

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**GNSS-INS SENSÖR ENTEGRASYONU İLE OTONOM
ARAÇLARDA HASSAS KONUM BELİRLEME**

Yüksek Lisans Tezi

Ahmet Can UÇARLI

Danışman

Doç. Dr. Veli İLÇİ

SAMSUN
2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Can UÇARLI tarafından, Doç. Dr. Veli İLÇİ danışmanlığında hazırlanan “GNSS-INS SENSÖR ENTEGRASYONU İLE OTONOM ARAÇLARDA HASSAS KONUM BELİRLEME” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 18.07.2022 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Yasemin ŞİŞMAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı		☒
			Kabul
			☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Veli İLÇİ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı		☒
			Kabul
			☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Nurullah ALKAN Hitit Üniversitesi Osmancık Ömer Derindere Meslek Yüksekokulu Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü		☒
			Kabul
			☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

İmza

18 / 07 / 2022

Ahmet Can UÇARLI

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : GNSS-INS SENSÖR ENTEGRASYONU İLE OTONOM ARAÇLARDA HASSAS KONUM BELİRLEME

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 18.07.2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 4

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

18 / 07 / 2022

Doç. Dr. Veli İLÇİ

ÖZET

GNSS-INS SENSÖR ENTEGRASYONU İLE OTONOM ARAÇLARDA HASSAS KONUM BELİRLEME

Ahmet Can UÇARLI
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans, Temmuz/2022
Danışman: Doç. Dr. Veli İLÇİ

Gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün daha fazla hayatımıza girmeye başlayan otonom araçlar için en gerekli bileşenlerden birisi de konum bilgisidir. Konum bilgisini elde etmek amacıyla otonom araçlarda farklı sensörler kullanılmaktadır. Global bir koordinat sisteminde konum belirleyebilen Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS) en yaygın kullanılan konumlama sensörlerindendir. Ancak GNSS kullanımı ile elde edilen konum bilgisinin altgeçit, yüksek binalar gibi alanlarda yeterli doğrulukta konum bilgisi üretememektedir. Günümüzde kesintisiz bir navigasyon çözümü için GNSS sistemleri, Ataletsel Konumlama Sistemleri (INS) ile birlikte kullanılmaktadır. Bu çalışma da 4. seviye otonom aracın hassas konumun belirlenmesi için GNSS ve INS sistemlerinin dahil edildiği uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama verileri ile birlikte 3 farklı karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

İlk analizde GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU uydu kombinasyonlarının otonom aracın konum belirleme performansına etkileri incelenmiştir. Sadece GPS çözümünde 2B konum doğruluğu 13 santimetre (cm) iken yükseklik doğruluğu 18 cm elde edilmiştir. Sadece GPS çözümüne kıyasla ikili kombinasyonlardan GPS+GLONASS ve GPS+BEIDOU çözümlerinde 2B’de 1-2 cm iyileşme sağlanırken yükseklikte ise yalnızca 1 cm iyileşme sağlanmıştır. GPS+GALILEO çözümünde ise 2B’de 4 cm, yükseklikte ise 5 cm iyileşme gözükmemektedir. Benzer şekilde üçlü ve dörtlü kombinasyonlarda da GALILEO sisteminin dahil edildiği çözümlerde elde edilen konum bilgisinin daha yüksek doğrulukta olduğu gözlenmiştir. Tüm uydu kombinasyonları ile elde edilen çözümde ise ortalama konum doğrulukları 2B’de 8 cm, yükseklikte ise 12 cm olarak belirlenmiştir.

İkinci analizde ise GNSS ve INS sistem verilerinin birlikte kullanımının otonom aracın konum doğruluğuna etkisi araştırılmıştır. GNSS ve INS entegrasyonu Loosely Couple (LC) ve Tightly Couple (TC) yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Yalnızca GNSS sistemlerinin kullanılması ile oluşturulan konum bilgisinde 2B standart sapma hataları 18 cm olmaktadırken yükseklik değerinde bu hata 24 cm olmaktadır. INS sisteminin entegrasyonu ile LC yönteminde 2B ve yükseklikte 1.3 cm iken TC yönteminde bu değerler sırasıyla 1.3 cm ve 1.4 cm olarak elde edilmiştir. INS verileri ile GNSS verilerinin entegre edilmesiyle otonom aracın konum bilgisi en zorlu bölgelerde dahi 1-2 cm doğrulukta elde edilmiştir. GNSS sinyal kesintilerinin yaşandığı alanlarda INS verilerinin konum bilgisini doğru ve sürekli konum bilgisi elde edildiği gözlenmiştir.

Üçüncü analizde ise Post Process Kinematik (PPK) ve Hassas Nokta Konumlama (PPP) yöntemlerinin otonom aracın konum belirleme performansına

etkileri araştırılmıştır. PPP GNSS çözümünde 2B’da standart sapma hataları 10 cm iken yükseklik değerlerinde bu hata 15 cm olarak elde edilmektedir PPK GNSS çözümünde bu hatalar sırasıyla 2.5 cm ve 4 cm olmaktadır. GNSS/INS entegrasyonu olan PPP-LC yönteminde 2B ve yükseklikte 1.5 cm’dir. PPK-LC yönteminde bu hatalar 0.8 cm ve 0.9 cm’dir. PPP-TC yönteminde 2B ve yükseklikte 1.8 cm iken, PPK-TC yönteminde bu hatalar sırasıyla 0.6 ve 0.7 cm olmaktadır. Bu verilerin değerlendirilmesi ile PPK yönteminin PPP yöntemine kıyasla çok daha yüksek doğruluklu konum bilgisi sağladığı görülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Otonom araç, GNSS, INS, Hassas Nokta Konumlama (PPP), Post- Proses Kinematik (PPK), Loosely Couple, Tightly Couple



ABSTRACT

PRECISE POSITIONING IN AUTONOMOUS VEHICLES WITH GNSS-INS SENSOR INTEGRATION

Ahmet Can UÇARLI
Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatics Engineer
Master, June/2022
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Veli İLÇİ

Autonomous vehicles are entering our lives increasingly every day with the developing technology. Location information is one of the most necessary components of the autonomous vehicle. Positioning information in autonomous vehicles can be obtained with different sensors. GNSS systems are among the most widely used positioning sensors, which can determine the position in a global coordinate system. However, the location information obtained using GNSS cannot accurately produce location information in areas such as underpasses and high-rise buildings. GNSS systems are used together with Inertial Positioning Systems (INS) for a seamless navigation solution. In this study, an application including GNSS and INS systems was carried out to determine the precise location of the 4th level autonomous vehicle. With this application data, three different comparative analyzes were made.

In the first analysis, the effects of GPS, GLONASS, GALILEO, and BEIDOU satellite combinations on the position determination performance of the autonomous vehicle were investigated. Only in the GPS solution the 2D position accuracy was 13 centimeters (cm), while the height accuracy was 18 cm. Compared to the GPS - only solution, the GPS+GLONASS and GPS+BEIDOU combinations provided 1-2 cm improvement in 2D while only 1 cm improvement in height. In the GPS+GALILEO solution, there is an improvement of 4 cm in 2D and 5 cm in height. Similarly, in the triple and quadruple combinations, it has been observed that the position information obtained in the solutions where the GALILEO system is included higher accuracy. In the solution obtained with all satellite combinations, the average position accuracies were determined as 8 cm in 2D and 12 cm in height.

In the second analysis, the effect of the combined use of GNSS and INS system data on the position accuracy of the autonomous vehicle was investigated. GNSS and INS integration were performed with Loosely Couple (LC) and Tightly Couple (TC) methods. While the 2D mean errors in the position information created by using GNSS-only solution are 18 cm in position, and 24 cm in height components. With the integration of the INS system, these values were obtained as 1.3 cm in 2D and height components by using the LC method, while these values were obtained as 1.3 cm and 1.4 cm in the TC method, respectively. By integrating INS and GNSS data, the position information of the autonomous vehicle was obtained with an accuracy of 1-2 cm, even in the most difficult areas. It has been observed that in areas where GNSS signal interruptions are occurred, INS data provides accurate and seamless positioning solution.

In the third analysis, the effects of Post Process Kinematics (PPK) and Precise Point Positioning (PPP) methods on the positioning performance of the autonomous vehicle were investigated. In the PPP-GNSS solution, the mean errors are 10 cm in 2D, and 15 cm in the height components. In the PPK-GNSS solution, these errors are 2.5 cm and 4 cm, respectively. With GNSS/INS integration, 1.5 cm mean errors were obtained in 2D and height components by using the PPP-LC method. In the PPK-LC method, these errors are 0.8 cm and 0.9 cm, respectively. In the PPP-TC method, 1.8 cm mean errors were provided in both components while these errors are 0.6 and 0.7 cm in the PPK-TC method, respectively. With the evaluation of these data, it is seen that the PPK method provides much higher accuracy position information compared to the PPP method.

Keywords: Autonomous Vehicle, GNSS, INS, Precise Point Positioning (PPP), Post-Process Kinematics (PPK), Loosely Couple, Tightly Couple



ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca benden hiçbir desteğini esirgemeyen, tüm deneyim, tecrübe ve değerli bilgileri ile bana yol gösteren tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Veli İLÇİ'ye teşekkür ederim. Bu yolda bana olan güveni ve katkısı ile hep yanımda olan annem Süreyya UÇARLI, babam Rahim UÇARLI ve kardeşlerim Taha Çağrı UÇARLI ve Mehmet Akif UÇARLI'ya teşekkür ederim. Çalışmam boyunca beni destekleyen ve motive eden tüm Adastec Teknoloji A.Ş. çalışanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Can UÇARLI

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GNSS	6
2.1. GNSS sistemlerinin tanıtımı	6
2.1.1. Global Positioning System (GPS)	8
2.1.2. Global navigation satellite system (GLONASS)	13
2.1.3. GALILEO	15
2.1.4. BeiDou	18
3. GNSS ÖLÇÜ VE HESAPLARINI ETKİLEYEN HATA KAYNAKLARI	19
3.1.1. Uydu yörünge hataları	19
3.1.2. Uydu saat hatası	20
3.1.3. Sinyal yansıma (multipath) hatası	20
3.1.4. İyonosferik etki	21
3.1.5. Troposferik etki	21
3.1.6. GNSS Doğruluk Ölçütleri	22
4. GNSS ÖLÇMELERİ	28
4.1. GNSS Gözlemleri	28
4.1.1. Kod pseudorange gözlemleri	28
4.1.2. Taşıyıcı faz ölçmeleri (Carrier-phase gözlemleri)	29
4.2. GNSS ölçme yöntemleri	30
4.2.1. Mutlak konum belirleme yöntemi	30
4.2.2. Bağlı konum belirleme yöntemi	31
4.2.3. Hassas Nokta Konumlandırma (PPP)	32
4.2.4. Post Process Kinematik - PPK	36
4.3. Multi GNSS	37
5. KALMAN FİLTRE	40
6. KOORDİNAT SİSTEMLERİ	45
6.1. Yeryüzü Merkezli Ataletsel (ECI) Koordinat Sistemi	45
6.2. Yeryüzü Merkezli Yeryüzüne Bağlı Koordinat Sistemi (ECEF)	46
6.3. Dünya Jeodezik Sistemi – 1984 (WGS-84)	47
6.4. Yerel Navigasyon Referans Sistemi	47

6.5. Gövde Referans Sistemi	48
7. ATALETSEL KONUMLAMA SİSTEMİ.....	49
7.1. Ataletsel Sensor (Inertial Sensor).....	49
7.1.1. İvmeölçer (Accelerometer).....	49
7.1.2. Jiroskop.....	50
7.1.3. Ataletsel Ölçü Birimi (Inertial Measurement Unit (IMU))	52
7.1.4. Ataletsel Navigasyon Sistemi (Inertial Navigation Systems).....	53
7.1.5. Mekanizasyon Denklemleri	54
7.1.6. INS Hata Durumları.....	57
8. GNSS AND INS ENTEGRASYONU	61
8.1. Loosely - Coupled (LC)	62
8.2. Tightly – Coupled (TC).....	68
9. UYGULAMA	74
9.1. Çalışma Alanı	74
9.2. Veri Toplama:.....	75
9.3. Çözümleme.....	80
9.3.1. PPP-GNSS çözümü	80
9.3.2. PPP-LC çözümü	81
9.3.3. PPP-TC çözümü	82
9.3.4. PPK-GNSS çözümü.....	83
9.3.5. PPK-LC çözümü.....	84
9.3.6. PPK-TC çözümü.....	84
10. BULGULAR.....	86
10.1. Duyarlılık Kaybı.....	86
10.2. Analizler	89
10.2.1. Çoklu Uydu Sistem Çözümlerinin Analizi	89
10.2.2. Loosely-Coupled ve Tightly Couple ile GNSS - INS Entegrasyonu	93
10.2.3. PPP ve PPK Verilerinin Analizi	101
11. SONUÇ	108
KAYNAKÇA	111
ÖZ GEÇMİŞ.....	123

SİMGELER VE KISALTMALAR

C/A	: Coarse/Acquisition
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CORS	: Continuously Operating Reference Stations
GDOP	: Geometric Dilution of Precision
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
GLONASS	: Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema
GPS	: Global Position Satellite Systems
EKF	: Extend Kalman Filter
FOC	: Full Operational Capability
HD	: High Definiton
HDOP	: Horizontal Dilution of Precision
INS	: Inertial Navigation Systems
IMU	: Inertial Measurement Unit
LC	: Loosely Couple
MEO	: Medium Earth Orbit
QZSS	: Quasi-Zenith Satellite System
PDOP	: Position Dilution of Precision
PRN	: Pseudo Random Noise
PPK	: Post Process Kinematik
PPP	: Precise Point Positioning
PPS	: Hassas Konumlandırma Hizmeti
RTK	: Real Time Kinematik
SA	: Selective Availability
SPS	: Standart Konumlandırma Hizmeti
TC	: Tightly Couple
TDOP	: Time Dilution of Precision
UERE	: User Equivalent Range Error
VDOP	: Vertical Dilution of Precision

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. GNSS bölümleri (İlcev, 2020)	7
Şekil 2.2. GPS kontrol (GPS, 2022).....	11
Şekil 2.3. Galileo uydu dağılımları (ESA, 2021).....	17
Şekil 2.4. Galileo frekans bantları (Falcon ve diğ, 2017)	17
Şekil 3.1. GNSS yörünge hatası.....	19
Şekil 3.2. Multipath hatası (Suzuki ve diğ., 2020).....	21
Şekil 4.1. GNSS ölçme yöntemleri (Kahveci ve Yıldız, 2012).	30
Şekil 4.2. Mutlak konum belirleme.....	31
Şekil 4.3. Bağıl konum belirleme.....	31
Şekil 4.4. IGS istasyonları (IGS)	36
Şekil 4.5. Binaların uydu sinyallerine etkisi ve farklı GNSS sistemlerinin kullanımı ile görülen uydu sayısı (Vinh ve Tung, 2014).	39
Şekil 4.6. Farklı GNSS sistemlerinin kullandığı koordinat sistemleri (Vinh ve Tung, 2014).	39
Şekil 5.1. Kalman filtresi genel işleyişi	44
Şekil 6.1. ECI koordinat sistemi eksenleri(Kahveci ve Yıldız, 2012)	46
Şekil 6.2. ECEF koordinat sistemi (Senapati ve diğ., 2020).....	47
Şekil 6.3. Farklı Sensörlere Ait Referans Sistemleri (Gabrlik ve diğ., 2018).....	48
Şekil 7.1. Basit bir ivmeölçer (Groves, 2013).....	50
Şekil 7.2. Mekanik jiroskop (Stocker, 2019)	51
Şekil 7.3. Jiroskop ölçek faktörleri (Schmidt, 2015)	52
Şekil 7.4. IMU eksen gösterimi (Jim Hamblen, 2016)	53
Şekil 7.5. INS'in 3 temel yapısı	54
Şekil 7.6. Mekanizasyon denklem diyagramı	55
Şekil 8.1. GNSS/INS entegrasyon şeması	62
Şekil 8.2 Loosely-Coupled yapı şeması	63
Şekil 8.3 Tightly Coupled yöntemi genel şeması.....	68

Şekil 9.1. Çalışma alanı	74
Şekil 9.2. Çalışma güzergahı.....	75
Şekil 9.3. 4. seviye otonom araç	76
Şekil 9.4. Kullanılan GNSS antenleri	76
Şekil 9.5. Sürücüsüz araç sensörleri.....	77
Şekil 9.6. Novatel PwrPak7	77
Şekil 9.7. Novatel Application Suite uygulama komutları	79
Şekil 9.8. ISTN ve araç rotasının konumları.....	84
Şekil 10.1. Gözlenen uydu sayısı.....	86
Şekil 10.2. PDOP değerleri	87
Şekil 10.3. HDOP değerleri	87
Şekil 10.4. VDOP değerleri	88
Şekil 10.5. PPP-GNSS çözümlerinde Sağa değerlerinin standart sapmaları	90
Şekil 10.6. PPP-GNSS çözümlerinde Yukarı değerlerinin standart sapmaları	90
Şekil 10.7. PPP-GNSS çözümlerinde Elipsoidal Yükseklik değerlerinin standart sapmaları	90
Şekil 10.8. PPP-GNSS sisteminde çalışma güzergahı	92
Şekil 10.9. GNSS ile belirlenen Sağa değerlerinin standart sapmaları	93
Şekil 10.10. GNSS-INS ile belirlenmiş Sağa değerlerinin standart sapmaları	94
Şekil 10.11. GNSS ile belirlenmiş Yukarı değerlerinin standart sapmaları.....	94
Şekil 10.12. GNSS-INS ile belirlenmiş Yukarı değerlerinin standart sapmaları	95
Şekil 10.13. GNSS ile belirlenmiş Yükseklik değerlerinin standart sapmaları	95
Şekil 10.14. GNSS-INS ile belirlenmiş Yükseklik değerlerinin standart sapmaları.....	96
Şekil 10.15. PPP-GNSS çözümü ile araç güzergahı	98
Şekil 10.16. LC-PPP çözümü ile araç güzergahı	98
Şekil 10.17. TC-PPP çözümü ile araç güzergahı	99
Şekil 10.18. LC-PPP ve TC-PPP çözümleri ile elde edilen Roll hata değerleri	100
Şekil 10.19. LC-PPP ve TC-PPP çözümleri ile elde edilen Pitch hata değerleri	100
Şekil 10.20. LC-PPP ve TC-PPP çözümleri ile elde edilen Heading hata değerleri.....	101

Şekil 10.21. PPP-GNSS ve PPK-GNSS Sağa değerlerin standart sapmaları.....	102
Şekil 10.22. PPP-GNSS ve PPK-GNSS Yukarı değerlerin standart sapmaları	103
Şekil 10.23. PPP-GNSS ve PPK-GNSS Elipsoidal Yükseklik değerlerinin standart sapmaları	103
Şekil 10.24. PPP ve PPK Yöntemlerinin LC ve TC çözümleri Sağa koordinat değerleri ...	104
Şekil 10.25. PPP ve PPK Yöntemlerinin LC ve TC çözümleri Yukarı koordinat değerleri	104
Şekil 10.26. PPP ve PPK Yöntemlerinin LC ve TC çözümleri Yükseklik koordinat değerleri	105



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1 GPS uydularının özellikleri (GPS, 2022)	9
Tablo 2.2. GPS sinyal özellikleri	13
Tablo 2.3. GLONASS uyduları ve sinyal özellikleri (Wikipedia, GLONASS, 2022).....	15
Tablo 9.1. Çözümlerin numaralandırılması	80
Tablo 9.2 Precise Point Positioning (PPP) - GNSS ayarları	81
Tablo 9.3 PPP-LC ayarları	81
Tablo 9.4 IMU ayarları	82
Tablo 9.5 PPP-TC ayarları	83
Tablo 9.6 Referans İstasyon ayarları.....	84
Tablo 9.7. Çözümlere göre eksik epok sayıları.....	85
Tablo 10.1. Konum, yatay ve düşey duyarlılık kaybı istatistikleri	88
Tablo 10.2. Uydu kombinasyonlarına göre elde edilen doğruluk değerleri.....	91
Tablo 10.3. GNSS, LC ve TC göre üretilen doğruluk değerleri	96
Tablo 10.4. LC ve TC göre üretilen Roll, Pitch, Heading doğruluk değerleri	101
Tablo 10.5. PPP ve PPK yöntemleri ile elde edilen doğruluk değerleri	106

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen ve değişen teknolojinin beraberinde getirmiş olduğu yenilikler dünyamızı ve içinde bulunan canlı cansız tüm varlıkları etkilemektedir. Değişim ve gelişim dünya için beraberinde şehirleri, büyük yapıları, binaları ve yaşam merkezlerini getirmiştir. Yeni dünya olarak nitelendirdiğimiz bu dünyada insan nüfusunun artması ile birlikte birçok yeni problem ortaya çıkmıştır. İnsanoğlu bu problemlerin çözümüne eski zamanlarda insan gücüyle çözüm yaratmaya çalışmış sonrasında sanayi devrimiyle çözüm yolu aramış, şu anda ise çözüm yolunu yapay zekâ ve makine öğrenmesi gibi konularda aramaktadır. Dünya kaynaklarının azalması ile birlikte eski teknolojilerin yetersiz kaldığı gün yüzüne çıkmıştır. Yeni teknolojiler ile sınırlı olan dünya kaynaklarının daha etkili şekilde kullanılması birçok ülke ve kuruluş tarafından planlanmaktadır. Bu yeni teknolojik çalışmalardan biri de nesnelerin akıllandırılmasına dayanmaktadır. Nesnelerin akıllı hale getirilmesi ile nesnelerin insan hayatındaki önemi ve değeri gittikçe artmaya başlamıştır. İlk olarak nesnelerin akıllandırılmasına dayanan teknolojiler daha sonrasında yeni nesnelerin akıllı olarak üretilmesine kadar ilerlemiştir. İnsan hayatının vazgeçilmez parçalarından olmaya başlayan cep telefonları, tabletler, televizyonlar, mutfak eşyaları vb. akıllı araçlar her gün daha yeni teknolojilerle hayatımıza entegre edilmektedir. Otomotiv sektörü, savunma sanayisi, askeri ve havacılık teknolojilerinde kullanılmakta olan bu akıllı sistemler geliştirilen yeni sensörler ile birlikte kendi başlarına verilen görevi otonom olarak yerine getirebilmektedirler. Bunların en büyük örneklerinden biri de herhangi bir insan müdahalesi olmadan kendilerine verilmiş olan görevi yerine getiren sürücüsüz araçlardır.

Sürücüsüz araçların gelişiminde en büyük rolü alan sensörler yazılım, otomotiv ve haritacılık sektöründeki gelişmelere göre dizayn edilmiştir. Bu alanların ortak gelişimi sürücüsüz araç teknolojisinin otomotiv sektöründe yeni bir çağı başlatmasına vesile olmuştur. İnsanların hayatındaki eski alışkanlıklar sürücüsüz araç teknolojisi ile birlikte değişime uğramış gündelik hayat, çalışma hayatı ve eğlence hayatı farklılaşmıştır (Cohen ve Hopkins, 2019). Sürücüsüz araç kavramının temeline bakıldığında amaç olarak belirlenen şey iki nokta arasında mekanik bir müdahaleye ihtiyaç duymadan konforlu, güvenilir ve ekonomik bir seyahat gerçekleştirmektir. Otonom araçlar iki nokta arasında seyahat edebilmek için çevresindeki objelerin, yolun ve yayaların durumunu sahip olduğu sensörler ile algılayabilen, topladığı

bilgileri yazılımları kullanarak derleyebilen, anlık duruma göre karar verme ve uygulama yetisine sahip araçlardır (Akar ve Orman, 2020; Demir ve Altun, 2020). Tamamen görüş sistemine dayalı olan araç kullanımı insanlar için dahi anlık refleksler ve anlık bilinmeyenler içerirken otonom araçlar böyle bir seyahat tamamlayabilmek için donanımsal ve yazılımsal güçlü bir altyapıya ihtiyaç duymaktadır. Donanımsal altyapı farklı sensörlerin kullanımı ile çözümlenirken, yazılımsal altyapı ise makine öğrenmesi, yapay zekâ ve bilgisayar görmesi gibi farklı metotlar kullanılarak çözüme kavuşturulmaktadır. Otonom araçlar ile birlikte sürücülük sırasında insanların kaybetmiş olduğu zamanın daha faydalı şekilde geçirilmesi, üretkenliğin artması ve ulaşım herkesin her yerden zaman fark etmeksizin ulaşabilmesi sağlanmaktadır (Schwartz ve diğ., 2018). 1920'lerde başlayan sürücüsüz araçlar teknolojinin gelişimi ile birlikte farklılaşmaya uğramış ve değişmiştir. Günümüzde otonom araçlara olan ilginin artması ile birlikte otonom araçların kullanımında birçok yasal mevzuata ve kanuna olan ihtiyaç artmaktadır. İlk olarak normal araçlara entegre edilen Gelişmiş Sürücü Yardım Sistemleri (Advanced Driver Assistance System ADAS) ile sürücünün seyir esnasında daha rahat ve konforlu vakit geçirmesine yönelik hizmetler olarak geliştirilen sistemler kullanılmaktaydı (Cho ve diğ., 2017). Sonrasında sürücü faktörünü ortadan kaldırmak için çalışmalar başlatılmış ve günümüzde ADAS sistemi Google, Tesla, Mercedes, Karsan, Zoox, Waymo ve Navya vb. birçok şirket tarafından kullanılmaya başlanmıştır. ABD merkezli Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (SAE-Society of Automotive Engineers) otonom araçları 0'dan 5'e kadar altı farklı seviyede sınıflandırmıştır (Martinez-Diaz ve Soriguera, 2018). Bu sınıflandırma şu şekildedir (Wang ve diğ.,2020; Othman,2021):

- Seviye 0: Tamamen mekanik olarak sürüş yapılmaktadır ve tüm kontrol sürücüye aittir.
- Seviye 1: Sürüş işlemi sürücü tarafından gerçekleştirilmekte, araçta bulunan yardımcı sürüş fonksiyonları sürücüye sürüş sırasında yardımcı olmaktadır.
- Seviye 2: Araç hızlanma, yavaşlama gibi kontrollerde bulunabilmektedir ancak tüm sürüşü sürücünün yönetmesini beklenmektedir.
- Seviye 3: Araç sürüş işlemini gerçekleştirebilmektedir ancak şoförün

yerinde bulunması gerekmektedir ve sürüşe müdahale edebilmektedir.

- Seviye 4: Araç tam otonom halde bulunmaktadır. Belli bir rota üzerinde sürücüyü ihtiyaç duymadan seyahat edebilmektedir.
- Seviye 5: Sürücü ihtiyacı olmadan araç istenilen yere seyahat edebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan araç 4. seviye otonom bir araçtır. 4. seviye bir otonom araç belli bir rota üzerinde insan müdahalesi olmaksızın otonom sürüş gerçekleştirebilmektedir. Otonom bir sürüş gerçekleştirebilmesi için araç üzerinde LIDAR, kamera, radar, GNSS, INS, odometre gibi sensörlerin olması gerekmektedir. Ayrıca 4. seviye bir araç için en önemli ayrıntılardan birisi de gideceği güzergahın belli olması konusudur. Bu araç için belirlenen güzergâhta aracın gidebilmesi için içerisinde detaylı bilgiler içeren High Definition (HD) haritaya ihtiyaç duymaktadır. Bu harita aracın tüm karar verme algoritmalarını etkilemektedir. 4. seviye otonom bir araçta donanımsal altyapıyı sensörler oluştururken yazılımsal altyapının bileşenlerini ise lokalizasyon, algılama ve kontrol-planlama kısımları oluşturmaktadır. Lokalizasyon kısmında araç oluşturulan HD harita üzerinden etrafındaki objelere göre kendi konumunu belirlerken, algılama kısmı bu konuma göre etrafındaki objeleri takip etmekte, planlama ve kontrol kısmı ise harita üzerindeki rota bilgisine göre aracın gideceği güzergahın oluşturulmasını sağlamaktadır. Tüm kısımlarda kullanılan konum ve harita bilgisi sürücüsüz araçlar için en önemli bileşenlerdendir. Sürücüsüz araçlar yağmur, kar ve sis gibi zorlu hava koşullarında, trafik koşullarının zorlayıcı olduğu yoğun şehir alanları ve otoyollarda yol planlaması, algılama ve kontrol fonksiyonlarını yerine getirmek için konum, durum ve harita bilgilerine ihtiyaç duymaktadır (Reid ve diğ., 2019). Algısal ve konumsal belirsizliklerin azaltılması ve tüm sürecin izlenebilir hale gelmesi amacıyla haritalar sürücüsüz araçlarda kullanılmaktadır. Ancak haritadan üretilen bilgilerin doğru bir şekilde kullanılabilmesi için sürücüsüz aracın harita içerisinde gerçek zamanlı olarak kendi konumunu ve yönelimini yüksek bir hassasiyetle belirlemesi gerekmektedir (Spangenberg ve diğ. 2016). Bu amacı gerçekleştirebilmek için kullanılan en önemli sistem GNSS'tir. GNSS sistemleri ile dünya yüzeyinde anlık olarak 3-boyutlu global bir koordinat sisteminde zaman ve hava koşullarından etkilenmeden konum, hız ve zaman belirlenebilmektedir (Kahveci ve Yıldız, 2012). Sürücüsüz araçlar GNSS sistemleri ile INS, odometre, LIDAR, kamera vb. sistemlerin entegrasyonu

vasıtasıyla konumlarını belirleyebilmektedir.

Meng ve diğ. (2017)'de, lokalizasyonun otonom araçların en önemli unsurlarından biri olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü şehir içi alanlarda otonom bir aracın güvenli şekilde seyahat gerçekleştirebilmesi için doğru konum ve yönelim bilgisine sahip olması gerekmektedir. GNSS ile bu ihtiyacın belli bir kısmı karşılanmış olsa da, GNSS'in en az dört uyduya gereksinim duyması ve çevredeki engeller sebebiyle sinyallerde kesinti yaşaması gibi nedenlerden dolayı GNSS her zaman doğru konum bilgisi sağlayamamaktadır. Inertial Navigatation System (INS) ise kesintiye uğrayabilecek veya engellenebilecek harici veri kaynaklarına dayanmadığı için GNSS ile entegrasyonu sayesinde daha yüksek doğrulukta konum bilgisi sağlamaktadır.

Elsheikh ve diğ. (2019)'da daha düşük maliyet ile daha yüksek doğrulukta konum bilgisi üretmek için tek frekanslı Precise Point Positioning (TF-PPP) yöntemi kullanılmıştır. TF-PPP yöntemi, çift frekanslı PPP yöntemine göre daha hızlı yakınsama süresine ve daha düşük maliyetli GNSS alıcıları ve INS'ler ile kullanılabilmesi gibi avantajlara sahip olduğundan değişken ortamlara ve hareketli ölçümlere kolay uyum sağlayabilmektedir. Düşük maliyetli GNSS alıcıları ve INS sensörlerinin entegrasyonu ile 2. seviye otonom bir araç için gerekli olan konum doğruluğu sağlanmıştır. Loosely Coupled (LC) yöntemi ile INS ve GNSS entegrasyonunda INS gözlemlerinin kalitesi, GNSS çözümünün doğruluğu ve kullanılan entegrasyon algoritması, üretilen konum ve durum bilgisinin doğruluğunu etkileyen faktörlerdir. TF-PPP/INS entegrasyonu ile şerit genişliğinin 3m veya daha fazla olduğu alanlarda 2. seviye otonom araçlar için konum bilgisi üretilebilmektedir.

Joubert ve diğ. (2020)'de şehir ortamlarında ve otoyollarda otonom araçların kullanması için sensörler ile birlikte yüksek çözünürlüklü HD haritalara ihtiyaç duymaktadır. 4. seviye otonom araçlarda lokalizasyon kısmında GNSS/INS/LIDAR/Odometre gibi sensörler entegre şekilde kullanılmaktadır. LIDAR HD harita üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden olsa da farklı hava şartlarından ve çevrede yeterli obje olmaması gibi durumlardan etkilenmektedir. GNSS ve INS sensörleri hava durumundan etkilenmeseler de, GNSS'teki uydu görme zorunluluğu ve INS sistemindeki sapmalar ve gürültüler GNSS-INS entegrasyonun doğruluğunu düşürmektedir. Otonom bir araçta LiDAR'ın yanına prezisyonu yüksek bir GNSS-INS entegrasyonunun eklenmesi konum bilgisinin doğruluğunu oldukça yükseltmektedir.

Kassas ve diğ., (2019)'da otonom araç navigasyon sistemlerinde GNSS alıcısının yanında LIDAR, kamera, INS, radar ve odometre sensörlerini kullanmışlardır. Ancak bu sensörlerin kullanımı her zaman konum bilgisini iyileştirmemektedir. Bu sensörler araç üzerinde ciddi bir maliyet oluştururken, araç boyutlarının da farklılaşmasına sebep olabilmektedir. Ayrıca bu sensörlerden bazıları karlı, sisli yağmurlu hava şartlarında düzgün çalışmamakla birlikte konum bilgisinin doğruluğunu da düşürebilmektedir. GNSS sistemi gece ve gündüz farkı olmadan 7 gün 24 saat gözlem hizmeti sunarken, hava şartlarından da etkilenmemektedir. Bu da zamandan ve hava durumundan bağımsız olarak kullanılmak istenen otonom araçlarda en önemli konum bilgisi sensörünün global koordinat bilgisi üreten GNSS'in olduğunu göstermektedir. Bu sebeple otonom araç konumlama sistemlerinde GNSS temel sistem olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada 4. seviye otonom bir aracın hassas şekilde konum bilgisini belirleyebilmek için farklı yöntemler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizler şöyle özetlenebilir;

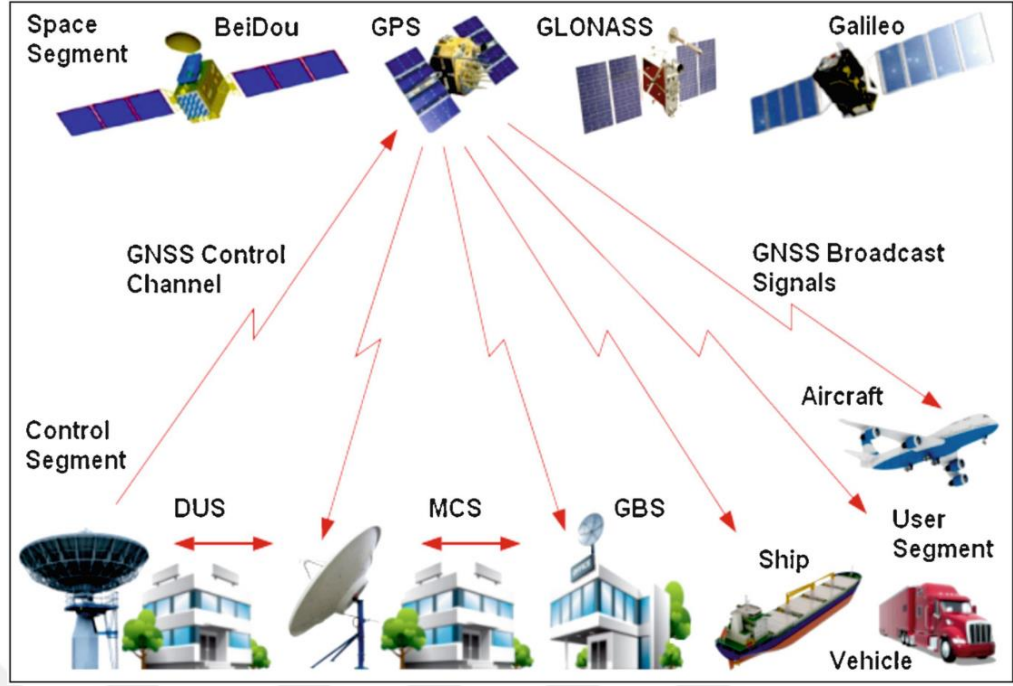
- Farklı uydu konfigürasyonlarının otonom aracın konum belirleme performansına etkileri,
- GNSS-INS entegrasyon tekniklerinden Loosely Couple (LC) ve Tightly Couple (TC) yöntem otonom aracın konum belirleme performansına etkileri,
- Post-Process Kinematik (PPK) ve Hassas Nokta Konumlama (PPP) yöntemlerinin otonom aracın konum belirleme performansına etkileri karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır.

Bu kapsamda yoğun şehir içi alanda test çalışmaları yapılmış, elde edilen bulgular ve analizler detaylı olarak değerlendirilmiştir.

2. GNSS

2.1. GNSS sistemlerinin tanıtımı

Dünya üzerindeki noktaların konumlarının belirlenmesi için eski zamanlardan bu yana uzak cisimlerin gözlemleri kullanılmaktadır. Güneş, yıldızlar ve gezegenlerin kullanılarak göksel konumlama işlemi teknoloji gelişimi ve uzay çağının başlaması ile birlikte yerini yüksek doğrulukta konumlandırma yapabilen global uydu sistemlerine bırakmıştır (Langley ve diğ., 2017). Bu uydu sistemleri takımı Küresel Uydu Navigasyon Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems (GNSS)) olarak adlandırılmaktadır. GNSS karada, denizde ve uzaydaki bir noktanın konumunu 3-Boyutlu (3B) global bir koordinat sisteminde belirleyebilmek için GNSS alıcısının uydulara olan mesafe hesaplamalarından yola çıkmaktadır (Dawoud, 2012). Bir uydu sistemindeki temel prensip yeryüzündeki bir nokta ile bu noktadan görülebilen en az dört uydu arasında bir üçgen ağı kurarak bu noktanın konum bilgisini elde etmektir (Lechner ve Baumann, 2000). Radyo sinyalleri ile uydulardan yayınlanan navigasyon mesajlarının alıcıya ulaşmasına kadar ki geçen sürenin ölçülmesi ile uydular ve alıcı arasındaki uzaklık metre hassasiyetiyle ölçülebilmektedir (Perosanz, 2019). Önceleri askeri amaçlı kullanmak amacıyla tasarlanan GNSS sistemlerinden yıllar sonra birçok farklı kullanıcı çeşitli amaçlar için yararlanmaya başlamıştır. Öncelikli olarak ABD Savunma Bakanlığı Global Positioning System (GPS) projesini başlatarak GNSS sistemlerinin temelini ortaya koymuştur. ABD ile hemen hemen aynı süreçte Rusya'nın Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) sistemi ile dünyanın ikinci konumlandırma sistemini ortaya çıkarmıştır. Sonrasında birçok farklı ülke ve kurum tarafından GALILEO, COMPASS, QZSS gibi sistemler üretilmiştir. Şekil 2.1' de gösterildiği gibi GNSS uzay, kontrol ve kullanıcı olmak üzere 3 temel yapı bölümünden oluşmaktadır.



Şekil 2.1. GNSS bölümleri (İlcev, 2020)

Uzay Bölümü: Navigasyon mesajı , hassas atomik saatler, seyir antenleri gibi sistemleri içeren GNSS uydularından oluşan bu bölüm kod ve taşıyıcı faz sinyallerinin oluşturulmasını ve alıcıya iletilmesini sağlamaktadır (Jin ve diğ., 2014). GNSS uyduları dünya yüzeyinden yaklaşık olarak 20.000 kilometre mesafede Orta Dünya Yörüngesinde (MEO) yer alırken, ekvator ile farklı açılarda eğimli yörüngelerde yaklaşık 12 saatlik periyotlara sahiptir (Peyret ve diğ., 2015). Kontrol bölümü tarafından yüklenen navigasyon mesajlarının depolanması ve geri iletilmesinden de sorumludur (Subirana ve diğ., 2013).

Kontrol Bölümü: Kontrol bölümü içerisinde ana kontrol istasyonunu, yer antenlerini ve izleme istasyonlarını barındırmaktadır. Dünya yüzeyinde birçok noktada kurulmuş olan tesislerden işleyen bu sistem uyduların takibi, iletimlerin izlenmesi, analizlerin gerçekleştirilmesi, uydulara komut ve veri gönderilmesi gibi görevleri üstlenmiş bulunmaktadır (GPS, 2021). Uydu yörünge bilgileri, uydu saat bilgileri ve atmosferik durumları tahmin ederek uyduya iletmekte ve uyduların çalışma durumlarını gözlemleyerek uydu işleyişinin doğruluğunu belirlemektedir (Tyszkowski ve diğ., 2007).

Kullanıcı Bölümü: Kullanıcı bölümünü GNSS sinyallerini alabilen ve çözümleyebilen herhangi bir alıcıya sahip olan kullanıcılar oluşturmaktadır. Kullanıcılar GNSS alıcıları ile konum, hız ve zaman gibi bilgilere ulaşabilmektedir. Bu bilgiler tarımsal uygulamalarda, sürücüsüz araçlarda, insansız hava araçlarında ve

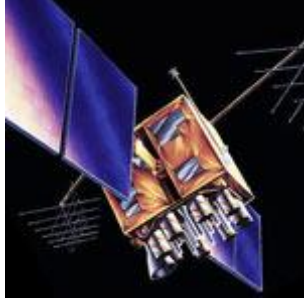
Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) gibi birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır.

GNSS Sinyali: GNSS uyduları L-band frekansları üzerinden kullanıcılarına sinyal göndererek kullanıcılarının konum bilgisi üretmesini sağlamaktadır. Farklı GNSS farklı frekansta sinyaller ile navigasyon mesajları ileterek konumlandırma için yedek sinyaller sağlarken, bu sinyallerin frekanslarındaki örtüşmeler de sinyallerin birbirleri ile karışmasına neden olabilmektedir (Gao ve Enge, 2012). GNSS sinyalleri içerisinde ranging (mesafe) kodu ve navigasyon mesajı içermektedirler. Alıcıların bu sinyalleri çözümlemesi ve uydudan çıkan sinyalin alıcıya varana kadar geçen sürenin de bilinmesi ile her zaman diliminde alıcının dünya yüzeyindeki koordinatlarını belirleyebilmektedir (Subirana ve diğ., 2013).

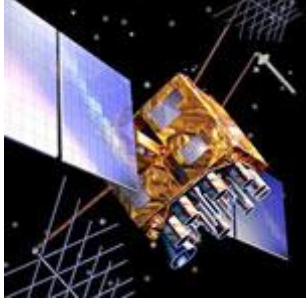
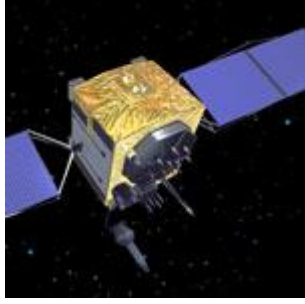
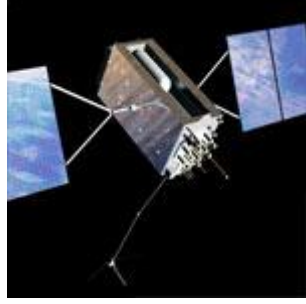
2.1.1. Global Positioning System (GPS)

1973 yılında ABD savunma bakanlığı tarafından Navigation Signal Time and Range Global Positioning System (NAVSTAR-GPS) programının başlamasıyla GPS sistemi ortaya çıkmıştır (Sabatini ve diğ., 2017). Küresel bir referans sisteminde anlık ve mutlak konum bilgisi üretmek için tasarlanan GPS sistemi başlangıçta askeri kullanıcılar için birkaç metre doğruluğunda sonuç verirken, sivil kullanıcılar için ise birkaç metreden daha düşük doğrulukta sonuçlar vermektedir (Paziewski, 2020). İlk uydusu 1977 yılında fırlatılan GPS sistemi 1995 yılında askeri amaçlı olarak tam kapasitesine ulaşmış, 2000 yılından itibaren sivil kullanıcılar içinde ücretsiz şekilde kullanıma sunulmuştur (Dawoud,2012). 24 uydu olarak tasarlanan sistemde yapılan güncellemeler ile birlikte 2 Şubat 2022 tarihi itibarıyla yörüngede hizmet dışı bırakılan uydular hariç 30 aktif uydusu bulunmaktadır(GPS, 2022). Dünya yüzeyindeki bir noktadan en az 4 uydunun görülebilir olması amacıyla dünyayı çevreleyen altı eşit yörüngeye sahiptir. IIA BLOK, BLOK IIR, BLOK IIR-M, BLOK IIF, GPS III/IIIF olarak adlandırılmış beş farklı uydu grupları gönderilmiştir. GPS sisteminin uydu kısmının büyük bölümü 1997 ile 2009 arasında fırlatılan IIR ve IIR-M uydularından oluşmaktadır. L2 ve L5 sinyallerini aktif şekilde çalışır hale getirmek amacıyla farklı uydu sistemleri farklı zamanlarda kullanıma sunulmuştur (Jin ve diğ., 2014). Çizelge 2.1’ de tüm GPS uydularına ve özelliklerine yer verilmiştir.

