



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KÜRESEL NAVİGASYON UYDU
SİSTEMLERİ (GNSS) ÖLÇÜMLERİNDE
UYDU YÜKSEKLİK AÇISINA BAĞLI
AĞIRLIKLANDIRMA STRATEJİLERİNİN
HASSAS NOKTA KONUM BELİRLEME (PPP)
PERFORMANSINA ETKİSİ

Sümeyye Nur KARAUĞUZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Sümeyye Nur KARAUĞUZ

14.01.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS) ÖLÇÜMLERİNDE UYDU YÜKSEKLİK AÇISINA BAĞLI AĞIRLIKLANDIRMA STRATEJİLERİNİN HASSAS NOKTA KONUM BELİRLEME (PPP) PERFORMANSINA ETKİSİ

Sümeyye Nur KARAĞUZ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ

2020, 58 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Cevat İNAL

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI

Associate Prof. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ

Hassas Nokta Konumlama (PPP) tek bir alıcı ile küresel bir ağdan yayımlanan hassas uydu yörünge ve saat ürünlerini kullanarak, hem kod hem faz gözlemleri ile santimetre (cm) seviyesinde hassas konum doğruluğu sağlayan bir konum belirleme tekniğidir. PPP atmosferin izlenmesi ve modellenmesi, yer kaynaklı tehlikelerin izlenmesi, hava triyagülasyonu gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uydu yükseklik açısı 0 derece (ufuk) ve 90 derece (zenith) arasında uydudan gelen sinyalin ufuk doğrultusuyla yaptığı açıya verilen isimdir. Ölçümlerde veri elde etmede uydu yükseklik açısı büyük öneme sahiptir. Uydu yükseklik açısı GNSS alıcısına doğrudan girildiği için sağlıklı veri elde etmede bir ayarlama olarak kabul edilebilir.

Bu tezde, uydu yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma stratejilerinin PPP performansına etkisini belirlemek amacıyla iki farklı uydu yükseklik açısı ($7-30^\circ$) ve üç farklı ağırlıklandırma stratejisi ($1/\sqrt{\sin(E)}$ (E), $1/\sin(E)$, 1 (her uydunun ağırlığı eşit)) GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou navigasyon sistemlerine ayrı ayrı uygulamak üzere seçilmiştir. 27 Multi-GNSS (MGEX) istasyonu verileri kullanılarak, statik ve kinematik PPP değerlendirmesi için 2019 yılında bir aylık bir dönem (01.09.2019-30.09.2019) seçilmiştir. Bir aylık dönemde 24 saatlik veriler işlenerek koordinat bilgisi elde edilmiştir. PPP işleme için NASA'nın JPL tarafından geliştirilen Gipsy/Oasis yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen koordinat bilgileri 27 MGEX istasyonunun gerçek koordinat değerleriyle karşılaştırılarak ölçülerin aykırı değer yüzdesi, kuzey, doğu ve yukarı bileşenlerinin ve iki boyutlu konumun karesel ortalama hata değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar, 7° uydu yükseklik açısı kullanılarak uygulanan PPP'nin, 30° uydu yükseklik açısı kullanılarak uygulanan PPP'den daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Ayrıca genel olarak 7° uydu yükseklik açısı kullanılarak yapılan PPP'nin ağırlıklandırma stratejilerinin kullanılması, tüm ağırlıklara 1 verilerek yapılan PPP'ye göre sonuçları iyileştirdiği görülmüştür. 30° uydu yükseklik açısı kullanılarak yapılan PPP için ağırlıklandırma stratejilerinin uygulanması sonuçlarda anlamlı bir iyileştirme sağlamamıştır.

Anahtar Kelimeler: Ağırlıklandırma stratejisi, BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS, MGEX, Uydu yükseklik açısı, PPP

ABSTRACT

MS THESIS

THE EFFECT OF WEIGHING STRATEGIES DEPENDING ON SATELLITE HEIGHT IN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GNSS) MEASUREMENTS ON PRECISE POINT POSITIONING (PPP) PERFORMANCE

Sümeyye Nur KARAUĞUZ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN SURVEYING ENGINEERING

Advisor: Associate Prof. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ
2020, 58 Pages

Jury

Prof. Dr. Cevat İNAL

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI

Associate Prof. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ

Precise Point Positioning (PPP) is a technique that provides centimeter (cm) level precision positioning accuracy with both pseudorange code and carrier phase observations using precise satellite orbit and clock products broadcast from a global network with a single receiver. PPP commonly used in areas such as atmospheric monitoring and modelling, geohazard monitoring, ariel triangulation.

Satellite elevation cut-off angle is the angle between 0 degrees (horizon) and 90 degrees (zenith) made by the signal coming from satellite with the direction of the horizon. Satellite elevation cut-off angle is of enormous significance in obtaining data in measurements. Since the satellite elevation angle is directly entered into the GNSS receiver, it can be considered an adjustment in obtaining reliable data.

In this thesis, two different satellite elevation angles (7-30°) and three different weighting strategies ($1/\sqrt{\sin(E)}$, $1/\sin(E)$, 1(each satellite weighs equal)) have been chosen to apply separately to GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou navigation systems in order to determine the effect of weighting strategies based on satellite elevation angle on PPP performance. A one-month period are chosen for conducting static and kinematic PPP, using the data of 27 Multi-GNSS Experiment (MGEX) stations. Coordinate information is obtained by making observations every 24 hours in a month. Gipsy Oasis scientific software developed by NASA's Jet Propulsion Laboratory (JPL) is used for PPP processes. By comparing the obtained coordinate information with the exact coordinate values of 27 MGEX stations, the outliers percentage of the measurements, the root mean square error values of the north, east and up components and the two-dimensional position are obtained. The results have shown that PPP conducted using 7° satellite elevation angle gives better results than PPP applied using 30° satellite elevation angle. In addition, it has been observed that the use of weighting strategies of PPP, which is generally made using 7° satellite elevation angle, improves the results compared to PPP made by giving 1 to all weights. Implementation of weighting strategies of PPP using 30° satellite elevation angle did not significantly improve the results.

Keywords: BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS, MGEX, PPP, Satellite elevation cut-off, Weighting strategie

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yardımlarını esirgemeyen Necmettin ERBAKAN Üniversitesi öğretim üyesi danışman hocam, Doç. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ hocama sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Sümeyye Nur KARAUĞUZ
KONYA-2020



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMİ (GNSS).....	5
2.1. GPS	5
2.2. GLONASS	8
2.3. GALİLEO	10
2.4. BEİDOU (BDS).....	10
2.5. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİNİN (GNSS) KIYASLAMASI.....	12
3. HASSAS NOKTA KONUM BELİRLEME (PPP)	14
4. GELENEKSEL PPP ve ÇOKLU-GNSS PPP YAKLAŞIMLARI	16
4.1. Kalman Filtresi	16
4.1.1. Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF).....	16
4.2. Geleneksel PPP Yaklaşımı.....	18
4.2.1. PPP Gözlem Modeli.....	18
4.2.2. Stokastik Model	20
4.3. Çoklu-GNSS PPP Yaklaşımı	23
5. PPP HATA KAYNAKLARI.....	29
5.1. Uydu Yörünge ve Saat	29
5.2. Alıcı Saat Hatası	30
5.3. Troposferik Gecikme	31
5.4. İyonosferik Gecikme.....	32
5.5. Görelilik Etkisi.....	33
5.6. Anten Faz Merkezi.....	34
5.7. Faz Dönüklüğü.....	36
5.8. Katı Yeryüzü Etkisi	37
5.9. Okyanus Yükleme Etkisi	38
5.10. Kutup Gezinimi.....	39

5.11. Diferansiyel Kod Hatası (DCB).....	40
5.12. Faz Sıçraması (Cycle Slip)	40
5.13. Özet.....	41
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	42
6.1. Uygulama.....	42
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	46
7.1. Araştırma Sonuçları	46
7.2. Tartışma	50
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
9. KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ACs: MGEX Analiz Merkezleri
APC: Antenna Phase Center
ARP: Antenna Reference Point
BDS: BEİDOU
BDT: BEİDOU Time
C/A: Coarse/ Acquisition
CDMA: Code Division Multiple Access
DCB: Differential Code Bias
ESA: European Space Agency
ECEF: Yer-merkezli Yer-sabit koordinat sistemi
EKF: Extended Kalman Filter
FDMA: Frequency Division Multiple Access
FOC: Full Operational Capability
GEO: Geostationary Earth Orbit
GNSS: Global Navigation Satellite System
GPS: Global Positioning System
ICB: Inter Channel Bias
IERS: International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGS: International GNSS Sevice
IGSO: Inclined Geo-Synchronous Orbit
IOV: In-Orbit Validation
ITRF: International Terrestrial Reference Frame
MBOC: Multiplexed Binary Offset Carrier
MEO: Medium Earth Orbit
MGEX: The Multi-GNSS Experiment
MT: Moscow Time
PPP: Precise Point Positioning
PCO: Antenna Phase Center Offset
PCV: Antenna Phase Center Variation
UTC: Coordinated Universal Time

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1.	GPS uydularının yörünge üzerinde dağılımı.....	5
Şekil 5.1.	IGS Çoklu-GNSS istasyonları.....	28
Şekil 5.2.	Nominal savrulma tutum (yaw-steering) modunda GNSS uydu yönü.....	33
Şekil 6.1.	Çalışma için seçilen istasyonların konumu.....	41

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1.	GPS Taşıyıcı Frekanslarının Temel Özellikleri.....	5
Çizelge 2.2.	GPS uyduları.....	7
Çizelge 2.3.	Ekim 2016 itibarıyla GLONASS navigasyon uydu sisteminin durumu...8	
Çizelge 2.4.	GALİLEO konumlama ve navigasyon sisteminin taşıyıcı frekanslar.....9	
Çizelge 2.5.	BDS'nin taşıyıcı frekansları.....	10
Çizelge 2.6.	Küresel Uydu Navigasyon Sistemlerinin Özelliklerinin Kıyaslanması....12	
Çizelge 4.1.	MGEX ürünleri.....	23
Çizelge 5.1.	Standart IGS uydu yörünge ve saat ürünleri.....	27
Çizelge 5.2.	Saat sıçrama tipleri.....	29
Çizelge 5.3.	PPP hata kaynakları ve azaltma stratejileri.....	40
Çizelge 6.1.	Çalışma için seçilen IGS MGEX istasyonları.....	41
Çizelge 6.2.	PPP İşleme Stratejisi.....	43
Çizelge 7.1.	GPS statik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları.....	45
Çizelge 7.2.	GLONASS statik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları.....	45
Çizelge 7.3.	GALİLEO statik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları.....	46
Çizelge 7.4.	BEİDOU statik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları.....	46
Çizelge 7.5.	GPS kinematik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları.....	46
Çizelge 7.6.	GLONASS kinematik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları.....	47
Çizelge 7.7.	GALİLEO kinematik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları.....	47
Çizelge 7.8.	BEİDOU kinematik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları.....	47

1. GİRİŞ

Uzun yıllar boyunca görelî konum belirleme hassas konum belirlemede baskın bir teknik olarak kullanılmaktadır. Görelî konum belirleme tekniğinde, koordinatları bilinen bir noktaya ve bir referans alıcı ve bir de gezici alıcı olmak üzere en az iki alıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece hem referans hem de koordinatı bilinmeyen noktalarda GNSS gözlem hatasını azaltır ve yüksek hassasiyetli konumlama sağlar. Görelî konum belirlemenin referans istasyonuna gereksinim duyması ve istasyonlar arası mesafenin belli sınırlar arasında tutulması gerekliliği görelî konum belirlemenin dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır (Choy, vd., 2017).

Son yıllarda Hassas Nokta Konumlama (PPP) GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) hassas konumlama tekniklerine alternatif olarak ortaya çıkmıştır. PPP küresel bir ağdan yayınlanan uydu saat ve yörünge ürünleri kullanarak tek bir GNSS alıcısından, hem taşıyıcı faz hem kod gözlemlerini işleyerek yüksek doğrulukta konum doğruluğu elde etmeyi sağlayan bir konum belirleme tekniğidir (Zumberge vd., 1999). PPP referans istasyonuna olan gerekliliği ortadan kaldırması, pratikliği ve maliyeti azaltması gibi faydalar sağladığından GNSS komitelerinde büyük ilgi uyandırmıştır. PPP birçok GNSS uygulaması için yeterli konum doğruluğunu sağlamaktadır. PPP birçok uygulama için yeterli konum doğruluğunu sağlasa da, en büyük kısıtlaması santimetre seviyesinde konum doğruluğu sağlamak için uzun bir başlatma süresi gerektirmesidir. Bu süre yakınsama süresi olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak, standart bir statik PPP işleminden 5 cm doğruluk elde etmek için yakınsama süresi en az bir saattir (Choy vd., 2017). Yakınsama süresini azaltmak için yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların bir kısmı taşıyıcı faz başlangıç belirsizliği ambiguity çözümü ile ilgili çalışmalar olmuştur. Bu çalışmalarda ambiguity çözümüne yönelik modeller geliştirilmiş ve yakınsama süresinin azaldığı gösterilmiştir (Ge vd., 2007; Collins vd., 2010; Laurichesse vd., 2009; Geng vd., 2010; Li vd., 2014; Shi ve Gao, 2014). Yakınsama süresini azaltmaya yönelik çalışmaların bir kısmı da Çoklu-GNSS olarak adlandırılan, farklı GNSS uydu sistemlerinin birlikte kullanılabilirliği ile yakınsama süresinin azaltılması üzerine olmuştur. Bu çalışmalar ilk olarak GPS ile Rusya'nın konumlama ve navigasyon sistemi olan GLONASS'ın birlikte kullanılmasıyla yapılmıştır ve çalışmaların sonucunda yalnızca GPS ölçümlerine göre GPS/GLONASS ölçümleri birlikte kullanıldığında yakınsama süresinin azaldığı ortaya konmuştur (Hesselbarth ve Wanninger, 2008; Cai ve Gao, 2013; Yiğit vd., 2014; Li ve

Zhang; 2014). Avrupa'nın Galileo ve Çin'in Compass BeiDou navigasyon sistemlerinin ortaya çıkması ve geliştirilmesiyle, dört GNSS sistemi bir arada kullanılarak çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar ile tek sistemle ya da iki sistemle yapılmış olan çalışmalara kıyasla konum doğruluğu ve yakınsama süresinin önemli ölçüde iyileştiği ortaya konmuştur (Tegeodor vd., 2014; Cai vd., 2015; Li vd., 2015; Guo vd., 2017; Guo vd., 2017; Bahadur, 2017). Türkiye ve yakın çevresi için ilk kez Çoklu-GNSS performansını araştıran Bahadur ve Nohutçu (2018) Çoklu-GNSS kullanıldığında sonuçları önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. PPP çalışmalarının çoğu sabit uydular yükseklik açısı kullanılarak ve herhangi bir ağırlıklandırma stratejisi uygulamadan gerçekleştirilmiştir.

GPS gözlemlerinde, gözlemlerin gürültü seviyesi uydular yükseklik açısıyla doğrudan ilişkilidir. Collins ve Langley (1999) yaptıkları bir çalışmada GPS verilerini değerlendirirken üç farklı ağırlıklandırma şeması kullanmıştır. Bu şemalardan ilki taşıyıcı faz gözlemlerine eşit ağırlık uygulanması, ikincisi troposferik gecikme haritalama fonksiyonunda kullanılan yükseklik açısının kosekantının alınarak uygulanması uygulanmış ve üçüncüsü ise sinyal gürültü değerlerinin kullanılmasıyla uygulanmıştır. Sonuçlar ikinci ve üçüncü şemanın, eşit ağırlık verilen şemaya kıyasla sinyal yansıma (multipath) etkisinin koordinat farklılıkları arasındaki etkiyi mm seviyesine düşürdüğünü göstermiştir (Witchayankoon, 2000). Nötr atmosferden geçen sinyal gecikmesi uydular yükseklik açısına bağlıdır (Niel,1996). J.W. Marini 1972'de troposferik düzeltme için $1/\sin(E)$ formülünü uygulayarak troposferik etkinin azaldığını göstermiştir. GPS gözlemleri için gözlem ağırlıklandırma yöntemleri geliştirilmiştir (Niel,1996; Marini, 1972'den aktaran Witchayankoon B., 2000). Farklı ağırlık yöntemleri, özellikle yükseklik bileşeninde farklı çözümler verdiği için gözlemlere uygun ağırlık verilmesi önemlidir (Vermeer, 1997'den aktaran Witchayankoon B., 2000; Collins ve Langley, 1999).

Uydular yükseklik açısı GNSS alıcısına doğrudan girildiği için sağlıklı veri elde etmede bir ayarlama olarak kabul edilebilir. Uydudan çıkan sinyal, ufuk doğrultusuna (0°) ne kadar yakın olursa troposferik ve iyonosferik etkiye o kadar maruz kalır. Ufka yakın giren sinyalin gürültüsü artmaktadır. Ufka yakın giren sinyallerin, sinyal yansıma hatası daha fazla olur. Uydular yükseklik açısı azaldıkça; iyonosferik etki artar, troposferik etki artar, multipath (sinyal yansıma) etkisi artar ve sinyal gücü azalır.

Öğütçü (2019), $7-15-30^\circ$ uydu yükseklik açılarını ve ağırlıklandırma stratejisi olarak $1/\sqrt{\sin(E)}$ (E =uydu yükseklik açısı) fonksiyonunu kullanarak Galileo 'nun GPS+GLONASS kombine PPP'sine katkısını incelemiştir. Yine Öğütçü (2019), GPS, GLONASS, Galileo ve BDS (BeiDou) uydularının kombinasyonları ile, $7-15-30^\circ$ uydu yükseklik açıları ve farklı oturum süreleri (24-12-6-3-1-0.5 saat) kullanmış, ağırlıklandırma stratejisi olarak $1/\sin(E)$ fonksiyonunu kullanarak, PPP doğruluk performansını Türkiye ve çevresi için incelemiştir. Sonuç olarak, en iyi doğruluk dörtlü uydu takımı kullanarak $15-30^\circ$ uydu yükseklik açılarında gözlenmiştir, ayrıca 24 ve 12 saatlik gözlem seansları için, Türkiye ve çevresinde 15° uydu yükseklik açısına kadar seçilmiş olan istasyonlardan cm altı üç boyutlu konum doğruluğu elde edilebileceğini göstermiştir. GPS, GLONASS ve BeiDou (IGSO, MEO) navigasyon uydu sistemlerinin kullanılarak PPP tamsayı belirsizlik çözümünün değerlendirilmesi başlıklı bir çalışmada uydu yükseklik açısı olarak 7 derece kullanılmış ve ağırlıklandırma için uydu yükseklik açısı 30 dereceden büyükse 1, değilse $\sin(E)$ fonksiyonunu kullanılmış (Liu vd. 2017). Li vd. (2014) gerçek zamanlı Çoklu-GNSS PPP'nin doğruluğunu ve güvenilirliği üzerine yaptıkları bir çalışmada ayrıca Çoklu-GNSS'in 10° ile 40° arasında değişen farklı uydu yükseklik açıları altında gerçek zamanlı konumlandırma yeteneklerini analiz etmiştir ve yükseklik açısı arttıkça PDOP değerinin arttığını bu yüzden yalnızca GPS için güvenilirlik ve doğruluğun önemli ölçüde azalacağını fakat Çoklu-GNSS kullanıldığında PDOP değerinin güvenilir sınırlarda kaldığı göstermiştir.

