

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK MALİYETLİ GNSS ALICILARINDA  
KONUMLAMA DOĞRULUĞUNUN HASSAS YÖRÜNGE  
BİLGİSİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**FURKAN SOĞUKKUYU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI**

**GEBZE  
2021**

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK MALİYETLİ GNSS ALICILARINDA  
KONUMLAMA DOĞRULUĞUNUN HASSAS  
YÖRÜNGE BİLGİSİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**FURKAN SOĞUKKUYU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMANI  
PROF. DR. MEHMET HALİS SAKA**

**GEBZE  
2021**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**IMPROVING POSITIONING ACCURACY  
WITH PRECISE EPHEMERIS INFORMATION  
ON LOW-COST GNSS RECEIVERS**

**FURKAN SOĞUKKUYU**

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

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

THESIS SUPERVISOR  
PROF. DR. MEHMET HALİS SAKA

**GEBZE**

**2021**



## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

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

### JÜRİ

ÜYE

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

ÜYE

: Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Reha Metin ALKAN

### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

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

İMZA/MÜHÜR



## ÖZET

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS), tek başına gerçek zamanlı olarak kullanıcıların konum ihtiyacını standart alıcılarda sağlar. Konumlama doğruluğunun gerçek zamanlı iyileştirilmesi, Diferansiyel GNSS (DGNSS) yöntemiyle gerçekleştirilir. DGNSS; referans istasyonu ve kullanıcı arasında ekstra bir iletişim bağlantısına ile metre seviyesindeki doğruluk gereksinimlerini karşılayan rölatif bir tekniktir. Ayrıca, kullanıcıya yakın bir referans istasyonu bulunması şartıyla, DGNSS-CP yöntemi ile de ham gözlem verisi kaydetmeyen GNSS alıcılarının konumlama doğruluğu artırılabilir. Bu tez kapsamında, referans istasyonu verisine ihtiyaç duymadan, Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ürünleri ve NMEA mesajlarını kullanarak alıcının konumlama doğruluğunu arttırmayı amaçlayan DGNSS-IGS modeli geliştirilmiştir. DGNSS-IGS modelinin, DGNSS-CP modeline göre avantajlarının doğruluk ölçütlerine göre karşılaştırılması ve sonuçların analizi bir test çalışmasıyla gerçekleştirilmiştir. DGNSS-IGS modelinin konumlama doğruluğuna etkisi, farklı doğruluğa sahip IGS ürünleriyle (ultra-rapid, rapid ve final) test edilmiştir. Gözlem anından sonra yayınlanmış IGS ürünleriyle konumlama doğruluğunun, alıcının SPP çözümüne göre ~%40 arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kestirilmiş ultra-rapid ürünleriyle DGNSS-IGS yönteminin gerçek zamanlı olarak uygulanabileceği ve konum bilgisini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. DGNSS-CP ve DGNSS-IGS yöntemlerinin yatay konum doğruluğuna etkisi karşılaştırıldığında eş değer sonuçlar bulunmuştur. Sonuç olarak, IGS ürünleri kullanılarak, ham gözlem verilerini kaydetmeyen düşük maliyetli GNSS alıcılarının konumlama doğruluklarının iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler: Diferansiyel GNSS (DGNSS), Doğruluk, NMEA, Düşük Maliyetli GNSS Alıcısı, DGNSS-IGS, DGNSS-CP, Navigasyon, Tek Nokta Konumlama (SPP).**

## SUMMARY

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) alone, provide positioning needs of users with standard receivers in real-time. Real-time improvement of positioning accuracy is carried out by the differential GNSS method. DGNSS is a relative technique used for meter level accuracy requirements with an extra communication link between a reference station and user. In addition, the positioning accuracy of GNSS receivers that do not record raw observation data can be improved by the DGNSS-CP method provided that there is a reference station close to the user. In this thesis, the DGNSS-IGS model was developed, which aims to improve the positioning accuracy of the receiver using International GNSS Service (IGS) products and NMEA messages without the need for reference station data. An experimental study was carried out in order to analyze results and compare the advantages of DGNSS-IGS model over DGNSS-CP model in the context of accuracy. The effect of DGNSS-IGS model on positioning accuracy was tested with IGS products with different levels of accuracies (ultra-rapid, rapid and final). Compared to the receiver's SPP solution, it was noted that positioning accuracy increased ~40% with IGS products that produced after the observation date. It was also noted that the DGNSS-IGS method can be implemented in real-time with predicted ultra-rapid products and improves position information. Equivalent results were found compared to the effect of DGNSS-CP and DGNSS-IGS methods on horizontal positioning accuracy. As a result, it was concluded that by using IGS products, the positioning accuracy of low-cost GNSS receivers that do not record raw observation data can be improved.

**Key Words: Differential GNSS (DGNSS), Accuracy, NMEA, Low-cost GNSS receiver, DGNSS-IGS, DGNSS-CP, Navigation, Single Point Positioning (SPP).**

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, yaşamım boyunca beni karşılıksız seven, eğiten, her türlü desteği veren ve yaşamımla ilgili aldığım tüm kararları maddi ve manevi destekleyerek bugünlere gelmemde çok büyük payı olan çok değerli anne ve babama,

Tezimin konusunun belirlenmesinden bitişine kadar bana inanan, her zaman yanımda olan ve çok değerli bilgi birikimleri ile bu çalışmanın yolunu açan danışmanım Prof. Dr. M. Halis SAKA'ya,

Yüksek lisans yolculuğumda her zaman yanımda olan Arş. Gör. Sinan BİRİNCİ'ye,

Tez çalışmam boyunca göstermiş oldukları destekle yanımda olan değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Elif Özlem YILMAZ, Arş. Gör. Süleyman ŞİŞMAN, Arş. Gör. Dr. Hasan TONBUL, Arş. Gör. Mert BEZCİOĞLU, Arş. Gör. Rabia BOVKIR, GTÜ Harita Mühendisliği Bölümü hocalarıma ve Bölüm Sekreteri Canan KIRCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. DİFERANSİYEL GNSS (DGNSS)	4
2.1. DGNSS Servisleri	6
2.2. DGNSS Matematik Modeli	10
2.3. Konum Etki Alanı Düzeltmesi (Position-Domain Correction)	12
2.4. Ölçme Etki Alanı Düzeltmesi (Measurement-Domain Correction)	13
2.5. NMEA 0183 Formatı	15
2.5.1. GGA Mesajı	17
2.5.2. GSA Mesajı	17
2.5.3. GSV Mesajı	18
2.6. DGNSS Projeksiyon Düzeltmesi (DGNSS-CP)	19
3. DGNSS-IGS	22
3.1. IGS	22
3.2. IGS Ürünleri	23
3.3. DGNSS-IGS Algoritması	25
3.3.1. Uydu Yörünge ve Saat Hatası Düzeltmesi	29
3.3.2. İyonosferik Gecikme Düzeltmesi	33
3.3.2.1 Klobuchar Modeli	34
3.3.2.2 Küresel İyonosferik Harita Modeli	34
4. UYGULAMA	37
4.1. Çalışma Alanı ve Verilerin Toplanması	37
4.2. GNSS Verilerinin İşlenmesi	40

4.3. Test Çalışması Sonuçları	41
4.3.1. DGNSS-CP Sonuçları	41
4.3.2. DGNSS-IGS Sonuçları	43
4.3.2.1. Pseudorange Düzeltmesinin Etkisi	43
4.3.2.2. Uydu Saat Hatası Düzeltmesinin Etkisi	49
4.3.2.3. İyonosferik Gecikme Düzeltmesinin Etkisi	54
4.3.2.4. Kestirilmiş Ultra-Rapid Ürünlerin Etkisi	57
4.3.2.5. Gözlemlenmiş Ultra-Rapid Ürünlerin Etkisi	59
4.3.2.6. Rapid Ürünlerin Etkisi	61
4.3.2.7. Final Ürünlerin Etkisi	63
4.3.3. DGNSS-CP ile DGNSS-IGS Karşılaştırılması	65
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	74

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
$e^i$	: Alıcı ile uydu ile arasındaki görüş hattı
$b$	: Alıcı saat hatası
$h^i$	: Alıcıdan uyduya doğru olan görüş hattı
$z$	: Alıcıdan uyduya olan zenit açısını
$\Delta x_s$	: Bilinmeyenler vektörü
$\lambda$	: Boylam
$\varepsilon$	: Çeşitli hatalar
$M$	: Çok yolluluk etkisi (Multipath)
$x_{DGNS-CP}$	: DGNS-CP yöntemiyle hesaplanan konum
$R$	: Dünyanın yarıçapı
$\rho_c$	: Düzeltilmiş pseudorange ölçüsü
$LOS_{ecef}^i$	: ECEF koordinat sisteminde görüş hattı vektörü
$\varphi$	: Enlem
$I_p$	: Faz ölçüleri için iyonosferik gecikme
$H$	: Gözlem matrisi
$I_{IGS}$	: IGS ürünleri ile hesaplanan iyonosferik gecikme düzeltmesi
$PRC_{BRD-IGS}$	: IGS ürünleri ile hesaplanan pseudorange düzeltmesi
$B_{IGS}$	: IGS ürünleri ile hesaplanan uydu saat hatası düzeltmesi
$z'$	: İyonosfer delme noktasından (IPP) uyduya olan zenit açısını
$h_1$	: İyonosfer ince kabuğunun yüksekliğini
$I$	: İyonosferik gecikme
$\hat{x}_m, \hat{y}_m, \hat{z}_m$	: Kestirilmiş alıcı koordinatları
$\hat{b}_u$	: Kestirilmiş alıcı saat hatası
$\hat{I}$	: Kestirilmiş iyonosferik gecikme
$\hat{\rho}_c^i$	: Kestirilmiş pseudorange ölçüsü
$\hat{T}$	: Kestirilmiş troposferik gecikme
$\hat{B}$	: Kestirilmiş uydu saat hatası
$\delta \vec{x}$	: Konum düzeltmesi

$\vec{x}_{DGNS(P)}$	: Konum etki alanı düzeltmesi yöntemiyle hesaplanan konum
$\vec{x}_{DGNS(M)}$	: Ölçme etki alanı düzeltmesi yöntemiyle hesaplanan konum
$t$	: Ölçme zamanı
$PRC$	: Pseudorange düzeltmesi
$RRC$	: Pseudorange düzeltmesi değişimi
$\rho$	: Pseudorange ölçüsü
$x_m, y_m, z_m$	: Referans istasyonu koordinatları
$t_0$	: Referans zamanı
$f$	: Sinyalin frekansı
$LOS_{local}^i$	: Toposentrik koordinat sisteminde görüş hattı vektörü
$T$	: Troposferik gecikme
$R_m^i$	: Uydu ile referans istasyonu arasındaki geometrik mesafe
$x^i, y^i, z^i$	: Uydu koordinatları
$B$	: Uydu saat hatası
$X_{AFM}$	: Uydunun anten faz merkezi koordinatları
$X_{KM}$	: Uydunun kütle merkezi koordinatları
ANTEX	: The Antenna Exchange Format
BKG	: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CORS	: Continuously Operating Reference Station
DGNSS	: Diferansiyel GNSS
DGNSS-CP	: DGNSS Projeksiyon Düzeltmesi
DORIS	: Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite
ECEF	: Earth Centered Earth Fixed
GBAS	: Ground-Based Augmentation Systems
GGOS	: Global Geodetic Observing System
GIM	: Global İonospheric Maps
GLONASS	: Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLObal Navigation Satellite System)
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
GPRS	: General Packet Radio Service
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
GPT	: Global Pressure and Temperature
GSM	: Global System for Mobile Communication

IGS	: International GNSS Service (Uluslararası GNSS Servisi)
INS	: Inertial Navigation System
IONEX	: The IONosphere Map EXchange
IPP	: Ionospheric Pierce Point
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
LAAS	: Local Area Augmentation System
LADGNSS	: Local Area DGNS
MSAS	: Multifunctional Transport Satellites Satellite Augmentation System
NAVIC	: Navigation with Indian Constellation
NDGPS	: Nationwide Differential Global Positioning System
NMEA	: National Marine Electronics Association (Ulusal Deniz Elektroniği Birliği)
NTRIP	: Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PPP	: Precise Point Positioning (Hassas Nokta Konumlama)
QZSS	: Quasi-Zenith Satellite System
RTCM	: Radio Technical Commission for Maritime Services
RTCM SC-104	: RTCM Special Committee 104
RTK	: Real Time Kinematic
SA	: Selective Ability
SBAS	: Satellite-Based Augmentation Systems
SLR	: Satellite Laser Ranging
SPP	: Single Point Positioning
STEC	: Slant Total Electron Content
TEC	: Total Electron Content (Toplam Elektron Yoğunluğu)
TECU	: Total Electron Content Unit
UMTS	: Universal Mobile Telecommunication System
VHF	: Very High Frequency
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
VTEC	: Vertical Total Electron Content
WADGNSS	: Wide Area DGNS
ZTD	: Zenith Tropospheric Delay



# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: DGNSS tekniği.	4
2.2: LADGNSS tekniği; referans alıcı, gezici alıcı ve uydu konfigürasyonu.	6
2.3: WADGNSS tekniği; referans alıcı, gezici alıcı ve uydu konfigürasyonu.	7
2.4: Konum etki alanı düzeltmesi tekniği.	12
2.5: Ölçme etki alanı düzeltmesi tekniği.	14
3.1: a) Yayın efemerisi b) hassas efemerise ilişkin yörünge ve saat bilgilerinin referans noktaları.	30
3.2: Pseudorange düzeltmesinin geometrisi.	33
3.3: İyonosfer gecikmesinin geometrisi.	36
4.1: U-blox C94-M8P geliştirme kiti.	37
4.2: Çalışma alanı.	38
4.3: NMEA verisi örneği.	39
4.4: DGNSS-CP ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	42
4.5: Kestirilmiş ultra-rapid pseudorange düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	45
4.6: Gözlemlenmiş ultra-rapid pseudorange düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	46
4.7: Rapid pseudorange düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	47
4.8: Final pseudorange düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	48
4.9: Kestirilmiş ultra-rapid uydu saat hatası düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	50
4.10: Gözlemlenmiş ultra-rapid uydu saat hatası düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	51
4.11: Rapid uydu saat hatası düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	52

4.12:	Final uydu saat hatası düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	53
4.13:	Rapid iyonosferik gecikme düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	55
4.14:	Final iyonosferik gecikme düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	56
4.15:	Kestirilmiş ultra-rapid ürünleri ile DGNSS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	58
4.16:	Gözlemlenmiş ultra-rapid ürünleri ile DGNSS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	60
4.17:	Rapid ürünleri ile DGNSS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	62
4.18:	Final ürünleri ile DGNSS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	64
4.19	DGNSS-CP, DGNSS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.	66

# TABLolar DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: DGNSS servisleri.	9
2.2: NMEA konuşmacı kimliği.	16
2.3: NMEA mesajları ve içerikleri.	16
2.4: GGA mesajı içeriği ve örneği.	17
2.5: GSA mesajı içeriği ve örneği	18
2.6: GSV mesajı içeriği ve örneği.	19
3.1: IGS yörünge ve saat ürünleri.	24
3.2: IGS atmosferik ürünleri.	24
3.3: L1 frekansı için uydu anteni faz kayıklığı	30
4.1: HRT ve MAR İstasyonlarının Coğrafi Koordinatları (WGS84).	37
4.2: DGNSS-CP algoritması istatistiksel sonuçları.	43
4.3: DGNSS-IGS algoritması pseudorange düzeltmesi istatistiksel sonuçları.	44
4.4: DGNSS-IGS algoritması uydu saat hatası düzeltmesi istatistiksel sonuçları.	49
4.5: DGNSS-IGS algoritması iyonosferik gecikme düzeltmesi istatistiksel sonuçları.	54
4.6: Kestirilmiş ultra-rapid ürünleri ile DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.	57
4.7: Gözlemlenmiş ultra-rapid ürünleri ile DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.	59
4.8: Rapid ürünler ile DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.	61
4.9: Final ürünler ile DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.	63
4.10: DGNSS-CP ve DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.	65

# 1. GİRİŞ

Yapay uydu sistemlerine dayalı konum belirleme yöntemi, GNSS (Global Navigation Satellite Systems), gelişim sürecinde (1970'li yıllardan günümüze) bilimsel çalışmalar başta olmak üzere, pek çok alandaki konum belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. GNSS, yeryüzüne ilişkin konum ihtiyacı duyulan, hava araçları ve yakın uydu sistemleride dahil olmak üzere, konum bilgisini beklenen doğrulukta, hızlı ve ekonomik sunabilmesi sayesinde, navigasyon ve diğer alanlar için, birincil konum belirleme yöntemi haline gelmiştir. Güncel itibarıyla GNSS, dördü küresel (Global Positioning System (GPS), Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), Galileo ve BeiDou) ve ikisi de bölgesel (Navigation with Indian Constellation (NAVIC) ve Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)) olmak üzere toplam altı adet farklı uydu sisteminden oluşmaktadır. Alıcı üretiminin de bu çerçeveyi bir bütün olarak ele alması, farklı sistemleri birlikte etkin ve verimli kullanımını sağlamıştır.

GNSS'de yalnızca GPS ile Tek Nokta Konumlamayla (SPP), konum 3.8 m ila 7 m arasında bir doğrulukla belirlenir ve günlük hayatımızda pek çok ihtiyacı karşılar [Web 1, 2021]. Bu yöntem, günümüz itibarıyla kullanılan cep telefonlarındaki GNSS konum belirleme yöntemini de büyük ölçüde kapsar. Bu yöntemin doğruluğu, sistemlerin kabiliyetleriyle sınırlı temel ölçme inceliği ve standart hata kaynakları dışında, çevresel ölçme hatalarından da etkilenir. Bu nedenle, gerçek zamanlı ölçülerin iyileştirilmesi amacıyla GNSS, kuruluşundan günümüze yardımcı destek sistemleriyle iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu durum, ilave bir donanım ve hesap külfeti getirir, bazı ihtiyaç alanları için katkı sağlaması bakımından önem kazanmış ve literatürde Diferansiyel GNSS (DGNSS) adıyla yerini almıştır.

Diferansiyel GNSS (DGNSS) yöntemi 1980'ler itibarıyla GPS üzerinden geliştirilmiştir. DGNSS, bir veya daha fazla referans istasyonu tarafından oluşturulan düzeltmeleri ve ham ölçümleri kullanarak, ölçümlerdeki sistematik hataların azaltılmasını hedefler [Enge et al., 1988], [Krasuski and Ćwiklak, 2018]. Referans istasyonlarından elde edilen düzeltmeler, uydu saat hatalarını, yörünge hatalarını ve kullanıcı tarafındaki iyonosferik ve troposferik hataların çoğunu ortadan kaldırır. Böylece DGNSS kullanıcısının konumlama doğruluğu, birçok uygulama için yeterli olan 1 metreden 2 metreye kadar iyileşir. Günümüz itibarıyla, akıllı ulaşım

sistemlerinde DGNS, doğruluğu ve güvenilirliği artırmak için diğer sensörlere entegre edilmiştir ve böylece, bu türden araç kontrol ve güvenlik sistemleri için özel bir DGNS ünitesinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur [Rife, 2012], [Vu et al., 2012], [Alam and Dempster, 2013], [Miura et al., 2015], [Kaplan and Hegarty, 2017]. DGNS konum hatası, referans istasyonu ve kullanıcı arasındaki mesafe ile artmaktadır. Mesafe ile bozulma, esas olarak iyonosferik gecikmeden kaynaklanmaktadır [Weng et al., 2015], [Kaplan and Hegarty, 2017]. Çok yolluluk (multipath) vb. alıcıdan kaynaklı hatalar ise DGNS ile giderilememektedir. Önceki çalışmalarda, çok yolluluk etkisinin ataletsel navigasyon sistemi (INS) ile entegre konumlama ve üç boyutlu haritalar yardımıyla azaltılabildiği ortaya konmuştur [Rife, 2012], [Vu et al., 2012], [Alam and Dempster, 2013], [Barrios et al., 2015], [Miura et al., 2015].

DGNS, elektronik pazardaki çoğu akıllı telefona gömülü yonga setlerinde devre dışı bırakılmıştır, yani DGNS geleneksel GNSS alıcılarında elde edildiği gibi, GNSS yonga setlerine pseudorange düzeltmeleri ile elde edilememektedir. İlk olarak, 2016 yılında Google cihazlarında ham GNSS ölçümlerini erişimi açmıştır [Web 2, 2021]. Bu, daha yüksek doğruluk gerektiren uygulamalara büyük faydalar sağlamıştır. Yeni nesil akıllı telefonlarla, hassas nokta konumlama (PPP) veya gerçek zamanlı kinematik konumlama (RTK) kullanılarak desimetre doğruluğu elde edilebilmektedir [Niu et al., 2019], [Wu et al., 2019]. Bununla birlikte, üst sınıf akıllı telefonların çoğu, fazla güç tüketimi nedeniyle sürekli taşıyıcı faz ölçümü gerçekleştirmemektedir. Ek olarak, orta ve düşük sınıf akıllı telefonların çoğu pseudorange ölçümü gerçekleştirmemektedir ve bu nedenle DGNS işlemini desteklenmemektedir [Weng, 2020].

GNSS'nin gelişiminin erken aşamasında, GNSS doğruluğunu artırmak için konum alanı düzeltilmesi geliştirilmiştir. Bu basit yöntemde, referans istasyonunun ve kullanıcının konumlarını belirlemek için aynı uydu setini kullanıldığı varsayılmaktadır. Ancak, uydudan kullanıcıya giden doğrultudaki binalar veya ağaçlar GNSS sinyallerini engelleyebilir ve referans istasyonu ve kullanıcılar farklı uydu setlerini kullanabilirler. Bu nedenle, geleneksel konum düzeltilmesi, doğruluğu artırmak yerine, çoğu zaman GNSS'nin doğruluğunu bozmaktadır [Ogundipe, 2013], [Park et al., 2013], [Ji et al., 2015].

DGNS standart yöntemi ile konum belirleme dışında, navigasyon çözümü için literatürde farklı çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalar, pseudorange uzunluk

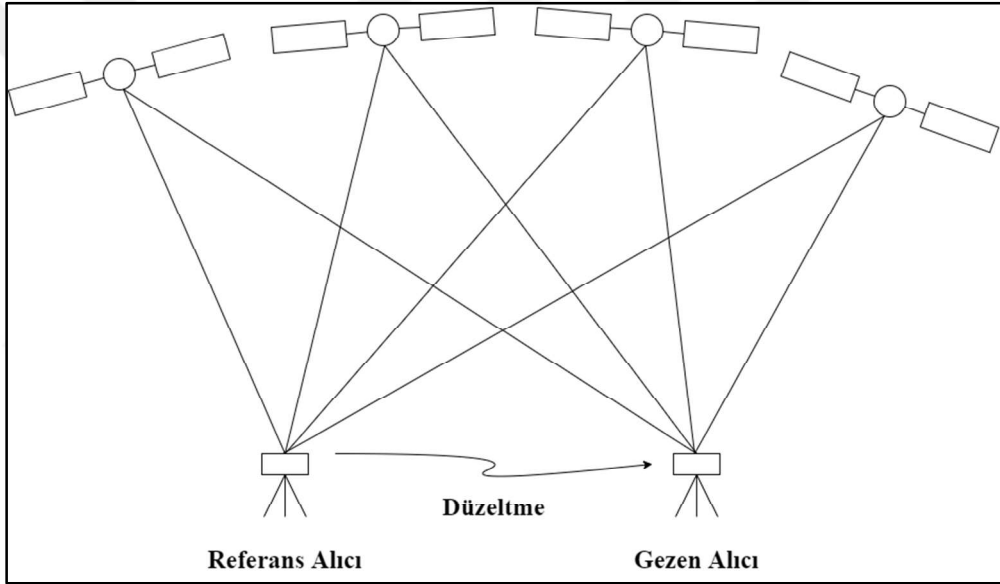
ölçülerine ulaşamayan standart navigasyon alıcılarıyla elde edilen konum değerlerinin düzeltilmesi fikrine dayanmaktadır. Bu düzeltme yakın noktalar için konum düzeltmesi şeklinde yapılabilir. Bunun dışında, pseudorange düzeltmeleri referans istasyonda, alıcının navigasyon çözümünde kullandığı sistematik hatalara ilişkin düzeltmelerde göz önüne alınmasıyla hesaplanır ve konum üzerindeki etkileri kestirilir. NMEA (National Marine Electronics Association) mesajlarına dayalı olarak ortaya konan bu DGNSS fikri, DGNSS-CP ismiyle ilk olarak Park ve arkadaşları tarafından öne sürülmüştür [Park et al., 2013]. Bu yöntemdeki esas fikir, alıcıdan uydulara olan görüş hattının (line-of-sight) NMEA mesajlarındaki yükseklik ve azimut açıları ile oluşturulmasıdır. Yapılan çalışmalarda, DGNSS-CP yöntemi ile ham gözlem verisi kaydetmeyen akıllı telefonların konum doğruluğunun iyileştirilebileceği ortaya konmuştur [Yoon et al., 2016], [Weng et al., 2020].

Bu temel düşünce esas alınarak, referans bir istasyon olmadan daha esnek bir çözümün; Uluslararası GNSS Servisi (IGS) tarafından sağlanan hassas yörünge, saat ve iyonosferik model ürünleriyle benzer şekilde uygulanabileceğinden hareket edilerek, DGNSS-IGS ismiyle yeni bir değerlendirme stratejisinin benzer katkıları sağlayabileceği düşüncesi bu çalışmanın ana fikrini oluşturmaktadır. Bu modelin ele alınmasının diğer bir motivasyonu; IGS ürünlerinin gerçek zamanlı olarak tüm GNSS sistemleri için yayınlanabileceğine yönelik ortaya çıkan gelişmelerdir. Özellikle, DGNSS-CP yöntemi gibi, DGNSS-IGS ile de ham gözlem verisi kaydetmeyen GNSS alıcılarının konum doğruluğu artırılabilir olması da en önemli motivasyonlardan birisi olmuştur.

Bu tez çalışmasının temel amacı, ham gözlem verisi kaydetmeyen düşük maliyetli GNSS alıcılarının, DGNSS-CP ve bu tez çalışması kapsamında önerilen DGNSS-IGS modeli ile konumlama doğruluğunun iyileştirilmesidir. DGNSS-IGS modeli; pseudorange düzeltmesi, uydu saat hatası düzeltmesi ve iyonosferik gecikme düzeltmesi olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. DGNSS-CP ve DGNSS-IGS'nin bileşenlerinin konumlama doğruluğuna katkısı analiz edilmiştir. Ayrıca, hassas ürünlerin yayınlanma süresi dikkate alınarak farklı ürün kombinasyonlarını kullanarak DGNSS-IGS'nin, düşük maliyetli GNSS alıcılarının konumlama doğruluğuna etkisi incelenmiştir.

## 2. DİFERANSİYEL GNSS (DGNS)

DGNSS, iki veya daha fazla alıcının kullanıldığı gerçek zamanlı bir konumlandırma tekniğidir. Bir alıcı, koordinatları bilinen, referans veya baz istasyonunda bulunur ve gezen alıcıya/alıcılara gerçek zamanlı düzeltme verisi gönderir. Referans istasyonu genellikle pseudorange düzeltmeleri hesaplar. Gezen alıcı, düzeltmeleri pseudorange ölçülerine uygular ve düzeltilmiş pseudorange ölçüleri ile nokta konumlama gerçekleştirir. DGNSS konumlama tekniği Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Düzeltilmiş pseudorange ölçülerinin kullanılması referans istasyonuna göre konum doğruluğunu iyileştirir [Hofmann-Wellenhof and Lichtenegger, 2008].



