

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GNSS ALICILARI İLE AKILLI MOBİL CİHAZLARIN KONUM
BELİRLEME PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

BARIŞCAN ARI

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

DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ HÜSEYİN PEHLİVAN

TEMMUZ 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GNSS ALICILARI İLE AKILLI MOBİL CİHAZLARIN
KONUM BELİRLEME PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ

BARIŞCAN ARI

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

DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ HÜSEYİN PEHLİVAN

TEMMUZ 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF EDUCATION

**INVESTIGATION OF THE POSITIONING
PERFORMANCE OF SMART MOBILE DEVICES WITH
GNSS RECEIVERS**

BARIŞCAN ARI

MASTER'S THESIS
DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
GEODESY AND GEOGRAPHICAL INFORMATION
TECHNOLOGIES PROGRAM

ADVISOR: ASSIST. PROF. HÜSEYİN PEHLİVAN

JULY 2025

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 03/02/2025 tarih ve 2025/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 29/05/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Barışcan ARI'nın tez çalışması Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin PEHLİVAN

ÜYE

: Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT

ÜYE

: Doç. Dr. Ercenk ATA

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

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

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Günümüzde akıllı mobil cihaz teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, konuma dayalı uygulamaların doğruluk ve hassasiyetini artırmaya yönelik önemli yenilikleri beraberinde getirmektedir. Özellikle 2016 yılından itibaren, Android tabanlı akıllı mobil cihazlarda ham GNSS (Global Navigation Satellite System) verilerine erişim sağlanması, düşük maliyetli, sürekli ve anlık konum belirlemeye yönelik yeni sistemlerin ve uygulamaların gelişimini teşvik etmiş ve konumlandırma doğruluğu ile hassasiyetini artırmaya yönelik gelişmeler hız kazanmıştır. Akıllı mobil cihazların GNSS konumlandırma performanslarının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, CHC I80 ve NovAtel GPS 702 antenine bağlı Trimble MB-2 OEM GNSS alıcıları ile GNSS gözlem verilerini çift frekanslı olarak toplayabilen Xiaomi 11T Pro serisi (128 ve 256) Gigabyte (GB) android akıllı mobil cihazlar kullanılmıştır. Gebze Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölüm binasının çatısına kurulan ölçüm düzeneğiyle gerçekleştirilen GNSS oturumları kapsamında, tüm cihazlardan eşzamanlı olarak statik veri toplanmıştır. Verilerin değerlendirilmesi sürecinde, beş farklı analiz merkezinin sağladığı yörünge ve saat düzeltme ürünleri kullanılmıştır. Ayrıca, RTKLIB yazılımı üzerinden Estimate TEC ve Iono-Free LC iyonosfer düzeltme parametreleri, Hassas Nokta Konumlandırma (Precise Point Positioning, PPP) ve Fix-Hold tamsayı belirsizlik çözüm (Ambiguity Resolution, AR) yöntemleri kullanılarak sonradan değerlendirme (Post Process, PP) işlemleriyle statik ve PPP-Statik çözümleri uygulanmıştır. Analiz sürecinde, ölçümlerin yapıldığı noktaların koordinatları hassas GNSS alıcılarıyla belirlenmiş ve bu koordinat değerleri referans alınarak, farklı cihazlardan elde edilen konum verileri çok kriterli çözümlerle kapsamlı biçimde karşılaştırılmıştır. Bu sayede, akıllı mobil cihazların konumlandırma performansı farklı değerlendirme senaryolarında ortaya konmuştur. Değerlendirmeler, Test-1, Test-2 ve Test-3 konumlarında yaklaşık 60 dakikalık ölçümlerle gerçekleştirilen statik GNSS gözlemleri üzerinden yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, akıllı mobil cihazların yüksek hassasiyetli GNSS alıcılarına kıyasla sınırlı bir konumlandırma performansı sunduğunu, ancak gelişen donanım, yazılım ve sinyal işleme teknikleri sayesinde metre altı seviyesinde konumlandırma doğruluğunun elde edilebildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Mobil Cihazlar, Düşük Maliyetli GNSS, Statik, PPP.

SUMMARY

Today, the rapid developments in smart mobile device technologies are bringing with them important innovations aimed at increasing the accuracy and sensitivity of location-based applications. Especially since 2016, the provision of access to raw GNSS (Global Navigation Satellite System) data on Android-based smart mobile devices has encouraged the development of new systems and applications for low-cost, continuous, and instant location determination, and developments aimed at increasing positioning accuracy and sensitivity have gained momentum. In this thesis study, carried out to evaluate the GNSS positioning performance of smart mobile devices, Xiaomi 11T Pro series (128 and 256) Gigabyte (GB) Android smart mobile devices that can collect GNSS observation data with dual frequency with Trimble MB-2 OEM GNSS receivers connected to the CHC I80 and NovAtel GPS 702 antenna were used. Within the scope of the GNSS sessions carried out with the measuring setup installed on the roof of the Department of Map Engineering building of Gebze Technical University, static data were collected simultaneously from all devices. During the evaluation process of the data, trajectory and time correction products provided by five different analysis centers were used. In addition, static and PPP-static solutions were applied by post-process (PP) operations using estimate dec and iono-free LC ionosphere correction parameters, precise point positioning (PPP), and fix-hold integer uncertainty resolution (AR) methods via RTKLIB software. During the analysis process, the coordinates of the points where measurements were made were determined with sensitive GNSS receivers, and by reference to these coordinate values, the location data obtained from different devices were compared comprehensively with multi-criteria solutions. In this way, the positioning performance of smart mobile devices has been demonstrated in different evaluation scenarios. The evaluations were made on the basis of static GNSS observations performed with approximately 60-minute measurements at Test-1, Test-2, and Test-3 locations. The results obtained show that smart mobile devices offer a limited positioning performance compared to high-precision GNSS receivers, but positioning accuracy at the sub-meter level can be achieved thanks to developing hardware, software, and signal processing techniques.

Keywords: Smartphone, Low-cost GNSS, Static, PPP.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince ve tez çalışmam kapsamında bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yol gösteren, desteğini ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Pehlivan’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca bilgi ve tecrübelerini biz öğrencilerle paylaşarak akademik gelişimimize katkıda bulunan kıymetli hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Özellikle, hayatım boyunca her daim yanımda olup sevgileri ve destekleriyle bana güç veren aileme ve varlığıyla bana ilham kaynağı olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili kız arkadaşşıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, “2024-A-105-15” proje kodu ve “Android Akıllı Telefonlardan GNSS Gözlemlerinin Konum Belirleme Doğruluğunun İncelenmesi” adlı Gebze Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmektedir.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLOLAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ	11
2.1. Küresel Konumlama Sistemi (GPS)	12
2.2. GPS Uydularının Yörünge Özellikleri	13
2.2.1. Modernizasyon Öncesi Sinyal Yapısı	14
2.2.2. Modernizasyon Sonrası Sinyal Yapısı	15
2.3. Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)	16
2.4. Galileo Uydu Konumlandırma Sistemi	18
2.5. BeiDou (Compass) Uydu Konumlandırma Sistemi	22
2.6. Quasi-Zenith Uydu Sistemi (QZSS)	25
3. GNSS BÖLÜMLERİ	29
3.1. GNSS Yapısı	30
3.2. GNSS Referans Çerçevesi	31
3.3. GNSS Gözlemleri	31
3.3.1. Tez Kapsamında Kullanılan GNSS Gözlem Cihazları	32
3.4. GNSS Veri İşleme Yazılımları	36
3.4.1. Bilimsel, Ticari ve Açık Kaynak Kodlu Veri İşleme Yazılımları	36
3.4.2. Web Tabanlı Online Veri İşleme Yazılımları	37
3.5. RTKLIB Veri İşleme Yazılımı	38
4. GNSS KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ	41
4.1. Kod Pseudorange (Sözde Menzil) Gözlemleri	42
4.2. Faz Pseudorange Gözlemleri	44
4.3. Mutlak Konum Belirleme Yöntemi	46
4.4. Bağıl Konum Belirleme Yöntemi	47
5. HASSAS NOKTA KONUMLANDIRMA (PPP)	49
5.1. PPP Yönteminin Matematiksel Modeli	51
5.2. GNSS ile Konum Belirlemede Hata Kaynakları	54
5.2.1. İyonosferik ve Troposferik Etki	55
5.2.2. Sinyal Yansıma (Multipath) Etkisi	58
5.2.3. Uydu Yörünge Hataları	59
5.2.4. Uydu ve Alıcı Saati Hataları	60
5.2.5. Uydu Geometrisi	61
5.2.6. Anten Faz Merkezi Hatası	61
5.2.7. Taşıyıcı Dalga Faz Belirsizliği ve Faz Kesiklikleri	62
6. SONRADAN DEĞERLENDİRME (PP) PPP	64
6.1. Uluslararası GNSS Servisi (IGS)	64
7. UYGULAMA	68

7.1. GNSS Ölçüm Düzenineğinin Tasarımı	68
7.2. Ölçüm Planı ve GNSS Verilerinin Toplanması	69
7.3. Statik Konum Belirleme Yöntemiyle Referans Noktaların Koordinatlarının Belirlenmesi	73
7.4. Düzeltme Ürünlerinin İndirilmesi ve RTKLIB Parametre Ayarları	86
7.5. Koordinat Dönüşümü ve CAD Ortamına Aktarılması	91
7.6. GNSS Gözlem Verilerinin Hata Analizleri	91
7.7. Analiz Merkezlerinin PP-PPP-Statik Değerlendirmeleri	92
7.7.1. C1 Gözlem Verilerinin CODE Ürünleriyle Analizleri	92
7.7.1.1. Iono-Free-LC ile PPP-AR Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları	93
7.7.1.2. Iono-Free-LC ile FIX-HOLD Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları	95
7.7.1.3. Estimate TEC ile PPP-AR Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları	96
7.7.1.4. Estimate TEC ile FIX-HOLD Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları	98
7.7.2. C1 Gözlem Verilerinin GFZ Ürünleriyle Analizleri	101
7.7.3. C1 Gözlem Verilerinin GRG Ürünleriyle Analizleri	104
7.7.4. C1 Gözlem Verilerinin IGS Ürünleriyle Analizleri	109
7.7.5. C1 Gözlem Verilerinin JAX Ürünleriyle Analizleri	113
7.8. Ölçüm Cihazlarına Ait Verilerin PPP Statik Analizleri	119
7.8.1. Test-1 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi	119
7.8.2. Test-2 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi	124
7.8.3. Test-3 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi	129
7.9. Ölçüm Cihazlarına Ait Verilerin Statik Analizleri	135
7.9.1. Test-1 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi	135
7.9.2. Test-2 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi	141
7.9.3. Test-3 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi	146
8. SONUÇLAR	152
KAYNAKLAR	156
ÖZGEÇMİŞ	164
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	165
EKLER	166