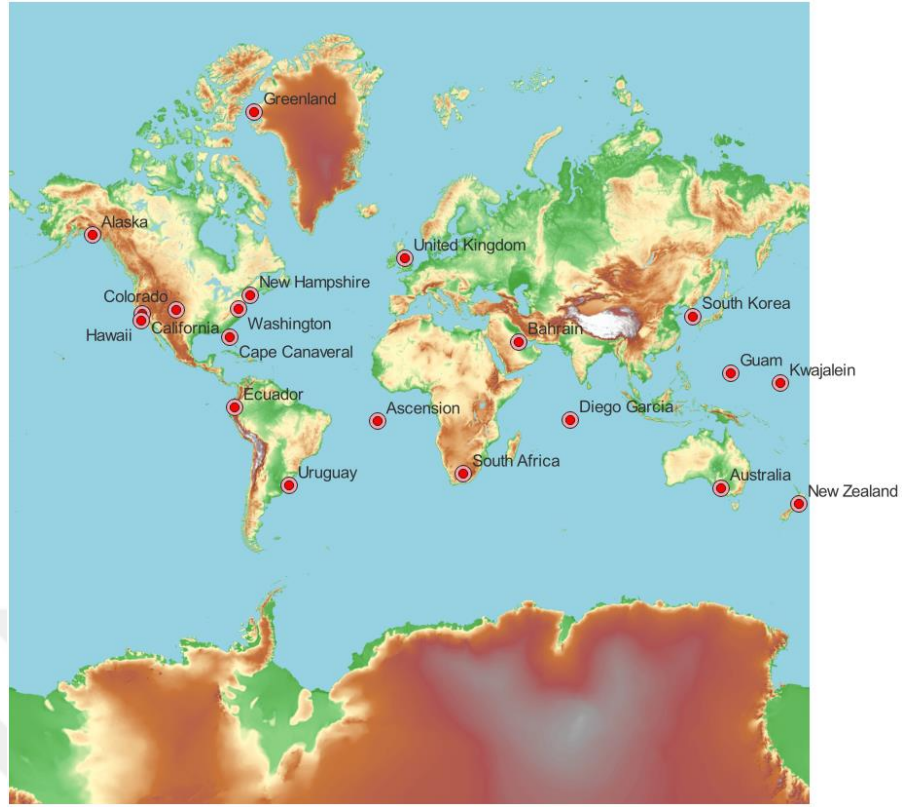
Tablo 2.1 GPS uydularının özellikleri (GPS, 2022)

ESKİ UYDULAR	
	
IIA BLOK	BLOK IIR
0 Aktif	7 Aktif
Sivil kullanıcılar için L1 frekansında Kalitesiz Alım (C / A) kodu Askeri kullanıcılar için L1 ve L2 frekanslarında hassas P (Y) kodu 7.5 yıllık tasarım ömrü 1990-1997 yılları arasında gönderildiler 2019' da görevini tamamladı.	L1 frekansı üzerinden C / A kodu yayını L1 ve L2 frekansları üzerinden P (Y) kodu yayını Dahili saat izleme 7.5 yıllık tasarım ömrü 1997-2004 yılları arasında gönderildiler.

MODERNİZE UYDULAR

		
BLOK IIR-M	BLOK IIF	GPS III / IIIF
7 Aktif	12 Aktif	4 Aktif
Tüm eski sinyalleri içerir L2(L2C) frekansı ile sivil kullanıcılar için de ikinci bir sinyal eklendi Gelişmiş sıkıştırma direnci için yeni askeri M kodu sinyalleri Askeri sinyaller için esnek güç seviyeleri 7.5 yıllık tasarım ömrü 2005-2009 yılları arasında gönderildiler.	Block IIR-M sinyallerinin tamamını içermekte L5 frekansında 3. sivil sinyalin kullanımı Gelişmiş atomik saatlere sahip Doğruluğu, sinyal gücü ve kalitesi geliştirilmiş 12 yıllık tasarım ömrü 2010-2016 yılları arasında gönderildiler.	Bir önceki bloğun tüm sinyallerini içerir L1(L1C) frekansı 4. sivil sinyalin kullanımını sağlamıştır. Gelişmiş sinyal güvenilirliği, doğruluğu ve bütünlüğüne sahip 15 yıllık tasarım ömrü IIIF: lazer reflektörleri; arama kurtarma yükü 2018'de ilk lansmanı yapıldı.

GPS kontrol bölümü içerisinde bir ana kontrol istasyonu, on bir yer anteni ve on altı izleme istasyonu bulundurmaktadır. Bu istasyonların konumları Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Tüm GPS uyduları dünya üzerinde konumları iyi bilinen, hassas GPS alıcılarından oluşan izleme istasyonlarından takip edilirler. İzleme istasyonları bilinen ve hesaplanan konumlar arasında oluşan farkları kaydederler (Nature of Geoinfo). Colorado Springs'de bulunan istasyon ana kontrol istasyonu olarak görev yapmaktadır. Bu merkez diğer izleme istasyonlarının ve yer antenlerinin koordineli şekilde çalışmasından da sorumludur(GPS, 2022).



Şekil 2.2. GPS kontrol (GPS, 2022)

Bu istasyonlar uydu sağlığı denetlenmesi, uydudan alınan verilerin incelenmesi, uydu yörünge bilgilerinin hesaplanması, uydu saat hatalarının düzeltilmesi gibi işlemler yapmakla görevlendirilmişlerdir (Kahveci ve Yıldız, 2012).

2.1.1.1. GPS Sinyali

GPS ölçmelerinde L-bandı üzerinden yayınlanan radyo frekansları kullanılmaktadır. GPS uyduları çok hassas atomik saatler kullanarak L bandı üzerinden 10.23 MHz'in katları olan L1 ve L2 frekansları üretmektedirler (Hegarty, 2012). GPS sisteminin modernize edilmesi sonucunda dört tanesi askeri amaçlı olarak kullanılan iki frekans üzerinden, diğer 4 tanesi de sivil kullanıcılara açık olarak üç frekans üzerinden yayınlanan sekiz farklı GPS sinyaliyle kullanıcılara veri sağlamaktadır (Betz, 2021). Bunlardan L1, L2, L5 ve L1C frekansları olarak adlandırılanları sivil kullanıcıların kullanımına açıktır. L1 sinyali 1575.42 MHz frekansında, L2 sinyali 1227.60 MHz'lik bir frekansında, L5 1176.45 MHz'lik bir frekansında, L1C ise L1 bandı ile aynı frekans olan 1575.42 MHz'lik bir frekansından yayın yapmaktadır. L1, L2, L5 frekanslarının özellikleri Çizelge 2.2'de gösterilmektedir. NAVSTAR GPS Standart Konumlandırma Hizmeti (SPS) ve

Hassas Konumlandırma Hizmeti (PPS) olmak üzere iki farklı hizmet sağlamaktadır (Stefan, 2000). PPS sistemi ABD ordusu ve müttefikleri tarafından kullanılabilmek için tasarlanmış özel bir hizmettir. Bu hizmetin kullanılabilmesi için GPS alıcılarının bu sinyalleri çözebilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Sivil kullanıcılar için tasarlanmış olan SPS sistemi ile sivil kullanıcılarına Seçici Kullanılabilirlik (Selective Availability - SA) olarak bilinen özelliği ile PPS hizmetinden daha az bir doğrulukta konum belirlemesi sağlanmaktadır (GPS Standart Positioning Service Performance Standard, 2020). SPS servisi yalnızca L1 frekansı üzerinden Coarse/Acquisition (C/A) kodu ile saniyede 1.023 megachip pseudo random noise (PRN) ile konum hizmeti sağlamaktadır (Tiberius, 2003). PPS servisi ise L1 ve L2 frekansları üzerinden yayınlanan Precise (P) kodu ile hassas konum bilgisi sağlamaktadır (Angrisano, 2010). Bir GPS sinyali navigasyon mesajı, mesafe ve PRN kodunu içermektedir. PRN kodu belli algoritmalarla göre her uyduya ait bir kod olacak şekilde üretilmektedir (Suzer ve Oktal, 2017). PRN kodları uydu sinyalleri ile alıcıya iletildiğinde alıcının verilerin hangi uyduya ait olduğunu çözümleyebilmesine yardımcı olmaktadır (Ghimire ve diğ., 2021). Code Division Multiple Access (CDMA) olarak adlandırılan kod bölmeli çoklu erişim tekniği ile GPS alıcısının farklı PRN'lere sahip ama aynı frekanstaki birden fazla uyduya bağlanarak veri almasını sağlamaktadır (Jin ve diğ., 2014). L1 ve L2 frekansları üzerine bindirilen 2 farklı PRN kodu tanımlanmıştır (GPS, 2021). Bunlar C/A ve P kodlardır. C/A sivil kullanıcılara yönelik tasarlanan bu kod 1.023 MHz hızını sahip iki fazlı modüle edilmiş bir sinyal olarak 1ms ile yayınlanır (Bao ve Tsui, 2000). Buda her bir C/A kodun bir milisaniyede bir tekrar yayınlandığını ifade etmektedir. P kod kriptolanarak P(Y) kodu oluşturulur. Y kodu yalnızca kriptografik anahtarlarla sahip yetkili kullanıcılar tarafından kullanılmaktadır (Pang, 2003). P kodu 10 mbps'lik yayınlama hızına ve 29.31 m bir dalga boyuna sahiptir (Subirina ve diğ., 2013). 2005 yılından sonra GPS'in modernize hale getirilmeye başlanması ile birlikte yeni bir frekans olan L5 frekansı ve L2C ve L1C sinyalleri eklenerek GPS sistemi daha kararlı bir sistem haline getirilmesi istenmektedir. L2C sinyalinden önce L2 frekansından yalnızca P kod ve Navigasyon Mesajı verileri yayımlanırken P kodun yalnızca askeri amaçlı olarak kullanılması ve sivil kullanıcıların bu kodu çözemesinden dolayı sivil kullanıcılarının tek bir frekans üzerinden yayınlanan L1 C/A kodunu kullanmaları gerekmektedir. İyonosferden geçerken zaman gecikmesine uğrayan sinyallerdeki hataların düzeltilmesi ancak ikinci bir sinyal L2 civil

(L2C)'nin yayınlanması ile olmuştur (Ward ve diğ., 2006; Angrisano, 2010). IIR-M uyduları ile GPS sinyalleri arasına katılan L2C sinyali daha yüksek ve etkili frekansta yayınladığından L1 C/A sinyalinden daha güçlüdür (Subirina ve diğ., 2013). Tablo 2.2'de GPS sinyallinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. GPS sinyal özellikleri

Sinyaller /Özellikleri	Frekansları	PRN kodları	Bulundukları uydular	Kod Hızları	Service
L1	1575.42	C/A	IIR, IIR-M, IIF	1.023	Sivil
		P		10.23	Askeri
		M		5.115	Askeri
		L1C-I data		1.023	Sivil
		L1C-Qpilot			
L2	1227.60	P	IIR(P), IIR-M, IIF	10.23	Askeri
		L2C		1.023	Sivil
		M		1.023	Askeri
L5	1176.45	L5-I data	IIR-M,IIF	1.023	Sivil
		L5-Q pilot			

2010 yılında gönderilen Block IIF uydularının gönderilmesi ile birlikte GPS sistemi sivil kullanıcılar için L5 frekansı üzerinden yayın yapmaya başlamıştır. L5 frekansı zayıf sinyaller altında bile güvenilir navigasyon hizmeti sağlarken, L1 frekansı ile birlikte iyonosfer hatasını kaldırarak daha iyi konum bilgisi sağlamaktadır (Lee ve Shim, 2016). L5 frekansı L1 frekansından aynı zaman içerisinde 10 kat daha fazla yayınlama yayınlanmaktadır (Leclerc ve diğ., 2018).

2.1.1.2. GPS Navigasyon Mesajı

GPS navigasyon mesajı bir GPS alıcısına uydular tarafından sinyaller üzerine entegre edilmiş saniyede 50 bit'lik veri akışı ile iletilen bilgileri içermektedir (Van-Dierendonck, 1978). Bu navigasyon mesajı uydu saati, uydu yörüngesi, efemeris parametreleri, saat hataları düzeltmelerini, uydu sağlığı, iyonosferik parametre ve almanak bilgilerini içermektedir (Karaali ve Yıldırım, 1996).

2.1.2. Global navigation satellite system (GLONASS)

GLONASS sistemi 1970 yılların başında GPS sistemine karşı geliştirilmesi düşünülmüş, Sovyet Savunma Bakanlığınca Sovyet ordusu tarafından kullanılmak

üzere geliştirmiş olduğu radyo tabanlı bir uydu navigasyon sistemidir (Eissfeller ve diğ., 2007). Rusya tarafından 1982 yılında ilk uyduları gönderilmeye başlanmış olsa bile aktif 24 uydu ile çalışması 1995 yılında gerçekleşmiştir. 1996 ve 1998 yılları arasında birinci nesil uydularının ömürlerinin kısa olması ve gerekli ekonomik bütçenin ayrılmamasından dolayı bir bozulma dönemi gerçekleşmiş, ancak 2001 yılında Rusya Hükümeti tarafından bu sistemin modernizasyonu planlanmış, 2011 yılında da yeni nesil uydular ile modernizasyonu tamamlanmıştır (Jerez ve Alves, 2019). Bu proje kapsamında uydulardaki atomik saatlerin, sistemin uydu sayısının ve kontrol bölümünün sadece Rusya ile sınırlı kalması gibi GLONASS sisteminin çalışmasını etkileyen faktörler değerlendirilecek ve iyileştirilmesi sağlanacaktır (Koca ve Ceylan, 2018). Bu sistemdeki 24 uydu dünya yüzeyinden 19,100 km yukarıda 3 farklı yörünge düzleminde yer almaktadır. GLONASS yörüngeleri 65° eğime sahipken GPS yörüngeleri 55° eğime sahiptir. Bu 10° eğim farkı çoklu GNSS alıcısının yüksek enlem bölgelerinde GLONASS uydularını GPS uydularından daha uzun süre ve daha yüksek açılarda takip edebilmesini sağlamaktadır (Cherniak ve Zakharenkova, 2017).

GLONASS sistemi uzay, yer kontrol ve kullanıcı olmak üzere üç temel bölümden oluşmaktadır.

Uzay Bölümü 24 uydu olarak tasarlanmıştır. Ancak Ocak, 2020 itibarıyla 28 olan uydunun 23 tanesi aktif görev almakta iken 3 tanesi bakımda, 1 tanesi yedek, 1 tanesi ise henüz uçuş testi aşamasında bulunmaktadır. Her bir GLONASS uydusu yörünge düzlemini ve bu düzlemdeki yerlerini belirten slot numaraları ile tanımlanmaktadır (Revnivkykh ve diğ., 2017). GLONASS uydularından 1-8 uydular I. yörünge, 9-16 uydular II. yörünge ve 17-24 uydular ise III. yörüngede yer almaktadırlar. GLONASS uyduları Block I, BlockII, M ve K uyduları olmak üzere dört farklı jenerasyon ile fırlatılmıştır. Block I uyduları 1982 ile 1985 tarihleri arasında prototip amaçlı fırlatılmıştır. Blok II uyduları 2 ve 4,5 yıla yakın operasyon sürelerine göre farklı gruplara ayrılmışlardır. Blok IIa 2 yıl, Blok IIB 3 yıl ve Blok IIV ise 4.5 yıllık yaşam süresine sahiptirler (ESA GLONASS, 2018). 2003'ten itibaren birinci nesil GLONASS uydularının yerini modernize edilmiş GLONASS M uyduları almıştır. Yenilenmiş itme sistemleri ve daha stabil hale getirilmiş saatler (Sezyum saat) ile birlikte yedi yıla yükseltilmiş operasyon süresine sahiptirler (Viki, GLONASS, 2011). GLONASS K uyduları son jenerasyon uydu takımı olarak 2011 ve 2014 yılları arasında fırlatılma işlemleri gerçekleştirilmiştir. On yıla kadar yaşama

sürelerine sahip uydu takımı L3 ve L5 bandları ile yeni sinyaller sisteme entegre edilmiştir. GLONASS iki farklı servis ile kullanıcılarına hizmet vermektedir. Açık servisi L1, L2 ve L3 bandları üzerinden dünya üzerindeki tüm kullanıcılar için şifrelenmemiş sinyal bilgisi sağlamaktadır. L1 ve L2 bandları üzerinden ayrıca şifrelenmiş sinyal ile yetkili kullanıcılara hizmet sağlamaktadır (Novosti, 2011). Tablo 2.3'te GLONASS uyduları ve bu uyduların yayınlamakta olduğu sinyallerin özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2.3. GLONASS uyduları ve sinyal özellikleri (Wikipedia, GLONASS, 2022)

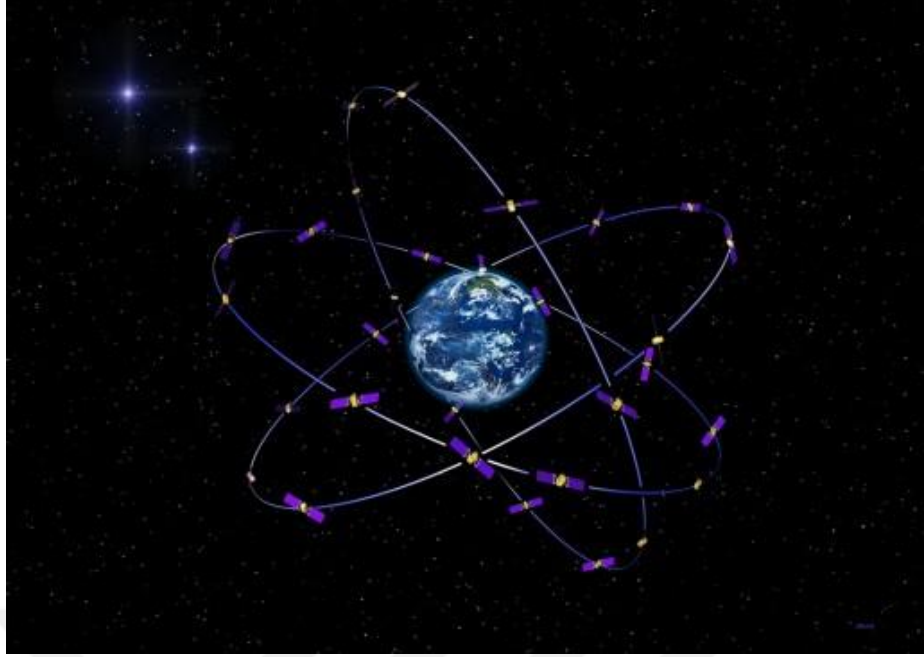
Uydu Serisi	Fırlatma	Geçerli Durum	FDMA Sinyalleri		CDMA Sinyalleri		
			L1	L2	L1	L2	L3
GLONASS	1982-2005	Hizmet dışı	L1OF, L1SF	L2SF			
GLONASS-M	2003-2016	Hizmette	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF			L3OC ‡
GLONASS-K1	2011, 2013	Hizmette	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF			L3OC
GLONASS-K2	2015-2024	Tasarım aşamasında	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF	L1OC, L1SC	L2OC, L2SC	L3OC
GLONASS-KM	2025-	Araştırma aşamasında	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF	L1OC, L1SC	L2OC, L2SC	L3OC, L3SC

2.1.3. GALILEO

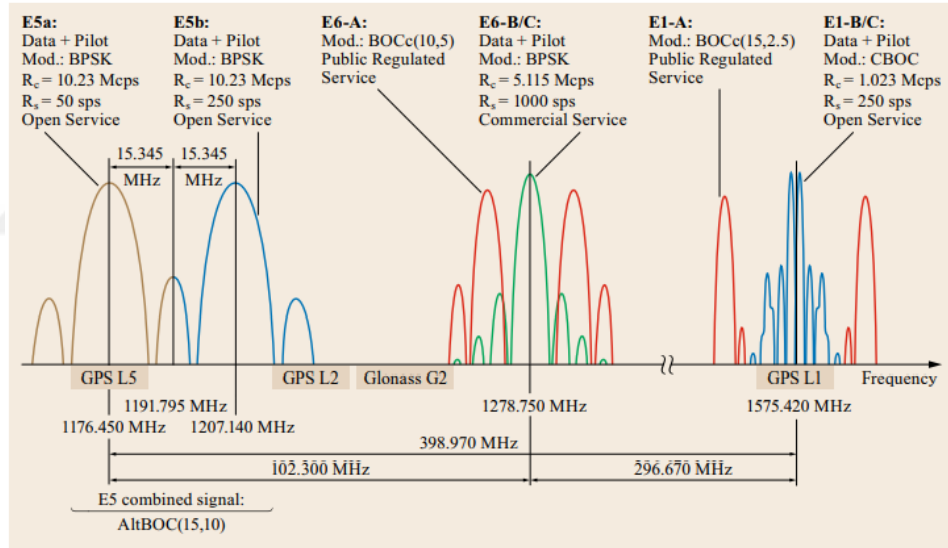
GALILEO Avrupa vatandaşlarına dünya çapında uydu bazlı konumlandırma sağlamak amacıyla sivil bir kurum olarak Avrupa Birliği (AB) ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 1999 yılında çalışmaları başlatılmış ve 2003 yılında da Avrupa Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (EGNSS) tanıtılmıştır (Groves, 2013). Bu sistem ile sadece askeri ve hükümet yetkililerine değil, aynı zamanda sivil kullanıcılara da ücretli olarak doğruluğu yüksek, ücretsiz olarak da doğruluğu daha düşük konum bilgisi sağlamayı amaçlamaktadır (Spacecraft and Satellites, 2022).

Uzay bölümünün 30 uydudan oluşması planlanırken, 21 Mart 2022 tarihi itibarıyla mevcut 26 uydudan 24 tanesi aktif görev alırken diğer 2 tane uydu Soyuz fırlatıcıda oluşan bir hatadan dolayı yanlış yörüngelere yerleştirilmiş ve konumlandırma sistemin bir parçası olarak değil arama kurtarma amaçlı kullanılmaktadır (Hein, 2020). 21 Ocak 2022 tarihi ile 27. ve 28. uydular fırlatılmış ancak testlerinin yapılması aşamasındadırlar. 29. ve 30. uyduların ise 2022 yılı içerisinde fırlatılması planlanmaktadır (EUSPA, 2022). Dünyadan yaklaşık olarak

23222 km yükseklikte ve üç farklı Orta Dünya Yörüngesi (MEO) düzleminde ekvator ile 56 derecelik bir eğimde uydular yerleştirilmiştir (ESA, 2022). Şekil 2.3'te uyduların yörüngeler üzerinde dağılımı gösterilmektedir. ESA 2005 ve 2008 yıllarında 2 farklı Galileo In-Orbit Validation Element (GIOVE-A ve GIOVE-B) adlı uyduları fırlatarak Galileo için tanımlanan frekansların güvence altına alınmasına olanak sağlarken, yerleşik atomik saatlerin ve navigasyon sinyal üretimi vb. mekanizmaların test edilmelerine ortam oluşturmuştur (Falcone ve diğ., 2017). 2011 ve 2012 yıllarında Galileo-IOV (In-Orbit Validation) yörünge içi doğrulama uyduları navigasyon mesajlarının son halinin tasarımını ve uydunun yer istasyonu ile olan iletişim yeteneklerini göstermek amacıyla fırlatılmıştır (Spacecraft&Satellites, 2022). 2014 yılında da FOC uydularının fırlatılmaya başlanması ile sistemdeki uydu sayılarında artış yaşanmış ve planlanan uydu sayısına erişilmek için çalışılmaktadır (Wu ve diğ., 2020). Her uydu dünya üzerindeki bir turunu 14 saatte tamamlayacak ve 3 farklı frekanstan farklı amaçlarda kullanılacak farklı navigasyon mesajları yayını yapmaktadır (Jin ve diğ., 2014). Bu 3 frekanstan birincisi E1 frekansı 1559-1592 MHz, ikinci E5 frekansı 1164-1215 MHz ve üçüncüsü E6 frekansı 1260-1300 MHz'dir. Şekil 2.4'te bu frekanslara ait bant ve özellikler gösterilmiştir. Başlangıçta iki farklı servis ile ortaya çıkan GALILEO son güncellemelerden sonra beş farklı servis aracılığıyla kullanıcılarına hizmet sağlamaktadır. Bunlar Sınırsız Ulaşım (OS: Open Service), Ticari Kullanım (CS: Commercial Service), Kamu Kullanımı (PRS: Public Regulated Service), Güvenlik ve Acil (SoL: Safety of Life) ve Arama-Kurtarma (SAR: Search And Rescue) servislerdir (Hernandez ve diğ., 2014).



Şekil 2.3. Galileo uydu dağılımları (ESA, 2021)



Şekil 2.4. Galileo frekans bantları (Falcon ve diğ, 2017)

Sınırsız Ulaşım (OS-Open Service): Open servis kullanıcılarına ücretsiz olarak E1 B/C, E5a ve E5b sinyalleri üzerinden küresel konumlandırma, hız ve zaman bilgileri sağlamaktadır (ESA, 2021). Signal-In-Space (SIS), navigasyon sinyalleri ile Galileo OS SIS tek ve çift frekanslı zaman, tek ve çift frekanslı konumlandırma ve Eşgüdümlü Evrensel Zaman (Universal Time Coördiante UTC) zaman belirleme gibi servisleri desteklemektedir (OS-Documents, 2021). Servis araç içi navigasyon, cep telefonları akıllı tarım uygulamaları ve insansız araç vb. pazarlarda kullanılmaktadır.

Ticari Kullanım (CS-Commercial Service): E6 frekans bandı üzerinden E6B ve E6C sinyalleri ile kullanıcılarına yüksek doğruluk ve hassasiyete sahip değerli

veri paylaşımı yapacak şekilde üretilmiştir (Hernandez ve diğ., 2014). Tüm CS verileri servis sağlayıcıları tarafından kriptolanarak üretilir ve kullanıcıya iletilir.

Kamu Kullanımı (PRS-Public Regulated Service): Yüksek doğruluk ve süreklilik gerektiren hassas uygulamalar için geliştirilmiş şifreli bir konumlama servisi olan PRS'ye ulaşım Avrupa Birliği (AB) üye devletleri içinden ulusal yetkililer tarafından yönetilir ve denetlenir (EUSPA, 2021). PRS servisi robust sinyallere sahip, istem dışı sinyal yanıltıcılarına ve müdahalelere karşı dayanıklı bir yapıda olacaktır. PRS sinyalleri şifreli ve yetkili kullanıcılara özel şekilde sınırlı kullanım alanlarına sahip olacaktır (Habrich ve Söhne, 2013).

GALILEO yer kontrol bölümü uyduların sağlıklarının izlenmesi ve uydu yayınlarının doğru şekilde çalışması amacıyla uyduları yöneten bir yapıya sahiptir. Yer kontrol bölümü tüm konumlandırma sistemlerinin etkin şekilde çalışması ile ilgilenen Ground Missions Segment(Yer Görev Segmenti (GMS)) ve uyduların yönetimi, uydu operasyonlarının planlanması ve doğru şekilde gerçekleştirmesinden sorumlu Ground Control Segment(Yer Kontrol Segmentinden (GCS)) oluşmaktadır (Toribio ve diğ., 2006).

2.1.4. BeiDou

BeiDou Navigasyon Uydu Sistemi (BDS) Çin'in ABD ve Rusya gibi ülkelerden sonra Dünya üzerinde söz sahibi olarak ulusal güvenliği ile ekonomik ve sosyal kalkınması amacıyla bağımsız olarak inşa edilmiş ve işletilmektedir. Ulusal öneme sahip zamansal-mekânsal bir altyapı olarak BDS, küresel kullanıcılara her zaman, her hava koşulunda ve yüksek doğrulukta konumlandırma ve zamanlama hizmeti sağlamaktadır (China's BeiDou Navigation Satellite System, 2016). 2000 yılında BDS-1 ile bölgesel olarak Çin'e konumlama ve zamanlama bilgisi sunan BeiDou, 2012 yılı itibariyle Asya-Pasifik bölgesine hizmet vermeye başlamış, 2020'de tamamlanan BDS-3 ile küresel konumlandırma, navigasyon ve zamanlama hizmetleri sunmaktadır (Li ve diğ., 2020).

Üç aşamada geliştirilmiş olan sistemde ilk olarak bölgesel olarak çalışmakta olan sistem daha sonrasında yine bölgesel ancak daha büyük alan olan Çin ve çevre ülkelerinde çalışmaya başlamış geliştirilmeye devam edilen sistemde en son olarak global şeklini alması planlanmaktadır. 30 tane yer sabit olmayan yörüngede ve 5 tane yer sabit yörüngeli uydu sisteminden oluşan BeiDou sistemi B1, B2 ve B3 frekanslarında yayın yapmaktadır.

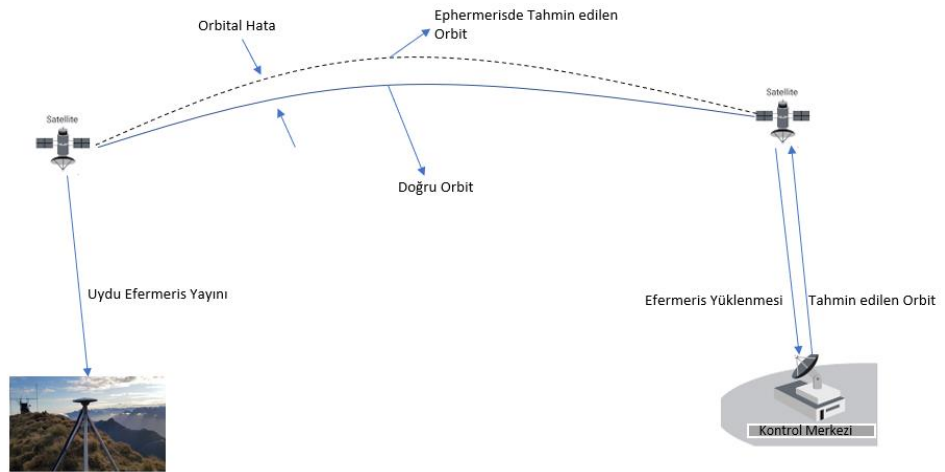
3. GNSS ÖLÇÜ VE HESAPLARINI ETKİLEYEN HATA KAYNAKLARI

Günümüzde kullanılan konum belirleme sistemleri birçok yönden gelişmesine rağmen sadece bu sistemlere bağlı olmayan, dış faktörlerden kaynaklı hatalar hâlâ ortaya çıkmaktadır. Bu hatalar rastlantısal ve sistematik olarak etki etmekte ve bu da yapılan uygulamalarda alınan sonuçların doğruluklarının daha düşük olmasına neden olmaktadır. Kod ve faz ölçmeleri gürültü ve hatalardan etkilenecek sapmalara sebep olmaktadır. Başlıca hata kaynakları:

- ✚ Uydu yörünge hataları
- ✚ Uydu saat hatası
- ✚ Sinyal yansıma (multipath) hatası
- ✚ Troposferik etki
- ✚ İyonosferik etki

3.1.1. Uydu yörünge hataları

Uydu yörünge hatası GNSS uydusunun beklenen ve gerçek yörünge konumu arasındaki farkı tanımlar. Yörünge hatası GNSS alıcılarının yalancı uzaklık hesaplamalarında uydu yörünge bilgilerini kullanır. Yörünge verisindeki hata hesaplanan konum bilgisinin doğruluğunun düşmesine neden olmaktadır (UAV Navigation, 2021). Şekil 3.1’de yanlış tahminlenen bir efemeris yörünge bilgisinin nasıl bir hataya yol açacağı gözlenmektedir.



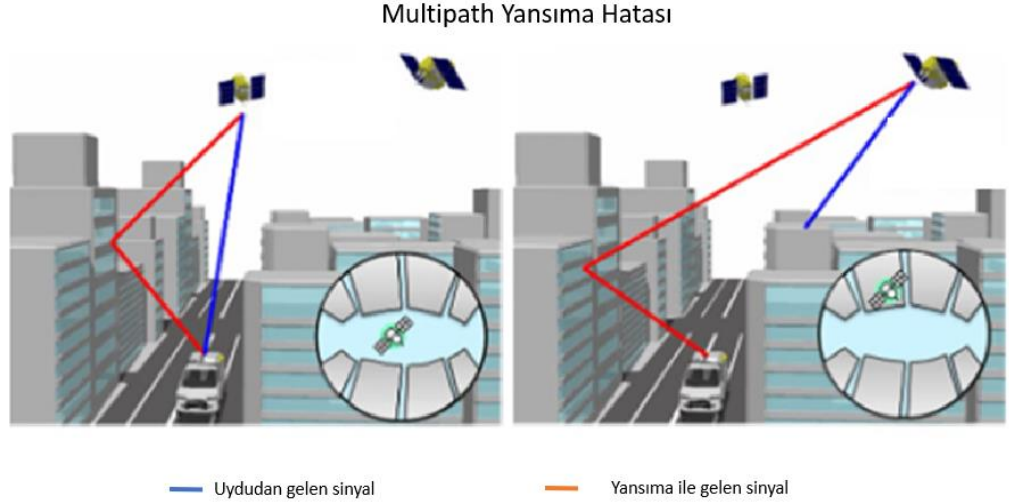
Şekil 3.1. GNSS yörünge hatası

3.1.2. Uydu saat hatası

Tüm uydular, zamanlama sistemini kontrol eden, navigasyon sisteminin de temel parçalardan birini oluşturan yüksek hassasiyetli zaman ve frekansa sahip atomik saatler içermektedir (Bidikar ve diğ., 2014; Li ve diğ., 2018). GNSS yayın sinyali zamanı ile uydu yayın sinyali arasında GNSS saatlerinde oluşan sapmalardan dolayı farklar oluşmaktadır (Mansu ve Ferreira, 2019). Günde 9 ila 18 ns arasında sapmalar meydana gelebilmektedir (Sathyamoorthy ve diğ., 2016). Uydu saat hatasının yanında GNSS alıcısı da saat hatası barındırmaktadır. Bu da uydu alıcı arasında zaman senkronizasyonunun sağlanamamasına neden olmaktadır (Kahveci ve Yıldız, 2012).

3.1.3. Sinyal yansıma (multipath) hatası

GNSS sinyalleri özellikle yoğun şehir alanlarındaki yüksek binalar, ağaçlar ve gerilim hatları gibi yapılardan etkilenmektedirler (Xie ve Petovello, 2015). Multipath hatası GNSS ölçümlerinin yapıldığı çevreden kaynaklanan, alıcının etrafındaki yansıtıcı yüzeylerden dolayı GNSS sinyalinin direkt alıcı antenine ulaşmamasından ortaya çıkmaktadır (Lau ve Cross, 2007). Multipath hatası GNSS sinyalinin alıcıya ulaşmadan önce farklı yüzeylere çarpmasıyla oluşan ikincil bir sinyalin GNSS alıcısına ulaşmasını ifade etmektedir (Pirsiavash ve diğ., 2018). Hem taşıyıcı faz hem de yalancı uzaklık ölçmeleri etkileyen multipath hatası, yalancı uzaklık ölçmelerinin direkt olarak geometrik mesafeyi kullanmasından dolayı taşıyıcı faz ölçmelerine göre daha büyük oranda etkilemektedir (Bidikar ve diğ., 2020). Multipath hatası bir sinyalin birden çok kez alıcıya ulaşmasından dolayı gerçek sinyal değeri ile hesaplanan sinyal değeri arasındaki fark konum doğruluğunun düşmesine neden olmaktadır (Niko ve diğ., 2012). Şekil 3.2’de multipath hatasının örnek bir görseli verilmiştir.



Şekil 3.2. Multipath hatası (Suzuki ve diğ., 2020)

3.1.4. İyonosferik etki

İyonosfer tabakasındaki serbest elektronlar GNSS sisteminden iletilen radyo dalgalarından pseudorange ölçümlerinde ve taşıyıcı faz ölçümlerinde sapmalar meydana getirmektedir (Perez, 2016). Sonuç olarak ölçülen kod uzunluk ölçüsü olması gerekenden daha uzun olmaktadır. İyonosferde oluşan kırılmanın elimine edilmesi için birden çok frekanslı GNSS alıcıları kullanılır (Rovira ve diğ., 2020). Tek frekanslı GNSS alıcılarında ise iyonosfer modellerinden alınan değerler uydu tarafından alıcıya navigasyon mesajı olarak iletilmektedir (Wu ve diğ., 2013).

3.1.5. Troposferik etki

İyonosferden geçen sinyaller sırasıyla mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarından geçerler (Kahveci ve Yıldız, 2012). Troposfer tabakası atmosfer tabakasının en alt seviyesidir. Troposfer tabakası yer yüzeyinden itibaren atmosferin 50 km'ye kadar olan tabakasıdır. Radyo sinyalleri atmosferden geçerken gazlar ve su taneciklerinden dolayı gecikmeye veya sapmaya uğrayabilirler (Yang ve diğ., 2021). Troposfer tabakasında kuru gazların neden olduğu kuru ve hava koşullarından kaynaklı su buharı oluşmaktadır. Bu su buharı ve kuru gazlar GNSS sinyalinin troposfer tabakasından geçerken konum bilgisinde 2.5 m'den 20 m'ye kadar uydu ile alıcı arasındaki açığa göre değişen sapmalara sebep olan bir gecikme yaratmaktadır (Wei ve diğ., 2012). Bu etkinin giderilmesi için Troposferin modellenmesi ile troposferde oluşan gecikmenin tahmin edilerek elimine edilmesini sağlamaktadır (Gallon ve diğ., 2021). Basınç, sıcaklık ve su buharı gibi meteorolojik parametreler, iklimsel modeller ve tarihsel atmosfer verileri bu modellemenin yapılmasına katkı

sağlamaktadır (Sun ve diğ., 2017).

3.1.6. GNSS Doğruluk Ölçütleri

3.1.6.1. User equivalent range error (UERE)

Kullanıcı eşdeğer menzil hatası (UERE), alıcı ile her bir uydu arasında gerçekleştirilen yalancı uzaklık ölçümündeki hataları ifade etmektedir (Sairo ve diğ., 2003). Uydudan yayınlanan radyo sinyalleri alıcıya ulaşana kadar birçok hataya maruz kalmaktadır, sinyal kalitesinin düşmesine neden olan bu hataların her biri yalancı uzaklık ölçmelerinde mesafe doğruluğunun düşmesine neden olmaktadır (Sadman ve Hossam, 2019). Her uydu ve alıcı çifti için birbirinden bağımsız olan UERE değeri, sinyale etki eden her bir hatanın karelerinin toplamının karekökü olarak ifade edilmektedir (Kahveci,y.y).

3.1.6.2. Dilution of precision (DOP)

GNSS alıcısının daha iyi bir konumlama bilgisi üretebilmesi için yeterli sayıda uydu görmesi, uydu geometrisinin iyi olması ve gelen sinyallerin diğer hata kaynaklarından da arındırılmış olması gereklidir (Sairo ve diğ., 2003). GNSS uydularının geometrik dağılım kalitesinin konumlandırma hatasındaki etkisi duyarlık kaybı (DOP) ile açıklanmaktadır (Meng ve diğ., 2020). DOP değerlerinin düşük olması uydu geometrisinin daha iyi ve sinyal doğruluğunun yüksek olduğunu ifade etmektedir (Santerre ve diğ., 2017). DOP değerlerinin hesaplanması GNSS kullanıcılarının bu değerlere göre hangi uyduların konum doğruluğuna etkisinin kötü olduğunu belirlemesini ve bu uydudan gelen sinyalleri elimine ettiğinde konum doğruluğunun arttığını gözlemlemesine fayda sağlamaktadır (Huihui ve diğ., 2008). Geometric Dilution of Precision (GDOP) uydu geometrisinin konumlama doğruluğu üzerindeki etkiyi açıklayan değerdir (Yongcai ve diğ., 2016). Position Dilution of Precision (PDOP) uydu geometrisi ile konumlandırma sisteminin güvenilirliğini ölçmektedir (Koulouri ve diğ., 2020). Horizontal Dilution of Precision (HDOP) ve Vertical Dilution of Precision (VDOP) yatayda ve dikeyde etki eden DOP değerlerini ifade etmektedirler. Uydu geometrisinin zaman bilgisine olan etkisine Time Dilution of Precision (TDOP) denmektedir.

DOP Hesaplamaları:

Burada X, Y, Z GNSS alıcısının ECEF koordinatlarına göre konumu, x_i, y_i, z_i

her bir i uydusunun uzaydaki konumu olmak üzere;

$$p^i = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} + C_b \quad (3.1.)$$

Burada p^i her bir uyduya yapılan pseudorange ölçümelerini, C_b düzeltilmiş uydu saat sapmasını ifade etmektedir.

Yaklaşık konum değerleri kullanılarak yazılacak olan denklem ise:

$$\hat{p}^i = \sqrt{(x_i - \hat{X})^2 + (y_i - \hat{Y})^2 + (z_i - \hat{Z})^2} + \hat{C}_b \quad (3.2.)$$

olarak yazılmaktadır. Buradan da aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$X = \hat{X} + \Delta X$$

$$Y = \hat{Y} + \Delta Y$$

$$Z = \hat{Z} + \Delta Z$$

$$C_b = \hat{C}_b + \Delta C_b$$

(3.3.)

Denklem 3.3'te yaklaşık konum değerlerinin hata miktarı ile toplamı noktanın koordinatlarına eşit olmaktadır.

$$f(X, Y, Z, C_b) = f(\hat{X} + \Delta X, \hat{Y} + \Delta Y, \hat{Z} + \Delta Z, \hat{C}_b + \Delta C_b)$$

(3.4.)

Bu işlem için uzaklık fonksiyonu 3.1 Taylor Serisine açılırsa ve 1. Dereceden sonraki terimler ihmal edilirse:

$$\begin{aligned} f(\hat{X} + \Delta X, \hat{Y} + \Delta Y, \hat{Z} + \Delta Z, \hat{C}_b + \Delta C_b) \\ = f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{C}_b) + \frac{\delta f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{C}_b)}{\delta \hat{X}} \Delta X + \frac{\delta f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{C}_b)}{\delta \hat{Y}} \Delta Y \\ + \frac{\delta f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{C}_b)}{\delta \hat{Z}} \Delta Z + \frac{\delta f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{C}_b)}{\delta \hat{C}_b} \Delta C_b \end{aligned} \quad (3.5.)$$

eşitlik 3.5 elde edilir ve bu eşitlikteki her bir terimin kısmi türevleri aşağıdaki gibi alınabilir:

$$\frac{\delta f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \widehat{C_b})}{\delta \hat{X}} = -\frac{x_i - \hat{X}}{\hat{p}^i} = -a_{xi}$$

$$\frac{\delta f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \widehat{C_b})}{\delta \hat{Y}} = -\frac{y_i - \hat{Y}}{\hat{p}^i} = -a_{yi}$$

$$\frac{\delta f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \widehat{C_b})}{\delta \hat{Z}} = -\frac{z_i - \hat{Z}}{\hat{p}^i} = -a_{zi}$$

$$\frac{\delta f(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \widehat{C_b})}{\delta \widehat{C_b}} = c$$

(3.6.)

Buradan da kısmi türevler a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} vektörlerine eşit olarak kabul edilir. a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} değerleri i. uyduya olan tahmini kullanıcı konumunu oluşturan birim vektörün yön kosinülerini belirtir (Tahsin ve diğ., 2015). Her bir uyduya yapılan pseudorange ölçmelerinden yaklaşık konum değerlerinin çıkarılması ile Δp^i değerine ulaşılmaktadır:

$$p^i - \hat{p}^i = -\frac{x_i - \hat{X}}{\hat{p}^i} \Delta X - \frac{y_i - \hat{Y}}{\hat{p}^i} \Delta Y - \frac{z_i - \hat{Z}}{\hat{p}^i} \Delta Z + c \Delta C_b$$

$$\Delta p^i = \hat{p}^i - p^i = \frac{x_i - \hat{X}}{\hat{p}^i} \Delta X + \frac{y_i - \hat{Y}}{\hat{p}^i} \Delta Y + \frac{z_i - \hat{Z}}{\hat{p}^i} \Delta Z - c \Delta C_b$$

$$\Delta p^i = a_{xi} \Delta X + a_{yi} \Delta Y + a_{zi} \Delta Z - c \Delta C_b$$

(3.7.)