Şekil 2.1: DGNSS tekniği.

DGNSS, her biri en az bir GNSS alıcısı ile donatılmış, bilinen konumlarda bir veya daha fazla referans istasyonundan alınan ölçümlerden yararlanarak GNSS'nin konumlama performansını iyileştirme yöntemidir. Referans istasyon(lar), son kullanıcı için konumlama, navigasyon ve zamanlama performansını iyileştirmek için yararlı bilgiler sağlar. Sağlanan bilgiler şunları içerebilir:

- Son kullanıcıların ham pseudorange veya taşıyıcı faz ölçümlerine düzeltmeler, GNSS uydusu tarafından sağlanan yörünge ve saat verilerine düzeltmeler veya atmosferik düzeltmeler vb.

- Referans istasyonuna ait ham ölçüler
- Doğruluk verileri, örneğin, sağlanan düzeltmelerin doğruluğunun istatistiksel göstergeleri
- Referans istasyonun konumu, sağlığı ve meteorolojik verileri

Referans istasyonlar verileri, 300 kHz'in altındaki düşük frekanslardan L-bandına (1.000-2.000 MHz) kadar değişen frekanslardaki radyo bağlantıları veya internet kullanarak çeşitli veri bağlantıları ile son kullanıcıya gerçek zamanlı olarak sunulabilir. Her biri verileri sabit sürücüyü veya başka bir depolama cihazına kaydeden iki GNSS alıcısı kullanarak DGNSSS yöntemlerini gerçek zamanlı olmadan da uygulamak mümkündür.

Tüm DGNSSS sistemleri, GNSS hatalarının uzaysal ve zaman korelasyon özelliklerinden yararlanarak çalışır. Birçok GNSS hata kaynağı uzaysal ve zamansal olarak yüksek oranda ilişkili olduğundan, bu hatalar bilinen konumlarda bir veya daha fazla referans istasyonu kullanılarak ölçülebiliyorsa, zamanında sağlanan bu bilgiler son kullanıcıya büyük ölçüde fayda sağlayabilir. GNSS hatalarının korelasyonu genellikle daha kısa mesafeler için daha yüksek olduğundan, referans istasyonları son kullanıcıya daha yakın olduğunda, DGNSSS ile sağlanan doğruluk genellikle artar [Kaplan and Hegarty, 2017].

DGNSSS sistemleri, hizmet verilecek coğrafi alan açısından kategorize edilebilir. En basit GNSS sistemleri sadece çok küçük bir coğrafi alanda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanıcı ve referans İstasyonu arasındaki mesafe, baz vektörü olarak adlandırılır. Yaygın olarak 0-20 km mesafe kısa baz vektörü, 20-100 km mesafe orta baz vektörü, 100 km'den daha uzun mesafe uzun baz vektörü olarak adlandırılır. Büyük coğrafi alanları etkili bir şekilde kapsamak için, tipik olarak çok sayıda referans istasyonu ve farklı algoritmalar kullanılır. Bölgesel Alan (Regional-Area) ya da Geniş Alan (Wide-Area) terimleri, 1000 km'ye kadar olan alanları kapsayan bölgesel alan sistemlerini ve kıta gibi daha büyük bölgeleri kapsayan DGNSSS sistemlerini tanımlamak için sıklıkla kullanılmaktadır.

DGNSSS sistemlerini kod tabanlı veya taşıyıcı faz tabanlı teknikler olarak da sınıflandırılabilir. Kod tabanlı DGNSSS sistemleri esas olarak GNSS kod (yani, pseudorange) ölçümlerine dayanır, oysa taşıyıcı faz tabanlı DGNSSS sistemleri ise taşıyıcı faz ölçümlerine dayanır. Taşıyıcı faz ölçümleri, pseudorange ölçümlerden çok daha hassastır, ancak çözülmesi gereken tamsayı bilinmeyenini (ambiguity) içerir.

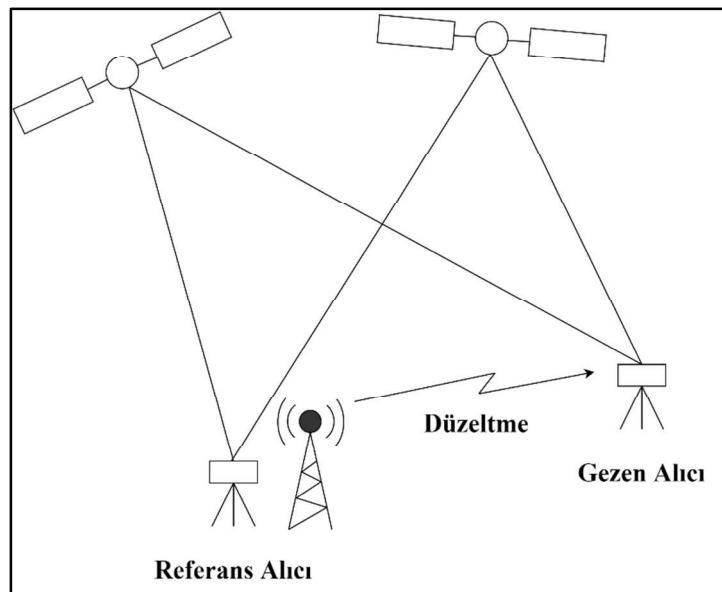


Kod tabanlı diferansiyel sistemler, desimetre düzeyinde konum doğruluğu sağlayabilirken, taşıyıcı tabanlı sistemler ise milimetre düzeyinde performans sağlayabilir [Kaplan and Hegarty, 2017].

## 2.1. DGNSS Servisleri

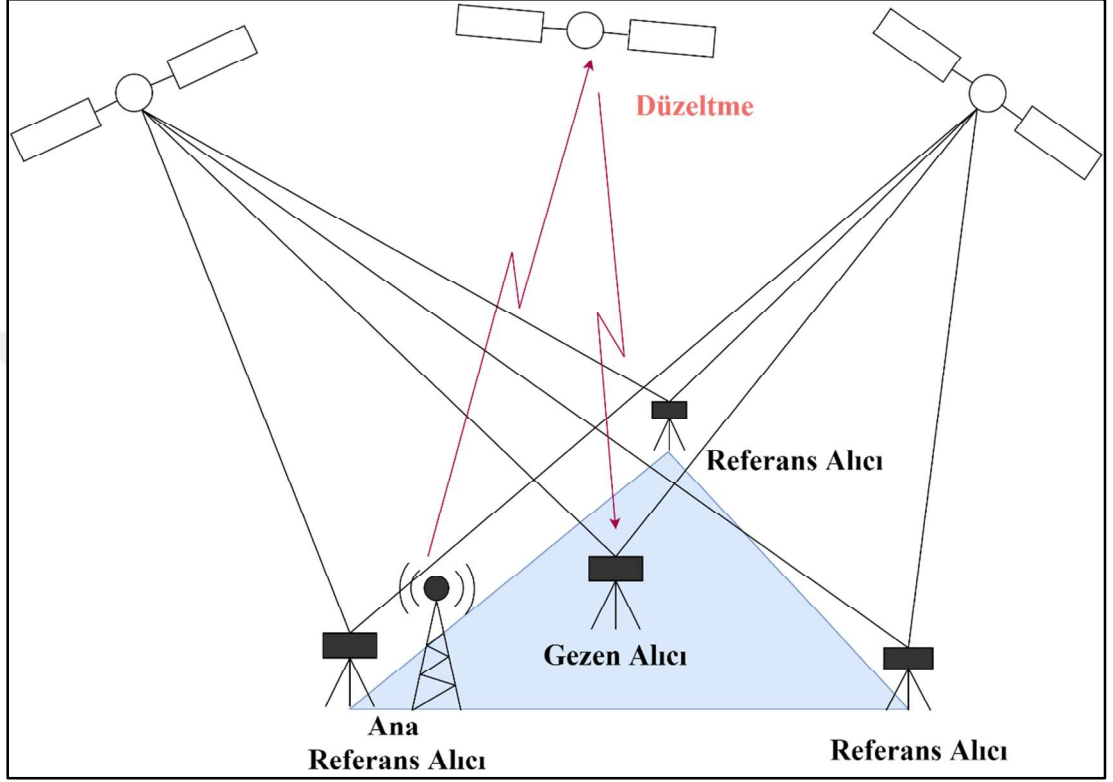
Bilinen bir konuma yerleştirilmiş olan GNSS alıcısı, gözlemleyebildiği tüm uyduların verilerini izler ve belirli bir mesafedeki kullanıcılara (gezici alıcı) gerçek zamanlı olarak iletilen DGNSS düzeltmeleri üretirler. Bu kullanıcılar, DGNSS düzeltmelerini kullanarak konum doğruluklarını arttırabilirler.

DGNSS düzeltmeleri tek bir referans istasyonunun verilerine dayanarak belirlenirse Küçük Alan DGNSS (Local Area DGNSS (LADGNSS)) olarak adlandırılır ve Şekil 2.2’de gösterilmektedir [Parkinson and Enge, 1996]. Bu teknikte, gezici alıcı genellikle tek frekanslıdır (GPS: L1). Gezici ile referans alıcıları arasında, yeterli ortak uyduya sahip olmak için en fazla 1000 km mesafe olmalıdır. Çünkü, mesafeye bağlı hata kaynakları (atmosfer, yörünge) nedeniyle, LADGNSS’nin konum doğruluğu 1-10 ppm ile sınırlıdır [Wuebbena et al., 1996]. Yani, 1000 km’lik bir mesafe için, konum doğruluğu yaklaşık 10 m’dir, bu da SPP’nin konum doğruluğuna karşılık gelmektedir ve bu nedenle daha uzun mesafelerde LADGNSS fayda sağlamamaktadır.



Şekil 2.2: LADGNSS tekniği; referans alıcı, gezici alıcı ve uydu konfigürasyonu.

DGNSS, tek bir referans istasyonu yerine tüm bir referans istasyonu ağına dayanıyorsa, konum doğruluğu geliştirilebilir (Şekil 2.3). Burada, çok frekanslı GNSS alıcıları ile donatılmış tüm referans istasyonları, verilerini ağı kapsadığı bölge için geçerli olan DGNSS düzeltmeleri üreten merkezi bir işleme tesisine göndermektedir.



Şekil 2.3: WADGNSS tekniği; referans alıcı, gezici alıcı ve uydu konfigürasyonu.

Bu teknik, Geniş Alanlı DGNSS (Wide Area DGNSS (WADGNSS)) olarak adlandırılmaktadır. WADGNSS, LADGNSS'ye göre aşağıdaki avantajlara sahiptir [Odiş and Wanninger, 2017]:

- Ağ, tek bir referans istasyonuna göre daha büyük bir alanı kapsamaktadır.
- Diferansiyel düzeltmeler, ağı kapsadığı alanda tutarlıdır. Ancak farklı referans istasyonlarına dayanarak üretilen düzeltmelerde tutarsızlıklar ortaya çıkabilir.
- Ağ, kapsama alanındaki mesafeye bağlı olan hata kaynakları (atmosfer, yörünge) için modeller hesaplayabilirken, bu tek bir referans istasyona dayanarak mümkün değildir.

Sadece kod ölçüsü kullanan WADGNSS'in konum doğruluğu 4 metre hesaplanmıştır [Kee and Parkinson, 1996]. Faz ölçüleriyle yumuşatılmış kod ölçülerinin kullanımında ise metre altı konum doğruluğunun elde edilmesi mümkündür [Rho and Langley, 2007].

Tek frekanslı GNSS alıcısı kullanan LADGNSS'nin konumlama doğruluğu, katsayıları navigasyon mesajında yayınlanan iyonosfer modeli vasıtasıyla, diferansiyel anlamda iyonosfer gecikmesinin azaltılmasıyla geliştirilebilir. İyonosfer gecikmesinin etkisi, GPS ve BeiDou için Klobuchar modeli, Galileo için ise NeQuick modeli kullanılarak azaltılabilir [Klobuchar, 1987], [Di Giovanni and Radicella, 1990], [Wu et al., 2013]. Bu modeller diferansiyel iyonosferik gecikmenin etkisini tamamen olmasa da %50 - %80 oranında azaltmaktadır [Yuan et al., 2008]. Diferansiyel troposferik gecikmeler ise Saastamoinen modeli veya GPT (Küresel basınç ve sıcaklık) modeli gibi standart modeller kullanılarak düzeltilmektedir [Saastamoinen, 1972], [Boehm et al., 2007].

DGNSS'nin en büyük uygulama alanı deniz taşımacılığı sektöründedir. Bunun başlıca nedeni, 1990'larda, çeşitli denizcilik ülkelerinin sahil güvenlik kurumları ve deniz feneri yetkililerinin, SA'nın GPS üzerindeki etkilerini azaltmak için farklı düzeltmeler sağlayan kapsamlı referans istasyon ağları oluşturmasıdır. İlk olarak, ABD Sahil Güvenlik Kurumu ve ABD Ulaştırma Bakanlığı tarafından ortaklaşa işletilen ABD çapında, NDGPS (Nationwide Differential Global Positioning System) kurulmuştur. 1999'dan beri faaliyette olan NDGPS ağı başlangıçta sadece kıyı bölgelerini kapsıyordu. Daha sonra, NDGPS tüm ABD'yi kapsayacak şekilde iç kesimlere de referans istasyonları yerleştirilerek genişletilmiştir. 2016 yılında, iç kesimlerdeki Sürekli Gözlem Yapan Referans İstasyonları (Continuously Operating Reference Station (CORS)) ağlarının büyümesi nedeniyle sadece kıyı bölgelerinde çalışmasına karar verilmiştir [Web 3, 2021].

DGNSS düzeltmeleri iletimi iki farklı sistem ile gerçekleştirilmektedir. İlk sistem, Yer Bazlı Destekleyici Sistemler (Ground-Based Augmentation Systems (GBAS)) olarak adlandırılır. Burada, düzeltme mesajları NDGPS'e benzer şekilde karasal mesajlar aracılığıyla iletilmektedir. İkinci sistem ise, Uydu Bazlı Destekleyici Sistemler (Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)), düzeltme mesajları uydular aracılığıyla iletilmektedir. Uydular aracılığıyla mesaj iletimi, karasal bağlantılar yoluyla iletime kıyasla daha geniş bir alanı kapsayabilme avantajına

sahiptir. GBAS ve SBAS tabanlı DGNSS servislerine örnekler Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: DGNSS servisleri

Servis Adı	İşletme	Kapsama Alanı	İletim Sistemi
NDGPS	Devlet	ABD	GBAS
SAPOS EPS	Devlet	Almanya	GBAS
AMSA	Devlet	Avustralya	GBAS
LAAS	Devlet	ABD	GBAS
WAAS	Devlet	ABD	SBAS
EGNOS	Devlet	Avrupa	SBAS
MSAS	Devlet	Japonya	SBAS
GAGAN	Devlet	Hindistan	SBAS
QZSS	Devlet	Japonya	SBAS
OmniSTAR VBS (Trimble)	Ticari	Küresel	SBAS
StarFire (NavCom/J. Deere)	Ticari	Küresel	SBAS
Starfix.L1 (Fugro)	Ticari	Küresel	SBAS
Veripos Standard (Veripos)	Ticari	Küresel	SBAS

MSAS (Multifunctional Transport Satellites Satellite Augmentation System) ve QZSS her ikisi de Japon sistemleri olmasına rağmen, sundukları hizmet türlerinde farklılık göstermektedirler: MSAS, tek frekanslı kod tabanlı konumlamayı artırmak için standart düzeltmeler sağlayan bir sistemdir, QZSS ise yoğun bir şekilde inşa edilmiş Japon kentsel bölgelerinde konumlamaya, faz ölçülerini de kullanarak düzeltmeler sağlar. Uçağın hassas konumu ve inişi için kullanılan Yerel Alan Destek Sistemi (Local Area Augmentation System (LAAS)), DGPS düzeltmelerinin iletimi için çok yüksek frekanslı (Very High Frequency (VHF)) bir radyo bağlantısı kullandığı için GBAS tipindedir [Odijk and Wanninger, 2017].

Veri iletişim bağlantısı, DGNSS düzeltmelerinin kullanıcılara gerçek zamanlı iletimi için gereklidir. Çoğu DGNSS servis sağlayıcısı, RTCM SC-104 (Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104) standart formatını kullanır. SBAS sistemleri, RTCM düzeltmelerini uydular aracılığıyla dağıtırken, GBAS sistemleri için kullanımda birkaç iletişim bağlantısı vardır [Odijk and Wanninger, 2017]:

- Çok yüksek frekanslı radyo bağlantısı (VHF)
- Mobil iletişim bağlantıları (Global System for Mobile Communication (GSM), General Packet Radio Service (GPRS), Universal Mobile Telecommunication System (UMTS))
- İnternet bağlantısı (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP))

2004 yılında BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) tarafından geliştirilen NTRIP, RTCM düzeltmelerinin internet üzerinden yayınlanmasını sağlamaktadır ve çoğu GNSS alıcısı üreticisi tarafından benimsenmiştir [Weber et al., 2005].

## 2.2. DGNSS Matematik Modeli

Koordinatları bilinen bir  $A$  noktasında,  $t_0$  anında  $s$  uydusuna ölçülen pseudorange  $R_A^s(t_0)$  aşağıdaki gibi modellenenir [Lichtenegger, 1998].

$$R_A^s(t_0) = \rho_A^s(t_0) + \Delta\rho_A^s(t_0) + \Delta\rho^s(t_0) + \Delta\rho_A(t_0) \quad (2.1)$$

Burada  $\rho_A^s(t_0)$  uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafeyi,  $\Delta\rho_A^s(t_0)$  uydu ile alıcının konumuna bağlı hataları (radyal yörünge hatası vb.),  $\Delta\rho^s(t_0)$  uydudan kaynaklanan hataları (uydu saat hatası vb.),  $\Delta\rho_A(t_0)$  alıcıdan kaynaklı hataları (alıcı saat hatası, çok yolluluk etkisi vb.) ifade etmektedir.

$t_0$  referans epöğü anında  $s$  uydusu için pseudorange düzeltmesi ( $PRC^s(t_0)$ ) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} PRC^s(t_0) &= \rho_A^s(t_0) - R_A^s(t_0) \\ &= -\Delta\rho_A^s(t_0) - \Delta\rho^s(t_0) - \Delta\rho_A(t_0) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Burada  $\rho_A^s(t_0)$  ile ifade edilen geometrik mesafe, referans istasyonun kesin koordinatları ve yayın yörünge bilgileri ile hesaplanabilir.  $R_A^s(t_0)$  ise ölçülen pseudorange ölçüsünü ifade etmektedir.

Kullanıcılar, DGNSS çözümünü mümkün olan en iyi doğrulukla hesaplamak için, ölçümlerini topladıkları zamanla aynı zamana karşılık gelen düzeltmelere sahip olmak isterler. Ancak, düzeltmeler kullanıcıya ulaşmadan önce bir miktar gecikme olabilir veya referans istasyonu ile kullanıcı veri örnekleme aralıkları birbiriyle uyuşmayabilir.

DGNSS düzeltmelerinin güncelleme hızı yüksek bile olsa, bunları kullanıcılara iletmek için kullanılan iletişim bağlantısı nedeniyle her zaman bir miktar gecikme olmaktadır [Weber et al., 2005]. Bu yüzden, gecikme sorunuyla başa çıkmak ve yeni bir düzeltme kümesi gelmeden önceki süre boyunca uygulanabilecek düzeltmeleri sağlamak için RTCM protokolü, bu DGNSS düzeltmelerinin hızına bağlı olarak birinci dereceden polinom kullanarak düzeltme değişimleri ( $RRC(t_0)$ , Range Rate Correction) yayımlar [Kahveci, 2012].

$$PRC(t) = PRC(t_0) + (t - t_0)RRC(t_0) \quad (2.3)$$

Burada  $t_0$  pseudorange düzeltmelerinin referans istasyonunda belirlendiği andaki zamanı,  $t$  kullanıcının ölçümlerine karşılık gelen zamanı,  $(t - t_0)$  ise gecikme süresini ifade eder.

Seçimli doğruluk erişimi (SA: Selective Ability) kaldırılmadan önce, pseudorange düzeltmeleri zamanla değişimi çok fazla değişiklik gösteriyordu. SA etkisi açıkken düzeltme değişimleri DGNSS doğruluğunun artmasına katkı sağlamasına rağmen, SA etkisi kaldırıldıktan sonra, düzeltme değişimleri çok yavaş değiştiğinden ve neredeyse sıfır olduğundan, DGNSS konumlama doğruluğuna katkı sağlamamaktadır [Park et al., 2006].

(2.1) eşitliğine benzer şekilde,  $B$  gezici alıcısı için  $t$  epoğunda  $s$  uydusuna yapılan pseudorange ölçüsü aşağıdaki gibi modellenebilir.

$$R_B^s(t) = \rho_B^s(t) + \Delta\rho_B^s(t) + \Delta\rho^s(t) + \Delta\rho_B(t) \quad (2.4)$$

Bu eşitliğe, (2.2) eşitliği ile hesaplanan pseudorange düzeltmesi eklenirse,

$$R_B^s(t)_{düz} = R_B^s(t) + PRC(t) \quad (2.5)$$

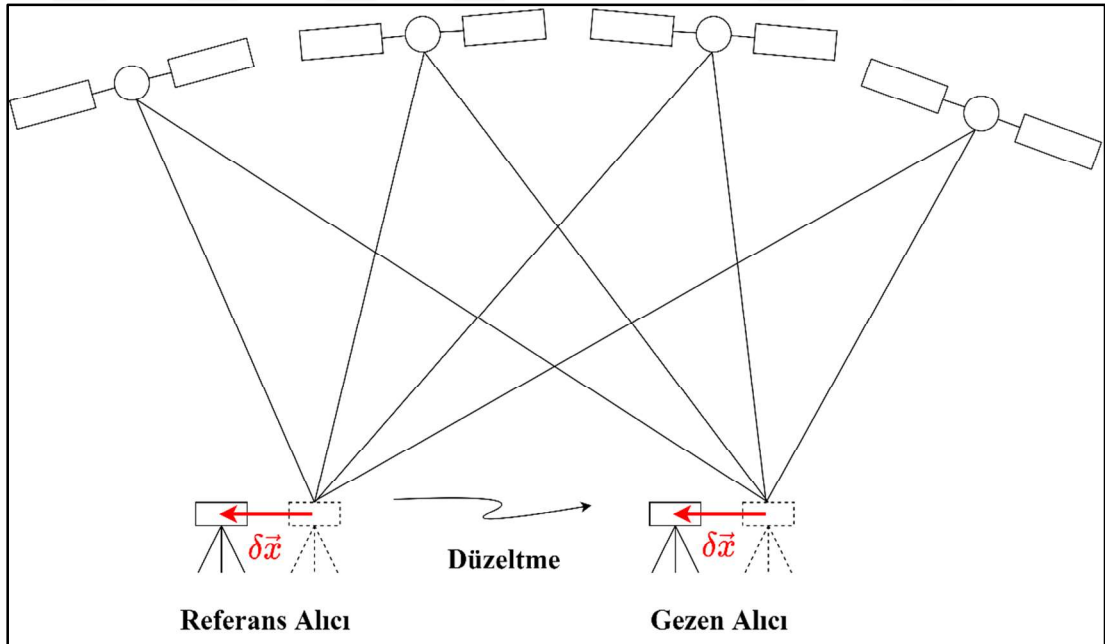
eşitliği elde edilir. Bu eşitlik, (2.1) ve (2.4) eşitliklerinden faydalanarak

$$R_B^s(t)_{düz} = \rho_B^s(t) + [\Delta\rho_B^s(t) - \Delta\rho_A^s(t)] + [\Delta\rho_B(t) - \Delta\rho_A(t)] \quad (2.6)$$

olarak daha açık yazılabilir. Burada uydudan kaynaklanan hatalar tamamen elimine edilmiş olmaktadır. Referans ile gezici alıcıları arasındaki baz mesafesi ile ters orantılı olarak radyal yörünge hatası veya atmosferik etkiler de büyük ölçüde giderilmektedir. DGNSS ile giderilemeyen en önemli hata çok yolluluk etkisidir [Hofmann-Wellenhop and Lichtenegger, 2008].

### 2.3. Konum Etki Alanı Düzeltmesi (Position-Domain Correction)

Konum etki alanı düzeltmesi yönteminde, gezen alıcı tarafından hesaplanan konuma doğrudan konum düzeltmesi getirilmektedir. Referans alıcı gözlem yaptığı uydulardan yararlanarak anlık olarak hesapladığı konumu ile kesin koordinatları arasındaki farkı gönderir ve gezici alıcı(lar) tarafından hesaplanan konuma doğrudan düzeltme olarak getirilir [Kahveci, 2012]. Konum etki alanı düzeltmesi tekniği Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Konum etki alanı düzeltmesi tekniği.

Son derece basit olmasına karşın, bu tekniğin önemli eksiklikleri bulunmaktadır. İlk olarak, tüm alıcılarda ortak hatalar meydana gelmesi için aynı uydulara pseudorange

ölçümleri yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, kullanıcı alıcıları kullandığı uydu seçimlerini referans alıcısı ile koordine etmelidir veya referans istasyonu, görünür uyduların tüm kombinasyonları için konum düzeltmelerini hesaplaması gerekmektedir. İkinci önemli sorun ise referans alıcısı ile kullanıcı alıcısı aynı konum çözüm tekniklerini kullanması gerekmektedir. Her iki alıcı da aynı tekniği (en küçük kareler, ağırlıklı en küçük kareler veya kalman filtresi vb.) kullanmadığı sürece konum etki alanı düzeltmeleri, konum doğruluğunu düşürebilir. Bu nedenlerden dolayı, DGNSS sistemlerinde konum etki alanı düzeltilmesi nadiren kullanılmaktadır [Kaplan and Hegarty, 2017].

Referans alıcısından gezen alıcıya gönderilen koordinat düzeltmesi  $\delta\vec{x}$  şu eşitlik ile hesaplanabilir [Park et al., 2013].

$$\delta\vec{x} = \vec{x}_{RS,fix} - \vec{x}_{RS} \quad (2.7)$$

Burada  $\vec{x}_{RS,fix}$  referans alıcısının kesin koordinatlarını,  $\vec{x}_{RS}$  ise referans alıcısının anlık hesaplanan konumunu ifade etmektedir. Gezen alıcı ise konum etki alanı düzeltmesi ile konumunu,

$$\vec{x}_{DGNS(S(P))} = \hat{\vec{x}} + \delta\vec{x} \quad (2.8)$$

eşitliği ile elde edebilir. Burada  $\hat{\vec{x}}$  ile gezen alıcının anlık hesaplanan konumu ifade edilmektedir.