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	: Işık hızı
t^R	: Alıcı tarafından sinyalin alındığı zaman
t^S	: Uydu tarafından sinyalin gönderildiği zaman
r	: Uydu ile alıcı arasındaki gerçek mesafe
Δt	: Uydu ve alıcı arasındaki zaman farkı
δ^S	: Uydu saatindeki sapmalar
δ^R	: Alıcı saatindeki sapmalar
Δ_{iono}	: İyonosferik gecikme
Δ_{trop}	: Troposferik gecikme
Δ_{sol}	: Katı gelgit kaynaklı deformasyonlar
Δ_{pol}	: Kutup hareketleri kaynaklı yer değiştirmeler
Δ_{ocn}	: Okyanus yüklemesi kaynaklı deformasyon
Δ_{atm}	: Atmosferik basınca bağlı yüzey yüklenme etkisi
Δ_{mul}	: Multipath etkisi
Δ_{pcv}	: Uydu ve alıcı antenlerine ait faz merkezi konum farklılıkları
Δ_{pol}	: Kutup hareketleri kaynaklı düzeltme
Δ_{sol}	: Katı yeryüzü gelgit hareketleri kaynaklı düzeltme
ε	: Rastgele hata terimi
ε_ρ	: Rastgele ve modellenemeyen kod gözlem hataları
ε_Φ	: Rastgele ve modellenemeyen faz gözlem hataları
Φ	: Taşıyıcı faz gözlemi
N	: Başlangıç tam sayı faz belirsizliği
λ	: Taşıyıcı sinyalin dalga boyu
w	: Faz sarması etkisi
P_i	: GNSS pseudorange gözlemi
Φ_i	: GNSS taşıyıcı faz gözlemi
i	: Frekans indeksi
ρ'	: Uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafesi
dt^r	: Alıcı saat hatası
dt^s	: Uydu saat hatası
v	: Rölatiflik etkileri
$b_{P_i}^r, b_{P_i}^s$	: Alıcı ve uydu pseudorange gecikmeleri
$b_{\Phi_i}^r, b_{\Phi_i}^s$	: Alıcı ve uydu faz gecikmeleri
PCV_i^s	: Uydu Anten Faz Merkezi Değişimi
APC_i^r	: Alıcı Anten Faz Merkezi Düzeltmesi
P_{if}, Φ_{if}	: İyonosferden arındırılmış pseudorange ve taşıyıcı faz gözlemleri
f_1, f_2	: L1 ve L2 GNSS taşıyıcı sinyalinin başlangıç frekansları
P_1, P_2, Φ_1, Φ_2	: f_1 ve f_2 frekanslarında alınan kod ve taşıyıcı faz ölçümleri
M_p, M_Φ	: Kod ve faz gözlemlerindeki modelleme hataları
λ_{if}, N_{if}	: İyonosferden arındırılmış dalga boyu ve faz belirsizliği
N_1, N_2	: λ_1 ve λ_2 dalga boylarındaki faz belirsizlikleri
a_0	: Saat hatası
a_1	: Saat kayması

a_2	: Frekans kayması
t_T	: Uydudan sinyalin çıktığı an
t_0	: Referans zamanı
Δt_r	: Rölativistik etkilerden kaynaklanan düzeltme
3G	: 3. Nesil Mobil İletişim Teknolojisi
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
API	: Application Programming Interface
AR	: Ambiguity Resolution
A-GPS	: Assisted GPS
ATX	: Anten kalibrasyon dosyası formatı
BC	: Broadcast
BDS	: BeiDou Navigation Satellite System
B1, B1A, B1B, B1C, B1-2	: BeiDou sisteminde kullanılan sinyal bantları
B2, B2a, B2b	: BeiDou sisteminde yüksek doğruluklu konumlama için kullanılan frekans bantları
B3, B3A	: BeiDou sisteminde iyonosferik düzeltmeler için kullanılan sinyal bantları
BLQ	: BLQ formatında yeryuvarı gelgit dosyası
C1, C2, C3	: CHC I80 GNSS alıcısının ölçüm planındaki kurulum noktaları
C11, C12, C21, C22, C51, C52	: Cihazlarla gerçekleştirilen GNSS ölçüm noktaları
C/A	: Coarse/Acquisition
C/N ₀	: Carrier-to-Noise Ratio
CAD	: Computer Aided Design
CAS	: Chinese Academy of Sciences
CDDIS	: Crustal Dynamics Data Information System
CDGNSS	: Carrier-Phase Differential GNSS
CDMA	: Code Division Multiple Access
CLK3	: GNSS Uydu Saat Düzeltme Dosyası Formatı
CMR	: Düzeltme Veri Formatı
CODE	: Center for Orbit Determination in Europe
CORS	: Continuously Operating Reference Stations
COSPAS- SARSAT	: Uzay Tabanlı Arama ve Kurtarma Sistemi
CS	: Commercial Service
CUI	: Character User Interface
dE, dN, dU	: Doğu, kuzey ve düşey yönündeki hata bileşenleri
DCB	: Differential Code Bias
DGPS	: Diferansiyel GPS
DHF-2	: Yer sabit yörüngeli iletişim uydusu
DOP	: Dilution of Precision
E1, E5, E6	: Galileo sisteminde kullanılan ana frekans bantları
E1A, E1B	: E1 bandında veri (A) ve pilot (B) sinyalleri
E5a, E5b	: E5 bandının alt bileşenleri
E6A, E6B, E6C	: E6 bandındaki farklı sinyal taşıyıcı bileşenleri
ECEF	: Earth-Centered, Earth-Fixed

EM	: Estimate TEC
EOP	: Earth Orientation Parameters
ESA	: European Space Agency
EU	: European Union
FDMA	: Frequency-Division Multiple Access
FIN	: Final düzeltme ürünleri
FOC	: Full Operational Capability
GB	: Gigabyte
GEO	: Geostationary Earth Orbit
GFZ	: Geo Forschungs Zentrum Potsdam
GIM	: Global Ionosphere Map
GIOVE	: Galileo In-Orbit Validation Element
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPRS	: General Packet Radio Service
GPS	: Global Positioning System
GRG	: Space Geodesy Team of CNES/CLS
GUI	: Graphical User Interface
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
HEO	: High Earth Orbit
I, Q	: Faz içi (in-phase) ve kuadrafaz sinyal bileşenleri
IF	: İyonosferden Arındırılmış Lineer Kombinasyon
IGS	: International GNSS Service
IGSO	: Inclined Geosynchronous Orbit
IOC	: Initial Operational Capability
INX	: İyonosfer düzeltme verisi
IONEX	: Ionosphere Exchange Format
IOV	: In-Orbit Validation
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
JAX	: Japan Aerospace Agency
KOH	: Karesel Ortalama Hata
L1, L2, L5	: Taşıyıcı Sinyaller
L1C/A, L1/C, L2C	: GPS ile uyumlu standart GNSS taşıyıcı sinyalleri
L1-SAIF	: Submeter-class Augmentation with Integrity Function
L bandı	: GNSS uydularının sinyal gönderdiği mikrodalga frekans aralığı
LBS	: Location-Based Service
LC	: Linear Combination
LEX	: L-Band Experiment
LTE	: Long-Term Evolution
LS	: Least Squares
MGEX	: The Multi-GNSS Experiment
MEO	: Medium Earth Orbit
MHz	: Megahertz
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
NRTK	: Network Real-Time Kinematics
NTRIP	: Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OEM	: Original Equipment Manufacturer

OEM1,	
OEM2,	: OEM GNSS alıcısının ölçüm planındaki kurulum noktaları
OEM3	
OPSFİN	: Opsiyonel final düzeltme ürünleri
P	: Precise code
PNT	: Positioning, Navigation and Timing
P(Y)	: Askeri GPS kodu
POS	: RTKLIB konum çıktısı dosya uzantısı (.pos)
PPK	: Post-Processed Kinematik
PP	: Post Process
PPP	: Precise Point Positioning
PPP-AR	: Tamsayı Belirsizlik Çözümlemeli Hassas Nokta Konumlandırma
RT-PPP	: Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlandırma
PRN	: Pseudo Random Noise
PVT	: Position, Velocity, Time
RAP	: Rapid veri tipi
RINEX	: Receiver Independent Exchange Format
RTCM	: The Radio Technical Commission for Maritime Services
RTKLIB	: Real-Time Kinematic Library
RDSS	: Radio Determination Satellite Service
RNSS	: Radio Navigation Satellite Service
RT	: Real Time
RTK	: Real-Time Kinematic
RTS	: Real Time Service
SA	: Selective Availability
SAR	: Search and Rescue
SBAS	: Satellite-Based Augmentation System
SP3	: Uydu Yörünge Dosyası Formatı
STD	: Standart sapma
SNR	: Signal-to-Noise Ratio
SPP	: Single Point Positioning
T1	: Xiaomi 11T Pro 128 GB
T2	: Xiaomi 11T Pro 256 GB
T11, T12,	
T13, T21,	: T1 ve T2 akıllı mobil cihazların ölçüm planındaki kurulum noktaları
T22, T23	
TEC	: Total electron content
UHS	: Ultra High Frequency
ULT	: Ultra-Rapid veri tipi
UTM	: Universal Transverse Mercator
ZTD	: Zenit yönlü troposferik gecikme
QZO	: Quasi-Zenith Satellite Orbit
QZSS	: Quasi-Zenith Satellite System
WGS84	: World Geodetic System-1984
Wi-Fi	: Wireless Fidelity

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: GNSS uydu takımyıldızları.	11
Şekil 2.2: GPS takımyıldızı [Fouda, 2004].	13
Şekil 2.3: GPS yörünge düzlemleri [Web 3].	14
Şekil 2.4: GPS sinyallerinin güç spektral yoğunlukları [Hofmann-Wellenhof vd., 2007].	15
Şekil 2.5: GLONASS takımyıldızı [Web 4].	16
Şekil 2.6: GLONASS sinyallerinin yapısı [Hofmann-Wellenhof vd., 2007].	17
Şekil 2.7: Galileo takımyıldızı [Web 4].	19
Şekil 2.8: Galileo yörünge düzlemleri [Web 7].	20
Şekil 2.9: Galileo sinyallerinin güç spektral yoğunlukları [Hofmann-Wellenhof vd., 2007].	21
Şekil 2.10: BeiDou takımyıldızı [Web 4].	23
Şekil 2.11: GNSS frekans sinyalleri [Web 15].	24
Şekil 2.12: QZSS takımyıldızı [Web 4].	26
Şekil 2.13: QZSS uydu sisteminin yer küre üzerindeki izdüşümü [Xie vd., 2019].	27
Şekil 3.1: GNSS segmenti [Karaim vd., 2018].	29
Şekil 3.2: Uygulama kapsamında kullanılan cihazlar.	33
Şekil 3.3: RTKLIB arayüzü [Web 14].	39
Şekil 4.1: GNSS konum belirleme için gerekli minimum uydu gereksinimi.	41
Şekil 4.2: Geometrik uzaklık ölçülerinin zamanla ilişkisi [Abdallah M., 2016].	44
Şekil 4.3: Uydu tabanlı konum belirleme yöntemleri [Kahveci vd., 2011].	46
Şekil 5.1: GNSS hata kaynakları.	54
Şekil 5.2: Atmosferin Katmanları.	56
Şekil 5.3: Direkt ve multipath sinyaller [Karaim vd., 2018].	59
Şekil 6.1: IGS bünyesindeki küresel GNSS izleme istasyonları (Web 11)	67
Şekil 7.1: GNSS gözlemleri için hazırlanan ölçüm düzeneği.	69
Şekil 7.2: GNSS ölçüm düzeneğine ait plan.	70
Şekil 7.3: Ölçüm planında kullanılan referans noktalar: (a) Çatı üzerinde belirlenen noktalara kurulan CHC alıcıları, (b) Koordinatı kesin olarak bilinen pilye üzerine kurulum.	71
Şekil 7.4: Ölçüm düzeneğinin planı: (a) ve (b) 1. noktanın, (c) ve (d) 2. noktanın, (e) ve (f) 3. noktanın kurulum yerlerini ve düzenini göstermektedir.	72
Şekil 7.5: Referans noktalara ait ham verilerin RTKLIB yazılımındaki statik çözüm sonuçlarının CAD gösterimi.	74
Şekil 7.6: C11 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.	76
Şekil 7.7: C12 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.	77
Şekil 7.8: C21 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.	79
Şekil 7.9: C22 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.	80
Şekil 7.10: C51 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.	82