Ölçülerin değerlendirilmesinde farklı derecelerdeki uydu yükseklik açıları (7° ve 30°) ve çalışma için seçilen ağırlıklandırma stratejileri kullanılarak, statik ve kinematik olmak üzere PPP performansına etkisi araştırılmıştır. Bu tezde Gipsy/Oasis yazılımı kullanılmıştır. Çalışma için 1 aylık (01.09.2019- 30.09.2019) dönem seçilmiştir ve günlük (24 saat) veriler işlenerek koordinat bilgisi elde edilmiştir. Bu koordinat değerleri IGS ağından seçilen IGS istasyonlarının gerçek koordinat değerleriyle kıyaslanarak, kuzey, doğu ve yukarı eksen bileşenlerinin karesel ortalama hataları ve aykırı değer yüzdesi belirlenmiştir.

Bu çalışma sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışma ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölüm Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri ile ilgili kısa bilgileri ve GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou' nun karşılaştırılmasını içermektedir. Üçüncü bölüm Hassas Nokta Konumlamayla ilgili genel ve temel bilgileri içermektedir. Dördüncü bölüm geleneksel ve Çoklu-GNSS PPP yaklaşımlarını

içermektedir. Beşinci bölüm PPP hata kaynaklarının verildiği bölümdür. Altıncı bölüm tez için kullanılan materyal ve yöntemin açıklandığı bölümdür. Yedinci bölümde araştırma sonuçları ve tartışma yer almaktadır. Sekizinci bölümde de sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

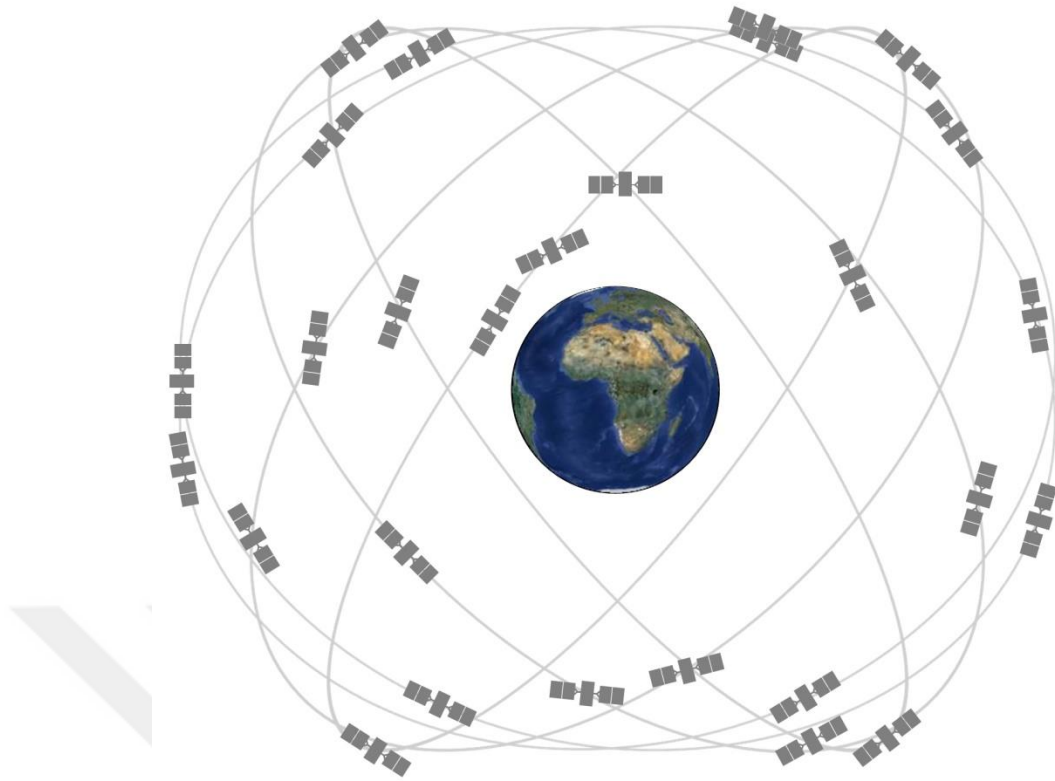


2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMİ (GNSS)

GNSS, küresel uydu tabanlı navigasyon, konumlama ve zamanlama sistemleri GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou olarak tanımlanabilir. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou'nun içinde bulunduğu dört adet tam kapasiteyle çalışan küresel navigasyon uydu sistemi bulunmaktadır.

2.1. GPS

GPS, Amerika tarafından geliştirilmiş, ilk küresel olarak hizmet veren navigasyon ve konumlama sistemidir ve üç ana bölümden oluşur; uzay bölümü, kontrol bölümü, kullanıcı bölümü. Uzay bölümü, radyo sinyallerini kullanıcılara ileten uydulardan oluşur. GPS uyduları Dünya'dan yaklaşık olarak 20200 km yükseklikte olup, altı adet yörünge düzleminde eşit olarak hizalanırlar. Yörünge düzlemleri, Dünya'nın ekvatorial düzlemiyle 55° lik açı yapmaktadır. Uydular yörüngeyi yaklaşık olarak 11 saat 58 dakikada tamamlarlar. GPS en az 24 işlevsel GPS uydusunun kullanılabilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır ve kullanıcılara, dünyanın herhangi bir yerinde hemen hemen her noktadan en az dört uyduyu görüntülemelerini sağlamaktadır. GPS şu anda 31 uydusuyla hizmet vermektedir. Şekil 2.1 GPS uydularının yörüngedeki dağılımını göstermektedir. GPS kontrol bölümü, GPS uydularını izleyen, yayınlarını izleyen, analizler yapan ve uydulara komut ve veri gönderen küresel bir yer tesisleri ağından oluşur (<http://www.gps.gov>, Agustos, 2020).



Şekil 2.1. GPS uydularının yörünge üzerinde dağılımı (<http://www.gps.gov>).

GPS uyduları, navigasyon sinyallerini oluşturmak için tüm uydular için aynı taşıyıcı frekanslarında modüle edilmiş standart navigasyon sinyallerini kullanan kod bölme çoklu erişim (CDMA) yöntemini kullanır. Alıcılar CDMA tekniği ile, her bir uydu tarafından iletilen farklı kod setleri aracılığıyla GPS uydularını birbirlerinden ayırt edebilmektedir. GPS sinyalleri temel frekansın ($f_0 = 10.23 \text{ MHz}$) farklı kat sayılar ile çarpılmasından elde edilmektedir. GPS temel olarak C/A kodu (Coarse/ Acquisition), P kodu (Precision code) ve D navigasyon mesajı olmak üzere üç farklı kod üretip yayınlamaktadır. L1 frekansı hem C/A hem de P kodlarını taşıırken, L2 frekansı GPS kullanıcılarına yalnızca P kodu taşımaktadır.

Çizelge 2.1. GPS Taşıyıcı Frekanslarının Temel Özellikleri

SİNYAL	KAT SAYI (f_0)	FREKANS (MHz)	DALGA BOYU (cm)
L1	154	1575.42	19.0
L2	120	1227.60	24.4
L5	115	1176.45	25.5

GPS modernizasyonu, 2005 yılında Block IIR-M uydularının fırlatılmasıyla ikinci sivil sinyal olan L2C sinyalinin yayınlanmasıyla başlamıştır. GPS

modernizasyonu, ikinci sivil sinyal (L2C), üçüncü sivil sinyal (L5) ve dördüncü sivil sinyal (L1C) olmak üzere üç sinyali içermektedir. GPS modernizasyonu ile kullanıcılara daha iyi sinyal kalitesi, uydu görünürlüğü ve daha iyi konumlama performansı sağlanması amaçlanmaktadır.

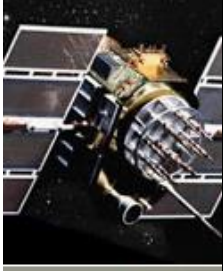
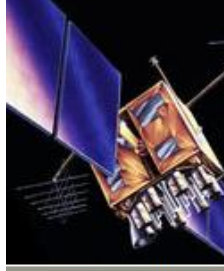

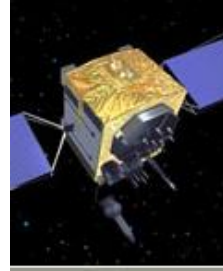
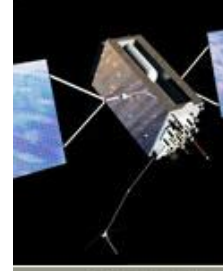
L2C ticari amaçlar doğrultusunda özel olarak tasarlanmış 1227 MHz frekansına sahip ikinci sivil sinyaldir. L2C, bir çift frekanslı alıcıda L1 C / A ile birleştirildiğinde, doğruluğu artıran bir teknik olan iyonosferik düzeltmeyi etkinleştirir. L2C, daha hızlı sinyal alımı, gelişmiş güvenilirlik ve daha geniş çalışma aralığı sağlar. L2C, eski L1 C / A sinyalinden daha yüksek bir etkili güçte yayın yaparak ağaçların altında ve hatta iç mekanlarda sinyal almayı kolaylaştırır. GPS Block IIR-M ile 2005 yılında L2C sinyali yayınlanmaya başlanmıştır. 26 Mayıs 2020 itibariyle 19 GPS uydusundan L2C sinyali yayınlanmaktadır. Çizelge 2.2.' de GPS uydularının 26 Mayıs 2020 itibariyle durumu gösterilmiştir.

Üçüncü sivil sinyal olan L5, artan can güvenliği ihtiyaçları doğrultusunda ve yüksek performanslı uygulamalar için zorlu gereksinimleri karşılamak üzere tasarlanmıştır. L5 (1176 MHz) yalnızca havacılık güvenlik hizmetleri için ayrılmış bir radyo bandında yayınlanır. Daha fazla bant genişliği, daha yüksek güç ve gelişmiş bir sinyal tasarımına sahiptir. Gelecekte uçaklar için, L5 ve L1 C/A birlikte kullanılarak, iyonosferik düzeltme yoluyla doğruluğu ve sinyal fazlalığı sayesinde sağlamlığı iyileştirecektir. GPS Block IIF ile 2010 yılında L5 sinyali yayınlanmaya başlanmıştır. 26 Mayıs 2020 itibariyle 12 GPS uydusundan L5 sinyali yayınlanmaktadır.

L1C, GPS ve diğer uluslararası navigasyon sistemleri ile birlikte çalışılabilirliği sağlamak amacıyla tasarlanmış dördüncü sivil sinyaldir. L1C (1575 MHz), uluslararası işbirliğini mümkün kılan Multiplexed Binary Offset Carrier (MBOC) modülasyon şemasına sahiptir. L1C, orijinal L1 C/A ile aynı frekansta yayın yapmaktadır, geçmiş ile uyumu sağlayabilmek amacıyla L1 C/A devam ettirilmektedir. L1C sinyali ilk defa GPS III uydusu ile Aralık 2018'de yayınlanmaya başlanmıştır. 26 Mayıs 2020 itibariyle 2 adet GPS uydusundan L1C sinyalinin yayını yapılmaktadır.

26 Mayıs 2020 itibariyle, GPS'in hizmet dışı bırakılmış ve yörüngedeki yedek parçalar hariç toplam 31 işlevsel uydusu bulunmaktadır (<http://www.gps.gov>, [Agustos, 2020](#)).

Çizelge 2.2. GPS uyduları

ESKİ UYDULAR		MODERNİZE UYDULAR		
				
BLOK IIA	BLOK IIR	BLOK IIR-M	BLOK IIF	GPS III / IIIF
0 Operasyonel	10 Operasyonel	7 Operasyonel	12 Operasyonel	2 Operasyonel
Sivil kullanıcılar için L1 frekansında C / A kodu	L1'de C / A kodu L1 ve L2'de P (Y) kodu	Tüm eski sinyaller L2 ile ilgili 2. sivil sinyal (L2C)	Tüm Blok IIR-M sinyalleri L5 frekansında (L5) 3. sivil sinyal	Tüm Blok IIF sinyalleri L1'de (L1C) 4. sivil sinyal
Askeri kullanıcılar için L1 ve L2 frekanslarında P (Y) kodu	Yerleşik saat izleme 7,5 yıllık tasarım ömrü	Gelişmiş sıkıştırma direnci için yeni askeri M kodu sinyalleri	Gelişmiş atom saatleri İyileştirilmiş doğruluk, sinyal gücü ve kalite	Gelişmiş sinyal güvenilirliği, doğruluğu ve bütünlüğü Selective Availability yok
7,5 yıllık tasarım ömrü	1997-2004'te yörüngeye fırlatıldı	Askeri sinyaller için esnek güç seviyeleri 7,5 yıllık tasarım ömrü	12 yıllık tasarım ömrü	15 yıllık tasarım ömrü
1990-1997'de yörüngeye fırlatıldı		2005-2009'da yörüngeye fırlatıldı	2010-2016'da yörüngeye fırlatıldı	IIIF: lazer reflektörleri; arama ve kurtarma yükü 2018'de ilk lansman
Sonuncusu 2019'da hizmet dışı bırakıldı				

(www.gps.gov, Ağustos, 2020)

Amerikan hükümeti iki yıla kadar, tamamen işlevsel navigasyon mesajları ile L5 yayını yapan uydu sayısı 24 oluncaya kadar, kodsuz ve yarı-kodsuz GPS erişimini mümkün kılan mevcut GPS L1 C / A, L1 P (Y), L2C ve L2 P (Y) sinyal özelliklerini kaldıracaktır (2019 Federal Radionavigation Plan).

2.2. GLONASS

Rusya Federasyonu'nun Küresel Navigasyon Uydu Sistemi olan GLONASS, deniz, hava, kara ve uzay kullanıcıları için konumlandırma, hız ve hassas zaman

sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. GLONASS, kontrol bölümü, kullanıcı bölümü ve uzay bölümü olmak üzere üç bölümden oluşur. Tamamen konuşlandırılmış GLONASS uydusu takımı 3 yörüngeye yerleştirilmiş toplam 24 uydudan oluşmaktadır. GLONASS uyduları yerden 19100 km yükseklikte, yörünge düzlemleri, Dünya'nın ekvatorial düzlemiyle 64.8° lik açı yapmaktadır. Uydular yörüngeyi 11 sa 15 dk 44 sn' de tamamlamaktadır. GLONASS uydusu takımı 2011 yılında tam operasyonel kapasite ile hizmet vermeye başlamıştır. GLONASS, L1 ve L2 olmak üzere L bandında modüle edilmiş iki çeşit sinyal kullanır ayrıca C/A kodu (Coarse/ Acquisition), P kodu (Precision code) olmak üzere iki adet kod kullanır. Çizelge 2.3'te GLONASS uydularının genel durumu verilmiştir. GLONASS, hem L1 hem de L2 alt bantlarında Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA) tekniğini kullanır. Bu, her uydunun L1 ve L2 alt bantlarında kendi taşıyıcı frekansı üzerinden navigasyon sinyalini ilettiği anlamına gelmektedir (GLONASS ICD, 2011). GLONASS, FDMA sinyal ayırma tekniğini kullanması nedeniyle GLONASS kod gözlemlerinde alıcı ve uyduya bağlı kanallar arası hatalar (inter-channel biases (ICBs)) bulunur. ICB'ler her uydusu için farklı olduklarından alıcı saatine yerleştirilemezler. Tüm bunlar dikkate alınarak GLONASS kod ölçümlerinin doğruluğu GPS kod ölçümlerinden daha düşük olduğu için GLONASS kod ölçümlerine küçük ağırlıklar atanması önerilir (Cai ve Gao, 2013).

Çizelge 2.3. Ekim 2016 itibarıyla GLONASS navigasyon uydusu sisteminin durumu

GLONASS	BLOCK	SİNYAL	UYDULAR
	M	L1 L2 C/A & P	23
	M+	L1 L2 C/A & P, L3	1
	K	L1 L2 C/A & P, L3	1+

(Montenbruck vd., 2017)

GLONASS ilk GLONASS-K uydusunu 26 Şubat 2011'de yörüngeye fırlatmıştır. GLONASS-K uyduları, FDMA tekniği yerine CDMA tekniğinin sinyallerini iletmektedir. 2020'den sonra fırlatılması planlanan yeni nesil uyduların, GLONASS-KM ve K2 prototipini temel alması planlanmaktadır (Urlichich vd. 2011'den aktaran Montenbruck vd., 2017).

2.3. GALİLEO

Galileo, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından, konumlama ve navigasyon amaçlı geliştirilen küresel uydu tabanlı bir sistemdir. Galileo, uzay bölümü, kontrol bölümü ve kullanıcı bölümü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır (<https://www.gsc-europa.eu/>, Ağustos, 2020).

Galileo uydularını, yörünge içi doğrulama (IOV) ve tam operasyonel kapasite (FOC) uyduları olarak iki aşamalı fırlatmıştır. İlk IOV uydu çifti Ekim 2011’de, ikinci IOV uydu çifti Ekim 2012’de fırlatılmıştır. IOV uyduları fırlatıldıktan sonra tam operasyonel kapasiteye geçiş için belirli aralıklarla FOC uyduları fırlatılmıştır. Galileo sistemi için tam operasyonel yetenek (FOC) aşaması 22 Ağustos 2014’te başlatılmıştır. Son güçlendirme 25 Temmuz 2018’de yapılmıştır, dört FOC Galileo uydusu fırlatılmıştır. Gelecek fırlatmalar 2020 sonundan itibaren planlanmaktadır. İlk fırlatmalar yedek uyduların konuşlandırılmasıyla güçlendirilecektir. Sonraki fırlatmalar uydu ikmali amacıyla kullanılacaktır (<https://www.gsc-europa.eu/>, Ağustos, 2020). Galileo uzay bölümü tam olarak konuşlandırıldığında 6 uydu yedek olmak üzere toplam 30 uydudan oluşacaktır. Galileo uyduları yerden 23222 km uzaklıkta, 3 adet yörüngeye konuşlandırılmış ve yörüngelerin ekvator düzlemiyle yaptığı açı 56°’dir. Yörüngelerin bir tam turu yaklaşık 14 saattir. Galileo uyduları CDMA tekniğini kullanır ve uydular E5, E6 ve E1 sinyallerini iletir. E5 sinyali, E5a ve E5b olmak üzere iki sinyale bölünmüştür (European GNSS (Galileo) Open Service Signal-In-Space Interface Control Document, 2016). Çizelge 2.4.’te Galileo taşıyıcı frekansları gösterilmektedir.