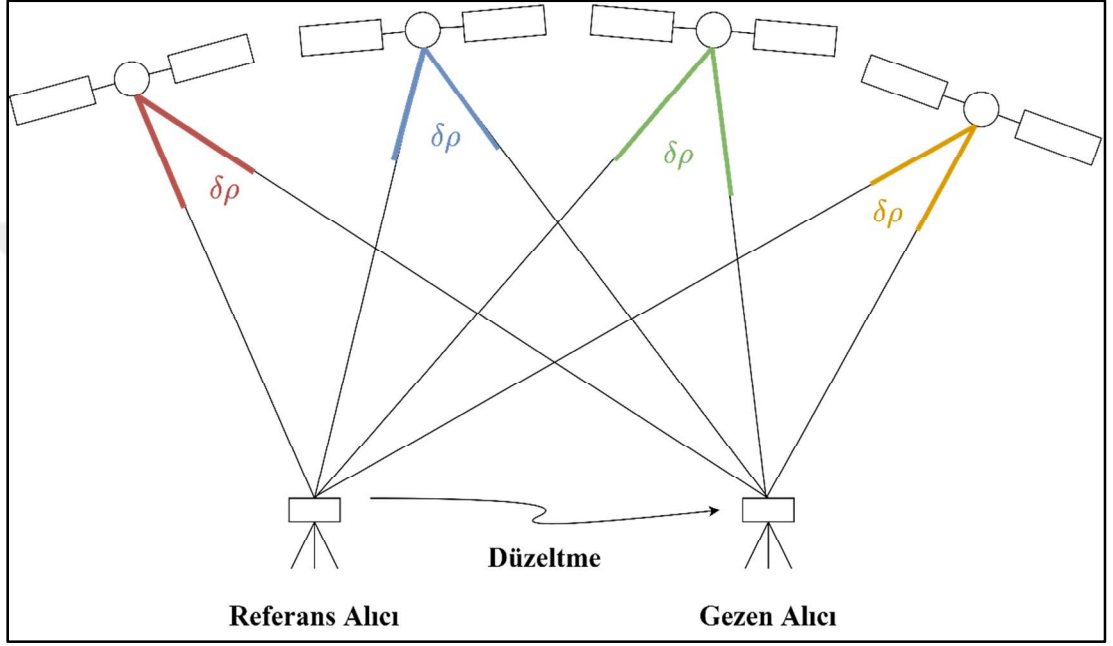
## 2.4. Ölçme Etki Alanı Düzeltmesi (Measurement-Domain Correction)

Çoğu DGNSS uygulamasında, konum düzeltmelerini belirlemek yerine referans alıcısının navigasyon çözümünde kullandığı her uydu için pseudorange düzeltmesi hesaplanır ve yayınlanır. Referans istasyonu kullanıcıya yeterince yakınsa, referans istasyonunun pseudorange ölçümlerindeki sistematik hataların, kullanıcı tarafındakilere benzer olması beklenir. Referans istasyonu, bilinen konumundan yararlanarak hataları kestirirse ve bu bilgileri kullanıcıya düzeltmeler şeklinde sağlarsa, kullanıcının konum doğruluğunun iyileştirilmesi beklenir. Doğruluk hem



referans istasyonuna olan mesafeye hem de verilen düzeltmelerin gecikmesine bağlıdır [Kaplan and Hegarty, 2017]. Ölçme etki alanı düzeltmesi tekniği Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

Bu yöntem, konum etki alanı yöntemine göre çok daha kullanışlıdır, çünkü gezen alıcı, sadece referans istasyonunda kullanılan uydu seçimlerini değil, düzeltilmiş pseudorange ölçümlerinin herhangi bir kombinasyonunu kullanabilir.



Şekil 2.5: Ölçme etki alanı düzeltmesi tekniği.

Bilinen konumdaki  $(x_m, y_m, z_m)$  referans istasyonu ile  $i$  uydusu ile arasındaki geometrik mesafe  $R_m^i$  şu şekilde hesaplanabilir [Weng et al., 2020]:

$$R_m^i = \sqrt{(x_m - x^i)^2 + (y_m - y^i)^2 + (z_m - z^i)^2} \quad (2.9)$$

Burada  $(x^i, y^i, z^i)$ ,  $i$  uydusunun konumunu ifade etmektedir. Referans istasyonu,  $i$  uydusu için pseudorange düzeltmesini ( $PRC^i$ ) aşağıdaki eşitlik ile hesaplayabilir.

$$PRC^i = R_m^i - \rho_m^i \quad (2.10)$$

Burada  $\rho_m^i$ , referans alıcısının  $i$  uydusu için ölçtüğü pseudorange ölçüsünü temsil etmektedir. Gezici alıcı, referans alıcısı tarafından iletilen  $PRC^i$  ile düzeltilmiş pseudorange ölçülerini şu şekilde hesaplayabilir:

$$\rho_c^i = \rho^i + PRC^i \quad (2.11)$$

Burada  $\rho^i$ , gezici alıcısının  $i$  uydusu için ölçtüğü pseudorange ölçüsünü ifade etmektedir. Gezici alıcı, ölçme etki alanı düzeltmesi yöntemiyle konumunu aşağıdaki eşitlik ile hesaplayabilir [Park et al., 2013].

$$\begin{bmatrix} \vec{x}_{DGNS(S(M))} \\ b \end{bmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T \begin{bmatrix} \vdots \\ R_m^i \\ -\rho_c^i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Burada,

- $\vec{x}_{DGNS(S(M))}$  : Ölçme etki alanı yöntemiyle elde edilen konum bilgisi
- $b$  : Alıcı saat hatası
- $H$  : Gözlem matrisidir.

## 2.5. NMEA 0183 Formatı

Ulusal Deniz Elektroniği Birliği (NMEA: National Marine Electronics Association) 1957 yılında elektronik üreticileriyle ilişkilerin güçlendirilmesini tartışmak için bir araya gelen elektronik satıcıları tarafından kurulmuş bir dernektir. NMEA'nın çalışmaları sonunda denizcilik elektronik ürünleri arasında iletişim için tek tip bir arayüz standardı olan NMEA 0183 geliştirildi [Web 4, 2021]. NMEA 0183, ASCII tabanlı tek yönlü seri veri aktarım protokolü için gerekli parametreleri tanımlar. Aktarım 4800 baud hızında, saniyede yaklaşık 600 karakter iletilebilir, bu da genellikle yavaş hareket eden gemilerin iletişim konumu, hızı ve yardımcı verilerinin ihtiyaçları ile uyumludur. NMEA 0183 mesajları, GNSS alıcısı tarafından hesaplanan konum, hız ve zaman çözümünü içermesine rağmen uydulara ilişkin gözlem verilerini içermemektedir [u-blox 8, 2020].

Veri gönderen her cihaza, ekipman türünü yansıtan iki karakterli bir konuşmacı kimliği atanır. Tablo 2.2’de GNSS kombinasyonlarına ait konuşmacı kimlikleri yer almaktadır.

Tablo 2.2: NMEA konuşmacı kimliği.

<b>GNSS Kombinasyonları</b>	<b>Konuşmacı Kimliği</b>
GPS, SBAS, QZSS	GP
GLONASS	GL
Galileo	GA
BeiDou	GB
Çoklu-GNSS	GN

Tüm mesajlar bir “\$” işaretiyle başlar, ardından konuşmacı kimliğini ve üç karakterli bir mesaj kimliğini içeren beş karakterlik bir dizi gelir.

NMEA 0183, navigasyon amaçlı uygulamalarda kullanılan bir veri formatıdır. Mesaj başlığını takiben, tek tek veri alanları sayılardan veya karakterlerden oluşan virgülle ayrılmış bir liste olarak sağlanır. Parametre dizisi, her ileti türü için özeldir. GNSS alıcıları için yaygın olarak kullanılan NMEA 0183 mesajları Tablo 2.3’te verilmiştir.

Bunlara ek olarak, üreticiye özgü mesajlar standart tarafından desteklenir ve çeşitli alıcı üreticileri tarafından kullanılır. Bunlar, standart mesaj başlığı yerine “\$P” ve üç karakterli bir satıcı kimliği ile tanımlanır (Örneğin, uBlox ve Ashtech alıcıları için “\$PUBX” ve “\$PASH”), ancak aksi takdirde yukarıda açıklanan standart mesaj konseptini takip eder.

Tablo 2.3: NMEA mesajları ve içerikleri.

<b>Mesaj Kimliği</b>	<b>Açıklama</b>
GGA	Konum Bilgisi
GLL	Coğrafi Konum
GSA	DOP (Dilution of Precision) ve Aktif Uydular
GSV	Görülen Uydular
RMC	Önerilen minimum navigasyon bilgileri
VTG	Hız Bilgisi ve Manyetik Rota

### 2.5.1. GGA Mesajı

GGA mesajı alıcının hesapladığı konum bilgisini içermektedir. GGA mesajına ilişkin açıklamalar Tablo 2.4’te gösterilmiştir [u-blox 8, 2020].

Tablo 2.4: GGA mesajı içeriği ve örneği.

Alan Adı	Örnek	Biçim	Açıklama
Mesaj Kimliği	\$xxGGA		GGA Mesajı
Zaman	092725.00	hhmmss.ss	Ölçüm Zamanı (UTC)
Enlem	4717.11399	dddmm.mmmmm	Enlem
N/S	N		Kuzey / Güney Belirteci
Boylam	00833.91590	dddmm.mmmmm	Boylam
E/W	E		Batı / Doğu Belirteci
Çözüm	1		Çözüm Çeşidi
Uydu Sayısı	08		Çözümde Kullanılan Uydu Sayısı
HDOP	1.01		Yatay Hassaslık Ölçeği (HDOP)
Yükseklik ve Birimi	499.6, M		Ortalama Deniz Seviyesinden Yükseklik (m)
Jeoid Ondülasyonu ve Birimi	48.0, M		Jeoid Ondülasyonu (m)
Kontrol	*5B		Kontrol Mesajı

Yukarıdaki tabloda GGA mesajına “\$GPGGA, 092725.00, 4717.11399, N, 00833.91590, E, 1, 08, 1.01, 499.6, M, 48.0, M, \*5B” örnek verilmiştir. Bu mesajı gönderen GNSS alıcısı, konumunu 8 adet GPS uydusu kullanarak 47° 17’11399 Kuzey Enlemi, 8° 33’91590 Batı Boylamı olarak hesaplamıştır.

### 2.5.2. GSA Mesajı

GSA mesajı, GNSS alıcısının SPP çözümünde kullandığı uydular hakkında bilgi vermektedir. Navigasyon çözümünde 12’den fazla uydu kullanılması durumunda sadece 12 uydu GSA mesajında listelenmektedir. Eğer Çoklu-GNSS kullanılırsa her

uydu sistemi için farklı GSA mesajı yayınlanmaktadır. GSA mesajına ilişkin açıklamalar Tablo 2.5’te gösterilmiştir [u-blox 8, 2020].

Tablo 2.5: GSA mesajı içeriği ve örneği.

Alan Adı	Örnek	Açıklama
Mesaj Kimliği	\$xxGSA	GSA Mesajı
Çalışma Türü	A	Otomatik / Manuel
Navigasyon Çeşidi	3	Çözüm Yok, 2B Çözüm, 3B Çözüm
12 kez tekrarlanır.		
Uydu Numarası	23 ,29 ,07 ,08 ,09 ,18 ,26 ,28	Navigasyon Çözümünde Kullanılan Uydular
12 kez tekrarlanır.		
PDOP	1.94	Konum Hassaslık Ölçeği (PDOP)
HDOP	1.18	Yatay Hassaslık Ölçeği (HDOP)
VDOP	1.54	Düşey Hassaslık Ölçeği (VDOP)
Kontrol	*0D	Kontrol Mesajı

Yukarıdaki tabloda GSA mesajına “\$GPGSA, A, 3, 23, 29, 07, 08, 09, 18, 26, 28, , , , , 1.94, 1.18, 1.54\*0D” örnek verilmiştir. Bu mesajı gönderen GNSS alıcısı, 23, 29, 07, 08, 09, 18, 26 ve 28 numaralı GPS uydularını kullanarak navigasyon çözümü yapmıştır.

### 2.5.3. GSV Mesajı

GSV mesajı, GNSS alıcısının gördüğü uyduların yükseklik ve azimut açıları hakkında bilgi vermektedir. Her bir GSV mesajında 4 uyduyla ilgili bilgi yer almaktadır. Eğer Çoklu-GNSS kullanılırsa her uydu sistemi için farklı GSV mesajı yayınlanmaktadır. GSV mesajına ilişkin açıklamalar Tablo 2.6’de gösterilmiştir [u-blox 8, 2020].

Aşağıdaki tabloda GSV mesajına “\$GPGSV, 3, 1, 10, 01, 44, 173, 42, 03, 74, 030, 44, 04, 69, 261, 43, 06, 16, 320, 39\*78” örnek verilmiştir. Bu mesajı gönderen GNSS alıcısı, 01 numaralı GPS uydusunu 44° yükseklik açısı ve 173 ° azimut açısıyla görmektedir.

Tablo 2.6: GSV mesajı içeriği ve örneği.

Alan Adı	Örnek	Açıklama
Mesaj Kimliği	\$xxGSV	GSV Mesajı
Mesaj Sayısı	3	Toplam Mesaj Sayısı
Mesaj Numarası	1	Mesajın Numarası
Uydu Sayısı	10	Görülen Uydu Sayısı
4 kez tekrarlanır.		
Uydu No	01, 03, 04, 06	Görülen Uydular
Yükseklik Açısı	44, 74, 69, 16	Yükseklik Açısı
Azimet Açısı	173, 030, 261, 320	Azimet Açısı
Sinyal Gücü	42, 44, 43, 39	Sinyal Gücü
4 kez tekrarlanır.		
Kontrol	*78	Kontrol Mesajı

## 2.6. DGNSS Projeksiyon Düzeltmesi (DGNSS-CP)

Çoğu DGNSS düzeltme mesajında, ölçme etki alanı yöntemi kullanılmaktadır. Ancak çoğu düşük maliyetli GNSS alıcısı, konumunu ham gözlem verilerini kaydetmeden, sadece NMEA mesajları ile yayınlamaktadır. Bu nedenle, DGNSS tekniğini desteklememektedir. DGNSS Projeksiyon Düzeltmesi yöntemi, Park ve arkadaşları tarafından ham gözlem verisi kaydetmeyen GNSS alıcılarının DGNSS ile konum bilgisinin iyileştirilmesi amacıyla geliştirilmiştir [Park et al., 2013].

Düşük maliyetli GNSS alıcıları, konum bilgilerini (enlem, boylam ve yükseklik) GGA mesajı ile, çözümde kullanılan uyduları ise GSA mesajı ile yayınlamaktadırlar. Burada DGNSS-CP yöntemi ile hesaplanan konum aşağıdaki eşitlik ile tanımlanabilir [Weng et al., 2020].

$$x_{DGNSS-CP} = x_0 + \Delta x_{CP} \quad (2.13)$$

Burada  $x_0 = (x_m, y_m, z_m)$  GNSS alıcısının hesapladığı konumu,  $\Delta x_{CP}$  ise konum düzeltmesini ifade etmektedir. GNSS alıcısının hesapladığı konum  $x_0$  kullanılarak  $i$  uydusu için yaklaşık pseudorange ölçüsü şu şekilde gösterilebilir:

$$\hat{\rho}_c^i = \sqrt{(x_m - x^i)^2 + (y_m - y^i)^2 + (z_m - z^i)^2} + \hat{b}_m \quad (2.14)$$

Burada  $(x^i, y^i, z^i)$  i uydusunun konum bilgisini,  $\hat{b}_m$  ise yaklaşık alıcı saat hatasını ifade etmektedir.

Eğer ölçülen pseudorange ölçüsü  $\rho^i$  biliniyorsa, (2.11) eşitliğinden faydalanarak düzeltilmiş pseudorange ölçüsü ile navigasyon çözümünde kullanılmış yaklaşık pseudorange ölçüsünün farkı,

$$\Delta\rho^i = (\rho^i + PRC^i) - \hat{\rho}_c^i \quad (2.15)$$

eşitliği ile tanımlanabilir. Ardından, (2.13) eşitliğinde belirtilen konum düzeltmesini şu şekilde türetilebilir:

$$\Delta x_{CP} = (H^T H)^{-1} H^T \Delta\rho = (H^T H)^{-1} H^T (\rho + PRC - \hat{\rho}_c) \quad (2.16)$$

Eşitlik şu şekilde de yazılabilir:

$$\Delta x_{CP} = (H^T H)^{-1} H^T [(\rho - \hat{I} - \hat{T} + \hat{B} - \hat{\rho}_c) + (\hat{I} + \hat{T} - \hat{B} + PRC)] \quad (2.17)$$

Burada  $H$  gözlem matrisini,  $\hat{I}$  iyonosfer gecikmesini,  $\hat{T}$  troposfer gecikmesini,  $\hat{B}$  ise uydu saat hatasını ifade etmektedir. (2.17) eşitliği düzenlenirse,

$$\Delta x_{CP} = \Delta x_m + (H^T H)^{-1} H^T (\hat{I} + \hat{T} - \hat{B} + PRC) \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir. GNSS alıcısının navigasyon çözümünü en küçük kareler yöntemini kullanarak yaptığı varsayılırsa  $\Delta x_m = 0$  kabul edilebilir. (2.18) eşitliği şu şekilde de gösterilebilir:

$$\Delta x_{CP} \approx (H^T H)^{-1} H^T (\hat{I} + \hat{T} - \hat{B} + PRC) \quad (2.19)$$

Bu eşitlik ile pseudorange ölçüleri bilinmese bile konum düzeltmesinin hesaplanabileceği görülebilir. İyonosfer gecikmesi Klobuchar modeli, troposfer

gecikmesi Saastamoinen modeli ile, uydu saat hatası ise navigasyon mesajından faydalanılarak hesaplanabilir [Saastamoinen, 1972], [Klobuchar, 1987].

$H$  gözlem matrisi ise GSV mesajından faydalanılarak hesaplanabilir. GSV mesajındaki uyduların azimut ( $Az$ ) ve yükseklik açıları ( $El$ ) ile toposentrik koordinat sisteminde görüş hattı vektörü şu şekilde gösterilebilir:

$$LOS_{local}^i = \begin{bmatrix} \cos(El^i) \sin(Az^i) \\ \cos(El^i) \cos(Az^i) \\ \sin(El^i) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Görüş hattı vektörü alıcının enlem ( $\varphi$ ) ve boylamına ( $\lambda$ ) bağlı olarak oluşturulan  $R$  dönüşüm matrisi ECEF (Earth Centered Earth Fixed) koordinat sistemine aşağıdaki eşitlik dönüştülebilir.

$$LOS_{ecef}^i = R(\varphi, \lambda) \cdot LOS_{local}^i \quad (2.21)$$

Navigasyon çözümüne  $n$  tane uydu katkı sağlamış olan bir GNSS alıcısı için gözlem matrisi şu şekilde gösterilebilir [Yoon et al., 2016].

$$H = \begin{bmatrix} LOS_{ecef}^1 & 1 \\ LOS_{ecef}^2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ LOS_{ecef}^n & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$



## 3. DGNSS-IGS

### 3.1. IGS

Uluslararası GNSS Servisi (IGS), 1992 yılında kurulan ve 1 Ocak 1994'te resmi olarak göreve başlayan 100'den fazla ülkedeki 200'den fazla üniversite ve araştırma kurumundan oluşan gönüllü bir federasyondur. IGS'nin temel misyonu; Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi'ni (ITRF) destekleyen, yeryüzüne ilişkin gözlem ve araştırmalara dayanarak konumlama, navigasyon ve zamanlama hizmetleri için yüksek kalitedeki GNSS verilerini ve ürünlerini, kullanıcının hizmetine sunmaktır [Web 5, 2021]. Küresel bir araştırma topluluğuna dayanan IGS, yeni teknolojilerin ve sistemlerin düzenli olarak ürünlerine entegre edilmesini sağlar ve GNSS verilerinin ve ürünlerinin toplanması ve kullanımı ile ilgili standartlar geliştirmektedir.

IGS, Küresel Jeodezik Gözlem Sistemi'nin (GGOS) önemli bir unsurudur ve üç temel rolü yerine getirmektedir[Plag and Pearlman, 2009]. Birincisi, Uydu Lazer Ölçmeleri (Satellite Laser Ranging (SLR)), Çok Uzun Bazlı İnterferometre (Very Long Baseline Interferometry (VLBI)) ve DORIS (Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite) gözlemleri arasındaki ilişkileri kurmaktır. Bu ilişkiler, ITRF'nin temelini oluşturmaktadır [Altamimi and Collilieux, 2009]. SLR ve VLBI istasyonları kurulmasının ve işletilmesinin yüksek maliyeti ve SLR, VLBI ve DORIS'in doğrudan birlikte yerleştirilmesinin her zaman uygulanabilir olmaması dikkate alındığında, IGS ürünleri bu gözlem teknikleri arasında ilişkiler kurarak uygun maliyetli çözümler sunmaktadır. İkinci görevi, küresel jeodezik ağın geometrik dağılımını geliştirmek, uydu yörüngelerinin ve saatlerinin, atmosferik davranışların ve tektonik süreçlerin doğru modellenmesini sağlamaktır. Son görevi ise kullanıcıların ITRF'ye erişimini sağlamaktır. Bu, hem GNSS konumlamanın doğruluğu arttığı için hem de bunun sonucunda ITRF ile ulusal datumlar arasındaki ilişkiyi daha iyi anlama ihtiyacı ortaya çıktığı için giderek daha önemli hale gelmektedir [Johnston et al, 2017].

## 3.2. IGS Ürünleri

IGS'nin temel amacı, GNSS'yi içeren çeşitli bilimsel ve mühendislik kullanıcıları için referans GNSS ürünleri ve gözlemleri sağlamaktır. Bu rolü yerine getirmek için IGS, aşağıdaki temel ürünleri üretmektedir [Web 6, 2021]:

- GNSS yörünge ve saatleri
- Dünya yöneltme parametreleri ve istasyon koordinatları
- İyonosfer ve troposfer parametreleri
- Sistemik hata kestirimleri

Bu yüksek kalitedeki ürünler, ITRF'nin gerçekleştirilmesi, okyanus gelgitleri ve hidrolojiye bağlı olarak katı Dünya'nın deformasyonunun izlenmesi ve deniz seviyesi değişikliği ve ilgili iklim değişikliği olaylarının izlenmesi gibi bilimsel uygulamaları desteklemek için kullanılmaktadır. Ürünler giderek artan bir şekilde atmosferi modellemek, iyonosferik ve troposferik haritalar üretmek için de kullanılmaktadır. Son olarak, IGS ürünleri, endüstri ve toplum için hassas konumlama uygulamalarını desteklemek için de yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [Johnston et al, 2017].

Bir kullanıcının hassas konumlama yapabilmesi için, GNSS uydularının yörüngeleri ve saatleri hakkında bilgi sahibi olması gerekmektedir. Konumlama doğruluğu, uydu yörüngelerindeki ve saatlerindeki hatalardan doğrudan etkilenmektedir. GNSS navigasyon mesajları yoluyla nispeten daha düşük doğrulukta yörünge ve saat bilgisi iletilmektedir. IGS ve onun bağımsız analiz merkezleri tarafından ise hassas yörünge ve saat bilgileri sağlanmaktadır. IGS yörünge ve saat ürünlerinin bir listesi Tablo 3.1'de verilmektedir [Web 6, 2021].

Ayrıca, IGS'nin iklim ve atmosferik araştırmalar üzerine troposferik zenit yolu gecikmesi parametreleri (ZTD) ve düşey toplam elektron yoğunluğu (VTEC) haritaları bulunmaktadır. IGS atmosferik ürünleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir [Web 6, 2021].

Tablo 3.1: IGS yörünge ve saat ürünleri.

GPS Uydu Verileri		Örnekleme Aralığı	Doğruluk	Gecikme	Güncellenme Zamanı
Yayın Efemerisi	Yörünge	-	$\approx 100$ cm	Gerçek Zamanlı	Gerçek Zamanlı
	Saat		$\approx 5$ ns KOH		
Ultra-rapid (Kestirilmiş)	Yörünge	15 dk	$\approx 5$ cm	Kestirilmiş	03:00, 09:00, 15:00, 21:00 UTC
	Saat		$\approx 3$ ns KOH		
Ultra-rapid (Gözlemlenmiş)	Yörünge	15 dk	$\approx 3$ cm	3-9 Saat	03:00, 09:00, 15:00, 21:00 UTC
	Saat		$\approx 150$ ps KOH		
Rapid	Yörünge	15 dk	$\approx 2.5$ cm	17-41 Saat	17:00 UTC
	Saat	5 dk	$\approx 75$ ps KOH		
Final	Yörünge	15 dk	$\approx 2$ cm	12-18 Gün	Her Perşembe
	Saat	30 s	$\approx 75$ ps KOH		

Tablo 3.2: IGS atmosferik ürünleri.

Atmosferik Parametreler	Örnekleme Aralığı	Doğruluk	Gecikme	Güncellenme Zamanı
Troposferik Zenit Yolu Gecikmesi	5 dakika	$\approx 4$ mm	< 4 Hafta	Günlük
Final İyonosferik TEC Grid	2 saat, $5^\circ \times 2.5^\circ$ (Enlem/Boylam)	2-8 TECU	$\approx 11$ Gün	Haftalık
Rapid İyonosferik TEC Grid	2 saat, $5^\circ \times 2.5^\circ$ (Enlem/Boylam)	2-9 TECU	< 24 Saat	Günlük

ZTD ürünleri, yer tabanlı GNSS verilerinin işlenmesiyle IGS analiz merkezleri tarafından üretilir. Bunun için, GNSS istasyonlarındaki basınç ve sıcaklığın gözlemlenmesi gerekir [Byun and Bar-Sever, 2009]. İyonosfer ürünler, çift frekanslı GNSS alıcıları ile yapılan gözlemlerden elde edilen yörünge, saat ve dünya yöneltme parametrelerini kullanan bir GNSS işleme stratejisinin ürünüdür [Hernández-Pajares et al., 2009]. Bunun bir başka yan ürünü de, diferansiyel kod sapmasıdır. Bu iyonosfer ürünleri, 24 saatten daha az gecikme süresi ile yayınlanan rapid çözümlerden, yaklaşık 11 gün gecikme süresi olan final çözümlerden elde edilebilir. İyonosfer ürünleri IONEX (Ionosphere Exchange) formatında sunulmaktadır [Web 6, 2021].

### 3.3. DGNSS-IGS Algoritması

GNSS alıcısının temel gözlemlerinden biri, uydu ile alıcı arasındaki geometrik uzunlukla ( $R$ ) beraber çeşitli hataları da bünyesinde barındıran pseudorange ( $\rho$ ) ölçüsüdür.

$$\rho = R + b - B + I + T + M + e \quad (3.1)$$

Burada  $b$  ve  $B$  alıcı ve uydu saat hatasını,  $I$  ve  $T$  iyonosferik ve troposferik gecikmeyi,  $M$  çok yolluk etkisini,  $e$  ise gürültüyü temsil etmektedir. Ayrıca, pseudorange ölçüsü relativistik etki, diferansiyel kod sapması vb. hatalar da içermektedir. Ancak eşitliğin basit olması açısından bu terimler dahil edilmemiştir.

GNSS alıcısı, navigasyon mesajından faydalanarak (3.1) eşitliğindeki bazı hataları modelleyerek, düzeltilmiş pseudorange ölçüsünü ( $\rho_c$ ) şu şekilde elde etmektedir:

$$\rho_c = \rho - \hat{I} - \hat{T} + \hat{B} \quad (3.2)$$

Burada  $\hat{I}$  ve  $\hat{T}$  kestirilen iyonosferik ve troposferik gecikmeyi,  $\hat{B}$  ise kestirilen uydu saat hatasını göstermektedir. Tek frekanslı GNSS alıcıları, iyonosferik gecikmeyi kestirirken çeşitli modeller kullanmaktadır. En sık kullanılan modellerden biri olan Klobuchar modeli iyonosferik gecikmenin %50'sini yok etmektedir [Klobuchar, 1987]. Uydu saat hatası ise navigasyon mesajındaki katsayılar kullanılarak ikinci dereceden polinom ile kestirilmektedir.