Şekil 7.11: C52 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.	83
Şekil 7.12: Referans noktalara ait koordinatlar kullanılarak oluşturulan ölçüm planı.	86
Şekil 7.13: GNSS veri indirme otomasyonu	87
Şekil 7.14: C1 cihazına ait ölçüm verilerinin CODE ürünleriyle Iono-Free-LC ve PPP-AR parametreleri kullanılarak yapılan analiz grafikleri: (a) Yatay yöndeki hatalar ve (b) Zaman serisi.	94
Şekil 7.15: C1 cihazına ait ölçüm verilerinin CODE ürünleriyle Iono-Free-LC ve FIX-HOLD parametreleri kullanılarak yapılan analiz grafikleri: (a) Yatay yöndeki hatalar ve (b) Zaman serisi.	96
Şekil 7.16: C1 cihazına ait ölçüm verilerinin CODE ürünleriyle Estimate TEC ve PPP-AR parametreleri kullanılarak yapılan analiz grafikleri: (a) Yatay yöndeki hatalar ve (b) Zaman serisi.	97
Şekil 7.17: C1 cihazına ait ölçüm verilerinin CODE ürünleriyle Estimate TEC ve Fix-Hold parametreleri kullanılarak yapılan analiz grafikleri: (a) Yatay yöndeki hatalar ve (b) Zaman serisi.	99
Şekil 7.18: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait CODE analiz sonuçlarının CAD gösterimi.	100
Şekil 7.19: GFZ ürünleri ve iyonosfer düzeltme parametreleri ile tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin zaman serisi grafiği.	103
Şekil 7.20: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait GFZ analiz sonuçlarının CAD gösterimi.	104
Şekil 7.21: GRG ürünleri ve iyonosfer düzeltme parametreleri ile tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin zaman serisi grafiği.	107
Şekil 7.22: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait GRG analiz sonuçlarının CAD gösterimi.	108
Şekil 7.23: IGS ürünleri ve iyonosfer düzeltme parametreleri ile tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin zaman serisi grafiği.	111
Şekil 7.24: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait IGS analiz sonuçlarının CAD gösterimi.	112
Şekil 7.25: JAX ürünleri ve iyonosfer düzeltme parametreleri ile tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin zaman serisi grafiği.	115
Şekil 7.26: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait JAX analiz sonuçlarının CAD gösterimi.	116
Şekil 7.27: Test-1 konumundaki C1, OEM, T1 ve T2 cihazlarına ait gözlem verilerinin ve gerçek konumlarının yatay düzlemde gösterimi.	121
Şekil 7.28: OEM1 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	121
Şekil 7.29: T11 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	122
Şekil 7.30: T21 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	123
Şekil 7.31: Test-2 konumundaki C2, OEM, T1 ve T2 cihazlarına ait gözlem verilerinin ve gerçek konumlarının yatay düzlemde gösterimi.	125
Şekil 7.32: C2 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	126
Şekil 7.33: OEM2 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	127
Şekil 7.34: T12 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	128
Şekil 7.35: T22 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	129

Şekil 7.36: Test-3 konumundaki C3, OEM3, T1 ve T2 cihazlarına ait gözlem verilerinin ve gerçek konumlarının yatay düzlemde gösterimi.	131
Şekil 7.37: C3 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	131
Şekil 7.38: OEM3 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	132
Şekil 7.39: T13 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	133
Şekil 7.40: T23 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.	134
Şekil 7.41: Test-1 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin statik çözümleri.	137
Şekil 7.42: C1 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	138
Şekil 7.43: OEM1 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	139
Şekil 7.44: T11 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	140
Şekil 7.45: T21 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	140
Şekil 7.46: Test-2 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin statik çözümleri.	142
Şekil 7.47: C2 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	143
Şekil 7.48: OEM2 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	144
Şekil 7.49: T12 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	145
Şekil 7.50: T22 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	146
Şekil 7.51: Test-3 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin statik çözümleri.	147
Şekil 7.52: C3 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	148
Şekil 7.53: OEM3 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	149
Şekil 7.54: T13 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	150
Şekil 7.55: T23 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.	151

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: Xiaomi 11T Pro (128 ve 256 GB) mobil cihazlarının teknik özellikleri	33
Tablo 3.2: CHC I80 GNSS alıcısının teknik özellikleri.	34
Tablo 3.3: Trimble MB-2 OEM GNSS alıcısının teknik özellikleri.	35
Tablo 3.4: GPS-702-GG-HV Anteninin teknik özellikleri	35
Tablo 3.5: Bilimsel, ticari ve açık kaynak kodlu veri işleme yazılımları.	37
Tablo 3.6: Web tabanlı online veri işleme yazılımları.	38
Tablo 3.7: RTKLIB yazılımına ait modüller [Web 14].	40
Tablo 6.1: IGS bünyesindeki farklı analiz merkezleri Web 11.	66
Tablo 7.1: Referans noktalarının 2023.5 epöğündaki koordinatları.	84
Tablo 7.2: Test-1-2-3 köşelerinde kurulan ölçüm düzeneğinin üzerinde bulunan cihazların koordinatları.	85
Tablo 7.3: Analiz merkezleri ait ürünler	88
Tablo 7.4: RTKLIB’de gerçekleştirilen PP-PPP statik analizi için parametre ayarları.	89
Tablo 7.5: CODE ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.	93
Tablo 7.6: GFZ ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.	101
Tablo 7.7: GRG ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.	105
Tablo 7.8: IGS ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.	109
Tablo 7.9: JAX ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.	113
Tablo 7.10: C1 noktasındaki CHC gözlem verilerinin CODE, GFZ, GRG, IGS ve JAX analiz merkezlerine ait en doğru konumlandırma performansı sağlayan çözümler.	118
Tablo 7.11: Test-1 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile PPP-Statik değerlendirmeleri sonucunda elde edilen hata analizleri.	120
Tablo 7.12: Test-2 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile PPP-Statik değerlendirmeleri sonucunda elde edilen hata analizleri.	125
Tablo 7.13: Test-3 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile PPP-Statik değerlendirmeleri sonucunda elde edilen hata analizleri	130
Tablo 7.14: Test-1 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile statik çözümleri sonucunda elde edilen hata analizleri	136
Tablo 7.15: Test-2 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile statik çözümleri sonucunda elde edilen hata analizleri	142
Tablo 7.16: Test-3 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile statik çözümleri sonucunda elde edilen hata analizleri	147

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızla geliştiği 21. yüzyılda mobil cihazlar (Akıllı telefonlar, tabletler, akıllı saatler, dijital gözlükler, artırılmış gerçeklik cihazları, araç içi bilgi ekranları, airtagler vb.) yalnızca birer iletişim aracı olmaktan çıkmış, gelişerek hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Başlangıçta temel iletişim işlevine sahip olarak kullanılan mobil cihazlar, işletim sistemlerinin gelişmesi, internete erişimin kolaylaşması, entegre sensör sayılarının ve hassasiyetlerinin artması, birçok uygulamada kullanılan konumlama ve navigasyon işlemleri için hızlı çözümler sunması ve kullanım kolaylığı sağlaması ile akıllı mobil cihazlara dönüşerek insanların günlük yaşamlarında birçok alanda kullanılabilir hale gelmiştir. Özellikle, konum belirleme ve navigasyon teknolojilerindeki gelişmeler, akıllı mobil cihazların Konum Tabanlı Hizmetler (Location- Based Service, LBS) kapsamında çeşitli uygulamalara entegre edilmesine olanak sağlamış ve bu hizmetler mobil teknolojilerde en yaygın olarak kullanılan hizmet türü haline gelmiştir.

LBS, araştırmacılar tarafından farklı şekillerde tanımlanmaktadır. LBS'yi kısaca tanımlamak gerekirse, Küresel Konum Belirleme Sistemine (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) sahip cihazların sunmuş olduğu konumsal verilerden yararlanılarak, kullanıcılara çeşitli konumsal hizmetler sunan teknolojik servisleri ifade etmektedir. Bu hizmetler, Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System, GPS) aracılığıyla kullanıcının fiziksel konumunu belirlemektedir **[Jiang ve Yao, 2006], [Raper vd., 2007], [Brimicombe ve Li, 2009]**. İlk olarak Amerika Birleşik Devleti (ABD) tarafından 1970'li yıllarda geliştirilen GPS teknolojisinin 1980'li yılların sonlarına doğru askeri amaçlı kullanımın dışında sınırlı olarak sivil amaçlı kullanıma açılması, LBS'lerin geliştirilmesine imkân sunmuştur. LBS'ye olan ilgi, 1990'larda Küresel Mobil İletişim Sisteminde (Global System for Mobile Communications, GSM) ikinci nesil hücresel sistemlere geçilmesiyle başlamıştır **[Langley, 2000], [Adams vd., 2003], [Wang vd., 2008]**. 2000'li yılların başlarında ABD tarafından Seçici Erişim (Selective Availability, SA) özelliği devre dışı bırakılarak sivil kullanıma tamamen açılmasının ardından, mobil cihazlara entegre edilen GPS teknolojisi, LBS'lerin gelişiminde bir kilometre taşı olarak kabul edilmiştir **[Casademont vd., 2004], [Jiang ve Yao, 2006]**.

Clarke [2001], masaüstü sistemlerden mobil cihazlara geçerek masaüstü sistemlerin kısıtlamalarından kurtulmanın, LBS alanında önemli gelişmelere yol açacağını belirtmiştir. GPS teknolojisinin gelişmesi konumsal doğruluğu arttırmış, bunun yanı sıra alıcıların daha küçük, daha hafif, daha hızlı ve daha ucuz hale gelmesi GPS'in mobil cihazlara entegrasyonunu mümkün hale getirmiştir **[Langley, 2000]**. Mobil cihazların ve GPS teknolojisinin gelişmesiyle birlikte grafik uygulamalarının önü açılmıştır. Bu nedenle mobil cihazlarda kullanılacak LBS için konumsal verilerin güncel, doğru, hassas ve kolay elde edilebilir olmasının önemi artmıştır **[Casademon vd., 2004]**.

GPS alıcılarının mobil cihazlara entegre edilmesi, Amerika'da acil durum hizmeti sunan E911 biriminin gereksinimleri doğrultusunda geliştirilmeye başlamıştır **[Langley, 2000]**, **[Banville ve Van Diggelen, 2016]**. 2005 yılına gelindiğinde Google tarafından geliştirilen Google Maps'in tanıtılması LBS için önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu gelişme sonucunda akıllı mobil cihazlar ile harita tabanlı konum bulma ve navigasyon işlemi Google tarafından geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşmaya başlamıştır. Google Maps'in popülerleşmesi LBS'lerin yaygınlaşması ve geliştirilmesi sürecinde önemli bir itici güç olmuştur **[Raper vd., 2007]**, **[Brimicombe ve Li, 2009]**.

Mobil cihazlarla konum belirleme işlemi, GNSS, kablosuz bağlantı (Wireless Fidelity, Wi-Fi) veya hücrel üçgenleme olmak üzere üç yöntemden biri veya hepsi kullanılarak sağlanır. Bunun yanı sıra akıllı mobil cihazlardaki diğer sensörler (ivmeölçer, jiroskop, barometre ve manyetometre) de konumlandırma sistemi için kullanılmaktadır **[Zandbergen, 2009]**, **[Farid vd., 2013]**, **[European GNSS Agency, 2017]**.

Li vd., [2006] ile **Casademont vd., [2004]**, mobil cihazlardaki ağ tabanlı konumlandırma hizmetlerinden olan Kablosuz Yerel Alan Ağı (Wireless Local Area Network), Kablosuz Geniş Alan Ağları (Wireless Wide Area Networks), Küresel Mobil İletişim Sistemi/Genel Paket Radyo Hizmeti (GSM/GPRS) ve Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) gibi kablosuz veri iletim formatlarını inceleyerek konum belirleme işlemi için kullanılan mevcut teknolojileri ve gelişmeleri sunmaktadır. Benzer şekilde **Pontikakos vd., [2005]**, mobil cihazlardaki iletişim teknolojilerinin ve mobil konumlandırma sistemlerindeki işleyişin yanında LBS mimarisinin genel yapısını araştırmacılara sunmaktadır.