Denklem 3.7 elde edilen Δp^i değeri ile 4 uyduya yapılan gözlemlerin denklemleri yazılarak bu denklemlerden bilinmeyenlerin çözümleri gerçekleştirilmektedir (Tahsin ve diğ., 2015):

$$\Delta p^1 = a_{x1} \Delta X + a_{y1} \Delta Y + a_{z1} \Delta Z - c \Delta C_b$$

$$\Delta p^2 = a_{x2} \Delta X + a_{y2} \Delta Y + a_{z2} \Delta Z - c \Delta C_b$$

$$\Delta p^3 = a_{x3} \Delta X + a_{y3} \Delta Y + a_{z3} \Delta Z - c \Delta C_b$$

$$\Delta p^4 = a_{x4}\Delta X + a_{y4}\Delta Y + a_{z4}\Delta Z - c\Delta C_b \quad (3.8.)$$

Denklem 3.8 eşitliklerin matris hali:

$$\Delta p = \begin{bmatrix} \Delta p^1 \\ \Delta p^2 \\ \Delta p^3 \\ \Delta p^4 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} & 1 \end{bmatrix} \quad \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \Delta C_b \end{bmatrix}$$

$$\Delta p = H\Delta x$$

$$\Delta x = H^{-1}\Delta p$$

(3.9.)

Pseudorange denklemleri alıcının ürettiği koordinatların genel doğruluğunu belirler (Tahsin ve diğ., 2015)

$$\delta p = H\delta x + e$$

(3.10.)

Denklem 3.10'a bakıldığında N görülen uydu sayısını belirtirken H her eksenin alıcı ve uydu arasındaki yön vektörünü temsil etmekte ve Nx4 Görüş Hattı (Line-Of-Sight LOS) vektörünü temsil etmektedir. δp pseudorange ölçümlerini ifade eden Nx1 boyutunda bir matristir. δx alıcı hataların ve saat düzeltmesini içeren 4x1 boyutunda hata matrisi, e pseudorange ölçümleri gürültüsünün Gauss dağılım vektörüdür (Tahsin ve diğ., 2015). Burada pseudorange ölçümlerinin değeri H değerine bağlı olarak gürültü ile oluşan değerleri göstermektedir.

Burada N ifadesi gözlem yapılan dört uydu eşit olarak alındığında

$$\delta x = H^{-1}\delta p$$

(3.11.)

elde edilir. Alıcı hataları ve saat düzeltmesi denklem 3.11'deki gibi yazılmaktayken N değerinin dört uydudan büyük olduğunda ise

$$\delta x = (H^T H)^{-1} H^T \delta p$$

(3.12.)

şeklinde yazılmaktadır.

Buradan da δx 'in kovaryansı:

$$\begin{aligned}
 cov(\delta x) &= E(\delta x \delta x^T) \\
 &= E[(H^T H)^{-1} \delta p \delta p^T H (H^T H)^{-T}] \\
 &= (H^T H)^{-1} H^T dp dp^T H (H^T H)^{-T} \\
 &= (H^T H)^{-1} H^T cov(dp) H (H^T H)^{-T}
 \end{aligned} \tag{3.13.}$$

şekilde hesaplanır ve burada $cov(\delta p)$ pseudorange hatasını temsil eder.

Her bir uydunun aynı varyansa σ_n^2 sahip olduğu dikkate alınarak:

$$\begin{aligned}
 cov(\delta p) &= \sigma_n^2 \\
 E(\delta x \delta x^T) &= \sigma_n^2 (H^T H)^{-1} H^T H (H^T H)^{-T} \\
 &= \sigma_n^2 (H^T H)^{-T} \\
 cov(\delta x) &= \sigma_n^2 (H^T H)^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.14.}$$

eşitlikleri elde edilir. Alıcı hataları ve saat düzeltmesi hata miktarı $cov(\delta x)$ denklem

3.14'teki gibi ifade edilmektedir. Burada:

$G = (H^T H)^{-1}$ ve $cov(\delta x) = \sigma_n^2 G$ olmak üzere;

$$\begin{aligned}
 &\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & cov(x, y) & cov(x, z) & cov(x, b) \\ cov(y, x) & \sigma_y^2 & cov(y, z) & cov(y, b) \\ cov(z, x) & cov(z, y) & \sigma_z^2 & cov(z, b) \\ cov(b, x) & cov(b, y) & cov(b, z) & \sigma_b^2 \end{bmatrix} = \\
 &= \sigma_n^2 \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} & G_{xb} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} & G_{yb} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} & G_{zb} \\ G_{bx} & G_{by} & G_{bz} & G_{bb} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2 = \sigma_n^2 (G_{xx} + G_{yy} + G_{zz} + G_{bb})$$

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2} = \sigma_n \cdot GDOP$$

(3.15.)

olarak elde edilir. Her bir uydunun varyansının $GDOP$ değeri ile çarpılması, x, y, z yön vektörlerinin varyansı ve b saat düzeltmesinin varyansının karelerinin toplamının kareköküne eşit olmaktadır.

Buradan da

$$GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2}}{\sigma_n} = \sqrt{(G_{xx} + G_{yy} + G_{zz} + G_{bb})}$$

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma_n} = \sqrt{(G_{xx} + G_{yy} + G_{zz})}$$

$$HDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}{\sigma_n} = \sqrt{(G_{xx} + G_{yy})}$$

$$VDOP = \frac{\sqrt{\sigma_z^2}}{\sigma_n} = \sqrt{G_{zz}}$$

$$TDOP = \frac{\sigma_b}{\sigma_n} = \sqrt{G_{bb}}$$

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2}$$

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2}$$

$$GNSS \text{ Konum Doğruluğu} = UERE \times GDOP$$

(3.16.)

eşitliklerine ulaşılır. Denklem 3.16'da ise DOP değerleri ifade edilmektedir. GNSS'de konum doğruluğu ise GDOP değerinin UERE değeri ile çarpılması ile ifade edilmektedir.

$$GNSS \text{ Konum Doğruluğu} = UERE \times GDOP$$

(3.17.)

4. GNSS ÖLÇMELERİ

4.1. GNSS Gözlemleri

GNSS’de konum belirlemek amacıyla 4 farklı gözlem yöntemi kullanılmaktadır (Zhou ve diğ., 2020). Bunlar:

- ✚ Pseudo-range
- ✚ Carrier Phase (Taşıyıcı faz)
- ✚ Doppler
- ✚ Sinyal genliği

4.1.1. Kod pseudorange gözlemleri

GNSS dünya üzerindeki kullanıcının konumunu belirlemek için üçgenleme metoduyla en az 4 farklı uydu ile alıcı arasındaki pseudorange olarak adlandırılan mesafe hesaplanarak belirlemektedir (Yang ve diğ., 2012). Pseudorange uydu ile alıcı arasındaki ham mesafeyi ifade etmektedir. Uydudan iletilen sinyal uydu atomik saatleri tarafından oluşturulan zaman bilgisini de içermektedir. Aynı zamanda iletilen sinyali alan alıcı tarafından sinyalin alıcıya ulaştığı zaman bilgisi alıcı saatleri tarafından da oluşturulmaktadır (Blewitt, 1997). Bu iki zaman farkı ve sinyal hızının kullanılması basit fizik problemi olan hız ve zamanın çarpılması mesafeye eşittir denklemine indirgenmiş olmaktadır.

$$pseudorange = (zaman\ farkı) \times (ışık\ hızı)$$

(4.1.)

Ancak fiziksel olarak yapılan tüm ölçmelerde oluşan hatalar pseudorange için de geçerli olmaktadır. Birçok fiziksel olgu pseudorange ölçmelerini etkilemektedir. Bunlarda göz önüne alınarak bakıldığında pseudorange ölçmeleri için denklem 4.2’deki eşitlik yazılmaktadır.

GNSS kod gözlemleri:

$$P = \rho + cdt_r - cdt + I + T + d_r + d$$

(4.2.)

eşitliğiyle ifade edilmektedir. Burada P ölçülen pseudorange, ρ uydu faz merkezi ve alıcı anteni arasındaki geometrik mesafe, cdt_r ve cdt uydu ve alıcı saat hataları, I

iyonosfer gecikmesi, T troposfer gecikmesi, d_r ve d ise uydu ve alıcıdaki stabil kod gecikmelerini ifade etmektedir. Bu etkilerden bazıları tahmin edilebilir modellere dayanarak düzeltilebilirken, bazı değerler farklı kurum ve kaynaklar tarafından üretilmekte ve bazı değerler ise uygulamanın ihtiyaç duyduğu doğruluk seviyesine göre elimine edilebilmektedir (Hauschild, 2017).

4.1.2. Taşıyıcı faz ölçmeleri (Carrier-phase gözlemleri)

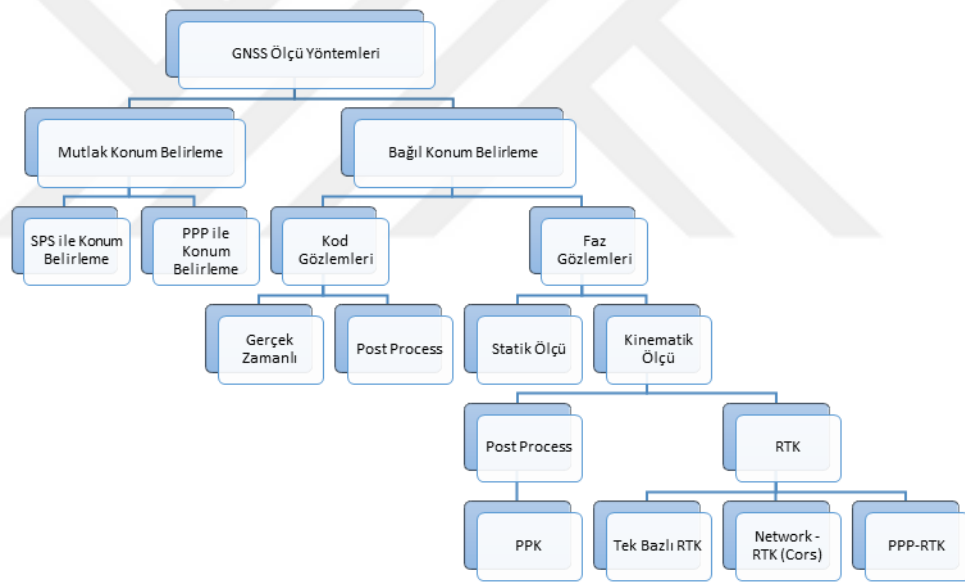
Bir GNSS alıcısı uydulardan gelen taşıyıcı faz sinyalini kullanarak pseudorange ölçmelerinden daha hassas ve daha yüksek doğrulukta konum belirleyebilmektedir (Giorgi ve diğ., 2012). Taşıyıcı faz ölçmeleri pseudorange ölçmelerine göre daha yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda daha fazla tercih edilmektedir (Forssell ve diğ., 1997). Alıcı antenin içinde taşıyıcı sinyalin bir kopyasını oluşturarak, uydudan gelen sinyal ile eşleştirir ve her iki sinyaldeki faz kaymalarını ölçer. Ancak ölçülen kısım taşıyıcı faz kısımlarının kesirli kısmını ifade etmekte olup, başlangıçta uydu ve alıcı arasındaki tam sayı döngü kısmı bilinmemektedir (Hauschild, 2017). Denklem 4.3’de taşıyıcı faz gözlemlerinin matematiksel modeli oluşturulmuştur (Hoffman-Wellenhof ve diğ., 2008; Hakansson ve diğ., 2017):

$$\phi_{f,r}^{sys,s} = \rho_r^s + c(\delta_r - \delta^s + b_{f,r}^{sys} - b_f^s + \tau^{sys}) + T_r^s - I_{f,r}^s + m_{f,r}^s + \lambda_f N_{f,r}^s + \varepsilon_0 \quad (4.3.)$$

Denklem 4.3’te sys GNSS uydu sistemi tarafından iletilen ifadeleri, f frekansı, s uyduyu ve r ’de alıcıyı ifade etmektedir. ρ_r^s ifadesi alıcı ile uydu arasındaki geometrik mesafeyi, δ_r alıcı saat hatası, δ^s uydu saat hatası, $b_{f,r}^{sys}$ f frekansı için alıcı faz sapması, b_f^s f frekansında uydu faz sapması, τ^{sys} GNSS zamanın referans sisteme göre zaman ofseti, T_r^s troposfer gecikmesi, $I_{f,r}^s$ iyonosfer gecikmesi, $m_{f,r}^s$ çoklu faz yansıması, λ_f f frekansının dalga boyu uzunluğu, $N_{f,r}^s$ faz belirsizliği, ε_0 faz gürültüsünü ifade etmektedir (Hauschild, 2017).

4.2. GNSS ölçme yöntemleri

GNSS ile konum belirlemede 2 temel yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri bir nesnenin dünya üzerindeki konumunun nerede olduğunun mutlak konum belirleme yöntemleri ile tek GNSS alıcısı ile belirlenmesi, diğeri ise bir nesnenin konumunun diğeri bir nesnenin konumuna göre bağıl olarak belirlenmesidir (Schaefer ve Woodyer, 2015). Bu iki yöntem farklı GNSS ölçme uygulamalarında kullanılmaktadır. Mutlak yöntemler bağıl yöntemlere göre daha düşük doğrulukta konum bilgisi üretmesine rağmen başka bir GNSS alıcısına ihtiyaç duymadan konum bilgisi üretmesi vasıtasıyla dünya üzerinde her noktada anlık ve sürekli konuma ihtiyaç duyan sürücüsüz araçlarda kullanılmaktadır. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi hem mutlak yöntemlerde hem de bağıl yöntemlerde farklı ölçme metodları ile uygulamaların daha hızlı ve maliyet performans oranının yüksek şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır.

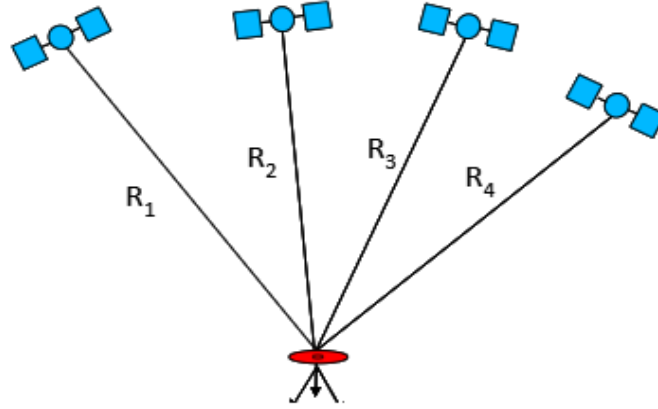


Şekil 4.1. GNSS ölçme yöntemleri (Kahveci ve Yıldız, 2012).

4.2.1. Mutlak konum belirleme yöntemi

Bir GNSS alıcısının en az dört farklı GNSS uydusu ile pseudorange ölçmelerini gerçekleştirmesi ve doğru efemeris verileri ile GNSS alıcısının konumunun belirlenmesidir (Zhao ve diğ., 2021). Uydudan çıkan sinyalin alıcıya ulaştığı zamandaki süre farkının ışık hızı ile çarpılması alıcı ile uydu arasındaki mesafenin hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu mesafe bilinen uydu koordinatları ile

değerlendirildiğinde alıcının üzerinde bulunduğu noktanın koordinat bilgileri bulunmaktadır(Kahveci ve Yıldız, 2012). Şekil 4.2’de mutlak konum bilgisinin tek bir GNSS alıcısı ile yapılması üzerine bir görsel verilmektedir.

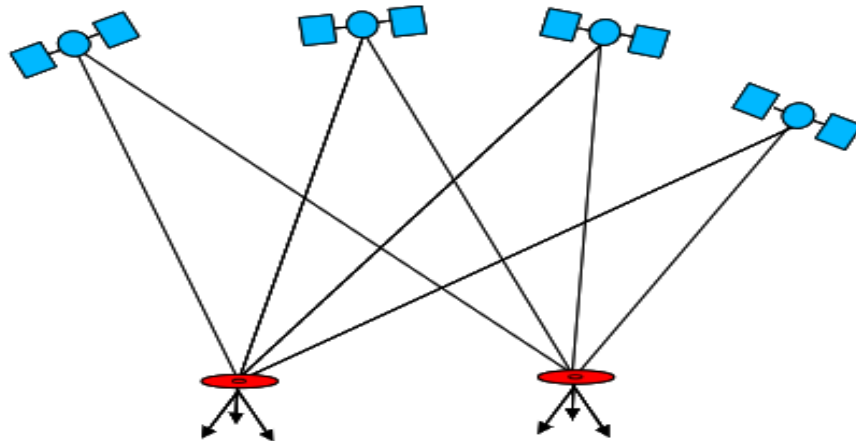


Şekil 4.2. Mutlak konum belirleme

Bu şekil üzerindeki R değeri her bir uydu-alıcı arasındaki mesafe değerlerini ifade etmektedir.

4.2.2. Bağıl konum belirleme yöntemi

Bir noktanın, referans nokta diye adlandırılan kesin konumu bilinen noktadan diferansiyel düzeltmeler alarak kendi konumunu ürettiği yöntemdir (Shao ve Sui, 2016). İki GNSS alıcısı ile uydulara eş zamanlı olarak kod ve/veya faz ölçüleri yaparak cm veya daha düşük seviyelerde konum bilgisi üretebilmektedirler. Şekil 4.3’de bağıl yöntem ile konum belirleme gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Bağıl konum belirleme.

Bağıl konum belirleme yöntemi denklemi 4.4 eşitliklerle verilmektedir;

$$\Delta P = P_R - P_{GR}$$

$$P_i = P_{Gi} + \Delta P$$

(4.4.)

Burada, P_R referans noktasının bilinen konumunu (X_R, Y_R, Z_R), P_{GR} referans noktasının GNSS ölçümlerinden belirlenen konumunu (X_{GR}, Y_{GR}, Z_{GR}), ΔP GNSS sistemindeki diferansiyel farklar, P_i konum ölçümü yapılan i noktasının konumunu (X_i, Y_i, Z_i), P_{Gi} ise i noktasının GNSS ölçümlerinden elde edilmiş konumu (X_{Gi}, Y_{Gi}, Z_{Gi}) göstermektedir. Mutlak ve bağıl konum belirleme avantaj ve dezavantajları şu şekildedir:

Mutlak Konum Belirleme (Yun ve Jiming, 2008):

- ✚ Hızlı
- ✚ Düşük Maliyet
- ✚ Anlık Konum Bilgisi
- ✚ Düşük Doğruluk

Bağıl Konum Belirleme (Morgan ve Johnston, 1995):

- ✚ Presizyonu Yüksek
- ✚ Mesafeye Bağımlı
- ✚ Ekstra Maliyete sahip
- ✚ Daha az hataya sahip

Bu tez çalışmasında incelenen PPP ve PPK GNSS yöntemleri ile çoklu uydu sistemi kavramları detaylı olarak aşağıda açıklanmaktadır.

4.2.3. Hassas Nokta Konumlandırma (PPP)

Günümüzde bağıl konum belirleme yöntemlerine kıyasla mutlak konum belirleme yöntemlerinin kullanım oranında artış yaşanmaktadır. Geline nokta insanların hayatın her alanında hem 2B hem de 3B konum bilgisine olan ihtiyacı artmıştır. Herhangi bir başka faktöre bağlı kalmadan anlık olarak konum belirlemek günümüz teknolojilerinin birçoğunun gereksinimi olmuştur. Başka bir referans noktaya ihtiyaç duymadan tek bir GNSS alıcısı ile konum belirleyebilen Hassas

Nokta Konumlandırma (Precise Point Positioning (PPP)) yöntemi 1997 yılında ortaya çıkarılmış konum belirleme yöntemidir (Zumberge ve diğ., 1997). Uydu yörünge bilgileri ve saat hataları düzeltme bilgileri ile tek bir GNSS alıcısı kullanarak yapılan kod ve faz ölçmelerinden global bir koordinat sisteminde 3B konum bilgisi üretilebilmektedir (Martin ve diğ., 2012). International GNSS Service (IGS), German Research Center for Geoscience (GFZ), Jet Propulsion Laboratory (JPL), Center for Orbit Determination in Europe (CODE) gibi çok sayıda kurum ve kuruluş dünya üzerindeki referans istasyon verilerinden elde etmiş olduğu hassas uydu ve yörünge bilgilerini internet ağı aracılığıyla kullanıcılara sunması, PPP yönteminin de daha yüksek doğruluklu konum belirlemeyi mümkün kılmıştır (İlçi, 2020). Diğer konum belirleme yöntemlerindeki dezavantajlardan olan başka bir referans istasyon ihtiyacı duyulması, mesafeye bağlı olarak çalışılması gibi dezavantajları içermeyen PPP yöntemi ile sabit bir noktaya bağlı kalınmadan konum belirlenebilmektedir (Rizos ve diğ., 2012).

Küresel navigasyon sistemleri içerisindeki en eski ve en sağlam sistem olan GPS sisteminde kullanılmaya başlanan PPP yöntemi diğer sistemlerin de gelişimini tamamlamasıyla multi GNSS olarak adlandırılan birden çok GNSS sisteminin ortak kullanımı ile beraber gelen; artan uydu sayısı, yeni ve daha güçlü uydu sinyalleri ve daha iyi bir uydu geometrisi, PPP yönteminde nokta konum doğruluğunu artırdığı gözlenmektedir (Bahadır ve Nohutçu, 2020). Çoklu sinyal kullanımı ile taşıyıcı faz belirsizlikleri daha kısa sürelerde giderilebilmektedir (Li ve diğ., 2020).

Statik ve kinematik olarak konum belirleyen PPP yönteminde, statik yöntem ile cm-mm mertebesinde, kinematik yöntemde ise dm-cm mertebesinde konum belirlenebilmektedir (Zumberge ve diğ., 1997; Kouba and Héroux, 2001; Kouba, 2003; Choy ve diğ., 2007; Tsakiri, 2008; El-Mowafy, 2011; Anquela ve diğ., 2013; Lou ve diğ., 2016; Choy ve diğ., 2017; Kouba ve diğ., 2017; Ozulu ve diğ., 2018). Burada doğruluğu etkileyen faktörler alıcı GNSS türü (Geliştirici tabanlı, düşük-maliyetli, jeodezik), gözlem türü (kod/faz), gözlem yapılan uydu sayısı, uydu geometrisi (multi GNSS), uydu yörünge ve saat hatası bilgilerinin doğruluğu (IGS vb.), Sagnac etkisi, atmosferik etkiler, görecelilik hatası, uydu ve alıcı anten faz merkezi hatalarıdır (Alkan ve diğ., 2020).

PPP yönteminin denklemleri yazılırken çoklu-GNSS sistemleri kullanımında her bir sistemin kendi koordinat ve zaman sistemine sahip olduğu varsayılarak değerlendirilmelidir. Birçok kurum bunu dikkate alarak uydu yörünge bilgilerini ve

saat hatalarını yayınlarken her bir sistem için aynı referans ve zaman sistemini kullanmaktadır (Uçarlı ve diğ., 2021).

Çoklu GNSS PPP kod ve faz gözlemleri denklemleri 4.5 denkleminde şu şekilde verilmektedir (Azis ve diğ., 2019):

$$\begin{aligned}
 P_{k,f}^i &= r_{k,f}^i + dy_{k,f}^i + dT_{k,f}^i + dI_{k,f}^i + dm_{k,f}^i + c(\delta t_{kf} - \delta t_f^i) + \varepsilon_{k,f}^i \\
 \theta_{k,f}^i &= r_{k,f}^i + dy_{k,f}^i + dT_{k,f}^i - dI_{k,f}^i + dm_{k,f}^i + c(\delta t_{kf} - \delta t_f^i) + \lambda_f [\phi_{k,f} + \phi_f^i] \\
 &\quad + \lambda_f N_{k,f}^i + e_{k,f}^i
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Burada i GNSS uydularını, k GNSS alıcılarını, f GNSS sinyalinin, $P_{k,f}^i$ pseudorange ölçümünü, $r_{k,f}^i$ uydu ve alıcı arasındaki geometrik mesafeyi, $dy_{k,f}^i$, yörünge hatasını, $dT_{k,f}^i$ troposfer gecikmesini, $dI_{k,f}^i$ iyonosfer gecikmesini, $dm_{k,f}^i$ multipath hatasını, $c(\delta t_{kf} - \delta t_f^i)$ GNSS alıcısı ve GNSS uydu saat farklarını, $\varepsilon_{k,f}^i$ pseudorange gürültüsünü ifade etmektedir. $\theta_{k,f}^i$ taşıyıcı faz gözlemini, λ_f ilgili frekans dalga boyunu, $\phi_{k,f}$ alıcı başlangıç faz değerini, ϕ_f^i uydu başlangıç faz değerini, $N_{k,f}^i$ taşıyıcı faz belirsizliğini, $e_{k,f}^i$ ise faz gözlemleri gürültü değerini ifade etmektedir (Azis ve diğ., 2019).

İki frekanslı bir alıcı kullanılması durumunda kod ve faz ölçümlerinden iyonosfer etkisi elimine edilebilmektedir (Paziewski ve diğ., 2017):

$$P_{k,f}^i = \frac{(f_1^2 \theta_{k,f_1}^i - f_2^2 \theta_{k,f_2}^i)}{f_1^2 - f_2^2}
 \tag{4.6}$$

$$\theta_{k,f}^i = \frac{(f_1^2 P_{k,f_1}^i - f_2^2 P_{k,f_2}^i)}{f_1^2 - f_2^2}
 \tag{4.7}$$

IGS vb. kurumlar tarafından oluşturulan veriler ve uydulardan gelen bilgiler

hareketli alıcılara iletilerek ölçme işleminin gerçek zamanlı(real time RTK) PPP(RT-PPP) veya toplanan verilerin ofiste gözlem sonrası(post-process) PPP (PP-PPP) değerlendirilmesi ile konum bilgileri üretilmektedir (Erdoğan ve diğ., 2018). PP-PPP yöntemi ile alınan verilerin değerlendirilmesi amacıyla üniversitelerde, araştırma merkezlerinde, akademi camiasında üretilen akademik programlar kullanılmaya başlanmış ancak kullanıcı sayısının artması ile özel şirketler tarafından da ücretli ve ücretsiz programlar geliştirilmiştir. Akademik programlara BERNESE, GAMIT, RTKLIB web-tabanlı online servilere CSRS, APPS, MagicGNSS, Trimble CenterPoint-RTX ticari yazılımlara, Trimble Business Center, GrafNet, GrafNav, Inertial Explorer, PosPac PP-RTX gibi örnekler verilmektedir (Ozulu ve diğ., 2018). Bu uygulamalar ile PP-PPP değerlendirmeleri yapılabilmektedir. Amaçları yalnızca PPP sonuçlarını elde etmek olan kullanıcılar için ise en kolay yöntem web-tabanlı servisleri kullanmaktır. Web-tabanlı bu servisler kullanıcıdan çok fazla girdi istemeyen, yalnızca birkaç dakikada verilerinizi yükleyerek yine dakikalar içinde sonuçlarını aldığınız uygulamalar olarak ortaya çıkmıştır (Uçarlı ve diğ., 2021). RT-PPP çözümlemesi için BKG/BNC, RTKLIB ve PPP-WIZARD gibi yazılımlara ise kullanılarak sonuçlar üretilmektedir (Alçay ve Titiz, 2021).

RT-PPP yönteminde diğer bir seçenek olarak L-band frekansını destekleyen hareketli alıcılara, bu kanal yoluyla yersel istasyonlarda hesaplanan hassas uydu yörünge ve saat bilgileri iletilir (Sheridan ve diğ.,). GNSS alıcısı aynı anda hem GNSS gözlemlerini hem de düzeltmeleri alır. Çift frekanslı bir GNSS alıcısı ile iyonosferik hataları da kaldırarak, referans bir istasyona gerek duymadan desimetre (dm) veya santimetre (cm) mertebesinde konum bilgisi üretebilmektedirler (Kasat,2019). Dünya çapında bu hizmeti sağlayan ücretsiz ve ticari servisler bulunmaktadır (İlci ve Peker, 2021). Bunlardan Real-Time Service (RTS) Nisan 2013 yılından bu yana dünya çapındaki kullanıcılar için gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat bilgilerini IGS'in sahip olduğu ağ istasyonları, veri merkezleri ve analiz merkezleri kullanarak sağlamaktadır (Alkan ve diğ., 2022). Şekil 4.4'te RTS servisinin kullandığı IGS istasyonları gösterilmektedir.



Şekil 4.4. IGS istasyonları (IGS)

Bazı servisler de kullanıcılarına ticari olarak hizmet sunmaktadır. Bunlar Trimble tarafından sağlanan RTX ve OmniStar, Hexagon tarafından sağlanan TerraStar, Fugro tarafından sağlanan Starfix, Hemisphere tarafından sağlanan Atlas vb. servislerdir (Şişman ve İlçi, 2021). Bu servisler yeryüzünde bulunan istasyonlardan aldıkları yörünge ve saat bilgilerini Geostationary (GEO) coğrafi iletişim uyduları veya internet yoluyla kullanıcılarına iletmektedir (Sheridan ve diğ., 2015).

4.2.4. Post Process Kinematik - PPK

Mutlak konum belirleme yöntemlerine göre daha yüksek konum doğruluğu bilgisi veren bağıl konum belirleme yöntemleri birçok uygulamada kullanılmaktadır. DGNSS, Real-Time Kinematik (RTK), Post Process Kinematik (PPK) gibi yöntemlerden oluşan bağıl konum belirleme yöntemlerinde bir referans noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu referans noktasının konum bilgisinin doğruluğu tüm gözlemlerin doğruluğunu etkilemektedir. RTK yöntemi ile konum belirlemede iki farklı GNSS alıcısı birbirleri ile radyo sinyalleri üzerinden haberleşerek durağan biçimdeki referans noktası, hareketli olarak gözlem yapan alıcıya GNSS düzeltmelerini radyo sinyalleri ile iletmektedir.

Diğer bir RTK modeli ise Ağ-RTK modelidir. Ağ-RTK modelinde tek bir referans istasyona olan bağımlılık ortadan kaldırılır. Belli bir alanda farklı yerlerde devamlı gözlem yapan GNSS ağı kurulur ve bu ağdaki noktaların konum bilgileri

yüksek hassasiyet ile hesaplanır. Bu ağdaki sabit noktalarda yapılan gözlemlerden üretilen düzeltme bilgileri internet vasıtasıyla GNSS alıcısına iletilmektedir. RTK yönteminde ölçüm yapmak isteyen bir kişi iki farklı GNSS alıcısına sahip olmak zorundayken, Ağ-RTK yöntemi ile sabit GNSS alıcısını birden çok kişi kullanabilmektedir. Ancak hem RTK hem de Ağ-RTK düzeltmeleri referans istasyonu ile konumu belirlenmek istenen GNSS alıcıları arasındaki mesafeye bağlıdır. Sabit GNSS alıcısına olan mesafe arttıkça belirlenen konumun doğruluğu düşmektedir. Ayrıca RTK yönteminde radyo sinyallerindeki kesilmeler ve kayıplar yaşanabilmekte, bu da anlık olarak belirlenen konum bilgisinde sapmalara neden olabilmektedir. Aynı şekilde Ağ-RTK yöntemi de internet kapsama alanı dışında kalınan bölgelerde kullanılmamaktadır.

PPK yönteminde yine referans bir GNSS alıcısına ihtiyaç duyan yöntemlerden birisidir. PPK yönteminde CORS ve sanal referans istasyon ile kullanıcı GNSS arasında bağlantı ihtiyacı olmadan iki GNSS alıcısında da eş zamanlı olarak yapılan ham GNSS verilerini kaydedilmekte ve bu verilerden ofiste yapılan değerlendirme işlemlerinden sonra konum bilgisi üretilebilmektedir. Verilerin ölçme anında değil de sonrasında değerlendirilmesi birkaç avantaj sağlamaktadır:

- + Hassas efemeris verileri kullanılabilir (Zhang ve diğ., 2019).
- + Sabit referans istasyonun konum bilgisinin ölçmelerden önce konum bilgisinin bilinmesine ihtiyaç duyulmamaktadır (Pırtı, 2021).
- + Gezici GNSS alıcısı ile referans GNSS alıcısı arasında bağlantı olmadığından mesafeden bağımsızdır.
- + Bağlantı olmadığından dolayı veri akışında bir gecikme veya kesilme yaşanmamaktadır.
- + Toplanan veriler farklı algoritma yöntemleri ile birden fazla değerlendirilebilmektedir.
- + Yapılan ölçümler arşivde saklanabilmekte, ihtiyaç duyulduğunda tekrar işlenebilmektedir (Kahveci ve diğ., 2011).

4.3. Multi GNSS

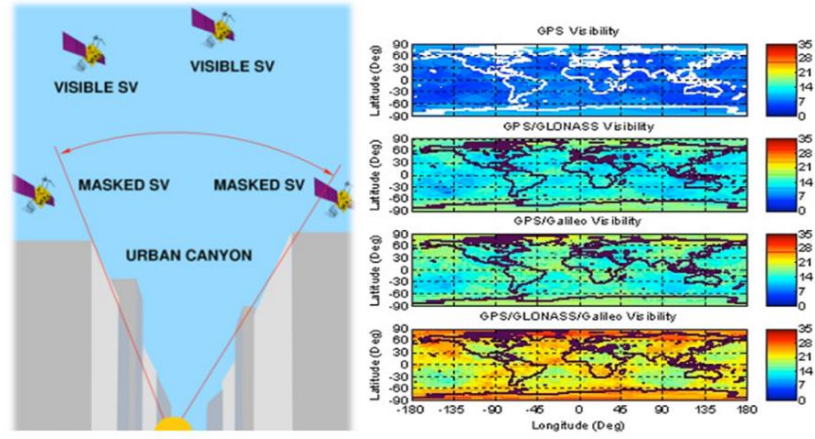
Günümüzde uydu-bazlı konum belirleme sistemleri birçok uygulamada farklı yöntemler ile kullanılmaktadır. GNSS kullanımına artan ilgi ile birlikte en yaygın kullanılan Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Savunma Bakanlığı'na ait olan NAVSTAR-GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging-Global Positioning System) sistemi ve Rusya tarafından işletilen GLObal'naya NAVigatsionnaya

Sputnikovaya Sistema (GLONASS) sisteminin yanında farklı kurum ve ülkeler tarafından geliştirilen GALILEO, BEIDOU ve QZSS gibi uydu sistemleri de eklenmiş bulunmaktadır (Ferrara ve diğ., 2017). Bu uyduların hepsinin ortak olarak kullanılması ile birlikte global alanda tümleşik konumlama sistemi ortaya çıkmıştır. 2024 yılı itibariyle atmosferik modellemeleri ve zamanlama uygulamalarını daha iyi yapılabilecek 110 farklı GNSS uydusuna erişim imkânının sunulacağı çoklu GNSS modeli ile konum belirlemenin doğruluğu da artacaktır (Odolinski ve diğ., 2020). Çoklu GNSS kullanımı ile birlikte izlenebilir uydu sayısında artış meydana gelirken, GNSS gözlemlerinde doğruluk ölçütlerinden olan uydu geometrisinin de daha iyi duruma geldiği gözlenmektedir. Çoklu sinyallerin kullanımı ile farklı algoritmalar geliştirilmiş ve bu algoritmalar ile daha yüksek doğrulukta konum bilgisi üretilmektedir.

Çoklu GNSS ile çok frekanslı GNSS alıcıları geliştirilmiştir. Çok frekanslı GNSS alıcıları ile yapılan gözlemlerde birden fazla GNSS sinyali ile alıcının ürettiği konum bilgisi daha prezisyonlu ve daha doğru hale gelmektedir. İyonosferik hatanın farklı frekanslara göre farklılaşması özelliği çoklu sinyallerde kullanılarak yapılan gözlemlerden iyonosfer hatasının elimine edilmesini sağlamaktadır (Uçarlı ve Demir, 2020).

Çoklu GNSS sisteminin kullanımı ile gelen avantajlar şu şekildedir:

- Daha fazla uydu sayısı DOP değerlerinin iyileşmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte konumlama doğruluğu artmakta ve yüksek yakınsama süresini azaltmaktadır (Montenbruck ve diğ., 2017).
- Yoğun şehir alanlarındaki yüksek binalar ve ağaçlık bölgelerde kesintiye uğrayan sinyalleri telafi edebilecek sinyallerin var olması sağlanmaktadır. Şekil 4.5'te binaların uydu görünürlüğünü nasıl etkilediği gösterilmektedir (Ving ve Thung, 2014).
- Dünya üzerinde daha büyük kapsama alanına olanak sağlamaktadır.
- Daha fazla sinyal ile daha fazla tercih sağlamakta ve artan sinyal sayısı ile daha sağlam konum bilgisi de üretebilmektedir.



Şekil 4.5. Binaların uydu sinyallerine etkisi ve farklı GNSS sistemlerinin kullanımı ile görülen uydu sayısı (Vinh ve Tung, 2014).

Çoklu GNSS kullanımı birçok avantaja sahip olmasının yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar;

- Farklı GNSS sistemleri arasında ortaya çıkan parazitler konum doğruluğunun düşmesine neden olabilmektedir.
- Çoklu GNSS sistemleri yüksek frekans sayısına sahip GNSS alıcılara ihtiyaç doğurmaktadır ve bu da maliyetin artmasına sebep olmaktadır.
- Çok fazla sayıda sinyal daha gelişmiş ve daha karmaşık algoritmaların ortaya çıkmasına sebep olurken, hesaplama gücünü de etkilemekte ve alıcının daha iyi özelliklere sahip olmasını gerektirmektedir.
- Her GNSS sisteminin farklı referans sistemine ve zaman sistemine sahip olması gözlem yapılan sinyallerin hepsinin ortak bir referans sistemine ve zaman sistemine dönüştürülmesini zorunlu kılmaktadır. Bu durumda gözlemlerde konum hesaplama hatasına neden olmaktadır. Şekil 4.6’da ise hangi GNSS sisteminin hangi referans koordinat sistemini kullandığı gösterilmektedir.

Sistem Adı	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
Uydu Pozisyonu	Kepler param	ECEF	Kepler param	Kepler Param
Referans Koordinat Sistemi	WGS84	PZ-90.02	GTRF	CGCS2000

Şekil 4.6. Farklı GNSS sistemlerinin kullandığı koordinat sistemleri (Vinh ve Tung, 2014).

5. KALMAN FİLTRE

Kalman filtresi 1960 yılında Rudolf Emil Kalman tarafından “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems” adlı makale ilk kez yayınlanmış bir filtredir (Kalman, 1960). Bu filtre ölçümlenebilir değişkenlerden yola çıkarak içerisinde ölçüm hatalarının ve bilinmeyen değişkenlerin olduğu gözlemleri daha doğru şekilde tahmin etmek için geliştirilmiş bir tahmin algoritmasıdır (Li ve diğ., 2015). Kalman filtresi lineer gözlemler için geliştirilmiş olmasına rağmen sonraları doğrusal olmayan sistemlerde kullanılmak üzere genişletilmiştir (Urrea, 2021). Kalman filtresi bir Bayesian filtresi olarak önceki gözlemlerden yola çıkarak sonraki gözlemlerde daha optimal değerlerin elde edildiği özyinelemeli olarak çalışan bir tahmin algoritmasıdır (Charles, 2017). Ancak buradan yalnızca gürültü değerlerinin Gauss dağılımına uygun olduğu durumlarda kullanılır şeklinde bir sonuç çıkarılmaması gerekmektedir (Pei ve diğ., 2019). Kalman filtreleri kullanımı ile birçok çözümlenemeyen karmaşık problemler çözülebilmektedir. Kalman filtresinin yaygın bilinen özellikleri olan ayrıklık, özyineleme ve gelecek tahmini problemlerinin çözümüne olanak sağlamaktadır (Alsadik, 2019). Kalman filtresinin ayrık olması belli zaman dilimlerine ait verileri alır ve aynı zaman dilimine göre bir çıktı oluşturur (Jia, 2019). Kalman filtresi öz yinelemeli olarak çalışmaktadır ve belli bir zamandaki gözlemi güncellemektedir (Roujean ve diğ., 2018). Kalman filtresi bulunduğu zamandan günümüze kadar sayısız uygulamaya çözüm kaynağı olmuştur. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Araç yönlendirme, konumlama ve kontrol uygulamaları (Kurowksi ve diğ., 2019),
- Sinyal işleme uygulamaları (Roth ve diğ., 2017),
- Ekonomi uygulamaları (Pasricha, 2006),
- Çoklu sensör birleştirmeleri (Rigatos ve Tzafestas, 2007),
- Sürücüsüz araç uygulamaları (Frag, 2021).

Kalman filtresi tahminleme ve güncelleme adımlarından oluşmaktadır. Tahminleme adımı ile durum değişkenlerinin kendi dinamiklerine bağlı olarak bir sonraki adımda optimal tahminlerin yaratılması sağlanır (Parisca, 2006). Güncelleme adımında ise gözlenen özellikler ile yapılan tahmin değerleri kullanılarak sistemin

düzeltilmesi sağlanır (Urrea, 2021). Lineer dinamik bir sistemin Kalman denklemleri şu şekilde oluşturulmuştur:

Bir durum vektörü:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + Bu_{k-1} + w_k \quad (5.1.)$$

Denklem 5.1’de tanımlanan durumun ölçüm denklemi:

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (5.2.)$$

denklemi ile tanımlanmaktadır.

Burada x_k k epogundaki durum vektörü, Φ durum geçiş vektörü, B kontrol giriş matrisi, u_{k-1} sistem kontrol vektörü, w_k sistem gürültü vektörü, z_k gözlemler vektörü, H gözlem geçiş matrisi, v_k gözlemlerin gürültü vektörünü oluşturmaktadır (Li ve diğ., 2015).

Kalman filtresi Tahminleme Adımı:

Kalma filtresi durum vektörüne bağlı olarak tahmin değerlerinin denklem 5.1’e göre oluşturulması ile başlanır:

$$\hat{x}_k^- = \Phi \hat{x}_{k-1} + Bu \quad (5.3.)$$

Denklem 5.3’de tahmin denklemi oluşturulmuştur ve bu denklemde $\hat{x}_k^-$ bir önceki öncül tahmin değeri temsil ederken, $\hat{x}_{k-1}$ $k - 1$ epogundaki durum tahmin vektörünü ifade etmektedir (Haykin, 2001). Buradan yola çıkarak:

$e_k^- = x_k - \hat{x}_k^-$ öncül (a-priori) tahmin hatası

$e_k = x_k - \hat{x}_k$ soncul (a-posteriori) tahmin hataları yazılmaktadır.

w_k ve v_k gürültülerinin Gauss dağılımını sağladığı varsayıldığı için;

$$E(w) = 0, cov(w) = E(ww^T) = Q$$

$$E(v) = 0, cov(v) = E(vv^T) = R, \quad E(wv^T) = 0$$

(5.4.)

5.4 eşitlikleri gerçekleşmektedir (Li ve diğ., 2015).

Buradan da öncül tahmin hatasının kovaryansı :

$$\begin{aligned}
 P_k^- &= E[e_k^- e_k^{-T}] = E[(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T] \\
 P_k^- &= E[\{\phi(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + w_k\} \cdot \{\phi(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + w_k\}^T] \\
 &= E \cdot \phi[(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) \cdot (x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^T] \phi^T + \phi E[(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) \cdot w_k^T] \\
 &\quad + E[w_k(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^T] \phi^T + E[w_k w_k^T]
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

denklem 5.5'teki gibi yazılmaktadır. Durum hatası ve ölçüm hatası birbirini etkilemeyen korelasyonsuz hatalar olduğundan (Hun ve diğ., 2016) :

$$\begin{aligned}
 E[(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) \cdot w_k^T] &= E[(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^T \cdot w_k] = 0 \\
 P_k^- &= E \cdot \phi[(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) \cdot (x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^T] \phi^T + E[w_k w_k^T] = \phi P_{k-1} \phi^T + Q_k
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

5.6'daki denklem ile öncül tahmin hatasının kovaryansı geçiş matrisi, bir önceki epoğun posteriori kovaryansı ve işlem gürültü hatası kullanılarak elde edilmektedir (Hun ve diğ., 2016).