Düzeltilmiş pseudorange ölçüsü ( $\rho_c$ ) bilinmeyenlerin fonksiyonu olarak

$$\rho_c^i = \sqrt{(x^i - x_m)^2 + (y^i - y_m)^2 + (z^i - z_m)^2} + b + \varepsilon_m^i \quad (3.3)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada  $n$  uydu sayısı,  $i = 1, 2 \dots n$  olmak üzere,  $i$  uydu indeksini ( $x_m, y_m, z_m$ ) kullanıcının konumunu, ( $x^i, y^i, z^i$ )  $i$  uydusunun konumunu,  $\varepsilon_m^i$  ise ölçme gürültüsü yanı sıra modellenemeyen çeşitli hataları ifade etmektedir. Sadece bir uydu sistemi kullanarak GNSS alıcısının konumunu ( $x_m, y_m, z_m$ ) ve alıcı saat hatasını ( $b$ ) belirlemek için en az 4 ölçü gerekmektedir. Eğer  $s$  sayıda uydu

sistemi kullanılırsa bilinmeyen sayısı ( $p$ ), her bir uydu sistemine ilişkin saat bilinmeyeninin eklenmesiyle,

$$p = s + 3 \quad (3.4)$$

olmaktadır ve (3.3) eşitliğini çözmek için en az  $p$  sayıda ölçü gerekmektedir. Bilinmeyenleri çözmek için genellikle iteratif en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır. Yöntemin ilk adımı olarak, başlangıç durumuna ( $x_0 = \hat{x}_m, \hat{y}_m, \hat{z}_m, \hat{b}_m$ ) göre yaklaşık pseudorange ölçüsü şu şekilde türetilebilir:

$$\hat{\rho}_c^i = \sqrt{(x^i - \hat{x}_m)^2 + (y^i - \hat{y}_m)^2 + (z^i - \hat{z}_m)^2} + \hat{b}_m \quad (3.5)$$

Ardından, düzeltilmiş pseudorange ölçüsü ( $\rho_c$ ) başlangıç durumunda doğrusallaştırılır.

$$\rho_c^i = \hat{\rho}_c^i + h^i \Delta x_m + \varepsilon^i \quad (3.6)$$

Burada  $h^i$   $i$  uydusuna görüş hattını,  $\Delta x_m$  bilinmeyenler vektörünü ( $p \times 1$ ) temsil etmektedir. (3.6) eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta \rho^i = h^i \Delta x_m + \varepsilon^i \quad (3.7)$$

Buradan,  $\Delta \rho^i$  düzeltilmiş pseudorange ölçüsü ile (3.5) eşitliğinden elde edilen uzunluk arasındaki farkı göstermektedir:

$$\Delta \rho^i = \rho_c^i - \hat{\rho}_c^i \quad (3.8)$$

$n$  tane pseudorange ölçüsü için, (3.7) eşitliği matris formunda şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta \rho = H \Delta x_m + \varepsilon \quad (3.9)$$

Burada  $H$  ( $n \times p$ ) boyutundaki gözlem matrisini,  $\varepsilon$  ise ölçüm hatalarını temsil etmektedir. (3.9) eşitliğinin en küçük kareler çözümü şu şekilde verilebilir [Weng et al., 2020]:

$$\Delta x_m = (H^T H)^{-1} H^T \Delta \rho = (H^T H)^{-1} H^T (\rho - \hat{I} - \hat{T} + \hat{B} - \hat{\rho}_c) \quad (3.10)$$

Daha sonra, kullanıcı konumu ve alıcı saat hatası aşağıdaki denkleme göre yinelenir:

$$x_m = x_0 + \Delta x_m \quad (3.11)$$

$\Delta x_m$  vektörünün büyüklüğü, yinelemenin anlamlı olup olmadığını belirlemek için karşılaştırma değeriyle ( $\xi$ ) kıyaslanır:

$$|\Delta x_m| < \xi \quad (3.12)$$

Eğer (3.12) eşitliği şartı sağlanırsa,  $x_m$  nihai çözüm olarak kabul edilir. Aksi takdirde,  $x_m$  daha sonra  $x_0$ 'a atanır ve (3.12) eşitliği şartı sağlanana kadar (3.5) eşitliğinden (3.11) eşitliğine işlemler yinelenir.

DGNSS-IGS yöntemiyle IGS ürünlerinden faydalanarak konum doğruluğunun iyileştirilmesi hedeflenmektedir. DGNSS-IGS çözümü, IGS ürünleri ile yayın efemerisi ve standart iyonosfer modellerinden türetilen konum düzeltmesi ( $\Delta x_{IGS}$ ) ile şu şekilde tanımlanabilir:

$$x_{DGNSS-IGS} = x_m + \Delta x_{IGS} \quad (3.13)$$

Burada  $x_m$  GGA mesajından gelen konum bilgisini ifade etmektedir. (3.2) eşitliği esas alınarak, IGS ürünleri ile düzeltilmiş pseudorange ölçüsü ( $\rho_{IGS}$ ) şu şekilde gösterilebilir:

$$\rho_{IGS} = (\rho + PRC_{BRD-IGS}) - I_{IGS} - \hat{T} + B_{IGS} \quad (3.14)$$

Burada  $PRC_{BRD-IGS}$  IGS hassas yörünge bilgisi ile yayın yörünge bilgisindeki uydu koordinatları farkından oluşan pseudorange düzeltmesini,  $I_{IGS}$  IGS TEC haritalarından üretilen iyonosferik gecikmeyi,  $B_{IGS}$  ise IGS hassas saat bilgisinden üretilen uydu saat hatasını ifade etmektedir.

$i$  uydusu için, eğer  $\rho_{IGS}^i$  ölçüsü biliniyorsa ve (3.5) eşitliği ile yaklaşık pseudorange ölçüsü hesaplanırsa, IGS ürünlerden üretilen pseudorange düzeltmesi ( $\Delta\rho_{IGS}^i$ ) şu şekilde hesaplanabilir:

$$\Delta\rho_{IGS}^i = \rho_{IGS}^i - \hat{\rho}_c^i \quad (3.15)$$

DGNSS-IGS yöntemi konum düzeltmesi ( $\Delta x_{IGS}$ ), şu şekilde hesaplanabilir:

$$\Delta x_{IGS} = (H^T H)^{-1} H^T \Delta\rho_{IGS} \quad (3.16)$$

Burada  $H$  gözlem matrisini ifade etmektedir ve (2.22) eşitliği ile hesaplanmaktadır. (3.16) eşitliği şu şekilde de gösterilebilir:

$$\Delta x_{IGS} = (H^T H)^{-1} H^T [(\rho + PRC_{BRD-IGS} - I_{IGS} - \hat{T} + B_{IGS}) - \hat{\rho}_c] \quad (3.17)$$

Eşitlik şu şekilde düzenlenebilir:

$$\begin{aligned} \Delta x_{IGS} = (H^T H)^{-1} H^T & \left[ (\rho - \hat{I} - \hat{T} + \hat{B} - \hat{\rho}_c) \right. \\ & \left. + (PRC_{BRD-IGS} - (I_{IGS} - \hat{I}) + (B_{IGS} - \hat{B})) \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

(3.10) eşitliği dikkate alınırsa şu şekilde gösterilebilir:

$$\Delta x_{IGS} = \Delta x_m + (H^T H)^{-1} H^T [PRC_{BRD-IGS} - (I_{IGS} - \hat{I}) + (B_{IGS} - \hat{B})] \quad (3.19)$$

Eşitlik, (3.12) eşitliğinde gösterildiği üzere  $\Delta x_m$  çok küçük bir değer olduğundan şu şekilde de yazılabilir.

$$\Delta x_{IGS} \approx (H^T H)^{-1} H^T [PRC_{BRD-IGS} - (I_{IGS} - \hat{I}) + (B_{IGS} - \hat{B})] \quad (3.20)$$

Bu ifade (3.13) eşitliğinde yerine konularak, düzeltilmiş sonuç elde edilir.

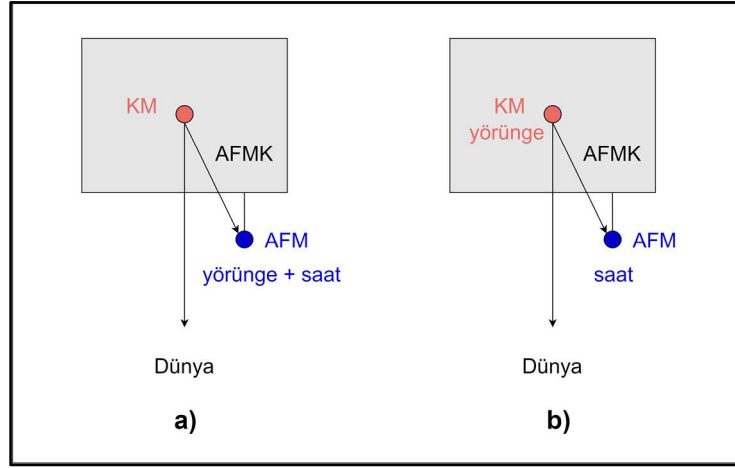
### 3.3.1. Uydu Yörünge ve Saat Hatası Düzeltmesi

GNSS alıcıları, uyduların konumlarını navigasyon mesajında yayınlanan bilgiler ile hesaplamaktadırlar. Navigasyon mesajında GPS uydularının konumunu hesaplamak için 6 Kepler yörünge elemanı, bu elemanların referans anına göre doğrusal değişimlerini içeren 3 parametre, bu elemanların harmonik düzeltme katsayıları içeren 6 parametre ve referans epoğu bulunmaktadır. Bu parametreler genellikle iki saatte bir güncellenmektedirler. Navigasyon mesajı ile GPS uydularının konumları, IS-GPS-200'de yer alan algoritmaya göre gerçek zamanlı olarak hesaplanmaktadır [Subirana et al., 2013].

IGS tarafından üretilen hassas yörünge bilgilerinde, daha önceden Tablo 3.1'de gösterildiği üzere, uyduların 15 dakika aralıklarla yüksek doğruluğa sahip koordinatları yer almaktadır. Uyduların koordinatlarını ölçü epoğunda, cm doğruluğu ile hesaplamak için 10. dereceden polinom kullanarak Lagrange enterpolasyonu yapılmıştır [Subirana et al., 2013].

Tüm hassas yörünge bilgileri (IGS ve diğerleri), uydunun kütle merkezinin koordinatlarını içermektedir [Kouba, 2009]. Ancak uydu kütle merkezi koordinatları, hassas nokta konumlama için uygun değildir. Çünkü, bir GNSS uydusu tarafından iletilen tüm radyo sinyallerinin referans noktası; uydu kütle merkezi değil, anten faz merkezidir. Bu yüzden GNSS gözlemlerinin hassas bir şekilde modellenmesi için uydu anteni faz merkezi kayıklığı dikkate alınmalıdır [Héroux and Kouba, 2001]. Yayın yörünge efemerisi ise, uydu anteni faz merkezi koordinatlarını yayınladığı için uydu anteni faz merkezi kayıklığını dikkate almaksızın kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Hassas efemeris ve yayın efemerisinin yörünge ve saat bilgilerinin referans noktası Şekil 3.1'de gösterilmiştir [Montenbruck et al., 2015a].





Şekil 3.1: a) Yayın efemerisi, b) hassas efemerise ilişkin yörünge ve saat bilgilerinin referans noktaları.

Uydu anteni faz kayıklığı, uydunun kendi koordinat sisteminde sabit bir vektördür, ancak uydunun anlık yönüne veya yüksekliğine bağlı olarak uzayda değişmektedir. Navigasyon sinyallerinin optimum kapsama alanını ve gücünü korumak için antenin görüş açısı her zaman Dünya'nın ağırlık merkezine yönlendirilmektedir. Uydunun güneş panelleri ise, güneşi gören alanı ve dolayısıyla alınan güneş enerjisini en yüksek seviyeye çıkarmak için Güneş yönüne dik olarak hizalanmaktadır. Güneş panellerinin dönüş eksenini ise bu nedenle Güneş ve Dünya yönünün kapsadığı düzleme dik olarak yönlendirilmektedir [Hugentobler and Montenbruck, 2017]. Uydu anteni faz kayıklığı, uydunun kendi koordinat sisteminde  $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$  ANTEX (The Antenna Exchange Format) formatında IGS tarafından yayımlanmaktadır. 13 Mart 2021 itibariyle L1 frekansı için uydu anteni faz kayıklığı Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3: L1 frekansı için uydu anteni faz kayıklığı.

Uydu Numarası	$\hat{i}$ (mm)	$\hat{j}$ (mm)	$\hat{k}$ (mm)
G01	394	0	1501.80
G02	1.30	-1.10	728.80
G03	394	0	1550.60
G04	3.80	-18.10	1232.40
G05	-3.30	-0.30	778
G06	394	0	1467
G07	-0.40	5	822.40

Tablo 3.3: (Devam)

G08	394	0	1501.40
G09	394	0	1522.60
G10	394	0	1515.10
G11	-0.70	-1.20	1117.80
G12	10.20	-5.60	767.80
G13	-2.40	-1.60	1348.30
G14	3.80	-18.10	1232.40
G15	4.50	1.90	622.80
G16	12.60	-6.90	1468.70
G17	3	1	770.90
G18	3.80	-18.10	1232.40
G19	8.60	-0.60	808.20
G20	1	-3.20	1313.50
G21	279	0	2455.70
G22	-2.20	2.20	850.60
G23	3.10	-16.20	740.50
G24	394	0	1407.10
G25	394	0	1517.40
G26	394	0	1503.50
G27	394	0	1522.30
G28	1.40	4.70	999.50
G29	10.90	-4.50	791.80
G30	394	0	1522.10
G31	-0.80	5.80	912.50
G32	394	0	1534.80

Uydu koordinatlarını, kütle merkezinden anten faz merkezine ötelemek için uydu anteni faz merkezi kayıklığını ECEF koordinat sistemine dönüştürmek gerekmektedir. Bu şu eşitlikler ile hesaplanabilir [Montenbruck et al., 2015b]:

$$\hat{e}_x = \hat{e}_y \times \hat{e}_z \quad (3.21)$$

$$\hat{e}_y = \frac{\hat{e}_\odot \times r^{sat}}{|\hat{e}_\odot \times r^{sat}|} \quad (3.22)$$

$$\hat{e}_z = -\frac{r^{sat}}{|r^{sat}|} \quad (3.23)$$

Burada  $\hat{e}_\odot$  uydudan güneşe olan birim vektörü,  $r^{sat}$  uydunun ECEF koordinat sistemindeki koordinatlarını ifade etmektedir. Anten faz merkezi koordinatları şu eşitlikle hesaplanabilir:

$$X_{AFM} = X_{KM} + \begin{bmatrix} \hat{e}_x \\ \hat{e}_y \\ \hat{e}_z \end{bmatrix} [\hat{i} \quad \hat{j} \quad \hat{k}] \quad (3.24)$$

Burada  $X_{AFM}$  anten faz merkezi koordinatlarını,  $X_{KM}$  kütle merkezi koordinatlarını ifade etmektedir.

Hassas efemeris ve yayın efemerisi ile uydu koordinatları anten faz merkezinde hesaplandıktan sonra (3.5) eşitliğindeki yaklaşık pseudorange ölçüsü daha yüksek doğrulukla hesaplanabilir. Bunun için öncelikle yayın efemerisi ile hesaplanan uydu koordinatlarından, hassas efemeris ile hesaplanan uydu koordinatlarına olan vektörün,

$$\delta \vec{X}_{BRD-IGS}^i = \begin{bmatrix} (x_{IGS}^i - x_{BRD}^i) \\ (y_{IGS}^i - y_{BRD}^i) \\ (z_{IGS}^i - z_{BRD}^i) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

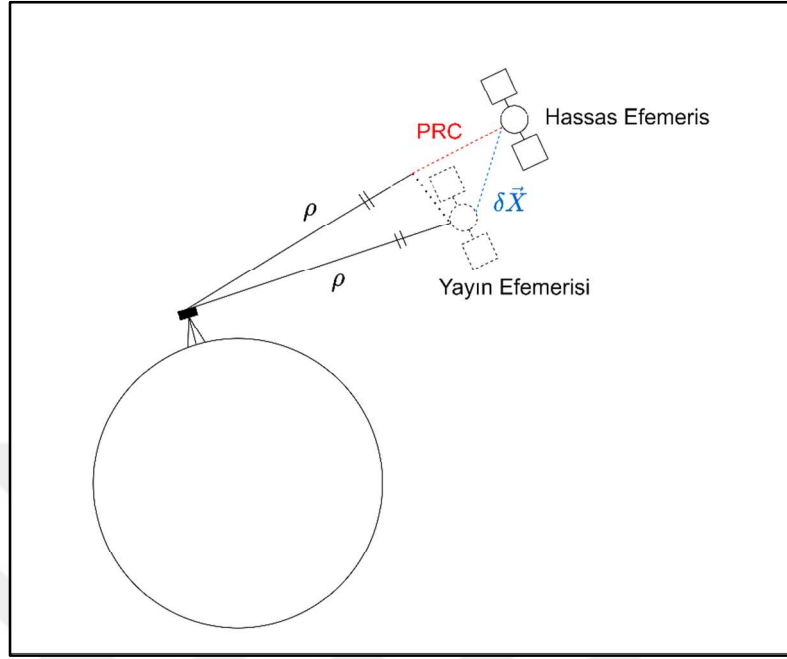
eşitliği ile hesaplanması gerekmektedir. Burada  $i$  uydusu için hassas efemeris ile hesaplanan uydu koordinatları  $X_{IGS} = (x_{IGS}^i, y_{IGS}^i, z_{IGS}^i)$  ile, yayın efemerisi ile hesaplanan uydu koordinatları  $(x_{BRD}^i, y_{BRD}^i, z_{BRD}^i)$  ile gösterilmektedir. GNSS alıcısından uyduya olan görüş hattı birim vektörü şu eşitlik ile hesaplanabilir:

$$\vec{e}^i = \frac{X_{IGS} - x_m}{|X_{IGS} - x_m|} \quad (3.26)$$

Burada  $x_m$  GNSS alıcısının konumunu ifade etmektedir. IGS hassas efemerisi ile pseudorange düzeltmesi şu şekilde gösterilebilir:

$$PRC^i = \vec{e}^i \cdot \delta \vec{X}_{BRD-IGS}^i \quad (3.27)$$

Pseudorange düzeltmesinin hesaplanmasına dair geometri Şekil 3.2'de gösterilmiştir [Zhu et al., 2003].



Şekil 3.2: Pseudorange düzeltmesinin geometrisi.

### 3.3.2. İyonosferik Gecikme Düzeltmesi

İyonosfer, dünya yüzeyinden 50 km'den 1000 km'ye kadar uzanan atmosferin en üst tabakasıdır. Bu katmanın ana bileşenleri O, O<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub>, NO'dur. Bu bölgede, elektronların yoğunluğu elektromanyetik dalgaların yayılmasını etkileyecek kadar yüksektir [Teunissen and Kleusberg 1996]. Elektron yoğunluğu güneş aktivitesine, Dünya'nın manyetik alanına ve kullanıcının konumuna bağlıdır [Misra and Enge, 2012]. İyonosfer gecikmesi zamana, kullanıcı konumuna ve varyasyonlara bağlı olarak bir gün içinde birkaç metreden yirmi metreye kadar değişebilir.

İyonosferik gecikme, iyonosfer tabakasının içinden geçen sinyal frekansına bağlıdır ve sinyal frekansının karesi ile ters orantılı olarak tanımlanabilir. Bu yüzden, çift frekanslı GNSS alıcılarında, iyonosferden bağımsız doğrusal bir kombinasyon oluşturularak iyonosferik gecikme yok edilebilmektedir. Ancak, tek frekanslı GNSS alıcılarında, iyonosferden bağımsız doğrusal bir kombinasyon oluşturmak için ikinci bir frekans olmaması nedeniyle iyonosferik gecikmeyi azaltmak için harici bir iyonosferik model kullanılması gerekmektedir. Bu iyonosferik modellerin doğruluğu,

yüksek doğruluklu konumlama çözümü elde etmek için kritik öneme sahiptir [Choy 2009].

### 3.3.2.1 Klobuchar Modeli

Klobuchar Modeli, John A. Klobuchar tarafından tek frekanslı alıcılar için iyonosferik gecikme etkisini azaltmak amacıyla yaklaşık otuz beş yıl önce geliştirilmiştir. Modelde, uydu navigasyon mesajında yer alan sekiz katsayı kullanılmaktadır [Klobuchar, 1987]. Bu katsayılar, daha önceden Bent tarafından geliştirilen toplam elektron yoğunluğu (TEC) modelinin basitleştirilmiş bir sürümüdür [Choy, 2009]. Bu iyonosferik modelde, gecikme etkisinin en gelişmiş hesaplama açısından çok fazla katsayı kullanılsa bile iyonosferik etkilerin sadece %70'i ile %80'inini yok edebilmektedir [Klobuchar, 1987]. İyonosferik gecikme, sinyal geçiş süresi boyunca elektromanyetik dalgalarla karşılaştığı için TEC ile orantılıdır. Yüklü parçacıkların maksimum yoğunluğu, iyonosferin F2 bölgesi ile çakışan 250-400 km yükseklikte olduğu varsayılmaktadır [Klobuchar, 1996].

Klobuchar modeli, iyonosferin tek katmanlı modeline dayanmaktadır (Şekil 3.3). Bu modelde, elektronların belirli bir yükseklikte sonsuz ince bir tabakada yoğunlaştığı varsayılmaktadır [Choy, 2009].

### 3.3.2.2 Küresel İyonosferik Harita Modeli

İyonosferik gecikme etkisi, IGS tarafından sağlanan IONEX formatında olan Küresel İyonosferik Haritalar (GIM) kullanılarak hafifletilebilir [Schaer et al., 1998]. Bu aynı zamanda, tek frekanslı GNSS alıcısı kullanılarak mutlak konumlama için mevcut olan en doğru ampirik modeldir [Øvstedal, 2002].

Günlük TEC değerleri,  $2.5^{\circ}$  çözünürlük ile  $-87.5^{\circ}$  ile  $87.5^{\circ}$  enlemleri arasında,  $5^{\circ}$  çözünürlük ile  $-180^{\circ}$  ile  $180^{\circ}$  boylamları arasında yayınlanmaktadır. Her gün 2 saatlik zamansal çözünürlükle toplam 13 TEC haritası mevcuttur [Wienia, 2008]. Toplam elektron yoğunluğu (TEC), TECU ile ölçülmektedir. 1 TECU (Birim toplam elektron yoğunluğu),  $10^{16}$  elektron/m<sup>2</sup>'ye karşılık gelmektedir. Final GIM modeli 2-8 TECU doğruluğundadır. Pseudorange ölçüleri için iyonosfer gecikmesi ( $I$ ) şu şekilde gösterilebilir [Hauschild, 2017]:

$$I = -I_p = \frac{40.3 \times TEC}{f^2} \quad (3.28)$$

Burada  $I_p$  faz ölçüleri için iyonosferik gecikmeyi,  $f$  sinyalin frekansını,  $TEC$  sinyal yolu boyunca toplam elektron yoğunluğu olarak adlandırılan eğik toplam elektron yoğunluğunu (STEC) ifade etmektedir. GPS L1 frekansı için 1 TECU 0.163 metre iyonosferik gecikmeye karşılık gelmektedir.

İyonosferik gecikme, iyonosferin dünyayı eşit olarak dağıtılmış elektron yoğunluğu ile çevreleyen ince bir kabuk olduğu varsayımından türetilir. Bu durumda, toplam elektron yoğunluğu, daha düşük yükseklik açıları için sinyalin iyonosferdeki yol uzunluğunun artmasını hesaba katmak için bir eğim faktörü tarafından ölçeklendirilen VTEC olarak modellenabilmektedir. Küresel iyonosferik haritalardan (GIM) elde edilebilen VTEC ile, kullanıcılar gözlem modelindeki iyonosferik gecikmenin düzeltilmesi aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilmektedir.

$$I_{IGS} = \frac{1}{\cos(z')} \frac{40.3 \times VTEC}{f^2} \quad (3.29)$$

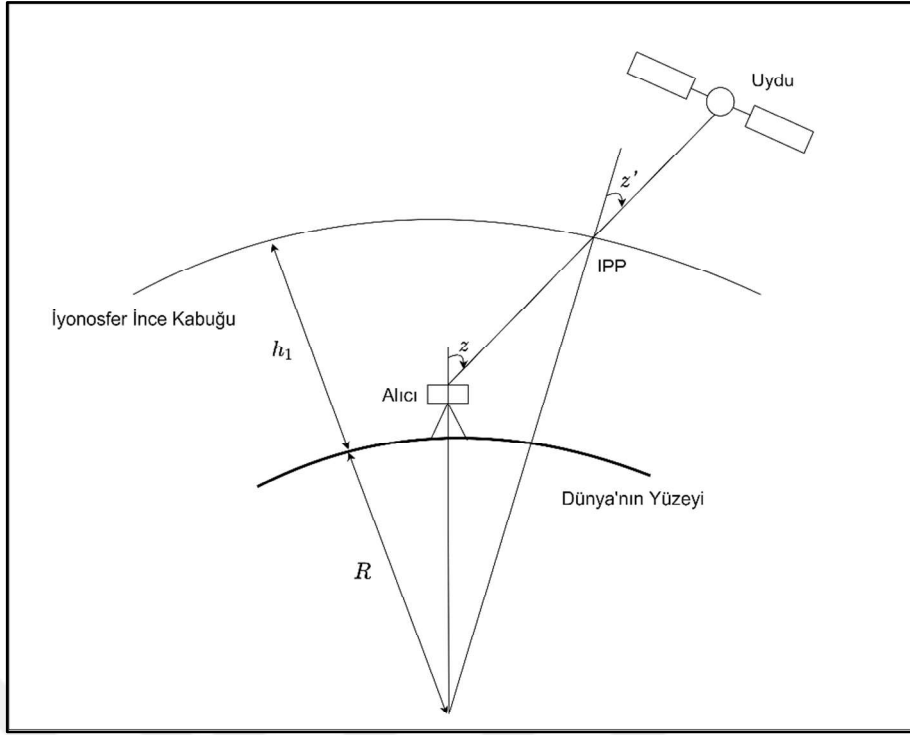
Burada  $z'$ , iyonosfer delme noktasından (IPP) uyduya olan zenit açısını ifade etmektedir. Bu açının, alıcının zenit açısı ( $z$ ) ile ilişkisi şu eşitlik ile gösterilebilir:

$$\sin(z') = \frac{R}{R + h_1} \sin(z) \quad (3.30)$$

Burada  $R$  Dünya'nın yarıçapını,  $h_1$  iyonosfer ince kabuğunun yüksekliğini ifade etmektedir. Sonuç olarak, iyonosfer gecikmesi şu eşitlik ile hesaplanabilir:

$$I_{IGS} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R + h_1} \sin(z)\right)^2}} \frac{40.3 \times VTEC}{f^2} \quad (3.31)$$

Bu eşitliklerin dayandığı geometri Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: İyonosfer Gecikmesinin Geometrisi.

## 4. UYGULAMA

### 4.1. Çalışma Alanı ve Verilerin Toplanması

Bu çalışmada, DGNSS-CP ve bu tez kapsamında önerilen DGNSS-IGS algoritmalarının düşük maliyetli GNSS alıcılarının konumunu iyileştirme performansının incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışma alanı, Gebze Teknik Üniversitesi Çayırova Kampüsüdür. Çalışma kapsamında Harita Mühendisliği Bölümü binasının çatısına “HRT”, İşletme Fakülte’sinin doğusunda bulunan pilyeye ise “MAR” istasyonları tesis edilmiştir. Bu iki istasyon arasındaki mesafe yaklaşık 200 metredir. İstasyonların çevresinde bozucu yansımalara sebep olabilecek binalar bulunmamaktadır ve etrafı GNSS sinyallerini alabilecek şekilde açıktır. İstasyonların koordinatları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: HRT ve MAR İstasyonlarının Coğrafi Koordinatları (WGS84).