Başlangıçta LBS için konum belirleme işlemleri ağ teknolojileri üzerinden yapılmaktadır. Ağ teknolojileri LBS için tasarlanmamış olsa da 3. Nesil Mobil İletişim Teknolojisi (3G) veri hizmetlerinin geniş çapta kabul görmesi, LBS'nin tanınmasına ve gelişmesine yardımcı olmuştur [Wang vd., 2008, May]. Zamanla akıllı mobil cihazların ve GPS teknolojisinin gelişmesiyle en doğru ve güvenilir konum verisi birçok mobil cihazda var olan GNSS çipi ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Akıllı mobil cihazlarda bulunan GNSS dışındaki diğer sensörler, GNSS sinyallerinin kesintiye uğraması halinde navigasyon ve konum belirleme doğruluğu hücrel üçgenleme ve Wi-Fi izi ile artırılmaktadır [Masiero vd., 2014].

Mobil cihaz teknolojisinin dokunmatik ekran, güçlü işlemci ve gelişmiş sensör teknolojileriyle donatılması sonucunda, mobil cihazlar akıllı mobil cihazlara dönüşmüş ve LBS'ler kişisel kullanım açısından daha erişilebilir hale gelmiştir [Raper vd., 2007]. Akıllı mobil cihazların kullanıcılar tarafından günlük yaşantıda aktif olarak kullanılması LBS'lerin popülerliğini daha da arttırmış ve bu teknolojinin günlük rutinlerde kullanımı yaygın bir şekilde benimsenmesine zemin hazırlamıştır. Günümüz akıllı teknolojilerinde kullanılan chip setlerin gelişerek işlemlerimize hızlı dönüş yapması ve bu teknolojinin her geçen gün daha da küçültülerek kompakt bir hale gelmesi, akıllı mobil cihazlardaki LBS uygulamalarında kullanılan gerçek zamanlı konumlandırma işlemlerinde de kullanılmasına imkân sunmuştur. Konumlandırma, navigasyon ve zamanlama (Positioning, Navigation and Timing, PNT) işlemlerini gerçekleştiren akıllı cihazlar için düşük maliyetli GNSS chip setlerinin geliştirilmesi bir devrime yol açmış ve bunun sonucunda GNSS teknolojisi daha geniş bir kullanıcı kitlesine erişir hale gelmiştir [Banville ve Van Diggelen, 2016], [Dabove ve Di Pietra, 2019].

Raper vd., [2007] tarafından yapılan araştırma raporunda, LBS teknolojisine ait son gelişmeler üzerine çeşitli araştırma ve geliştirme zorluklarına, verilerin kullanımı ve gizliliği konusunda oluşabilecek potansiyel istismlara ve GPS teknolojisinin kentsel ortamlardaki konumlandırma doğruluğunun iyileştirilmesini vurgulamaktadır. Bu gelişmelerin üzerine Wang vd., [2008, May], farklı konumlandırma teknolojilerini incelemiş ve bir karşılaştırma yapmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda GPS teknolojisinin 5-30 metre aralığında doğruluk ile diğer konumlandırma teknolojilerine kıyasla daha iyi doğruluk sunduğu görülmektedir.

Pesyna vd., [2014] araştırmalarında, akıllı telefon kalitesinde bir GNSS alıcısı ve anteninden sağlanan gözlem verilerine dayanarak taşıyıcı faz (carrier-phase) konumlandırma işlemini gerçekleştirerek santimetre düzeyinde konumlandırmanın mümkün olabileceğini savunmaktadır. Santimetre düzeyinde konumlandırma için bir yazılım geliştirilmiştir. GNSS alıcısı ve yazılım aracılığı ile işlenerek çıkan taşıyıcı faz ölçümlerine dayalı bir taşıyıcı faz diferansiyel GNSS (Carrier-Phase Differential GNSS, CDGNSS) çözümü hesaplanarak santimetre düzeyinde konumlandırma yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Akıllı cihazlara entegre sensörlerin kalitesi ve doğruluğu, başarılı bir konumlandırma doğruluğu ve hassasiyeti için kritik öneme sahiptir. Cihazlara gömülü olarak gelen GNSS sensörleri, farklı doğruluklarda PNT hizmeti sağlamaktadır. 1999 yılında akıllı mobil cihazlarda PNT uygulamaları için GPS sensörleri eklenmiştir. Android akıllı mobil cihazlarda yerleşik olan tek frekanslı GNSS chip seti ve mobil cihaz anteninden alınan GNSS ham ölçümlerine erişimin sağlanabilmesi için Google 2016 yılında Android Sürüm N (Nougat, Android 7.0) Uygulama Programlama Arayüzünü (Application Programming Interface, API) piyasaya sürdü. Bundan önce, GNSS yonga setine tamamen erişim sağlanamıyor ve yalnızca Konum, Hız, Zaman (PVT), yükseklik ve azimut gibi sınırlı uydu bilgilerine erişim sağlanıyordu. Bu teknolojik gelişim ile GPS, Glonass, Galileo, BeiDou, Quasi-Zenith Uydu Sistemi (QZSS) ve Uydu Tabanlı Artımlı Sistemlerinden (Satellite-Based Augmentation System, SBAS) alınan ham GNSS gözlem verilerine Google tarafından erişim sağlanarak daha hassas konumlandırma işlemleri gerçekleştirmeye başlamıştır **[Banville ve Van Diggelen, 2016], [Aggrey vd., 2019]**.

Akıllı mobil cihazlardaki ham GNSS verileri olan pseudorange (sözde kod), carrier phase (taşıyıcı faz), doppler, yörünge bilgileri, saat verileri, SNR bilgisi, gecikmeleri ve hataları içeren ham GNSS verilerine erişim imkânı sunan bu karar ile akıllı mobil cihazlarda metre altı konumlandırmalar için çalışmalar başlamıştır. Ham GNSS ölçümlerine erişim sağlanması, işlem sonrası (Post Process, PP) ve Gerçek Zamanlı Konumlandırma (Real Time Kinematic, RTK) doğruluğunu ve hassasiyetini arttırmaya yönelik gelişmeler hız kazanmıştır. Bu sayede, çoklu GNSS çözümlerinin optimize edilebilmesine ve uyduların performanslarına göre analiz edilip filtrelenebilmesine olanak sağlamaktadır **[European GNSS Agency, 2017], [Liu vd., 2019], [Wu vd., 2019]**.

Google tarafından akıllı mobil cihazlarda ham GNSS gözlem verilerine erişim sağlanmasının ardından ilk olarak **Banville ve Diggelen [2016]**, ham GNSS gözlemlerinin kalitesi üzerine araştırma yapmıştır. Samsung Galaxy S7 akıllı cihazında GNSS hizmeti sağlayan Broadcom 4774 model çip seti yardımı ile GPS, Glonass, Galileo, BeiDou ve QZSS uydularına ait L1 frekansında pseudocode, carrier phase, multipath (çoklu yol) ve Doppler gözlemlerini elde etmiştir. Bu verilerden yalnızca GPS gözlemlerini kullanarak Samsung Galaxy S7 akıllı cihazının GNSS veri kalitesi değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda, pseudorange verilerinin gürültülü olmasının metre düzeyinde konumlandırma sağladığı görülmüştür. Akıllı mobil cihaz içerisinde bulunan GNSS anten kalitesinin ve sinyal sıçramalarının konumlandırma doğruluğu ve hassasiyeti üzerinde temel sorun olduğu ve bunun yanı sıra metre alı düzeyde doğruluk için pil tasarrufuna neden olan GNSS görev döngüsünün dikkate alınarak değerlendirmelerin yapılmasını vurgulamıştır.

Akıllı mobil cihazlarda baskılı devre kartı (Printed Circuit Board) üzerine mikro şerit şeklinde inşa edilen düşük maliyetli düzlemsel ters-F anteni (Planar Inverted-F Antenna) kullanılmaktadır. Bu antenler L1 frekans bandındaki herhangi bir uydu dağılımı için uygundur. Ayrıca akıllı mobil cihazın tasarımı nedeniyle antenin konumu kısıtlanabilmektedir. Bu durum, akıllı mobil cihazın kullanımı sırasında GNSS sinyallerinin alınmasını engelleyebilmekte ve optimum olmayan PVT çözümü ile sonuçlanabilmektedir. Bu farkın değerlendirilebilmesi için aracın çatısına ve gösterge panelinin üzerine yerleştirilen akıllı mobil cihazlar ile kentsel bir ortamda altı saatlik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerin neticesinde çatıya yerleştirilen cihazın PVT çözümü, gösterge paneline yerleştirilen cihazdan daha iyi performans göstermiştir. Bu durumun nedeni olarak, araç yapısının sinyalleri engellemesinden ve alınan sinyallerin multipath etkilere maruz kalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [**European GNSS Agency, 2017**].

Akıllı teknolojilerin gelişmesi kullanıcı sayısını ve kullanım oranlarını her geçen gün arttırmaktadır. Dünya genelinde 5 milyardan fazla cihaz GNSS alıcılarını kullanmaktadır. Akıllı telefonlar, GNSS alıcılarının en yaygın kullanıldığı cihazlardan biridir ve bunların %80'i LBS'lere altlık oluşturmak için tasarlanmıştır. Google Play ve Apple mağazalarındaki uygulamaların %50'den fazlasının konum verilerini altlık olarak kullanması, kullanıcıların günlük yaşamlarında LBS'lere olan talebinin arttığını göstermektedir [**European GNSS Agency, 2017**], [**Robustelli vd., 2019**].

Çip üreticisi olan Broadcom Şirketi 2017 yılında, akıllı mobil cihazların konumlandırma ve navigasyon işlemleri için önemli bir adımı temsil ederek ilk çift frekanslı GNSS yonga seti olan BCM47755'i piyasaya sürmüştür. Bunun üzerine akıllı mobil cihaz üreticilerinden olan Xiaomi, akıllı mobil cihazlarda GNSS tabanlı hassas konum belirleme üzerine yoğunlaşmıştır. Mayıs 2018'de Broadcom BCM47755 model çipinin gömülü olduğu GPS L1/L5, Galileo E1/E5a sinyallerini kaydedebilen ilk çift frekanslı GNSS sensörüne sahip akıllı mobil cihaz olan Xiaomi Mi8'i üreterek piyasaya sürmüştür **[Robustelli vd., 2019]**. Önceki yıllarda, çoğu akıllı mobil cihazın içinde bulunan GNSS yonga setleri yalnızca tek frekansla (L1 bandı) gözlemler sağlamaktaydı. Ancak tek frekanslı gözlemlerde, ikili veya üçlü farklar yaklaşımını uygulamak veya farklı gözlemleri birleştirmek mümkün değildi. Çift frekanslı cihazların üretilmesi sonucunda bu işlemlerin yapılması mümkün hale gelmiştir. Bu sayede metre altı düzeyde doğrulukla konum belirlenebilmeye başlanmıştır. Akıllı mobil cihazların bu derece hassas konumlandırma imkânı sunabilmesi, mühendislik çalışmalarında GNSS konumlandırma hizmeti için kullanılan yüksek maliyetli jeodezik alıcılar yerine, çok düşük maliyetli akıllı cihazların kullanılabilirliği hakkında düşünceleri ortaya çıkarmış ve araştırmalar hız kazanmıştır **[Zhang vd., 2018]**, **[Chen vd., 2019]**, **[Karadeniz vd., 2023]**.

GNSS teknolojisindeki ilerlemeler ve akıllı mobil cihazlardaki konumsal veri hassasiyetinin artmasıyla birlikte düşük maliyetli, hızlı, sürekli ve anlık konum belirlemeye imkân sunan cihazlara ve uygulamalara talep artmıştır. Başlangıçta genel navigasyon amaçlı olarak kullanılan LBS'ler araştırmaların ilerlemesi, hassasiyetin ve doğruluğun artmasıyla navigasyon uygulamaları, ulaşım sistemleri, hassas tarım, acil durum ve sağlık hizmetleri, araç takip sistemleri, güvenlik uygulamaları ve taşımacılık hizmetleri gibi birçok alanda kullanılabilir duruma gelmiştir **[Huang vd., 2018]**, **[Zangenehnejad ve Gao, 2021]**.