Çizelge 2.4. Galileo konumlama ve navigasyon sisteminin taşıyıcı frekansları

SİNYAL	TAŞIYICI FREKANS (MHz)	DALGA BOYU (cm)
E1	1575.42	19
E6	1278.75	23.4
E5a	1176.45	25.5
E5b	1207.14	24.8

(European GNSS (Galileo) Open Service Signal-In-Space Interface Control Document, 2016)

2.4. BEİDOU (BDS)

BeiDou (BDS) navigasyon uydu sistemi, küresel olarak kullanıcılara her zaman, her türlü hava koşulunda ve yüksek doğrulukta konumlandırma, navigasyon ve

zamanlama hizmeti sunmak üzere Çin tarafından, ülkenin ulusal güvenliği ve sosyal kalkınma ihtiyaçları göz önünde bulundurularak kurulmuştur. Çin BDS'yi üç aşamada planlamıştır. İlk aşama BDS-1 tüm ülkeye hizmet vermek amacıyla 2000 yılında tamamlanmıştır. BDS-2 Asya Pasifik bölgesine hizmet vermek için 2012 yılında tamamlanan aşamadır. BDS-3 2020 yılına kadar 30 uydunun fırlatılmasıyla sistemin küresel olarak hizmet vermesiyle tamamlanmasını amaçlayan aşamadır. BDS, diğer navigasyon sistemleri gibi uzay bölümü, kontrol bölümü ve kullanıcı bölümü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Uzay bölümü, GEO (Geostationary Earth Orbit), MEO (Medium Earth Orbit) ve IGSO (Inclined Geo-Synchronous Orbit) uydularından oluşur (<http://en.beidou.gov.cn/>, Ağustos,2020).

BDS-2, 5 GEO, 5 IGSO ve 4 MEO uydusundan oluşmaktadır. MEO uydularının yerden yüksekliği 21528 km, GEO ve IGSO uydularının yerden yüksekliği 35786 km'dir. BDS-3, 3 GEO, 3 IGSO ve 24 MEO uydusundan oluşmaktadır. BDS uyduları ekvator düzlemiyle 55°lik açı yapmaktadır. BDS, B1, B2 ve B3 sinyallerini iletmektedir ve sinyal ayırma tekniği olarak CDMA tekniğini kullanmaktadır (BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 3.0), China Satellite Navigation Office, February 2019). Çizelge 2.5.'da BDS'nin taşıyıcı frekansları gösterilmektedir.

Çizelge 2.5. BDS'nin taşıyıcı frekansları

SİNYAL	TAŞIYICI FREKANS (MHz)	DALGA BOYU (cm)
B1	1561.098	19.2
B2	1207.14	24.8
B3	1268.52	23.6

(BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 3.0), China Satellite Navigation Office, February 2019)

3 Ağustos 2020 itibariyle BDS-3 resmi olarak devreye alınmıştır. BDS uydu takımında toplam 49 uydu bulunmaktadır, bu 49 uydudan, 15 BDS-2, 29 BDS-3 olmak üzere 44 tanesi işlevsel olarak faaliyet göstermektedir (<https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/>, Ağustos,2020).

2.5. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİNİN (GNSS) KARŞILAŞTIRMASI

GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou olmak üzere her sistemin kendi zaman ölçeği ve koordinat sistemi vardır. Çizelge 2.6.'da Küresel Uydu Navigasyon Sistemlerinin Özelliklerinin Kıyaslanması verilmiştir.

GPS zamanı, 6 Ocak 1980'de UTC'ye (Coordinated Universal Time) uygun olacak şekilde ayarlanmıştır (NAVSTAR GPS Space Segment/Navigaton User Segment Interface, Kasım, 2015).

GLONASS saati, Moskova zamanı (MT) ve Greenwich zamanı arasında üç saatlik zaman farkı dikkate alınarak GLONASS saati ile UTC arasındaki fark 1 milisaniye içinde olacak şekilde ayarlanmıştır (Global navigation satellite system GLONASS interface control document (Versiyon 5.1), 2008).

Galileo sistem saati (GST), 21 Ağustos ve 22 Ağustos 1999 arasında gece yarısından 13 saniye önce olarak tanımlanmıştır, yani GST 22 Ağustos 1999 00:00:00'da UTC'de 13 saniyeye eşittir. GST ve UTC arasında oluşan tam sayı artık saniye sayıları düzeltildiğinden, GALİLEO navigasyon mesajı GST ve UTC arasında dönüşüm için gerekli tüm parametreleri içermektedir (European GNSS (GALILEO) open service interface control document (Version1.3)).

BeiDou navigasyon uydu sistemi zamanının (BDT) başlangıç dönemi 1 Ocak 2006 UTC'ye göre 00: 00: 00'dır (BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document (Version 2.1), Şubat, 2019) .

Her sistemin farklı Yer-Merkezli Yer-Sabit Koordinat Sistemi (ECEF) vardır. GPS, koordinat sistemi olarak WGS-84'ü kullanır, koordinat sisteminin başlangıç merkezi Dünya'nın ağırlık-kitle merkezidir, X eksen, Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (IERS) Referans Meridyeni (IRM) ile çakışır, Z eksen, IERS Referans Kutbu (IRP) yönünü gösterir ve Y eksen, sağ el koordinat sistemidir (NAVSTAR GPS Space Segment/Navigaton User Segment Interface, Kasım, 2015).

GLONASS, PZ-90 koordinat sistemini kullanır; koordinat sisteminin merkezi Dünya'nın ağırlık merkezi, X eksen, ekvator düzlemi ile Bureau International de l'Heure (BIH) tarafından oluşturulan sıfır meridyenin kesişme noktasına yönlendirilmiştir, Z eksen, IRP'yi gösterir ve Y eksen sağ el koordinat sistemidir (Global navigation satellite system GLONASS interface control document (Versiyon 5.1), 2008).

Galileo, Uluslararası Yersel Referans Sistemi (ITRF) tanımıyla uyumlu olan, GTRF koordinat sistemini kullanmaktadır.

BeiDou, Çin Koordinat Sistemi 2000 (CGCS2000) koordinat sistemini kullanmaktadır; X eksenini IRM'ye, Z eksenini IRP'ye yönelmiştir ve Y eksenini sağ el koordinat sistemidir (BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document (Version 2.1), Şubat, 2019) .

Çizelge 2.6. Küresel Uydu Navigasyon Sistemlerinin Özelliklerinin Kıyaslanması

	GPS	GLONASS	GALİLEO	BEİDOU	
Ülke	ABD	Rusya	Avrupa	Çin	
Uydu sayısı	31	27	24	BDS2 15	BDS3 29
Yörünge sayısı	6	3	3	3	
Eğim	55°	64.8°	56°	55°	
Yörünge yarıçapı (km)	26508	25510	29601	MEO 27878	GEO/IGSO 42164
Yeryüzünden yükseklik (km)	20200	19130	23222	MEO 21528	GEO/IGSO 35786
Yörünge periyodu	11 ^{saat} 58 ^{dk}	11 ^{saat} 16 ^{dk}	14 ^{saat} 04 ^{dk}	12 ^{saat} 53 ^{dk}	
Koordinat sistemi	WGS-84	PZ-90	GTRF	CGCS ₂₀₀₀	
Zaman ölçeği	GPS Time	GLONASS Time	GST	BDT	
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 :1561.1 B ₃ :1268.52	B ₂ :1207.14

(Bahadır, 2017; www.gps.gov, Ağustos, 2020; BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 3.0), China Satellite Navigation Office, February 2019; European GNSS (Galileo) Open Service Signal-In-Space Interface Control Document, 2016; Global Navigation Satellite System GLONASS, Interface Control Document General Description of Code Division Multiple Access Signal System Edition 1.0, Moscow, 2011)

3. HASSAS NOKTA KONUM BELİRLEME (PPP)

Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP) kavramı ilk kez Zumberge vd. (1997) tarafından ortaya atılmıştır. PPP, başlangıçta büyük GPS verilerinin işlenmesi için kullanılmış sonrasında Kouba ve Hereoux (2001) tarafından geliştirilerek görelî konum belirlemeye alternatif olarak kullanılabilirdiği ortaya çıkmıştır.

PPP, hem taşıyıcı faz hem kod gözlemlerini ve küresel bir ağdan yayınlanan hassas uydu yörünge ve saat ürünleri bir arada kullanarak, tek bir alıcı ile referans istasyonuna ihtiyaç duymaksızın cm seviyesinde konum doğruluğu sağlayan hassas konum belirleme tekniğidir.

PPP, atmosferin izlenmesi ve modellenmesi, hava nirengi uygulamaları, ölçme, yer kaynaklı tehlikelerin belirlenmesi, inşaat alanında yapı sağlığının izlenmesi gibi günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, PPP'nin ana ticari uygulama alanı tarım endüstrisinde, hassas tarımda kullanılmaktadır, aynı şekilde denizcilik uygulamalarında, deniz haritalanması gibi yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Temel olarak PPP, hassas konumlandırma ve navigasyonun gerekli olduğu, izole veya geniş alanlarda veyahut referans istasyonu alt yapısı bulunmayan alanlarda uygulanabilir bir yöntemdir (Shi vd., 2017; Yuan vd., 2009; Tu vd., 2013; Wright vd., 2012; Lu vd., 2015; Li vd., 2013; Yiğit ve Gürlek, 2017; Alkan vd., 2015; Bisnath ve Gao, 2009).

Tipik bir çift frekanslı GNSS alıcısı, çift frekanslı kod ve faz ölçümlerini doğrusal olarak kombine ederek, iyonosferik refraksiyonun etkisini ortadan kaldırmaktadır. Gerçek değerli taşıyıcı faz ambiguity terimi, ölçüm modelinden tahmin edilir. Alıcı konumu ve ambiguity parametreleriyle birlikte troposferik refraksiyon da ölçümlerden tahmin edilmektedir. PPP'den mümkün olan en iyi doğruluğu elde etmek için, taşıyıcı faz wind-up etkisi, katı yeryüzü etkisi, verici anten faz kayması, okyanus yüklemesi etkisi gibi etkiler modellenerek düzeltilmelidir. Alıcı gürültüsü ve multipath etkileri ihmal edilmekte ya da stokastik prosedürler kullanılarak minimuma indirgenmektedir. PPP, post-process ya da gerçek zamanla olarak, statik modda birkaç santimetre (cm) seviyesinde, kinematik modda birkaç desimetre (dm) seviyesinde doğruluk sağlayabilmektedir.

Geleneksel PPP hizmetinin performansı, doğruluk, hassaslık, yakınsama süresi ve entegrasyon olmak üzere bu ölçümler minvalinde tanımlanır. PPP'nin en önemli dezavantajı olarak görülen yakınsama süresi, uzun bir başlatma süresi gerektirmektedir.

Genel olarak, standart bir statik PPP işleminden 5 cm doğruluk elde etmek için yakınsama süresi en az bir saattir (Choy vd., 2017). PPP yakınsama süresi, görünür uydu sayısı ve geometrisi, gözlemlerin kalitesi ve örnekleme oranları, kullanıcı ortamı ve dinamikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. PPP'nin doğruluğunu etkileyen temel kısıtlamalar, mevcut hassas uydu yörünge ve saat ürünlerinin yeterince hassasiyete sahip olup olmaması ve modellenmemiş hata kaynaklarının etkileridir. PPP işlemede, bazı parametreler tahmin edilirken bazıları ayrı bir işlemde üretilmektedir, bu nedenle bütünlük bilgisi sağlamak da oldukça önemlidir (Bisnath ve Gao, 2009).

PPP ile uygulanabilir ve güvenilebilir sonuçlar elde etmek için hata kaynaklarının uygun şekilde giderilmesi gerekmektedir aynı zamanda PPP'nin temel kısıtlaması olan yakınsama süresini azaltmaya yönelik yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Birinci bölümde yakınsama süresini azaltmaya yönelik çalışmalardan bahsedilmiştir.

4. GELENEKSEL PPP ve ÇOKLU-GNSS PPP YAKLAŞIMLARI

PPP, tek alıcı ile referans istasyonuna ihtiyaç duymaksızın cm mertebesinde konum doğruluğu sağlayan bir konum belirleme tekniğidir. Küresel bir ağdan yayınlanan (International GNSS Service (IGS)) hassas uydu yörünge ve saat ürünleri sayesinde uydu yörünge ve saat hataları giderilmektedir. PPP çift-frekanslı kod ve faz ölçümleri ile iyonosfer içermeyen lineer kombinasyonlar kullanarak iyonosfer etkisini büyük oranda azaltmaktadır. PPP’de çözümlerin doğru ve güvenilir olabilmesi için tahmin süreçlerinde kullanılan modellerin en uygun şekilde tanımlanması gerekmektedir. PPP’de kullanılan en yaygın model, fark alınmamış (undifferenced) iyonosfer içermeyen kod ve faz gözlemleridir. Tahmin süreçlerinde kullanılan stokastik modellerin uygun bir şekilde belirlenmesi çözüm performansına etkisi oldukça önemlidir. PPP bilinmeyen parametrelerin tahmininde genellikle Kalman filtresi kullanılmaktadır. Kalman filtresi sistemin durumu hakkında, ölçülerin ve bilinmeyen parametrelerin tanımlanması, daha doğru ve güvenilir çözüme ulaşmak için bir tahmin sağlamaktadır (Bahadur ve Nohutçu, 2020). Bu bölümde tezde kullanılan stokastik Kalman filtresi, geleneksel PPP ve Çoklu-GNSS PPP yaklaşımlarına değinilecektir.

4.1. Kalman Filtresi

Kalman filtresi, en küçük kareler yönteminin etkili hesaplamalı (özyinelemeli) çözümünü sağlayan matematik denklemler kümesidir. Kalman filtresi, geçmiş, şimdiki zamanı ve aynı zamanda gelecekteki durumların tahminlerini yapabildiğinden birçok yönden oldukça önemli bir filtredir (Welch ve Bishop, 1995).

4.1.1. Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF)

Genişletilmiş Kalman filtresi bilinmeyenleri ve gözlem eşitlikleri, lineer olmayan bir sistemde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x_k = f(x_{k-1}) + w_k \quad (4.1)$$

$$y_k = h(x_k) + v_k \quad (4.2)$$

Burada x_k durum vektörü, y_k gözlem vektörü, $f(x)$ dinamik model, $h(x)$ gözlem modeli, w_k ve v_k sırasıyla sistem ve gözlem modeli için korelasyonsuz beyaz gürültü vektörüdür.

Durum vektörü (x) ve durum vektörünün kovaryans matrisi $P(x)$, herhangi bir (t_k) epeğinde gözlem vektörü (y) yardımıyla genişletilmiş kalman filtresi kullanılarak aşağıdaki şekilde tahmin edilebilir:

$$\bar{x}_k = F_{k,k-1} \hat{x}_{k-1} \quad (4.3)$$

$$P_{x_k}^- = F_{k,k-1} P_{x_{k-1}} F_{k,k-1}^T + Q_{k,k-1} \quad (4.4)$$

$$K_k = P_{x_k}^- H_k^T \left(H_k P_{x_k}^- H_k^T + R_k \right)^{-1} \quad (4.5)$$

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k \left(y_k - h(\bar{x}_k) \right) \quad (4.6)$$

$$P_{\hat{x}_k} = (1 - K_k H_k) P_{x_k}^- \quad (4.7)$$

burada \bar{x}_k ve $P_{x_k}^-$, t_k epeğinde kestirilen durum vektörünü ve onun kovaryans matrisini; $F_{k,k-1}$ ve $Q_{k,k-1}$ sırasıyla geçiş matrisini ve sistem gürültüsünü (w_k) t_{k-1} epeğundan t_k epeğine taşıyan kovaryans matrisini ifade eder. \bar{x}_k ve $P_{x_k}^-$ öncül olarak tahmin edilmiş durum vektörünü ve onun kovaryans matrisini ifade etmektedir. H_k kısmi türevlerden (Jacobian) oluşan dizayn matrisini, R_k ölçülerin kovaryans matrisini ve K_k Kalman kazanç matrisini ifade etmektedir.

PPP çözümünde bilinmeyen parametreler; alıcı koordinatları, alıcı saat hatası, faz başlangıç belirsizliği ve troposferik gecikmenin ıslak bileşenidir. Konum bileşenleri statik değerlendirmede de sabit kabul edilirken kinematik değerlendirmede hareketin zamana göre değişimi göz önünde bulundurularak değerlendirilmesi gerekmektedir (Zhang vd., 2018). Kalman filtresinde alıcı saat hatası ve troposferik gecikme rastgele yürüyüş (random walk) olarak kestirilmektedir. Belirsizlik parametreleri ilgili uyduya ait sinyaller kesilmediği sürece sabit kabul edilmektedir ve tam sayı özelliği kaybolduğundan ondalık bir sayı olarak kestirilmektedir (Cai ve Gao, 2013; aktaran Bahadır ve Nohutçu, 2020).

Kalman filtresinde R_k ile ifade edilen, ölçülerin stokastik davranışının kovaryans matrisidir. Standart PPP yaklaşımında ölçülerin kovaryans matrisi, yalnızca köşegen elemanlarıyla yani ölçülerin varyans değerleri ile oluşturulmaktadır. Bu durum, standart PPP'nin fark alınmamış (undifferenced) gözlemler kullanmasından ötürü ölçülerin birbiriyle ilişkisiz kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır.

4.2. Geleneksel PPP Yaklaşımı

Hassas Nokta Konumlama (PPP) ilk olarak küresel bir ağdan gelen büyük GPS verilerini işleyerek hassas konum elde edilmesinde kullanılmıştır (Zumberge vd., 1999). Daha sonraları geliştirilerek (Kouba ve Hereoux, 2001) görelî konum belirlemeye alternatif olarak uygulanmaya başlanmıştır. Bu bölümde geleneksel PPP yaklaşımında kullanılan gözlem ve stokastik modeller verilmiştir.

4.2.1. PPP Gözlem Modeli

$$P_{IF,r}^{s,j} = p_r^{s,j} + c\tilde{d} t_r^s - c\tilde{d} T^{s,j} + T_r^{s,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{s,j}) \quad (4.8)$$

$$L_{IF,r}^{s,j} = p_r^{s,j} + c\tilde{d} t_r^s - c\tilde{d} T^{s,j} + T_r^{s,j} + \lambda_{IF}^s \tilde{N}_{IF}^{s,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{s,j}) \quad (4.9)$$

burada

$$c\tilde{d} t_r^s = (c\tilde{d} t_r^s + b_{IF,r}^s) \quad (4.10)$$

$$c\tilde{d} T^{s,j} = (c\tilde{d} T^{s,j} + b_{IF}^{s,j}) \quad (4.11)$$

$$\tilde{N}_{IF}^{s,j} = N_{IF}^{s,j} + (B_{IF,r}^s - b_{IF}^{s,j}) - (B_{IF}^{s,j} - b_{IF}^{s,j}) \quad (4.12)$$

burada r alıcı, s GNSS endeksi, j uydu numarası, $p_r^{s,j}$ geometrik mesafe, c ışık hızı, $T_r^{s,j}$ troposferik gecikme, $N_{IF}^{s,j}$ belirsizlik parametresi, IF (Ionosphere Free) lineer kombinasyonun dalga boyu, ε gürültü, $c\tilde{d} t_r^s$ alıcı saat hatası, $c\tilde{d} T^{s,j}$ uydu saat hatası, $b_{IF,r}^s$ IF lineer kombinasyon için alıcı kod donanım hatası, $b_{IF}^{s,j}$ IF lineer kombinasyon için uydu kod donanım hatası,

$B_{IF,r}^s$ ve $B_{IF}^{s,j}$ sırasıyla lineer kombinasyon için alıcı ve uydu faz donanım hatasıdır. $c\tilde{d} t_r^s$ ve $c\tilde{d} T^{s,j}$ saat hatalarına ek olarak donanım hatalarını da içerdikleri için sırasıyla

yeniden düzenlenmiş alıcı ve uydu saat hatalarını ve $\tilde{N}_{IF}^{s,j}$ IF lineer kombinasyonu için düzenlenmiş belirsizlik parametresidir. Standart PPP ölçü modelinde, üç konum bileşeni, bir alıcı saat hatası, bir troposferik gecikme ve gözlemlenen her uydu için bir belirsizlik parametresi bilinmeyen olarak kestirilmektedir (Bahadur ve Nohutçu, 2020).