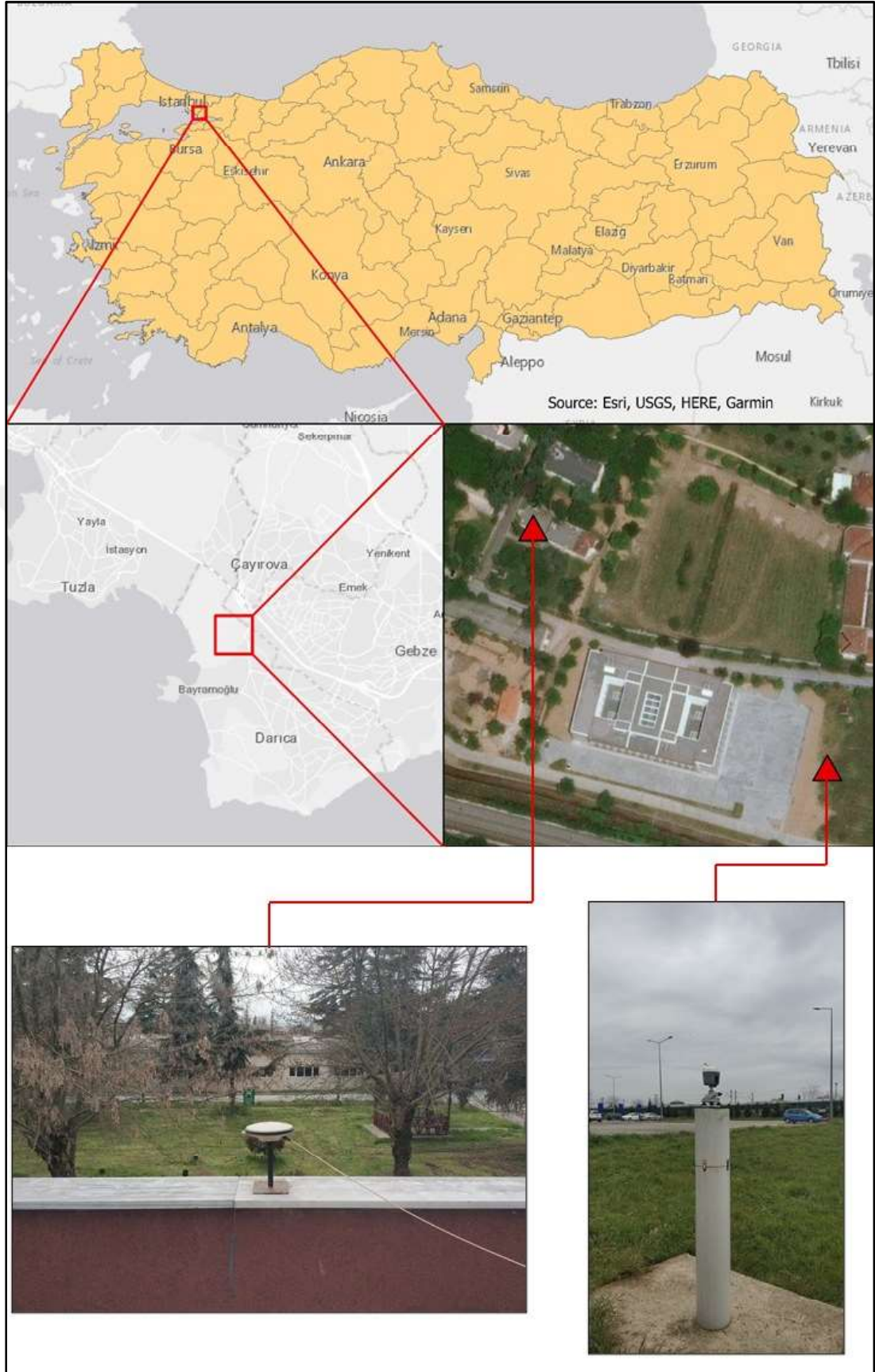
İstasyon	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)
HRT	40° 48' 34" .1965611 K	29° 21' 40" .4825251 D	51.5625
MAR	40° 48' 30" .6113532 K	29° 21' 46" .8897453 D	47.7331

Bu tez çalışması kapsamında bir adet CHC i80 marka jeodezik GNSS alıcısı ve bir adet u-blox C94-M8P geliştirme kiti kullanılmıştır. U-blox C94-M8P geliştirme kitinde, u-blox’un yüksek hassasiyetli konumlama modüllerinden biri olan NEO-M8P bulunmaktadır. NEO-M8P GNSS modülü; GPS, GLONASS, BeiDou ve QZSS sistemlerini desteklemektedir ve aynı anda bu uydu sistemlerinden en fazla ikisini değerlendirebilmektedir. U-blox C94-M8P geliştirme kiti Şekil 4.1’de, çalışma alanı Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1: U-blox C94-M8P geliştirme kiti.





Şekil 4.2: Çalışma alanı.

Test çalışmasına ilişkin ölçmeler, 19 Mart 2021 tarihinde gerçekleştirilmiştir. HRT istasyonuna NovAtel GPS-702 anteni kurulmuş ve u-blox C94-M8P geliştirme kiti ile bağlantısı sağlanmıştır. CHC i80 GNSS alıcısı ise MAR istasyonuna kurulmuştur. Çalışma kapsamında, Tablo 4.1’de verilen istasyonların kesin koordinatları DGNSS-CP ve DGNSS-IGS algoritmalarının konum doğruluğuna etkisini karşılaştırılmak amacıyla referans kabul edilmiştir. Ölçme oturumu, 14:33’te (UTC+3) başlatılmış ve yaklaşık 75 dk sürmüştür. U-blox C94-M8P geliştirme kiti, Windows işletim sistemine sahip bir bilgisayara bağlanmış ve u-center programı aracılığı ile konfigürasyon ayarları yapılmıştır. Veri toplama sıklığı 1 saniye olarak ayarlanmıştır. Geliştirme kitiyle, 10°’lik yükseklik kesme açısı ve sadece GPS uydularına gözlem yapılarak NMEA formatında konum verisi elde edilmiştir. Gözlenen GPS uydu sayısının 8 ile 11 arasında değiştiği, navigasyon çözümünde kullanılan uydu sayısının 6 ile 8 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Konum verisinin küçük bir örneği Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

```

11:34:28 $GPRMC,113428.00,A,4048.57129,N,02921.67520,E,0.119,,190321,,,A*72
11:34:28 $GPVTG,,T,,M,0.119,N,0.220,K,A*2A
11:34:28 $GPGGA,113428.00,4048.57129,N,02921.67520,E,1,07,1.37,18.7,M,37.8,M,,*6F
11:34:28 $GPGSA,A,3,06,32,02,12,19,24,25,,,,,2.62,1.37,2.23*0D
11:34:28 $GPGSV,3,1,09,02,41,127,46,06,36,078,43,12,66,326,49,15,07,198,33*72
11:34:28 $GPGSV,3,2,09,19,28,046,43,24,67,169,49,25,30,287,35,29,09,223,34*7B
11:34:28 $GPGSV,3,3,09,32,19,308,29*49
11:34:28 $GPGLL,4048.57129,N,02921.67520,E,113428.00,A,A*6A
11:34:29 $GPRMC,113429.00,A,4048.57128,N,02921.67525,E,0.027,,190321,,,A*7B
11:34:29 $GPVTG,,T,,M,0.027,N,0.049,K,A*2B
11:34:29 $GPGGA,113429.00,4048.57128,N,02921.67525,E,1,07,1.37,18.8,M,37.8,M,,*65
11:34:29 $GPGSA,A,3,06,32,02,12,19,24,25,,,,,2.62,1.37,2.24*0A
11:34:29 $GPGSV,3,1,09,02,41,127,46,06,36,078,43,12,66,326,49,15,07,198,33*72
11:34:29 $GPGSV,3,2,09,19,28,046,43,24,67,169,49,25,30,287,35,29,09,223,34*7B
11:34:29 $GPGSV,3,3,09,32,19,308,29*49
11:34:29 $GPGLL,4048.57128,N,02921.67525,E,113429.00,A,A*6F
11:34:30 $GPRMC,113430.00,A,4048.57125,N,02921.67529,E,0.138,,190321,,,A*7D
11:34:30 $GPVTG,,T,,M,0.138,N,0.255,K,A*2B
11:34:30 $GPGGA,113430.00,4048.57125,N,02921.67529,E,1,07,1.37,18.8,M,37.8,M,,*6C
11:34:30 $GPGSA,A,3,06,32,02,12,19,24,25,,,,,2.62,1.37,2.24*0A
11:34:30 $GPGSV,3,1,09,02,41,127,46,06,36,078,43,12,66,326,49,15,07,198,33*72
11:34:30 $GPGSV,3,2,09,19,28,046,43,24,67,169,49,25,30,287,35,29,09,223,34*7B
11:34:30 $GPGSV,3,3,09,32,19,308,29*49
11:34:30 $GPGLL,4048.57125,N,02921.67529,E,113430.00,A,A*66

```

Şekil 4.3: NMEA verisi örneği.

CHC i80 GNSS alıcısı ile 0°’lik yükseklik kesme açısı ve sadece GPS uydularına gözlem yapılarak, 1 saniye veri toplama sıklığı ile RINEX formatında veri toplanmıştır. CHC i80 GNSS alıcısında, geliştirme kitinin navigasyon çözümünde kullandığı uyduların yükseklik kesme açısı sebebiyle gözlemlenmemesini önlemek amacıyla 0°’lik yükseklik kesme açısı seçilmiştir.

## 4.2. GNSS Verilerinin İşlenmesi

GNSS verilerinin tamamı, bu tez çalışması kapsamında MATLAB 2018b ortamında geliştirilmiş bir yazılım kütüphanesi kullanılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme yazılımı bölüm 2.6 ve 3.3'te belirtilen algoritmaları esas almaktadır. Düşük maliyetli GNSS alıcılarının konum bilgisi coğrafi koordinatlar olarak GGA mesajı ile iletilmektedir. Çözümde kullanılan uydular GSA mesajında, bu uydulara olan azimut ve yükseklik açıları GSV mesajında bulunmaktadır. NMEA mesajlarındaki referans zaman sistemi UTC'dir, ancak bunun aksine toplanan RINEX verilerinin referans zamanı ise GPS zamanıdır (GPST). GPS uydularının koordinatlarının hesaplanma algoritması GPST'yi referans aldığı için, tüm verilerin referans zamanının GPST'ye dönüştürülmesi gerekmektedir. UTC ile GPST arasındaki ilişki şu eşitlik ile gösterilebilir:

$$UTC = GPST + Artık Saniye (Leap Second) \quad (4.1)$$

*Artık Saniye* RINEX mesajında bulunmaktadır ve 31 Aralık 2016'dan beri 18 saniyedir. GPST, UTC ile 1 ms düzeyinde senkronize edilmektedir, hatta gerçekte 25 ns düzeyinde tutulmaktadır [Parker and Matsakis, 2004]. GPS, kullanıcılarına UTC'ye dönüşüm yapmak için navigasyon mesajının başlık kısmında zaman ölçeği ile ilgili parametreleri iletmektedir. Ancak bu uygulamada DGNSS'in doğruluğu göz önüne alınarak bu ölçek ihmal edilmiştir.

İlk olarak NMEA mesajında iletilen GNSS alıcısının koordinatları, coğrafi koordinatlardan kartezyen koordinat sistemine dönüştürülmüştür. GSA mesajında yer alan, çözümde kullanılan uydu seti ve çözüm zamanı kullanılarak DGNSS-CP ve DGNSS-IGS algoritmalarıyla konum düzeltmeleri hesaplanmıştır.

DGNSS-CP algoritmasında NMEA'dan gelen çözüm zamanı GPST'ye dönüştürülmüş ve MAR istasyonunda toplanan RINEX ile eşleştirilmiştir. MAR istasyonu için GGA mesajında yer alan uydularla navigasyon çözümü yapılmış ve DGNSS-CP algoritması uygulanmıştır.

Bu tez kapsamında önerilen DGNSS-IGS algoritmasında, ilk olarak u-blox C94-M8P'nin çözüm zamanı GPST'ye dönüştürülmüştür. Geliştirme kitinin GGA mesajında yer alan uyduların, navigasyon mesajı kullanılarak uydu koordinatları

hesaplanmıştır. 19 Mart 2021 gününe ait olan “brdc0780.21n” isimli navigasyon mesajı dosyasına “<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/brdc/>”, IGS hassas efemeris dosyalarına “<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2149/>”, IGS iyonosferik ürünlerine “<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/2021/078/>” bağlantısından ulaşılmıştır.

Her iki algoritmada da u-blox C94-M8P’nin iyonosferik ve troposferik gecikmeler için Klobuchar ve Saastamoinen modellerini kullandığı varsayılarak, aynı modeller kullanılmıştır. Uydu anteni faz merkezi kayıklığı için “igs14\_2148.atx” dosyası kullanılmıştır, bu dosyaya “<http://www.epncb.oma.be/ftp/station/general>” bağlantısından ulaşılmıştır. Düzeltilmiş konum bilgisinin anlamlı olarak yorumlanabilmesi için toposentrik koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Toposentrik koordinat sistemine geçiş,

$$\begin{bmatrix} k_t \\ d_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\varphi_0) & 0 \\ -\sin(\varphi_0) \cos(\lambda_0) & -\sin(\varphi_0) \sin(\lambda_0) & \cos(\varphi_0) \\ \cos(\varphi_0) \cos(\lambda_0) & \cos(\varphi_0) \sin(\lambda_0) & \sin(\varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t - x_0 \\ y_t - y_0 \\ z_t - z_0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

eşitliği ile yapılmıştır. Burada  $k_t$ ,  $d_t$  ve  $y_t$  t zamanındaki kuzey, doğu ve yükseklik bileşenlerini;  $\varphi_0$  ve  $\lambda_0$  noktanın kesin konumunun enlemini ve boylamını;  $x_t$ ,  $y_t$  ve  $z_t$  düzeltilmiş konumun kartezyen koordinatlarını ifade etmektedir.

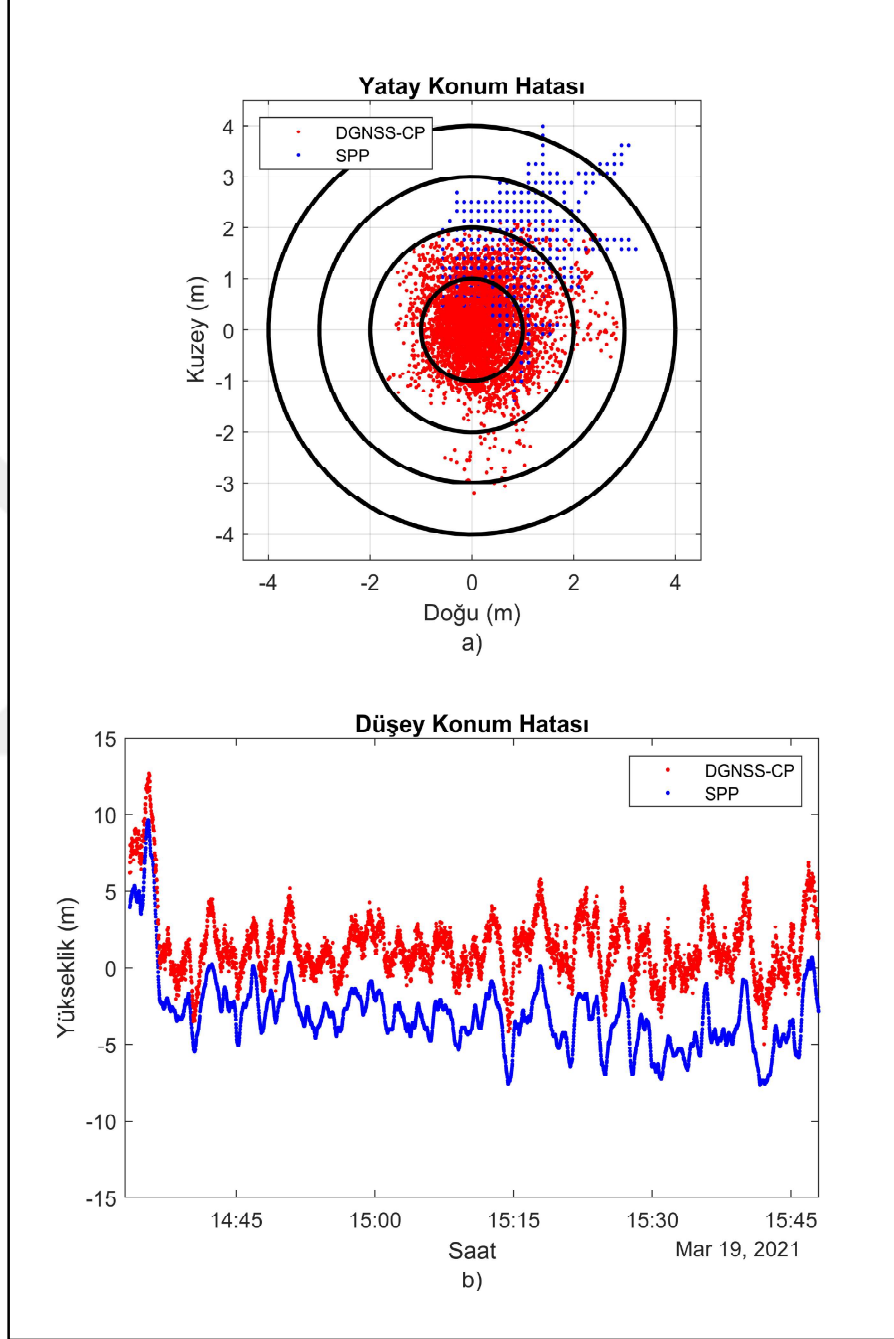
### 4.3. Test Çalışması Sonuçları

#### 4.3.1. DGNSS-CP Sonuçları

Tezin bu bölümünde, düşük maliyetli GNSS alıcısı ile üretilen konum bilgisinin post-process DGNSS-CP algoritması ile iyileştirilmesi ve sonuçların HRT istasyonu kesin koordinatları ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını yer almaktadır. Test çalışmasına ilişkin detaylar bölüm 4.1. ve 4.2. açıklanmıştır. Referans istasyon olarak öngörülen MAR istasyonunda DGNSS-CP algoritmasıyla üretilen konum düzeltmesi HRT istasyonundaki alıcının konumuna uygulanmıştır.

Şekil 4.4, düşük maliyetli GNSS alıcısının ürettiği konum bilgisini ve DGNSS-CP algoritması ile iyileştirilmiş konum bilgisini göstermektedir. Referans olarak HRT istasyonunun kesin koordinatları alınmıştır. Şekilde mavi renk u-blox C94-M8P

geliştirme kitinin ürettiği konum bilgisini, kırmızı renk ise iyileştirilmiş konum bilgisini temsil etmektedir. Şekil incelendiğinde, DGNSS-CP algoritmasının hem yatay hem de düşey ekseninde konum bilgisini iyileştirdiği açıkça gözükmemektedir.



Şekil 4.4: DGNSS-CP ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

Tablo 4.2’de DGNSS-CP algoritması sonuçlarını kuzey, doğu ve yükseklik bileşenler için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir. DGNSS algoritması ile kuzey, doğu ve yükseklik



bileşenleri için ortalama hatanın; 1.61 metreden 0.12 metreye, 0.69 metreden 0.19 metreye, -3.03 metreden 1.40 metreye düştüğü görülmüştür. Karesel ortalama hatalar incelendiğinde konum bilgisinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için; %57, %25 ve %32 iyileştiği görülmüştür. Standart sapmalar incelendiğinde, anlamlı bir değişim gözlemlenmemiştir. Bunun sebebinin DGNSS-CP algoritmasının geleneksel konum düzeltmesine dayanmasından kaynakladığı düşünülmektedir.

Tablo 4.2: DGNSS-CP algoritması istatistiksel sonuçları.

Çözüm	Bileşen	Ortalama (m)	STD (m)	KOH (m)
SPP	K	1.61	0.70	1.75
	D	0.69	0.60	0.91
	Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-CP	K	0.12	0.75	0.76
	D	0.19	0.65	0.68
	Y	1.40	2.26	2.66

#### 4.3.2. DGNSS-IGS Sonuçları

Tezin bu bölümünde, düşük maliyetli GNSS alıcısının konum bilgisinin post-process DGNSS-IGS algoritması ile iyileştirilmesi ve sonuçların HRT istasyonu kesin koordinatları ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını yer almaktadır. Test çalışmasına ilişkin detaylar bölüm 4.1. ve 4.2. açıklanmıştır.

DGNSS-IGS algoritmasında (3.20) eşitliğinde de görüleceği üzere pseudorange, uydu saat ve iyonosferik gecikme bileşenlerinden oluşan üç düzeltme bulunmaktadır. Bu düzeltmelerin konum iyileştirmesine etkisi bölüm 4.3.2.1. – 4.3.2.3'te incelenmiştir. IGS ürünlerinin, gözlem anından ne kadar gecikme ile yayınlandığı Tablo 3.1 ve 3.2'de gösterilmiştir. Bu gecikme süreleri dikkate alınarak ultra-rapid, rapid ve final ürünleri kullanılmasının konum iyileştirmesine etkisi bölüm 4.3.2.4. – 4.3.2.7'de incelenmiştir.

##### 4.3.2.1. Pseudorange Düzeltmesinin Etkisi

Çalışma kapsamında, Şekil 3.2'de gösterilen geometriden yola çıkarak IGS hassas efemeris ve yayın yörünge efemerisinden hesaplanan uydu koordinatları ile

hesaplanan pseudorange düzeltmesinin etkisi incelenmiştir. Bu etki 3.20 eşitliğinden yola çıkarak şu şekilde gösterilebilir:

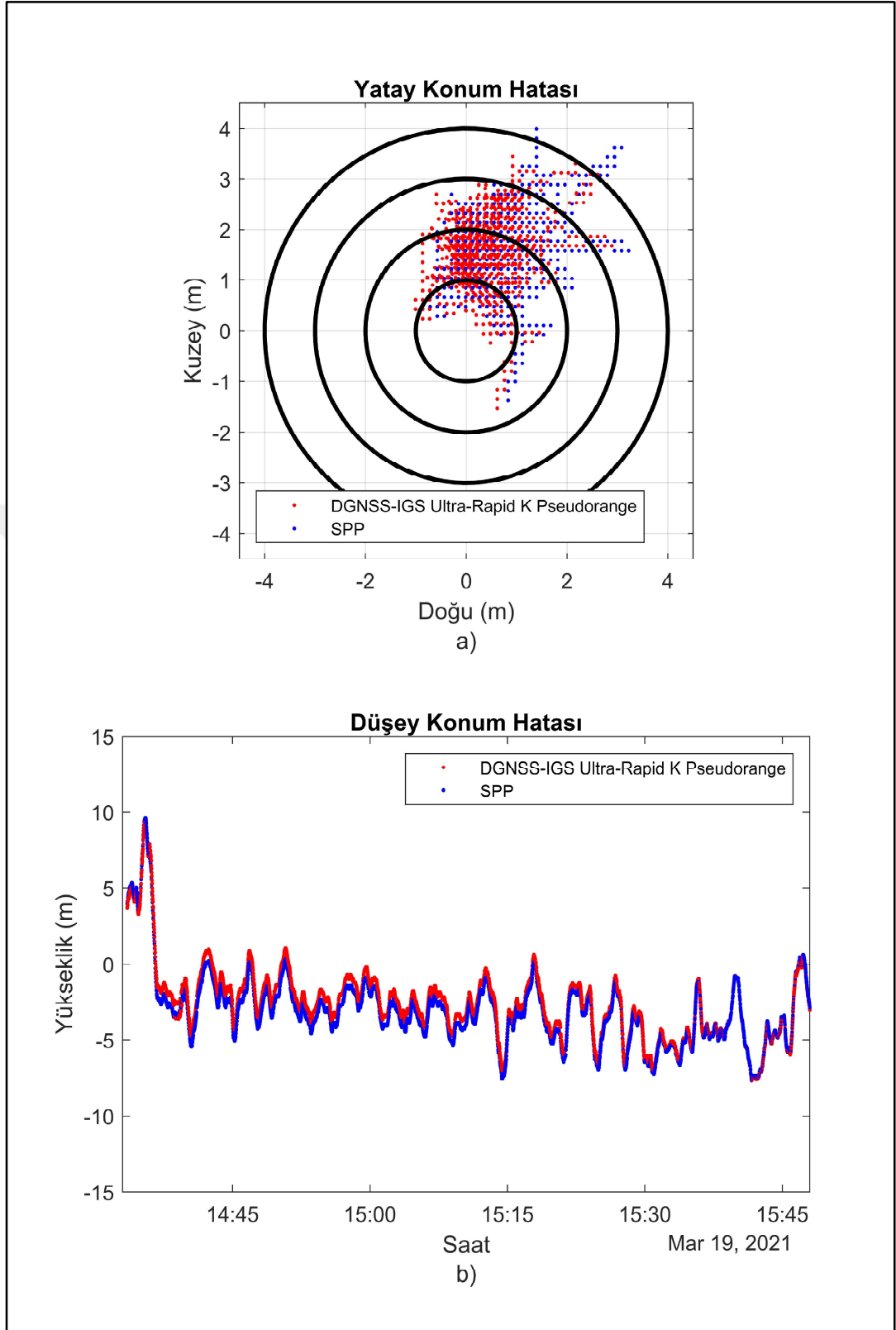
$$\Delta x_{IGS} = (H^T H)^{-1} H^T (PRC_{BRD-IGS}) \quad (4.3)$$

Şekil 4.5 – 4.8 sırasıyla kestirilmiş ultra-rapid, gözlemlenmiş ultra-rapid, rapid ve final ürünleri ile iyileştirilen konum hatalarını göstermektedir. Şekilde mavi renk düşük maliyetli GNSS alıcısının ürettiği konum bilgisini, kırmızı renk iyileştirilmiş konum bilgisini ifade etmektedir. Tablo 4.3'te pseudorange düzeltmesinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.3: DGNSS-IGS algoritması pseudorange düzeltmesi istatistiksel sonuçları.