GNSS teknolojisinin akıllı mobil cihazlardaki gelişimi, halihazırda kullanılan uygulamalar ile bu uygulamalar dışında da daha hassas konumlandırma yapabileceği görülmüştür **[Robustelli vd., 2019]**. Ancak kentsel alanlarda binaların arasında, ağaçların altında, sinyal yoğunluğunun fazla olduğu ve birbirine karıştığı kalabalık ortamlarda uydu sinyallerinin takip edilemeyecek kadar zayıf duruma düşmesi ve bunun sonucunda akıllı mobil cihazların konumlandırma performansının etkilendiği görülmüştür. Bunun üzerine akıllı mobil cihazlardaki GNSS teknolojisinin

konumlandırma doğruluğunun, hassasiyetinin ve performansının geliştirilmesi üzerine detaylı araştırmalar söz konusu olmaya başlamıştır **[Zangenehjad ve Gao, 2021]**, **[Pehlivan vd., 2023]**.

Konumsal veri toplama ihtiyacı bilimsel araştırmaların yanı sıra, kamusal hizmetlere istatistik oluşturma, çevre, sağlık, turizm, ticaret, spor faaliyetleri gibi birçok alanda vazgeçilmez bir öneme sahiptir **[Babaoğlu vd., 2021]**, **[Tatar vd., 2024]**. Bununla birlikte zamana bağlı konum verisi toplamak geleneksel olarak pahalı ve zaman alıcı olmakla birlikte gelişen yeni sensör teknolojileri ile daha ucuz ve hızlı bir hale gelmiştir **[Onyıl ve Ulukavak, 2021]**. Bunlardan en yaygını olan akıllı mobil cihazlar gün geçtikçe artan uygulama alanları ile veri toplama ve kullanma alışkanlıklarını değiştirmiştir. Ancak konum verilerinin toplanması için akıllı mobil cihaz teknolojisi henüz yüksek doğruluklara ulaşmamıştır. Mobil uygulama geliştiricileri, kullanılan akıllı mobil cihazların konum belirleme performanslarına bakmaksızın, problem çözüm odaklı yeni uygulamalar geliştirmeye devam etmektedir. Buna rağmen, akıllı cihaz teknolojisindeki artış ve mevcut faydalı uygulamaların çeşitliliği, kullanıcıları geleneksel sistemler yerine akıllı mobil cihazları kullanmaya yönlendirmektedir **[Masiero vd., 2014]**, **[Lazović vd., 2015]**, **[Humphreys vd., 2016]**, **[Baboğlu vd., 2021]**.

Dabove ve Di Pietra [2019a], Sürekli Çalışan Referans İstasyonları (Continuously Operating Reference Stations, CORS) ağı dikkate alınarak gerçekleştirdikleri ölçümlerde, düşük maliyetli ve tek frekanslı U-Blox EVK-M8T alıcısıyla tek frekanslı Samsung Galaxy S8+ ve Huawei P10 Plus akıllı telefonlarından elde edilen GPS ve GPS/GLONASS gözlem verilerini kullanmıştır. Bu veriler ile Ağ Gerçek Zamanlı Kinematik (Network Real-Time Kinematics, NRTK) konumlandırmanın doğruluğunu ve hassasiyetini değerlendirmiştir. Değerlendirmeler neticesinde, hızlı statik ölçümlerin, faz belirsizliği düzeltilmesi uygulanmadan desimetre düzeyinde doğruluk elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Akıllı mobil cihazlarla NRTK konumlandırma işleminin yapılması hassasiyet açısından iyi bir performans gösterse de doğruluk açısından yetersiz olduğu görülmüştür. Bu yetersizliğin ana sorunlarının başında, akıllı mobil cihazların GNSS gözlemlerinin kalitesini, doğruluğunu ve hassasiyetini etkileyen küçük boyutlu ve düşük maliyetli doğrusal polarize antenler ve bu antenlerin mobil cihaz içerisindeki konumunun bilinmemesi; düşük maliyetli ve gücü düşük

GNSS yonga setlerinin kullanılması olarak belirtilmiştir [Li ve Geng, 2019], [Liu vd., 2019].

Dabove ve Di Pietra [2019b], Xiaomi tarafından çift frekanslı akıllı mobil cihazların çıkarılmasından sonra gerçekleştirdikleri araştırmada, Xiaomi Mi8 akıllı mobil cihazının RTK konumlandırma performansını değerlendirmiştir. Xiaomi Mi8 ile gerçekleştirdikleri ölçümlerde cm düzeyinde hassasiyet ve metre altı düzeyde 3B doğruluk elde edilmiştir. Ancak, akıllı mobil cihazlarda bulunan mevcut yazılım ile taşıyıcı faz belirsizliklerinin çözümü giderilemediği için RTK konumlandırmanın fix (sabit) çözüm sağlamadığı görülmüştür. Ayrıca, akıllı mobil cihaz bileşenleri, pil ömründen tasarruf etmek amacıyla görev döngüsüne sahiptir. Bu durum, periyodik olarak kapanıp açılarak gerçekleşmektedir ve bu da taşıyıcı fazın süreksizliğine ve yüksek hassasiyetli konumlandırma işlemlerinde zorluklara yol açabilmektedir [Zhang vd., 2018], [Netthonglang vd., 2019]. Liu vd., [2019], düşük güç tüketimini sürdürmek için görev döngüsünün GNSS gözlemleri üzerindeki etkisini ilk kez ayrıntılı olarak analiz etmiştir. Bu analiz için farklı akıllı telefonlar ile statik ve kinematik ölçümler yapılarak görev döngüsünün açık ve kapalı olması durumundaki gözlemler değerlendirilmiştir.

Wu vd., [2019], Xiaomi tarafından çıkarılan dünyanın ilk çift frekanslı akıllı cihazı Mi8'i, Gerçek Zamanlı Kinematik Kütüphanesi (Real-Time Kinematic Library, RTKLIB) ve GAMP yazılımlarını kullanarak hassas nokta konumlandırma (Precise Point Positioning, PPP) yöntemiyle statik ve kinematik olarak değerlendirmiştir. Xiaomi Mi8'in statik PPP performansı tek frekanslı jeodezik alıcıya yakın olduğu, kinematik PPP de ise 3-5 metreye yakın fark olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Robustelli vd., [2019], Xiaomi Mi8 akıllı mobil cihazının konum belirleme performansını Topcon GRS-1 jeodezik alıcı ve Topcon PG-A1 anteni kullanarak düşük ve yüksek multipath etkisine sahip ortamlarda değerlendirmiştir. Xiaomi Mi8 ile toplanan verilerin, Topcon GRS-1 jeodezik alıcısına göre daha düşük taşıyıcı gürültü oranına (Carrier-to-Noise Ratio, C/N0) sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır. Xiaomi Mi8 GNSS ölçümleri ile düşük multipath etkisine sahip ortamlarda 1,02 m, yüksek multipath etkisine sahip ortamlarda 1,95 m doğruluğa ulaşıldığını ifade etmiştir.

Aggrey vd., [2019], jeodezik alıcı sayısını ikiye, akıllı mobil cihaz sayısını dörde çıkartarak çoklu GNSS PPP performanslarını değerlendirmiştir. SwiftNav Piksi ve

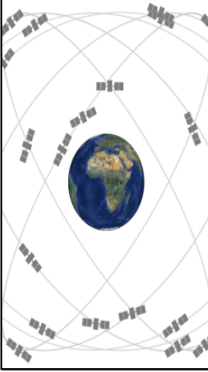
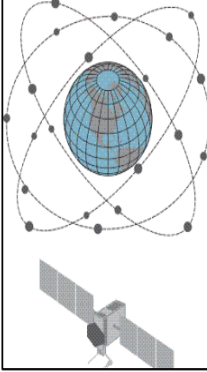
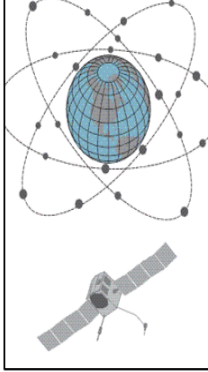
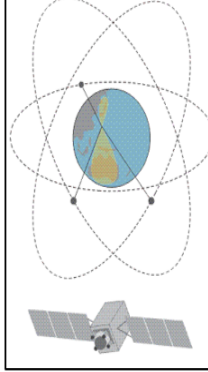
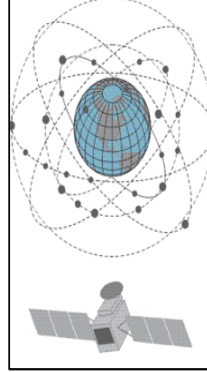
Topcon NET-G3A jeodezik alıcıları ile Huawei Mate 20, Samsung Galaxy S9, Google Pixel 3 ve Xiaomi Mi8 akıllı cihazları kullanmıştır. Alıcılarla statik olarak 6 saat gözlem yapmıştır. Kinematik ölçümler için SwiftNav Piksi alıcısı aracın üzerine, akıllı mobil cihazları ise aracın içinde ön kısma kurmuştur. Kinematik ölçümleri önceden belirlemiş olduğu güzergâh üzerinde gerçekleştirmiştir. Değerlendirmeler sonucunda akıllı mobil cihazların multipath etkisinin daha yüksek ve C/NO değerinin daha düşük olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca çift frekanslı akıllı mobil cihazlarda statik modda desimetre, kinematik modda birkaç metre mertebesinde doğruluk elde etmiştir.

Güncel literatür incelendiğinde, GNSS ve akıllı mobil cihaz teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmelerin, akıllı telefonların konum belirleme performansına yönelik araştırmalara olan ilgiyi kayda değer şekilde artırdığı görülmektedir. Özellikle, Android işletim sistemine sahip mobil cihazlarda ham GNSS verilerine erişim imkânının sunulması, bu cihazların konumlandırma doğruluğu ve hassasiyetinin artırılması yönündeki çalışmaları hızlandırmıştır. Literatürde yer alan araştırmalarda, farklı yıllarda piyasaya sürülen ve marka-model açısından çeşitlilik gösteren akıllı cihazların konum doğruluğu ve hassasiyetinde anlamlı farklılıklar olduğu saptanmıştır. Bu farklılıklar; GNSS alıcılarında gerçekleştirilen donanımsal ve yazılımsal iyileştirmeler, çift frekans desteği, gelişmiş sinyal işleme teknikleri ve entegre analiz yöntemlerinin geliştirilmesiyle yakından ilişkilidir. Literatürdeki çalışmalarda, güncel akıllı mobil cihazlardan elde edilen ham GNSS gözlemlerinin statik ve kinematik modlarda değerlendirilmesi amacıyla RTK, PP-PPP ve RT-PPP gibi farklı konumlandırma yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, farklı analiz tekniklerinin bir arada uygulanması ile konumlandırma doğruluğunun artırılması yönünde çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bununla birlikte, literatür incelendiğinde; farklı analiz merkezlerine ait düzeltme ürünlerinin kullanıldığı, çeşitli iyonosfer düzeltme parametrelerinin ve farklı tamsayı belirsizlik çözüm yöntemlerinin uygulandığı, ayrıca farklı GNSS alıcıları ile akıllı mobil cihazların doğrudan karşılaştırıldığı kapsamlı çalışmaların oldukça sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu tez çalışması ise, literatürdeki bu boşlukları gidermeyi hedeflemekte; farklı GNSS alıcılarının ve güncel akıllı mobil cihazların konumlandırma doğruluklarını çok kriterli analizlerle karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Bu amaçla, beş farklı analiz merkezine ait düzeltme ürünleri kullanılarak, açık kaynak kodlu RTKLIB yazılımı ile iki farklı iyonosfer düzeltme parametresi ve iki ayrı tamsayı belirsizlik çözüm

yöntemiyle kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde, en iyi konumlandırma performansının sağlanabilmesi için öncelikle CHC I80 GNSS alıcısına ait gözlem verileri üzerinde PP-PPP yöntemiyle değerlendirmeler yapılmış ve analiz merkezleri, iyonosfer düzeltme parametreleri ile tamsayı belirsizlik çözüm yöntemleri arasından en yüksek doğruluğu sunan parametreler belirlenmiştir. Ardından, elde edilen bu en iyi parametre kombinasyonu kullanılarak, diğer gözlem noktalarına ve cihazlara ait verilerin çözümlemeleri hem statik hem de PP-PPP-Statik yöntemleriyle gerçekleştirilmiş, böylece iki yöntemin karşılaştırmalı değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen bulguların, akıllı mobil cihazların GNSS konumlandırma performansının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacağı ve gelecekteki çalışmalar için önemli bir kaynak teşkil edeceği düşünülmektedir.

