GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and other global navigation satellite systems*. NovAtel.

Kuang, K., Li, J., & Zhang, S. (2021). Galileo real-time orbit determination with multi-frequency raw observations. *Advances in Space Research*, 67(10), 3147-3155.

Laurichesse, D. and Blot, A., 2016, Fast PPP convergence using multi-constellation and triple-frequency ambiguity resolution, *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*.

Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons.

Liao, X. (2001). *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*. University of Calgary.

Liu, X., Jiang, W., Li, Z., Chen, H., & Zhao, W. (2019). Comparison of convergence time and positioning accuracy among BDS, GPS and BDS/GPS precise point positioning with ambiguity resolution. *Advances in Space Research*, 63(11), 3489-3504.

Luo X, Schaufler S, Branzanti M & Chen J (2020). Assessing the benefits of Galileo to high-precision GNSS positioning—RTK, PPP and post-processing. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.08.022>.

Ma, H., & Verhagen, S. (2020). Precise point positioning on the reliable detection of tropospheric model errors. *Sensors*, 20(6), 1634.

Mendoza, L., Kehm, A., Koppert, A., Dávila, J. M., Gárate, J., & Becker, M. (2012). The Lorca Earthquake observed by GPS: a test case for GPS seismology. *Física de la Tierra*, 24(2012), 129-150.

Montenbruck, O., Gill, E., & Kroes, R. (2005). Rapid orbit determination of LEO satellites using IGS clock and ephemeris products. *GPS Solutions*, 9(3), 226-235.

Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., ... & 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.

Ogutcu, S. (2020). Assessing the contribution of Galileo to GPS+ GLONASS PPP: Towards full operational capability. *Measurement*, 151, 107143.

Ogutcu, S., Shakor, A., & Farhan, H. (2022) Investigating the effect of observation interval on GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou static PPP. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(3), 294-301.

Paziewski, J., Sieradzki, R., & Baryla, R. (2018). Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: Application to precise dynamic displacement detection. *Measurement Science and technology*, 29(3), 035002.

Psychas, D., Verhagen, S., & Teunissen, P. J. (2020). Precision analysis of partial ambiguity resolution-enabled PPP using multi-GNSS and multi-frequency signals. *Advances in Space Research*, 66(9), 2075-2093.

Subirana, J. S., Zornoza, J. M. J., & Hernández-Pajares, M. (2013). GNSS Data Processing Volume I: Fundamentals and Algorithms, vol. I. Noordwijk, Netherlands: ESA Communications.

URL-1. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J.M., Hernández-Pajares M., 2011, Combination of GNSS Measurements, https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Combination_of_GNSS_Measurements, [Ziyaret Tarihi: 5 Kasım 2021].

URL-2. Products, <https://igs.org/products>, [Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2021].

URL-3. MGEX Data & Products, <https://igs.org/mgex/data-products>, [Ziyaret Tarihi: 18 Aralık 2021].

URL-4. IGS Station Map and List, <https://igs.org/network/#station-map-list>, [Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2022].

Wang, J., Huang, G., Zhou, P., Yang, Y., Zhang, Q., & Gao, Y. (2020). Advantages of Uncombined Precise Point Positioning with Fixed Ambiguity Resolution for Slant Total Electron Content (STEC) and Differential Code Bias (DCB) Estimation. *Remote Sensing*, 12(2), 304.

Weill, L. R. (2003). Multipath Mitigation. *GPS World*, June 1, 2003, Available at <http://www.gpsworld.com/>, Last accessed on February 13, 2009.

Xiao, G., Li, P., Sui, L., Heck, B., & Schuh, H. (2019). Estimating and assessing Galileo satellite fractional cycle bias for PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, 23(1), 1-13.

Xiao, G., Li, P., Sui, L., Heck, B., & Schuh, H. (2019). Estimating and assessing Galileo satellite fractional cycle bias for PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, 23(1), 1-13.

Xu, P., Shi, C., Fang, R., Liu, J., Niu, X., Zhang, Q., & Yanagidani, T. (2013). High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units. *Journal of Geodesy*, 87(4), 361-372.

Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Anil Dindar, A., Bezcioglu, M., & Tiryakioglu, I. (2021). Investigating Performance of high-rate GNSS-PPP and PPP-AR for structural health monitoring: dynamic tests on shake table. *Journal of surveying engineering*, 147(1).

Yousif, H., & El-Rabbany, A. (2007). Assessment of several interpolation methods for precise GPS orbit. *The journal of navigation*, 60(3), 443-455.

Zhang, H., Gao, Z., Ge, M., Niu, X., Huang, L., Tu, R., & Li, X. (2013). On the convergence of ionospheric constrained precise point positioning (IC-PPP) based on undifferential uncombined raw GNSS observations. *Sensors*, 13(11), 15708-15725.

Zheng, Y., & Zhang, J. (2020, May). Satellite Orbit Interpolation Algorithm Analysis for GNSS Terminals. In *China Satellite Navigation Conference* (pp. 310-321). Springer, Singapore.

Zhu, Y., Zheng, K., Cui, X., Zhang, Q., Jia, X., Zhang, M., & Fan, S. (2021). Preliminary analysis of the quality and positioning performance of BDS-3 global interoperable signal B1C&B2a. *Advances in space research*, 67(8), 2483-2490.

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.