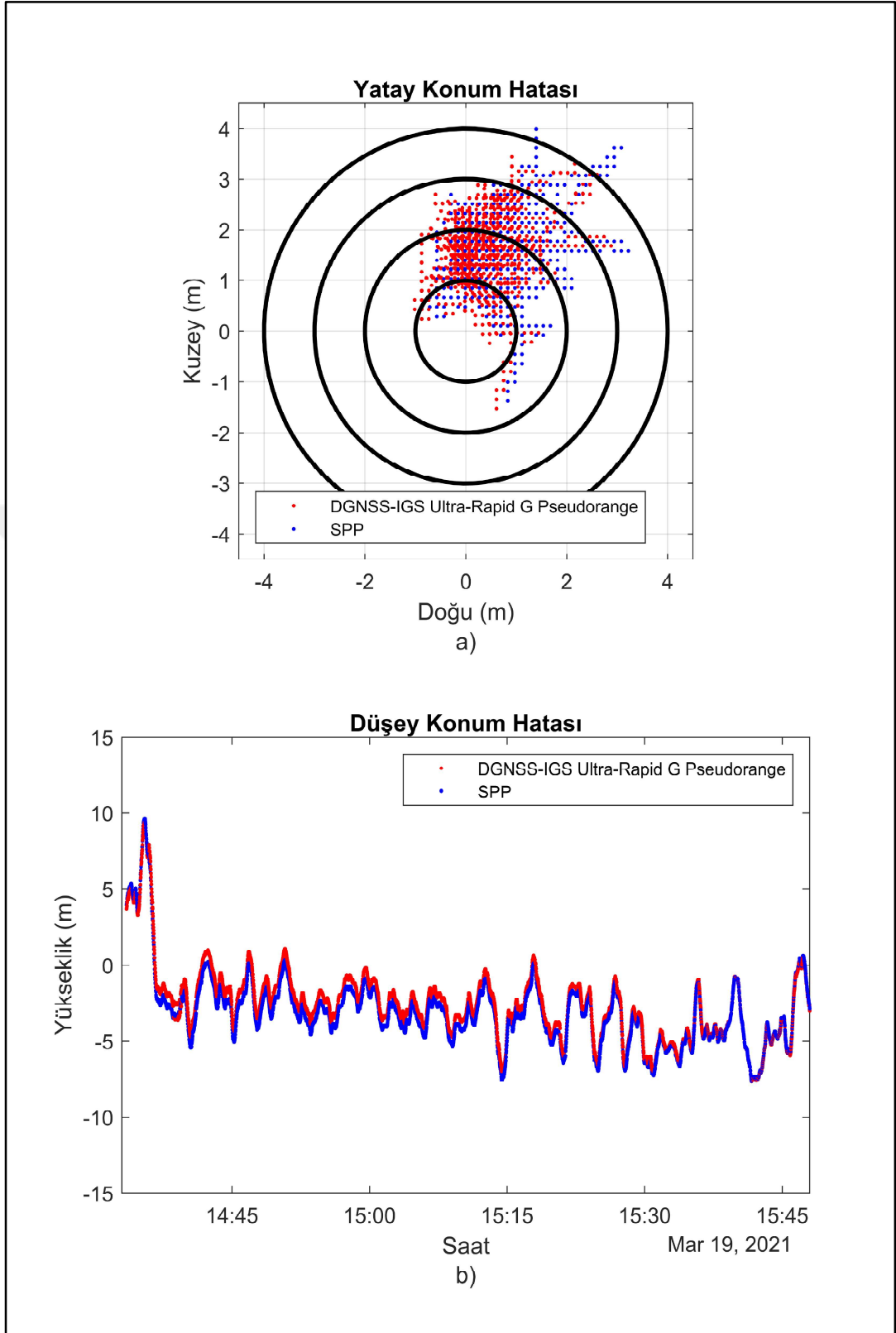
Çözüm		Bileşen	Ortalama (m)	STD (m)	KOH (m)
SPP		K	1.61	0.70	1.75
		D	0.69	0.60	0.91
		Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-IGS	Kestirilmiş Ultra-Rapid	K	1.58	0.71	1.73
		D	0.39	0.58	0.70
		Y	-2.59	2.48	3.59
DGNSS-IGS	Gözlemlenmiş Ultra-Rapid	K	1.59	0.71	1.74
		D	0.38	0.58	0.70
		Y	-2.58	2.48	3.58
DGNSS-IGS	Rapid	K	1.74	0.70	1.87
		D	0.35	0.59	0.69
		Y	-2.67	2.41	3.59
DGNSS-IGS	Final	K	1.74	0.70	1.87
		D	0.35	0.59	0.69
		Y	-2.67	2.41	3.59

Tablo 4.3'te karesel ortalama hatalar incelendiğinde pseudorange düzeltmesi ile konum bilgisinin, yükseklik bileşeni için tüm IGS ürünleri ile %8 iyileştiği, kuzey ve doğu bileşenleri için iyileşmediği görülmüştür. Kestirilmiş ultra-rapid, gözlemlenmiş ultra-rapid, rapid ve final ürünlerin doğruluğu, sırasıyla 5, 3, 2.5 ve 2.5 santimetredir. Yayın yörünge efemerisinin doğruluğunun 1 metre olduğu düşünüldüğünde hassas efemerislerin doğruluğu birbirine oldukça benzerdir. Bu nedenle tüm IGS ürünlerinin benzer sonuç vermesi tutarlıdır.

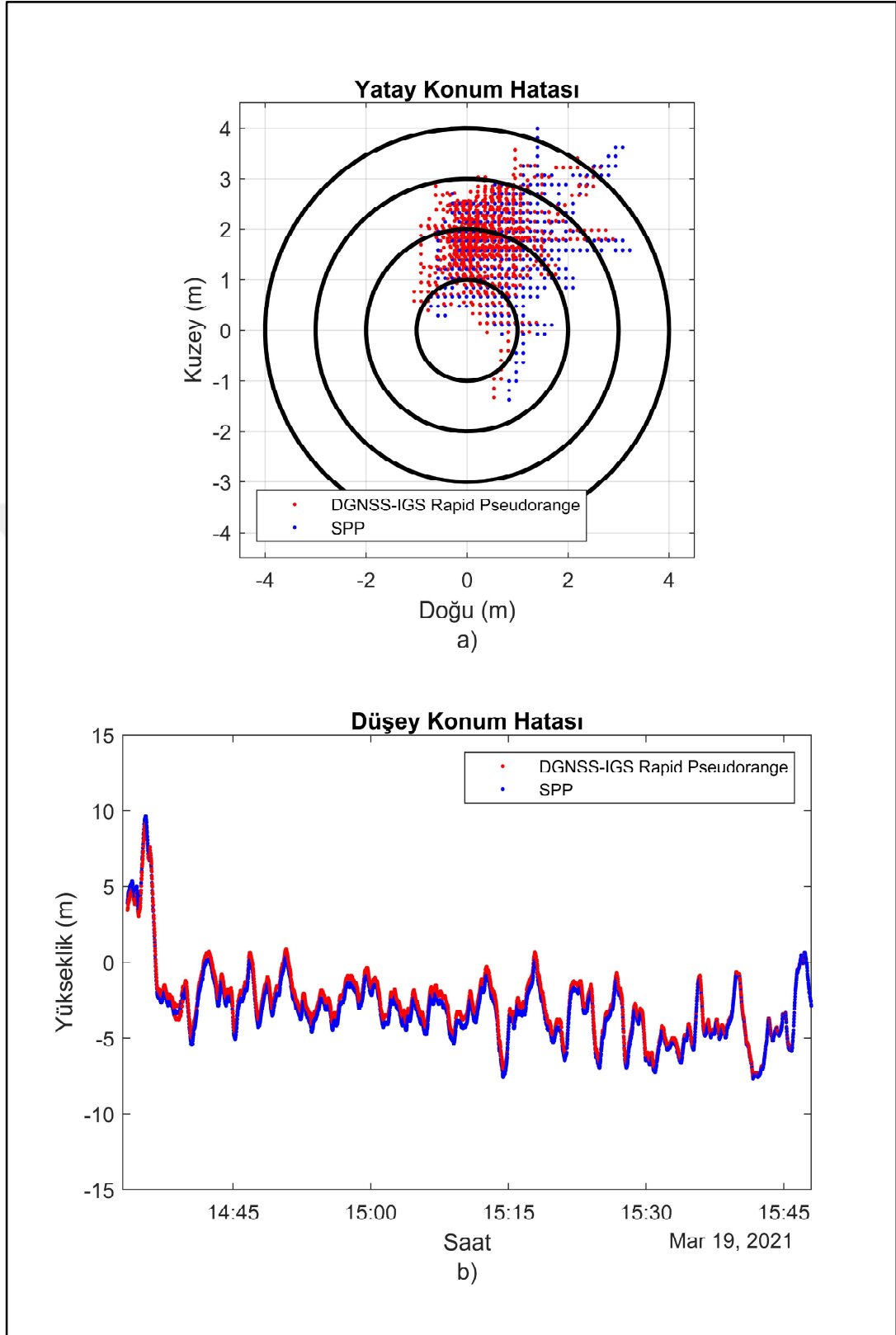


Şekil 4.5: Kestirilmiş ultra-rapid pseudorange düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

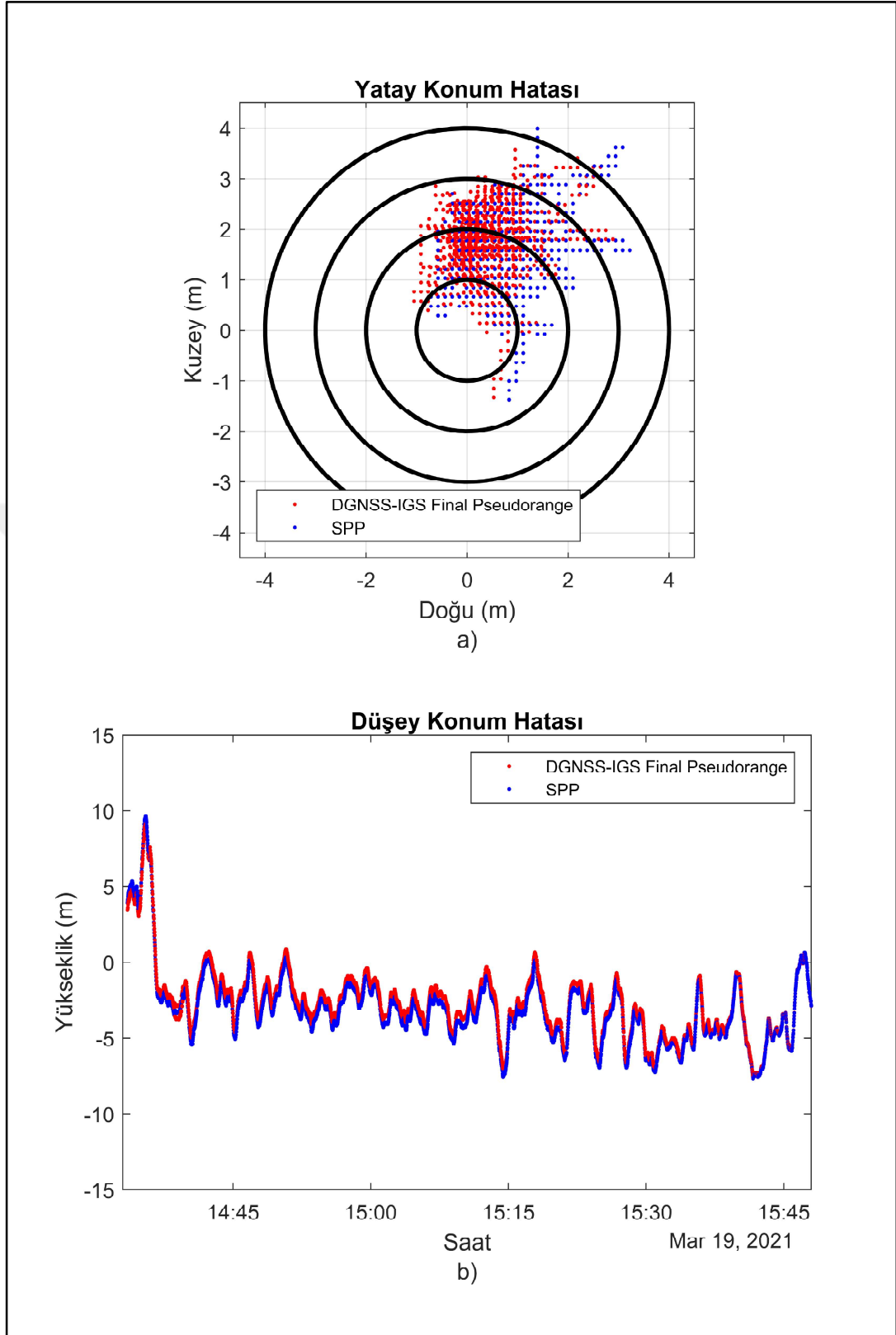




Şekil 4.6: Gözlemlenmiş ultra-rapid pseudorange düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.



Şekil 4.7: Rapid pseudorange düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.



Şekil 4.8: Final pseudorange düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

### 4.3.2.2. Uydu Saat Hatası Düzeltmesinin Etkisi

Bu bölümde, IGS saat ürünleri ile navigasyon dosyasındaki katsayılardan hesaplanan uydu saat hatası düzeltmesinin etkisi incelenmiştir. Bu etki 3.20 eşitliğinden yola çıkarak şu şekilde gösterilebilir:

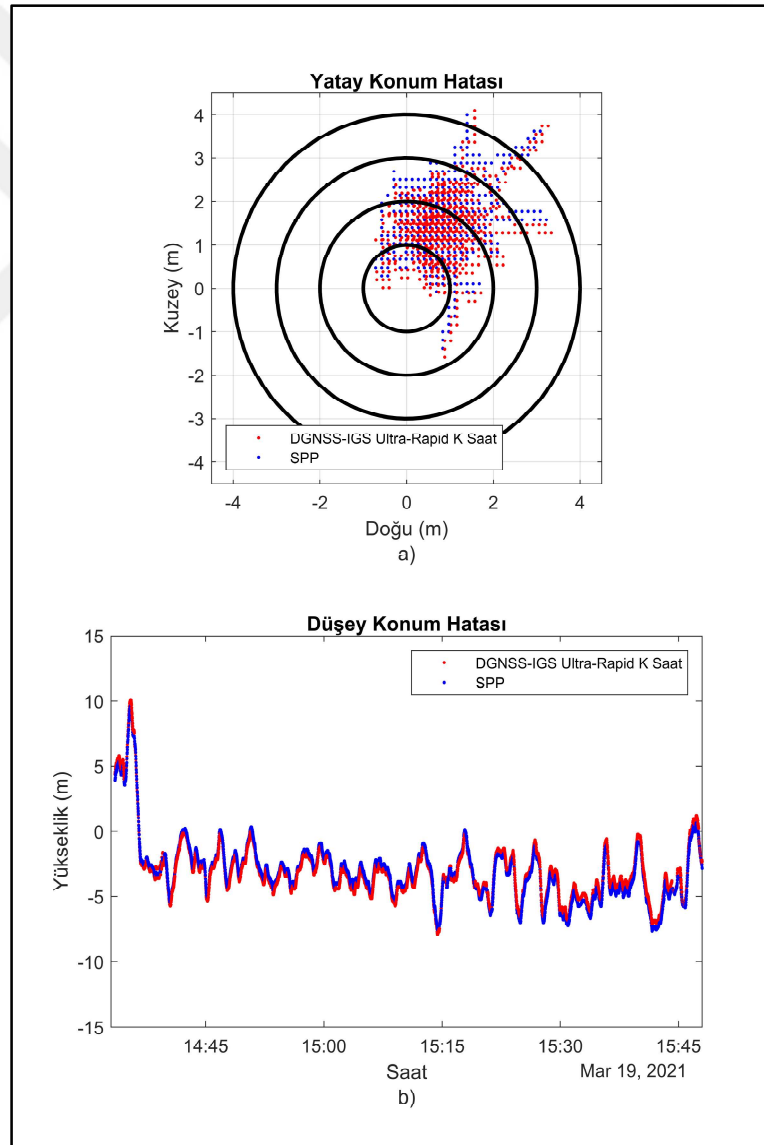
$$\Delta x_{IGS} = (H^T H)^{-1} H^T (B_{IGS} - \hat{B}) \quad (4.4)$$

Şekil 4.9 – 4.12 sırasıyla kestirilmiş ultra-rapid, gözlemlenmiş ultra-rapid, rapid ve final ürünleri ile iyileştirilen konum hatalarını göstermektedir. Şekilde mavi renk u-blox C94-M8P geliştirme kitinin ürettiği konum bilgisini, kırmızı renk iyileştirilmiş konum bilgisini ifade etmektedir. Tablo 4.4'te uydu saat hatası düzeltmesinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir.

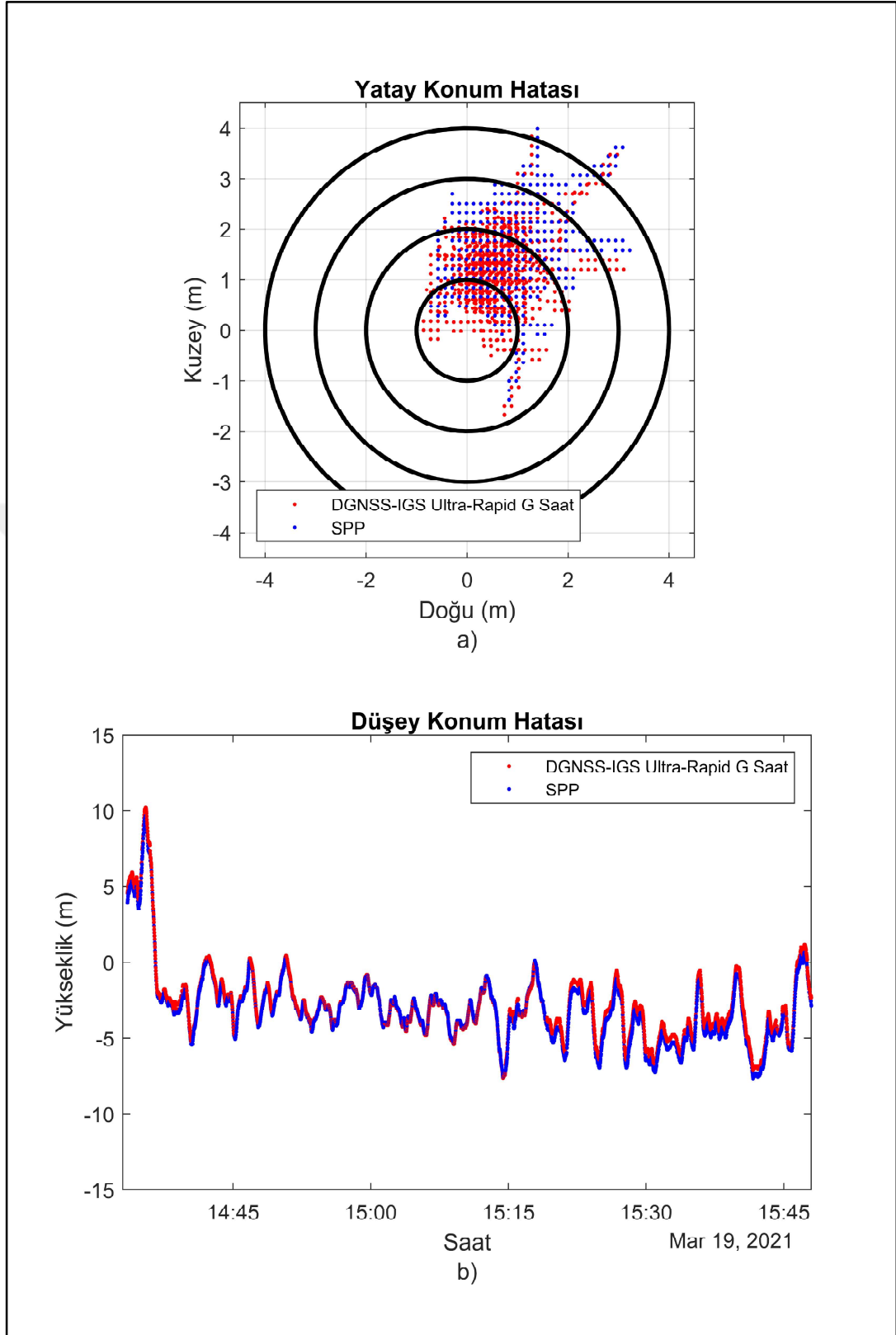
Tablo 4.4: DGNSS-IGS algoritması uydu saat hatası düzeltmesi istatistiksel sonuçları.

Çözüm		Bileşen	Ortalama (m)	STD (m)	KOH (m)
SPP		K	1.61	0.70	1.75
		D	0.69	0.60	0.91
		Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-IGS	Kestirilmiş Ultra-Rapid	K	1.36	0.72	1.54
		D	0.79	0.61	1.00
		Y	-3.01	2.45	3.88
DGNSS-IGS	Gözlemlenmiş Ultra-Rapid	K	1.18	0.73	1.38
		D	0.60	0.60	0.84
		Y	-2.77	2.47	3.71
DGNSS-IGS	Rapid	K	1.02	0.74	1.26
		D	0.64	0.58	0.86
		Y	-2.72	2.55	3.73
DGNSS-IGS	Final	K	1.02	0.74	1.26
		D	0.65	0.58	0.87
		Y	-2.72	2.54	3.72

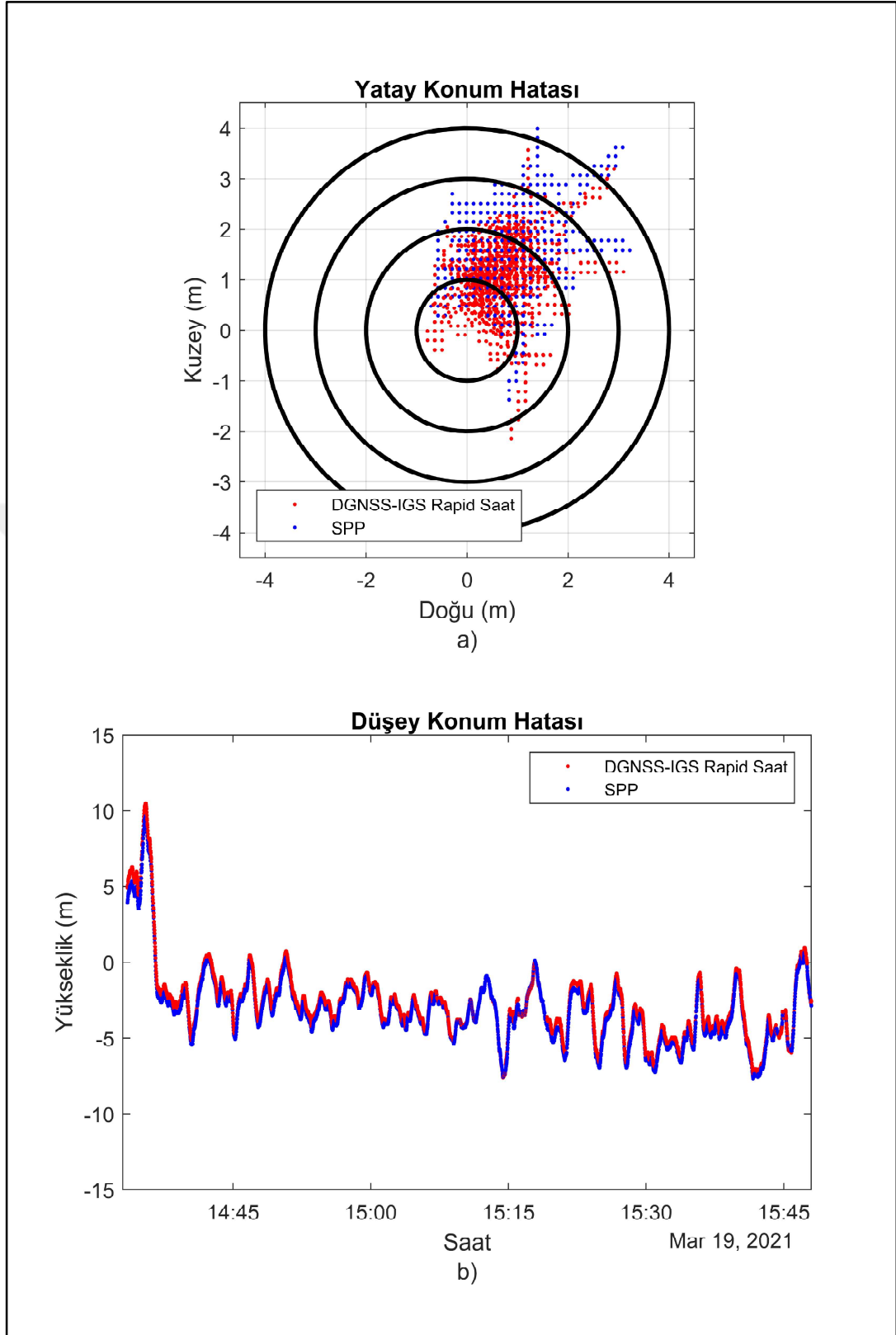
Tablo 4.4'te karesel ortalama hatalar incelendiğinde uydu saat hatası düzeltmesi ile konum bilgisinin; kuzey bileşeni için kestirilmiş ultra-rapid ile %12, gözlemlenmiş ultra-rapid ile %21, rapid ve final ile %28 iyileştiği; doğu bileşeni için kestirilmiş ultra-rapid ile iyileşmediği, diğer IGS saat ürünleriyle %8 iyileştiği görülmüştür. Yayın yörünge efemerisi ile hesaplanan uydu saat hatası, kestirilmiş ultra-rapid, gözlemlenmiş ultra-rapid, rapid ve final saat ürünlerinin doğruluğu; sırasıyla 5000, 3000, 150, 75 ve 75 pikosaniyedir. Saat ürünlerinin doğruluğu incelendiğinde kestirilmiş ultra-rapid ile konum bilgisinin çok fazla iyileşmemesi, gözlemlenen ultra-rapid, rapid ve final ürünleriyle iyileşme oranının artması tutarlı bulunmuştur.



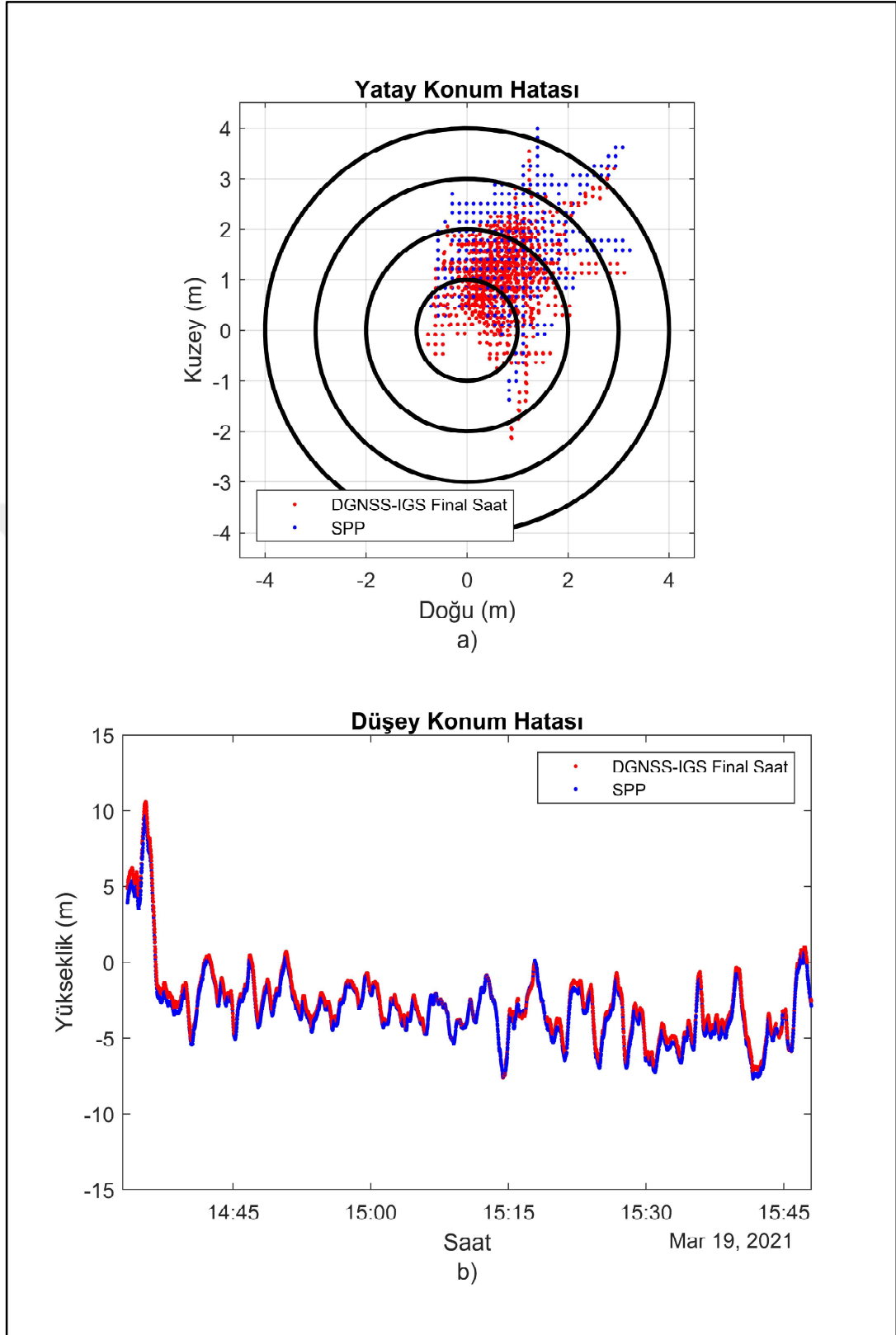
Şekil 4.9: Kestirilmiş ultra-rapid uydu saat hatası düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.