2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ

Günümüzde uydu teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler, konum belirleme sistemlerinin çeşitliliğini ve etkinliğini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) temelinde geliştirilen yöntemler hem teknolojik hem de uygulama açısından geniş bir yelpazede kendine yer bulmuştur. Teknolojinin bu denli hızlı gelişmesi, uydu sistemlerinin kullanım alanlarını da çeşitlendirmiştir; navigasyon, haritacılık, tarım, savunma ve acil durum yönetimi gibi pek çok sektörde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Uydu tabanlı konum belirleme sistemleri, teknolojik gelişim sürecini sürdürmeye devam etmekte ve uzayda aktif olan uydu sayısındaki artışla birlikte kapsamını her geçen gün genişletmektedir. Şu anda dünya genelinde tam kapasiteyle işlev gören dört farklı küresel uydu sistemi mevcut olup, bu sistemler yeryüzüne kesintisiz sinyal sağlayarak kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır. Bunun yanı sıra, bölgesel ölçekte faaliyet gösteren sistemler de kendi belirledikleri coğrafi sınırlar dahilinde GNSS alıcılarına sinyal iletimi gerçekleştirmektedir. Küresel sistemler, tüm dünya yüzeyini kapsayan sinyal yayılımıyla evrensel bir erişim sunarken; bölgesel sistemler, daha spesifik alanlarda yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlamayı hedeflemektedir. Bu bölümde, **Şekil 2.1**'de gösterilen küresel ve bölgesel uydu tabanlı konum belirleme sistemleri ele alınacaktır.

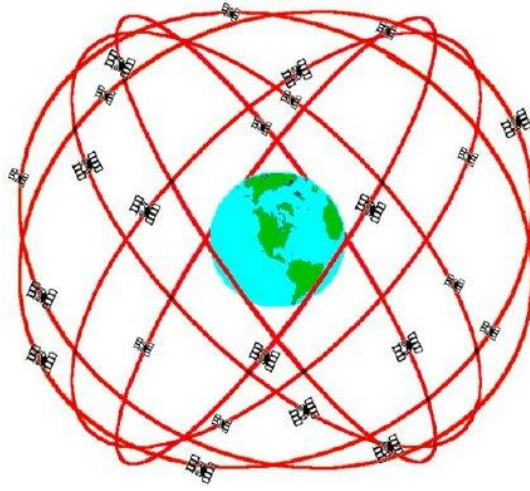
				
GPS	GLONASS	GALİLEO	BEİDOU	QZSS
Yörünge Düzlemi: 6	Yörünge Düzlemi: 3	Yörünge Düzlemi: 3	Yörünge Düzlemi: 6	Yörünge Düzlemi: 3
Uydu Sayısı: 24 + yedek	Uydu Sayısı: 21 + yedek	Uydu Sayısı: 27+3 yedek	Uydu Sayısı: 44	Uydu Sayısı: 3
Yükseklik Açısı: 55°	Yükseklik Açısı: 64.8°	Yükseklik Açısı: 56°	Yükseklik Açısı: 56°	Yükseklik Açısı: ~40°
Yükseklik: 20.200 km	Yükseklik: 19.100 km	Yükseklik: 23.222 km	Yükseklik: 23.222 km	Yükseklik: ~32 - 40 km

Şekil 2.1: GNSS uydu takımı yıldızları.

2.1. Küresel Konumlama Sistemi (GPS)

GPS, kullanıcılara konumlandırma, navigasyon ve zamanlama PNT hizmetleri sunan ABD'ye ait bir sistem olarak, Soğuk Savaş döneminin teknolojik rekabetinden doğmuş ve günümüzde vazgeçilmez bir teknoloji haline gelmiştir. Bu sistemin temelleri, İkinci Dünya Savaşı sonrasında süper güç konumuna yükselen ABD ile Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği (SSCB) arasında 1950'lerde başlayan uzay yarışına dayanır. Rekabet, 4 Ekim 1957'de SSCB'nin ilk yapay uydu Sputnik-1'i uzaya fırlatmasıyla hız kazanmış, bir ay sonra Sputnik-2'nin fırlatılmasıyla devam etmiş; ABD ise bu hamlelere 31 Ocak 1958'de Explorer-1 uydusuyla yanıt vermiştir. Bu erken dönem uydular, uydu teknolojilerinin gelişiminde bir dönüm noktası oluşturarak zamanla GPS gibi ileri sistemlerin ortaya çıkmasının yolunu açmıştır. Bu süreç hem teknolojik yeniliklerin hem de stratejik üstünlük arayışının bir yansıması olarak tarihe geçmiştir [Logsdon, 1995], [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Çolak, 2019], [Web 2].

GPS'in geliştirilme süreci, resmi olarak 1973 yılında ABD Savunma Bakanlığı tarafından onaylanan "Navstar GPS" programı ile başlamıştır. İlk deneysel uydu olan NavStar-1, 22 Şubat 1978'de uzaya fırlatılarak sistemin uzay bölümünün temelini oluşturmuş; tam operasyonel kapasiteye ise 1990'larda ulaşılmıştır. 1994 yılında, **Şekil 2.2**'de gösterildiği gibi, 6 yörünge düzlemine yerleştirilen 24 uydu ile küresel çapta hizmet verebilecek duruma gelen sistem, Tam Operasyonel Yetkinlik (Full Operational Capability, FOC) statüsüne ulaşmıştır. GPS başlangıçta tamamen askeri amaçlar için tasarlanmış ve ABD ordusu tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Sistemin ilk testleri 1978'den itibaren askeri operasyonlarda gerçekleştirilmiştir. Ancak, 1983'te Sovyetler Birliği'nin rotasından sapan Kore Hava Yolları'na ait bir yolcu uçağını düşürmesi, navigasyon teknolojilerinin sivil alandaki kritik önemini ortaya koymuş; bu olay üzerine ABD Başkanı Ronald Reagan, GPS'in kamu kullanıma açılacağını duyurmuştur [Parkinson, 1994], [Logsdon, 1995], [Resch ve Romirer-Maierhofer, 2005], [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Web 2].



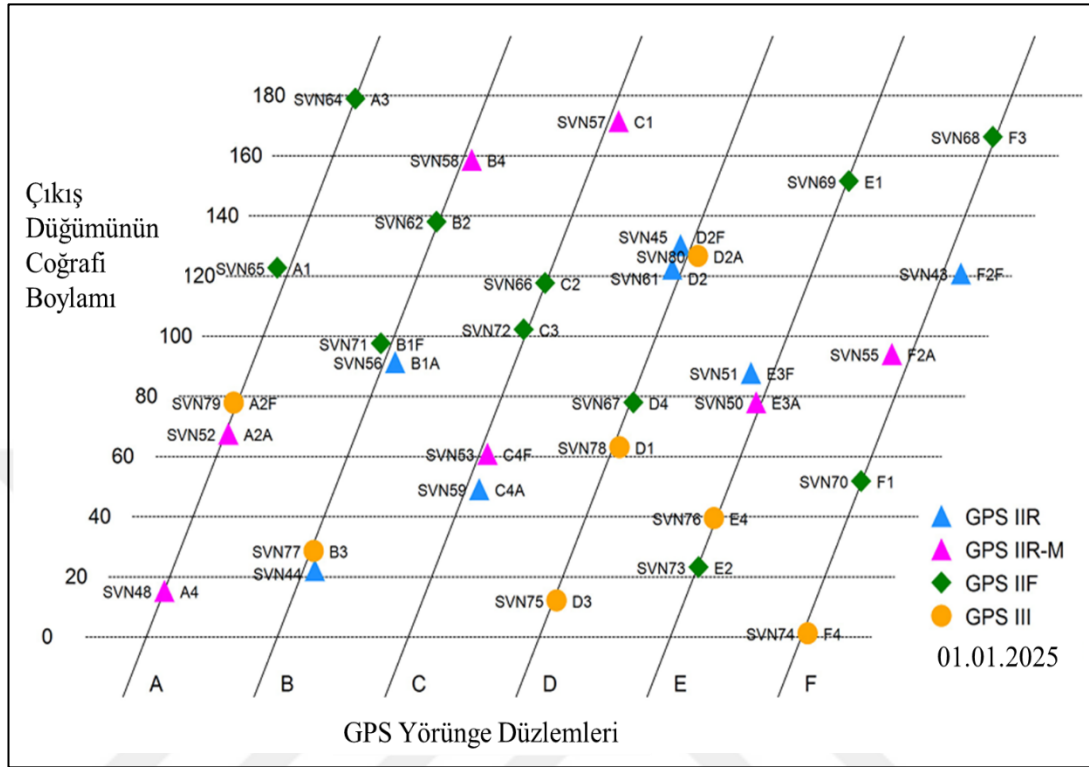
Şekil 2.2: GPS takımyıldızı [Fouda, 2004].

Sivil kullanım, 1980'lerin sonlarında sınırlı bir şekilde başlamış olsa bile, başlangıçta SA politikası nedeniyle sinyal doğruluğu kasıtlı olarak düşürülmüş ve sivil kullanıcılar için yaklaşık 100 metrelik bir hata payı bırakılmıştır. Sistemin tam anlamıyla sivil erişime açılması ise 1 Mayıs 2000'de gerçekleşmiş; Başkan Bill Clinton'ın emriyle SA kaldırılarak sinyal doğruluğu artırılmış ve hata payı 10-20 metreye düşürülmüştür. Böylelikle GPS, navigasyondan tarıma, savunmadan acil durum yönetimine kadar geniş bir yelpazede sivil kullanımın temel bir aracı haline gelmiştir. Bu gelişim süreci, Soğuk Savaş'ın teknolojik rekabetinden başlayarak günümüze uzanan bir evrimi yansıtırken, GPS'in hem askeri hem de sivil alandaki rolü, modern uydu tabanlı sistemlerin stratejik ve toplumsal etkilerini gözler önüne sermektedir [Pace vd., 1995; Çolak, 2019].

2.2. GPS Uydularının Yörünge Özellikleri

GPS uydu takımyıldızı, günümüzde Şekil 2.3'te gösterildiği gibi 31 uydudan oluşmaktadır. Bu uydular, Dünya yüzeyinden yaklaşık 20,200 km yükseklikte, 6 farklı yörünge düzleminde konumlandırılmıştır. Her bir yörünge düzlemi, ekvator düzlemine 55° eğim açısına sahip olup, düzlemler arası açı farkı 60° 'dir. Bu düzenleme, Dünya'nın her bölgesinden aynı anda en az dört uydunun görünür olmasını sağlayarak küresel kapsama alanı oluşturur. Uyduların yörünge periyodu yaklaşık 11 saat 58 dakikadır; bu süre, tam 12 saat olmayarak her bir uydunun günde iki tam tur atmasını ve zamanla farklı konumlardan gözlemlenebilmesini mümkün kılar. Bu yapı, sistemin

etkinliğini ve doğruluk düzeyini optimize eder [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Web 2], [Web 3].