Standart PPP tekniği ölçü modeli iyonosfer içermeyen (IF) lineer kombinasyonlar ile çift frekanslı faz ve kod ölçümlerinden oluşmaktadır. IF lineer kombinasyon kullanıldığı için GNSS sinyallerindeki iyonosferik etkinin büyük oranda giderilmesi sağlanmaktadır. PPP'deki en önemli hata kaynaklarından olan uydu saat hataları, küresel bir ağdan yayınlanan (International GNSS Service) IGS tarafından sağlanan IF lineer kombinasyonlar baz alınarak üretilen hassas uydu saat ürünleri ile giderilmektedir. IGS tarafından sağlanan uydu saat düzeltmeleri, uydu saat hatasının yanında uydu kod donanım hatasını da içerdiğinden, bu hatalar uydu saat hatasına yüklenmek suretiyle hassas ürünler yardımıyla giderilmektedir. Alıcı kod donanım hatası ise alıcı saat hatasıyla birlikte kestirilmektedir. Alıcı faz donanım hataları için ise IGS tarafından ayrı bir ürün sağlanmadığı için, belirsizlik parametresine yüklenerek tek bilinmeyen olarak kestirilmektedir (Bahadur ve Nohutçu,2020).

Hassas uydu yörünge ve saat ürünleri, iyonosferden bağımsız lineer kombinasyonlara uygulanarak hatalar giderilir. Diğer hata kaynakları modellenir. Tüm hata kaynakları düzeltildikten sonra gözlem modeli basitleştirilmiş olarak aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$P_{IF,r}^{s,j} = p_r^{s,j} + c\tilde{d} t_r^s + Z_{wet}M_{wet}(E) + \mathcal{E}(P_{IF,r}) \quad (4.13)$$

$$L_{IF,r}^{s,j} = p_r^{s,j} + c\tilde{d} t_r^s + Z_{wet}M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^s B_{IF}^{s,j} + \mathcal{E}(L_{IF,r}) \quad (4.14)$$

$$p_r^{s,j} = \sqrt{(x^s - x^r)^2 + (y^s - y^r)^2 + (z^s - z^r)^2} \quad (4.15)$$

Burada; x^s, y^s, z^s uydu konumu, x^r, y^r, z^r alıcı konumu, Z_{wet} ıslak bileşen nedeniyle zenit gecikmesi, M_{wet} ıslak haritalama fonksiyonu, E uydu yükseklik açısıdır. Bu durumda bilinmeyen parametreler matrisi şu şekildedir:

$$x = [x^r, y^r, z^r, c\tilde{d} t_r^s, Z_{wet}, \lambda_{IF}^s B_{IF}^{s,1}, \lambda_{IF}^s B_{IF}^{s,2}, \dots] \quad (4.16)$$

Gözlem modelinden görüldüğü üzere, ölçüm denklemleri doğrusal değildir. Gözlem modelinde tahmin edilen parametrelerin kısmi türevleri ile katsayılar matrisi oluşturulmaktadır:

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial x^r} = \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial x^r} = -\frac{x^s - x^r}{p},$$

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial y^r} = \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial y^r} = -\frac{y^s - y^r}{p},$$

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial z^r} = \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial z} = -\frac{z^s - z^r}{p},$$

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial \tilde{c} d t_r^s} = \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial \tilde{c} d t_r^s} = 1,$$

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial Z_{wet}} = \frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial Z_{wet}} = M_{wet}(E),$$

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{s,j}}{\partial \lambda_{IF}^s B_{IF}^{s,j}} = 0,$$

$$\frac{\partial L_{IF,r}^{s,j}}{\partial \lambda_{IF}^s B_{IF}^{s,j}} = 1$$

Kısmi türevlerden oluşan tam katsayılar matrisi her uydu için şu şekildedir:

$$H = \begin{bmatrix} -\frac{x^s - x_0^r}{p_0} & -\frac{y^s - y_0^r}{p_0} & -\frac{z^s - z_0^r}{p_0} & 1 & M_{wet}(E) & 0 & \dots \\ -\frac{x^s - x_0^r}{p_0} & -\frac{y^s - y_0^r}{p_0} & -\frac{z^s - z_0^r}{p_0} & 1 & M_{wet}(E) & 1 & \dots \end{bmatrix}$$

4.2.2. Stokastik Model

Kalman filtresi ile en uygun çözüme ulaşmak için ölçümlerin ve parametrelerin doğru bir şekilde tanımlanması önemlidir. Kalman filtresi, tahmin edilen parametrelerin ve ölçümlerin istatistiksel özelliklerine ihtiyaç duymaktadır. Ölçümlerin istatistiksel özelliklerini belirlemek için Denklem (4.5)' te R ile gösterilen ölçülerin kovaryans matrisini oluşturmak gerekmektedir. Ölçülerin stokastik davranışlarını belirlemek için

ölçülerin kinematik davranışları ve zamanla değişimlerinin tahmin parametreleri önemlidir.

Geleneksel PPP yaklaşımında kullanılan iyonosfer içermeyen lineer kombinasyonların varyanslarını elde etmek amacıyla hata yayılma yasası uygulanır:

$$\sigma_{P_{IF}}^2 = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \sigma_{P_1}^2 + \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \sigma_{P_2}^2 = 6.481\sigma_{P_1}^2 + 2.389\sigma_{P_2}^2 \quad (4.17)$$

$$\sigma_{L_{IF}}^2 = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \sigma_{L_1}^2 + \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \sigma_{L_2}^2 = 6.481\sigma_{L_1}^2 + 2.389\sigma_{L_2}^2 \quad (4.18)$$

burada $\sigma_{P_1}^2$ ve $\sigma_{P_2}^2$ frekans 1 ve 2'deki kod gözlemlerinin varyansı, $\sigma_{L_1}^2$ ve $\sigma_{L_2}^2$ frekans 1 ve 2'deki faz gözlemlerinin varyansıdır. $\sigma_{P_{IF}}^2$ ve $\sigma_{L_{IF}}^2$ iyonosfer içermeyen lineer kombinasyonların varyansları gözlem matrisinin (R) köşegen bileşenleridir.

Faz ve kod gözlemleri korelasyonsuz varsayıldığı için, gözlem matrisinin köşegen elemanları dışındaki elemanlar sıfır kabul edilir. Kod gözlemleri, taşıyıcı faz gözlemlerinden çok daha büyük dalga boyuna sahip olduğu için, kod gözlemlerinin gürültüsü faz gözlemlerinin gürültüsünden çok daha fazladır (Bahadur, 2017).

Tahmini parametrelerin stokastik özelliklerinin tanımlanması gerektiği gibi, Kalman filtresindeki ölçülerin stokastik özellikleri de tanımlanmalıdır. Geleneksel PPP modelinde, durum vektörü; üç koordinat bileşeninden, bir alıcı saat ofsetinden, bir zenit ıslak troposferik gecikmeden ve belirsizlik parametrelerinden oluşur. Tahmin edilen parametrelerin beklenen değerleri başlangıçtaki durum vektörü \hat{x}_0 'ı oluşturmaktadır. Durum vektörünün bileşenleri arasında bir korelasyon olmadığı varsayılırsa, ilk kovaryans matrisi P_0 yalnızca köşegen elemanlarını içerir.

Dinamik model davranışını doğru bir şekilde tanımlamak oldukça zordur. Koordinat bileşenleri, troposferik gecikme ve alıcı saat hatası rastgele yürüyüş süreci kullanılarak modellenenirken, taşıyıcı faz belirsizlik parametreleri sabit varsayılır. Rastgele yürüyüş süreci için sistem dinamiklerinin fark denklemi aşağıdaki denklemde verilmiştir:

$$F(t)x(t) + w(t) = \dot{x}, \quad w(t) \approx q(t) \quad (4.19)$$

burada $F(t)$ sistem dinamik matrisi, $w(t)$ spektral yoğunluk matrisi $q(t)$ tarafından tanımlanan raslantısal beyaz gürültüdür. Sistem dinamik matrisinin yayılması aşağıdaki gibi basitleştirilmiştir:

$$Q = \int_0^{\Delta t} A(t)q(t)A(t)^T \quad (4.20)$$

burada Q proses gürültü matrisi, t zaman farkı, $A(t)$ geçiş matrisidir.

Statik konumlandırma istasyon koordinatlarının geçiş matrisi ve gürültü matrisi şu şekildedir:

$$Q_{pos} = \begin{bmatrix} q_x \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & q_y \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & z \Delta t \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

burada q_x , q_y , q_z konum bileşenlerinin spektral yoğunluğudur.

Benzer şekilde alıcı saat hatası ve troposferik gecikme için geçiş matrisi ve bu parametrelerin gürültüsü aşağıdaki gibidir:

$$Q_{clock} = [q_{clock} \Delta t] \quad (4.22)$$

$$Q_{trop} = [q_{trop} \Delta t] \quad (4.23)$$

ve burada q_{clock} ve q_{trop} sırasıyla alıcı saat ve zenit ıslak gecikmenin spektral yoğunluğudur (Bahadur, 2017).

Kalman (Kalman, 1960) filtresi her dönemde durum vektörünü yenileyen özyinelemeli bir filtredir. Herhangi bir hata ölçümleri etkileyeceğinden, ölçümlerdeki hata tespiti ve minimize edilmesi son derece önemlidir.

Stokastik modelde öngürülen ve gerçek değerler arasındaki tutarlılık önemlidir. Tutarlılığı tespit etmek için inovasyon dizisi vektörü kullanılmaktadır;

$$v_k = z_k - (\hat{x}_k, 0) \quad (4.24)$$

burada z_k gerçek ölçümler ve h ise ölçüm modelidir.

İnovasyon dizisi hatalı ölçümlerin etkisini yansıtır. Öncelikle bu dizilerin Gauss'a uygunluğunu test etmek amacıyla global test uygulanmaktadır. Global testte herhangi bir anormallik tespit edildiği durumda yerelleşme yapılarak yerel test uygulanır ve maksimum yerel test değerine sahip ölçümün aykırı değer olduğu kabul edilir (Teunissen ve Salzmann, 1988'den aktaran Bahadur, 2017). Global ve yerel test işleyişi:

Global test:

$$T = v_k^T S_k v_k \mid T < X_{\alpha}^2(m_k, 0) \quad (4.25)$$

Yerel test:

$$w = \frac{(v_k)_i}{\sqrt{(S_k)_{ii}}} \quad (4.26)$$

burada:

$$S_k = R_k + H_k P_k^- H_k^T$$

α = önem seviyesi

m_k = özgürlük derecesi

$X_{\alpha}^2(m_k, 0)$ = ki-kare dağılımının üst α olasılık noktası

H_k = tasarım matrisi

R_k = ölçümlerin kovaryans matrisi

P_k^- = tahmin edilen parametrelerin kovaryans matrisi

4.3. Çoklu-GNSS PPP Yaklaşımı

Uluslararası GNSS Servisi (IGS (Dow vd., 2009)), bünyesinde dünyanın her yerinden çok sayıda üniversite, araştırma kurumu, jeodezi ve uzay ajansı barındıran, yüksek kalitedeki GNSS verilerini ve ürünlerini, bilimsel araştırmalar, bilimsel çalışmalar ve kamu yararı için ücretsiz olarak sağlamak amacıyla oluşturulmuş bir kuruluştur. IGS kurulduğu günden bugüne başlangıçta GPS için sonrasında GLONASS ve diğer navigasyon sistemleri için hassas yörünge ve saat ürünlerini giderek geliştirmiştir. Navigasyon sistemlerindeki gelişmeler, modernizasyon ile ilgili bilgiler Bölüm 2'de ayrıntılı verilmiştir. Yeni sistemlerin ortaya çıkmasıyla Çoklu-GNSS kavramı gündeme gelmiştir. IGS GPS ve GLONASS'a ek olarak yeni sistemler için de

hassas uydu yörünge ve saat ürünlerini sağlamak için var olan tüm GNSS uydularına gözlem yaparak, yaptığı gözlemlerden elde ettiği verileri toplamak ve değerlendirmek için 2011 yılında Çoklu-GNSS deneyini (Multi-GNSS Experiment (MGEX)) başlatmıştır. Çoklu-GNSS kullanılması PPP üzerinde yakınsama süresini azalttığı için oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalarda sadece GPS kullanılarak yapılan PPP ye göre, GPS/GLONASS, GPS/GLONASS/Galileo ve GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou Çoklu-GNSS kullanılarak yapılan PPP'nin, konum doğruluğunu önemli ölçüde geliştirdiği ve yakınsama süresini de önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir (Hesselbarth ve Wanninger, 2008; Cai ve Gao, 2013; Yiğit vd., 2014; Li ve Zhang; 2014; Tegedor vd., 2014; Cai vd., 2015; Li vd., 2015; Guo vd., 2017; Guo vd., 2017; Bahadur, 2017).

Çoklu-GNSS' in PPP performansını geliştirdiği yapılan araştırmalarla gösterilmiştir. Ancak Çoklu-GNSS PPP'nin doğru bir şekilde uygulanması için, hata kaynaklarının iyi bilinmesi ve modellemelerin uygun şekilde yapılması çok önemlidir. Çoklu-GNSS PPP'si için kullanılacak navigasyon sistemlerinin her biri farklı koordinat sistemine, farklı zaman ölçeklerine ve farklı sinyal ayırma tekniklerine sahiptir. Bu nedenle sistemler arası entegrasyonu sağlamak için stokastik ve fonksiyonel modeller tanımlanmıştır. Her navigasyon sistemi farklı referans çerçevesi kullandığından koordinat sistemi dönüşümü yapılması gerekmektedir ya da Çoklu-GNSS'in sağladığı aynı referans sisteminde sunulan hassas ürünler kullanılmaktadır. Çoklu-GNSS için MGEX hassas uydu yörünge ve saat ürünleri (Çizelge 4.1) sunarak uydu saat hatalarının giderilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.1. MGEX ürünleri

Enstitü	Kısaltma	Uydu Takımı	Uydu Yörünge ve Saat	Uydu ve istasyon saat
CNES/CLS	GRM	GPS+GLO+GAL	15 dk	30 sn
CODE	COM	GPS+GLO+GAL+BDS2+QZS	5 dk	30 sn/5 dk
GFZ	GBM	GPS+GLO+GAL+BDS2+QZS	15 dk	30 sn/5 dk
IAC	IAC	GPS+GLO+GAL+BDS2+BDS3+QZS	5 dk	30 sn
JAXA	GZF	GPS+GLO+QZS	5 dk	30 sn
SHAO	SHAO	GPS+GLO+GAL+BDS2	15 dk	5 dk
TUM	TUM	GAL+BDS2+QZS	5 dk	
Wuhan Univ.	WUM	GPS+GLO+GAL+BDS2+BDS3+QZS	15 dk	5 dk

(<http://www.igs.org>, Kasım, 2020)

Çoklu-GNSS PPP’de iyonosferik etkiyi ortadan kaldırmak için iyonosfer içermeyen gözlemler kullanılarak, gözlem denklemleri şu şekilde oluşturulur:

$$P_{IF,r}^{G,j} = p_r^{G,j} + c \tilde{d} t_r^G + Z_{wet} M_{wet}(E) + \varepsilon(P_{IF,r}^G) \quad (4.27)$$

$$L_{IF,r}^{G,j} = p_r^{G,j} + c \tilde{d} t_r^G + Z_{wet} M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^G B_{IF}^{G,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^G)$$

$$P_{IF,r}^{R,j} = p_r^{R,j} + c \tilde{d} t_r^R + Z_{wet} M_{wet}(E) + \varepsilon(P_{IF,r}^R) \quad (4.28)$$

$$L_{IF,r}^{R,j} = p_r^{R,j} + c \tilde{d} t_r^R + Z_{wet} M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^R B_{IF}^{R,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^R)$$

$$P_{IF,r}^{E,j} = p_r^{E,j} + c \tilde{d} t_r^E + Z_{wet} M_{wet}(E) + \varepsilon(P_{IF,r}^E) \quad (4.29)$$

$$L_{IF,r}^{E,j} = p_r^{E,j} + c \tilde{d} t_r^E + Z_{wet} M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^E B_{IF}^{E,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^E)$$

$$P_{IF,r}^{C,j} = p_r^{C,j} + c \tilde{d} t_r^C + Z_{wet} M_{wet}(E) + \varepsilon(P_{IF,r}^C) \quad (4.30)$$

$$L_{IF,r}^{C,j} = p_r^{C,j} + c \tilde{d} t_r^C + Z_{wet} M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^C B_{IF}^{C,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^C)$$

burada G, R, E, C sırasıyla GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou’yu temsil etmektedir.

Diğer sistemlerin aksine GLONASS sinyal ayırma tekniği olarak FDMA tekniğini kullandığı için, GLONASS alıcı kanallarında farklı donanım hataları mevcuttur (Wanninger,2011). Bu nedenle donanım hataları, ortalama bir terim ve uyduya bağlı bir hata teriminin toplamı olarak şu şekilde yazılır (Cai ve Gao, 2013):

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

$$b_{L_{i,r}}^R = b_{L_{i,r}}^{R,avg} + \delta b_{L_{i,r}}^R \quad (4.32)$$

burada, $b_{P_{i,r}}^{R,avg}$ ve $b_{L_{i,r}}^{R,avg}$, sırasıyla kod ve faz için ortalama alıcı donanım hatası, $\delta b_{P_{i,r}}^R$ ve $\delta b_{L_{i,r}}^R$ frekanslar arası hata (inter-frequency biases (IFB)).

Uydu donanım hataları dikkate alınmamaktadır ve alıcı donanım hataları ise alıcı saati tarafından absorbe edilmektedir (Bahadur,2017). Denklem (4.33) Denklem (4.28)’in içine yazılırsa GLONASS gözlem denklemi:

$$P_{IF,r}^{R,j} = p_r^{R,j} + c \tilde{d} t_r^R + Z_{wet} M_{wet}(E) + \delta b_{P_{IF,r}}^R + \varepsilon(P_{IF,r}^R)$$

$$L_{IF,r}^{R,j} = p_r^{R,j} + c \tilde{d} t_r^R + Z_{wet} M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^R B_{IF}^{R,j} + \lambda_{IF}^R B_{IF}^{R,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^R) \quad (4.33)$$

$$\tilde{d} t_r^R = dt_r^R + b_{P_{IF,r}}^{R,avg}$$

$$\lambda_{IF}^R B_{IF}^{R,j} = \lambda_{IF}^G N_{IF}^{G,j} + \left(b_{L_{IF,r}}^{R,avg} + \delta b_{L_{IF,r}}^R - b_{P_{IF,r}}^{R,avg} \right) - \left(b_{L_{IF}}^{G,j} - b_{P_{IF}}^{G,j} \right)$$

Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü üzere kod sözde mesafe gözlemleri frekanslar arası kod yanlılığı terimi $\delta b_{P_{IF,r}}^R$ içermektedir. Frekanslar arası hatalar durum vektöründe tahmin edilebilir fakat bu durumda fazla bilinmeyen olacağından bilinmeyen model yapısı bozulabilir bu yüzden tercih edilmez. Bu yüzden frekanslar arası hata, faz gözlemlerine kıyasla yalnızca sözde mesafe ölçümlerine daha az ağırlık alması durumunda Çoklu-GNSS modelinde ihmal edilebilir (Cai ve Gao, 2013; Bahadur, 2017).