Şekil 4.10: Gözlemlenmiş ultra-rapid uydu saat hatası düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.



Şekil 4.11: Rapid uydu saat hatası düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.



Şekil 4.12: Final uydu saat hatası düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.



### 4.3.2.3. İyonosferik Gecikme Düzeltmesinin Etkisi

Bu bölümde, IGS atmosferik ürünleri ile kestirilen Klobuchar modelinden hesaplanan iyonosferik gecikme düzeltmesinin etkisi incelenmiştir. Bu etki 3.20 eşitliğinden yola çıkarak şu şekilde gösterilebilir:

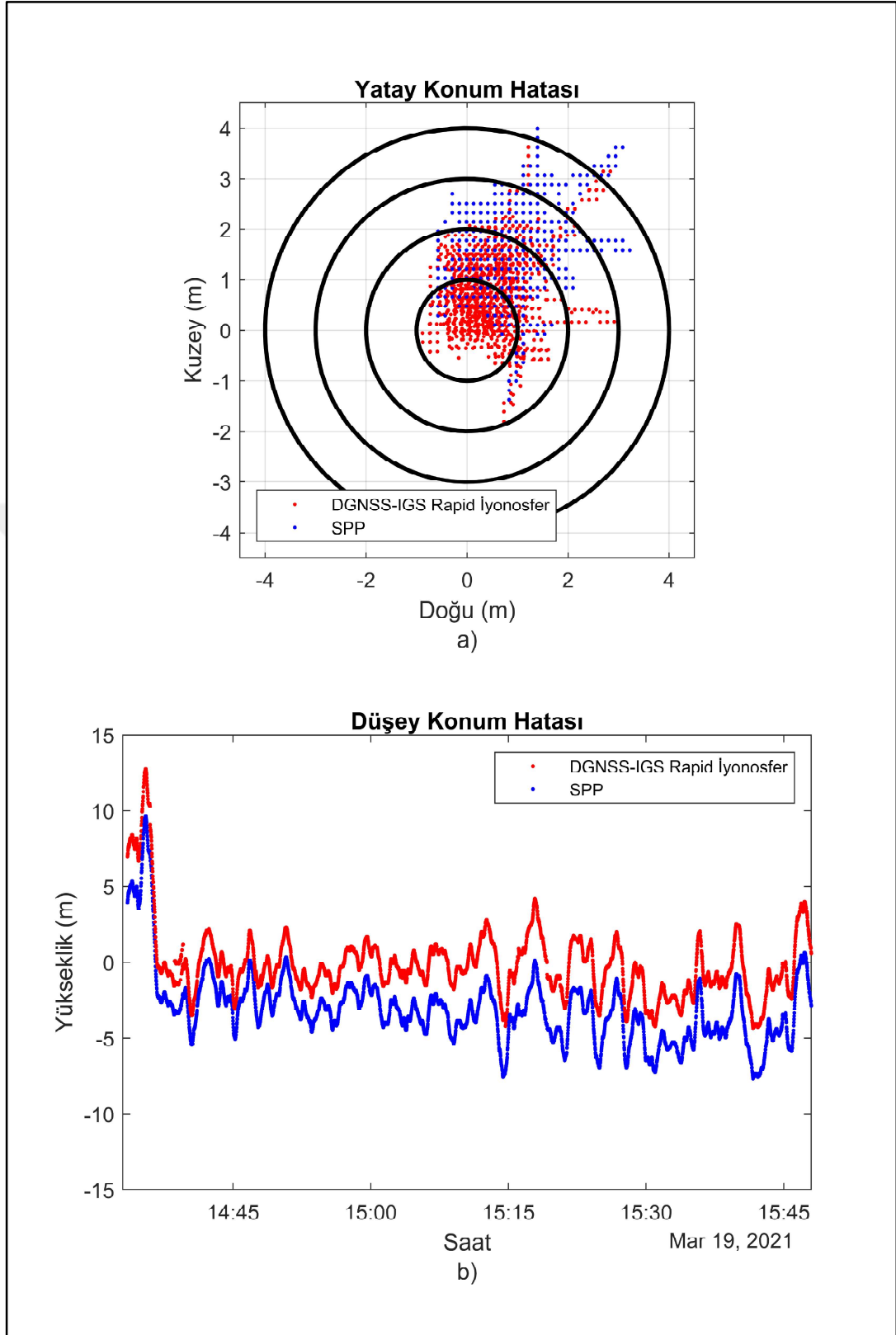
$$\Delta x_{IGS} = (H^T H)^{-1} H^T (I_{IGS} - \hat{I}) \quad (4.5)$$

Şekil 4.13 ve 4.14 IGS'nin iyonosfer için hesaplanan rapid ve final ürünleri ile iyileştirilen konuma ilişkin hataları göstermektedir. Şekilde mavi renk düşük maliyetli GNSS alıcısının ürettiği konum bilgisini, kırmızı renk iyileştirilmiş konum bilgisini ifade etmektedir. Tablo 4.5'te iyonosferik gecikme düzeltmesinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir.

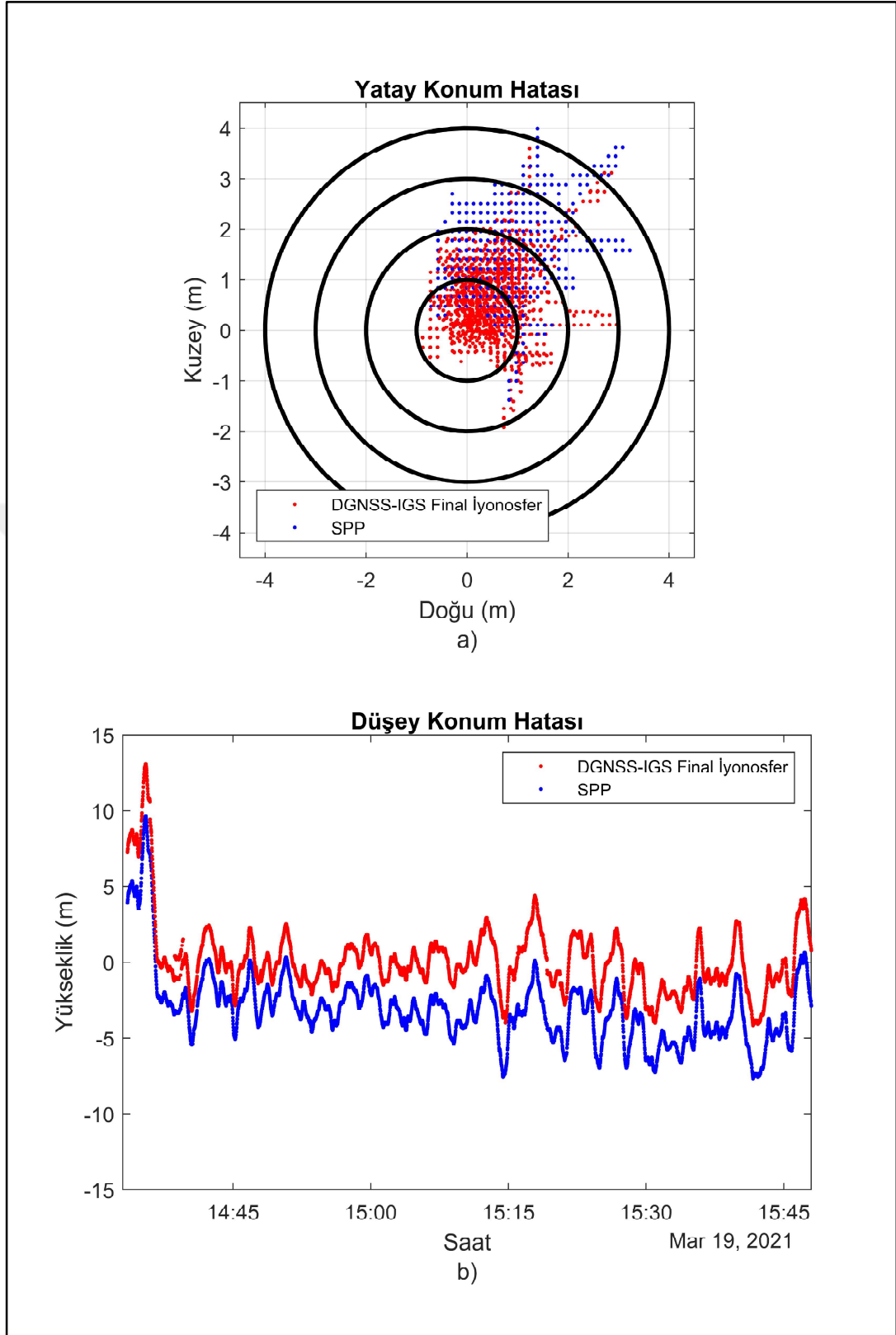
Tablo 4.5: DGNSS-IGS algoritması iyonosferik gecikme düzeltmesi istatistiksel sonuçları

Çözüm		Bileşen	Ortalama (m)	STD (m)	KOH (m)
SPP		K	1.61	0.70	1.75
		D	0.69	0.60	0.91
		Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-IGS	Rapid İyonosfer	K	0.70	0.74	1.03
		D	0.41	0.59	0.72
		Y	-0.10	2.42	2.42
DGNSS-IGS	Final İyonosfer	K	0.63	0.75	0.98
		D	0.43	0.59	0.73
		Y	0.11	2.43	2.44

Tablo 4.5'te karesel ortalama hatalar incelendiğinde iyonosferik gecikme düzeltmesi ile konum bilgisinin; kuzey bileşeni için rapid ile %41, final ile %44 iyileştiği; doğu bileşeni için rapid ile %21, final ile %20 iyileştiği; yükseklik bileşeni için hem rapid hem final ile %38 iyileştiği görülmüştür. GPS L1 frekansı için rapid iyonosferik gecikmenin doğruluğu 0.33 - 1.47 metre iken final iyonosferik gecikmenin doğruluğu 0.33 – 1.30 metredir. Bu nedenle rapid ve final iyonosferik gecikme düzeltmesi ile benzer konum iyileştirmesi sağlanması tutarlı bulunmuştur.



Şekil 4.13: Rapid iyonosferik gecikme düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.



Şekil 4.14: Final iyonosferik gecikme düzeltmesi ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

#### 4.3.2.4. Kestirilmiş Ultra-Rapid Ürünlerin Etkisi

Bu bölümde, DGNSS-IGS algoritmasının gerçek zamanlı olarak uygulandığında konum bilgisine etkisi analiz edilmiştir. Kestirilmiş ultra-rapid ürünleri gözlem anından önce yayınlanmaktadır ve bu nedenle DGNSS-IGS gerçek zamanlı olarak uygulanabilmektedir. Bu etki 3.20 eşitliğinden yola çıkarak şu şekilde gösterilebilir:

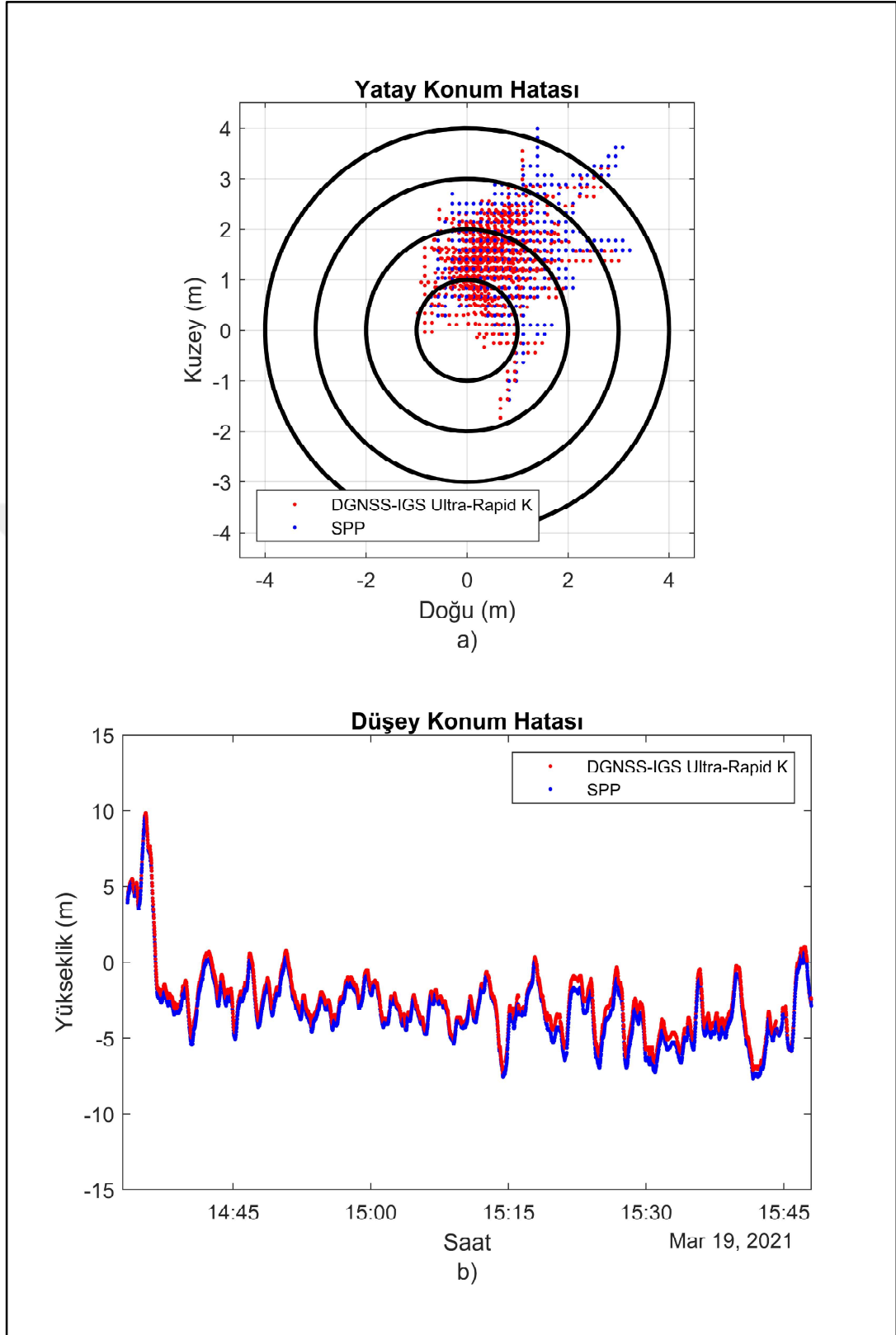
$$\Delta x_{IGS} \approx (H^T H)^{-1} H^T [PRC_{BRD-IGS} + (B_{IGS} - \hat{B})] \quad (4.6)$$

Şekil 4.15 kestirilmiş ultra-rapid ürünleri ile iyileştirilen konuma ilişkin hataları göstermektedir. Şekilde mavi renk u-blox C94-M8P geliştirme kitinin ürettiği konum bilgisini, kırmızı renk iyileştirilmiş konum bilgisini ifade etmektedir. Tablo 4.6'da gerçek zamanlı DGNSS-IGS düzeltmesinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.6: Kestirilmiş ultra-rapid ürünleri ile DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.

Çözüm	Bileşen	Ortalama (m)	STD (m)	KOH (m)
SPP	K	1.61	0.70	1.75
	D	0.69	0.60	0.91
	Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-IGS Ultra-Rapid Kestirilmiş	K	1.34	0.71	1.51
	D	0.48	0.59	0.77
	Y	-2.58	2.41	3.53

Tablo 4.6'da karesel ortalama hatalar incelendiğinde gerçek zamanlı DGNSS-IGS düzeltmesi ile konum bilgisinin kuzey bileşeni için %13, doğu bileşeni için %15, yükseklik bileşeni için %10 iyileştiği görülmüştür. DGNSS-IGS algoritmasının gerçek zamanlı olarak alıcının SPP çözümüne göre konumlama doğruluğunu yaklaşık %10 iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.15: Kestirilmiş ultra-rapid ürünleri ile DGNSS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

#### 4.3.2.5. Gözlemlenmiş Ultra-Rapid Ürünlerin Etkisi

Gözlemlenmiş ultra-rapid ürünleri gözlem anından 3-9 saat gecikme ile, rapid iyonosferik TEC haritası en fazla 24 saat gecikme ile yayınlanmaktadır. Bu bölümde, gözlem anından 24 saat sonra DGNSS algoritması uygulandığında düşük maliyetli GNSS alıcısının konumuna etkisi analiz edilmiştir.

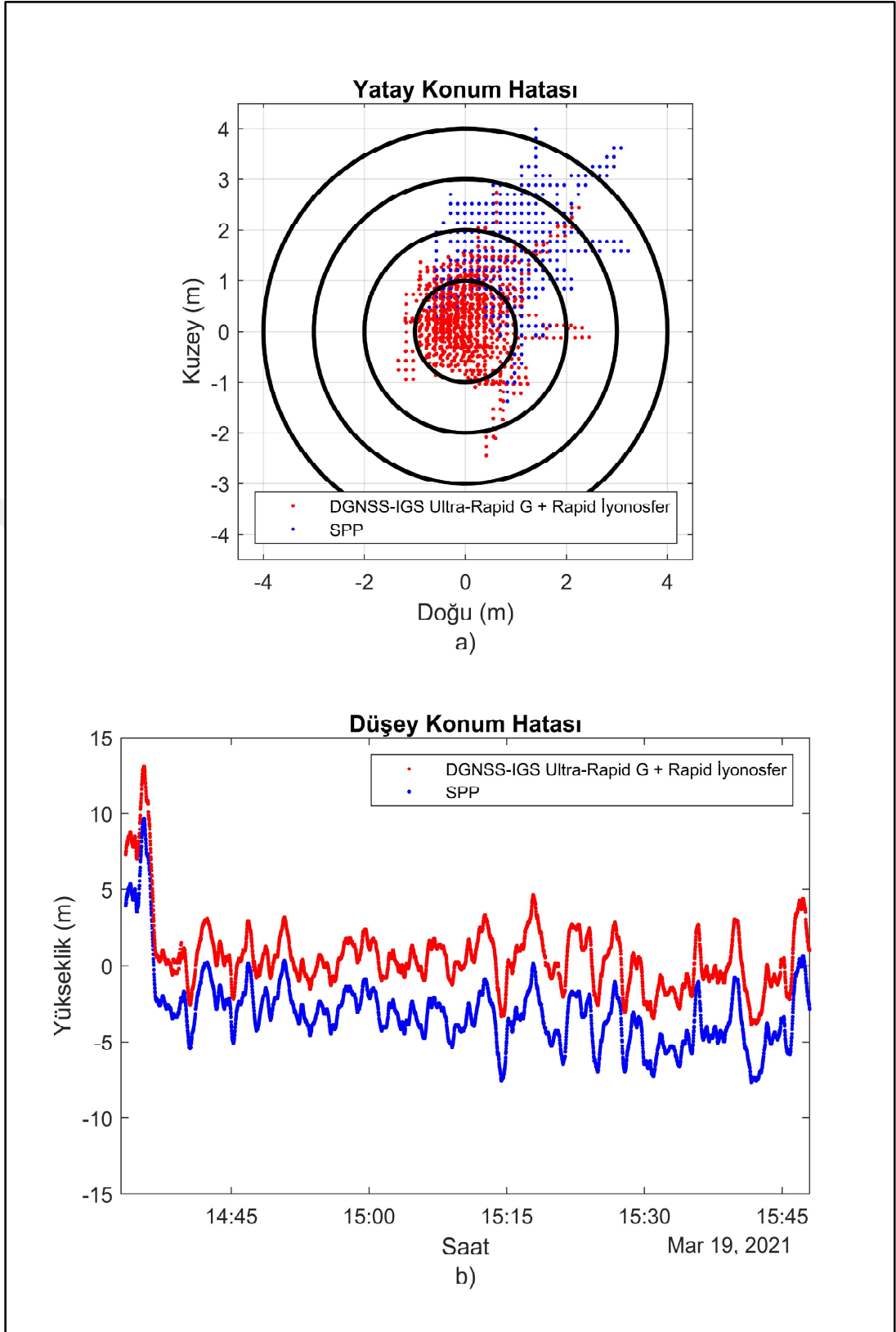
Tablo 4.7’de gözlemlenmiş ultra-rapid ve rapid iyonosferik TEC haritalarının birlikte kullanımı ile DGNSS-IGS düzeltmesinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.7: Gözlemlenmiş ultra-rapid ürünleri ile DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.

Çözüm	Bileşen	Ortalama (m)	STD (m)	KOH (m)
SPP	K	1.61	0.70	1.75
	D	0.69	0.60	0.91
	Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-IGS Ultra-Rapid Gözlemlenmiş Rapid İyonosfer	K	0.25	0.71	0.75
	D	0.00	0.58	0.58
	Y	0.60	2.37	2.44

Tablo 4.7’de ortalama hatalar incelendiğinde DGNSS-IGS düzeltmesi ile konum bilgisinin kuzey bileşeni için 1.61 metreden 0.25 metreye düştüğü, yükseklik bileşeni için -3.03 metreden 0.60 metreye düştüğü, iyileştirilmiş konumun doğu bileşenlerinin ortalamasının referans noktası ile çakıştığı görülmüştür. Karesel ortalama hatalar incelendiğinde DGNSS-IGS düzeltmesi ile konum bilgisinin kuzey bileşeni için %57, doğu bileşeni için %36, yükseklik bileşeni için %38 iyileştiği görülmüştür.

Şekil 4.16 gözlemlenmiş ultra-rapid ve rapid iyonosferik TEC haritalarının birlikte kullanımı ile iyileştirilen konum hatalarını göstermektedir. Şekilde mavi renk düşük maliyetli GNSS alıcısının konum bilgisini, kırmızı renk iyileştirilmiş konum bilgisini ifade etmektedir.



Şekil 4.16: Gözlemlenmiş ultra-rapid ürünleri ile DGNSS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

#### 4.3.2.6. Rapid Ürünlerin Etkisi

Bu bölümde, IGS-Rapid ürünleriyle DGNSS algoritması uygulandığında düşük maliyetli GNSS alıcısının konumuna etkisi analiz edilmiştir. IGS-Rapid ürünleri gözlem anından 17-41 saat gecikme ile, rapid iyonosferik TEC haritası en fazla 24 saat gecikme ile yayınlanmaktadır. Bu nedenle, IGS-Rapid ürünleriyle DGNSS algoritması gözlem anından 17-41 saat sonra uygulanabilmektedir.

Tablo 4.8’de IGS-Rapid ve rapid iyonosferik TEC haritalarının birlikte kullanımı ile DGNSS-IGS düzeltmesinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir.

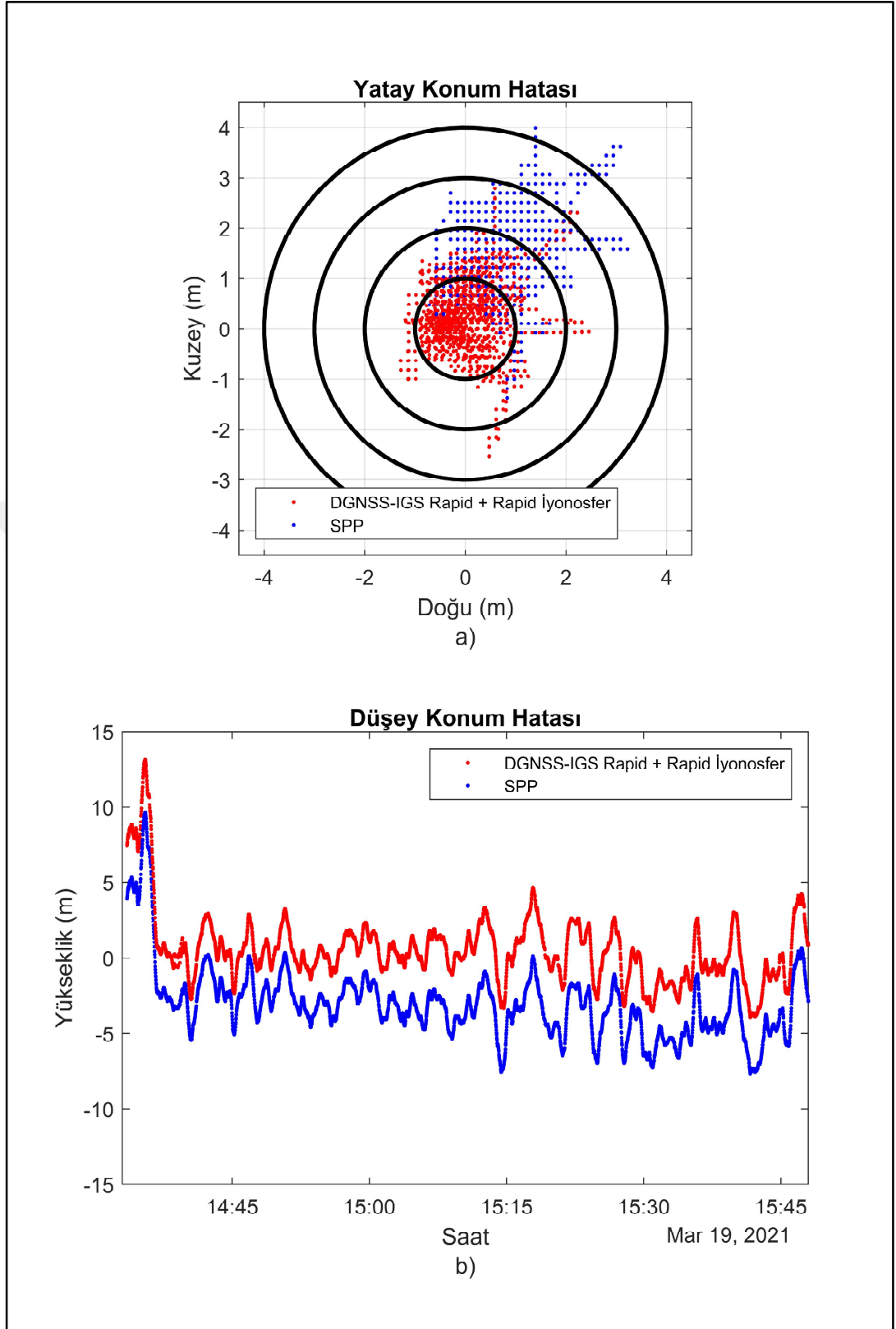
Tablo 4.8: Rapid ürünler ile DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.