Bundan sonraki süreç ölçülerin güncellenmesi sürecidir:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \tag{5.6}$$

Denklem 5.7'de K_k Kalman kazancını, $(z_k - H\hat{x}_k^-)$ ise artık ölçüyü tanımlamaktadır:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(Hx_k + v_k - H\hat{x}_k^-) = \hat{x}_k^- + K_k H(x_k - \hat{x}_k^-) + K_k v_k \tag{5.7}$$

Buradanda Posteriori ölçüm kovaryansı:

$$\begin{aligned}
 P_k &= E[e_k e_k^T] = E[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T] \\
 P_k &= E[(x_k - \hat{x}_k^- - K_k H(x_k - \hat{x}_k^-) - K_k v_k) \cdot (x_k - \hat{x}_k^- - K_k H(x_k - \hat{x}_k^-) - K_k v_k)^T] \\
 &= E[(I - K_k H)(x_k - \hat{x}_k^-) - K_k v_k] \cdot [(I - K_k H)(x_k - \hat{x}_k^-) - K_k v_k]^T
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= E(I - K_k H)[(x_k - \hat{x}_k^-) \cdot (K_k v_k)^T] \cdot (I - K_k H)^T + K_k E[v_k v_k^T] \cdot K_k^T \\
&\quad - E(I - K_k H)[(x_k - \hat{x}_k^-) \cdot (K_k v_k)^T] \\
&\quad - E[(K_k v_k)(x_k - \hat{x}_k^-)^T] \cdot (I - K_k H)^T
\end{aligned} \tag{5.8.}$$

denklem 5.9'daki gibi yazılmaktadır. Yine bu epokdaki durum hatası ve ölçüm hatası korelasyonsuz olduğundan

$$E[(x_k - \hat{x}_k^-)(K_k v_k)^T] = E[(K_k v_k)(x_k - \hat{x}_k^-)^T] = 0 \tag{5.9.}$$

denklem 5.9'daki eşitlik yazılabilmektedir ve denklem 5.9 sadeleştirilirse

$$\begin{aligned}
P_k &= E(I - K_k H)[(x_k - \hat{x}_k^-) \cdot (x_k - \hat{x}_k^-)^T] \cdot (I - K_k H)^T + K_k E[v_k v_k^T] \cdot K_k^T \\
&= (I - K_k H) \cdot P_k^- \cdot (I - K_k H)^T + K_k R_k K_k^T \\
P_k &= P_k^- - K_k H P_k^- - P_k^- K_k^T H^T + K_k (H P_k^- \cdot H^T + R_k) K_k^T \\
T[P_k] &= T[P_k^-] - T[K_k H P_k^-] - T[P_k^- K_k^T H^T] + T[K_k (H P_k^- \cdot H^T + R_k) K_k^T] \\
&= T[P_k^-] - 2T[K_k H P_k^-] + T[K_k (H P_k^- \cdot H^T + R_k) K_k^T]
\end{aligned} \tag{5.10.}$$

denklem 5.10 elde edilmektedir. Burada $T[\cdot]$ iz matrisini ifade eder. Denklem 5.10'in Kalman kazancına göre türevi alınır;

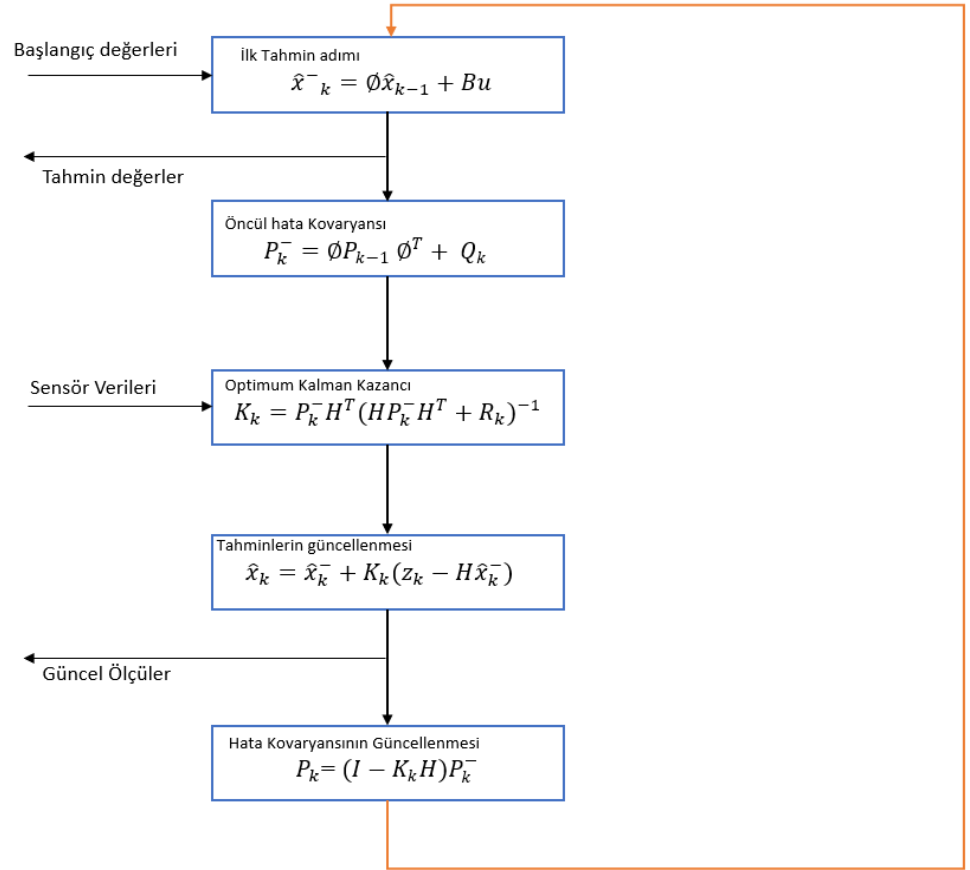
$$\frac{dT[P_k]}{dK_k} = -2[H P_k^-]^T + 2K_k H P_k^- H^T + 2K_k R_k = 0 \tag{5.11.}$$

denklem 5.11'deki eşitlikler yazılabilmektedir. Bu şekilde en küçük karesel ortalama hatayla 5.11 denklemi yeniden düzenlenirse en optimal Kalman kazancı ifadesi:

$$\begin{aligned}
K_k &= P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R_k)^{-1} \\
P_k &= P_k^- - P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R_k)^{-1} H P_k^- = (I - K_k H) P_k^-
\end{aligned} \tag{5.12.}$$

5.12denklemi ile optimal Kalman kazancı ve önsel tahmin hata kovaryansı cinsinden hata kovaryans güncelleme denklemidir (Hun ve diğ., 2016).

Şekil 5.1 te Kalman Filtresinin genel işleyişi gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Kalman filtresi genel işleyişi

6. KOORDİNAT SİSTEMLERİ

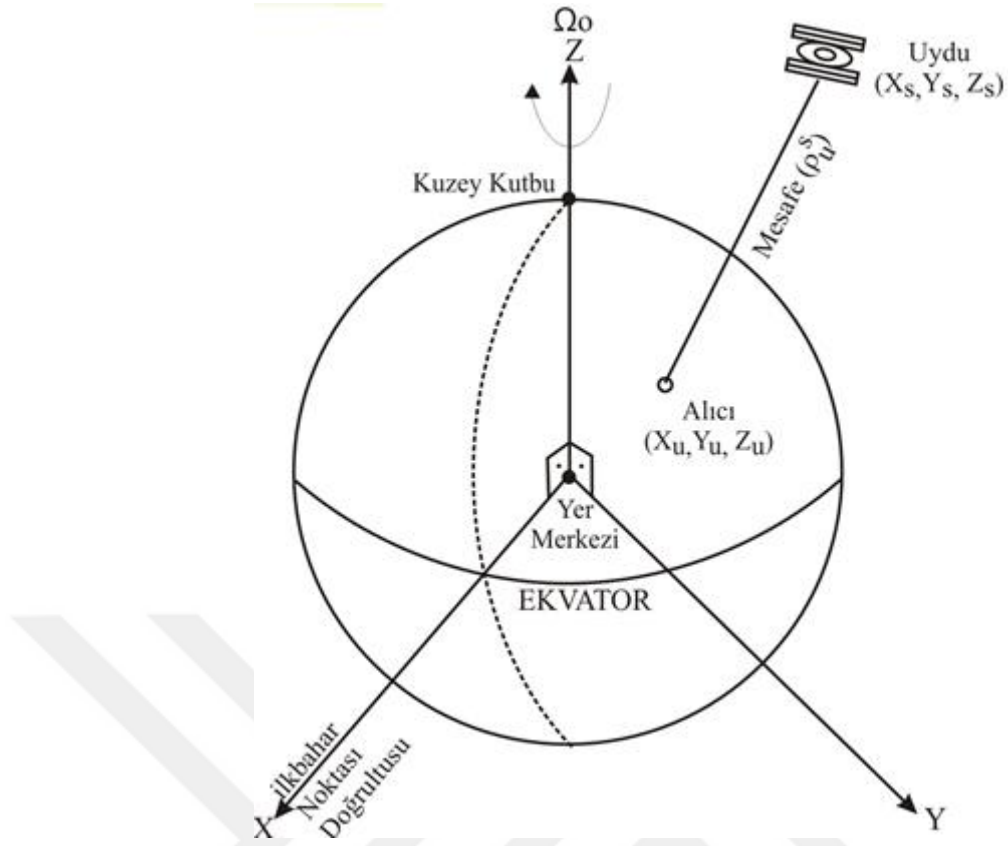
Koordinatlar bir noktanın belirli bir referans sistemindeki konumunu tanımlayan doğrusal ve açısal büyüklüklerdir. Bir noktanın konumu, yönelimi ve hızı belli bir başlangıç noktasına göre ifade edilmektedir. Bundan dolayı farklı sensörlerin kullanıldığı konum belirleme yöntemlerinde aynı noktanın konumun belirlenmesi için bu sensörlerin koordinat sistemlerinin aynı referans düzleminde olması gereklidir (Leung ve diğ.,2011). Bir koordinat sisteminin tanımlanması için:

- + Başlangıç noktası (orjin)
- + Dönüklüğü (orientation)
- + Birimi (units)

tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. INS ve GNSS sistemlerinin entegre edilmesindeki zorluklardan birisi de her sensör ve verinin farklı referans sistemlerde tanımlı olmasıdır. Tüm bu sensör ve verilerin ortak bir referans sisteme dönüştürülmesi ve tek bir sistem üzerinden konum belirleme işleminin yapılması gereklidir.

6.1. Yeryüzü Merkezli Ataletsel (ECI) Koordinat Sistemi

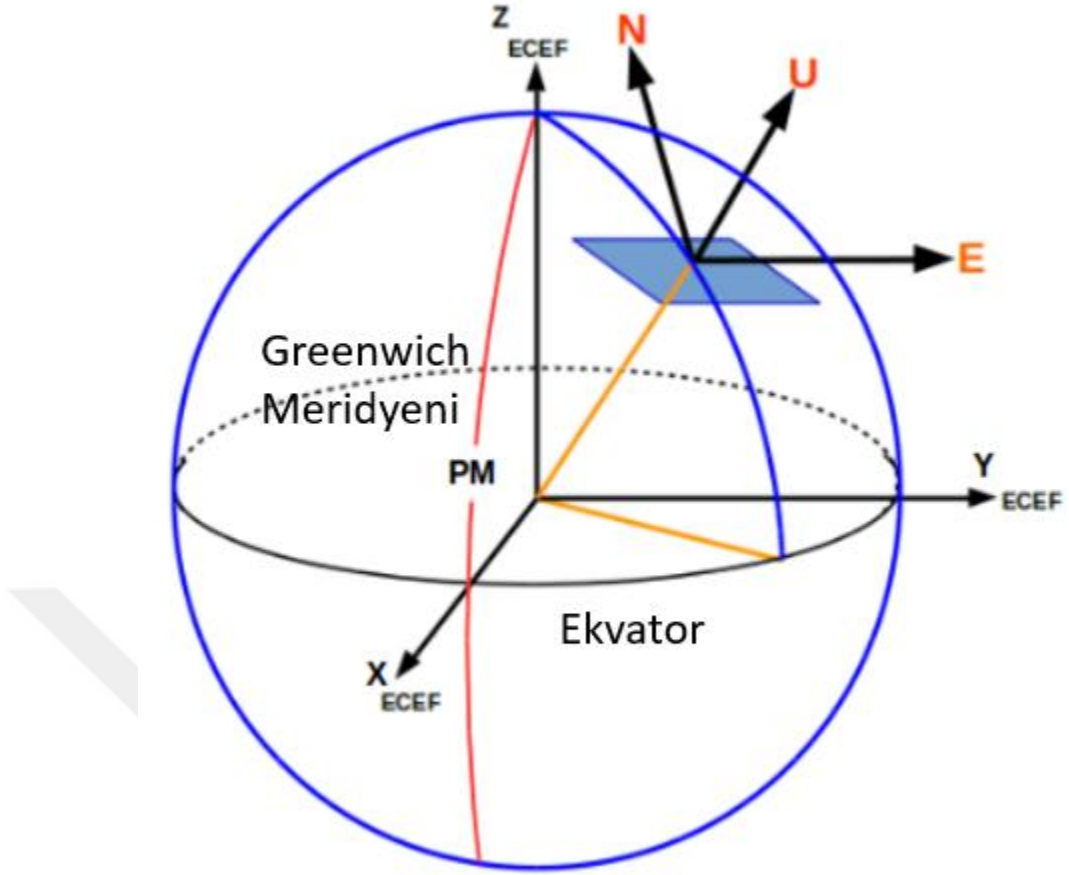
Merkezi yeryüzü merkezine konumlandırılmış, dünya dönüşünden bağımsız uzak mesafe yıldızlara sabitlenmiş referans sistemidir. Orijin noktası yeryüzü ağırlık merkezine, Z eksenine ise J2000.0 döneminin ortalama kuzey gök kutbuna karşılık gelir. X eksenine Vernal ekinoks yönünde, Y eksenine de sağ el sistemine göre ortogonal bir kartezyen koordinat sistemidir (Rahal ve diğ., 2012). Şekil 6.1’de ECI koordinat sistemi eksenleri gösterilmiştir.



Şekil 6.1. ECI koordinat sistemi eksenleri(Kahveci ve Yıldız, 2012)

6.2. Yeryüzü Merkezli Yeryüzüne Bağlı Koordinat Sistemi (ECEF)

Merkezi dünyanın merkezine konumlandırılmış, Z eksenini kuzey kutup noktası doğrultusunda, X eksenini Greenwich meridyeni ile ekvator kesişimi yönünde, Y eksenini sağ el kuralına göre X ve Z eksenlerine dik şekilde tanımlanmış koordinat sistemidir. GNSS sistemlerinde kullanılan ECEF koordinat sistemi Kartezyen bir koordinat sistemidir. Şekil 6.2’de ECEF koordinat sistemi gösterilmektedir (Popescu, 2016).



Şekil 6.2. ECEF koordinat sistemi (Senapati ve diğ., 2020)

6.3. Dünya Jeodezik Sistemi – 1984 (WGS-84)

ABD savunma bakanlığı tarafından GPS ile konum belirlemek için referans sistem olarak kullanılan WGS-84 sistemi National Geospatial Intelligence Agency(NGA) tarafından geliştirilmiştir(Kahveci ve Yıldız, 2012). GPS kontrol segmentinde yörünge belirleme ve yayın efermerisi üretiminde kullanılırken, GPS uydularından yayınlanan Navigasyon mesajı içerisindeki bilgilerde bu sistemindedir(Montenbruck ve diğ., 2017).

6.4. Yerel Navigasyon Referans Sistemi

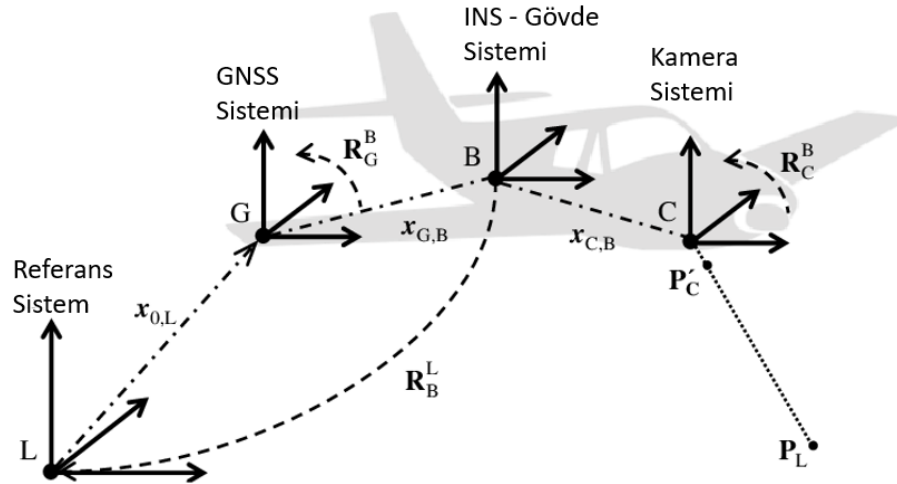
Yerel navigasyon referans sisteminin orijini konumu belirlenecek cismin merkezi diğer eksenleri Kuzey, Doğu ve Dikey eksenlerdir. İki farklı sağ el kuralına göre oluşturulmuş referans sistemi bulunmaktadır. Bunlardan birisi North East Down (NED) diğeri ise East North Up (ENU) navigasyon referans sistemleridir. İki koordinat sistemindeki fark dikey eksenin aşağı ve yukarı yönlü olmasıdır (Groves, 2013). ENU ile gösterilen koordinat eksenlerinde:

- n- eksen jeodezik kuzeyi göstermekte,

- e- eksenini jeodezik doğuyu göstermekte,
- u- eksenini alıcı antenin kurulu olduğu noktadaki elipsoit normali ile çakışmaktadır ve jeodezik zenit olarak isimlendirilir.

6.5. Gövde Referans Sistemi

Bu referans sistemi cisim gövdesine sabitlenir ve cisim ile birlikte dönmektedir (Khalaf ve diğ., 2015). X eksenini cismin yer değiştirme yönünü, Z eksenini yerçekimi kuvveti yönünü, Y eksenini de sağ el kuralına göre diğer iki eksene dik eksendir (Farell ve Wendel, 2017). Açısal hareket için gövde referans eksenleri yaw, pitch, roll açıları ile temsil edilmektedir. Roll açısal hareketi x eksenini, pitch açısal hareketi y eksenini, yaw açısal hareketi ise z eksenini temsil etmektedir (Groves, 2013). Şekil 6.3'te bir araç üzerindeki farklı sensörlerin koordinat sistemleri gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Farklı Sensörlere Ait Referans Sistemleri (Gabrlik ve diğ., 2018)

Bir çok sensörün kendisine ait referans sistemi bulunmaktadır. Bu sensörlerin entegrasyonunun sağlanmasında ortak bir referans sisteminde tüm bu sensörlerin birleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 6.3'te görüldüğü üzere INS sistemi ile aracın gövde sistemi aynı referans sistemi tanımlamakta, GNSS'in ise farklı bir referans sistemi bulunmaktadır. GNSS-INS entegrasyonunun gerçekleşmesinde iki sensöründe ortak bir referans sistemde sunulması gerekmektedir.

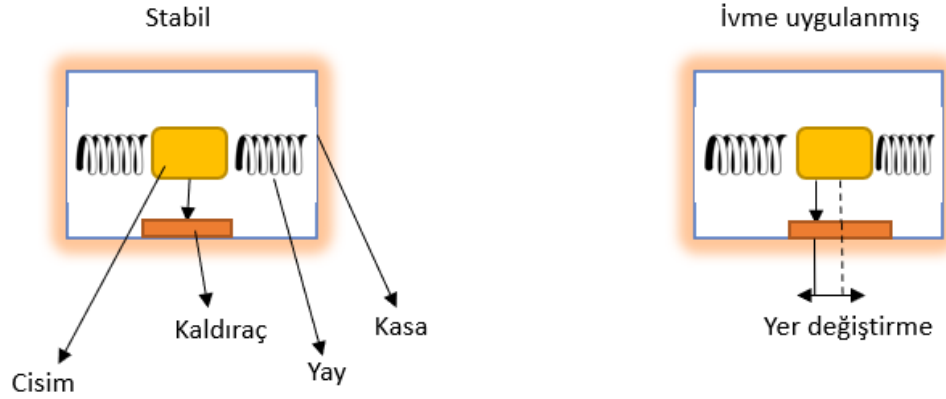
7. ATALETSEL KONUMLAMA SİSTEMİ

7.1. Ataletsel Sensor (Inertial Sensor)

Belirli bir kuvveti ölçen ivmeölçer ve açısal oranı ölçen jiroskop sensörlerinden oluşan ataletsel sensör bağımsız şekilde çalışmaktadır (Diaz ve diğ., 2019). İvme ölçer bir nesnenin hızını ve yer değiştirme miktarı gibi bilgileri üretirken, jiroskop ise nesnenin durumu olan rotasyonel yer değiştirmesini ölçmektedir (Zheng ve diğ., 2021). Ataletsel ölçü birimi (Inertial Measurements Unit (IMU)) içerisinde birbirine göre dik olarak yerleştirilmiş üç farklı ekseninde veri toplayan ivme ölçerler ve yine aynı ivme ölçerler gibi dik üç farklı ekseninde açısal hız ölçen jiroskoplar barındıran ölçüm birimidir (Sheimy ve Youssef, 2020). IMU, cep telefonları, mobil haritalama, sürücüsüz araçlar, insansız hava araçları, savunma sanayi, robotik sistemler gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Kok ve diğ., 2017).

7.1.1. İvmeölçer (Accelerometer)

İvmeölçer bir referans çerçevesine göre cisme etki eden ivme kuvvetlerini ölçen sensördür (Jost, 2019). Atalet sensörlerde ağırlığı belli bir cismi sabit şekilde tutmak için gereken özel kuvveti ölçen ivmeölçerler, bu ölçümün yapılışına ve kuvvetin nasıl dağıtıldığına göre farklılık gösterirler (Grewal ve diğ., 2020). İvmeölçerin hassas ekseninde hareket edebilen dayanıklı bir kütle iki tarafından yaylar ile asılı şekilde bulunmaktadır (Groves, 2014). Belli özel bir dış kuvvet tarafından bir ivme uygulandığında yaylardaki gerilme kuvveti cismin kasaya göre hareket etmesini sağlamaktadır. Bu hareket ile birlikte cismin uğramış olduğu yer değiştirmesi lineer bir ilişki ile ivmeye bağlanmaktadır (Abozyd ve diğ., 2022). Bu yer değiştirmenin ölçülebilmesi ve ölçümün bir sinyale dönüştürülebilmesi için Piezoresistive, Piezoelectric, kapasitif, dirençli, optik, termal ve tunneling gibi transdüksiyon yöntemleri kullanılmaktadır (Mohammed ve diğ., 2018). Şekil 7.1’de basit bir ivmeölçer ve kısımlarının tanıtılması ile kuvvet uygulandığında oluşan durum gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Basit bir ivmeölçer (Groves, 2013)

İvmeölçerin ölçtüğü özel kuvvet denklemi:

$$f = a - g$$

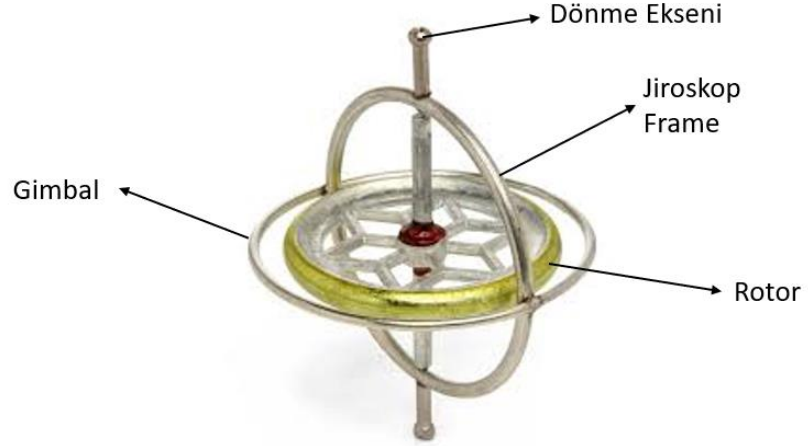
(7.1.)

ile ifade edilmektedir. Denklem 7.1’de f özel kuvvet, a kinematik ivme, g yerçekimi ivmesini tanımlamaktadır.

İki çeşit ivmeölçer bulunmaktadır. Bunlardan birisi sarkaç ivmeölçer, diğeri ise titreşimli ivmeölçerdir (Beitia ve diğ., 2015).

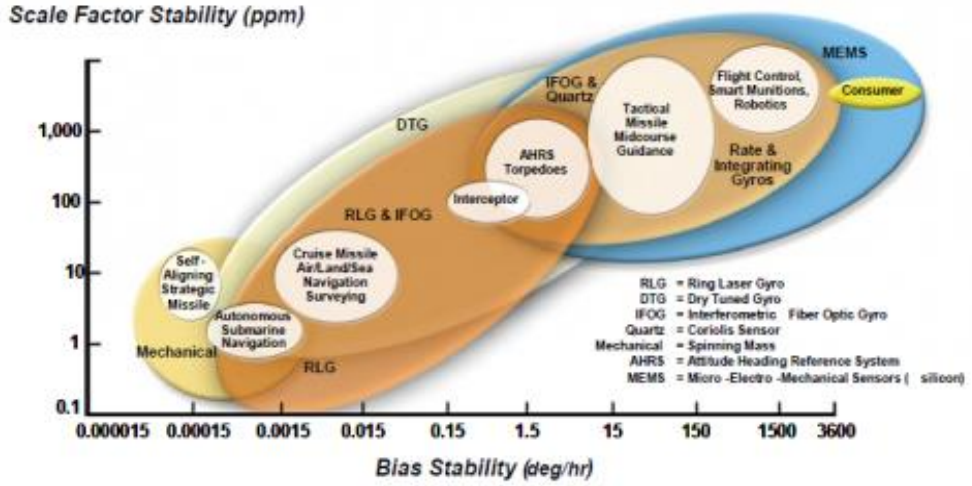
7.1.2. Jiroskop

Jiroskoplar cihaz tabanından bağımsız bir çerçeveye monte edilmiş tüm dönüklüklerin sağlanması için birden fazla yöne dönebilen ve açısal hızı algılayabilen cihazlardır (Passaro ve diğ. 2017). Gimbal adı verilen halka yapılara asılı durarak dış kuvvetlerden korunmaktadır (Maneka ve diğ., 2005). Şekil 7.2’de mekanik bir jiroskop ve parçaları tanıtılmaktadır. Bir jiroskop dönme eksenini, gimbal, rotor ve jiroskop yapısından oluşmaktadır.



Şekil 7.2. Mekanik jiroskop (Stocker, 2019)

Farklı uygulamalarda kullanılmak üzere farklı hassasiyete sahip jiroskoplar bulunmaktadır: Titreşmeli jiroskop (Mochida ve diğ., 2000), mekanik jiroskop, optik jiroskop, Ring Laser jiroskop (RLG), Fiber-Optic jiroskop (IFOG) (Zhuang ve diğ., 2020) ve Micro-Electromechanical System (MEMS) jiroskop (Nabholz ve diğ., 2019). Açısal hız ölçümünün doğruluğu her sınıf jiroskop için değişmekle birlikte, ölçümlerde hata değerini etkileyen en önemli değerlerden birisi ölçek faktörünün kararlılığıdır (Guo ve Zhong, 2017). Gürültü kaynaklı ölçüm hatalarının etkilediği ölçek faktörü optik jiroskobun prezisyonunu ifade ederken, diğer jiroskopların hassasiyeti ile ters orantılıdır (Passaro ve diğ. 2017). Şekil 7.3'te farklı jiroskopların ölçek faktörü kararlılıkları gösterilmektedir. Ölçek faktörünün minimize edilmesi ile jiroskobun doğruluğu artmakta iken ölçek faktörü minimize işleminin yüksek maliyete sahip olmasından dolayı sensör maliyeti artmaktadır (Han ve diğ., 2021). Buradaki en önemli konu yapılacak olan uygulamanın hassasiyet durumuna göre sensör seçimidir.



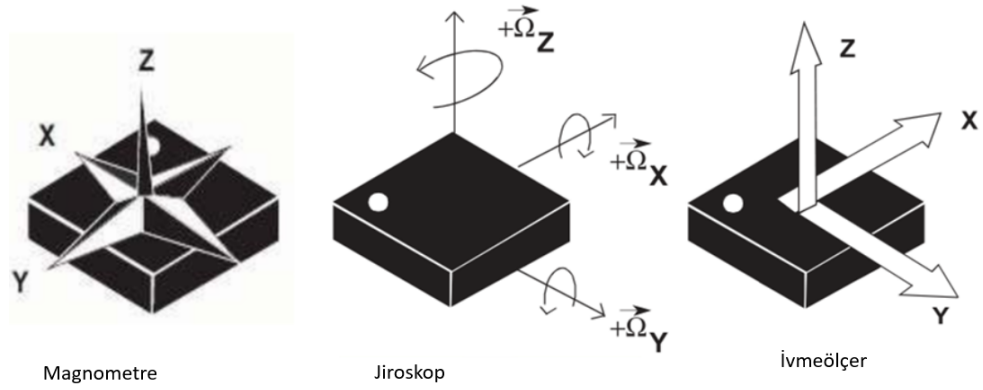
Şekil 7.3. Jiroskop ölçek faktörleri (Schmidt, 2015)

Günümüzde birçok uygulamada kullanılan RLG ve mekanik jiroskoplar kullanılmakla birlikte, son geliştirmeler IFOG ve MEMS jiroskoplarının da kullanımının artmasına sebep olmuştur (Schmidt, 2015).

7.1.3. Ataletsel Ölçü Birimi (Inertial Measurement Unit (IMU))

İçerisinde doğrusal ivmeyi ölçmek için ivmeölçer, açısal hızı ölçmek için jiroskop ve yeni teknolojik gelişmelerden sonra entegre olan manyetik alan gücünü ölçmek için manyetometre bulunduran Ataletsel Ölçü Birimi (IMU) 1930'lardan beri kullanılmaktadır (Osborn ve diğ., 2020). Günümüzde mobil haritalama sistemleri (Puente ve diğ., 2013), kapalı alan haritalama sistemleri (Karam ve diğ., 2019), sürücüsüz araç sistemleri (Wang ve diğ., 2016), tarım aletleri (Takai ve diğ., 2014), insansız hava araçları (Stöcker ve diğ., 2017) ve fotogrametrik sistemler (Zhang ve diğ., 2006) gibi birçok alanda IMU kullanımı devam etmektedir.

IMU içerisinde x, y ve z eksenlerindeki ivme ve açısal hızı ölçümleyebilmek için üç tane ivmeölçer ve üç tane jiroskop bulundurmaktadır. Üç eksen de ivmeölçer değerleri ve üç eksen de jiroskop değerlerinin bulunan bir IMU altı eksen de ölçüm yaptığı söylenebilirken, ekstra üç eksenli manyetometrenin eklenmesi IMU'nun dokuz eksen de ölçüm yapmasını sağlamaktadır (Liu, 2020). Şekil 7.4'te IMU içerisinde bulunan sensörler ve bu sensörlerin eksenleri gösterilmiştir.

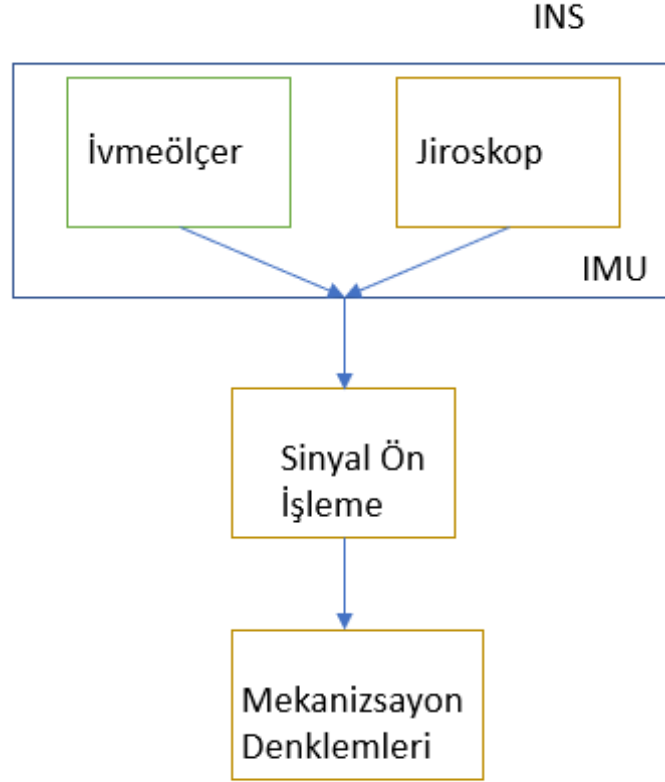


Şekil 7.4. IMU eksen gösterimi (Jim Hamblen, 2016)

Altı eksen ve dokuz eksen IMU rotasyon açıları olan pitch, roll, yaw açılarını, açısal hızı ve doğrusal ivmelenmeyi sonuç olarak vermektedir.

7.1.4. Ataletsel Navigasyon Sistemi (Inertial Navigation Systems)

Ataletsel Navigasyon Sistemi (INS) dış ortamdan bağımsız olarak IMU'dan aldığı yüksek frekanslı ivme ve açısal hız bilgilerini navigasyon denklemleri ile birleştirerek konum, hız ve durum bilgilerini hesaplamaktadır (Wu ve diğ., 2005). IMU'dan alınan veriler bir nevi filtre olarak kullanılan bozulmaların düzeltildiği ön işleme alanında işlendikten sonra, sinyallerden konum, hız ve durum bilgisi elde etmek için mekanizasyon algoritmalarında kullanılmaktadır (Noureldin ve diğ., 2013). Şekil 7.5'te INS sistemini oluşturan üç temel yapı gösterilmiştir.

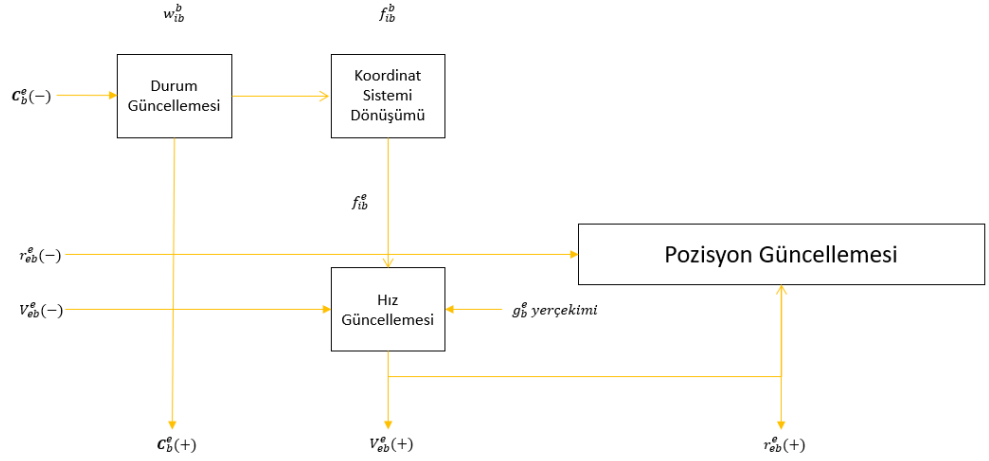


Şekil 7.5. INS'in 3 temel yapısı

IMU'dan kaynaklı sapma hataları zamanla artarak devam etmekte bu da elde edilen konum hatasını artırmaktadır (Barshan ve Whyte, 1993). Bu hataların giderilmesi için diğer konumlama sensörleri olan GNSS, odometre vb. sensörler ile birlikte INS kullanımı daha iyi sonuçlarda konum bilgisi elde etmeye olanak sağlamaktadır (Ishibashi ve diğ., 2007).

7.1.5. Mekanizasyon Denklemleri

IMU'dan gelen verilerden konum, hız ve durum bilgisinin üretildiği denklemlerdir. Bu çalışmada Sağa, Kuzey ve Yükseklik(East, North, Up ENU) koordinat sistemi kullanılmıştır. Dört adımda ENU koordinat sisteminde INS çözümünün nasıl gerçekleştirildiği Şekil 7.6'da gösterilmektedir (Groves, 2013).



Şekil 7.6. Mekanizasyon denklem diyagramı

-Öncelikle denklem 7.2'deki koordinat sistemi dönüşümü denklemi yazılır:

$$\begin{bmatrix} \dot{r}^n \\ \dot{V}^n \\ \dot{R}_b^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D.V^n \\ R_b^n f^b - (2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n).V^n + g^n \\ R_b^n (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) \end{bmatrix} \quad (7.2.)$$

7.2 denklemi ENU koordinat sistemindeki hız bileşeni ile coğrafi koordinatlar arasındaki ilişki açıklamaktadır.

$$\dot{r}^n = D.V^n \quad (7.3.)$$

7.3 denkleminde $r^n = [\varphi \quad \lambda \quad h]^T$ ENU referans sisteminde coğrafik koordinatları temsil etmektedir.

$V^n = [V_E \quad V_N \quad V_U]^T$ kuzey, doğu ve yukarı yöndeki hız değerleri ifade etmektedir.

D hız bileşenlerini coğrafi koordinatların türevine dönüştüren matristir ve şu şekilde ifade edilir:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M+h} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{(N+h)\cos\varphi}{0} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.4.)$$

7.4 denklemindeki N ve M elipsoit eğrilik yarıçapını ifade eder.

7.2 denklemindeki 2. satır hız güncellemesi denklemini ifade eder:

$$\dot{V}^n = R_b^n f^b - (2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n).V^n + g^n \quad (7.5.)$$

Denklem 7.5 ENU referans sisteminde hız mekanizasyon denklemdir ve burada:

$\dot{V}^n$ kinematik ivmelenme,

$\Omega_{en}^n.V^n$ ECEF koordinat sistemine göre ENU referans sisteminin hareketiyle ilgili merkezci ivmeyi,

$2\Omega_{ie}^n.V^n$ Coriolis ivmesini,

g^n yerçekimi ivmesini,

f^b özel kuvvet vektörü ivmeölçerde ölçülen değeri,

Ω_{ie}^n dünya dönüşünün(w_{ie}) çarpık simetrik matrisi ifade etmektedir.

$$w_{ie} = [0 \quad \sigma\cos\varphi \quad \sigma\sin\varphi]^T \quad (7.6.)$$

Denklem 7.6 da ise dünya dönüşünün matrisi gösterilmektedir.

w_{en}^n vektörü ENU referans sisteminin ECEF sistemine göre dönüş hız matrisi olmaktadır ve denklem 7.7 de eşitliği gösterilmektedir. Ayrıca Ω_{en}^n dünya dönüşünün çarpık matrisi w_{en}^n matrisinin çarpık simetrik vektörüdür.

$$w_{en}^n = \begin{bmatrix} \frac{-V_N}{M+h} & \frac{V_E}{N+h} & \frac{V_E\tan\varphi}{N+h} \end{bmatrix}^T \quad (7.7.)$$

Denklem 7.2'deki 3. satır durum güncellemesini ifade etmektedir.

$$\dot{R}_b^n = R_b^n(\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) \quad (7.8.)$$

7.4 ile durum güncellemesinin mekanizasyon denklemini ifade etmektedir.

w_{ib}^b jiroskop tarafından ölçülen değer gövde referans sisteminin ECI referans sistemine göre dönüş hızını temsil eder. Ω_{ib}^b vektörü, w_{ib}^b vektörünün çarpık simetrik vektörünü ifade etmektedir.

w_{in}^b vektörü navigasyon referans sisteminin body referans sistemine göre dönüş hızını temsil eder. Ω_{in}^b vektörü w_{in}^b vektörünün çarpık simetrik vektörünü ifade etmektedir.

w_{in}^b vektörü w_{ie}^n vektörü ve w_{en}^n vektöründen hesaplanır ve body frame'e göre dönüştürülür.

$$w_{in}^b = R_b^n.(w_{ie}^n + w_{en}^n) \quad (7.9.)$$

7.9 denklemi ile navigasyon referans sisteminin gövde referans sistemine göre dönüş hızının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

INS sisteminden konum belirlemek için öncelikli olarak IMU'nun oryantasyonu navigasyon referans sisteminde belirlenir. Jiroskop içerisinde dünya dönmesi ve IMU'nun ataletsel referans sistemine göre olan açısal hızları da içerdiğinden bu açısal hızların IMU'nun navigasyon referans sistemine göre olan açısal hızı bulunur (Angrisano, 2010; El-Sheimy ve Chatfield 1997). Diğer bir işlemde ise ivmeölçerden hesaplanan özgül kuvvet navigasyon referans sistemine dönüştürülür ve yerçekimi ve yön değiştirme düzeltilir. Düzeltilmiş ivme konum bilgisinde hesaba katılır (Angrisano ,2010).

7.1.6. INS Hata Durumları

Gürültü, sapma ve kayma gibi hata değerleri içeren INS verilerinde bu hata değerleri konumlamaya olan kötü etkisinin giderilmesi için tahmin algoritmaları kullanılmaktadır (Leung ve diğ., 2011). Tahmin algoritmasında bu hatalar için bir matematiksel model ihtiyacı oluşmaktadır (Filyashkin ve Yatskivsky, 2013). Bu

kısımda INS hataları için bir durum modeli elde etmek amaçlanmıştır.

Pozisyon, hız ve durum için hata parametreleri:

$$\delta r^n = r^n - \hat{r}^n$$

$$\delta v^n = v^n - \hat{v}^n$$

$$\hat{R}_b^n = (I - E^n)R_b^n$$

(7.10.)

olarak gösterilmektedir ve burada δ hatayı, $\hat{}$ tahmin edilen değeri, E^n ise ENU referans sisteminde durumu hatasının çarpık simetrik matrisini temsil etmektedir (Angrisano, 2010).

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{r}^n \\ \delta \dot{v}^n \\ \delta \dot{e}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{rr} & F_{rv} & F_{re} \\ F_{vr} & F_{vv} & F_{ve} \\ F_{er} & F_{ev} & F_{ee} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta r^n \\ \delta v^n \\ \delta e^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ R_b^n \delta f^b \\ R_b^n \delta w^b \end{bmatrix}$$

(7.11.)

7.11 denkleminde bakıldığında:

e^n ENU referans sisteminde durum hatası vektörü,

δf^b Ölçülen özel kuvvetin hata vektörü,

δw^b Ölçülen açısal hız hata vektörü ifade etmektedir. Denklem 7.11'deki F matrisinin açılımları şu şekildedir:

$$F_{rr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-V_N}{(M+h)^2} \\ \frac{V_E \sin \varphi}{(N+h) \cos^2 \varphi} & 0 & \frac{-V_E}{(N+h) \cos \varphi} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(7.12.)

Denklem 7.12'de F_{rr} değerinin açılımı gösterilmektedir.

$$F_{rv} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{(M+h)} & 0 \\ \frac{1}{(N+h)\cos\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.13.)$$

Denklem 7.13'te ise F_{rv} değerin açılımı gösterilmiştir.

$$F_{re} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.14.)$$

Denklem 7.14'te F_{re} değerin açılımı gösterilmektedir.

$$F_{vr} = \begin{bmatrix} 2\sigma(V_U \sin\varphi + V_N \cos\varphi) + \frac{V_E V_N}{(N+h)\cos^2\varphi} & 0 & \frac{V_E V_U}{(N+h)^2} - \frac{V_E V_N \tan\varphi}{(N+h)^2} \\ -2\sigma V_E \cos\varphi - \frac{V_E^2}{(N+h)\cos^2\varphi} & 0 & \frac{V_N V_U}{(M+h)^2} - \frac{V_E^2 \tan\varphi}{(N+h)^2} \\ -2\sigma V_E \cos\varphi & 0 & -\frac{V_E^2}{(N+h)^2} - \frac{V_N^2}{(M+h)^2} + \frac{2g}{R+h} \end{bmatrix} \quad (7.15.)$$

Denklem 7.15'te F_{vr} değerin açılımı gösterilmektedir.

$$F_{vv} = \begin{bmatrix} \frac{V_N \tan\varphi}{(N+h)} - \frac{V_U}{(N+h)} & 2\sigma \sin\varphi + \frac{V_E \tan\varphi}{(N+h)} & -2\sigma \cos\varphi - \frac{V_E}{(N+h)} \\ -2\sigma \sin\varphi - \frac{2V_E \tan\varphi}{(N+h)} & -\frac{V_U}{(M+h)} & -\frac{V_N}{(M+h)} \\ 2\sigma \cos\varphi + \frac{2V_E}{(N+h)} & \frac{V_N}{(M+h)} & 0 \end{bmatrix} \quad (7.16.)$$

Denklem 7.16'da F_{vv} değerin açılımı gösterilmektedir.

$$F_{ve} = \begin{bmatrix} 0 & f_U & -f_N \\ -f_U & 0 & f_E \\ f_N & -f_E & 0 \end{bmatrix}$$

(7.17.)

Denklem 7.17’de F_{ve} değerinin açılımı gösterilmektedir.

$$F_{er} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 - \frac{V_N}{(M+h)^2} \\ \sigma \sin \varphi & 0 & \frac{V_E}{(N+h)^2} \\ -\sigma \cos \varphi - \frac{V_E}{(N+h) \cos^2 \varphi} & 0 & \frac{V_E \tan \varphi}{(N+h)^2} \end{bmatrix}$$

(7.18.)

Denklem 7.18’de F_{er} değerinin açılımı gösterilmektedir.

$$F_{ev} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{(M+h)} & 0 \\ -\frac{1}{(N+h)} & 0 & 0 \\ -\frac{\tan \uparrow \varphi}{(N+h)} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(7.19.)

Denklem 7.19’da F_{ev} değerinin açılımı gösterilmektedir.