Denklem (4.27) ile (4.30) arasındaki denklemler doğrudan kullanılırsa tahmin edilen parametrelerde birçok alıcı saati olacağı görülmektedir. Diğer navigasyon sistemleri ile GPS arasındaki zaman sapması parametreleri kullanılarak, sistem hata parametreleri ayarlanmış olan GPS alıcı saatine girilirse, GLONASS, Galileo ve BeiDou için denklemler şöyle yazılır (Cai ve Gao, 2013):

$$P_{IF,r}^{R,j} = p_r^{R,j} + c \left(\tilde{d} t_r^G + ISB_r^R \right) + Z_{wet} M_{wet}(E) + \varepsilon(P_{IF,r}^R) \quad (4.34)$$

$$L_{IF,r}^{R,j} = p_r^{R,j} + c \left(\tilde{d} t_r^G + ISB_r^R \right) + Z_{wet} M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^R B_{IF}^{R,j} + \lambda_{IF}^R B_{IF}^{R,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^R)$$

$$P_{IF,r}^{E,j} = p_r^{E,j} + c \left(\tilde{d} t_r^G + ISB_r^E \right) + Z_{wet} M_{wet}(E) + \varepsilon(P_{IF,r}^E) \quad (4.35)$$

$$L_{IF,r}^{E,j} = p_r^{E,j} + c \left(\tilde{d} t_r^G + ISB_r^E \right) + Z_{wet} M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^E B_{IF}^{E,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^E)$$

$$P_{IF,r}^{C,j} = p_r^{C,j} + c \left(\tilde{d} t_r^G + ISB_r^C \right) + Z_{wet} M_{wet}(E) + \varepsilon(P_{IF,r}^C) \quad (4.36)$$

$$L_{IF,r}^{C,j} = p_r^{C,j} + c \left(\tilde{d} t_r^G + ISB_r^C \right) + Z_{wet} M_{wet}(E) + \lambda_{IF}^C B_{IF}^{C,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^C)$$

burada ISB_r^R , ISB_r^E , ISB_r^C parametreleri sırasıyla GPS/GLONASS, GPS/Galileo ve GPS/BDS zaman sapması parametrelerini temsil eder.

Çoklu-GNSS modelinde bilinmeyen parametreler şunlardır: gözlemlenen uyduların her biri için üç konum koordinat bileşeni, bir alıcı saat hatası, üç sistemler arası zaman sapması parametresi, bir zenit tropsferik gecikmenin ıslak bileşeni, bir gerçek değerli bilinmeyen (ambiguity) parametresidir. Böylece durum vektörü şu şekildedir:

$$x = [x^r, y^r, z^r, c\tilde{d}t_r^G, ISB_r^R, ISB_r^E, ISB_r^C, Z_{wet}, \lambda_{IF}^G B_{IF}^{G,1}, \lambda_{IF}^G B_{IF}^{G,2}, \dots] \quad (4.37)$$

Çoklu-GNSS modelinin tasarım matrisi, tahmin edilen parametrelere göre gözlem matrisinin kısmi türevlerinden oluşmaktadır. Sistemler arası zaman sapması parametreleri için kısmi türevler aşağıda verilmiştir. Diğer parametrelerin kısmi türevleri geleneksel PPP modeliyle aynı olduğu için burada tekrar verilmemiştir.

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{S,j}}{\partial cISB_r^R} = \frac{\partial L_{IF,r}^{S,j}}{\partial cISB_r^R} = \begin{cases} 0 & GPS, GALİLEO ve BDS uyduları \\ 1 & GLONASS uyduları \end{cases}$$

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{S,j}}{\partial cISB_r^E} = \frac{\partial L_{IF,r}^{S,j}}{\partial cISB_r^E} = \begin{cases} 0 & GPS, GLONASS ve BDS uyduları \\ 1 & GALİLEO uyduları \end{cases}$$

$$\frac{\partial P_{IF,r}^{S,j}}{\partial cISB_r^C} = \frac{\partial L_{IF,r}^{S,j}}{\partial cISB_r^C} = \begin{cases} 0 & GPS, GALİLEO ve GLONASS uyduları \\ 1 & BDS uyduları \end{cases}$$

Daha önce de bahsedildiği gibi, ölçümlerin en doğru, en uygun çözüme ulaşması için Kalman filtresindeki stokastik modellerin uygun şekilde açıklanması oldukça önemlidir. Çoklu-GNSS modeli farklı türde ve çok sayıda parametre içerdiği için, hem ölçümlerin hem de parametrelerin istatistiksel davranışları karmaşık olduğundan, kovaryans matrisi ve parametrelerin zamanla değişimleri dikkatlice ele alınmalıdır (Bahadur,2017).

Ölçümlerin kovaryans matrisi, geleneksel modele benzer şekilde, ölçüler arasında korelasyon olmadığı kabul edilerek köşegen elemanlarından oluşmaktadır. Köşegen elemanları Denklem (4.17) ve Denklem (4.18)'de hesaplanan iyonosfer içermeyen kombinasyonların varyanslarıdır. Daha önce de belirtildiği gibi düşük yükseklik açılarında multipath etkisi ve gürültünün fazla olması nedeniyle uydu yükseklik açısına bağlı ağırlık modeli kullanılmalıdır. Aşağıda tüm GPS uyduları için iyonosfer içermeyen kombinasyonların varyansları verilmiştir (Bahadur, 2017):

$$\Sigma \varepsilon_G = \begin{bmatrix} \sigma_{P,G1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{L,G1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{P,Gk} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{L,Gk} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{P,Gn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{L,Gn} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Benzer şekilde GLONASS, Galileo ve BDS için sırasıyla $\Sigma \varepsilon_R$, $\Sigma \varepsilon_E$, $\Sigma \varepsilon_C$ yazılarak kovaryans matrisleri oluşturulabilir.

Çoklu-GNSS ölçümlerinin tutarlılığı için daha önce geleneksel PPP için bölüm 4.2.2’de bahsedilen global test ve yerel test uygulanarak belirlenebilir.

5. PPP HATA KAYNAKLARI

PPP yönteminde yüksek konum doğruluğu elde etmek için var olan hata kaynaklarının giderilmesi önemli rol oynamaktadır. Bu bölümde PPP hata kaynaklarına değinilecektir.

5.1. Uydu Yörünge ve Saat

Tüm GNSS uyduları yayın efemerisini, değişen sinyalleriyle gerçek zamanlı olarak iletir. Yayın efemerisi uydu yörünge ve saat bilgilerini içermektedir fakat PPP için yeterli doğruluğu sağlamamaktadır.

IGS (International GNSS Service) tarafından sunulan hassas uydu yörünge ve saat ürünleri sayesinde PPP uygulanabilir ve yüksek doğruluk sağlanabilir hale gelmiştir. IGS, GNSS kullanıcılarına içerdiği 400'den fazla referans istasyonu ile küresel bir ağ kullanarak gözlem veri setleri, hassas yörünge ve saat ürünleri sağlayan bir kuruluştur. Çizelge 5.1'de farklı gecikme ve doğruluklarda standart IGS ürünleri verilmiştir.

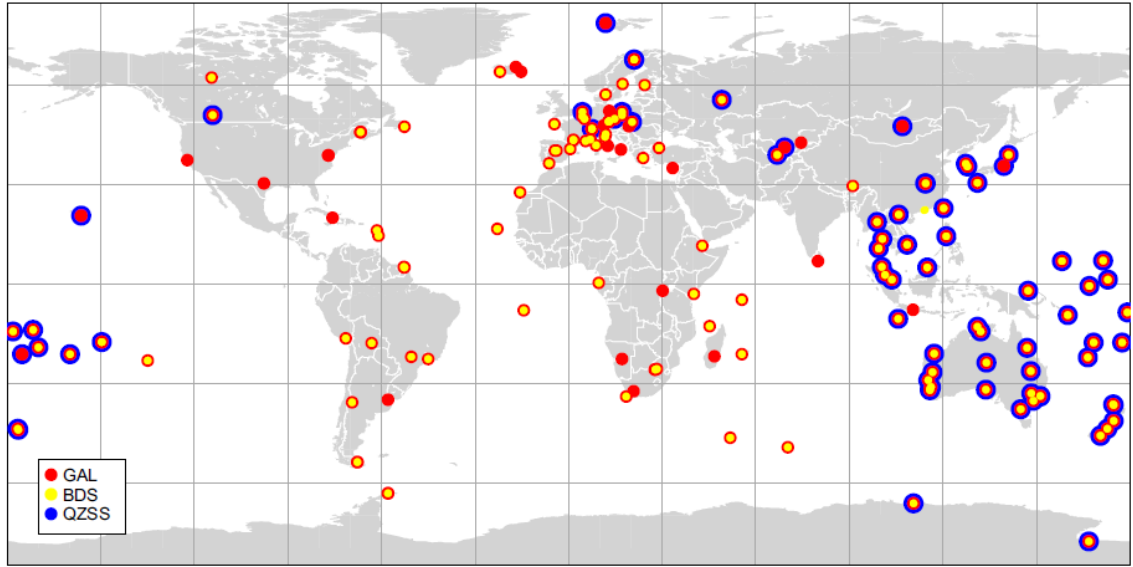
Çizelge 5.1. Standart IGS uydu yörünge ve saat ürünleri

Sistem	Tip		Doğruluk (RMS)	Gecikme	Örnek Aralığı
GPS	Broadcast	Yörünge	100 cm	Real Time	Günlük
		Saat	5 ns		
	Ultra-hızlı (tahmin)	Yörünge	5 cm	Real Time	15 dk
		Saat	3 ns		
	Ultra-hızlı (gözlem)	Yörünge	3 cm	3-9 saat	15 dk
		Saat	150 ps		
	Hızlı	Yörünge	2.5 cm	17-41 saat	15 dk
		Saat	75 ps		5 dk
	Final	Yörünge	2.5 cm	12-18 gün	15 dk
		Saat	75 ps		30 sn
GLONASS	Final	Yörünge	3 cm	12-18 gün	15 dk

(<http://www.igs.org>, Kasım, 2020)

Yeni navigasyon sistemlerinin ortaya çıkması ve GPS ve GLONASS'ın devam eden modernizasyonlarıyla IGS, yeni sistemlere erken aşinalık sağlamak ve bunların

yüksek hassasiyetli GNSS modelleme ve analizine dahil edilmesini sağlamak amacıyla 2011 yılında Çoklu-GNSS Deneyinin (MGEX) başlatmıştır (Montenbruck vd., 2014). Öncelikle 40 istasyona sahip küçük bir ağ Çoklu-GNSS alıcıları ve MGEX yörünge ve saat ürünleriyle donatılmıştır. Bu gözlemlerin kısa sürede yaygın olarak kullanılmasıyla IGS, MGEX statüsünü 2016 yılında IGS Çoklu-GNSS pilot projesi olarak değiştirmiş ancak MGEX kullanılmaya devam edilmiştir. Ekim 2016'dan IGS istasyonlarının üçte biri IGS Çoklu-GNSS izlemeden oluşmaktadır (Şekil 5.1) (Montenbruck vd., 2017).



Şekil 5.1. IGS Çoklu-GNSS istasyonları (Montenbruck vd. 2017)

Aynı referans çerçevesinde tahmin edilen birleşik uydu efemeris ve saat ürünleri Çoklu-GNSS prosesi için kullanılabilir. Çoklu-GNSS uydu efemeris ve saat ürünleri MGEX'in bir parçası olarak aynı referans çerçevesinde tahmin edilerek kullanıcılara MGEX Analiz Merkezleri (ACs) aracılığıyla yayınlanmaktadır. Daha önceki bölümde verilen Çizelge 4.1' de MGEX Analiz Merkezleri gösterilmiştir.

5.2. Alıcı Saat Hatası

GNSS alıcılarının çoğu kuvars kristal osilatör kullanmaktadır. GNSS uydularında kullanılan atomik saatlere göre daha az kararlıdır. Bu nedenle alıcı saati kısa bir süre içinde kayar ve bu zamanla alıcı saat ofsetinin değişmesine neden olur. Bu nedenle alıcı saat ofseti, Hassas Nokta Konumlamada üç koordinat bileşeniyle birlikte bilinmeyen olarak kestirilir. Alıcı saat sapması tüm sinyalleri eşit şekilde etkilemektedir. Bazı alıcılar, oldukça büyük saat hatasını önlemek için dahili saatlerini

referans zaman ölçeğiyle senkronize etmeye çalışmaktadır. Bu tür alıcılar, alıcı saatini bir eşik değerinin altında tutmak için periyodik olarak ayrı saat atlamaları ekler. Saat sıçramaları tipik olarak, milisaniye cinsinden tamsayı olarak gerçekleşir. Saat sıçramaları yalnızca kod sözde mesafe gözlemlerinde görülür, bu da kod ve faz ölçüleri arasında bir tutarsızlığa neden olmaktadır (Bahadur, 2017). Saat sıçramalarının GNSS gözlemleri üzerindeki etkisi Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Her tür saat sıçramasını tespit etmek ve düzeltmek gerekli değildir. Kod sözde mesafe ve taşıyıcı faz gözlemleri arasındaki tutarsızlık nedeniyle sadece tip 2 ve tip 3 sıçramalarının düzeltilmesi gerekmektedir (Guo ve Zhang, 2014).

Çizelge 5.2. Saat sıçrama tipleri

Tip	Zaman Etiketleri	Kod Pseudorange	Taşıyıcı Faz
1	Jumpy	Smooth	Smooth
2	Jumpy	Jumpy	Smooth
3	Smooth	Jumpy	Smooth
4	Smooth	Jumpy	Jumpy

(Guo ve Zhang, 2014)

5.3. Troposferik Gecikme

Atmosferin nötr kısmı GNSS sinyallerinin iletimini etkilemektedir. Atmosferin nötr kısmı hem stratosfer hem troposfer tabakasını içerir fakat etki genellikle troposferik etki ya da troposferik gecikme olarak adlandırılmaktadır. Troposferik gecikmenin büyüklüğü, uydu yükseklik açısı, istasyon yüksekliği, atmosferik basınç, sıcaklık ve su buharı gibi birçok faktöre bağlıdır. Troposferik gecikme dağılmayan yapısı nedeniyle sistem frekansına bağlı değildir. Bu nedenle iyonosferik etkinin aksine troposferik etki çift frekans kombinasyonlar kullanılarak giderilememektedir. Sinyal yolu boyunca troposferik gecikme aşağıdaki şekilde tahmin edilir:

$$T = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N^{trop} ds \quad (5.1)$$

burada n troposfer tabakasının kırılma indisini belirtir, N^{trop} kırılma özelliği olarak adlandırılır. Troposferik yol gecikmesinin hesaplanması, geometrik aralık boyunca entegrasyonu gerçekleştiren bir yaklaşıma dayanmaktadır. Troposferik gecikme, kuru ve ıslak olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Kuru kısım troposferin yüksek

kısmını oluşturur ve troposferik gecikmenin %90'ını oluşturmaktadır. Islak kısım, troposferin alt kısmından kaynaklanan ve su buharının çoğunu içeren bileşendir. Troposferik gecikmenin kuru kısmı kolayca modellenir ancak su buharındaki varyasyonlar nedeniyle ıslak bileşeni modellemek zorlaşmaktadır (Hopfield, 1969).

$$T = T_{dry} + T_{wet} = 10^{-6} \int N_{dry}^{trop} ds + 10^{-6} \int N_{wet}^{trop} ds \quad (5.2)$$

Troposferik gecikme sinyali yoluna bağlıdır bu nedenle genellikle zenit mesafesinin bir fonksiyonu olarak formüle edilir ve bir haritalama fonksiyonu kullanılarak uydu yükseklik açısına yansıtılmaktadır (Hofmann vd., 2008'den aktaran Bahadır, 2017):

$$T = Z_{dry}M_{dry}(E) + Z_{wet}M_{wet}(E) \quad (5.3)$$

burada E uydu yükseklik açısıdır, Z_{dry} kuru bileşenden kaynaklanan zenit gecikmesidir, Z_{wet} ıslak bileşenden kaynaklanan zenit gecikmesidir. M_{dry} kuru haritalama fonksiyonunu, M_{wet} ıslak haritalama fonksiyonudur.

Bu çalışmada GPT2 (Lagler vd., 2013) modeli kullanılmıştır.

5.4. İyonosferik Gecikme

İyonosfer tabakası yeryüzünün yaklaşık 50-1000 kilometre kadar yukarısında uzanmaktadır. Bu tabakada Güneş'in ultraviyole ışığı atomları ve molekülleri iyonlaştırmaktadır. İyonosferdeki serbest elektronlar GNSS sinyallerinin yayılmasını etkilemektedir. Elektron yoğunluğundaki düzensizlikler sebebiyle iyonosferik etkinin GNSS sinyalleri üzerindeki etkisini modellemek zorlaşmaktadır (Seeber, 2003'ten aktaran Bahadır, 2017).

Kırılma indisi, iyonosferi karakterize eden en önemli parametrelerden biridir. İyonosfer dağıtıcı bir ortamdır, bu nedenle kırılma indisi, frekansın bir fonksiyonudur (Seeber, 1993'ten aktaran Cai, 2009). Birinci dereceden iyonosferik etki taşıyıcı faz ölçümlerinde aşağıdaki gibi tahmin edilmektedir:

$$n_L = 1 - \frac{40.3N_e}{f^2} \quad (5.4)$$

burada N_e toplam elektron yoğunluğunu (el/m^3), f sinyal frekansı (Hz)' dir. Benzer şekilde kod ölçümleri için birinci dereceden iyonosferik etki :

$$n_p = 1 + \frac{40.3N_e}{f^2} \quad (5.6)$$

Faz ve kod gözlemlerindeki iyonosferik gecikmeler, tüm yayılma yolu boyunca kırılma indislerini entegre ederek elde edilebilir:

$$\Delta_L^{ion} = \int (n_L - 1) dl = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e dl \quad (5.7)$$

$$\Delta_P^{ion} = \int (n_P - 1) dl = \frac{40.3}{f^2} \int N_e dl \quad (5.8)$$

Toplam elektron içeriğinin (TEC), sinyal yolu boyunca toplam elektron sayısı olduğu düşünülürse, Denklem (5.7) ve Denklem (5.8) şu şekilde yazılır:

$$\Delta_L^{ion} = -\frac{40.3}{f^2} TEC, \quad \Delta_P^{ion} = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (5.9)$$

İyonosferik refraksiyon etkisinin kod ve faz ölçümleri üzerindeki etkileri aynı büyüklükte fakat zıt işaretlere sahiptir. Bu da iyonosferin faz ölçümlerini hızlandırırken kod ölçümlerini geciktirdiği anlamı taşımaktadır. Ayrıca iyonosferik etki dağıtıcı bir ortam olduğundan sistem frekansına bağlıdır. Bu nedenle, birinci dereceden iyonosferik etki, GNSS gözlemlerini birleştirerek ortadan kaldırılabılır. Geleneksel PPP yaklaşımı, birinci dereceden iyonosferik etkiyi ortadan kaldırmak için iyonosfer içermeyen kombinasyonu kullanmaktadır (Kouba, 2009).