<b>Çözüm</b>	<b>Bileşen</b>	<b>Ortalama (m)</b>	<b>STD (m)</b>	<b>KOH (m)</b>
SPP	K	1.61	0.70	1.75
	D	0.69	0.60	0.91
	Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-IGS Rapid Rapid İyonosfer	K	0.25	0.70	0.74
	D	0.02	0.58	0.58
	Y	0.56	2.40	2.46

Tablo 4.8’de karesel ortalama hatalar incelendiğinde DGNSS-IGS düzeltmesi ile konum bilgisinin kuzey bileşeni için %58, doğu bileşeni için %36, yükseklik bileşeni için %37 iyileştiği görülmüştür.

Şekil 4.17 IGS-Rapid ve rapid iyonosferik TEC haritalarının birlikte kullanımı ile iyileştirilen konuma ilişkin hataları göstermektedir. Şekilde mavi renk u-blox C94-M8P geliştirme kitinin ürettiği konum bilgisini, kırmızı renk iyileştirilmiş konum bilgisini ifade etmektedir.





Şekil 4.17: Rapid ürünleri ile DGNS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

#### 4.3.2.7. Final Ürünlerin Etkisi

Bu bölümde, en yüksek kalitedeki IGS ürünleri ile DGNSS algoritmasının konum bilgisine etki analiz edilmiştir. IGS-Final ürünleri gözlem anından 12-18 gün sonra, final iyonosferik TEC haritaları gözlem anından yaklaşık 11 gün sonra yayınlanmaktadır.

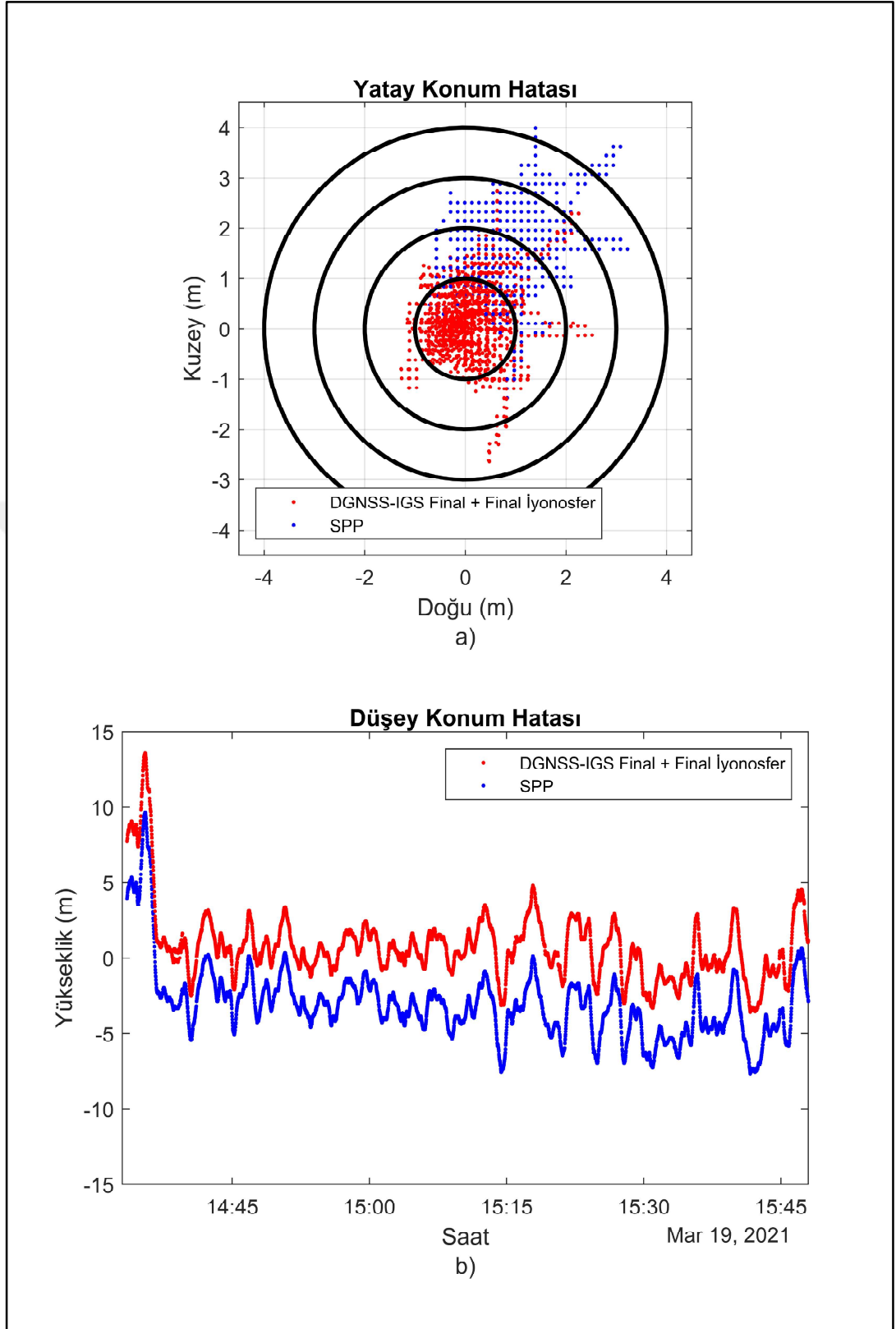
Tablo 4.9'da IGS-Final ve final iyonosferik TEC haritalarının birlikte kullanımı ile DGNSS-IGS düzeltmesinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.9: Final ürünler ile DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.

Çözüm	Bileşen	Ortalama (m)	STD (m)	KOH (m)
SPP	K	1.61	0.70	1.75
	D	0.69	0.60	0.91
	Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-IGS	K	0.16	0.71	0.73
Final	D	0.05	0.57	0.58
Final İyonosfer	Y	0.78	2.40	2.53

Tablo 4.8'de karesel ortalama hatalar incelendiğinde DGNSS-IGS düzeltmesi ile konum bilgisinin kuzey bileşeni için %58, doğu bileşeni için %36, yükseklik bileşeni için %35 iyileştiği görülmüştür. Standart sapmalar incelendiğinde anlamlı bir değişim olmadığı görülmektedir. Bunun sebebinin DGNSS-IGS algoritmasının konum düzeltmesine dayanmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Sonuçlar, Tablo 4.7 ve 4.8'de gösterilmiş olan gözlemlenmiş ultra-rapid ve rapid ürünleriyle DGNSS-IGS algoritmasının konuma etkisi ile karşılaştırıldığında anlamlı bir fark olmadığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.18 IGS-Final ve final iyonosferik TEC haritalarının birlikte kullanımı ile iyileştirilen konum hatalarını göstermektedir. Şekilde mavi renk düşük maliyetli GNSS alıcısının konum bilgisini, kırmızı renk iyileştirilmiş konum bilgisini göstermektedir.



Şekil 4.18: Final ürünleri ile DGNSS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

### 4.3.3. DGNSS-CP ile DGNSS-IGS Karşılaştırılması

Tezin bu bölümünde, bölüm 4.3.2.7’de açıklanan IGS-Final ürünlerinin kullanılmasıyla DGNSS-IGS sonuçları ve bölüm 4.3.1’de açıklanan DGNSS-CP sonuçları karşılaştırılmıştır.

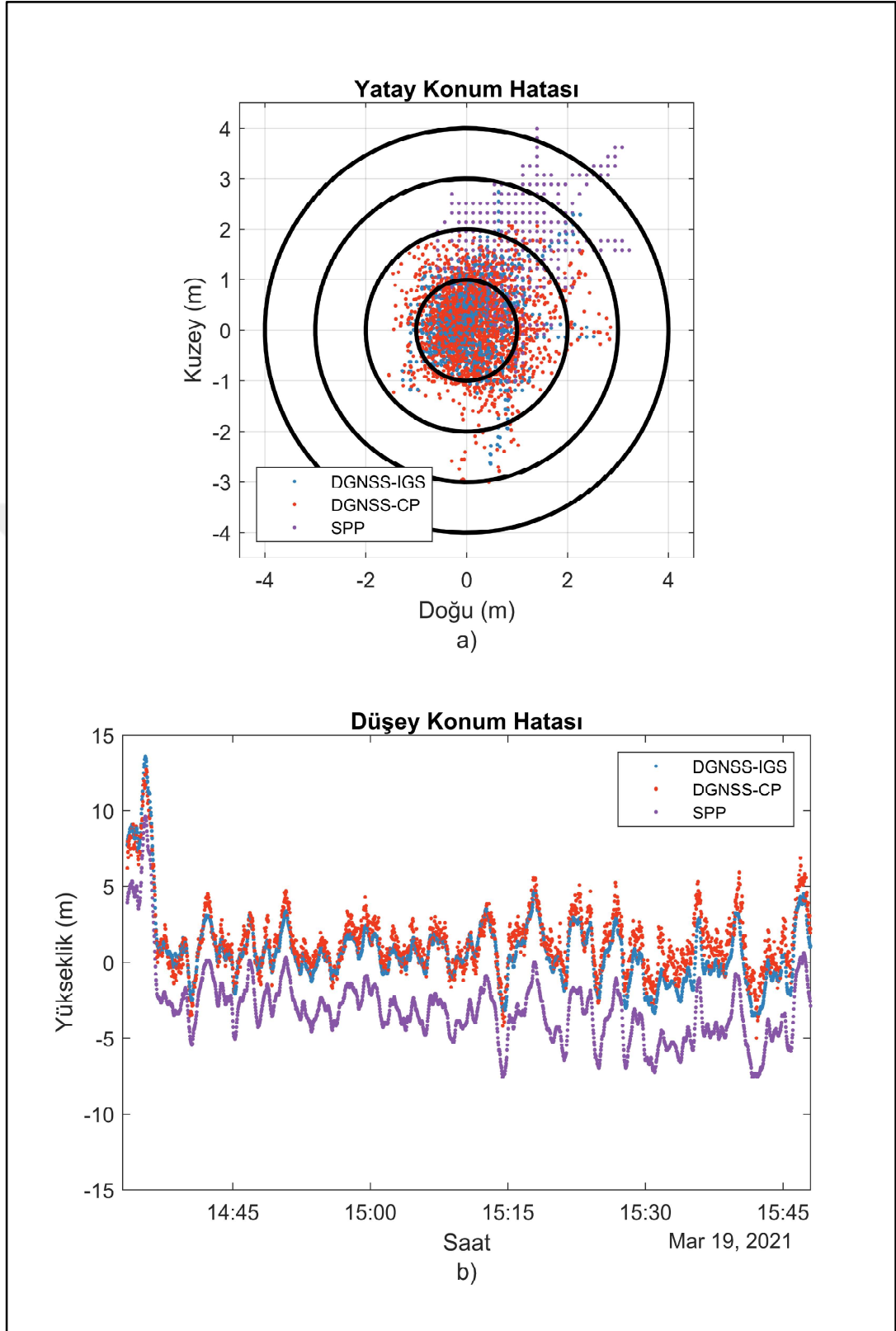
Tablo 4.10’da DGNSS-IGS ve DGNSS-CP konum düzeltmesinin kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için ortalama hata, standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.10: DGNSS-CP ve DGNSS-IGS istatistiksel sonuçları.

Çözüm	Bileşen	Ortalama (m)	STD (m)	KOH (m)
SPP	K	1.61	0.70	1.75
	D	0.69	0.60	0.91
	Y	-3.03	2.47	3.91
DGNSS-CP	K	0.12	0.75	0.76
	D	0.19	0.65	0.68
	Y	1.40	2.26	2.66
DGNSS-IGS Final Final İyonosfer	K	0.16	0.71	0.73
	D	0.05	0.57	0.58
	Y	0.78	2.40	2.53

Karesel ortalama hatalar incelendiğinde konum bilgisinin; kuzey bileşeni için DGNSS-CP ile %57, DGNSS-IGS ile %58; doğu bileşeni için DGNSS-CP ile %25, DGNSS-IGS ile %36; yükseklik bileşeni için DGNSS-CP ile %32, DGNSS-IGS ile %35 iyileştiği görülmüştür. Bu sonuçlardan hareketle DGNSS-IGS’in DGNSS-CP’ye göre daha başarılı sonuç verdiği söylenebilir. Ortalama hatalara bakıldığında yükseklik bileşeni için DGNSS-IGS 62 cm daha iyi sonuç vermiştir. Her iki yöntemde de standart sapmalarda anlamlı bir gelişme bulunmamaktadır.

Şekil 4.19 DGNSS-CP ve DGNSS-IGS ile iyileştirilen konum hatalarını göstermektedir. Şekilde mor renk düşük maliyetli GNSS alıcısının konum bilgisini, kırmızı renk DGNSS-CP ile iyileştirilmiş konum bilgisini, mavi renk DGNSS-IGS ile iyileştirilmiş konum bilgisini göstermektedir.



Şekil 4.19: DGNS-CP, DGNS-IGS ve SPP için a) yatay konum hatası, b) düşey konum hatası.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında DGNSS-CP ve bu tez kapsamında önerilen DGNSS-IGS algoritmalarının düşük maliyetli GNSS alıcılarının ürettiği konum bilgisine sağladığı katkının analizi yapılmıştır. Bu şekilde, günümüzde yaygın olarak kullanılan akıllı telefon, tablet, akıllı saat vb. cihazların önemli bir kısmını da kapsayan, ham gözlem verisi kaydetmeyen, GNSS alıcılarının konumlama doğruluğunun iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu tez kapsamında, hem DGNSS-CP algoritmasının hem de DGNSS-IGS algoritmasının kullanılabilceği bir test çalışması yapılmıştır. DGNSS-CP algoritmasıyla konumlama doğruluğu SPP çözümüne göre kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için %57, %25 ve %32 iyileştiği görülmüştür. DGNSS-CP, düşük maliyetli GNSS alıcısının yakın çevresinde koordinatları bilinen bir referans istasyonuna ihtiyaç duymaktadır.

DGNSS-IGS, DGNSS-CP'in ihtiyaç duyduğu referans istasyona gerek olmadan IGS ürünleri ile konumlama doğruluğunun iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır. DGNSS-IGS pseudorange düzeltmesi, uydu saat hatası düzeltmesi ve iyonosferik gecikme düzeltmesi olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Pseudorange ve uydu saat hatası düzeltmelerinin, IGS'nin kestirilmiş ultra-rapid, gözlemlenmiş ultra-rapid, rapid ve final hassas efemerisleriyle; iyonosferik gecikme düzeltmesi ise IGS'nin rapid ve final TEC haritalarıyla konumlama doğruluğuna katkısı incelenmiştir. Ek olarak hassas ürünlerin yayınlanma süresi dikkate alınarak farklı ürün kombinasyonlarının konumlama doğruluğuna katkısı analiz edilmiştir.

Pseudorange düzeltmesi, tüm IGS hassas efemerisleriyle alıcının konum doğruluğunun sadece yükseklik bileşenine %8 katkı sağlamıştır. Uydu saat hatası düzeltmesi, alıcının konumlama doğruluğunun; kuzey bileşeni için kestirilmiş ultra-rapid ile %12, gözlemlenmiş ultra-rapid ile %21, rapid ve final ile %28 iyileştiği; doğu bileşeni için kestirilmiş ultra-rapid ile iyileşmediği, diğer IGS saat ürünleriyle %8 iyileştiği görülmüştür. Bunun sebebinin, daha sonra yayınlanan IGS ürünlerinde uydu saat hatasının doğruluğunun artması ve örnekleme aralığının azalmasından kaynaklı olduğu söylenebilir. İyonosferik gecikme hatası düzeltmesiyle, alıcının konumlama doğruluğunun; kuzey bileşeni için rapid ile %41, final ile %44 iyileştirdiği; doğu bileşeni için rapid ile %21, final ile %20 iyileştiği; yükseklik bileşeni için hem rapid

hem final ile %38 iyileştiği görülmüştür. Rapid ve final TEC haritalarının doğruluğu birbirine çok yakın olduğundan bu iki ürünün benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

DGNSS-IGS, gözlem anından önce yayınlanan kestirilmiş ultra-rapid ürünüyle DGNSS-CP'ye benzer şekilde gerçek zamanlı olarak uygulanması sonucu konumlama doğruluğunun kuzey bileşeni için %13, doğu bileşeni için %15, yükseklik bileşeni için %10 arttığı görülmüştür. Bundan hareketle, DGNSS-IGS algoritmasının gerçek zamanlı olarak uygulandığında da konumlama doğruluğunu arttırdığı söylenebilir.

Gözlem anından sonraki 24 saat içinde yayınlanan IGS ürünleriyle düşük maliyetli GNSS alıcısının konumlama doğruluğunun kuzey bileşeni için %57, doğu bileşeni için %36, yükseklik bileşeni için %38 arttığı görülmüştür. Gözlem anından 41 saat sonra yayınlanan IGS ürünleriyle uygulanan DGNSS-IGS ile konumlama doğruluğunun kuzey bileşeni için %58, doğu bileşeni için %36, yükseklik bileşeni için %37 arttığı görülmüştür. Son olarak IGS-Final ürünleriyle konum bilgisi kuzey bileşeni için %58, doğu bileşeni için %36, yukarı bileşen için %35 iyileştirilmiştir. Bu sonuçlardan hareketle, gözlem anından sonra yayınlanan tüm IGS ürünleriyle alıcının SPP çözümüne göre konumlama doğruluğunun ~%40 arttığı görülmüştür. Bununla beraber, IGS-Final ürünlerin IGS-Rapid ürünlere göre doğruluğunun daha fazla olmasına rağmen, alıcıların konum doğruluğuna daha fazla arttıramadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, IGS-Final ürünlerinin gözlem anından yaklaşık 12-18 gün gecikme yayımlandığı göz önüne alındığında, zamanı etkin kullanmak için DGNSS-IGS'nin gözlemlenmiş ultra-rapid veya rapid ürünlerle kullanılmasının daha uygun olacağı söylenebilir.

DGNSS-IGS ve DGNSS-CP yöntemleri karşılaştırıldığında yatay konum hatası için eş değer, düşey konum hatası için DGNSS-IGS'nin daha iyi performans sağladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, her iki yöntemin de konum hatasının standart sapma değerlerini iyileştiremediği görülmüştür. Bunun sebebinin bu yöntemlerin konum düzeltmesi esasına dayanmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların nihai sonuçları, herhangi bir referans istasyonu üzerinden DGNSS-CP yöntemini kullanmak yerine IGS ürünlerini kullanarak DGNSS-IGS ile benzer konumlama doğruluğunu elde etmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Bu da önerilen yöntemin daha etkin ve pratik kullanımının olduğunu göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- Alam N., Dempster A. G., (2013), “Cooperative positioning for vehicular networks: facts and future”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14 (4), 1708–1717.
- Altamimi Z., Collilieux X., (2009), “IGS contribution to the ITRF”, *Journal of Geodesy*, 83 (3–4), 375–383.
- Barrios C., Motai Y., Huston D., (2015), “Trajectory estimations using smartphones”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (12), 7901–7910.
- Boehm J., Heinkelmann R., Schuh H., (2007), “Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications”, *Journal of Geodesy*, 81 (10), 679–683.
- Byun S. H., Bar-Sever Y. E., (2009), “A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service”, *Journal of Geodesy*, 83 (3–4), 1–7.
- Choy S. L., (2009), “An Investigation Into The Accuracy Of Single Frequency Precise Point Positioning (PPP)”, PhD Thesis, RMIT University.
- Di Giovanni G., Radicella S. M., (1990), “An analytical model of the electron density profile in the ionosphere”, *Advances in Space Research*, 10 (11), 27–30.
- Engel P. K., Kalafus R. M., Ruane M. F., (1988), “Differential operation of the Global Positioning System”, *IEEE Communications Magazine*, 26 (7), 48–60.
- Hauschild A., (2017), “Basic Observation Equations”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer.
- Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., Orus R., Garcia-Rigo A., Feltens J., Komjathy A., Schaer S. C., Krankowski A., (2009), “The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998”, *Journal of Geodesy*, 83 (3–4), 263–275.
- Héroux P., Kouba J., (2001), “GPS precise point positioning using IGS orbit products”, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26 (6–8), 573–578.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., (2008), “GNSS - Global Navigation Satellite Systems”, Springer Vienna.
- Hugentobler U., Montenbruck O., (2017), “Satellite Orbits and Attitude”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer.



Ji S., Gao Z., Wang W., (2015), “M-DGPS: mobile devices supported differential global positioning system algorithm”, *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (9), 6667–6675.

Johnston G., Riddell A., Hausler G., (2017), “Differential Positioning”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer.

Kahveci M., Yıldız F., (2012), “GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri”, Güncellenmiş 5. Basım, Nobel Yayın Dağıtım.

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

Kee C., Parkinson B. W., (1996), “Wide area differential GPS (WADGPS): future navigation system”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 32 (2), 795–808.

Klobuchar J. A., (1987), “Ionospheric Time-Delay algorithm for single-frequency GPS users”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-23 (3), 325–331.

Klobuchar J. A., (1996), “Ionospheric effects on GPS”, In: B.W. Parkinson, J. J. Spilker Jr., P. Axelrad, P. Enge, Editors, “Global Positioning System: Theory and Applications Volume 1”, American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Kouba J., (2009), “A guide to using international GNSS service (IGS) Products”, 1st Edition, Geodetic Survey Division-Natural Resources Canada.

Krasuski K., Ćwiklak J., (2018), “Application of the DGPS method for the precise positioning of an aircraft in air transport”, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 98 (35), 65–79.

Lichtenegger H., (1998), “DGPS Fundamentals. Reports on Geodesy”, *Warsaw University of Technology*, 11 (41), 7–19.

Misra P., Enge P., (2012), “Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance”, Revised 2nd edition, Ganga-Jamuna Press, USA.

Miura S., Hsu L.-T., Chen F., Kamijo S., (2015), “GPS error correction with pseudorange evaluation using three-dimensional maps”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16 (6), 3104–3115.

Montenbruck O., Schmid R., Mercier F., Steigenberger P., Noll C., Fatkulin R., Kogure S., Ganeshan A. S., (2015b), “GNSS satellite geometry and attitude models”, *Advances in Space Research*, 56 (6), 1015–1029.

Montenbruck O., Steigenberger P., Hauschild A., (2015a), “Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective”, *GPS Solutions*, 19 (2), 321–333.

Niu Z., Nie P., Tao L., Sun J., Zhu B., (2019), “RTK with the assistance of an IMU-based pedestrian navigation algorithm for smartphones”, *Sensors*, 19 (14), 3228.

Odijk D., Wanninger L., (2017), “Differential Positioning”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer.

Ogundipe O., (2013), “The Smart Phone as a Surveying Tool”, [http://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2013/papers/ts03c/TS](http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2013/papers/ts03c/TS).

Øvstedal O., (2002), “Absolute positioning with single-frequency GPS receivers”, *GPS Solutions*, 5 (4), 33–44.

Park B., Kim J., Kee C., Cleveland A., Parsons M., Wolfe D., Kalafus R., (2006), “RRC unnecessary for DGPS messages”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42 (3), 1149–1160.

Park B., Lee J., Kim Y., Yun H., Kee C., (2013), “DGPS enhancement to GPS NMEA output data: DGPS by correction projection to position-domain”, *Journal of Navigation*, 66 (2), 249–264.

Parker T. E., Matsakis D., (2004), “Time and frequency dissemination: Advances in GPS transfer techniques”, *GPS World*, 15 (11), 32–38.

Parkinson B. W., Enge P. K., (1996), “Differential GPS”, In: J. J. Spilker Jr., P. Axelrad, B. W. Parkinson, P. Enge, Editors, “Global Positioning System: Theory and Applications”, Volume II, American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Plag H.-P., Pearlman M., (2009), “Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020”, Springer.

Rho H., Langley R. B., (2007), “Dual-frequency GPS precise point positioning with WADGPS corrections”, *Navigation*, 54 (2), 139–152.

Rife J., (2012), “Collaborative vision-integrated pseudorange error removal: team-estimated differential GNSS corrections with no stationary reference receiver”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13 (1), 15–24.

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

Schaer S., Gurtner W., Feltens J., (1998). “IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1”, *Proceedings of the IGS AC Workshop*.

Subirana J. S., Zornoza J. J., Hernández-Pajares M., (2013), “GNSS Data Processing, Vol. I: Fundamentals and Algorithms (ESA TM-23/1)”, European Space Agency.

Teunissen P. J. G., Kleusberg A., (1996), “GPS Observation Equations and Positioning Concepts”. In: P. J. G. Teunissen, A. Kleusberg, Editors, “GPS for Geodesy”, Springer.

U-blox 8, (2020), u-blox M8 Receiver Description Manuel (R19), Thalwil, Switzerland.

Vu A., Ramanandan A., Chen A., Farrell J. A., Barth M., (2012), “Real-time computer vision/DGPS-aided inertial navigation system for lane-level vehicle navigation”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 13 (2), 899–913.

Web 1, (2021), <https://www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf>, (Erişim Tarihi: 07/05/2021).

Web 2, (2021), <https://www.gpsworld.com/google-to-provide-raw-gnss-measurements>, (Erişim Tarihi: 07/05/2021).

Web 3, (2021), <https://www.gpsworld.com/ndgps-loses-interior-keeps-coast>, (Erişim Tarihi: 14/05/2021).

Web 4, (2021), <https://nmea.org>, (Erişim Tarihi: 25/04/2021).

Web 5, (2021), <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/360036364391-IGS-Terms-of-Reference-v-07-2019>, (Erişim Tarihi: 15/05/2021).

Web 6, (2021), <https://www.igs.org/products/>, (Erişim Tarihi: 16/05/2021).

Weber G., Dettmering D., Gebhard H., (2005), “Networked transport of RTCM via internet protocol (NTRIP)”, In: F. Sansò, “A Window on the Future of Geodesy. International Association of Geodesy”, Springer.

Weng D., Gan X., Chen W., Ji S., Lu Y., (2020), “A new DGNSS positioning infrastructure for android smartphones”, Sensors, 20 (2), 487.

Weng D., Ji S., Chen W., Li Z., Xu Y., Ye L., (2015), “Assessing and mitigating the effects of the ionospheric variability on DGPS”, GPS Solutions, 19 (1), 107–116.

Wienia R.J., (2008), “Use of Global Ionospheric Maps for Precise Point Positioning”, MSc Thesis, Delft University of Technology.

Wu Q., Sun M., Zhou C., Zhang P., (2019), “Precise point positioning using dual-frequency GNSS observations on smartphone”, Sensors, 19 (9), 2189.

Wu X., Hu X., Wang G., Zhong H., Tang C., (2013), “Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning”, Advances in Space Research, 51 (6), 959–968.

Wuebbena G., Bagge A., Seeber G., Boeder V., Hankemeier P., (1996), “Reducing distance dependent errors for real-time precise DGPS applications by establishing reference station networks”, Proceedings of ION GPS, 2, 1845–1852.

Yoon D., Kee C., Seo J., Park B., (2016), “Position accuracy improvement by implementing the DGNSS-CP algorithm in smartphones”, Sensors, 16 (6), 910.

Yuan Y., Huo X., Ou J., Zhang K., Chai Y., Wen D., Grenfell R., (2008), “Refining the Klobuchar ionospheric coefficients based on GPS observations”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 44 (4), 1498–1510.

Zhu S. Y., Massmann F.-H., Yu Y., Reigber C., (2003), “Satellite antenna phase center offsets and scale errors in GPS solutions”, Journal of Geodesy, 76(11–12), 668–672.