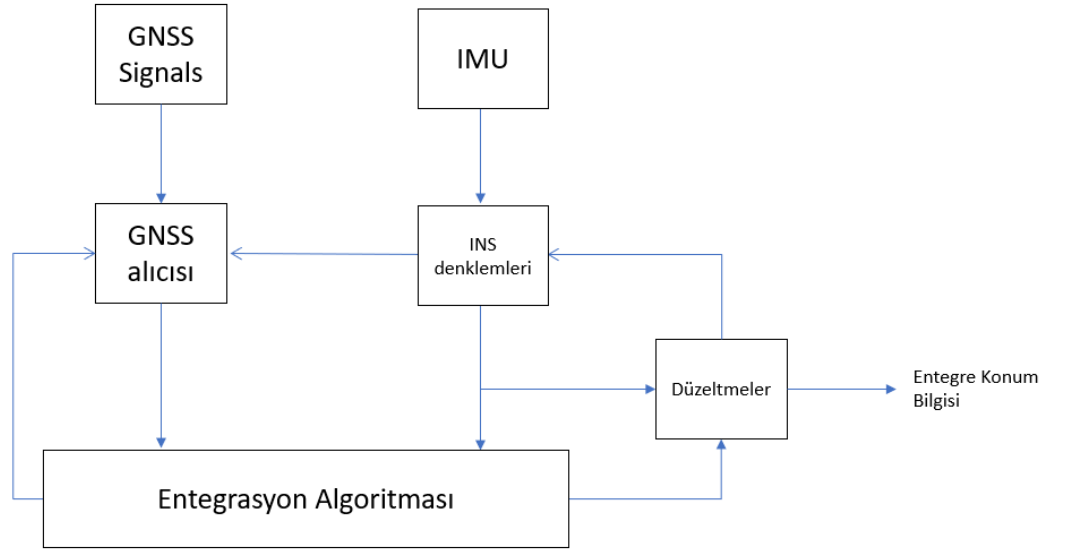
$$F_{ee} = \begin{bmatrix} 0 & \sigma \sin \varphi + \frac{V_E \tan \varphi}{(N+h)} & -\sigma \cos \varphi - \frac{V_E \tan \varphi}{(N+h)} \\ -\sigma \sin \varphi - \frac{V_E \tan \varphi}{(N+h)} & 0 & -\frac{V_N}{(M+h)} \\ \sigma \cos \varphi + \frac{V_E}{(N+h)} & \frac{V_N}{(M+h)} & 0 \end{bmatrix}$$

(7.20.)

Denklem 7.20’de F_{ee} değerinin açılımı gösterilmektedir. Denklem 7.10 verilen değerler ve 7.12’den 7.20’ ye kadar verilen değerlerin 7.11 denklemine yerlerine yerleştirilmesiyle hata durum matrisi elde edilebilmektedir.

8. GNSS AND INS ENTEGRASYONU

Navigasyon sistemlerinde yapılan ölçmelerde doğruluk ve hassaslık performanslarının artırılması ve sistemin güçlendirilmesi için dışa bağımlı olan bilgilerin, dışa bağımlı olmayan bilgiler birleştirilmektedir. Entegre sistemlerin kullanımı ile, bağımsız doğrulukları daha düşük olan sensörler birlikte kullanılarak sistem daha güçlü hale getirilmektedir.. (Wendel ve Trommer, 2004). Dünyada son yıllarda akıllı şehirler, sürücüsüz araçlar, insansız hava araçları (İHA) ve 3B kadastro altyapıları gibi projeler için doğru ve mutlak konum bilgisi üretmek elzem bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır (Wen ve diğ.,2019). GNSS sistemleri küresel konum belirlemede en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Ancak GNSS sistemleri yoğun şehir alanlarında yüksek doğrulukta konum doğruluğu belirleyememektedir. GNSS sinyalleri yoğun şehir alanlarındaki binalar, ağaçlar, alt geçit vb. yüksek yapılardan etkilenir ve multipath olarak adlandırılan hata ile GNSS sinyallerinin görüş hattı sinyalline ek olarak yansımaları ve kırılması ile konumlandırma bilgisinin daha düşük doğrulukta üretilmesine sebep olmaktadır (Xie ve Petovello, 2015). GNSS ve INS sistemlerinin entegrasyonu ile yüksek bant genişliğinde, uzun sürelerde yüksek konum doğruluğu elde etmek mümkün olmaktadır. GNSS-INS entegrasyonunda GNSS vasıtasıyla INS verisindeki sapma ve kaymalar önlenirken, INS GNSS sinyalinin kesintiye uğradığı altgeçit gibi alanlarında veya multipath hatalarında GNSS sinyallerine destek olarak konum bilgisinin daha yüksek doğrulukta elde edilmesini sağlamaktadır (Groves, 2013). GNSS ve INS sisteminin birleştirilmesi ile konum, hız ve yönelim bilgilerinden navigasyon bilgisi sağlanır. Böylece GNSS/INS sistemi araç navigasyonlarında, mobil haritalama uygulamalarında, savunma sanayi sistemlerinde vb. uygulamalarda kullanılabilmektedir (Chen ve diğ., 2020). GNSS alıcısından ve INS'den alınan verilerin birleştirilmesi ile navigasyon verisi üretmek için Kalman filtresi veya bunun değiştirilmiş versiyonları uygulanmaktadır (Zhou ve diğ., 2010). Şekil 8.1'de GNSS/INS entegrasyon şeması gösterilmiştir. GNSS ve INS entegrasyonunda Tightly–Couple (TC), Loosely–Coupled (LC) ve Deeply–Coupled (DC) olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır (Zhou ve diğ., 2010). Deeply – Coupled (DC) GNSS temel bant sinyal işlemlerini içerir ve bu da ticari GNSS alıcılarının çoğu için verilmemiştir (Wen ve diğ., 2019). Bu tezde yalnızca TC ve LC yöntemleri ele alınacaktır.

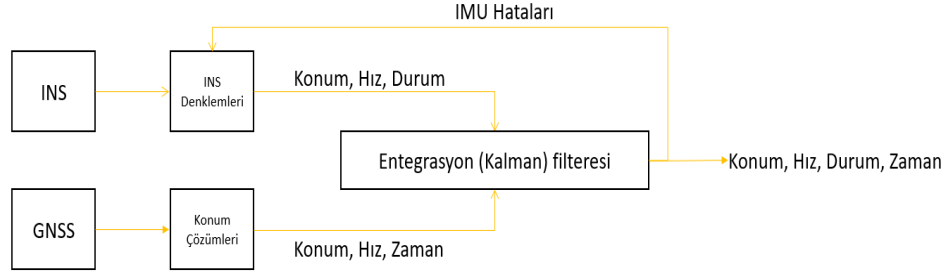


Şekil 8.1. GNSS/INS entegrasyon şeması

GNSS/INS entegrasyonunda kullanılan LC ve TC arasındaki en büyük fark GNSS ölçümlerinin kullanımındır. LC yönteminde GNSS alıcısından gelen pozisyon ve hız tahminleri direkt INS çözümleri ile birleştirilirken, TC yönteminde GNSS alıcısının ham datası (pseudorange ve Doppler gözlemleri) kullanılmaktadır (Falco ve diğ., 2017).

8.1. Loosely - Coupled (LC)

Bu yöntemde GNSS alıcısından alınan konum ve hız bilgileri INS hatalarını tahmin etmekte kullanılan Kalman filtresine ölçüm olarak girerken, Kalman filtresinin tahminleri düzeltilen INS navigasyonun çözümü olmaktadır (Falco ve diğ., 2012). Böylece entegrasyon belirli bir bölge alanında değil konum alanında gerçekleştirilir (Groves, 2013). IMU'dan gelen ham veriyi işleyen INS denklemleri navigasyon verisi oluştururken sistemde oluşan hatalar hakkında bilgi sağlamazlar ve bundan dolayı da INS'den üretilen navigasyon bilgisinin doğruluğu daha düşüktür (Klein ve diğ., 2011). Navigasyon bilgisinin doğruluğunu artırmak amacıyla navigasyon çözümlerinden, INS çözüm denklemleri geri beslenerek IMU'yu etkileyen hataları azaltılmaktadır (Falco ve diğ., 2017). LC yönteminin yapısı Şekil 8.2'de gösterilmektedir.



Şekil 8.2 Loosely-Coupled yapı şeması

LC yöntemi ile GNSS/INS füzyonunda hataların tahmin edilmesinde GNSS çözümleri kullanılır. Kalman filtresi ile LC yönteminin modeli aşağıdaki şekilde dizayn edilmiştir.

Durum Modeli

Ana durum vektörü üç pozisyon hatası, üç hız hatası ve üç durum hatasından oluşan dokuz parametrelili tahmin vektörüdür.

$$\underline{\delta \dot{x}^n} = \begin{bmatrix} \delta \dot{r}^n \\ \delta \dot{e}^n \\ \delta \dot{v}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{rr} & F_{rv} & F_{re} \\ F_{vr} & F_{vv} & F_{ve} \\ F_{er} & F_{ev} & F_{ee} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta r^n \\ \delta e^n \\ \delta v^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ R_b^n \delta f^b \\ R_b^n \delta w^b \end{bmatrix} = F \cdot \underline{\delta \dot{x}^n} + G \cdot \underline{w} \quad (8.1.)$$

Burada :

$$F = \begin{bmatrix} F_{rr} & F_{rv} & F_{re} \\ F_{vr} & F_{vv} & F_{ve} \\ F_{er} & F_{ev} & F_{ee} \end{bmatrix} \quad (8.2.)$$

Denklem 8.2 dinamik matrisi ifade etmektedir ve bu dinamik matrisin çıkarımı 7. kısımda denklem 7.12 ile 7.20 arasındaki denklemlerde açıklanmıştır.

Denklem 8.1'deki durum vektöründeki her bir terim şu şekilde açıklanmaktadır:

$$\underline{\delta \dot{x}^n} = \begin{bmatrix} \delta \dot{r}^n \\ \delta \dot{e}^n \\ \delta \dot{v}^n \end{bmatrix} \quad \text{\textit{r} pozisyon, \textit{e} durum, \textit{v} hız hatasının durum matrisini}$$

tanımlamaktadır. $\text{\textit{r}}$ pozisyon hatalarının vektörü denklem 8.3'te gösterilmektedir.

$$\delta r^n = \begin{matrix} \delta\varphi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{matrix} \text{ pozisyon hataları matrisini}$$

(8.3.)

Denklem 8.3'teki $\delta\varphi$ ifadesi enlem değerinin hata vektörünü, $\delta\lambda$ ifadesi boylam değerinin hata vektörünü, δh ifadesi ise yükseklik değerinin hata vektörünü temsil etmektedir.

$$\delta v^n = \begin{matrix} \delta V_E \\ \delta V_N \\ \delta V_U \end{matrix} \text{ hız hataları matrisini}$$

(8.4.)

Denklem 8.4 ise hız hataları vektörünü temsil etmektedir ve burada δV_E ifadesi doğu yönündeki hız vektörünün hata matrisi, δV_N ifadesi kuzey yöndeki hız vektörünün hata matrisi, δV_U ifadesi de yukarı yöndeki hız vektörünün hata matrisini ifade etmektedir.

$$\delta e^n = \begin{matrix} \varepsilon_E \\ \varepsilon_N \\ \varepsilon_U \end{matrix} \text{ durum hataları vektörü}$$

(8.5.)

Denklem 8.5'te ise durum hatalarının vektörü verilmektedir ve burada ε_E ifadesi doğu yönündeki durum hatasının vektörünü, ε_N ifadesi kuzey yönündeki durum hatasının vektörünü, ε_U ifadesi de yukarı yöndeki durum hatasının vektörünü ifade etmektedir.

Yine denklem 8.1' de ifade edilen R_b^n body frame ile n nokta frame arasındaki dönüşümü, $w = \begin{matrix} \delta f^b \\ \delta w^b \end{matrix}$ ise ölçülen kuvvet ve ölçülen açı hatalarını ifade etmektedir.

$$\delta f^b = \delta b_a + \eta_a$$

$$\delta w^b = \delta b_a + \eta_a$$

(8.6.)

Denklem 8.6'daki eşitlikler ise IMU kaynaklı ivmeölçer ve jiroskop hataları ve gürültülerini ifade etmektedir (Angrisano, 2010). Durum modeli oluşturulduktan sonra ölçüm modelinin tanımlanması gerekmektedir. Ölçüm modeli :

GNSS ile INS arasında lever-arm olarak adlandırılan üç farklı ekseninde öteleme bulunabilmektedir. Bu değerlerin doğru ve hassas şekilde ölçülerek denkleme katılması gerekmektedir (Chai ve diğ., 2018).

$$\hat{r}_{GNSS}^n = r_{INS}^n + DC_b^n l^b$$

$$\hat{V}_{GNSS}^n = V_{INS}^n + C_b^n (w_{nb}^b x) l^b$$

(8.7.)

Denklem 8.7 ile GNSS ve INS arasındaki lever-arm değerlerinin pozisyon ve hız değerlerine olan etkisi gösterilmektedir ve burada r_{INS}^n ve V_{INS}^n ifadeleri n referans sistemindeki INS merkezindeki pozisyon ve zaman değerlerini, $\hat{r}_{GNSS}^n$ ve $\hat{V}_{GNSS}^n$ değerleri GNSS merkezinden hesaplanan lever-arm etkili pozisyon ve hız değerlerini, l^b GNSS merkezinden INS merkezine olan lever-arm değerlerini ifade etmektedir.

LC yöntemindeki ölçüm modeli denklemi şu şekildedir:

$$Z_k = H_k X_k + v_k$$

(8.8.)

Bu denklemde v_k ölçüm gürültüleri, Z_k ölçüm sonuç matrisi, H_k ölçüm matrislerini ifade etmektedir.

$$Z_k = \begin{bmatrix} \hat{r}_{GNSS}^n - \tilde{r}_{GNSS}^n \\ \hat{V}_{GNSS}^n - \tilde{V}_{GNSS}^n \end{bmatrix}$$

(8.9.)

Denklem 8.9'da ise denklem 8.8'deki Z_k ifadesinin açılımı gösterilmektedir ve bu denklem içerisindeki değerlerde denklem 8.7'deki değerler üzerinden

oluşturulmaktadır. Ayrıca $\tilde{r}_{GNSS}^n$ ve $\tilde{V}_{GNSS}^n$ n referans sisteminde GNSS anten merkezinin pozisyon ve hız bilgilerini w_{in}^n ise n referans sisteminden i referans sistemine göre olan açışal hızı ifade etmektedir (Chai ve diğ., 2018).

$$H_k = \begin{bmatrix} DC_b^n(l^b x) & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -(w_{in}^n x) C_b^n(l^b x) - (C_b^n(l^b x w_{in}^n) x) & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & C_b^n(l^b x) & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (8.10.)$$

Denklem 8.10'da ise denklem 8.8'deki H_k ifadesinin açılımı gösterilmektedir.

Durum vektörü oluşturulması sonrasında ölçüm vektörü oluşturulmuş ve şimdi de Kalman durum vektör matrisinin tanımlaması yapılacaktır.

Kalman Durum Vektör:

15 boyutlu durum hata vektörü Kalman Filtresinde kullanılır. Bu 15 boyutlu matris içerisinde 9 navigasyon hatası 3 ivmeölçer sapması ve 3 jiroskop kayma hataları bulunmaktadır. Bu modelin denklemi şu şekilde verilmektedir:

$$X_k = \Delta_{k,k-1} X_{k-1} + \eta_k \quad (8.11.)$$

Eşitlik 8.11' de X hata durum matrisi, $\Delta_{k,k-1}$ iki epok arasındaki geçiş matrisi, η_k sistem gürültüsünü ifade etmektedir.

Kalman güncellemesi ile birlikte pozisyon değerleri Doğu, Kuzey ve Yükseklik olarak ifade edilmektedir. Radyan cinsinden ifade edilen konum hatalarında hata değerinin çok küçük olmasından dolayı Kalman filtresindeki hesaplamalarda sayısal kararsızlığı kaldırmak amacıyla dönüşüm yapılmaktadır. Kalman güncellemesi ile oluşan yeni durum vektörü:

$$X_{k-1} = [\delta r^n \ \delta v^n \ \delta e^n \ \delta b_a \ \delta b_g \ \delta S_a \ \delta S_g]^T \quad (8.12.)$$

8.12'deki denklemde sunulmaktadır.

$$X_k = [\delta P^n \ \delta v^n \ \delta e^n \ \delta b_a \ \delta b_g \ \delta S_a \ \delta S_g]^T \quad (8.13.)$$

8.13'te ise k epoğundaki durum vektörünü gösterilmektedir.

R dönüşüm matrisi ise denklem 8.14'te verilmektedir.

$$R = \begin{bmatrix} A & 0_{3 \times (n-3)} \\ 0_{3 \times (n-3)} & I_{n-3} \end{bmatrix} \quad (8.14.)$$

Denklem 8.13'te verilen durum vektöründeki ifadelerin terimleri ise şu şekilde tanımlanmaktadır:

$\delta P^n = [\delta D \ \delta K \ \delta U]^T$ Doğu, Kuzey ve Yükseklik formatında konum bilgisini,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & (N+h)\cos\varphi & 0 \\ M+h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A \text{ matrisi } \delta r^n \text{'nin } \delta P^n \text{'ye dönüşüm}$$

matrisidir.

$$Z_k = \begin{bmatrix} \hat{r}_{GNSS}^n - \tilde{r}_{GNSS}^n \\ \hat{v}_{GNSS}^n - \tilde{v}_{GNSS}^n \end{bmatrix} \quad (8.15.)$$

8.15 denkleminde ifade edilen ölçüm modeli Kalman ile birlikte 8.16 ölçüm modeline dönüşmektedir.

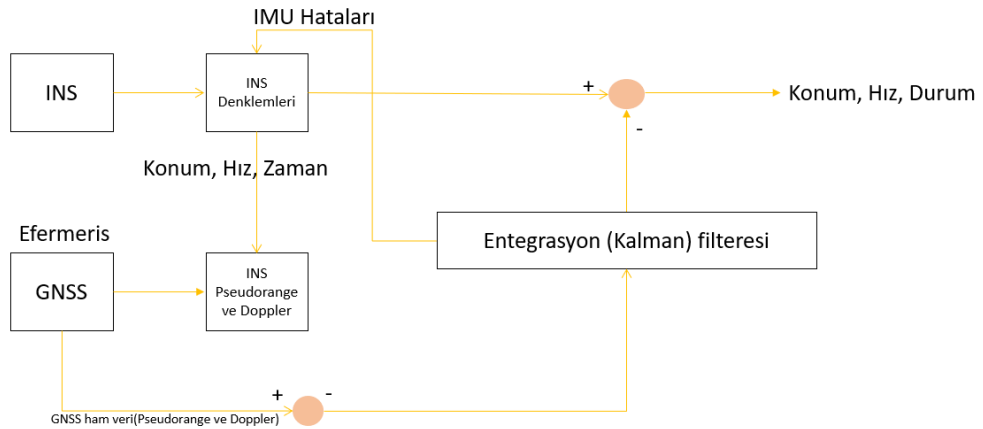
$$Z_k = \begin{bmatrix} \hat{P}_{GNSS}^n - \tilde{P}_{GNSS}^n \\ \hat{V}_{GNSS}^n - \tilde{V}_{GNSS}^n \end{bmatrix} \quad (8.16.)$$

LC yönteminin her türlü INS ve GNSS cihazı ile çalışabilen bir yöntem olarak uygulanabilmesi ve çözümünün basit olması en avantajlı yönlerindendir. Diğer bir avantajı ise entegre çözüme ek olarak bağımsız bir GNSS çözümünü de içerisinde barındırmasıdır (Groves, 2013). GNSS alıcısının sağladığı konum ve hız bilgilerindeki hatalar ile birlikte INS tahmini zamanla daha düşük doğrulukta

yayınlandıkça filtre ağırlığının küçülmesine neden olmaktadır. Bu da sonunda entegre çözümün sadece GNSS çözümlerinden oluşmasını sağlamaktadır (Grewal ve diğ., 2020). GNSS sinyallerinin kesildiği alanlarda INS'i yarımsız bırakmakta ve GNSS bilgileri direkt olarak yok sayılmaktadır.

8.2. Tightly – Coupled (TC)

Bu yöntemde GNSS alıcısından almış olduğu ham veriler olan pseudorange ve Doppler gözlemlerini ve INS gözlemlerini doğrudan özelleştirilmiş bir Kalman filtresinde işleyerek navigasyon sonuçları üretmektedir (Wendel ve Trommer, 2004; Falco ve diğ., 2017; Wen ve diğ., 2019). Geleneksel Kalman filtresi GNSS ham verilerinin doğrusal olmaması nedeniyle TC yönteminde kullanılamamaktadır (Hu ve diğ., 2014). TC yöntemi LC yöntemine göre bazı avantajlar içermektedir. TC yönteminde ham GNSS verileri kullanıldığında en az 4 uydu görünmemesi durumunda görülen kadar uydudan gelen pseudorange ve deltarange verileri ile INS'i desteklemeye devam edebilmektedir (Wendel ve diğ., 2005). TC yöntemi GNSS'in kısmen engellenmiş olduğu alanlarda daha çok tercih edilmektedir (Chiang ve diğ., 2019). Ancak yüksek gürültü ve multipath hatalarından pseudorange ölçmeleri, faz ölçmelerinden daha çok etkilenmektedir (Dong ve diğ., 2020). Bu da bazı uygulamalarda faz ölçümlerinin tercih edilmesine sebep olmaktadır (Ye ve diğ., 2021). Şekil 8.3' te TC yönteminin genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 8.3 Tightly Coupled yöntemi genel şeması

TC yöntem ile durum vektörünün tahmininin yapılması için merkezi bir Kalman filtresi GNSS pseudorange ve Doppler gözlemleri ile INS'den türetilen konum, hız ve durum ölçümlerini kullanır (Li ve diğ., 2017).

Gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki farktan oluşan hata durum matrisi LC yönteminden farklı olarak GNSS alıcısının saat hatasını da içermektedir

(Hu ve diğ., 2015).

INS hata durum matrisi ENU koordinat referans sisteminde tanımlanmak üzere:

$$\dot{X}_I = F_I(t)X_I(t) + G_I(t)W_I(t) \quad (8.17.)$$

denklem 8.17 verilmektedir ve burada $X_I(t)$ sistem durum matrisini, $W_I(t)$ sistem gürültü matrisini, $F_I(t)$ sistem dinamik matrisini ve $G_I(t)$ gürültü katsayı matrisini tanımlamaktadır (Hu ve diğ., 2015). Sistem durum matrisi $X_I(t)$ ise denklem 8.18’de şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\delta x = \hat{x}_{tahmin} - x_{kesin} \quad (8.18.)$$

Buradan denklem 8.18 deki durum matrisinin hata vektörü ise denklem 8.19’da açıklanmıştır.

$$\delta x = \begin{cases} \delta p_n = [\delta x_K \ \delta x_D \ \delta x_h]^T & (\text{Pozisyon Hatası NED referans sisteminde}) \\ \delta v_n = [\delta v_K \ \delta v_D \ \delta v_h]^T & (\text{Hız Hatası NED referans sisteminde}) \\ \delta \varepsilon_n = [\delta \emptyset \ \delta \theta \ \delta \varphi]^T & (\text{Durum Hatası}) \\ \delta f_b = [\delta f_x \ \delta f_y \ \delta f_z]^T & (\text{Accelerometre Bias Hatası Body Referans Sisteminde}) \\ \delta w_b = [\delta w_x \ \delta w_y \ \delta w_z]^T & (\text{Gyroscope Bias Hatası Body Referans Sisteminde}) \\ c\delta t & (\text{GNSS Alıcısı Saat Hatası}) \\ c\delta \dot{t} & (\text{GNSS Alıcısı Saat drift Hatası}) \end{cases} \quad (8.19.)$$

Denklem 8.19’da her bir terimin açıklaması yapılmıştır. Durum hata vektöründen sonra sistemin dinamik matrisi oluşturulmaktadır.

Sistem Dinamik matrisi $F_I(t)$ şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\begin{bmatrix} F_{PP} & F_{Pv} & F_{P\varepsilon} & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ F_{vP} & F_{vv} & F_{v\varepsilon} & R_b^n & 0_3 & R_b^n \cdot F^b & 0_3 & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ F_{\varepsilon P} & F_{\varepsilon v} & F_{\varepsilon\varepsilon} & 0_3 & R_b^n & 0_3 & R_b^n \cdot W^b & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & \beta_{ba} & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & \beta_{bg} & 0_3 & 0_3 & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & \beta_{sa} & 0_3 & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & \beta_{sg} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(8.20.)

Denklem 8.20’de sistem dinamik matrisinin gösterimi yapılmıştır. Sonrasında denklem 8.17’deki diğer bir ifade olan sistem gürültü matrisi oluşturulacaktır.

Sistem gürültü matrisi $W_I(t)$ şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\begin{bmatrix} \eta_a \\ \eta_g \\ \eta_{ba} \\ \eta_{bg} \\ \eta_{sa} \\ \eta_{sg} \\ \eta_{offset} \\ \eta_{drift} \end{bmatrix}$$

(8.21.)

8.21’de sistemin gürültü matrisinin tanımlaması yapılmıştır.

Sistemin hata durum matrisleri oluşturulduktan sonra GNSS ve INS gözlemlerimin denklemleri ifade edilecektir.

GNSS/INS gözlemlerinin entegrasyon denklemleri:

INS sisteminin pseudo-distance koordinatları

$$p_{INS\ i} = \sqrt{(x_i - x_{si})^2 + (y_i - y_{si})^2 + (z_i - z_{si})^2}$$

(8.22.)

Denklem 8.22’de INS sisteminin pseudo-distance denklemleri ifade edilmektedir.

GNSS alıcısının pseudorange ölçüm denklemi

$$p_i = r_i + \delta t + v_{pi}$$

(8.23.)

Denklem 8.23 ise GNSS alıcısının pseudorange gözlemlerinin denklemini ifade etmektedir ve burada $r_i = \|r - r_s^i\|$ i. uydu ile GNSS alıcısı arasındaki geometrik uzaklığı, δt GNSS alıcısı saat hatasını, v_{pi} i. uydudaki beyaz gürültü hatasını temsil etmektedir.

GNSS ve INS sistemlerinin entegre ölçüm denklemi:

$$\delta p_i = p_{INS\ i} - p_{GNSS\ i} = e_{i1}\delta x + e_{i2}\delta y + e_{i3}\delta z - \delta t - v_{pi}$$

(8.24.)

Denklem 8.24'te ise iki sistemin entegrasyonundan oluşan ölçüm denklemi gösterilmektedir. Ölçüm denklemlerinin oluşturulmasından sonra Kalman filtresi ile güncelleme işlemine geçilmektedir.

Extended Kalman Filter (EKF) için ölçüm denklemleri ise şu şekilde yazılmaktadır:

Denklem 8.25 r_{INS} k zamanındaki INS konumu olarak varsayılırsa tahmini mesafe:

$$\hat{p}_i = \|r_{ins} - r_s^i\|$$

(8.25.)

8.25 eşitliği ile oluşturulmaktadır. Daha sonrasında INS konum hatası δr olarak ifade edilirse:

$$\delta r = r - r_{ins}$$

(8.26.)

Denklem 8.26 ile INS konum hatasının r kesin değerlerinin r_{ins} gözlem değerlerinin farkı olarak tanımlanmaktadır.

GNSS alıcısının pseudorange ölçüm denklemi lineerleştirilirse:

$$p_i = \hat{p}_i + Jacobi_i r_{ins} . \delta r + \delta t + v_{pi}$$

(8.27.)

Denklem 8.27'deki Jacobi i. ölçümdeki Jacobian matrisi ifade etmektedir.

$$D_u = [Jacobi_1 r_{ins} Jacobi_2 r_{ins} Jacobi_3 r_{ins} Jacobi_4 r_{ins}]^t \quad (8.28.)$$

Denklem 8.28'de D_u dört farklı uyduya yapılan INS gözlemlerinin jacobian matrislerini ifade eden vektörleri ifade ederken ve 8.29'daki $e = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 'den oluşmaktadır.

$$G_k(r_{ins}) = [D_u \ e] \quad (8.29.)$$

Denklem 8.30'da EKF için karşılık gelen mesafe ölçüm denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\delta p = G_k(r_{ins}) \cdot \begin{bmatrix} \delta r \\ \delta t \end{bmatrix} + v_p \quad (8.30.)$$

8.30'da yazılan mesafe denkleminin uygun hale getirmek için, sistem durum vektöründe Enlem, Boylam ve Yükseklik değerleri kullanıldığından δr koordinatları jeodezik koordinata çevrilir. Dönüşüm matrisi şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$C_g^e = \begin{bmatrix} -(N+h) \sin L \cos \lambda & -(N+h) \cos L \sin \lambda & \cos L \sin \lambda \\ -(N+h) \sin L \sin \lambda & -(N+h) \cos L \cos \lambda & \cos L \sin \lambda \\ (N(1-f^2)+h) \cos L & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.31.)$$

$$\delta r = C_g^e \cdot \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta \lambda \\ \delta h \end{bmatrix} \quad (8.32.)$$

Denklem 8.32'nin çözümü ile jeodezik koordinatlar elde edilmiş olmaktadır. Sonrasında Kalman için durum vektörünün tanımlanması yapılmaktadır.

EKF için yazılan denklem:

$$Z_k^{EKF} = H_k X_k + V_k \quad (8.33.)$$

Denklem 8.33’de ifade edilen Z_k^{EKF} değeri, denklem 8.30’daki δp değerine eşit olmakta, X_k sistem durum vektörü, $H_k = [0_{4 \times 6} \ D_u \cdot C_g^e \ 0_{4 \times 6} \ e \ 0_{4 \times 6}]$ olmakta ve $V_k = v_p$ olmaktadır.

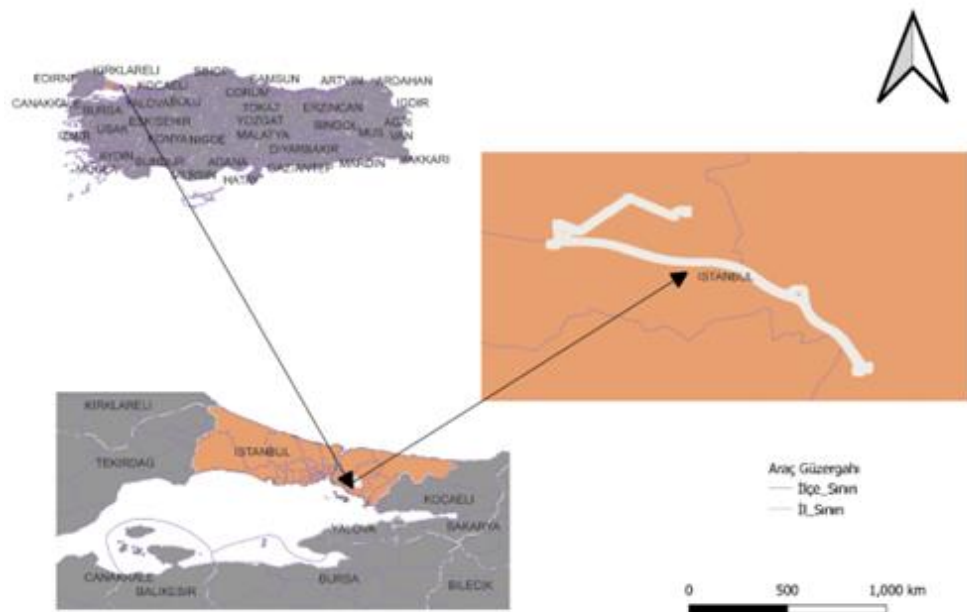
TC yöntemi GNSS ve GNSS/INS entegrasyon algoritmasının ortak çözümü ile LC yöntemindeki GNSS/INS entegrasyonunda Kalman filtresi kullanıldığında oluşan kademeli filtre sorunlarını ortadan kaldırabilmektedir (Xia ve Wang, 2016). TC yönteminde LC yöntemine göre daha yüksek kazanımlar elde edilebilmektedir. Bu söz konusu kazanımlar uydu geometrisi ve erişilebilirliği gibi değişkenlerden dolayı yoldan hesaba katılması ile INS hatalarının stokastik gözlemlenebilirliğinin artmasıyla gerçekleşmektedir (Groves, 2013). TC yöntemi yalnızca GNSS çözümü içermediğinden dolayı, GNSS çözümlerinin daha iyi olduğu yerlerde INS çözümlerinin getirdiği hata INS/GNSS entegrasyonun etkilemekte ve yapılan uygulamanın doğruluğunu düşürmektedir (Groves, 2013).

9. UYGULAMA

Bu çalışmada 4. seviye sürücüsüz bir otonom araç için gerekli olan konum bilgisinin en doğru şekilde üretilmesi amacıyla; farklı GNSS ölçme yöntemleri, farklı uydu kombinasyonları ile farklı GNSS/INS entegre modellerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Yoğun şehir alanlarında güzergahı bulunan bu araçlar için konum belirlemedeki en avantajlı yöntemin belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. GNSS çözümleri için PPP ve PPK yöntemleriyle çözümlenirken, GNSS sisteminin INS ile entegrasyonu Tightly-Couple (TC) ve Loosely Couple (LC) yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

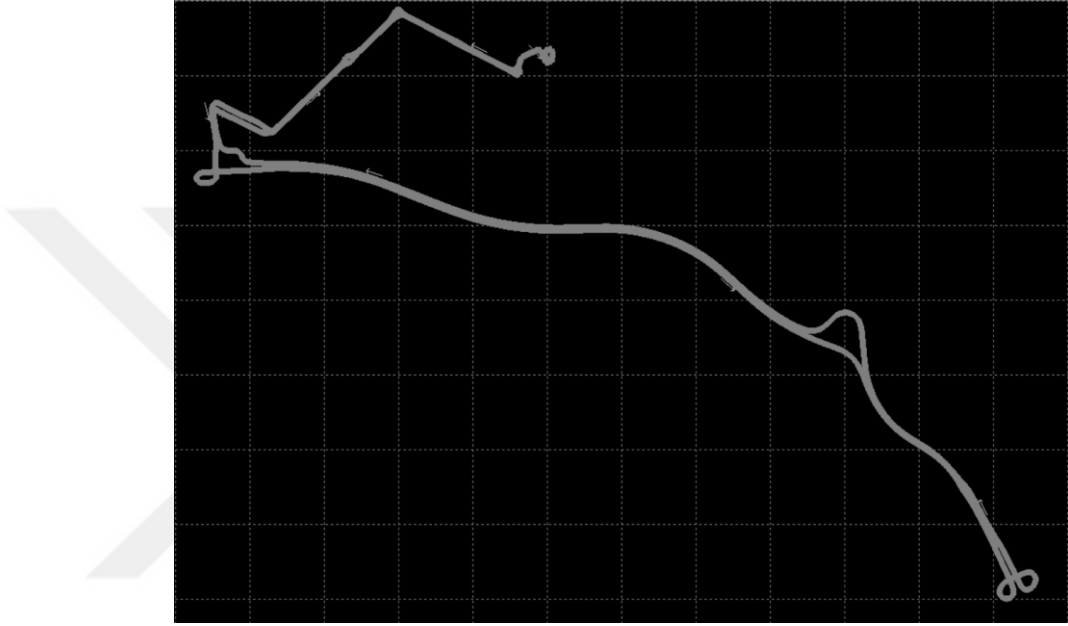
9.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak İstanbul ili içerisinde yoğun şehir alanlarını kapsayan bir bölge seçilmiştir. Çalışma bölgesi içerisinde alt geçit, yüksek binalar, ağaçlar, yüksek gerilim hatları bulunmaktadır. Bu alanlar GNSS gözlemleri için uydu kayıplarına, kötü uydu geometrisine ve çoklu sinyal yansımalarına yol açacak alanlardır. Bu alanlarda GNSS ile konum belirlemede yüksek doğruluklu konum bilgisi üretilmesinde problemler yaşanabileceği daha önceki literatür çalışmalarında net bir şekilde belirtilmiştir. Bu alanlarda INS entegrasyonun GNSS yardımı ile daha iyi bir konum çözümü elde edilip edilmeyeceği farklı yöntemler ile incelenmiştir. Şekil 9.1’te çalışma alanı gösterilmektedir.



Şekil 9.1. Çalışma alanı

Çalışma alanı içerisinde var olan yüksek binalar GNSS çalışma şartları açısından zorlu alanları ifade etmektedir. GNSS yöntemi ile konum belirlemede doğruluk üzerinde etkisi olan uydu geometrisinin böyle kısıtlayıcı alanlarda çok iyi olmayacağı bilinmektedir. Otonom aracın altgeçitlerden geçişlerinde GNSS sinyallerinin kesildiği gözlenmektedir. Bu da söz konusu alanlarda GNSS konum bilgisi üretemeyeceği ve INS tarafından desteklenmesi gerektiğini gözler önüne sermektedir. Şekil 9.2’de otonom aracın güzergahı gösterilmektedir.



Şekil 9.2. Çalışma güzergahı

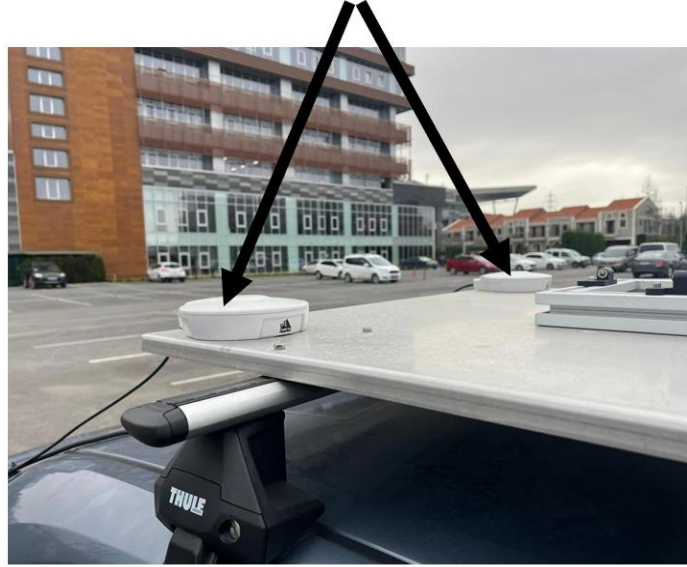
9.2. Veri Toplama:

Veri toplamak için 4. seviye otonom bir araç olan Toyota Corolla kullanılmıştır (Şekil 9.3). 4. Seviye otonom bir araç belli bir rota üzerinde etrafını algılayarak tam otonom şekilde gidebilmektedir. Çevre haritasına ihtiyaç duyan 4. Seviye otonom araçlar için HD haritalar üretilmektedir. Bu haritalar üzerinde kendini konumlayan araç istenilen rota üzerinde otonom şekilde ilerleyebilmektedir.. Şekil 9.4’te ve Şekil 9.5’te ise 4. seviye sürücüsüz araç ve üzerinde bulunan sensörler gösterilmektedir.

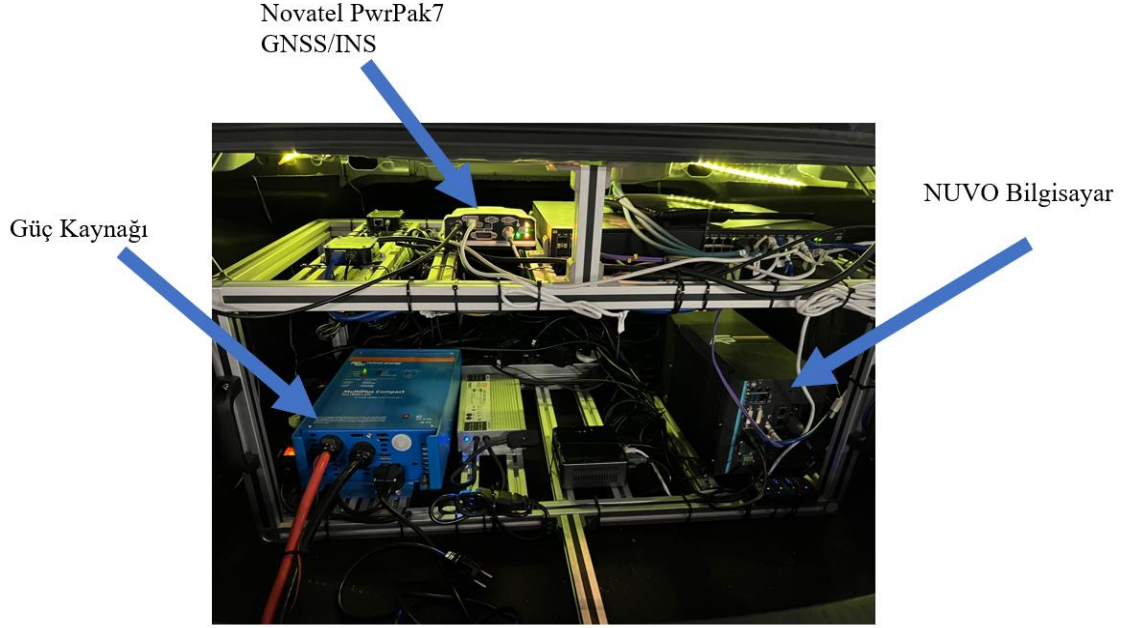


Şekil 9.3. 4. seviye otonom araç

VEXXIS GNSS-502
ANTEN



Şekil 9.4. Kullanılan GNSS antenleri



Şekil 9.5. Sürücüsüz araç sensörleri

Yapılan ölçümlerde Şekil 9.5’ te gösterilen NovAtel PwrPak7 GNSS/INS sistemi ve Şekil 9.4’teki VEXXIS GNSS-502 GNSS antenleri kullanılmıştır. PwrPak7 ürünün içerisinde NovAtel OEM7 GNSS alıcısı ve Epson G320N IMU bulunmaktadır. Şekil 9.6’da NovAtel PwrPak7 ve içindeki ürünler gösterilmiştir.



Şekil 9.6. Novatel PwrPak7

PwrPak7 GNSS ve INS sistemlerini ortak tek bir kapalı kutu içerisinde sunan

bir üründür. GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU, SBAS ve QZSS uydularını izleyebilen PwrPak7, L-bandı sinyallerini de izleyebilmektedir. Veri toplamak için GNSS/INS alıcısı çalıştırılmış ve veri toplamaya başlanmıştır. İlk 30 dk. durağan şekilde beklendikten sonra seçilen güzergahta harekete başlanmış ve yaklaşık 1 saat 6 dakikalık süre ve 15 Km boyunca kinematik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Hareket bitirdikten sonra 30 dk. daha durağan şekilde bekleyerek veri toplanmaya devam edilmiş ve ölçüm sonlandırılmıştır. Veriler 05.01.2022 tarihinde akan bir trafikte 20-80 km/h hızları arasında toplanmıştır.

Veri toplama kısmında NovAtel Application Suite uygulaması kullanılmıştır. Bu uygulamada toplanacak veri türü ve veri seçimi için terminal üzerinden yazılan komutlar kullanılmıştır. Şekil 9.7’de uygulama yapılırken kullanılan komutlar gösterilmektedir.

```

FILECONFIG OPEN

CONNECTIMU SPI EPSON_G320
SETINSTRANSLATION ANT1 -0.2878 0.6844 0.617 0.02 0.02 0.05 VEHICLE
SETINSTRANSLATION ANT2 0.5986 0.6883 0.625 0.02 0.02 0.05 VEHICLE
SETINSROTATION RBV 0 0 0
THISANTENNATYPE NOV702
ASSIGNLBANDBEAM AUTO
PPPDYNAMICS AUTO
NTRIPCONFIG NCOM1 CLIENT V1 sid-output.com:2101 SID08 SID MELs9tPw4 ALL
INTERFACEMODE NCOM1 VERIPOS NONE OFF
ETHCONFIG ETHA AUTO AUTO AUTO AUTO
ICOMCONFIG ICOM1 TCP :3001
IPCONFIG ETHA STATIC 192.168.1.50 255.255.255.0 192.168.1.1
LOG IPSTATUS
SAVEETHERNETDATA
LOG FILE VERSIONB ONCE
LOG FILE RXCONFIGB ONCE
LOG FILE RXSTATUSB ONCHANGED
LOG FILE THISANTENNATYPEB ONCE
LOG FILE HEADING2B ONNEW
LOG FILE INSCONFIGB ONCHANGED
LOG FILE RANGECPMB ONTIME 0.05
LOG FILE GPSEPHEMB ONNEW
LOG FILE GLOEPHEMERISB ONNEW
LOG FILE GALINAVEPHEMERISB ONNEW
LOG FILE GALFNAVEPHEMERISB ONNEW
LOG FILE BDSEPHEMERISB ONNEW
LOG FILE QZSEPHEMERISB ONNEW
LOG FILE RAWIMUSXB ONNEW
LOG FILE TIMEB ONTIME 0.05
LOG FILE BESTPOSB ONTIME 0.05
LOG FILE BESTGNSSPOSB ONTIME 0.05
LOG FILE INSPVAXB ONTIME 0.05
LOG FILE INSUPDATESTATUSB ONCHANGED

LOG FILE TRACKSTATB ONTIME 0.05
LOG FILE LBANDTRACKSTATB ONTIME 0.05
LOG FILE PPPPOSB ONTIME 0.05
LOG FILE PPPSATSB ONTIME 0.05
LOG FILE TERRASTARINFOB ONCHANGED
LOG FILE TERRASTARSTATUSB ONCHANGED
LOG FILE LBANDBEAMTABLEB ONCHANGED

FILECONFIG CLOSE

```

Şekil 9.7. Novatel Application Suite uygulama komutları

Şekil 9.7’de gösterilen komutlar ile öncelikli olarak kullanılan IMU’nun tanıtımı gerçekleştirilmiş, sonrasında IMU ile GNSS antenleri arasındaki lever-arm bilgileri girilmiş, anten tipi bilgisi verilmiş, port numaraları ve IP numaraları da girildikten sonra hangi verilerin kaydedilmek istendiği girilmiştir. Bu uygulama için ham GPS, GALILEO, BEIDOU, GLONASS uydularının verileri ve ham INS verileri toplanmıştır.