5.5. Görelilik Etkisi

Genel olarak uydu tabanlı konumlandırma teknikleri, alıcı ve uydu saatleri arasındaki zaman farkını ölçme temeli üzerine kurulmuştur. Görelilik, bir uydu saati ile bir alıcı saatinin yerçekimi potansiyeli ve hareket hızından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, zaman farklılıklarına dayalı ölçümler görelilik etkilerine tabidir. Uydu yörüngelerinin eksantrikliğinden kaynaklanan görelilik düzeltme şu şekilde verilir:

$$\Delta t_r = -2 \frac{r^{sat} \cdot v^{sat}}{c^2} \quad (5.10)$$

burada r^{sat} ve v^{sat} sırasıyla bir eylemsizlik sistemindeki uydu konumunu ve hızını ifade etmektedir, c ışık hızıdır.

İkincil görelî etki, yerçekimi alanının etkili olduğu uzay-zaman eğriliğinden kaynaklanır ve GNSS sinyallerinde gecikmeye neden olmaktadır. Bu etkiye Shapiro sinyal yayılma gecikmesi denilmektedir. Bu etki 2 santimetreden az olduğundan sadece yüksek doğruluklu konumlandırma için dikkate alınması gerekmektedir. Uydu ile alıcı arasındaki Öklid menziline aşağıda verilen miktar kadar düzeltmek gerekir (Bahadur,2017):

$$\delta_{\delta_{rel}} = \frac{2\mu}{c^2} \ln \frac{\rho^{sat} + \rho^{rec} + \rho_{rec}^{sat}}{\rho^{sat} + \rho^{rec} - \rho_{rec}^{sat}} \quad (5.11)$$

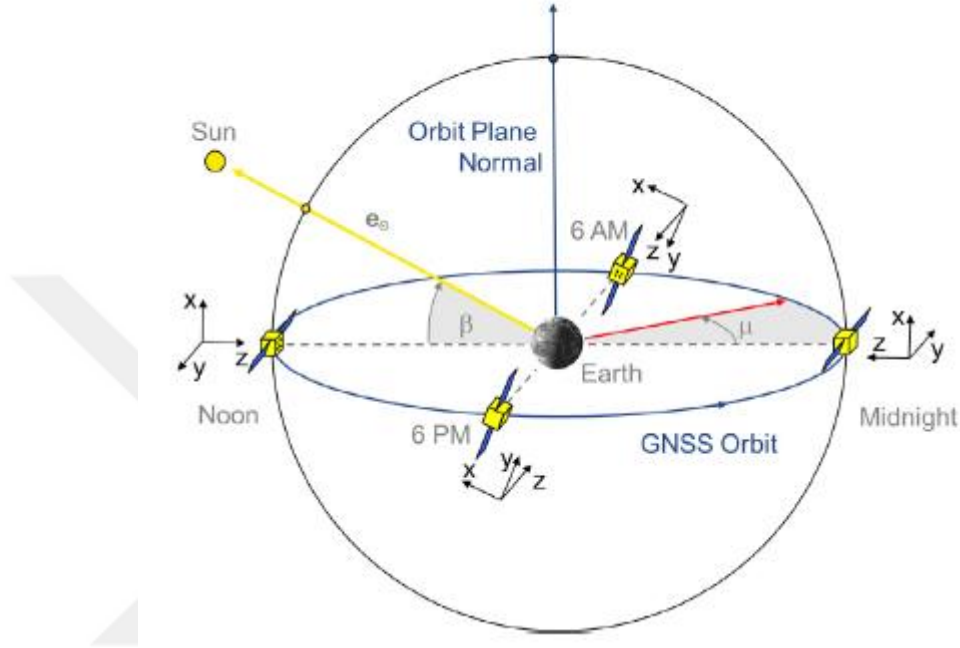
burada μ Dünya'nın yerçekimi sabiti, ρ^{sat} uydunun jeosantrik mesafesini göstermektedir, ρ^{rec} uydunun jeosantrik mesafesini ve ρ_{rec}^{sat} uydu ile alıcı arasındaki jeosantrik mesafedir.

5.6. Anten Faz Merkezi

Anten faz merkezi (APC) kullanmadan önce, uyduya sabitlenmiş bir referans çerçevesi tanımlayarak ilk olarak uydu yönünü açıklamak gereklidir. Eylemsizlik tutumunu belirlemek için GNSS uydularının davranışını anlamak önemlidir. Genel olarak, GNSS uydularının navigasyon anteni Dünya'yı gösterecek şekilde tasarlanırken, güneş panelleri Güneş'e doğru yönelecek şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle uydular, Dünya'yı işaret eden (sapma) eksenini etrafında dönen güneş ışığını yakalamaya çalışır. Bu konseptin adı savrulma tutum (yaw-steering (YS)) modudur. IGS, tutulma mevsimi dışındaki neredeyse tüm GNSS uyduları için referans çerçevesi olarak nominal sapma yönlendirme tutum modunu benimsemiştir (Montenbruck vd., 2015). Uydu sabit referans sisteminin kökeni, uydunun kütle merkezinin ifade eder. Sistem yönelimi aşağıda verilen üç birim vektörle tanımlanabilir:

$$\hat{e}_x = \hat{e}_y \times \hat{e}_z, \quad \hat{e}_y = \frac{\hat{e}_{\odot} \times r}{|\hat{e}_{\odot} \times r|}, \quad \hat{e}_z = -\frac{r}{|r|} \quad (5.12)$$

burada \hat{e}_\odot uydudan Güneş'e işaret eden birim vektör, r ECEF'deki uydu pozisyonu, \hat{e}_z vektörü dünyaya yönelir ve sağ el koordinat sistemini tamamlar. \hat{e}_y Güneş'e dik ve en düşük yöndür (Şekil 5.2) (Montenbruck vd., 2015).



Şekil 5.2. Nominal savrulma tutum (yaw-steering) modunda GNSS uydu yönü (Montenbruck vd., 2015)

Yayın efemerisinin aksine, hassas efemeris uydu yörünge modellemesinde kullanılan model nedeniyle uydunun kütle merkezini ifade etmektedir. Ancak GNSS ölçümlerinde referans noktası olarak uydu anten faz merkezi (APC) alınmaktadır. Bu nedenle hassas ürünleri kullanan hassas nokta konumlama için anten faz merkezi ofsetlerinin (PCO) dikkate alınması gerekmektedir (Montenbruck vd., 2015). Uydunun kütle merkezinden anten faz merkezine dönüşüm şu şekildedir:

$$X_{phase} = X_{mass} + \begin{bmatrix} \hat{e}_x & \hat{e}_y & \hat{e}_z \end{bmatrix}^{-1} \times \Delta X_{offset} \quad (5.13)$$

burada ΔX_{offset} uydu sabit koordinat sistemindeki faz merkezi ofseti (PCO) gösterir. X_{phase} ve X_{mass} sırasıyla anten faz merkezi (APC) ve uydu kütle merkezi uydu koordinatlarıdır.

Aynı zamanda antenin elektriksel faz merkezi, sinyal frekansı ve sinyal yönüne bağlı olarak değişmektedir. Yani gelen her sinyalin kendi elektriksel anten faz merkezi vardır (Hereoux ve Kouba, 2001). Sonuç olarak, sinyale bağlı anten faz merkezi varyasyonlarının (PCV) hassas nokta konumlandırmaya göre dikkate alınması gerekmektedir. Anten faz merkezi varyasyonlarının düzeltilmesi şu şekildedir:

$$\rho_{obs} = \rho_{geo} + PCV(\text{yükseklik}, \text{azimut}) \quad (5.14)$$

Burada ρ_{obs} ve ρ_{geo} sırasıyla gözlemlenen ve geometrik aralıktır.

Alıcı anteninde ise, anten faz merkezinin (APC) gelen sinyal yönüne bağlı olarak değişmesi nedeniyle, anten referans noktası (ARP) adı verilen geometrik bir nokta tanıtılmaktadır. Dolayısıyla, faz merkez ofsetleri (PCO) tipik olarak referans noktasına göre üç boyutlu koordinat düzeltmesi olarak tanımlanmaktadır. Faz merkezi varyasyonları PCV'ler ayrıca geometrik aralığa bir düzeltme olarak uygulanmaktadır. Uydu antenine benzer şekilde, alıcı anten düzeltmesi şu şekilde ifade edilebilir:

$$X_{phase} = X_{ARP} + \Delta x_{pco} \quad (5.15)$$

$$\rho_{obs} = \rho_{geo} + PCV(\text{yükseklik}, \text{azimut})$$

burada, X_{phase} ortalama elektriksel anten faz merkezi konumunu gösterir, X_{ARP} anten referans noktası (ARP) konumudur. Δx_{pco} genellikle alıcı tabanlı yerel bir sistemde verilen faz merkez ofseti PCO' dur. ρ_{obs} ve ρ_{geo} sırasıyla gözlemlenen ve geometrik aralıktır.

Mutlak anten modeli kullanan IGS, alıcı ve uydular için anten PCO' larını ve PCV' leri üretir ve yayınlar (Schmid vd., 2016' dan aktaran Bahadur, 2017). İlk aşamada ürün sadece GPS ve GLONASS frekanslarını içermekteyken daha sonra Galileo ve Beidou için uydu anten PCO'ları 2015 yılında eklenmiştir. (Montenbruck vd., 2017).

5.7. Faz Dönüklüğü

GPS uyduları, sağa dairesel polarize (RCP) radyo dalgaları iletir ve bu nedenle, uydu ve alıcı sinyali arasındaki faz farkından elde edilen taşıyıcı faz gözlemi, alıcı ve

uydu antenlerinin göreceli konumuna bağlıdır. Antenlerin karşılıklı yönlendirilmesi, ölçülen taşıyıcı fazlarda en fazla bir döngüye ulaşabilen faz dönüklüğü adı verilen bir değişikliği beraberinde getirir (Hereoux ve Kouba, 2001). Faz dönüklüğü etkisi diferansiyel konumlandırmada göz ardı edilir ancak hassas nokta konumlandırmada bir düzeltme olarak uygulanması önemlidir. Sabit alıcının anten yönünün sıklıkla değişmediği düşünülürse, faz dönüklüğü etkisinin ana nedeni uydu yörünge hareketidir. Tipik olarak, GNSS uyduları, güneş panellerini Güneşe doğru yönlendirmeye çalıştıkları için z eksenini etrafında bir dönüş gerçekleştirirler. Bu nedenle, alıcı ve uydu antenlerinin göreceli yönelimi sık sık değişir, bu da taşıyıcı faz ölçümünü etkilemektedir (Bahadur., 2017). Taşıyıcı faz ölçümleri üzerindeki dönüklük etkisi, aşağıdaki denklem ile modellenir ve düzeltilir:

$$\Delta_{\phi} = \text{sign} \left(\hat{p} \cdot (\vec{d}' \times \vec{d}) \right) \cos^{-1} \left(\frac{\vec{d}' \times \vec{d}}{|\vec{d}'| |\vec{d}|} \right) \quad (5.16)$$

burada \hat{p} uydu ile alıcı arasındaki birim vektörü göstermektedir. \vec{d}' ve \vec{d} sırasıyla ilgili uydu gövdesi koordinat birimi vektörleri ($\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$) ve yerel alıcı birim vektörleri ($\hat{n}, \hat{e}, \hat{u}$) ile belirlenen alıcı ve uydu antenlerinin etkin çift kutuplu vektörleridir. Etkili çift kutuplu vektörler şu şekilde verilir:

$$\vec{d}' = \hat{e}_x - \hat{p} (\hat{p} \cdot \hat{e}_x) - \hat{p} \times \hat{e}_y \quad (5.17)$$

$$\vec{d} = \hat{n} - \hat{p} (\hat{p} \cdot \hat{n}) - \hat{p} \times \hat{e} \quad (5.18)$$

Ardışık epoklar arasındaki faz ölçümlerinin sürekliliği, Denklem (5.16)'deki faz bükülme düzeltmesine tam döngüler eklenerek garanti edilmelidir (Kouba, 2015).

5.8. Katı Yeryüzü Etkisi

Yeryüzü, Güneş, Ay ve diğer gezegenlerin uyguladığı yerçekimi kuvveti tarafından etkilenmektedir ve bu da deformasyonlara neden olmaktadır. Yer istasyonlarının maruz kaldığı bu periyodik etkiye katı yeryüzü etkisi denilmektedir. Bu yer değiştirme, düşey ve yatay olarak sırasıyla 30 santimetre ve 5 santimetreye kadar ulaşabilir (Kouba ve Hereoux, 2001). Katı yeryüzü etkisinin neden olduğu yer

değiştirme genellikle küresel harmoniklerle temsil edilir. Bu değişiklikler, düşey ve yatay yönde (n, m) dereceden küresel harmoniklerle (Love number h_{nm} ve Shida number l_{nm}) ile ifade edilmektedir. Katı yeryüzü etkisinin neden olduğu yer değiştirme kalıcı ve periyodik olarak ikiye ayrılır. Periyodik bölüm büyük ölçüde tüm günün statik konumlandırılmasında ortalaması alınabilirken, kalıcı bölümün etkisi orta enlem bölgesinde 12 cm ulaşabilir. Hem kalıcı hem de periyodik yer değiştirme düzeltmelerini içeren denklem aşağıda verilmiştir (IERS, 1989):

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GMR_j^3} \left\{ h_2 \vec{r} \left(\frac{3(\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - 1}{2} \right) + 3l_2 (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) [\hat{R}_j - (\hat{R}_j \cdot \hat{r})\hat{r}] \right\} + [-0.025m \sin(\varphi) \cos(\varphi) \sin(\Theta_{Gr} + \lambda)].\hat{r}$$

(5.19)

burada

GM_j Ay (j=2) ve Güneş'in (j=3) yerçekimsel parametresi

GM Dünya'nın yerçekimsel parametreleri

$\Delta\vec{r}$ Kartezyen koordinat sisteminde yer değiştirme bölge vektörü

\hat{r}, r İstasyon yer merkezli birim vektör ve bu vektörün büyüklüğü

\hat{R}_j Ayın (j=2) ve Güneşin (j = 3) yer merkezli birim durum vektörü

R_j Ayın (j=2) ve Güneşin (j = 3) yer merkezli durum vektörü

R_e Dünyanın ekvator yarıçapı

h_2 nominal derece 2 Love numarası

l_2 nominal derece 2 Shida numarası

φ, λ istasyonun enlem ve boylamı

Θ_{Gr} Greenwich Ortalama Yıldız Saati'dir.

5.9. Okyanus Yükleme Etkisi

Okyanus yükleme etkisi, katı yeryüzü etkisine benzer ancak okyanus etkisinin yüklemesinden kaynaklanır. Okyanus yükleme etkisi neredeyse katı yeryüzü etkisinden daha küçük bir seviyede olsa da, daha yereldir ve genel olarak kalıcı bir parçası yoktur. Bu nedenle, 5 cm hassasiyet seviyesinde tek epok konumlandırma veya 24 saatlik bir süre boyunca mm statik konumlandırma için ve/veya okyanuslardan uzak istasyonlar için okyanus yüklemesi güvenli bir şekilde ihmal edilebilir. Öte yandan, kıyı bölgeleri boyunca 24 saatten önemli ölçüde daha kısa aralıklarla kinematik veya statik PPP için

bu etkinin hesaba katılması gerekir (Hereoux ve Kouba, 2001). Okyanus yüklemesinin etkileri şu şekilde elde edilebilir:

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + x_j + u_j - \phi_j) \quad (5.20)$$

burada; j 11 gelgit dalgasını temsil eder ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m, S_{sa}$), f_j ve u_j Ay nodu boylamına bağlıdır, ω_j t=0 s. zamandaki açısal hızdır, x_j t=0 s. astronomik bir argümandır, A_{cj} istasyon sfesifik genlik, ϕ_j istasyon sfesifik fazdır.

5.10. Kutup Gezinimi

Güneş ve Ay çekimlerinin neden olduğu periyodik istasyon konumu yer değiştirmelerine benzer şekilde, Dünya'nın dönme ekseninin Dünya'nın kabuğuna göre değişiklikleri, yani kutup hareketi, Dünya merkezkaç potansiyelindeki küçük değişiklikler nedeniyle periyodik deformasyonlara neden olur.

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= -9 \cos(2\varphi) [(X_p - \bar{X}_p) \cos\lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \sin\lambda] \\ \Delta\lambda &= 9 \sin\varphi [(X_p - \bar{X}_p) \sin\lambda + (Y_p - \bar{Y}_p) \cos\lambda] \\ \Delta r &= -33 \sin 2\varphi [(X_p - \bar{X}_p) \cos\lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \sin\lambda] \end{aligned} \quad (5.21)$$

Burada; φ ve λ istasyon enlem ve boylamıdır, $(X_p - \bar{X}_p)$ ve $(Y_p - \bar{Y}_p)$ ark saniye cinsinden ortalama kutuplardan (\bar{X}_p, \bar{Y}_p) kutup koordinat değişimleridir.

Çoğu AC, yörünge saat çözümlerini oluştururken bu düzeltmeyi kullandığından, IGS birleşik yörüngeler ve saatler bu istasyon konumu düzeltmeleriyle tutarlıdır. Başka bir deyişle, santimetrenin altındaki konum hassasiyeti için, yukarıdaki kutup gezinimi düzeltmelerinin, görünür bir istasyon konumu elde etmek için uygulanması gerekir, yani yukarıdaki düzeltmeler, ITRF ile tutarlı olmak için konum çözümlerinden çıkarılmalıdır. Katı yeryüzü etkisinin ve okyanus yükleme etkisinin aksine kutup gelgitleri 24 saatlik bir süre boyunca ortalama sifıra yaklaşmaz. Kutup gelgit yer değiştirmeleri düşeyde 25 mm'ye, yatay yönlerde 7 milimetreye kadar ulaşabilir. Kutup gelgit düzeltmesi, santimetrenin altında konum hassasiyeti gerektiğinde uygulanmalıdır (Kouba, 2009).

5.11. Diferansiyel Kod Hatası (DCB)

Diferansiyel kod hataları, iyonosferik dağılımdan bağımsız olarak, uydunun iletimindeki ve kullanıcının alıcı ekipmanındaki donanıma bağlı grup gecikme farklılıklarıyla ilgili olan belirli bir GNSS' in iki sinyali için sinyal yolculuk süresindeki farklılıkları temsil etmektedir. DCB' lerin nokta konumlandırmada ve zamanlama uygulamalarında, tek frekanslı kullanıcılar için dikkate alınması gereklidir. Aynı zamanda çift frekanslı kullanıcılar için, iyonosferden bağımsız lineer kombinasyonda kullanılan sinyaller, GNSS uydu saat ofset ürününün oluşturulmasında kullanılan farklıysa, DCB' lerin etkisinin dikkate alınmasını gerektirir. DCB' ler genel olarak uyduya özgü ve alıcıya özgü parçalara ayrılır. Pratik amaçlar için, DCB' ler genellikle uyduya ve alıcıya özgü hataların toplamına bölünür. Alıcıya özgü hata, çoğu konumlandırma uygulamasında ihmal edilir çünkü bunun etkisi, tahmin sürecinde alıcı saat hatasına eklenir. Bununla birlikte, uyduya özgü hatanın düzeltilmesi gerekmektedir (Montenbruck vd., 2017).