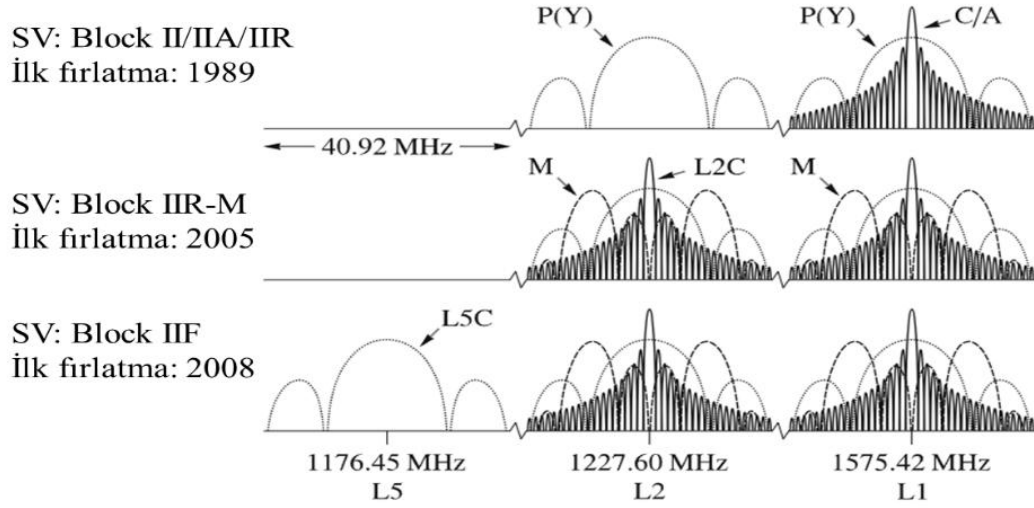


Şekil 2.3: GPS yörünge düzlemleri [Web 3].

2.2.1. Modernizasyon Öncesi Sinyal Yapısı

GPS uyduları, sinyal modernizasyonundan önceki dönemde, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi $f_0=10.23$ Megahertzlik (MHz) ana frekanstan türetilen iki taşıyıcı frekans olan L1 (1575.42 MHz) ve L2 (1227.60 MHz) üzerinden sinyal yayını gerçekleştirmekteydi. L1 sinyali, sivil kullanıcılar için tasarlanmış, binary yani ikili (0,1) yapıda kodlanmış ve sivil kullanıcılar için her milisaniyede tekrarlanan temel GPS (Coarse/Acquisition, CA) kodu (1.023 MHz frekans, 1 mikrosaniye chip uzunluğu, 293.1 metre dalga boyu), askeri kullanım için geliştirilmiş hassas P (Price) kodu (10.23 MHz frekans, 0.1 mikrosaniye chip uzunluğu, 29.31 metre dalga boyu) ve onun şifreli versiyonu Y kodu ile birlikte, 30 saniyede bir yenilenen navigasyon mesajı (uydu saati, almanak ve durum bilgileri) gibi bileşenleri taşıırken; L2 sinyali ise yalnızca askeri amaçlara hizmet edecek şekilde P(Y) kodu ve navigasyon verileriyle modüle edilmiştir. Bu sinyal yapısı, GPS sisteminin hem sivil hem de askeri kullanıcılara yönelik temel

navigasyon ve zamanlama ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Web 4].



Şekil 2.4: GPS sinyallerinin güç spektral yoğunlukları [Hofmann-Wellenhof vd., 2007].

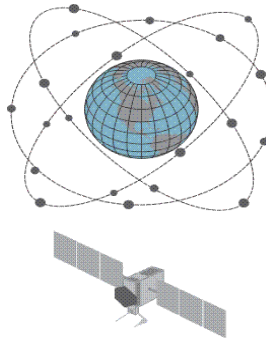
2.2.2. Modernizasyon Sonrası Sinyal Yapısı

GPS sinyal modernizasyonu kapsamında, 21 Eylül 2005'te fırlatılan Blok IIR-M uyduları, sivil kullanım için L1 ve L2 taşıyıcı sinyaller üzerine entegre edilmiş L2C sinyallerini yayınlamaya başlamıştır. Aynı uydular, L1 ve L2 taşıyıcı sinyalleriyle aynı frekans bantlarını paylaşan ancak farklı bir yapıda tasarlanan ve L1 ile L2 sinyalleri üzerinden iletilen askeri amaçlı M kodunu da içermektedir. Blok IIR-M serisinde toplam sekiz uydu bulunmakta olup, ilk uydu 21 Eylül 2005'te, sonuncusu ise 17 Ağustos 2009'da fırlatılmıştır. Bu serinin ardından, 2010 yılında Blok IIF uyduları uzaya gönderilmeye başlanmıştır. Blok IIF uyduları, önceki nesillere kıyasla daha hızlı işlemciler ve artırılmış bellek kapasitesi ile donatılmış olup, Havacılık Radyo Navigasyon Hizmetleri frekansında iletilen ve güç spektral yoğunluğu Şekil 2.4'te gösterilen L5 taşıyıcı sinyalini yayınlamaya başlamıştır. L5 sinyali, 1176,45 MHz frekansında yayın yapan ve hava araçlarının güvenliği gibi kritik uygulamalar için tasarlanmış sivil amaçlı bir sinyaldir. L1 sinyaline göre yaklaşık iki kat daha güçlü olan L5 sinyali, L1 ve L5 sinyalleri arasında eşit güç dağılımı sağlayarak parazit riskini ve multipath etkisini azaltır. Bu sayede daha güvenilir bir konumlandırma hizmeti sunmaktadır [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Web 4].

2.3. Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)

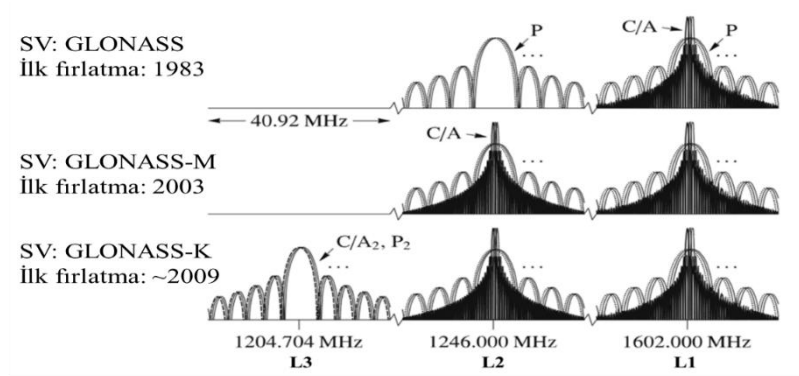
GLONASS, Sovyetler Birliği tarafından 1976 yılında geliştirilmeye başlanan ve GPS'e benzer nitelikte birimlerden oluşan, küresel konum belirleme sistemi olarak tasarlanmıştır. İlk GLONASS uydusu, "Cosmos-1413" adıyla 12 Ekim 1982'de uzaya fırlatılmış olup, sistemi kontrol etmek amacıyla Rusya sınırları içerisinde 8 adet yer istasyonu konuşlandırılmıştır. Sistem, 1993 yılında resmi olarak operasyonel hale getirilmiş ve 1995 yılında, **Şekil 2.5**'te gösterildiği şekilde, yörünge düzlemine yerleştirilen 24 uydudan oluşmaktadır. Başlangıçta askeri amaçlı geliştirilen GLONASS, ilerleyen yıllarda sivil kullanıma da açılmıştır [**Hofmann-Wellenhof vd., 2007**], [**Web 4**], [**Web 5**].

Sovyetler Birliği'nin dağılmasıyla ortaya çıkan ekonomik zorluklar ve birinci nesil GLONASS uydularının yalnızca üç yıl gibi kısa bir ömre sahip olması, sistemin işlevselliğinde ciddi kapasite kayıplarına neden olmuştur. 2001 yılına gelindiğinde, yörüngede faaliyet gösteren sağlıklı uydudan sayısı önemli ölçüde azalarak yediye düşmüş ve bu durum sistemin etkinliğini azaltmıştır [**Polischuk vd., 2002**]. Bu durumun üstesinden gelmek için, 2001 yılında Rusya hükümeti, GLONASS sisteminin FOC statüsüne ulaşması ve modernizasyonu için kapsamlı bir program başlatmıştır. Bu program sonucunda, 2001 ile 2014 yılları arasında geliştirilmiş olan Uran-M uyduları fırlatılarak sistemin işlevselliği ve kapasitesi yeniden artırılmıştır. Bu uydular, geliştirilmiş antenler, 7 yıla kadar uzatılmış ömür, iyileştirilmiş güneş paneli yönlendirmesi, daha kararlı saatler ve daha iyi manevra kabiliyeti gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca, 2004 yılında sivil kullanıcılar için L2 frekansı eklenmiştir [**Hofmann-Wellenhof vd., 2007**].



Şekil 2.5: GLONASS takımıyıldızı [**Web 4**].

Modernize edilen GLONASS sistemi, günümüzde global ölçekte 25 uyduya sahip olup, bu uyduların 22'si tam kapasite ile çalışmaktadır. Sistem, **Şekil 2.5**'te gösterildiği gibi üç yörünge düzlemine yerleştirilmiş olup, yörüngeler arası açılar yaklaşık 110° olacak şekilde tasarlanmıştır. GLONASS uydu takımı yıldı, ekvatora $64,8^\circ$ eğik yörüngede, yaklaşık 19.100 km irtifada ve 11 saat 15 dakika 44 saniyelik yörünge periyoduyla işlem görmektedir. Mevcut GLONASS uyduları, çoğunlukla Uragan-M uydularından oluşmaktadır ve bu uyduların yerini kademeli olarak daha hafif, basınçsız yapıya sahip, 10 yıl hizmet ömrü olan ve üretim maliyeti daha düşük olan GLONASS-K uyduları almıştır. Bu uydular, **Şekil 2.6**'da gösterildiği gibi L bandında L1 ve L2 taşıyıcı sinyallerini kullanmakta ve GPS uydularından farklı olarak her bir uydu için sinyal frekansları belirli adımlarla değişmektedir. Her bir uydu, farklı frekanslarda sinyal iletir; L1 taşıyıcı sinyali 1602,5625 MHz'den başlayarak 1615,5 MHz'e kadar 0,5625 MHz adımlarla, L2 bandı ise 1246,4375 MHz'den başlayarak 1256,5 MHz'e kadar 0,4375 MHz adımlarla artış göstererek değişir. GLONASS-K2 uyduları ise, 2023 yılından itibaren fırlatılmaya başlanmış olup, önceki nesillere kıyasla geliştirilmiş teknik özellikleri ile öne çıkmaktadır. Bu uydular yaklaşık 1645 kg kütleye ve 4370 watt güç kapasitesine ile 10 yıllık kullanım ömrüne sahip olup hem Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access, FDMA) hem de CDMA sinyallerini iletebilmektedir. FDMA sinyal çeşitliliği arasında L1OF, L1SF, L2OF ve L2SF; CDMA sinyalleri arasında ise L1OC, L1SC, L2SC ve L3OC yer almaktadır. Ayrıca, GLONASS-K2 uyduları uzay lazer ölçümü, arama ve kurtarma sistemi (COSPAS-SARSAT) ve uzay ortamı tespit sistemi gibi ek teknolojik donanımlarla donatılarak hem askeri hem de sivil uygulamalar için yüksek performans ve çok yönlülük sağlamaktadır [Web 3], [Web 4].



Şekil 2.6: GLONASS sinyallerinin yapısı [Hofmann-Wellenhof vd., 2007].