9.3. Çözümleme

Aracın konumunun belirlenmesi için Inertial Explorer post-process yazılımı kullanılmıştır (NovAtel, 2022). Bu program post-process PPP ve PPK yöntemlerini çoklu uydu sistemleri ile kullanarak konum bilgisi üretebilmektedir. Inertial Explorer yazılımı ile GNSS/INS entegrasyon çözümlerini farklı yöntemler ile gerçekleştirebilmektedir (NovAtel, 2022). Hem GNSS verilerinin tek başına değerlendirilebildiği, hem de GNSS/INS verileri ile esnek değerlendirmeler sağladığı için birçok uygulamada kullanılabilmektedir (NovAtel, 2022). Toplanan verilerin farklı şekilde proses edilebilmesi için Tablo 9.1’de gösterildiği üzere 48 farklı çözüm kombinasyonu oluşturulmuştur. Post-Process PPP çözümlemede Inertial Explorer yazılımında tüm değerlendirme işlemleri yapılırken, PPK yönteminde bu yazılıma referans bir GNSS alıcısının konum bilgileri eklenmiş ve diğer verilerin bu noktaya bağlı olarak çözümlemesi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 9.1. Çözümlerin numaralandırılması

Uydu kombinasyonu	PPP			PPK		
	GNSS	LC	TC	GNSS	LC	TC
GPS	1	9	17	25	33	41
GPS+GLONASS	2	10	18	26	34	42
GPS+GALILEO	3	11	19	27	35	43
GPS+BEIDOU	4	12	20	28	36	44
GPS+GLONASS+GALILEO	5	13	21	29	37	45
GPS+GLONASS+BEIDOU	6	14	22	30	38	46
GPS+GALILEO+BEIDOU	7	15	23	31	39	47
GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU	8	16	24	32	40	48

9.3.1. PPP-GNSS çözümü

PPP yöntemi çözümü için toplanan GNSS verileri Inertial Explorer programına yüklendikten sonra program içerisinde ölçümler ile aynı zamana ait hassas uydu yörünge ve saat bilgilerini çözüme dahil edilmiş ve sonra proses parametreleri Tablo 9.2’deki gibi belirlenmiştir. Bu parametreler, verilerin hangi kısımlarının kullanılabileceğini, belirleyebildiğiniz zaman aralığı veya sinyal ön filtrelemesi gibi seçenekler ile yapmak istediğiniz çözüm parametrelerini içermektedir.

Tablo 9.2 Precise Point Positioning (PPP) - GNSS ayarları

Proses Aralığı	0.05 sn
Epoğa göre Veri Seçimi	Veri Başlangıç ve Bitiş Epokları
Hassas Saat ve Yörünge Bilgileri	Çift frekanslı, hassas saat ve efemeris bilgileri var
Sinyal ön işleme Bilgileri	
Elimine Edilen Görüş Açısı	7.5 derece
L1 Frekansında Artık Zaman	4 sn

9.3.2. PPP-LC çözümü

Bu çözümde de GNSS ve INS verileri Inertial Explorer yazılımına entegre edildikten sonra GNSS verileri PPP-GNSS çözüm yöntemine göre çözümlenmiştir. PPP yöntemi ile güzergâhta konumlama işlemi yapıldıktan sonra LC yöntemine geçilmiştir. LC yöntemi gereği GNSS verilerinin çözümlendikten sonra INS verileri ile entegrasyonu sağlanmaktadır. Yine bu işlem için daha öncesinde belirli parametrelerin ayarlanması gerekmektedir. Bu parametreler, işlem yönü, IMU bilgileri, IMU ile GNSS antenleri arasındaki Lever-Arm değerleri, araç referans çerçevesi ile IMU referans çerçevesindeki dönüklük değerleri gibi sizin ölçüm kurulumunuza ait parametreler girilmektedir. Tablo 9.3'te bu parametrelerin ayarlandığı bölüm gösterilmektedir.

Tablo 9.3 PPP-LC ayarları

Proses Aralığı	0.05 sn
Epoğa göre Veri Seçimi	Veri Başlangıç ve Bitiş Epokları
Hassas Saat ve Yörünge Bilgileri	Çift frekanslı, hassas saat ve efemeris bilgileri var
Sinyal ön işleme Bilgileri	
Elimine Edilen Görüş Açısı	7.5 derece
L1 Frekansında Artık Zaman	4 sn
Proses Modeli	Precise Point Positioning (PPP)
Proses Yönü	İki Taraflı
Process Ayarları	
Profile	SPAN Kara Aracı (EPSON G320)
Datum	WGS84
Lever Arm Ayarları IMU'dan GNSS Antenine	
X	-0.288 m
Y	0.684 m

Z	0.617 m
IMU ve Gövde Arasındaki Dönüşüm	
X	0.000 derece
Y	0.000 derece
Z	0.000 derece

Lever-Arm ölçümlerinin doğru ölçülmesi oluşturulan tüm gözlemleri etkilediğinden dolayı kesin parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için de uygulama öncesi araç üzerinde bulunan GNSS antenleri ve IMU arasındaki Lever-Arm ölçümleri Total Station ölçüm aleti ile ölçülerek hassas şekilde belirlenmesi yapılmıştır.

Bu işlem bittikten sonra IMU cihazının özellikleri girilmektedir. Tablo 9.4'te IMU cihazına ait bilgilerin girilmesi gösterilmektedir.

Tablo 9.4 IMU ayarları

IMU Hata Modeli	NovAtel Span(Epson G320)
Lever Arm Çözüm Ayarları	
Standart Sapma	0.2 m
İvme Ölçer ve Jiroskop Ayarları	
İvmeölçer Ölçek Faktörü	25 ppm
Jiroskop Ölçek Faktörü	25 ppm
İvmeölçer Ortagonal	10 arcsec
Jiroskop Ortagonal	10 arcsec

Ölçüm ayarlarının da yapılması ile birlikte işlem başlatılır ve proses işlemi bittikten sonra GNSS ve INS entegrasyonu ile aracın konum bilgileri üretilmiş olmaktadır.

9.3.3. PPP-TC çözümü

TC yönteminde ise GNSS verileri tek başına değerlendirilmeden direkt INS ile birlikte değerlendirilmektedir. Bu adımda GNSS değerlendirmeleri olmadan işlem direkt TC çözümü ile başlamaktadır. Bunun içinde yine Tablo 9.5'te gösterilen parametrelerin girilmesi gerekmektedir.

Tablo 9.5 PPP-TC ayarları

Proses Modeli	Precise Point Positioning (PPP)
Proses Yönü	İki Taraflı
Process Ayarları	
Profile	SPAN Kara Aracı (EPSON G320)
Datum	WGS84
Lever Arm Ayarları IMU'dan GNSS Antenine	
X	-0.288 m
Y	0.684 m
Z	0.617 m
IMU ve Gövde Arasındaki Dönüşüm	
X	0.000 derece
Y	0.000 derece
Z	0.000 derece

Daha sonrasında yine ölçüm için gerekli parametreler girildikten sonra process işlemi başlatılır ve TC çözümü ile konum bilgisi üretilir.

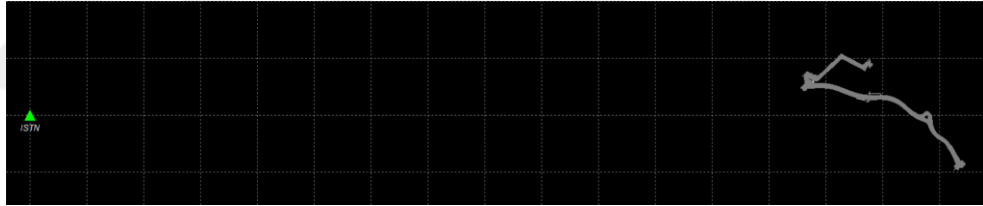
9.3.4. PPK-GNSS çözümü

Post Process Kinematik (PPK) yöntemi ile çözümleme yapılırken TUSAGA-Aktif ağına bağlı olan ISTN noktasının ölçüm zamanına ait 1 sn aralıklı verileri TUSAGA-Aktif sistemi web-sitesinden indirilmiş ve çözümde referans istasyon verisi olarak kullanılmıştır. TUSAGA-Aktif Türkiye Gerçek-Zamanlı Kinematik GNSS (TUSAGA-Aktif/CORS-TR) ağı 159 sabit GNSS istasyonunda sürekli GNSS gözlemleri yapılmaktadır (Cankurt ve diğ., 2019). Kullanılan istasyonun koordinatı ITRF-96 datum-2005.0 epoğunda mm doğruluğunda bulunmaktadır. Bu çözüm ile elde edilen tüm noktaların ITRF-96 datumu 2005.0 epoğuna göre konum bilgileri üretilmiş olmaktadır. Ancak PPP yöntemi ITRF-2014 datumunda ölçme epoğuna göre konum belirleme işlemi yapmaktadır. Bundan dolayı iki sistem arasında datum dönüşümü ve epok kaydırma işlemi gerçekleştirilmiştir. GNSS ve IMU verileri Inertial Explorer programına aktarıldıktan sonra PPP çözümünden farklı olarak referans istasyon hakkındaki Tablo 9.6'da gösterilen bilgilerin de burada girilmesi gerekmektedir.

Tablo 9.6 Referans İstasyon ayarları

İstasyon Adı	ISTN
Koordinat Bilgileri	
Enlem	40° 59' 27.462292" N
Boylam	28° 49' 53.882694" E
Elipsoidal Yükseklik	77.0522 m
Datum	ITRF96
Proses Datumu	WGS84
Epok	2005
Anten Yüksekliği	
İstasyon	ISTN
Anten profili	TRM55971.00
ARP'den ölçülen Yükseklik	0.087 m
ARP ve L1 arasındaki ofset	0.067 m
Uygulanan Yükseklik	0.154 m

Hem araçtan alınan hem de TUSAGA-Aktif'den alınmış olan GNSS verileri ISTN noktasının referans nokta olarak kabul edilmesi ile birlikte çözülür. Şekil 9.8'de araç güzergahı ve ISTN noktasının konumları gösterilmektedir.



Şekil 9.8. ISTN ve araç rotasının konumları

ISTN noktasının araç güzergahını ortalama uzaklığı 29.5 km'dir.

9.3.5. PPK-LC çözümü

PPK-LC yöntemi ile çözümleme gerçekleştirilirken öncelikle PPK-GNSS işlemindeki gibi GNSS verileri çözülür ve sonrasında INS verileri çözülür. GNSS verileri ile entegre edilerek tekrar konum bilgisi üretilmektedir.

9.3.6. PPK-TC çözümü

PPK-TC yöntemi ile çözümleme yapılırken PPK-GNSS ve PPK-LC yöntemlerinden farklı olarak, GNSS verileri çözülmeden önce GNSS/INS verileri ortak çözümleme yapılarak konum bilgisi üretilmektedir.

Tablo 9.1'de gösterilen çözümler içerisinde 27-32, 35-40, 43-48 numaralı çözümlerde sonuç elde edilememiştir. Bunun sebebi Tusaga-Aktif referans istasyonun koordinatları sadece GPS ve GLONASS uydu sistemlerini

desteklemektedir. 2006 yılında kurulan ağ, 2008 yılında aktif kullanıma başlanmıştır ancak sisteme yeterli güncellemeler getirilmemiştir (Cankurt ve diğ., 2019). Yalnızca GPS ve GLONASS uydularının desteklemesi TUSAGA-Aktif sisteminin güncellenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Günümüzde birçok GNSS alıcısı global sistemde bulunan GALILEO ve BEIDOU sistemlerini de desteklemekte iken TUSAGA-Aktif sisteminin bu desteği sağlamıyor olması özellikle otonom araçlar gibi zorlu ortamlarda kesintisiz konum bilgisi çözümüne gereksinim duyan bu sistemlerde her zaman yeterli doğruluğu sağlayamamaktadır. Ayrıca seçilen güzergâh üzerinde bulunan GNSS çözümlerini etkileyecek olan tünel, altgeçit, yüksek gerilim hatları gibi etmenlerden dolayı toplanan rotada çoklu GNSS alıcıları ile görülen uydu sayısı artırılırken, uydu geometrisinin de iyileştirilmesi beklenmektedir.

GNSS için zorlu koşullar altında yapılan ölçümlerde Tablo 9.7’de görülen epok sayılarında çözümleme yapılamamıştır. Tabloda yer alan (-) işareti ise yöntemin hiç çözüm sağlayamadığını göstermektedir.

Tablo 9.7. Çözümlere göre eksik epok sayıları

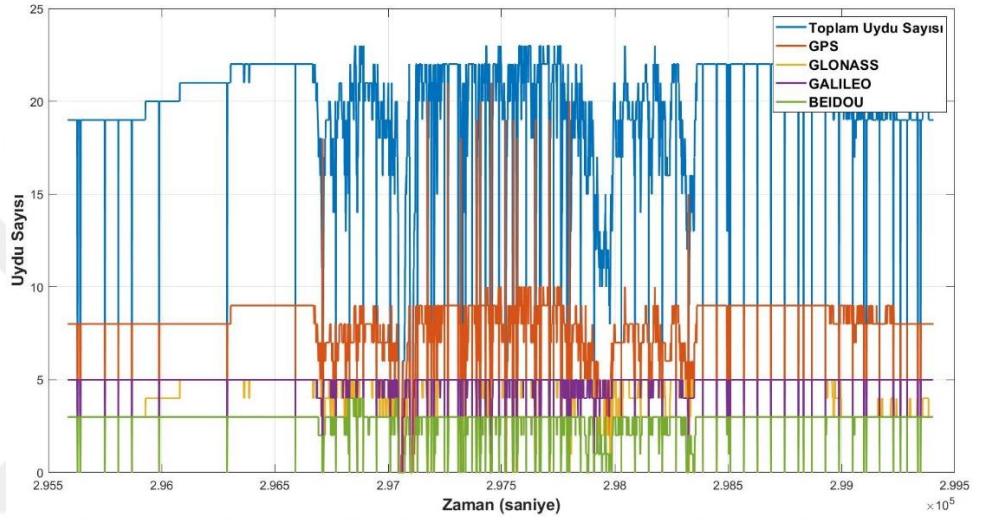
Uydu kombinasyonu	PPP			PPK		
	GNSS	LC	TC	GNSS	LC	TC
GPS	2026	0	0	1679	0	0
GPS+GLONASS	1177	0	0	1562	0	0
GPS+GALILEO	894	0	0	-	-	-
GPS+BEIDOU	1423	0	0	-	-	-
GPS+GLONASS+GALILEO	775	0	0	-	-	-
GPS+GLONASS+BEIDOU	1069	0	0	-	-	-
GPS+GALILEO+BEIDOU	823	0	0	-	-	-
GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU	726	0	0	-	-	-

Tabloda yer alan eksik epok çözümlerinin tamamının otonom aracın köprü geçişleri vb. gibi yeterli uydu verisi toplayamadığı durumlarda meydana gelmektedir. Bu durumlarda çoklu uydu sistemleri her ne kadar çözüm sağlamış olsa da elde edilen çözümler kimi durumlarda çok yüksek hatalar içermektedir. Bu durumun elde edilen verilerin analizinde yanlışlıklar oluşturmaması adına eksik olan veri saniyeleri tüm veri setlerinden çıkarılmış ve sonuçlar çıkarılan veri setleri kullanılarak oluşturulmuştur.

10. BULGULAR

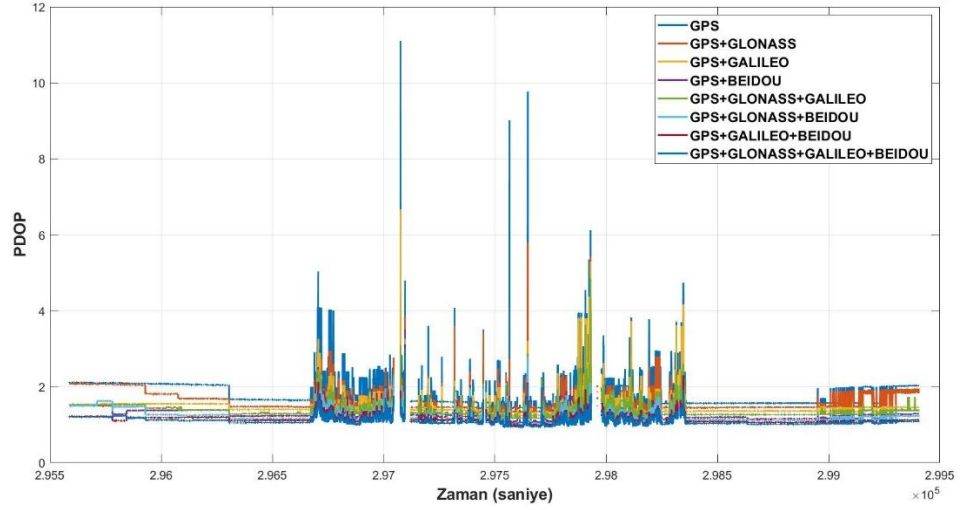
10.1. Duyarlılık Kaybı

GNSS ile konum belirlemede en önemli etmenlerden biri de uydu sayısı ve uydu geometrisidir. Sürücüsüz araçların güzergahlarında yoğun şehir alanları, havaalanları, kampüsler gibi ortamlar olmasından dolayı bazen yeterli uydu sayısının olmaması veya uydu geometrisinin kötü olması üretilen konum bilgisinin doğruluk değerlerini düşürmektedir. Şekil 10.1’de güzergâh boyunca gözlenen uydu sayıları verilmiştir.



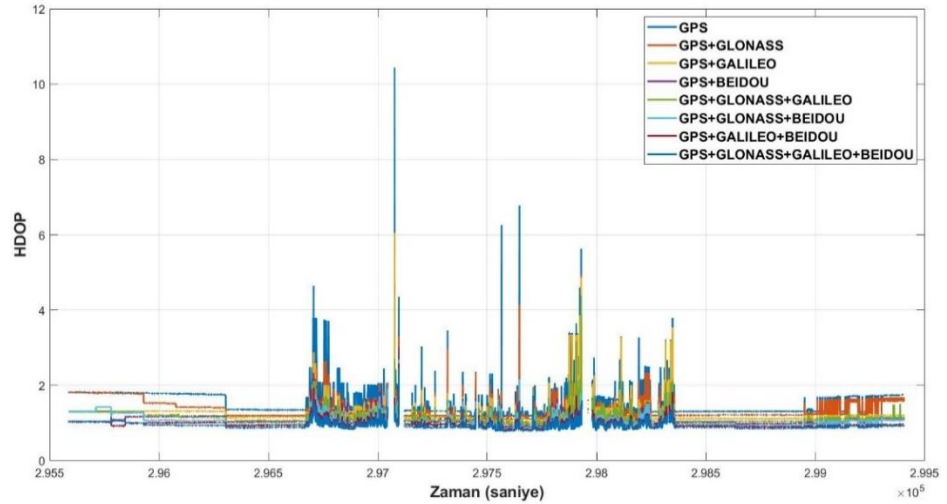
Şekil 10.1. Gözlenen uydu sayısı

GPS uyduları en baskın sistem olarak diğer uydu sistemlerinden neredeyse tüm epoklarda daha fazla sayıda ulaşılabilir olmaktadır. Ancak diğer sistemlerin de kullanılması ile sadece GPS sistemlerinin kullanılmasından iki katından daha fazla sayıda uydu sayısına ulaşılmaktadır. Şekil 10.2’de ise PDOP değerleri ile uydu geometrisinin konumsal duyarlılık kayıpları gösterilmektedir. Bölüm 3.1.6’da verildiği üzere DOP değerlerinin düşük olduğu değerlerde en doğru konum bilgisinin elde edilebileceği söylenirken, bu sayının artması uydu geometrisinin kötüye gittiğini ifade etmektedir.

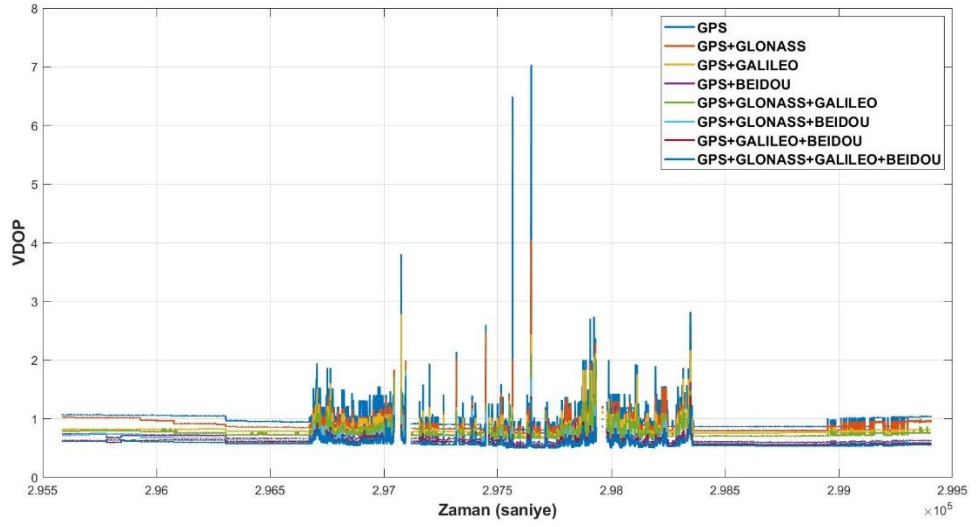


Şekil 10.2. PDOP değerleri

Şekil 10.2’de görüldüğü gibi bütün uydu sistemlerinin ortak kullanılması ile oluşturulan çözümlerde en doğru 3B konum bilgisini üretmek için gerekli PDOP değerlerine ulaşıldığı gözlenmekte iken, en baskın ve sağlam sistem olan GPS’in tek başına kullanıldığında PDOP değerlerinin fazlaca yüksek olduğu gözlenmektedir. Günümüzde hala en baskın ve sağlam uydu sistemi GPS olsa da, tek başına kullanımı diğer sistemler ile ortak kullanımındaki kadar etkili sonuç vermemektedir. Diğer sistemler hem Şekil 10.1’deki gibi uydu sayısını artırırken, Şekil 10.2’de de gözlemlendiği gibi PDOP değerlerinin de daha iyi olmasını sağlamaktadır. Şekil 10.3’te yine bir duyarlılık kaybı olan HDOP değerleri, Şekil 10.4’de ise VDOP değerleri gösterilmektedir.



Şekil 10.3. HDOP değerleri



Şekil 10.4. VDOP değerleri

HDOP değerleri uydu geometrisinin yatay yöndeki konum doğruluğuna olan etkilerini göstermekteyken VDOP değerleri ise dikey yöndeki konum doğruluğunu etkilemektedir. HDOP ve VDOP değerlerinin artması PDOP değerini de etkilemektedir. Bu kısım hakkında teorik bilgiler kısım 3.1.6’ da verilmiştir. Özellikle uydu sayısının düşük olduğu epok dilimlerinde GPS uydularının DOP değerlerinin çok yüksek olduğu gözlenmektedir. Çoğu zaman diliminde ise GPS uydularının yanına entegre edilen diğer bir sistemin DOP değerlerinde oldukça yüksek düzeltmeler getirdiği gözlenmektedir. Tablo 10.1’de farklı GNSS kombinasyonlarının gözlemler boyunca DOP değerlerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri gösterilmektedir.

Tablo 10.1. Konum, yatay ve düşey duyarlılık kaybı istatistikleri

Uydu kombinasyonu		PDOP	HDOP	VDOP
GPS	min.	1.43	1.17	0.80
	maks.	11.11	10.44	7.03
	ort.	1.82	1.53	1.00
GPS+GLONASS	min.	1.32	1.08	0.75
	maks.	5.80	4.93	4.05
	ort.	1.64	1.37	0.90
GPS+GALILEO	min.	1.23	1.01	0.69
	maks.	6.67	6.06	2.78
	ort.	1.47	1.22	0.82
GPS+BEIDOU	min.	1.05	0.88	0.56
	maks.	3.51	3.02	1.80

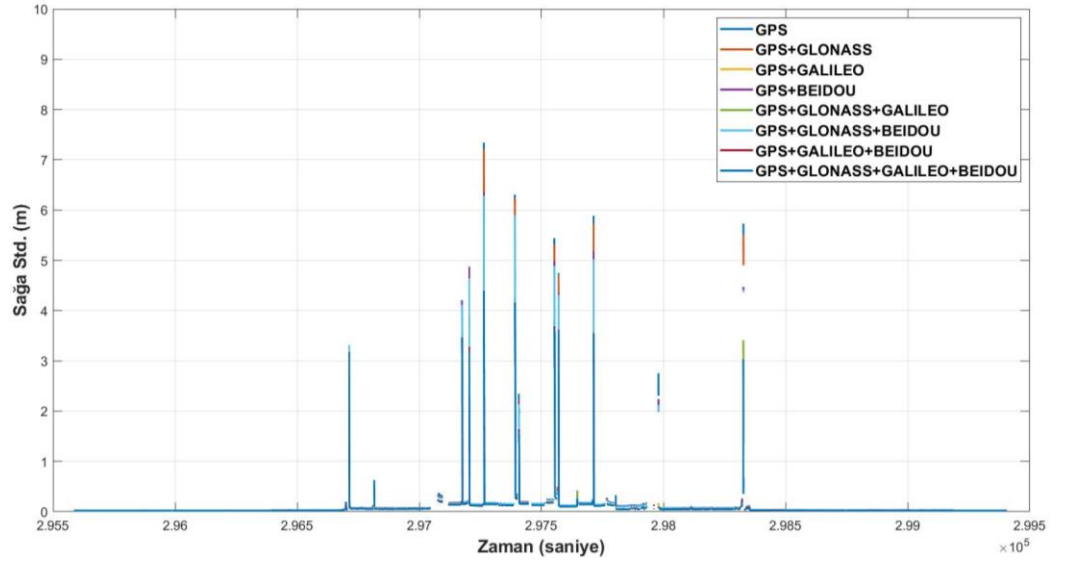
GPS+GLONASS+GALILEO	ort.	1.28	1.09	0.67
	min.	1.16	0.95	0.66
	maks.	4.84	4.39	2.10
GPS+GLONASS+BEIDOU	ort.	1.37	1.13	0.76
	min.	1.00	0.84	0.54
	maks.	3.22	2.67	1.79
GPS+GALILEO+BEIDOU	ort.	1.22	1.04	0.63
	min.	0.96	0.81	0.52
	maks.	3.12	2.58	1.73
GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU	ort.	1.14	0.97	0.60
	min.	0.93	0.78	0.50
	maks.	3.00	2.45	1.73
	ort.	1.09	0.92	0.58

Tablo 10.1’de görüldüğü üzere en yüksek ortalama PDOP 1.82 ile GPS uydularına ait iken, en düşük değer ise 1.09 değeri ile tüm GNSS sistemlerinin ortak kullanıldığı çözüme aittir. İki veya daha fazla sistemin birlikte kullanılması DOP değerlerinin en kötü seviye olduğu maksimum seviyelerde bile, daha iyi hale getirmektedir.

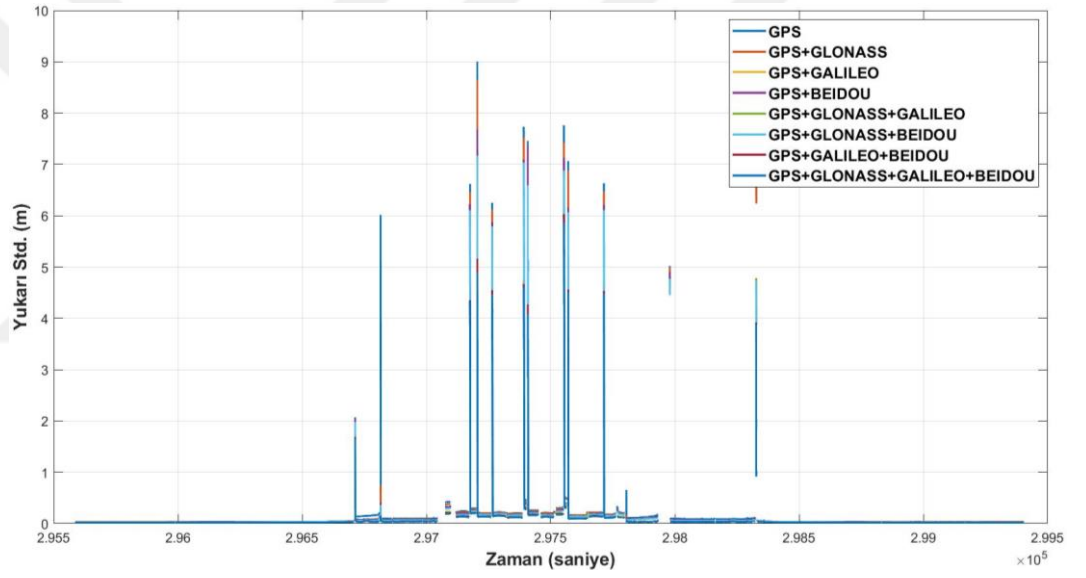
10.2. Analizler

10.2.1. Çoklu Uydu Sistem Çözümlerinin Analizi

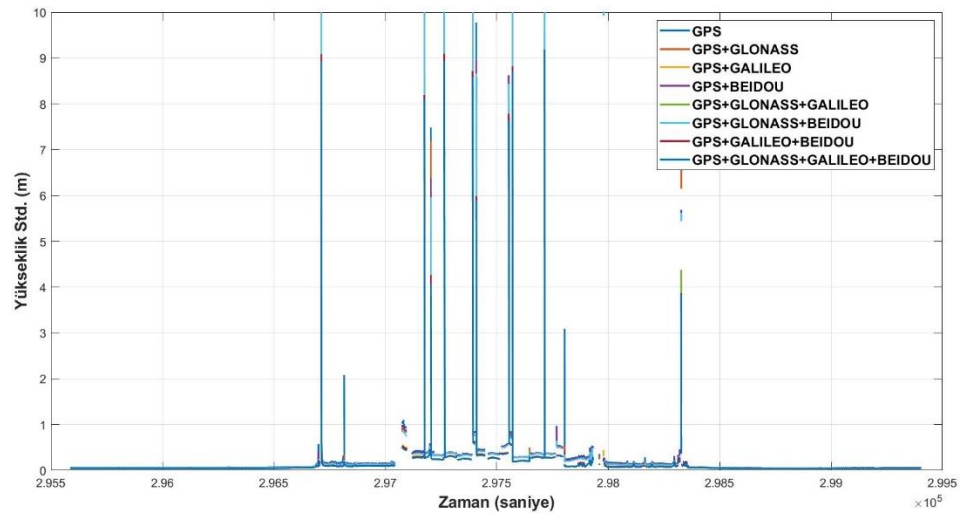
Bu bölümde otonom aracın güzergâh çözümünde yalnızca farklı GNSS sistemlerinin kullanılması sonucunda elde edilen konum ve yükseklik doğrulukları değerlendirilecektir. Bu veri analizi için Tablo 9.1’de yer alan 1’den 8’e kadar olan PPP-GNSS çözümleri değerlendirilmiştir. Şekil 10.5’te farklı GNSS sistemi kombinasyonlarının Sağa Koordinat değerlerindeki standart sapma, Şekil 10.6’da Yukarı Koordinat değerlerindeki standart sapma ve Şekil 10.7’de ise Elipsoidal Yükseklik değerlerindeki standart sapma değerleri gösterilmektedir.



Şekil 10.5. PPP-GNSS çözümlerinde Sağa değerlerinin standart sapmaları



Şekil 10.6. PPP-GNSS çözümlerinde Yukarı değerlerinin standart sapmaları



Şekil 10.7. PPP-GNSS çözümlerinde Elipsoidal Yükseklik değerlerinin standart sapmaları

Şekil 10.5, 10.6 ve 10.7'ye bakıldığında GPS sisteminin tek başına kullanılması konum ve yükseklik değerlerinde büyük sapmalar meydana getirirken, özellikle tüm sistemlerin kullanıldığı çözümlerde standart sapmaların oldukça küçük olduğu gözlenmektedir. Bazı zaman dilimlerinde elipsoidal yüksekliklerde GPS sistemi çoklu sisteme göre daha stabil çözümlemelerde bulunmaktadır. Tablo 10.2'de ise farklı GNSS kombinasyonlarının Sağa, Yukarı ve Yükseklik değerlerindeki doğruluk değerleri ve karesel ortalama hataları verilmektedir.

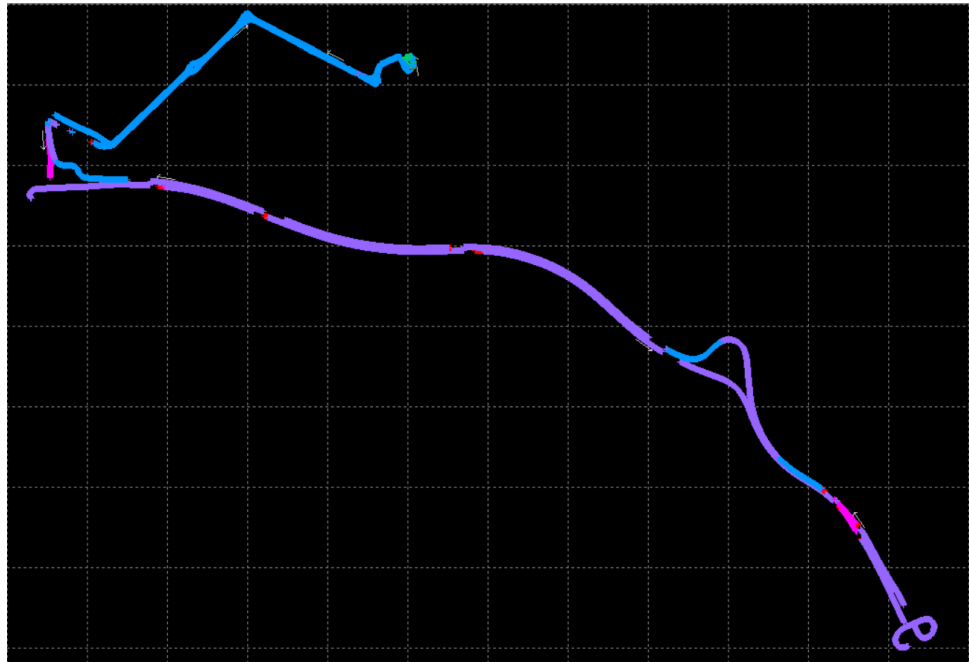
Tablo 10.2. Uydu kombinasyonlarına göre elde edilen doğruluk değerleri

Uydu kombinasyonu		Sağa (m)	Yukarı (m)	Ellip. Yük. (m)
GPS	min.	0.022	0.029	0.049
	maks.	7.338	9.001	17.721
	ort.	0.078	0.103	0.177
	RMSE	0.243	0.353	0.542
GPS+GLONASS	min.	0.022	0.029	0.048
	maks.	7.206	8.633	17.390
	ort.	0.075	0.092	0.167
	RMSE	0.237	0.322	0.523
GPS+GALILEO	min.	0.019	0.022	0.042
	maks.	4.692	6.332	9.705
	ort.	0.061	0.065	0.124
	RMSE	0.187	0.240	0.383
GPS+BEIDOU	min.	0.021	0.024	0.048
	maks.	6.341	7.678	15.720
	ort.	0.076	0.084	0.169
	RMSE	0.232	0.294	0.518
GPS+GLONASS+GALILEO	min.	0.019	0.021	0.041
	maks.	4.688	6.145	9.588
	ort.	0.059	0.062	0.119
	RMSE	0.185	0.234	0.377
GPS+GLONASS+BEIDOU	min.	0.021	0.024	0.047
	maks.	6.282	7.172	15.296
	ort.	0.074	0.078	0.161
	RMSE	0.229	0.285	0.503
GPS+GALILEO+BEIDOU	min.	0.019	0.019	0.041
	maks.	4.392	6.031	9.149
	ort.	0.060	0.058	0.119
	RMSE	0.183	0.221	0.375
GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU	min.	0.019	0.019	0.040
	maks.	4.374	5.873	9.188

ort.	0.059	0.056	0.116
RMSE	0.182	0.216	0.368

Tablo 10.2’de gösterildiği üzere 3B konum değerlerinin hepsinde maksimum hata tek başına kullanılan GPS sisteminde çıkmaktadır. Yalnızca GPS sisteminin kullanıldığında karesel ortalama hata sağa değerinde 0.243 m, yukarı değerinde 0.353 m, yükseklik değerinde ise 0.542 m olmaktadır, GPS+GLONASS sisteminde sağa değerinde 0.237 m, yukarı değerinde 0.322 m, yükseklik değerinde ise 0.523 m, GPS+GLONASS+GALILEO kombinasyonunda sağa değerinde 0.229 m, yukarı değerinde 0.285 m, yükseklik değerinde ise 0.377 m, GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU kombinasyonun tümü ile konum bilgisi üretildiğinde ise sağa değerinde 0.182 m, yukarı değerinde 0.216 m, yükseklik değerinde ise 0.368 m olmaktadır. Burada dikkat çeken bir husus GPS+GALILEO kombinasyonunun diğer ikili entegrasyonlara oranla çok daha yüksek doğruluk sağlamasıdır. GPS+GALILEO çözümü ile sağa, yukarı ve yükseklik RMSE değerlerinde sırasıyla 0.187, 0.240, 0.383 m değerler elde edilmiştir. Her yeni eklenen uydu sistemi gözlemlerin iyileşmesine katkı sağlamakta ve üretilen konum bilgisinin doğruluğunu artırmaktadır.

Şekil 10.8’de ise çalışma güzergahının çoklu GNSS sistem ile çözülmesi verilmiştir. Şekil üzerinde de görüldüğü üzere yalnızca GNSS sistemleri ile bazı kısımlarda konum bilgisi üretilmediği ve kesiklikler yaşandığı görülmektedir.



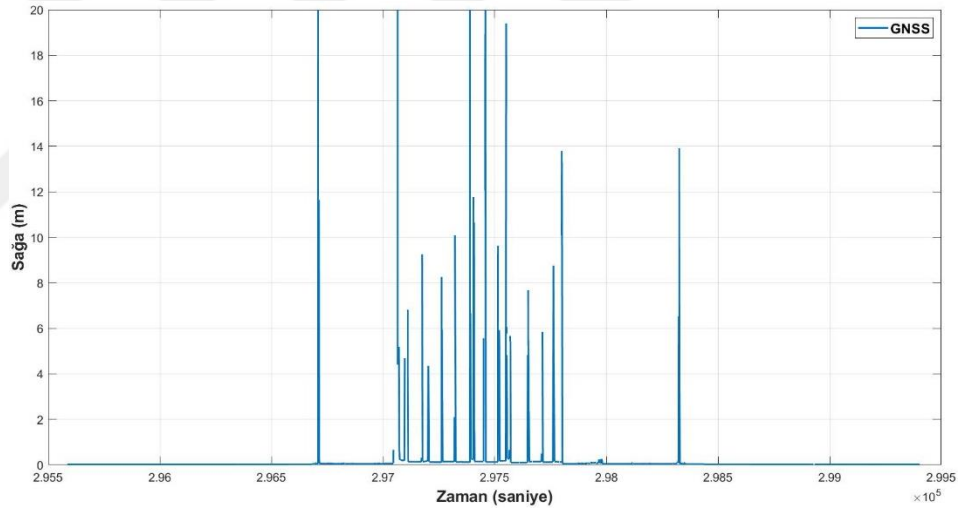
Şekil 10.8. PPP-GNSS sisteminde çalışma güzergahı

Ayrıca bazı alanlarda ise üretilen konum bilgisinin doğruluğunun yeterli olmadığı gözlenmektedir. Bu durum otonom bir araç için lokalizasyon konusunda ciddi sıkıntılar doğurabilmektedir.

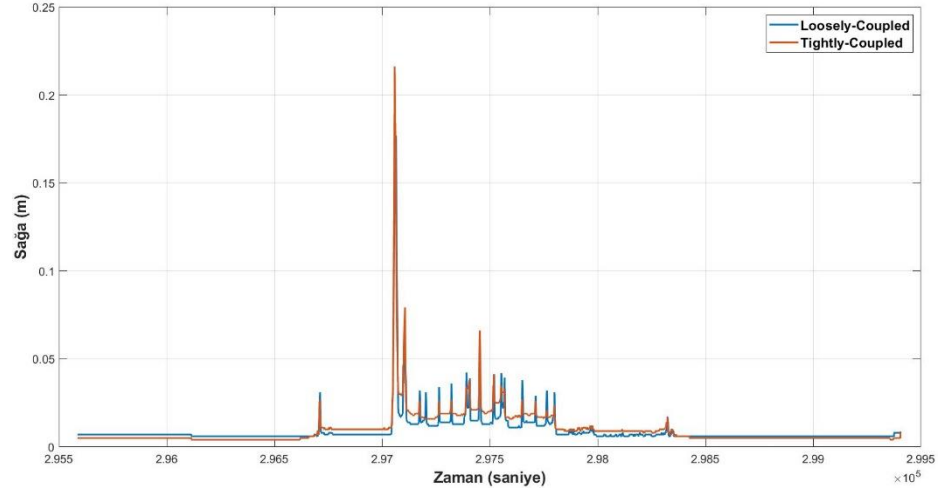
10.2.2. Loosely-Coupled ve Tightly Couple ile GNSS - INS Entegrasyonu

Bu bölümde GNSS yöntemi ile elde edilmiş verilerin LC ve TC yöntemleri kullanılarak INS ile entegrasyonu sağlanmıştır.

GNSS sinyallerinin kesintiye uğradığı alanlarda, dış çevreden bağımsız çalışan bir sensör bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada söz konusu problem INS sensörünün kullanımı ile çözülmüştür. Bölüm 10.2.1’de görüldüğü üzere yalnızca PPP-GNSS sistemi ile konum belirleme yöntemi otonom bir araç için yeterli doğruluk ve sürekli çözüm sağlamamaktadır. Şekil 10.9’daki gözlemler sonucunda yalnızca GNSS yöntemi ile elde edilmiş olan Sağa değerlerinin standart sapmaları gösterilmektedir. Şekil 10.10’da ise aynı veri setinden elde edilen ancak GNSS-INS entegrasyonu ile üretilmiş Sağa değerlerin standart sapmaları gösterilmektedir.