Multi-GNSS DCB ürünlerini GPS ve GLONASS için CODE analiz merkezi tarafından üretilmektedir. Ayrıca GPS, GLONASS, BeiDou ve Galileo için iki AC (DLR ve Çin Bilimler Akademisi, CAS) tarafından rutin olarak üretilmektedir (Montenbruck vd., 2017).

5.12. Faz Sıçraması (Cycle Slip)

Hassas nokta konum belirlemede en uygun çözüme ulaşmak için taşıyıcı faz ölçümleri belirsizliğinin doğru bir şekilde çözülmesi, sürdürülmesi ve faz sıçraması doğru şekilde onarılması gerekmektedir. Faz sıçramalarının meydana gelmesi, taşıyıcı faz izleme yayının sürekliliğini bozar ve her bir faz sıçraması, L1 ölçümlerine yaklaşık 20 cm' lik bir aralık hatasına neden olmaktadır. Belirsizlik parametresinin doğru tahmin edilmesi doğru faz sıçraması için önemlidir. Faz sıçraması, faz sıçramasını tespit etmek ve onarmak ve belirsizlik olarak ele alarak GNSS veri işleme ile diğer parametrelerle birlikte tahmin edilmek üzere temel olarak iki şekilde giderilmektedir. Bilinmeyen olarak tahmin edilmesi veri işlemeyi karmaşık hale getireceğinden tercih edilmemektedir (Liu, 2011).

Faz sıçramalarının meydana gelmesi, ölçümlerde bir süreksizliğe yol açmaktadır. Faz sıçramaları onarılmadan kalırsa, PPP'deki doğruluğu ve yakınsama

süresini bozabilir. Bu nedenle, hassas konumlandırma uygulamalarında faz sıçramalarının doğru bir şekilde algılanması ve onarılması gerekmektedir. Çift frekans kombinasyonlarına dayalı yöntemler ile faz sıçraması başarıyla tespit edilmektedir. Melbourne-Wubben (MW) kombinasyonu faz sıçraması tespiti için kullanılmaktadır (Bahadur, 2017).

5.13. Özet

PPP hata kaynakları ve hataları azaltma stratejileri özet olarak Çizelge 5.3' te verilmiştir:

Çizelge 5.3. PPP hata kaynakları ve azaltma stratejileri

Hata Kaynağı	Etkisi	Giderilmesi
Yörünge	~1 m	Hassas Yörünge düzeltmesi
Uydu saati	~ 2 ns (0.6) m	Hassas Saat düzeltmesi
İyonosfer	×	İyonosfer bağımsız kombinasyonu (IF)
Troposfer	~ 2-3 m	Kuru bileşeni ampirik modeller kullanarak Islak bileşeni bilinmeyen olarak kestirilir
Uydu saatindeki görelilik	~1 m	Denklem (5.10)
Sinyal bükülme etkisi (görelilik)	~1-2 cm	Denklem (5.11)
Uydu faz merkezi	~2 m	IGS ANTEX Dosyası
Uydu faz varyasyonu	~1-2 cm	IGS ANTEX Dosyası
Alıcı anten referans noktası	~10 cm	Offset değerlerini kullanarak
Alıcı faz varyasyonu	~1 cm	IGS
Faz dönüklüğü	~1 döngü	Denklem (5.16)
Katı yeryuvarı etkisi	~30 cm	Denklem (5.19)
Okyanus yükleme etkisi	~5 cm	Denklem (5.20)
Kutup gezinimi	~2.5 cm	Denklem (5.21)

(Bahadur, 2017)

6. MATERYAL VE YÖNTEM

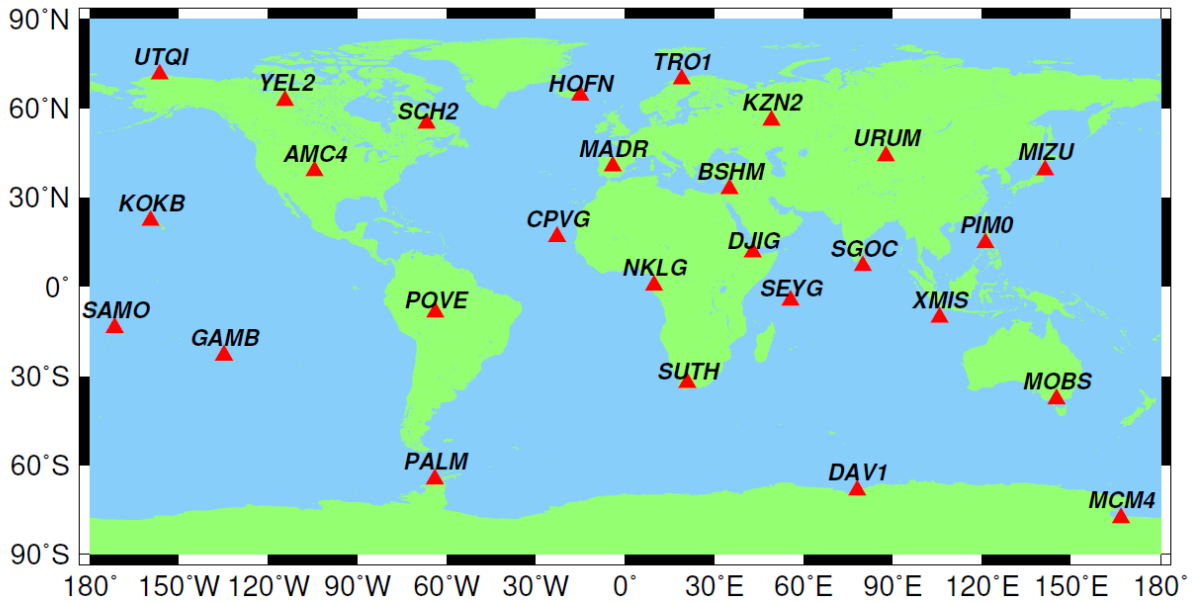
6.1. Uygulama

2019 tarihinde bir aylık bir sürede (01.09.2019-30.09.2019) GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou için hassas nokta konumlandırma (PPP) yapmak üzere seçilen GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou için toplam 27 olmak üzere IGS MGEX istasyonu seçilmiştir. Çizelge 6.1’de seçilen istasyonlar listelenmiştir. Şekil 6.1’de seçilen istasyonların konumu gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Çalışma için seçilen IGS MGEX istasyonları

IGS İstasyonu	Ülke	Ajans	Uydu Sistemi
AMC400USA	ABD	JPL	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS
BSHM00ISR	İsrail	JPL	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+IRNSS
CPVG00CPV	Cabo Verde	CNES	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS
DAV100ATA	Antartika	GA	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+IRNSS
DJIG00DJI	Cibuti	CNES	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS+IRNSS
GAMB00PYF	Fransız Polinezyası	CNES	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS
HOFN00ISL	İzlanda	BKG	GPS+GLO+GAL+BDS+IRNSS+SBAS
KOKB00USA	ABD	JPL	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS
KZN200RUS	Rusya Federasyonu	KFU	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+SBAS+IRNSS
MADR00ESP	İspanya	JPL	GPS+GLO+GAL+BDS
MCM400ATA	Antartika	JPL	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS
MIZU00JPN	Japonya	GFZ	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+IRNS+SBAS
MOBS00AUS	Avustralya	GA	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS
NKLG00GAB	Gabon	CNES	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS+IRNSS
PALM00ATA	Antartika	JPL	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS
PIMO00PHL	Filipinler	JPL	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS
POVE00BRA	Brezilya	IBGE	GPS+GLO+GAL+BDS
SAMO00WSM	Samoa	GA	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS
SCH200CAN	Kanada	NRcan	GPS+GLO+GAL
SEYG00SYC	Seyşeller	CNES	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS+IRNSS
SGOC00LKA	Sri Lanka	GFZ	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+IRNSS+SBAS
SUTH00ZAF	Güney Afrika	JPL	GPS+GLO+GAL+BDS
TRO100NOR	Norveç	NMA	GPS+GLO+GAL+BDS
URUM00CHN	Çin	GFZ	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+IRNSS+SBAS

UTQ100USA	ABD	GFZ	GPS+GLO+GAL
XMIS00AUS	Avustralya	GA	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS
YEL200CAN	Kanada	CNES	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS



Şekil 6.1. Çalışma için seçilen istasyonların konumu

GPS, GLONASS ve Galileo için Tablo 6.1’de verilen istasyonların hepsinden veri alınmıştır. BeiDou (BDS-2) için MIZU00JPN, MOBS00AUS, PIMO00PHL, SGOC00LKA ve URUM00CHN IGS istasyonlarının koordinat değerleri kullanılmıştır. Global olarak dağıtılmış 27 MGEX istasyonunda veri setleri bir aylık süre zarfında (01.09.2019-30.09.2019) 24 saatlik her gün işlenerek koordinat bilgisi elde edilmiştir. Tüm işlemler 2 farklı uydu yükseklik açısı (7, 30) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seçilen her uydu yükseklik açısı için ayrı ayrı ağırlıklandırma stratejileri uygulanmıştır. Bu ağırlıklandırma stratejileri; her bir GNSS için 1 , $1/\sin(E)$, $1/\sqrt{\sin(E)}$ (E: uydu yükseklik açısı), hem statik hem kinematik PPP olarak uygulanmıştır. Bu işlemler GİPSY/Oasis yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu tez için uygulanan PPP işleme stratejisi Çizelge 6.2’ de verilmiştir. Elde edilen koordinat verileri seçilen IGS MGEX istasyonlarının haftalık birleştirilmiş SINEX (Solution Independent Exchange Format) gerçek koordinatlarıyla kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda aykırı değer yüzdesi ve kuzey, doğu ve yukarı bileşenlerinin ve iki boyutlu karesel ortalama hata değerleri m (metre) biriminde elde edilmiştir. Aykırı değerler için kuzey, doğu ve düşey koordinat bileşenleri için 30 cm değeri alınmıştır.

Çizelge 6.2. PPP İşleme Stratejisi

Madde	Açıklama
Yazılım	Gipsy/Oasis
Dengeleme Modeli	Stokastik Kalman Filtresi
Filtre	İleri ve Geri Yumuşatma (Forward and Backward Smoothing)
Uydu ve Yörünge Ürünleri	CODE final ürünlerine düzeltme Aralık: uydu yörünge: 15 dk , uydu saat: 5 dk
Referans Çerçeve	Uyduların CODE koordinatlarına düzeltme (IGS14)
GNSS Sistemi	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Frekanslar (Faz ve Kod)	GPS: L1C/L2W/C1C/C2W GLONASS: L1C/L2P/C1P/C2P Galileo_1:L1C/L7Q/C1C/C7Q Galileo_2: L1X/L7X/C1X/C7X BeiDou: L2I/L7I/C2I/C7I
Epok Aralığı	30 sn
Uydu Yükseklik Açısı	7, 30
Ağırlıklandırma Stratejileri	Her bir GNSS sistemi için (GPS, GLONASS, Galileo, BDS) Ağırlıklandırma fonksiyonları: 1, $1/\sin(E)$, $1/\sqrt{\sin(E)}$, (E: uydu yükseklik açısı)
Alıcı ve Saat Faz Merkezi	BeiDou ve Galileo düzeltmelerinin GPS ile aynı olduğu varsayılarak igs14.atx dosyasından GPS ve GLONASS için PCO ve PCV değerleri kullanılmıştır.
İyonosferik Etki	Birinci derece iyonosfer içermeyen lineer kombinasyon ile kaldırıldı, ikinci derece iyonosferik etki JPL IONEX dosyası kullanılarak kaldırıldı.
Faz Belirsizliği	Döngü kayması ortaya çıkmadıkça, her ark (yay) için float değişmezleri olarak tahmin edilir.
Sistemler-Arası Hata (ISB)	Galileo ve Beidou: Tüm uydu sistemlerinin her epogu için rastgele yürüyüş (random walk) olarak tahmin edilir.
Frekanslar-Arası Hata (IFB)	GPS C1-P1 kod hatası, güncel DCB dosyası kullanılarak düzeltildi.
Önsel Troposfer	GPT2 model (Lagler vd., 2013)
Zenit Islak Gecikme Tahmini	Rastgele yürüyüş 0.05 mm km/sqrt(sec)
Yatay Gecikme Gradyanları Tahmini	Rastgele yürüyüş 0.05 mm km/sqrt(sec)
Faz Bükülmesi	Düzeltildi (Wu vd., 1993)
Gelgit Etkisi	Katı gelgitler, okyanus yükü ve kutup gelgitler göz önüne alındığında (IERS 2010 (Petit ve Luzum, 2010))
Görelilik Düzeltmeleri	Periyodik saat düzeltmeleri ve yerçekimi bükülmesi (shapiro gecikmesi) uygulandı

Sinyal Sıçraması (Cycle-Slip)	Melborne-Wubben kombinasyonu ile düzeltildi
Alıcı Saat Atlaması	Düzeltildi



7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Araştırma Sonuçları

27 IGS MGEX istasyonuna, bir aylık süre zarfında 24 saatlik PPP işleme sonucunda elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

Çizelge 7.1. GPS statik PPP için sırasıyla 7° ve 30° uydü yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları

GPS	STATİK					
	7°			30°		
	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1
Aykırı Değer Yüzdesi	0.2597	0.2597	1.2987	8.8312	8.3117	7.5325
Rms_n (m)	0.0027	0.0030	0.0027	0.0046	0.0045	0.0057
Rms_e (m)	0.0034	0.0032	0.0067	0.0052	0.0054	0.0075
Rms_u (m)	0.0058	0.0075	0.0084	0.0188	0.0192	0.0193
Rms_2d (m)	0.0043	0.0044	0.0072	0.0069	0.0071	0.0094

Çizelge 7.2. GLONASS statik PPP için sırasıyla 7° ve 30° uydü yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları

GLONASS	STATİK					
	7°			30°		
	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1
Aykırı Değer Yüzdesi	15.0649	11.9481	22.8571	35.3247	35.5844	41.2987
Rms_n (m)	0.0052	0.0055	0.0067	0.0119	0.0119	0.0112
Rms_e (m)	0.0218	0.0184	0.0261	0.0233	0.0233	0.0211
Rms_u (m)	0.0132	0.0135	0.0165	0.0398	0.0400	0.0400
Rms_2d (m)	0.0224	0.0192	0.0270	0.0262	0.0262	0.0239

Çizelge 7.3. Galileo statik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları

GALİLEO	STATİK					
	7			30°		
	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1
Aykırı Değer Yüzdesi	0.7792	0.7792	0.5195	11.1688	9.8701	11.4286
Rms_n (m)	0.0054	0.0055	0.0054	0.0065	0.0065	0.0065
Rms_e (m)	0.0076	0.0078	0.0075	0.0090	0.0091	0.0091
Rms_u (m)	0.0177	0.0173	0.0180	0.0399	0.0412	0.0392
Rms_2d (m)	0.0094	0.0095	0.0093	0.0111	0.0112	0.0112

Çizelge 7.4. BeiDou statik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları

BEİDOU	STATİK					
	7			30°		
	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1
Aykırı Değer Yüzdesi	0.5195	0.7792	0.2597	2.5974	2.5974	1.2987
Rms_n (m)	0.0072	0.0067	0.0072	0.0112	0.0109	0.0082
Rms_e (m)	0.0159	0.0148	0.0151	0.0182	0.0185	0.0218
Rms_u (m)	0.0398	0.0379	0.0394	0.0381	0.0366	0.0464
Rms_2d (m)	0.0175	0.0162	0.0167	0.0214	0.0215	0.0233

Çizelge 7.5. GPS kinematik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları

GPS	KİNEMATİK					
	7			30°		
	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1
Aykırı Değer Yüzdesi	28.8692	30.6917	27.7560	36.3128	36.9008	34.9356
Rms_n (m)	0.0236	0.0231	0.0242	0.0244	0.0243	0.0244
Rms_e (m)	0.0321	0.0302	0.0325	0.0324	0.0323	0.0322
Rms_u (m)	0.0401	0.0402	0.0413	0.0469	0.0469	0.0469
Rms_2d (m)	0.0398	0.0381	0.0405	0.0405	0.0404	0.0404

Çizelge 7.6. GLONASS kinematik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları

GLONASS	KİNEMATİK					
	7°			30°		
	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1
Aykırı Değer Yüzdesi	20.5112	20.9274	19.7434	28.5168	28.5382	27.8408
Rms_n (m)	0.0273	0.0280	0.0278	0.0309	0.0304	0.0311
Rms_e (m)	0.0350	0.0352	0.0369	0.0360	0.0369	0.0361
Rms_u (m)	0.0454	0.0463	0.0466	0.0504	0.0502	0.0494
Rms_2d (m)	0.0444	0.0450	0.0461	0.0475	0.0478	0.0476

Çizelge 7.7. Galileo kinematik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları

GALİLEO	KİNEMATİK					
	7°			30°		
	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1
Aykırı Değer Yüzdesi	15.1409	14.8465	16.4471	51.9505	52.1617	52.1617
Rms_n (m)	0.0189	0.0185	0.0202	0.0333	0.0336	0.0336
Rms_e (m)	0.0246	0.0240	0.0259	0.0442	0.0445	0.0445
Rms_u (m)	0.0382	0.0374	0.0404	0.0522	0.0529	0.0529
Rms_2d (m)	0.0311	0.0303	0.0328	0.0554	0.0558	0.0558

Çizelge 7.8. BeiDou kinematik PPP için sırasıyla 7 ve 30° uydu yükseklik açılarında, ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları

BEİDOU	KİNEMATİK					
	7°			30°		
	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1	$1/\sqrt{\sin(E)}$	$1/\sin(E)$	1
Aykırı Değer Yüzdesi	32.2041	32.2796	32.6690	27.8223	28.2856	26.0108
Rms_n (m)	0.0216	0.0214	0.0218	0.0205	0.0201	0.0209
Rms_e (m)	0.0344	0.0335	0.0348	0.0324	0.0323	0.0324
Rms_u (m)	0.0529	0.0521	0.0525	0.0533	0.0537	0.0533
Rms_2d (m)	0.0406	0.0398	0.0411	0.0384	0.0381	0.0386

Çizelge (7.1), (7.2), (7.3), (7.4), (7.5), (7.6), (7.7), (7.8)'dan görüldüğü üzere statik PPP sonuçları, kinematik PPP'ye göre daha iyidir.

Statik PPP sonuçları karşılaştırıldığında düşük uydu yükseklik açısındaki (7) doğruluk daha yüksektir. Sadece GPS gözlemleri kullanılarak gerçekleştirilen PPP sonuçları diğer alternatif senaryolara göre her iki yükseklik açısı ve uygulanan ağırlıklandırma stratejilerinin hepsinde genel olarak daha iyidir. GPS statik PPP (Çizelge 7.1) için 7 uydu yükseklik açısında ağırlıklandırma stratejisi olarak $(1/\sqrt{\sin(E)})$ ve $(1/\sin(E))$ fonksiyonlarının tüm ağırlıklara 1 verilerek uygulanan ağırlıklandırma stratejisine göre genel olarak biraz daha iyi sonuç verdiği görülmektedir ayrıca GPS statik PPP için 7 uydu yükseklik açısında $(1/\sqrt{\sin(E)})$ fonksiyonunun değerleri diğer fonksiyonlara göre daha iyidir. GPS statik PPP 30° uydu yükseklik açısında ise ağırlıklandırma stratejisi uygulanmasının sonuçları iyileştirdiği görülmektedir. GPS statik PPP için her iki uydu yükseklik açısında uygulanan ağırlıklandırma stratejilerine göre kuzey bileşenin karesel ortalama hata değeri diğer bileşenlere göre daha düşüktür.