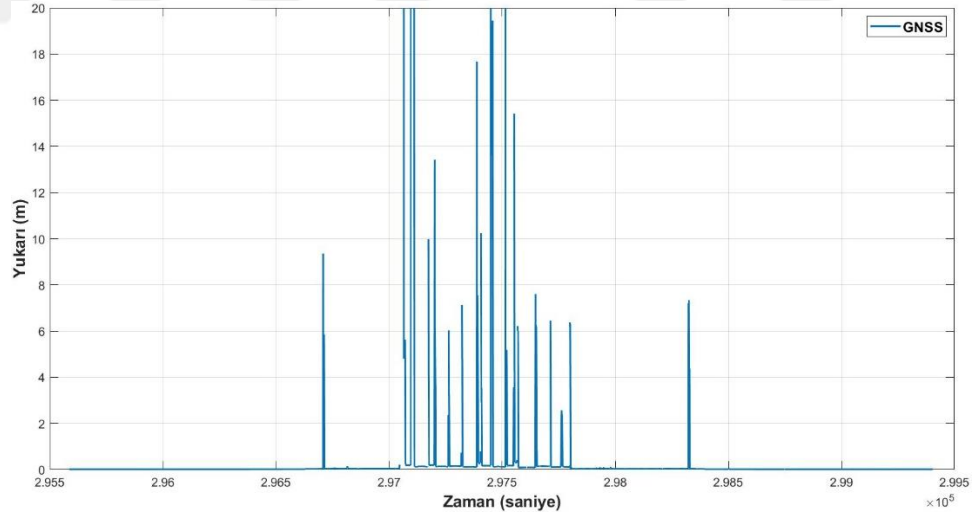


Şekil 10.9. GNSS ile belirlenen Sağa değerlerinin standart sapmaları

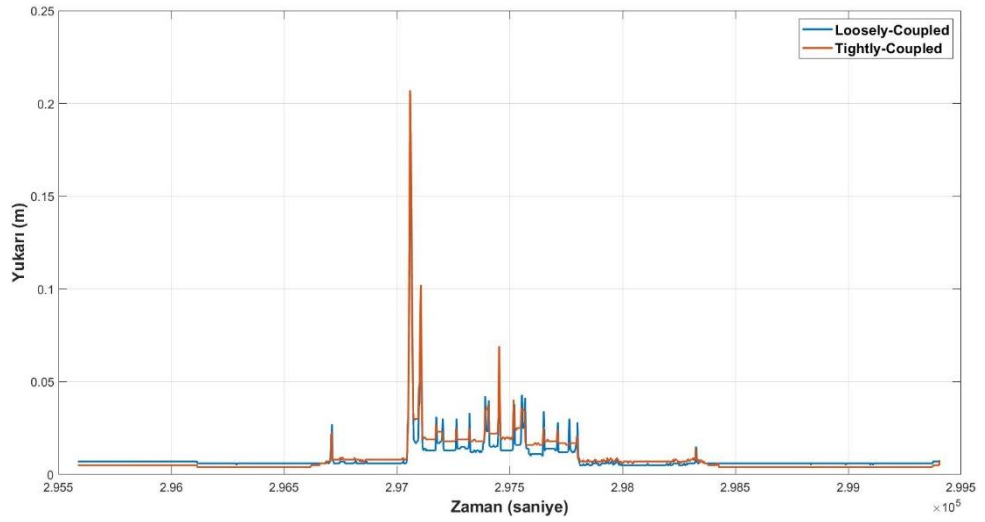


Şekil 10.10. GNSS-INS ile belirlenmiş Sağa değerlerinin standart sapmaları

Şekil 10.9’da gösterilen sağa değerlerinin standart sapmaları 10 metreler ile ifade edilirken, hem TC hem de LC yönteminde bu değerler maksimum 1-2 dm seviyelerinde olmaktadır. GNSS’in konum belirlemede sıkıntı çektiği zaman dilimlerinde GNSS-INS entegrasyonu sürekli ve doğru konum bilgisi üretmeye devam etmektedir. Şekil 10.11’de GNSS ile belirlenen Yukarı değerlerinin standart sapmaları gösterilirken, Şekil 10.12’de ise GNSS-INS ile üretilen Yukarı değerlerinin standart sapma değerleri gösterilmektedir.

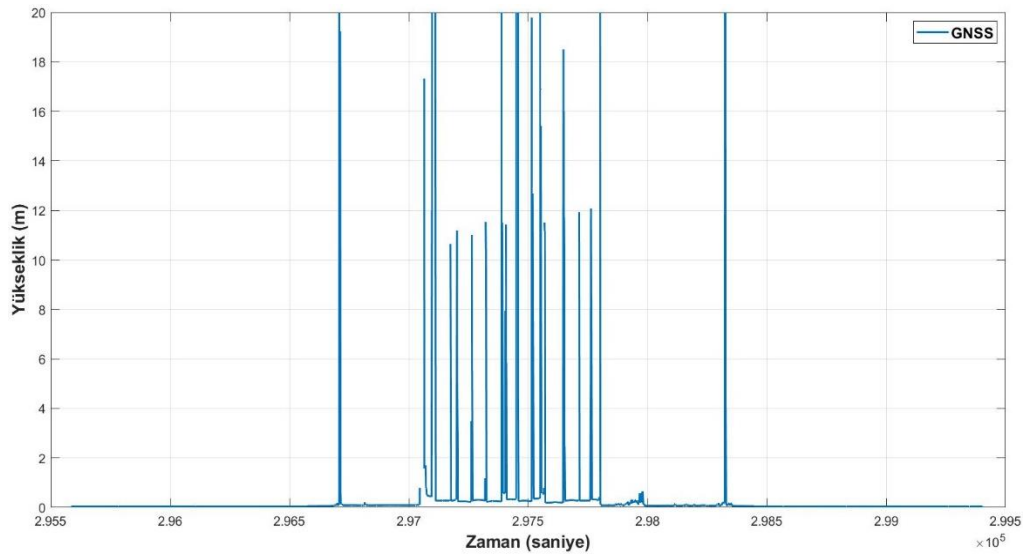


Şekil 10.11. GNSS ile belirlenmiş Yukarı değerlerinin standart sapmaları

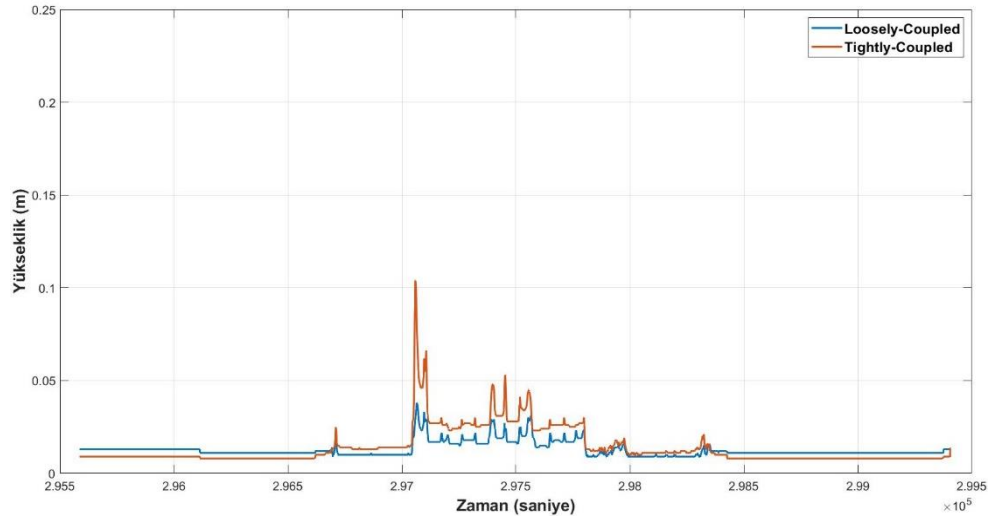


Şekil 10.12. GNSS-INS ile belirlenmiş Yukarı değerlerinin standart sapmaları

Yukarı değerlerine de bakıldığı zaman onlarca metre hataya sahip olan GNSS yöntemi INS entegrasyonu ile bu hataları 1-2 dm düzeyine kadar düşürebilmektedir. Yukarı ve Sağa değerleri ile aracın 2B konum bilgisi elde edilmiş olmaktadır. 2B konum bilgisinin standart sapmalarına bakıldığında GNSS-INS entegrasyonun yalnızca GNSS'e oranla çok daha iyi olduğu gözlenmektedir. GNSS-INS yönteminde ise GNSS verilerinin oldukça yüksek standart sapmaya sahip olduğu alanlarda LC yönteminin TC yöntemine göre küçük bir farkla da olsa daha iyi sonuçlar elde ettiği gözlenmektedir. Ancak GNSS verilerinin standart sapmalarının iyi olduğu zaman dilimlerinde de TC yönteminin yine küçük bir farkla üstünlük sağladığı gözlenmektedir. Şekil 10.13'te GNSS ile üretilen Elipsoidal Yükseklik değerleri verilmişken, Şekil 10.14'te ise GNSS-INS ile üretilen Elipsoidal Yükseklik değerleri gösterilmektedir.



Şekil 10.13. GNSS ile belirlenmiş Yükseklik değerlerinin standart sapmaları



Şekil 10.14. GNSS-INS ile belirlenmiş Yükseklik değerlerinin standart sapmaları

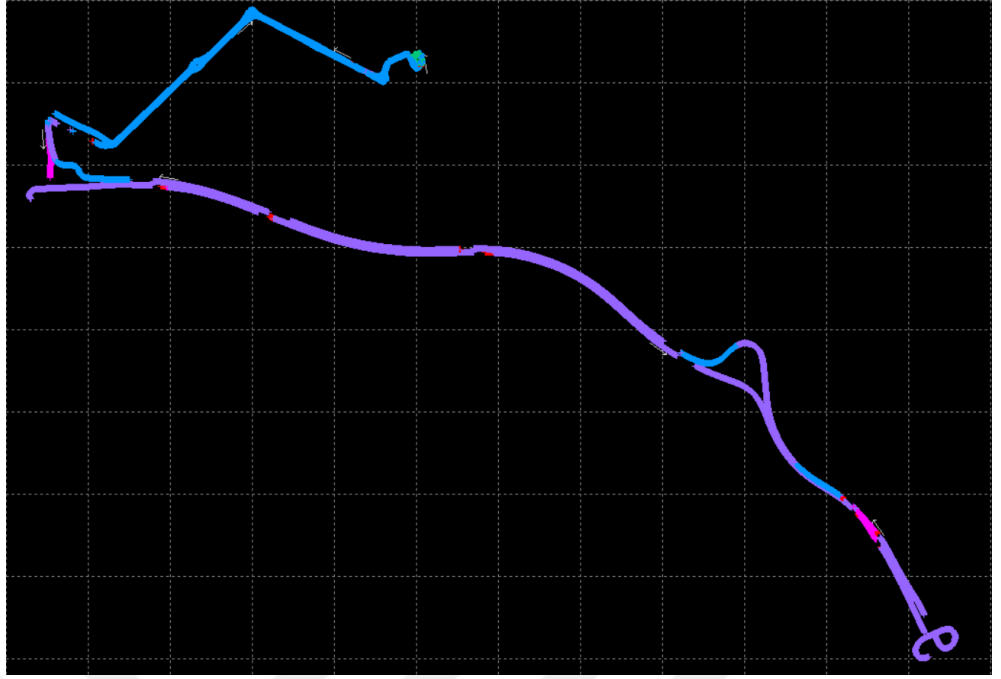
2B konum bilgisinin yanına yükseklik değerlerinin de eklenmesi ile 3B konum bilgisi elde edilmektedir. GNSS sistemleri yükseklik bilgilerini elipsoidal olarak üretmektedir. GNSS sistemleri ile 20 metrelere ulaşan hata payları INS kullanımı ile 0.1 metrelere kadar düşmektedir. Yine burada da GNSS'deki standart sapmaların yüksek olduğu epok dilimlerinde TC yöntemi, LC yöntemine göre daha düşük doğrulukta konum bilgisi sağlamaktadır. Tablo 10.3'te yalnızca GNSS, LC ve TC ile üretilen konum bilgilerinin standart sapma değerleri gösterilmektedir.

Tablo 10.3. GNSS, LC ve TC göre üretilen doğruluk değerleri

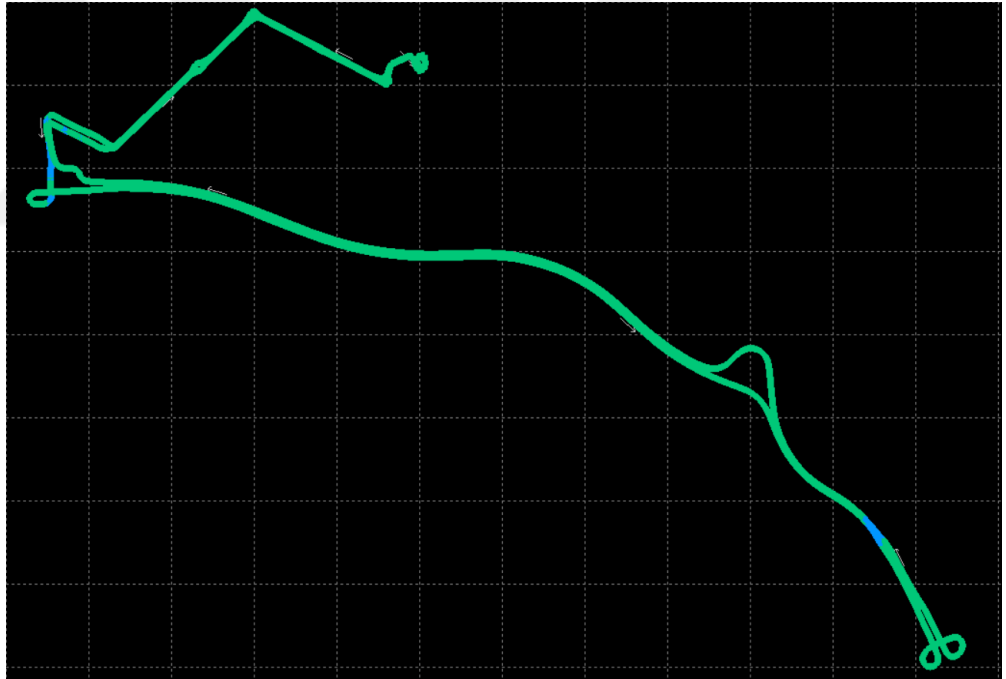
Çözüm Tipi		Sağa (m)	Yukarı (m)	Ellip. Yük. (m)
GNSS	min.	0.019	0.019	0.040
	maks.	32.897	121.213	105.876
	ort.	0.130	0.127	0.242
	RMSE	0.843	1.115	1.713
Loosely-Coupled	min.	0.006	0.005	0.009
	maks.	0.177	0.143	0.038
	ort.	0.009	0.009	0.013
	RMSE	0.014	0.013	0.013
Tightly-Coupled	min.	0.004	0.004	0.008
	maks.	0.216	0.207	0.104
	ort.	0.010	0.009	0.014
	RMSE	0.016	0.015	0.017

Tablo 10.3’de görüldüğü üzere GNSS sistemi ile üretilen tüm değerler, hem maksimum hata hem minimum hata hem de karesel ortalama hata değerleri bakımından LC ve TC yöntemine göre oldukça yüksektir. GNSS yöntemi ile elde edilen karesel ortalama hata değeri sağa koordinatta 0.843 m, yukarı koordinatta 1.115 m, elipsoidal yükseklikte 1.713 m değerinde iken LC yönteminde sağa koordinatta 0.014m, yukarı koordinatta 0.013 m, elipsoidal yükseklikte 0.013 m değerinde, TC yönteminde ise sağa koordinatta 0.016 m, yukarı koordinatta 0.015 m, elipsoidal yükseklikte 0.017 m değerinde hesaplanmıştır. Buradan da GNSS yöntemi ile üretilen konumun doğrulunun m hassasiyetinde, LC ve TC yöntemlerinde ise dm hassasiyetinde olduğu söylenebilir. LC ve TC yöntemlerine bakıldığında, LC yöntemi ile elde edilen doğruluk değerlerinin daha iyi olduğu gözlenmektedir. LC sağa değerindeki en yüksek hata 0.177 m iken TC yönteminde bu değer 0.216 m olmaktadır. Yine yukarı ve elipsoidal yüksekliklerdeki maksimum hataya bakıldığında LC yönteminin TC yöntemine göre daha iyi sonuçlar ürettiği gözlenmektedir. Ancak minimum hata değerlerine bakıldığında ise TC yönteminin, LC yöntemine göre çok küçük farkla daha iyi olduğu gözlenmektedir. Burada durağan halde TC hareket halinde ise LC’nin daha iyi sonuç vermesinden kaynaklı olduğu belirtilebilir. Buda daha iyi GNSS ölçme alanlarında TC yönteminin durağan alanlarda konum belirlemede LC yöntemine üstünlük sağlayacağı söylenebilmektedir. Ancak otonom araçlar hareketli olduklarından dolayı hareketli kısımlar da LC yöntemi ile daha iyi sonuçlar üretilebilmektedir.

Şekil 10.15’te LC yöntemi ile birleşmeden önce yalnızca PPP-GNSS güzergah çözümü gösterilmekte iken Şekil 10.16’da PPP-GNSS çözümünün LC yöntemi ile INS’ın entegre edilmesi ile oluşan güzergah çözümü gösterilmektedir.

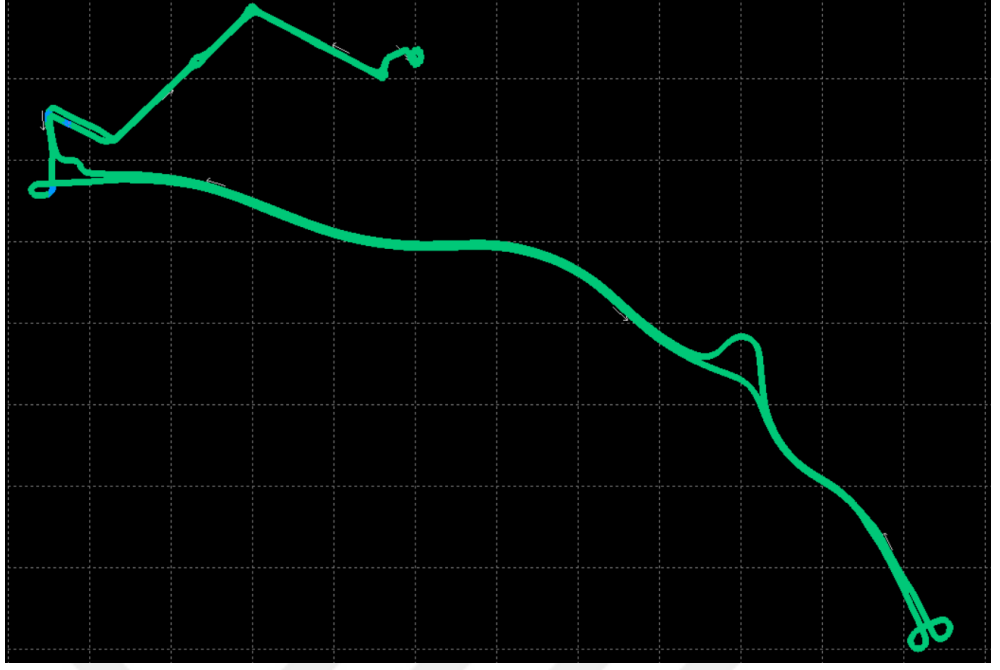


Şekil 10.15. PPP-GNSS çözümü ile araç güzergahı



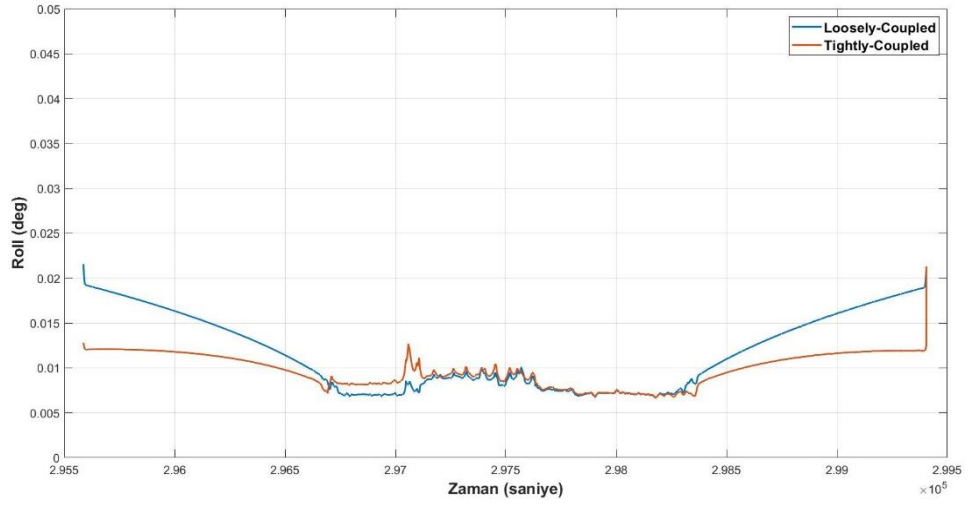
Şekil 10.16. LC-PPP çözümü ile araç güzergahı

Şekil 10.15’de görüldüğü üzere bazı kısımlarda konum bilgisi bütünlük sağlayamamış ve kesilmeler yaşanmıştır. Ancak INS verilerinin eklenmesi ile gerçekleştirilen çözümde ise araç güzergahında kesilme yaşanmadan tüm rotanın konumunun belirlendiği ve gerekli olan bütünlüğün sağlandığı gözlenmektedir.. Ancak şekil 10.17’de görüldüğü üzere TC-PPP yöntemi ile de araç güzergâhında konum bütünlüğü sağlanmıştır.



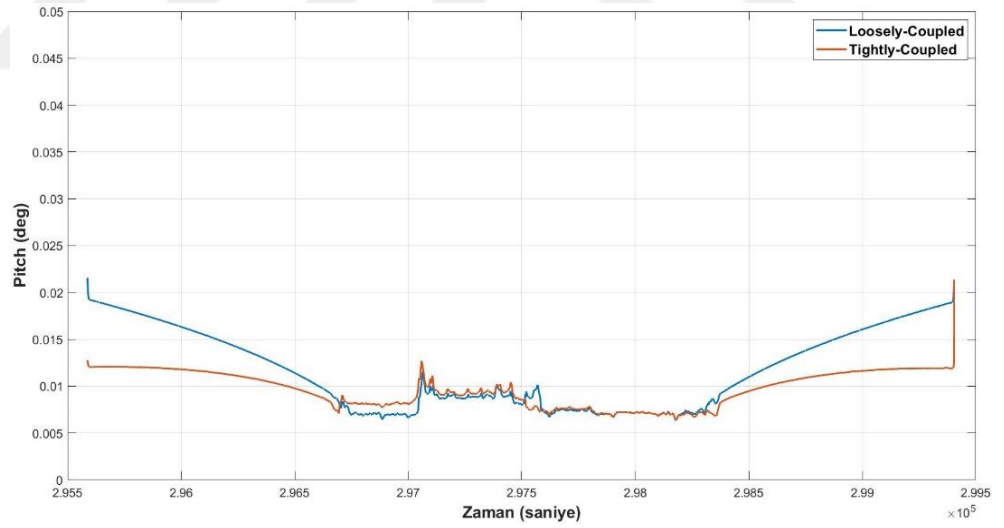
Şekil 10.17. TC-PPP çözümü ile araç güzergahı

TC-PPP yöntemi ile otonom araç için gerekli olan konum çözümü yalnızca GNSS çözümlerine oran ile gayet başarılı şekilde elde edilmiştir. Bu da yalnızca GNSS sistemi ile otonom araçlarda her alanda gerekli doğruluğu ulaşılamayabileceğinin göstergelerindendir. GNSS sistemin dış çevre etkenlerinden fazlaca etkilenmesi çok küçük bölgelerde bile farklı sonuçlar üretmesine neden olmaktadır. Küçük bir altgeçidin başında doğru şekilde konumlama bilgisi üretebilen GNSS, altgeçit çıkışında yeterli doğruluğu sağlamayabilmektedir. Bundan dolayı GNSS'in etkilendiği dış çevre etkenlerinden etkilenmeyen INS sistemleri GNSS ile entegre edilerek doğruluğu yüksek konum bilgisi üretilebilmektedir. Ayrıca INS ile pozisyon bilgilerine ek olarak durum bilgileri de elde edilmektedir. Durum bilgileri roll, pitch ve heading olarak adlandırılmaktadır. Açılı olarak ifade edilen bu değerleri ile aracın durum bilgileri elde edilmiş olmaktadır. Şekil 10.18'de roll değerlerinin LC-PPP ve TC-PPP yöntemleri ile oluşturulan değerleri gösterilmektedir.

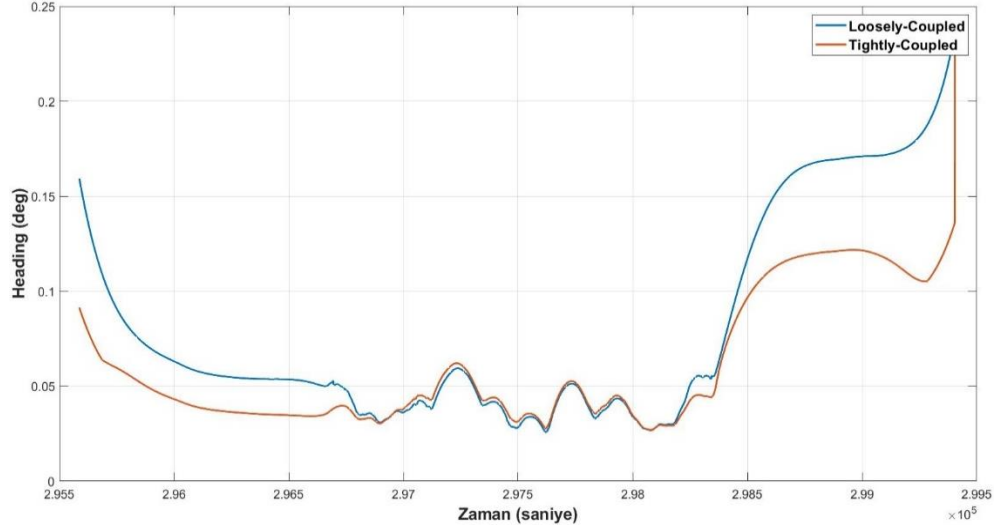


Şekil 10.18. LC-PPP ve TC-PPP çözümleri ile elde edilen Roll hata değerleri

Başlangıç ve bitiş kısmında TC yöntemi ile LC yöntemine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak daha yoğun şehir alanları kısımlarında LC yöntemi TC yöntemine göre çok küçük farklar olmak üzere daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Şekil 10.19’da pitch değerlerinin LC-PPP ve TC-PPP yöntemleri ile oluşturulan değerleri gösterilmektedir. Şekil 10.20’de heading değerlerinin LC-PPP ve TC-PPP yöntemleri ile oluşturulan değerleri gösterilmektedir.



Şekil 10.19. LC-PPP ve TC-PPP çözümleri ile elde edilen Pitch hata değerleri



Şekil 10.20. LC-PPP ve TC-PPP çözümleri ile elde edilen Heading hata değerleri

Pitch ve heading açılarının da elde edilen sonuçlar roll açıları ile benzerlik göstermektedir. TC yöntemi başlangıç ve bitiş kısımlarında daha iyi sonuçlar üretirken LC yöntemi ise orta kısımlarda doğruluğu TC yöntemine göre daha iyi olmaktadır.

Tablo 10.4. LC ve TC göre üretilen Roll, Pitch, Heading doğruluk değerleri

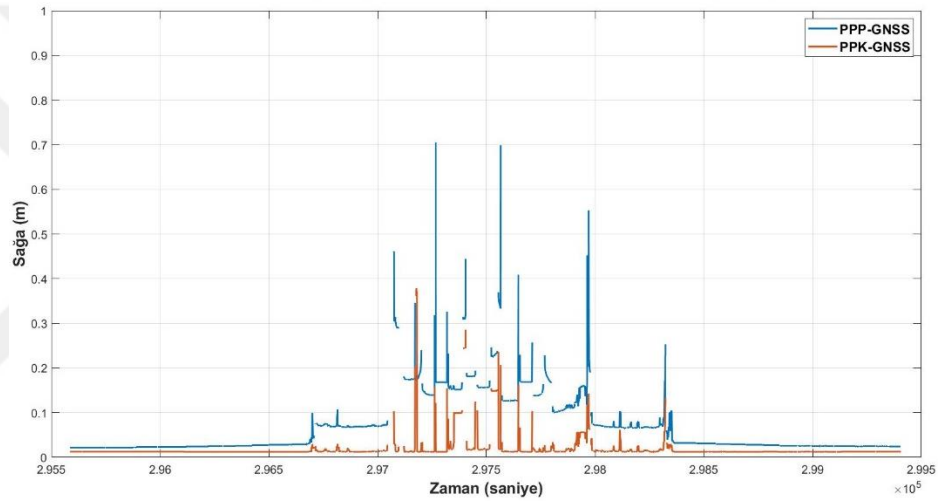
Çözüm Tipi		Roll (derece)	Pitch (derece)	Heading (derece)
Loosely-Coupled	min.	0.0067	0.0064	0.0257
	maks.	0.0215	0.0215	0.2374
	ort.	0.0117	0.0117	0.0811
	RMSE	0.0124	0.0124	0.0977
Tightly-Coupled	min.	0.0067	0.0064	0.0269
	maks.	0.0214	0.0214	0.2353
	ort.	0.0098	0.0097	0.0608
	RMSE	0.0099	0.0099	0.0691

Başlangıç ve bitiş epoklarının diğer orta kısımlara göre daha uzun süreler alması karesel ortalama değerlerinin TC yönteminin LC yöntemine göre daha iyi sonuçlar ürettiği gözlenmektedir.

10.2.3. PPP ve PPK Verilerinin Analizi

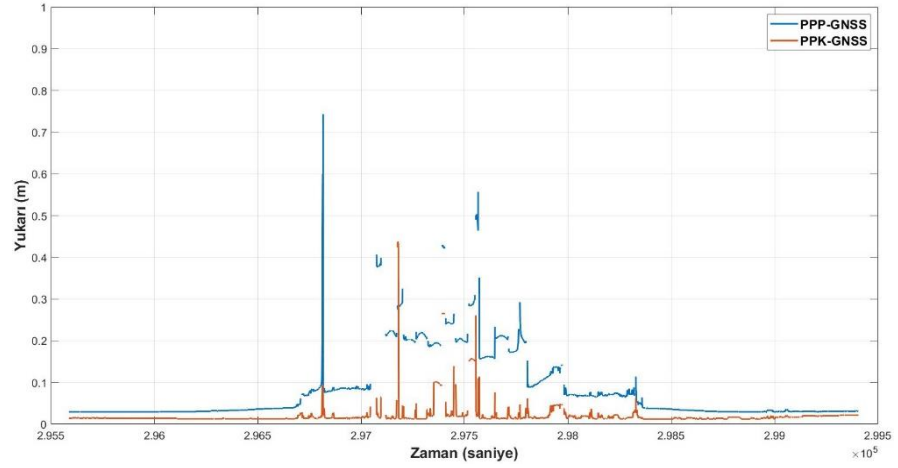
PPP yöntemi ek bir referans alıcısına ihtiyaç duymadan tek bir GNSS alıcısı ile konum bilgisi üretebilmekteyken PPK yöntemi konumu bilinen ve eşzamanlı ölçüm yapan ek bir referans GNSS alıcısına ihtiyaç duymaktadır. Bu da ekstra bir GNSS alıcısına bağımlı kalmaya neden olmaktadır. Her zaman gözlemlerin yapıldığı yakın

bölgelerde ek bir GNSS alıcısının olmadığı durumlar gözlemlenebilmekte ve böylece PPK yönteminin PPP yöntemine göre dezavantaja sahip olduğunu göstermektedir. Ancak PPK yöntemi ile konum belirleme işleminde referans noktasının olması yapılan gözlemlerde bilinen sayısını artırdığından dolayı daha iyi sonuçlar üretebilmektedir. Çalışmanın 9.3.4 kısmında belirtildiği üzere PPK çözümlerinde TUSAGA-Aktif ağında bulunan ISTN noktası referans noktası olarak kullanılmıştır. ISTN noktasındaki GNSS alıcısı yalnızca GPS ve GLONASS uydu sistemlerini gözlemleyebilmesi sebebiyle bu bölümde PPP ve PPK yöntemlerinin sağlıklı analizi için sadece GPS ve GLONASS verilerini içeren çözümler değerlendirilmiştir. Şekil 10.21’de PPP-GNSS ve PPK-GNSS çözümlerinin Sağa koordinat değerlerindeki standart sapmaları gösterilmiştir.



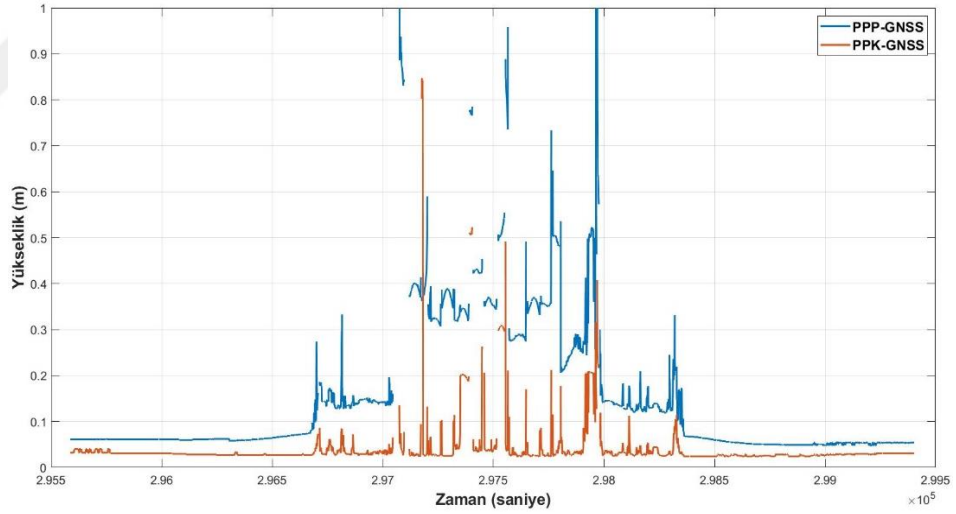
Şekil 10.21. PPP-GNSS ve PPK-GNSS Sağa değerlerin standart sapmaları

Şekil 10.21’de yansıdığı üzere PPK-GNSS çözümleri ile sağlanan sağa değerleri PPP-GNSS ile sağlanan sağa değerlerine göre daha doğru olduğu gözlenmektedir. PPP ve PPK yöntemlerinde Şekil 10.21’de görüldüğü gibi aynı yönde hataya sahiptirler. Bu da hata kaynaklarının benzer ancak çözümlerinin farklı olduğunu yansıtmaktadır ve PPK yöntemindeki çözümün daha iyi olduğu gözlenmektedir. Şekil 10.22’de ise PPP-GNSS ve PPK-GNSS çözümlerinin Yukarı koordinat değerlerindeki standart sapmaları gösterilmiştir.



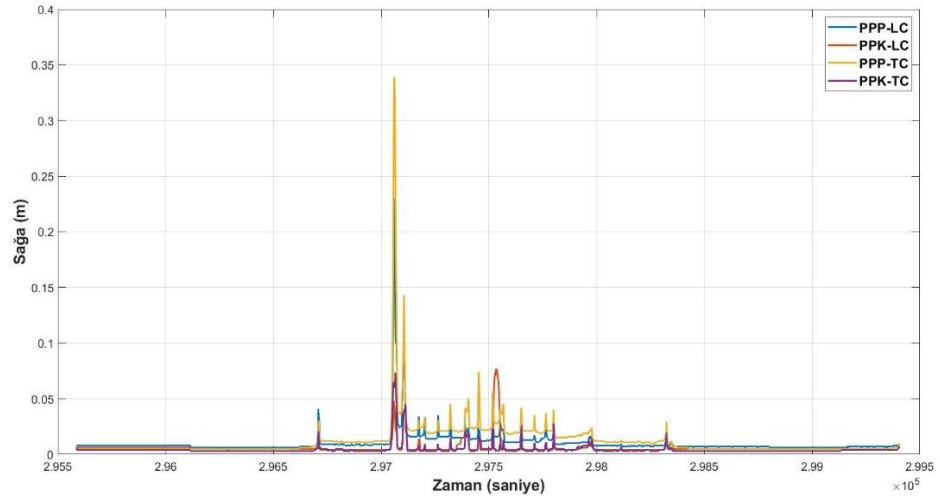
Şekil 10.22. PPP-GNSS ve PPK-GNSS Yukarı değerlerin standart sapmaları

Yukarı değerlerinde de PPK yöntemi PPP yöntemine göre daha iyi sonuçlar üretmektedir. PPK yöntemi ile belirlenen konum bilgisindeki kesilmeler daha kısa zaman dilimlerinde olmakta iken PPP yönteminde kesilme zamanları daha büyük olmaktadır. PPK yönteminin daha stabil olduğu yaşanan kopmaların daha kısa sürede telafi edilebildiği gözlenmektedir. Şekil 10.23'te de PPP-GNSS ve PPK-GNSS çözümlerinin Elipsoidal Yükseklik değerlerindeki standart sapmaları gösterilmiştir.



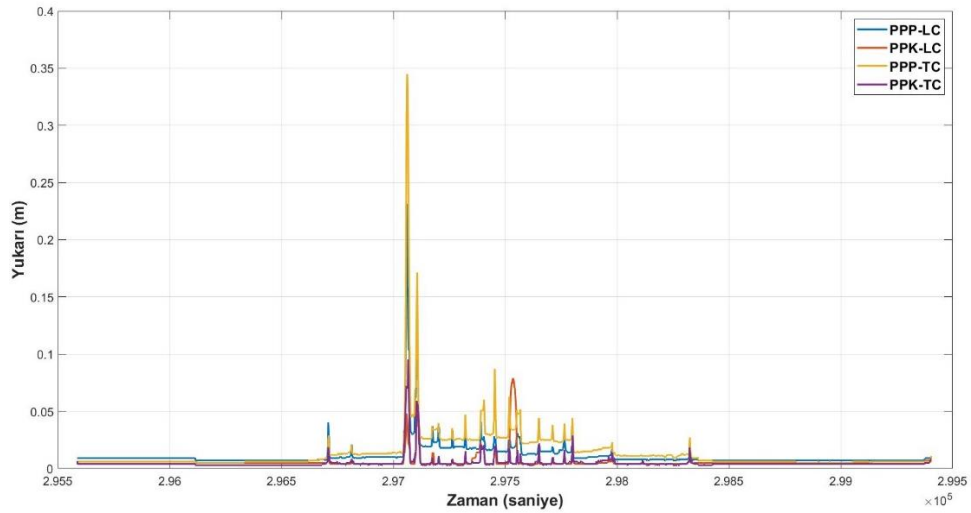
Şekil 10.23. PPP-GNSS ve PPK-GNSS Elipsoidal Yükseklik değerlerinin standart sapmaları

Elipsoidal yüksekliklerde de PPK yönteminin PPP yöntemine göre daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. 3B konum bilgisinde de PPK yönteminin PPP yöntemine göre daha iyi ve daha hassas sonuçlar üretmektedir. Şekil 10.24'de ise PPP ve PPK yöntemlerine INS'in eklenmesi ile oluşan Sağa koordinat değerlerindeki standart sapmalar gösterilmektedir.



Şekil 10.24. PPP ve PPK Yöntemlerinin LC ve TC çözümleri Sağa koordinat değerleri

Sağa koordinat değerlerindeki standart sapma hatalarına bakıldığında PPK LC ve TC çözümlerini PPP LC ve TC çözümlere göre daha iyi sonuçlar elde ettiği gözlenmektedir. Özellikle PPP-TC yönteminin bazı epoklarda hatasının büyük olduğu gözlenmektedir. Ancak PPK ve PPP GNSS çözümlerindeki sağa değerler ile karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların daha prezisyonlu ve doğruluğunun daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Şekil 10.25’de PPP ve PPK yöntemlerine INS’in eklenmesi ile oluşan yukarı koordinat değerlerindeki standart sapmalar gösterilmektedir.

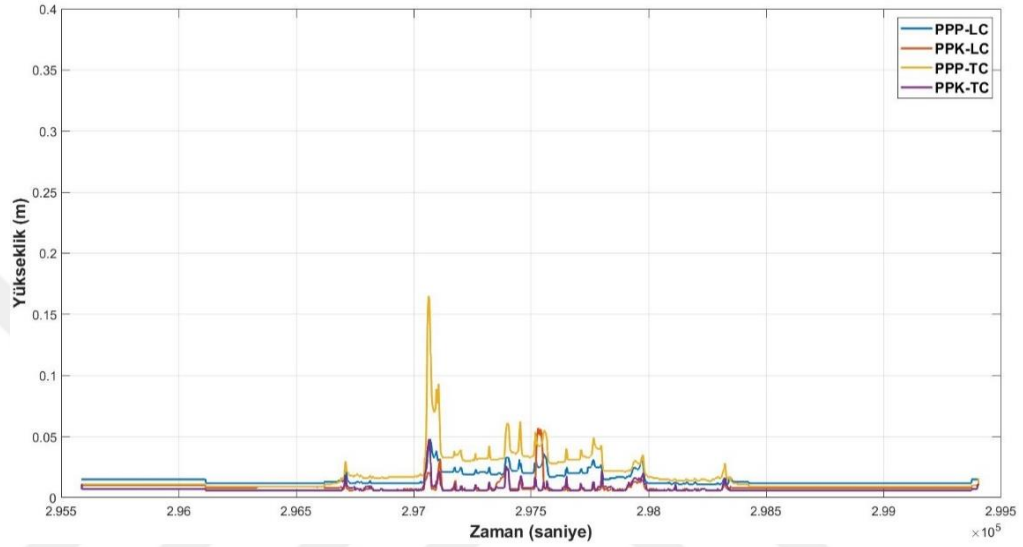


Şekil 10.25. PPP ve PPK Yöntemlerinin LC ve TC çözümleri Yukarı koordinat değerleri

Şekil 10.25’de görüldüğü üzere yukarı değerlerinin hataları sağa değerlerinin hata değerleri ile birebir benzerlik göstermektedir. Yukarı değerlerinde de PPP-TC yöntemi diğer yöntemlere göre doğruluğu daha düşük değerler içermektedir. PPK-LC, PPK-TC ve PPP-LC yöntemleri birbirlerine daha yakın sonuçlar vermektedirler.

GNSS verilerinde yaşanan kayıplar INS çözümleri ile birlikte elimine edilebilmekte ve sürekli konum bilgisi sağlanabilmektedir.

Şekil 10.26’da PPP ve PPK yöntemlerine INS’ın eklenmesi ile oluşan elipsoidal yükseklik değerlerindeki standart sapmalar gösterilmektedir. GNSS sistemleri elipsoidal yükseklik belirlerken tanımlanan elipsoidi referans almaktadırlar. Elipsoidal yükseklik hatası 2B konumlama hatasından farklı olmaktadır.



Şekil 10.26. PPP ve PPK Yöntemlerinin LC ve TC çözümleri Yükseklik koordinat değerleri

Elipsoidal yükseklik hatalarına bakıldığında PPP-TC yönteminin belli epoklarda diğer yöntemlere göre daha büyük hatalara sahip olduğu gözlenmektedir. Yine PPP-LC yöntemi ile de diğer yöntemler arasında belli epoklarda farklılıklar gözlenmektedir. Ancak PPK TC ve LC yöntemlerindeki yükseklik çözümlerinde çok küçük farklar gözlenmektedir. Sabit bir referans istasyon ile elipsoidal yüksekliklerin belirlenmesi PPP yöntemine göre daha iyi sonuçlar ürettiği gözlenmektedir. Tablo 10.5’te ise PPP ve PPK çözümlerinin GNSS, LC ve TC çözümleri ile elde edilen sağa, yukarı, elipsoidal yükseklik bilgilerindeki minimum, maksimum, ortalama ve karesel ortalama hatalar gösterilmektedir.

Tablo 10.5. PPP ve PPK yöntemleri ile elde edilen doğruluk değerleri

Uydu kombinasyonu		Sağa (m)	Yukarı (m)	Ellip. Yük. (m)
PPP - GNSS	min.	0.022	0.029	0.048
	maks.	0.705	0.742	1.587
	ort.	0.064	0.077	0.146
	RMSE	0.088	0.108	0.206
PPK - GNSS	min.	0.012	0.012	0.024
	maks.	0.378	0.438	0.846
	ort.	0.017	0.019	0.040
	RMSE	0.030	0.032	0.066
PPP - LC	min.	0.006	0.007	0.011
	maks.	0.230	0.231	0.048
	ort.	0.010	0.011	0.015
	RMSE	0.016	0.017	0.016
PPK - LC	min.	0.004	0.004	0.006
	maks.	0.077	0.079	0.057
	ort.	0.006	0.006	0.009
	RMSE	0.009	0.009	0.010
PPP - TC	min.	0.005	0.005	0.009
	maks.	0.339	0.345	0.165
	ort.	0.012	0.014	0.018
	RMSE	0.023	0.025	0.023
PPK - TC	min.	0.003	0.003	0.006
	maks.	0.073	0.095	0.048
	ort.	0.004	0.005	0.007
	RMSE	0.007	0.008	0.008

Tablo 10.5’de görüldüğü gibi PPK yönteminde LC ve TC yöntemlerinin PPP yönteminde LC ve TC çözümlerine göre daha iyi sonuçlar üretmektedir. PPP-GNSS yöntemi ile elde edilen karesel ortalama hata değeri sağa koordinatta 0.088 m, yukarı koordinatta 0.108 m, elipsoidal yükseklikte 0.206 m değerinde iken PPK yönteminde sağa koordinatta 0.030 m, yukarı koordinatta 0.032 m, elipsoidal yükseklikte 0.066 m değerinde, PPP-LC yönteminde ise sağa koordinatta 0.016 m, yukarı koordinatta 0.017 m, elipsoidal yükseklikte 0.016 m değerinde PPK-LC yönteminde ise sağa koordinatta 0.009 m, yukarı koordinatta 0.009 m, elipsoidal yükseklikte 0.010 m

değerinde, PPP-TC yönteminde ise sağa koordinatta 0.023 m, yukarı koordinatta 0.025 m, elipsoidal yükseklikte 0.023 m değerinde, PPK-TC yönteminde ise sağa koordinatta 0.007 m, yukarı koordinatta 0.008 m, elipsoidal yükseklikte 0.008 m değerinde olmaktadır. PPK-LC yöntemi ve TC yöntemleri arasında çok fazla fark bulunmaktadır. Ancak grafiklerde görüldüğü üzere TC yönteminin daha iyi olduğu bölgeler başlangıç ve bitiş epoklarındaki statik durumdaki zaman dilimlerinde daha iyi olduğu LC yönteminin ise daha kalabalık ve hareketli bölgelerde daha iyi sonuçlar üretmektedir.



11. SONUÇ

Otonom araçlar birden fazla ileri teknoloji sensör ve yazılımsal altyapıyı barındıran sistemler bütünüdür ve konum bilgisi bu araçların en önemli unsurlarındandır. Otonom araç konum bilgisini harita üretiminde, konumlamada ve planlama bölümlerinde kullanmaktadır. Otonom bir aracın konum bilgisinin doğruluğunun yüksek ve sürekli olması gerekmektedir. Şehir alanları, üniversite kampüsleri, havaalanları gibi insan ve araç trafiğinin yoğun olduğu alanlarda kullanılan bu araçlarda düşük doğrulukta konum bilgisi ölümcül dereceye ulaşacak kazalara yol açabilmektedir. Bundan dolayı otonom bir aracın insan gibi düşündüğü varsayılırsa, ilk soracağı soru “NERDEYİM?” olmaktadır. Bu sorunun cevabı da konum bilgisi tarafından cevaplanmaktadır. Konum bilgisi GNSS tarafından 3B olarak üretilmektedir. Ancak GNSS dış çevreye bağımlı bir sistemdir. Yüksek binalar, altgeçitler, yansıtıcı yüzeyler vb. alanlar GNSS ile elde edilen konum doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı GNSS ile konum verisi sağlanamayan alanlar yeryüzünde mevcuttur. Dış çevreden etkilenmeyen sistemlerin GNSS ile ortak kullanılarak otonom aracın konum bilgisinin doğruluğu artırılmaktadır. Bu sistemlerden en yaygın kullanılanı ise INS sistemidir. INS sistemi dış çevreden bağımsız olarak konum bilgisi üretse de, çok fazla sapma ve gürültülü değerlere sahip olabilmektedir. Bu iki sistemin entegre edilmesi ile GNSS’in konum bilgisi üretilmediği alanlarda INS’den yararlanırken GNSS’de INS’in sapma ve gürültülerini düzeltmektedir.

Bu çalışmada 4. seviye otonom bir araç için gerekli olan hassas ve yüksek doğruluklu konum bilgisinin sağlanması için farklı sistem ve yöntemlerin karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilmiştir.

İlk analiz kısmında farklı GNSS sistemlerinin (GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU) kombinasyonları ile otonom aracın konum doğruluğundaki değişimler incelenmiştir. Günümüzde kullanılan GNSS değerlendirme yazılımlarında temel sistem olan GPS sisteminin tek başına üretmiş olduğu konum doğruluklarından ikili ve üçlü uydu kombinasyonlarında elde edilen konum doğruluğu değerlerinin daha iyi olduğu gözlenmektedir. Çözüme en yüksek katkı ise GALILEO uydu sistemi ile sağlanmıştır. Görünen uydu sayısı arttıkça konum doğruluğunun iyileştiği belirlenmiştir. En yüksek konum ve yükseklik doğrulukları ise

GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU kombinasyonu ile elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda yoğun şehir alanlarında gözlenen uydu sayılarının beş ve altına düştüğü görülmekte bu da tekli uydu çözümünde doğruluğun düşmesine neden olmaktadır. Çoklu sistem kullanımında ise uydu sayılarının dört kat arttığı bununda konum doğruluğunu önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Uydu görüşünün büyük oranda kısıtlandığı alanlarda kullanılan otonom araçların çoklu uydu sistemleri ile daha yüksek doğrulukta konum bilgisi sağlayacağı söylenebilmektedir.

İkinci analizde ise GNSS/INS entegrasyonu ile elde edilen otonom aracın konum bilgisinin doğrulukları değerlendirilmiştir. Yalnızca GNSS çözümlerinde elde edilen konum bilgisinin GNSS sinyallerinin kesintiye uğradığı alanlarda sağlanamadığı gözlenmiştir. GNSS/INS entegrasyonu LC ve TC yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. LC yönteminde değerlendirilmiş GNSS verileri ve INS verileri Kalman filtresine girmekte ve elde edilen sonuçlar konum bilgisi olmaktadır. TC yönteminde ise ham GNSS verileri, INS verileri ile özelleştirilmiş Kalman filtresine girmekte ve üretilen sonuçlar navigasyon çözümlerini oluşturmaktadır. LC ve TC yöntemleri yalnızca GNSS'den oluşan konumlama çözümlerine göre daha yüksek doğrulukta ve hassaslıkta konum bilgisi üretmiştir. GNSS sistemlerinin düşük doğrulukta konum bilgisi ürettiği alanlarda LC yöntemi TC yöntemine göre daha iyi sonuçlar üretmektedir. Ancak gözlenen uydu sayısının dörtten az olduğu alanlarda LC yöntemi ile konum bilgisi üretilememekteyken TC yöntemi ile konum bilgisi üretilmektedir. Yalnızca GNSS alıcısı ile otonom aracın şehir içi alanlarda sürekli konum bilgisi sağlayamadı görülmekte olup GNSS/INS entegrasyonu ile kesintisiz konumlama çözümünün sağlanması gerektiği görülmüştür. LC yönteminin kullanımın daha kolay olması ve TC yöntemine kıyasla az da olsa daha iyi sonuçlar üretmesinden dolayı otonom araçlarda daha kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

Son analizde de PPK ve PPP yöntemlerinin otonom aracın konum belirleme doğrulukları incelenmiştir. Yalnızca GNSS çözümlerinde PPK çözümünün, PPP çözümüne göre daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür. PPK yönteminin LC ve TC yöntemleri ile INS entegrasyonunda üretilen konum bilgisinin doğruluklarının hem PPK-GNSS çözümüne hemde PPP-LC ve PPP-TC yöntemlerine göre çok daha iyi olduğu gözlenmiştir. PPK yöntemi PPP yöntemine göre daha iyi sonuçlar üretmesine rağmen PPK yönteminin referans bir GNSS alıcısına ihtiyaç duyması ve çözümlerinde bu referans istasyonun gözlemleyebildiği uydu sistemleri ile sınırlı olması bu yöntemin dezavantajlarından biridir. Her ne kadar bu çalışmada kullanılan

gezen GNSS alıcısı dört farklı uydu sistemini desteklemekte olsa da referans istasyonunun sadece GPS ve GLONASS verilerini çözümleyebiliyor olması sebebiyle PPK yönteminin çözümü sadece bu iki uydu sistemi ile sınırlı kalmıştır. PPP yöntemi ise başka bir referans GNSS alıcısına gereksinim duymadan GNSS alıcısının desteklediği tüm GNSS uydu sistemlerini kullanarak konum bilgisi üretmektedir. PPK yöntemindeki referans istasyon gerekliliği göz önüne alındığında, PPP yönteminin tüm dünyada kullanılması düşünülen otonom araçlar için daha kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.



KAYNAKÇA

- Abozyd, S., Toraya, A. and Gaber, N. (2022). Design and Modeling of Fiber-Free Optical MEMS Accelerometer Enabling 3D Measurements. *Micromachines*.13(3). 343. <https://doi.org/10.3390/mi13030343>
- Alcay, S. ve Atiz, O. F. (2020). Farklı yazılımlar kullanılarak gerçek zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) yönteminin performansının incelenmesi. *Geomatik*. 6(1). 77-83. <https://doi.org/10.29128/geomatik.687709>
- Alkan, R. M., Erol, S., Ozulu, I. M. and Ilci, V. (2020). Accuracy comparison of post-processed PPP and real-time absolute positioning techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 11(1). 178–190. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1714752>
- Alkan, R. M., Erol, Serdar. ve Mutlu, B. (2022). IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği. *Yerbilimleri*.43(1). 76-95.
- Alsadik, B. (2019). *Adjustment models in 3D geomatics and computational geophysics: with MATLAB examples*. Elsevier.
- Akar, F. ve Orman, K., (2020). Otonom Kara Araçlarındaki Görüş Sistemlerinin İncelenmesi. *MÜHENDİSLİK VE MİMARLIK BİLİMLERİ Teori, Güncel Araştırmalar ve Yeni Eğilimler*. (22-29),
- Angrisano, A. (2010). *GNSS/INS integration methods*. Dottorato di ricerca (PhD) in Scienze Geodetiche Topografiche Thesis, Università degli Studi di Napoli PARTHENOPE, Naple.
- Azis, R. A., Suhandri, H. F. and Wijaya, D. D. (2019). “The Study of Position Accuracy Using Precise Point Positioning (PPP) ” In Perspective of Indonesian National Standard of Horizontal Reference Network 2. ISGNSS. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199401004>
- Bahadur, B. ve Nohutçu, M. (2020). MULTI-GNSS PPP : An Alternative Positioning Technique for Establishing Ground Control Points. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEgeo)*. 7(1). 88-92.
- Barshan, B. and Durrant-Whyte, H. F. (1993). An inertial navigation system for a mobile robot. *IFAC Proceedings*. 26(1). 54-59.
- Beitia, J., Clifford, A., Fell, C. ve Loisel, P. (2015, September). Quartz pendulous accelerometers for navigation and tactical grade systems. In *2015 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS)* (1-20). IEEE.
- Benabadji, N. ve Belbachir, A. H. (2012). Automatic tracking system for weather satellite image reception. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 20(4). <https://doi.org/10.3906/elk-1003-401>
- Betz, J. W. (2021). *The Navstar Global Positioning System*. 1.
- Bidikar, B., Rao, G. S., Ganesh, L., ve Kumar, M. S. (2014). Satellite Clock Error and Orbital Solution Error Estimation for Precise Navigation Applications. *Positioning*.05(01). 22–26.
- Blewitt, G. (1997). Basics of the GPS Technique : Observation Equations. *Geodetic Applications of GPS*. 1–46.
- Chai, D., Chen, G., Wang, S. ve Lu, X. (2018). Loosely coupled GNSS/INS integration based on an auto regressive model in a data gap environment. *Acta Geodaetica et Geophysica*. 53(4). 691-715.
- Charles, A. S. (2017). *Kalman Filtering : A Bayesian Approach*. 6. 1–3.

- Chen, Q., Zhang, Q. and Niu, X. (2020). Estimate the pitch and heading mounting angles of the IMU for land vehicular GNSS/INS integrated system. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*. 22(10). 6503-6515.
- Cherniak, I., ve Zakharenkova, I. (2017). New advantages of the combined GPS and GLONASS observations for high - latitude ionospheric irregularities monitoring : case study of June 2015 geomagnetic storm. *Earth, Planets and Space*.
<https://doi.org/10.1186/s40623-017-0652-0>
- Chiang, K., Chang, H., Li, Y., Tsai, G., Tseng, C., ve Tien, Y. (2019). Assessment for INS / GNSS / Odometer / Barometer Integration in Loosely-Coupled and Tightly-Coupled Scheme in a GNSS-Degraded Environment. *IEEE Sensors Journal*.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2954532>
- Cho, Y., Park, J., Park, S., & Jung, E. S. (2017). Technology acceptance modeling based on user experience for autonomous vehicles. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*. 36(2). 87-108.
- Cohen, S. A., ve Hopkins, D. (2019). Autonomous vehicles and the future of urban tourism. *Annals of Tourism Research*. 74. 33-42
- Dawoud, S. (2012). *GNSS principles and comparison*.
- Degli, U., Di, S., Angrisano, A., Prof, S., Petovello, M. and Vultaggio, P. M. (2010). *Dipartimento di Scienze Applicate Dottorato di ricerca in Scienze Geodetiche e Topografiche XXIII Ciclo GNSS / INS Integration Methods*.
- Demir, M. N. ve Altun, Y. Otonom Araçla Genetik Algoritma Kullanılarak Haritalama ve Lokasyon. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 8(1). 654-666.
- Diaz, E. M., Ahmed, D. B. and Kaiser, S. (2019). Methods Based on Inertial Sensors. *Geographical and Fingerprinting Data for Positioning and Navigation Systems*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813189-3.00016-2>
- Dong, Y., Wang, D., Zhang, L., Li, Q. and Wu, J. (2020). Tightly coupled GNSS/INS integration with robust sequential kalman filter for accurate vehicular navigation. *Sensors*. 20(2). 561.
- Eissfeller, B., Ameres, G., Kropp, V. and Sanroma, D. (2007). Performance of GPS , GLONASS and Galileo. *In Photogrammetric Week*. 7. 185-199.
- Elsheikh, M., Abdelfatah, W., Nourledin, A., Iqbal, U. and Korenberg, M. (2019). Low-cost real-time PPP/INS integration for automated land vehicles. *Sensors (Switzerland)*. 19(22). 1–21. <https://doi.org/10.3390/s19224896>
- Erdogan, B., Karlitepe, F., Ocalan, T. ve Tunalioglu, N. (2018). Performance analysis of Real Time PPP for transit of Mercury. *Measurement*. 129. 358-367.
- Erol, S. and Alkan, R. M. (2018). “Comparative Analysis of Multi- constellation GNSS Precise Point Positioning (PPP) in Kinematic Mode”. *International Symposium GeoPreVi*, 2018, Bucharest, Romania.
- ESA (2022). *What is Galileo?*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo.
- ESA (2021). *Galileo Signal Plan*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan.
- Euspa (2022). *Galileo is the European global satellite-based navigation system*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/What-Galileo>.
- Euspa (2022). *Galileo Services*. Erişim: 21 Temmuz. 2022,

<https://www.euspa.europa.eu/galileo/services>.

- Falco, G., Pini, M. and Marucco, G. (2017). *Loose and Tight GNSS / INS Integrations : Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios*. *Sensors*. 17(2). 255.<https://doi.org/10.3390/s17020255>
- Falco, G., Einicke, G. A., Malos, J. T. and Dosis, F. (2012). Performance analysis of constrained loosely coupled GPS/INS integration solutions. *Sensors*. 12(11). 15983-16007.
- Falcone, M., Hahn, J. and Burger, T. (2017). Galileo. In *Springer handbook of global navigation satellite systems* (247-272). Springer.
- Farag, W. (2021). Real - Time Autonomous Vehicle Localization Based on Particle and Unscented Kalman Filters. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 32(2). 309–325. <https://doi.org/10.1007/s40313-020-00666-w>
- Farrell, J. A. and Wendel, J. (2017). GNSS/INS Integration. In *Springer handbook of global navigation satellite systems*. (811-840). Springer.
- Fernández-Hernández, I., Simón, J., Blasi, R., Payne, C., Miquel, T. and Boyero, J. P. (2014). The Galileo Commercial Service: Current Status and Prospects. *European Navigation Conference, (ENC-GNSS), November*. <http://gpsworld.com/enc-gnss-2014-program-now-online/%5Cnhttp://mycoordinates.org/the-galileo-commercial-service-current-status-and-prospects/>
- Ferrara, N.G., Daniel, O., Figueiredo e Silva, P., Nurmi, J., Lohan, ES. (2017). Multi-GNSS: Facts and Issues. In: Nurmi, J., Lohan, ES., Wymeersch, H., Seco-Granados, G., Nykänen, O. (eds) *Multi-Technology Positioning*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50427-8_6
- Filyashkin, N. K. and Yatskivsky, V. S. (2013). “Prediction of Inertial Navigation System Error Dynamics in INS / GPS System”. *IEEE 2nd International Conference, 2013*. 206–209.
- Fussell, D. S. (1960). *An Elementary Introduction to Kalman Filtering*. 6–11.
- Gabrlík, P., Cour-Harbo, A. L., Kalvodova, P., Zalud, L., & Janata, P. (2018). Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. *International journal of remote sensing*. 39(15-16). 4931-4959.
- Galileo SIS ICD. (2008). *Galileo Open Service Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD)*. Draft 1 01/02/2008, 2008
- Gallon, E., Joerger, M., Member, S., Pervan, B., ve Member, S. (2021). *Robust Modeling of GNSS Tropospheric Delay Dynamics*. 9251(c). <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3068441>
- Gao, G. X. (2012). How Many GNSS Satellites are Too Many ?. *IEEE Transactions on aerospace and electronic Systems*. 48(4). 2865-2874.
- Ghimire, B. D., Chapagain, N. P., Khadka, B., Bidari, G., Bhatta, K. and Thapa, A. S. (2021). GPS TEC Scintillations and TEC depletion as seen from Hetauda and NAST, Nepal for 2016. *BIBECHANA*. 18(2). 87-94.
- Giorgi, G., ve Teunissen, P. J. G. (y.y.). *Determination*.
- Grewal, M. S., Andrews, A. P., ve Bartone, C. G. (2020). *Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons.
- GPS (2021). *The Global Positioning System*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <https://www.gps.gov/systems/gps/#:~:text=The%20Global%20Positioning%20System&text=This%20system%20consists%20of%20three,the%20space%20and%20control%20segments>.

- GPS (2022). *Space Segment*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- GPS (2021). *Pseudorandom Noise Code Assignments*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <https://www.gps.gov/technical/prn-codes/>
- Groves, P. D. (2015). Navigation using inertial sensors. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 30(2). 42-69.
- Guo, J., ve Zhong, M. (2017). *Calibration and compensation of the scale factor errors in DTG POS*. November. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2261631>
- Habrich, H., ve Söhne, W. (2013, April). German National Galileo Public Regulated Service (PRS) Testing Activities. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (EGU2013-10458).
- Håkansson, M., Jensen, A. B. O., Horemuz, M., ve Hedling, G. (2017). Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning. *GPS Solutions*. 21(3). 849–860. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0572-7>
- Han, H., Wang, L. and Wang, M. (2021). *An Online Gyro Scale Factor Error Calibration method for Laser RINS*. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3071342>
- Hauschild, A. (2017). Basic Observation Equations. *Springer Handbooks*. Dll. 561–582. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_19
- Haykin, S. (2001). *NEURAL NETWORKS KALMAN FILTERING AND Edited by* (C. 5).
- Hegarty, C. J. (2012). *GNSS Signals – An Overview*.
- Hein, G. W. (2020). Status, perspectives and trends of satellite navigation. *Satellite Navigation*. 1(1). 1-12.
- Hu, G., Gao, S. and Zhong, Y. (2014). A derivative UKF for tightly coupled INS / GPS integrated navigation. *ISA Transactions*. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.10.006>
- Huihui, W., Xingqun, Z. and Yanhua, Z. (2008). Geometric dilution of precision for GPS single-point positioning based on four satellites. *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 19(5). 1058-1063.
- IGS (y.y.). *Network*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <https://igs.org/network/#station-map-list>
- İ, M. K. (y.y.). *GPS de Kullanılan Navigasyon Amaçlı Doğruluk Ölçütleri*. 28–40.
- İlçev, S. D. (2020). Ground Communication Segment. In *Global Aeronautical Distress and Safety Systems (GADSS)*. Springer, Cham.
- İlçi, V. (2020). *CenterPoint RTX Teknolojisinin Tekrarlanabilirliğinin Araştırılması* 5(48883), 10–18. <https://doi.org/10.29128/geomatik.560026>
- İlçi, V. and Peker, A. U. (2022). The kinematic performance of real-time PPP services in challenging environment. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 189. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110434>
- Jerez, G. O., Barroca, D. and Alves, M. (2019). *ARTICLE GENERATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF GPS AND GLONASS VIRTUAL DATA FOR POSITIONING UNDER DIFFERENT IONOSPHERIC*. 25(2). <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000200007>
- Jia, Y. B. (2015). Discrete-time kalman filter and the particle filter.
- Jim, H.(2016). *LSM9DS1 Breakout Hookup Guide*. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/lsm9ds1-breakout-hookup-guide/lsm9ds1-overview>

- Jin, S., Cardellach, E. and Xie, F. (2014). *GNSS Remote Sensing*.
- Jost, D.(2019). *What is an accelerometer?*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-accelerometer>
- Joubert, N., Reid, T. G. R. and Noble, F. (2020). Developments in Modern GNSS and Its Impact on Autonomous Vehicle Architectures. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. Iv.* 2029–2036. <https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304840>
- Kahveci, M., Karagöz, H. Ve Selbesoğlu, M. O. (2011). Statik ve RTK GNSS ölçüm ve hesaplamalarının karşılaştırılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi.* (104). 3-13.
- Kahveci, M. ve Yıldız, F. (2012). GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kalman, R. E. (1960). Contributions to the theory of optimal control. *Bol. soc. mat. Mexicana.* 5(2). 102-119.
- Karaali, C. ve Yildirim, Ö. (1996). *GLOBAL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ (GPS)*. 103–108.
- Karam, S., Lehtola, V. and Vosselman, G. (2019). Integrating a low-cost mems imu into a laser-based slam for indoor mobile mapping. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 42. 149-156.
- Kasat, N. (2019). “Static Coordinate Estimation Techniques Based on Satellite Navigation. 64–69”. In *2019 4th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques*.
- Kassas, Z. M., Closas, P. and Gross, J. (2019). Navigation systems panel report navigation systems for autonomous and semi-autonomous vehicles: Current trends and future challenges. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine.* 34(5).
- Khalaf, E. W., Chouaib, I. and Wainakh, M. (2017). Development of Unscented Kalman Filter for Loosely-coupled INS/GPS/Magnetometer/Barometer Integration.
- Klein, I., Filin, S. and Toledo, T. (2011). A modified loosely coupled approach to INS/GPS integration. *Journal of Applied Geodesy.* 5(2). 87-98.
- Koca, B. ve Ceylan, A. (2018). Uydu Konum Belirleme Sistemlerindeki (GNSS) Güncel Durum ve Son Geliřmeler. *Geomatik.* 3(1). 63–73.
- Kok, M., Hol, J. D., Sch, T. B., Kok, M., Hol, J. D. and Sch, T. B. (2017). *Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation arXiv preprint arXiv:1704.06053*.
- Koulouri, A., Smith, N. D., Vani, B. C., Rimpiläinen, V., Astin, I., ve Forte, B. (2020). Methodology to estimate ionospheric scintillation risk maps and their contribution to position dilution of precision on the ground. *Journal of Geodesy.* 94(2). 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01344-0>
- Kurowski, M., Roy, S., Damerius, R., Abel, D. and Jeinsch, T. (2019). “Multi-vehicle Guidance , Navigation and Control towards Autonomous Ship Maneuvering in Confined Waters”. *18th European Control Conference (ECC)*. 2559-2564. IEEE. <https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8795726>
- Langley, Richard B, Peter JG Teunissen and Oliver Montenbruck (2017). “Introduction to GNSS”. In: *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Ed. by P.J. Teunissen and O. Montenbruck. Springer. 3–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_1.
- Lau, L. and Cross, P. (2007). Development and testing of a new ray-tracing approach to GNSS carrier-phase multipath modelling. *Journal of Geodesy.* 81(11). 713-732.
- Lechner, W. and Baumann, S. (2000). Global navigation satellite systems. *Computers and*

- Electronics in Agriculture*. 25(1-2). 67–85.
- Leclère, J., Landry, R. and Botteron, C. (2018). Comparison of L1 and L5 bands GNSS signals acquisition. *Sensors*. 18(9). 2779.
- Lee, J. and Shim, D. (2016). *Fast Acquisition of GPS L5 PRN and NH Code Using L1 Signal for Software Receivers*. 14(4). 1133–1139.
- Leung, K. T., Whidborne, J. F. and Purdy, D. (y.y.). *Vehicle System Dynamics : International Journal of Vehicle Mechanics and A review of ground vehicle dynamic state estimations utilising GPS / INS*. July 2014, 37–41.
<https://doi.org/10.1080/00423110903406649>
- Li, H., Liao, X., Li, B. and Yang, L. (2018). Modeling of the GPS satellite clock error and its performance evaluation in precise point positioning ScienceDirect Modeling of the GPS satellite clock error and its performance evaluation in precise point positioning. *Advances in Space Research*. 62(4). 845–854. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.025>
- Li, Q., Li, R., Ji, K. and Dai, W. (2015). *Kalman Filter and Its Application*. 10. 74–77.
<https://doi.org/10.1109/ICINIS.2015.35>
- Li, R., Zheng, S., Wang, E., Chen, J., Feng, S., Wang, D. and Dai, L. (2020). Advances in BeiDou Navigation Satellite System (BDS) and satellite navigation augmentation technologies. *Satellite Navigation*. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s43020-020-00010-2>
- Li, X., Li, X., Liu, G., Feng, G., Yuan, Y., Zhang, K. and Ren, X. (2020). Triple - frequency PPP ambiguity resolution with multi - constellation GNSS : BDS and Galileo. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01229-x>
- Li, Z., Gao, J., Wang, J. and Yao, Y. (2016). PPP / INS tightly coupled navigation using adaptive federated filter. *GPS Solutions*. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0511-z>
- Liu, H. (2020). *Robot Systems for Rail Transit Applications*. Elsevier.
- Maenaka, K., Ioku, S., Sawai, N., Fujita, T. and Takayama, Y. (2005). Design, fabrication and operation of MEMS gimbal gyroscope. *Sensors and Actuators A: Physical*. 121(1). 6-15.
- Martín, A., Anquela, A. B., Berné, J. L. and Sanmartin, M. (2012). *Kinematic GNSS-PPP results from various software packages and raw data configurations*. 7(3), 419–431.
<https://doi.org/10.5897/SRE11.1885>
- Martínez-Díaz, M. and Soriguera, F. (2018). Autonomous vehicles: theoretical and practical challenges. *Transportation Research Procedia*. 33. 275-282.
- Mansur, G. B. and Ferreira, L. D. D. (2019). Error behavior of atomic clocks aboard GPS satellites. *Boletim de Ciências Geodésicas*. 25.
- Meng, L., Wang, J., Chen, J., Wang, B. and Zhang, Y. (2020). *Extended Geometry and Probability Model for GNSS + Constellation Performance Evaluation*.
- Meng, X., Wang, H. and Liu, B. (2017). A robust vehicle localization approach based on GNSS/IMU/DIM/LiDAR sensor fusion for autonomous vehicles. *Sensors (Switzerland)*. 17(9). <https://doi.org/10.3390/s17092140>
- Mochida, Y., Tamura, M. and Ohwada, K. (2000). *A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beams for the drive and detection modes*. 170–178.
- Mohammed, Z. and Elfadel, I. A. M. (2018). *Monolithic Multi Degree of Freedom (MDoF) Capacitive MEMS Accelerometers*. 1–20. <https://doi.org/10.3390/mi9110602>
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K. and Schaer, S. (2017). The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) –

- Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, 59(7), 1671–1697. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.011>
- Munguía, R. (2014). A GPS-aided inertial navigation system in direct configuration. *Journal of applied research and technology*. 12(4). 803-814.
- Nabholz, U., Curcic, M., Mehner, J. E. and Degenfeld-schonburg, P. (2019). *Nonlinear Dynamical System Model for Drive Mode Amplitude Instabilities in MEMS Gyroscopes*. 2–5.
- Niko, S., Obst, M., Wanielik, G. and Protzel, P. (2012). *Multipath Mitigation in GNSS-based Localization using Robust Optimization*.
- Noureldin, A., Karamat, T. B. and Georgy, J. (2013). Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration.
- Novatel (2022). *Inertial Explorer*. <https://novatel.com/products/waypoint-post-processing-software/inertial-explorer>
- Novosti (2011). *Russia Opens Criminal Case in Glonass Mishap*.
<https://spacenews.com/russia-opens-criminal-case-glonass-mishap-ria-novosti/>
- Odolinski, R., Teunissen, P. J. G. and Zhang, B. (2020). Multi-GNSS processing, positioning and applications. *Journal of Spatial Science*. 65(1). 3–5.
<https://doi.org/10.1080/14498596.2020.1687170>
- Osborn, L. E., Iskarous, M. M. and Thakor, N. V. (2020). 22. *Wearable Robotics*. INC.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814659-0.00022-9>
- Othman, K. (2021). Public acceptance and perception of autonomous vehicles: a comprehensive review. *AI and Ethics*. 1-33.
- Ozulu, I. M. and Alkan, R. M. (2018). “Kinematic PPP Positioning Using Different Processing Platforms (9535)”. *FIG Congress 2018 Embracing our smart world where the continents connect : enhancing the geospatial matur*.
- Pan, L., Zhang, Z., Yu, W. and Dai, W. (2021). Intersystem bias in gps, glonass, galileo, bds-3, and bds-2 integrated spp: Characteristics and performance enhancement as a priori constraints. *Remote Sensing*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/rs13224650>
- Pang, J. (2003). *Direct global positioning system P-code acquisition field programmable gate array prototyping*. Ohio University.
- Pasricha, G. K. (2006). Kalman filter and its economic applications.
- Passaro, V., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M. and Campanella, C. E. (2017). Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective. *Sensors*. 17(10). 2284.
- Paziewski, J. (2020). Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations. *Measurement Science and Technology*. 31(9).
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8a7d>
- Paziewski, J., Sieradzki, R. and Baryla, R. (2018). Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: Application to precise dynamic displacement detection. *Measurement Science and technology*. 29(3). 035002.
- P. D. Groves. *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. Artech house. 2013
- Pei, Y., Biswas, S., Fussell, D. S. and Pingali, K. (2019). An elementary introduction to Kalman filtering. *Communications of the ACM*. 62(11). 122-133.
- Perez, R. O. (2016). Ionospheric error contribution to GNSS single-frequency navigation at the 2014 solar maximum. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/10.1007/s00190-016->

- Perosanz, F. (2019). Comptes Rendus Physique GNSS : A revolution for precise geopositioning. *Comptes Rendus Physique*. 20(3). 171–175. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.05.018>
- Peyret, F., Gillieron, P. Y., Ruotsalainen, L. and Engdahl, J. (2015). SaPPART white paper: Better use of global navigation satellite systems for safer and greener transport. *SaPPART White paper: Better use of Global Navigation Satellite Systems for safer and greener transport*.
- Pirsiavash, A., Broumandan, A., Lachapelle, G. and O’Keefe, K. (2018). GNSS code multipath mitigation by cascading measurement monitoring techniques. *Sensors*. 18(6). 1967.
- Pirti, A. (2021). *Evaluating The Accuracy Of Post-Processed Kinematic (PPK)*. 47(2), 66–70.
- Popescu, G. (2016). *Pixel Geolocation Algorithm For Satellite Scanner Data*. June 2014.
- Puente, I. and Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*. 46(7). 2127–2145. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.03.006>
- Rahal, Wassila Leila; Benabadji, Nouredine; and Belbachir, Ahmed Hafid (2012) "Automatic tracking system for weather satellite image reception. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 20 (4). <https://doi.org/10.3906/elk-1003-401>
- Reid, T. G. R., Houts, S. E. and Cammarata, R. (2019). *Localization Requirements for Autonomous Vehicles*. 1–16.
- Revnivkykh, S., Bolkunov, A., Serdyukov, A. and Montenbruck, O. (2017). Glonass. In *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. 219-245. Springer, Cham.
- Rigatos, G. and Tzafestas, S. (2007). *Systems Extended Kalman filtering for fuzzy modelling and multi-sensor fusion*. 3954(May). <https://doi.org/10.1080/01443610500212468>
- Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. and Grinter, T. (2012). *Precise Point Positioning : Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End ? Precise Point Positioning : Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End ?* May, 6–10.
- Roth, M., Hendeby, G., Fritsche, C. and Gustafsson, F. (2017). *The Ensemble Kalman filter : a signal processing perspective*. <https://doi.org/10.1186/s13634-017-0492-x>
- Roujean, J., National, C., Météorologiques, D. R. and Cedex, T. (2018). Inversion of Lumped Parameters Using BRDF Kernels. *Comprehensive Remote Sensing*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10346-X>
- Rovira, A., Deimos, G., Segura, I., Orús, R., José, P., Juan, M. and Sanz, J. (2020). Assessing the quality of ionospheric models through GNSS positioning error : methodology and results. *GPS Solutions*. 24(1). 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0918-z>
- Sabatini, R., Moore, T., ve Ramasamy, S. (2017). Progress in Aerospace Sciences Global navigation satellite systems performance analysis and augmentation strategies in aviation. *Progress in Aerospace Sciences, October*, 1–54. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.10.002>
- Sadman, A. A. M. S. and Hossam-E-Haider, M. (2019). GNSS position accuracy considering GDOP and UERE for different constellation over Bangladesh. *2019 22nd International Conference on Computer and Information Technology, ICCIT 2019*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCIT48885.2019.9038577>

- Sairo, H., Akopian, D. and Takala, J. (2003). *Weighted dilution of precision as quality measure in satellite positioning*. 150(6). <https://doi.org/10.1049/ip-rsn>
- Santerre, R. (2017). Geometry of GPS dilution of precision : revisited. *GPS Solutions*. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0649-y>
- Sathyamoorthy, D., Shafii, S., Amin, Z. F. M., Jusoh, A. and Ali, S. Z. (2016, June). Evaluating the effect of global positioning system (GPS) satellite clock error via GPS simulation. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 37(1).
- Schaefer, M. and Woodyer, T. (2015). Assessing absolute and relative accuracy of recreation-grade and mobile phone GNSS devices: A method for informing device choice. *Area*. 47(2). 185–196. <https://doi.org/10.1111/area.12172>
- Schmidt, G. T. (2015). Navigation sensors and systems in GNSS degraded and denied environments. *Chinese Journal of Aeronautics*. 28(1). 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2014.12.001>
- Schwarting, W., Alonso-Mora, J. and Rus, D. (2018). Planning and decision-making for autonomous vehicles. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 1(1). 187-210.
- Senapati, M., Anand, B., Barsaiyan, V. and Rajalakshmi, P. (2020). “Geo-referencing system for locating objects globally in LiDAR point cloud”. *IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*.1-5. IEEE.
- Shao, M. And e Sui, X. (2016). Study on Differential GPS Positioning Methods. *Proceedings - 2015 International Conference on Computer Science and Mechanical Automation, CSMA 2015*. 1. 223–225. <https://doi.org/10.1109/CSMA.2015.51>
- Sheimy, N. El and Youssef, A. (2020). Inertial sensors technologies for navigation applications : state of the art and future trends. *Satellite Navigation*. 1–21. <https://doi.org/10.1186/s43020-019-0001-5>
- Sheridan, K., Alves, P., Masterson, S., Busser, J., Sadeque, Z., Gakne, P. V. and Martin, R. (2019). “TerraStar X: Precise Point Positioning with Fast Convergence and Integrity”. *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*. 1916-1943.
- Spangenberg, R. and Goehring, D. (2016). “Pole-based Localization for Autonomous Vehicles in Urban Scenarios”. *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*. 2161–2166.
- Spacecraft ve Satellites (2022). *Galileo Overview*. Erişim: 21 Temmuz. 2022 <https://spaceflight101.com/spacecraft/galileo/>.
- Stefan, J. (2000). Navigating with GPS. *Circuit Cellar*.123. 1–6.
- Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M. and Gerke, M. (2017). Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of UAV-based mapping. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 42. 355.
- Stocker, S.(2019). *Gyroscope applications graphic*. <https://www.ceva-dsp.com/ourblog/exploring-the-application-of-gyroscopes/hil-exploring-gyroscope-applications-blog-wk-2/>
- Subirana, S., Zornoza, J. and Garc, R. (2013). *Overview of GNSS Positioning Techniques and code pseudorange modelling*.
- Sun, J., Wu, Z., Yin, Z. and Ma, B. (2017). A simplified GNSS tropospheric delay model based on the nonlinear hypothesis. *GPS Solutions*. 21(4). 1735-1745. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0644-3>

- Süzer, A. E. and Oktal, H. (2017). "PRN Code Correlation in GPS Receiver". In *2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*. 189–193.
- Suzuki, T., Matsuo, K. and Amano, Y. (2020). Rotating GNSS Antennas : Simultaneous LOS and NLOS Multipath Mitigation. *GPS Solutions*. 24(3). 1–13.
<https://doi.org/10.1007/s10291-020-01006-w>
- Şişman, Y. ve İlçi, V. (2021). Real-Time eXtended (RTX) Konum Doğruluğuna Etki Eden Bazı Faktörlerin İstatistiksel Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 21. 138–146. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.827658>
- Tahsin, M., Sultana, S., Reza, T. and Hossam-E-Haider, M. (2015, May). Analysis of DOP and its preciseness in GNSS position estimation. In *2015 International conference on electrical engineering and information communication technology (ICEEICT)*. 1-6. IEEE.
- Techniques, M. M. (2018). *Measurement Monitoring Techniques*.
<https://doi.org/10.3390/s18061967>
- Tiberius, C. (2003). Handheld GPS Receiver Accuracy: Standard Positioning Service. *GPS World*. 14(2).
- Toribio, S., Merri, M., Matussi, S., Pena, A. and Payne, C. (2006). Galileo IOV phase: Design and implementation challenges of the Galileo Ground Control Segment. *SpaceOps 2006 Conference*. 1–10. <https://doi.org/10.2514/6.2006-5750>
- Transportu, P., Zeszyt, T., Tyszko, A., Temlin, T. and Oszczak, S. (2007). Gnss systems in vehicle fleet management. *Transport Problems*. 2(2). 11-16.
- Tsui, J. B. Y. (2005). *Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach* (Vol. 173). John Wiley & Sons.
- Tyszko, A., Temlin, T. and Oszczak, S. (2007). GNSS systems in vehicle fleet management. *Transport Problems*. 2(2). 11-16.
- UAV Navigation (2021). *Global Navigation Satellite System (GNSS)*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <https://www.uavnavigation.com/support/kb/general/inertial-navigation-system-and-estimation/global-navigation-satellite-system-gnss>
- Unavco(2020). *Selective Availability and the GPS Receiver*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <https://www.unavco.org/education/resources/tutorials-and-handouts/tutorials/selective-availability-gps.html>
- Uçarlı, A. C., Demir, F., Erol, S. ve Alkan, R. M. (2021). Farklı GNSS uydu s istemlerinin hassas nokta konumlama (PPP) tekniğinin performansına etkisinin incelenmesi. *Geomatik*. 6(3). 247–258. <https://doi.org/10.29128/geomatik.779420>
- Uçarlı, A. C. ve Demir, F. (2020). *Farklı GNSS uydu s istemlerinin 3D nokta konum doğruluğuna etkisi*. (Lisans bitirme tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Urrea, C. (2021). Kalman Filter : Historical Overview and Review of Its Use in Robotics 60 Years after Its Creation. *Journal of Sensors* 2021(1).
- Van Dierendonck, A. J., Russell, S. S., Kopitzke, E. R. and Birnbaum, M. (1978). The GPS navigation message. *Navigation*. 25(2). 147-165.
- Vinh, L. and Tung, T. How Multi-GNSS bring benefits to sea [Power Point slayt]. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2014/trieste-gnss/07.pdf> adresinden edinilmiştir
- Viki (2011). *GLONASS*. Erişim: 21 Temmuz. 2022, <http://wiki.gis.com/wiki/index.php/GLONASS>.
- Vikipedi (2022). *GLONASS*. Erişim: 21 Temmuz. 2022,

<https://tr.wikipedia.org/wiki/GLONASS>.

- Wei, L. I., Yunbin, Y., Jikun, O. U., Hui, L. I. and Zishen, L. I. (2012). A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. *Chinese science bulletin*. 57(17). 2132–2139. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5010-9>
- Wen, W., Bai, X., Kan, Y. C. and Hsu, L. (2019). “Tightly Coupled GNSS / INS Integration Via Factor Graph and Aided by Fish - eye Camera”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2944680>
- Wendel, J., Maier, A. and Trommer, G. F. (2005). “Comparison of Extended and Sigma-Point Kalman Filters for Tightly Coupled GPS / INS Integration”. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. August.
- Wendel, J. and Trommer, G. F. (2004). *Tightly coupled GPS / INS integration for missile applications*. 8, 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2004.07.003>
- Wu, W., Guo, F. and Zheng, J. (2020). Analysis of Galileo signal - in - space range error and positioning performance during 2015 – 2018. *Satellite Navigation*. 1–13. <https://doi.org/10.1186/s43020-019-0005-1>
- Wu, Y., Hu, X., Hu, D., Li, T. and Lian, J. (2005). Strapdown inertial navigation system algorithms based on dual quaternions. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*. 41(1). 110-132.
- Xia, G. and Wang, G. (2016). INS/GNSS Tightly-Coupled Integration Using Quaternion-Based AUPF for USV. *Sensors*. 16(8). 1215. <https://doi.org/10.3390/s16081215>
- Xie, P. and Petovello, M. G. (2015). Measuring GNSS Multipath Distributions in Urban Canyon Environments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 64(2). 366–377.
- Yang, D., Zhao, F., Liu, K., Lim, H. B., Frazzoli, E. and Rus, D. (2012). “A GPS pseudorange based cooperative vehicular distance measurement technique”. *IEEE Vehicular Technology Conference*. <https://doi.org/10.1109/VETECS.2012.6240332>
- Yang, F., Guo, J., Zhang, C., Li, Y. and Li, J. (2021). A Regional Zenith Tropospheric Delay (ZTD) Model Based on. *Remote Sensing*. 13(5). 838.
- Ye, F., Pan, S., Gao, W., Wang, H., Ma, C. and Wang, Y. (2021). A Tightly Coupled BDS / INS Integrated Positioning Algorithm Based on Triple-Frequency Single-Epoch Observations. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6653625>
- Zhang, H., Aldana-jague, E., Clapuyt, F., Wilken, F. and Vanacker, V. (2019). Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure- from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection. *Earth Surface Dynamics*. 7(3). 807-827.
- Zhang, L., Li, Q., Guo, D., He, Y. and Yan, Y. (2006). “Evaluation of GPS/IMU supported aerial photogrammetry”. *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. 1512-1514.
- Zhao, S., Cui, X. and Lu, M. (2021). Single point positioning using full and fractional pseudorange measurements from GPS and BDS. *Survey Review*. 53(376). 27–34. <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1683327>
- Zheng, Y., Jiang, Y., Luo, N., Ding, X., Zhang, Y. T. and Poon, C. C. (2021). Wearing sensors inside and outside of the human body for the early detection of diseases. *Wearable Sensors*. 85-103. Academic Press.
- Zhou, H., Li, Z., Liu, C., Xu, J., Li, S., and Zhou, K. (2020). Assessment of the performance of carrier-phase and Doppler smoothing code for low-cost GNSS receiver positioning.

Results in Physics. 19(November). 103574. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103574>

Zhou, J., Knedlik, S. and Loffeld, O. (2010). *INS / GPS Tightly-coupled Integration using Adaptive Unscented Particle Filter*. 491–511.
<https://doi.org/10.1017/S0373463310000068>

Zhuang, X., Li, P., Li, D. and Sui, W. (y.y.). *Introductory Chapter : Gyroscopes - Principles and Applications*. 1–4.

Zumberge, J. F., Heftin, M. B., Jefferson, D. C., ve Watkins, M. M. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of geophysical research: solid earth*. 102(B3). 5005-5017.



ÖZ GEÇMİŞ

Ahmet Can UÇARLI, Samsun Aziz Atik Fen Lisesi'ni bitirdikten sonra İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği bölümünden 18.08.2020 tarihinde mezun oldu. 2020 yılında OMÜ Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programına girdi. Mezuniyetinden bu yana CBS mühendisi olarak görev yapan Ahmet Can Uçarlı, orta derecede İngilizce bilmektedir (YÖKDİL:84). Temel ilgi alanları, GNSS sistemleri, Otonom araçlarda konum bilgisi, Ölçme sistemleri .

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0002-6401-5477

Yayınlar:

1. Uçarlı, A. C., Demir, F., Erol, S., ve Alkan, R. M. (2021). *Farklı GNSS uydu sistemlerinin hassas nokta konumlama (PPP) tekniğinin performansına etkisinin incelenmesi Investigation of the effect of different GNSS satellite systems on the performance of the precise point positioning (PPP) technique*. 6(3), 247–258. <https://doi.org/10.29128/geomatik.779420>
2. Uçarlı, A. C., İlçi, V., Peker, A. U., ve Par, K. (2022). “Investigation of positioning accuracy of gnss rt-ppp and ppk methods for autonomous vehicles”. *4th International "Başkent" Congress On Physical, Social and Health Sciences Full-Text Book (26-27 Şubat 2022)*.Ed. Bhatti, M. S., Sivasakthivelan, P., Fazıl, B. S. F., Fırat, T.