GLONASS statik PPP (Çizelge 7.2) için düşük yükseklik açısı olan 7'deki değerler 30° yükseklik açısına göre daha iyidir. GLONASS statik PPP için 7 uydu yükseklik açısı için ağırlıklandırma stratejisi uygulanması sonuçları biraz iyileştirmiştir. GLONASS statik PPP için kuzey bileşenin karesel ortalama hata değeri diğer bileşenlere göre daha düşüktür. GLONASS statik PPP 30° uydu yükseklik açısında ağırlıklandırma stratejisi uygulanması anlamlı değildir.

Galileo statik PPP (Çizelge 7.3) değerlerinde 7 uydu yükseklik açısındaki değerler, 30° uydu yükseklik açısındaki değerlere göre daha iyidir. 7 ve 30° uydu yükseklik açılarındaki kuzey bileşen karesel ortalama hata değerleri her bir ağırlıklandırma fonksiyonlarında diğer bileşenlere göre daha iyidir. 7 ve 30° uydu yükseklik açısında uygulanan ağırlıklandırma fonksiyonlarında sonuçların birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Bu yüzden her üç fonksiyon da Galileo statik PPP için kullanılabilir.

BeiDou statik PPP (Çizelge 7.4) için de 7 uydu yükseklik açısı 30° uydu yükseklik açısına göre daha iyidir. Her iki uydu yükseklik açısı için uygulanan ağırlıklandırma fonksiyonlarına bakıldığında yukarı bileşen hariç kuzey ve doğu bileşen değerlerinin $(1/\sqrt{\sin(E)})$ ve $(1/\sin(E))$ fonksiyonlarının tüm ağırlıklara 1 verilerek uygulanan ağırlıklandırma stratejisine göre biraz daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. BeiDou statik PPP için 7 uydu yükseklik açısında $(1/\sin(E))$ fonksiyonunun değerleri diğer fonksiyonlara göre daha iyidir. 7 ve 30° uydu yükseklik açılarındaki kuzey bileşen karesel ortalama hata değerleri her bir ağırlıklandırma fonksiyonlarında diğer bileşenlere göre daha iyidir.

GPS kinematik PPP (Çizelge 7.5) değerleri, her iki uydu yükseklik açısı için, GLONASS, Galileo ve BeiDou kinematik PPP değerlerine göre daha iyidir ancak Galileo 7 kinematik PPP değerleri GPS 7 kinematik PPP değerlerine göre daha iyidir.

GPS kinematik PPP değerleri düşük uydu yükseklik açısında daha iyidir. 7 uydu yükseklik açısında ağırlıklandırma stratejisi kullanmak sonuçları iyileştirmiştir. 30° yükseklik açısı için tüm fonksiyonların sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

GLONASS kinematik PPP (Çizelge 7.6) için 7 uydu yükseklik açısındaki değerler 30° yükseklik açısına göre daha iyidir ve 7 yükseklik açısındaki $(1/\sqrt{\sin(E)})$ fonksiyonunun değerleri diğer fonksiyonlara göre daha iyidir. 30° uydu yükseklik açısı için ağırlıklandırma stratejisi uygulanması anlamlı değildir.

Galileo kinematik PPP (Çizelge 7.7) sonuçları diğer navigasyon sistemlerinde olduğu gibi 7 uydu yükseklik açısında sonuçların iyileştiği görülmektedir. 7 uydu yükseklik açısında $(1/\sin(E))$ fonksiyonunun sonuçlarının daha iyi olduğu görülmektedir. 30° uydu yükseklik açısı içinse $(1/\sqrt{\sin(E)})$ fonksiyonu daha iyi sonuç vermiştir.

BeiDou kinematik PPP (Çizelge 7.8) sonuçları diğer navigasyon sistemlerinin aksine 30° uydu yükseklik açısındaki değerler 7 uydu yükseklik açısına göre daha iyidir. 7 uydu yükseklik açısı için $(1/\sin(E))$ fonksiyonu kullanılarak yapılan Beidou kinematik PPP sonucu diğer fonksiyonlara göre daha iyidir. 30° yükseklik açısı için kullanılan fonksiyonların sonuçları birbiriyle oldukça yakındır.

7.2. Tartışma

PPP ölçümlerinde ağırlıklandırma stratejisi kullanmak genel olarak sonuçları iyileştirmiştir. PPP ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu sabit uydu yükseklik açısında gerçekleştirilmiştir veya yapılan çalışmalarda kullanılan uydu yükseklik açısı belirtilmemiştir ayrıca çalışmaların geneline bakıldığında uydu yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma stratejileri uygulanmamıştır. Fakat ölçümlerde veri elde etmede uydu yükseklik açısının önemi büyüktür. Aynı zamanda uydu yükseklik açısı GNSS alıcısına doğrudan girildiği için veri elde etmede bir ayarlama olarak kabul edilebilir. GPS ölçümlerinde gürültü seviyesinin uydu yükseklik açısıyla doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda sinyal yansıma hatası, iyonosferik ve troposferik

gecikmeler düşük uydu yükseklik açısında daha fazla etki göstermektedir (Witchayangkoon, 2000).

Buradan hareketle uydu yükseklik açısının ölçümlerde dikkate alınması önemlidir. Araştırma sonuçları da farklı uydu yükseklik açılarında ve farklı ağırlıklandırma stratejileri uygulanmasında, farklı sonuçlar oluştuğunu ve ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçları iyileştirmeye katkı sağladığını göstermektedir.

Beklenildiği gibi GPS statik ve kinematik PPP değerleri her iki uydu yükseklik açısı için de, diğer navigasyon sistemlerine kıyasla daha iyi sonuç vermiştir. Aynı zamanda statik PPP sonuçları da kinematik PPP sonuçlarına göre daha iyi sonuç vermiştir. Düşük uydu yükseklik açısı olan 7 derecedeki değerler 30 derecedeki değerlere göre daha iyidir yani düşük uydu yükseklik açısı sonuçları iyileştirmiştir. Ancak BeiDou kinematik PPP'de tam aksine yüksek uydu yükseklik açısındaki değerler düşük uydu yükseklik açısına göre daha iyidir. Aynı zamanda BeiDou PPP sonuçları diğer sistemlere göre daha kötüdür. Burada BeiDou için seçilen IGS MGEX istasyonlarının Asya Pasifik bölgesini kapsayacak şekilde beş adet seçilmiş olması ve daha sınırlı bir örneklem aralığı kullanılmış olması belirtilmelidir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tüm bu değerlendirmeler göz önüne alındığında statik PPP'nin tahmin edileceği üzere kinematik PPP'ye göre daha doğru olduğu görülmektedir. Hem statik hem kinematik PPP sonuçları, 30° uydu yükseklik açısındaki doğruluk değerlerinin, düşük uydu yükseklik açısı olan 7° uydu yükseklik açısında iyileştiği görülmektedir (BeiDou kinematik PPP hariç). Ayrıca düşük uydu yükseklik açısında genel olarak tüm ağırlıklara 1 verilerek uygulanan ağırlıklandırma stratejisi yerine $(1/\sin(E))$ veya $(1/\sqrt{\sin(E)})$ ağırlıklandırma stratejilerinin kullanılmasının sonuçları iyileştirdiği gözlenmektedir. Bu da seçilen ağırlıklandırma stratejisi uygulanmasının önemini göstermektedir. 30° uydu yükseklik açısı kullanılarak yapılan PPP için ağırlıklandırma stratejilerinin uygulanması sonuçlarda anlamlı bir iyileştirme sağlamamıştır.

PPP konum belirleme tekniğinin referans istasyonu gerektirmemesi, tek alıcı ile cm seviyesinde konum doğruluğu sağlaması gibi avantajlarının yanında var olan hata kaynakları PPP'nin doğruluğunu etkilemektedir. Bu yüzden PPP sonuçlarını iyileştirmeye yardımcı olması amacıyla uygun uydu yükseklik açısı seçilmesi ve ağırlıklandırma stratejilerinin PPP işleme sürecine dahil edilmesi önemlidir. Uydu yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma stratejilerinin uygulanması özellikle GPS ölçümlerinde sonuçların iyileşmesine daha fazla katkı sağlamıştır. Gelecek çalışmalar için uydu yükseklik açısının ve ağırlıklandırma stratejilerinin yakınsama süresine etkisi ve Çoklu-GNSS PPP performansına etkisi araştırılmalıdır.

9. KAYNAKLAR

- Alkan R., Ozulu İ.M., İlçi V., 2015, Deniz Uygulamalarında Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin (PPP) Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma, *Harita Dergisi*, Temmuz 2015, Sayı 154
- Avrupa Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri Ajansı, <https://www.gsc-europa.eu/>, [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- Bahadır B., Nohutcu M., 2020, Hassas Nokta Konumlama İçin Robust Kalman Filtresi Yöntemlerinin Analizi, *Harita Dergisi*, Temmuz 2020; 164: 29-42
- Bahadır B., 2017, Improving the Performance of Precise Point Positioning with Multi-GNSS, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2017
- Bahadır B., Nohutcu M., 2018, Türkiye ve Yakın Çevresi İçin Çoklu-GNSS Kombinasyonlarının PPP Performansına Etkisi, *Harita Dergisi*, 2018, Sayı:160
- Bahadır B., Nohutcu M., 2020, Hassas Nokta Konumlama İçin Robust Kalman Filtresi Yöntemlerinin Analizi, *Harita Dergisi*, Temmuz 2020; 164: 29-42
- BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document (Version 2.1), <http://www.beidou.gov.cn/attach/2016/11/07/21212.pdf>, [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 3.0), China Satellite Navigation Office, Şubat, 2019
- Berber M. M., Üstün A., Yetkin M., 2017, Static and kinematic PPP using online services: a case study in Florida, *Journal of Spatial Science*
- Bisnath S., Gao Y., 2009, Precise Point Positioning A Powerfull Technique with a Promising Future, *Gps World 2009*, 43, Nisan
- Cai, C., Gao, Y., 2013, Modelling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning, *GPS Solutions*, 17, 223-236
- Cai, C., Gao, Y., Pan, L., Zhu, J., 2015, Precise point positioning with, quadconstellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo, *GPS Solutions*, *Advances in Space Research*, 56, 133-143
- Choy S., Bisnath S., Rizos C., 2017, Uncovering common misconceptions ,in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect, *GPS Solution 2017*, 21, 13-22
- Choy S., Bisnath S., Rizos C., 2017, Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect, *GPS Solution 2017*, 21, 13-22

- Collins P., Bisnath S., Layahe F., Heroux P., 2010, Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing, *Navigation*, 57(2), CA, 123-135
- Collins J.P ve Langley R. B.,1999, Possible Weighting Schemes For GPS Carrier Phase Observations in the Presence of Multipath, *Geodesy and Geomatic Engineering*, Mart
- Dow J., Neilan RE., Rizos C., 2009, The International GNSS Service in a changing landcape of Global Navigation Satellite Systems, *J Geod*, 83(3–4):191–198
- European GNSS (GALILEO) open service interface control document (Version 1.3), https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/Galileo_OS_SIS_ICD_1.3.pdf, [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- European GNSS (Galileo) Open Service Signal-In-Space Interface Control Document, 2016, <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf>, [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- Federal Radionavigation Plan, 2019, <https://www.navcen.uscg.gov/pdf/FederalRadioNavigationPlan2019.pdf>, [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- Ge M., Gendt G., Rothacker M., Shi C., Liu J., 2007, Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations, *Journal of Geodesy*, 82(7), 389:399
- Geng, J., Meng, X., Dodson, A. H., Ge, M., Teferle, F. N., 2010, Rapid re-convergences to ambiguity-fixed solutions in precise point positioning, *Journal of Geodesy*, 84(12), 705-714
- Global navigation satellite system GLONASS interface control document (Version 5.1), 2008, [http://facility.unavco.org/data/docs/ICD_GLONASS_5.1_\(2008\)_en.pdf](http://facility.unavco.org/data/docs/ICD_GLONASS_5.1_(2008)_en.pdf), [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- Global navigation satellite system GLONASS interface control document (Version 1.0), 2016, <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General.-Edition-1.0-2016.pdf>, [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- Glouass Resmi Web Sitesi, <https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/>, [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- Guo F., Zhang X., Li X., Wang J., 2017, Assessment of precise orbit and clock products for Galileo, BeiDou, and QZSS from IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX), *GPS Solution 2017*, 21, 279-290
- Guo F, Zhang X., Li X., Wang J., 2017, The contribution of Multi-GNSS Experiment (MGEX) to precise point positioning, *Advances in Space Research 2017*, 59, 2714-2725

- Guo, F., Zhang, X., 2014, Real-time clock jump compensation for precise point positioning, *GPS Solutions*, 18, 41-50
- Heroux P., Kouba J., 2001, GPS precise point positioning using IGS orbit products, *GPS Solutions*, 5:2, 12-28
- Hesselbarth A, Wanninger L., 2008, Short-term Stability of GNSS Satellite Clocks and its Effects on Precise Point Positioning, *Proc. ION GNSS 2008*, Savannah, GA, 1855-1863
- Hopfield, H. S., 1969, Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data, *Journal of Geophysical Research*, 74, 4487-4499
- IERS (1989), IERS Standards, IERS Technical Note 3, (ed.D.D.McCarthy), 1989
- IGS Resmi Web Sitesi, <http://www.igs.org/products>, [Ziyaret Tarihi: Kasım, 2020]
- Kalman R. E., 1960, A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Transactions of the ASME*, 82, 36-45
- Kouba, J., 2009, A guide to using International GNSS Service (IGS) products, <http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873-A-Guide-to-Using-the-IGS-Products>, 2020
- Laurichesse D, Mercier F, Berthias JP, Broca P, Cerri L, 2009, Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination navigation, *Navigation*, 56(2):135–149
- Li P., Zhang X., 2014, Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning, *GPS Solution 2014*, 18, 461-471
- Li T., Wang J., Laurichesse D., 2014, Modeling and quality control for reliable precise point positioning integer ambiguity resolution with GNSS modernization, *GPS Solution*, 18(3):429–442
- Li X., Dai X., Ge M., Ren X., 2015, Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo, *Journal Of Jeodesy 2015*, Mart
- Li X., Ge M., Zhang X., Zhang Y., Guo B., Wang R., Klotz J., Wickert J., 2013, Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: application to earthquake early warning, *Geophys Res Letters* 40(2):295–300
- Liu Y, Lou Y, Ye S, Zhang R, Song W, Zhang X, Li Q, 2017, Assessment of PPP integer ambiguity resolution using GPS, GLONASS and BeiDou (IGSO, MEO) constellations, *GPS Solution*, 21(4):1647–1659

- Liu, Z., 2011, A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency GPS receiver, *Journal of Geodesy*, 85, 171-183
- Lu C., Li X., Nilsson T., Heinkelmann R., Ge M., Glaser S., Schuh H., Realtime retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations, *Journal of Geodesy*, 89, 843-856, 2015
- Montenbruck O., Steigenberger P., Khachikyan R., Weber G., Langley R., Mervart L., Hugentobler U., 2014, IGS-MGEX Preparing the ground for multi-constellation GNSS science, *Inside GNSS*, 9:42– 49
- Montenbruck, O., Schmid, R., Mercier, F., Steinberger, P., Noll, C., Fatkulin, R., Kogure, S., Ganeshan, A.S., 2015, GNSS satellite geometry and attitude models, *Advances in Space Research*, 56, 1015-1029
- Montenbruck O., Steinberger P., Prange L., Deng Z., Zhao Q., Perosanz F., Romero I., Noll C., Stürze A., Weber G., Schmid R., MacLeod K., Schaer S., 2017, The Multi GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS)-Achievements, prospect and challenges, *Advances in Space Research 2017*, 59 1671-1697
- NAVSTAR GPS Space Segment/Navigaton User Segment Interface, 2015, http://www.gps.gov/technical/icwg/IRN-IS-200H-001+002+003_rollup.pdf, [Ziyaret Tarihi: Ağustos, 2020]
- Niell A. E., 1996, Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, 101 (B2), 3227-3246
- Öğütçü, S., 2019, The contribution of Multi-GNSS Experiment (MGEX) to precise point positioning over Turkey: Consideration of observation time and satellite geometry, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6(3): 642-658.
- Öğütçü, S., 2020, Assessing the contribution of Galileo to GPS+ GLONASS PPP: Towards full operational capability, *Measurement*, 2020, 151: 107143
- Petit, G., Luzum, B., 2010, IERS Conventions, Bureau International des Poids et Mesures Sevres (France)
- Shi J., Yuan X., Cai Y., Wang G., 2017, GPS real-time precise point positioning for aerial triangulation, *GPS Solutions*, 21, 405-414
- Shi, J., Gao, Y., A, 2014, comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods, *GPS Solutions*, 18, 519:528
- Togedor J., Øvstedal O., Vigen E., 2014, Precise orbit determination and point positioning using GPS, Glonass, Galileo and BeiDou, *Journal of Geodetic Science*, 4, 65-73
- Tu R., Zhang H., Ge M., Huang G., A real-time ionospheric model based on GNSS Precise Point Positioning, *Advances in Space Research*, 52, 1125-1134, 2013

- Yigit, C. O., Gikas, V., Alcay, S., Ceylan, A., 2014, Performance evaluation of short to long term GPS, GLONASS and GPS/GLONASS post-processed PPP, *Survey Review*, 46(336), 155-166
- Yiğit C. O. ve Gürlek E., 2017, Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures, *Geomatics Nat. Hazards Risk*, 8 893–904
- Yuan X., Fu J., Sun H., Toth C., The application of GPS precise point positioning technology in aerial triangulation, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 541-550,2009
- Welch G., Bishop G., 1995, An introduction to the Kalman Filter, TR 95-401, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC 27599-3175
- Witchayangkoon B., 2000, Elements of GPS Precise Point Positioning, Ph.D. Thesis, University of Maine
- Wu J.T., Wu S.C., Hajj G.A., Bertiger W.I., & Lichten S.M., 1993, Effects of antenna orientation on GPS carrier phase, *Manuscripta Geodaetica*, 18, 91-98.
- Wright T. J., Houlie N., Hildyard M., Iwabuchi T., 2012, Real-time, reliable magnitudes for large earthquakes from 1 Hz GPS precise point positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) earthquake, *Geophysical Research Letters*, 39, L12302
- Zhang Q.Q., Zhao L. D., Zhao L., Zhou J. H., An improved robust adaptive Kalman filter for GNSS precise point positioning, *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 99, pp. 4176–4186, May 2018.
- Zumberge J. F., Heftin 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* 1997, 102 (B3), 5005-5017

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sümeyye Nur KARAUĞUZ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya, 1996
Telefon : 5367806094
Faks :
e-mail : sumeyyenurkarauguz@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Konya (Anadolu) Lisesi, Meram, KONYA	2014
Üniversite	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram, KONYA	2018
Yüksek Lisans :		
Doktora :		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
-	-	-