2.4. Galileo Uydu Konumlandırma Sistemi

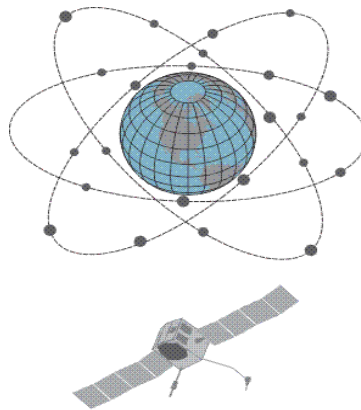
Galileo konumlandırma sistemi, Avrupa Birliği (European Union, EU) ve Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency, ESA) iş birliğiyle, ABD'nin GPS ve Rusya'nın GLONASS sistemlerine alternatif olarak tamamen sivil kullanım amacıyla tasarlanmış ve küresel ölçekte üçüncü navigasyon sistemi olarak konumlandırılmıştır. Proje, 1999 yılında Almanya, İtalya, Fransa ve Birleşik Krallık tarafından sunulan dört önerinin değerlendirilmesiyle temelleri atıldıktan sonra, 26 Mayıs 2003 tarihinde EA ile ESA tarafından sürekli hizmet garantisi sağlanacak şekilde resmen kabul edilmiştir. Galileo'nun geliştirilmesiyle, Avrupa'nın bağımsız bir uydu navigasyon sistemi oluşturması ve teknolojik özerkliğini artırması hedeflenmiştir [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Pırtı vd., 2021], [Web 6].

Sistem, 2005 yılında GIOVE-A test uydusunun, 2008 yılında ise GIOVE-B test uydusunun fırlatılmasıyla temel bileşenlerinin ve kritik teknolojilerinin doğrulanması amacıyla ilk adımlarını atmış, 2011 yılında operasyonel uyduların yörüngeye yerleştirilmesiyle genel işlevselliğinde önemli bir ilerleme kaydetmiştir. GIOVE-A uydusu, 2005 yılının aralık ayında Baykonur Uzay Üssü'nden fırlatılarak Galileo sinyallerini ileten ilk uydu olma özelliğini taşımaktadır; GIOVE-B ise benzer test süreçlerine tabi tutulmuştur. 21 Ekim 2011 tarihinde devreye alınan operasyonel test uyduları sayesinde, uydularda kullanılacak yüksek hassasiyetli saatler, bu saatlerin ortak Galileo sistemi zamanına göre senkronize edilmesini sağlayacak zaman üniteleri, sinyal jeneratörleri, güç yükselticiler, radyo frekansı yayıncıları, antenler ve diğer sinyal işleme bileşenlerinin geliştirilmesi açısından kritik teknolojilerin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. GIOVE-A, öngörülen görev süresini aşarak 30 Haziran 2012'de, GIOVE-B ise dört yılı aşkın hizmetinin ardından 23 Temmuz 2012'de hizmetten ayrılmıştır [Bhatta, 2021], [Pırtı vd., 2021].

Galileo sisteminin doğrulama süreci, 2011 ve 2012 yıllarında fırlatılan dört Yörünge İçi Doğrulama (In-Orbit Validation, IOV) uydusuyla başlatılmıştır. Bu uydular, Fransız Guyanası'ndan fırlatılarak sırasıyla Galileo-IOV PFM (GSAT0101, Thijs), Galileo-IOV FM2 (GSAT0102, Natalia), Galileo-IOV FM3 (GSAT0103, David) ve Galileo-IOV FM4 (GSAT0104, Sif) olarak adlandırılmıştır. 2013 yılında, Hollanda'nın Noordwijk kentindeki ESA'ya ait Navigasyon Laboratuvarı'nda, yalnızca bu dört

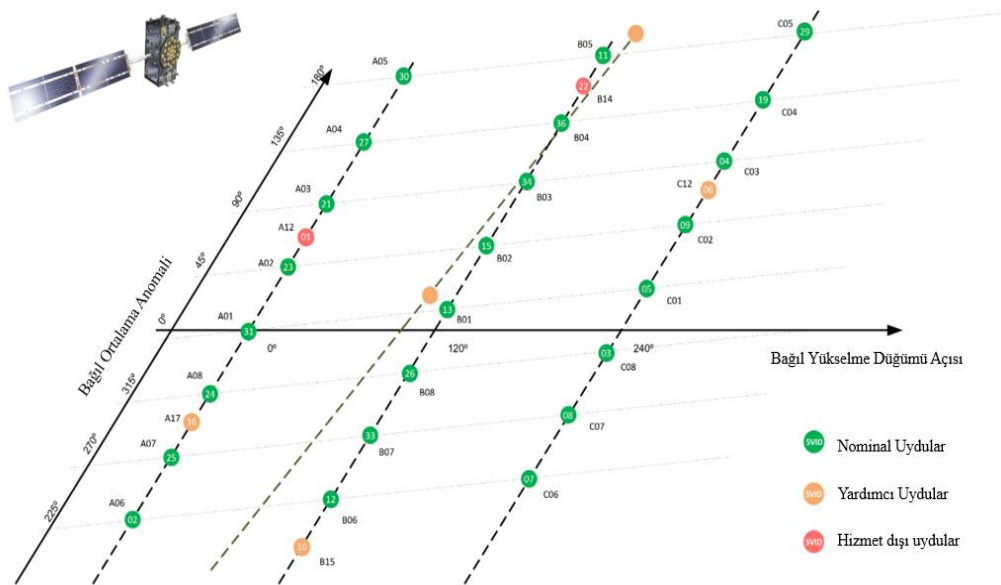
uydudan alınan sinyaller kullanılarak ilk konum belirleme denemesi başarıyla gerçekleştirilmiştir [Web 4].

2013 yılında, Galileo sistemine yönelik teknoloji gösterimi ve sistem doğrulama testlerine odaklanan kapsamlı uygulamalar gerçekleştirilmiş, bu çalışmalar Şubat 2014'e kadar süren bir dizi testle desteklenmiş ve yörünge doğrulama aşamasının başarıyla tamamlandığı ortaya konulmuştur. Ardından, sistemin İlk Operasyonel Yeteneğe (Initial Operational Capability, IOC) ulaşması hedeflenmiş; 2014 yılında Fransız Guyanası'ndan beşinci ve altıncı Galileo uydularının fırlatılmasıyla bu aşamaya geçiş sağlanmıştır. Ancak, bu uydular planlanan dairesel yörüngeler yerine eliptik yörüngelere oturmuş, bu da sistemin başlangıçta beklenen yörünge performansını etkilemiştir. Hatalı yörüngelere yerleşen uydular Mart 2015'te kullanılabilir yörüngeye sokularak sistemin operasyonel kapasitesine entegre edilmiştir. IOC aşaması, 2014 yılından itibaren zemin ve uzay altyapısının oluşturulmasıyla Galileo sisteminin FOC'a ulaşmasını hedeflemiştir. Bu süreçte, önceden fırlatılan dört IOV uydusuna ek olarak 14 yeni uydu devreye alınmış, fırlatma operasyonları ve yer kontrol altyapısı güçlendirilmiştir. Sonuç olarak, Aralık 2016 itibarıyla Galileo kapsamında Açık Hizmet (Open Service), Arama ve Kurtarma Hizmeti (Search and Rescue, SAR), Ticari Kullanım (Commercial Service, CS), Güvenlik ve Acil Durum Kullanımı (Safety of Life) ve Kamu Düzenleyici Hizmeti (Public Regulated Service) resmi olarak kullanıma sunulmuştur. En son FOC uyduları, 25 Temmuz 2018 tarihinde toplu olarak fırlatılan dört uydu olarak kayda geçmiştir [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Kahveci ve Yıldız, 2017], [Pırtı vd., 2021], [Web 4].



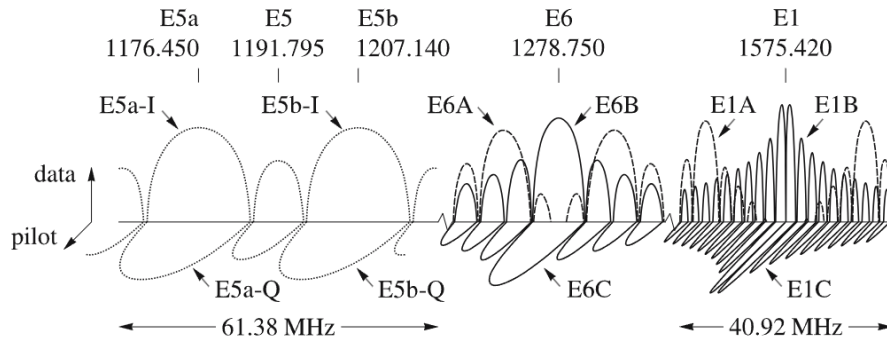
Şekil 2.7: Galileo takımyıldızı [Web 4].

Galileo uydu sistemi, Walker 27/3/1 konfigürasyonu temel alınarak 3 tanesi yedek olmak üzere toplamda 30 uyduya ulaşılması planlanmış ancak günümüzde, Walker 24/3/1 konfigürasyonunda 6 yedek uydu dahil olmak üzere 30 Orta Dünya Yörüngesi (Medium Earth Orbit, MEO) uydusuna sahiptir. Bu sistem, **Şekil 2.7**'de gösterildiği gibi üç ayrı yörünge düzlemine yerleştirilmiş olup, her bir düzlemde 120° aralıklarla konumlandırılmış 10 uydu bulunmaktadır. **Şekil 2.8**'de görüldüğü üzere, her yörünge düzleminde uydular arasındaki açısal mesafe 45° olarak ayrılmıştır. Yörünge düzlemlerinde yer alan uydulardan 8'i aktif olarak konumlandırma hizmeti sunarken, kalan 2 uydu ise yedek olarak görev yapması için planlanmıştır. Bu yapı sayesinde, sistemde toplamda 24 operasyonel ve 6 yedek uydu yer almakta olup, süreklilik ve güvenilirlik sağlanmaktadır. **Web 7** kaynağına göre, 2025 yılı itibarıyla Galileo sisteminde toplam 31 uydu bulunmakta olup, bunlardan 24'ü operasyonel, 5'i yedek ve 2'si hizmet dışıdır. Galileo uyduları, yaklaşık 23.222 km yükseklikte (yer merkezinden yaklaşık 29593 km uzaklıkta) faaliyet göstermektedir. Her bir uydu, yörüngesini yaklaşık 14 saat 4 dakika 42 saniyede tamamlamakta olup, 56° lik eğim açısıyla dünyanın her bölgesine, özellikle kutup bölgeleri de dahil olmak üzere, sürekli kapsama sağlamaktadır. Her uydu, kesin zaman sinyalleri, efemeris verileri ve diğer navigasyon bilgilerinin kesintisiz bir şekilde yayınlanmasını sağlayarak, sistemin yüksek doğrulukta konum belirleme ve zaman senkronizasyonu hizmetleri sunmasına olanak tanımaktadır [Pırtı vd., 2021], [Web 7].



Şekil 2.8: Galileo yörünge düzlemleri [Web 7].

Galileo uydu sistemi, üç ana frekans bandında (E1, E5 ve E6) yayın yaparak kullanıcıların konumlandırma ve zaman senkronizasyon ihtiyaçlarını karşılamayı amaçlamıştır. **Şekil 2.9**'de gösterildiği üzere, E5 (1191.795) bandı kendi içinde E5a (1176.45 MHz) ve E5b (1207.14 MHz) olarak ikiye ayrılmıştır. Her bir alt band, I (in-phase) ve Q (quadrature) olarak adlandırılan pilot ve veri bileşenlerini içerir; bu yapı, iyonosferik gecikmelerin düzeltilmesi için çift frekanslı ölçüm imkânı sunar ve sinyal işleme sürecini kolaylaştırmaktadır. Buna ek olarak, E1 bandı (1575.42 MHz) üzerinde E1A ve E1B olarak ayrılmış veri ve pilot sinyalleri, E6 bandı (1278.75 MHz) üzerinde ise E6A, E6B ve E6C şeklinde organize edilen taşıyıcılar bulunmaktadır. Bu ayırım hem veri hem de pilot sinyallerin daha güvenilir bir şekilde iletilmesine olanak tanırken, sinyallerin farklı alt taşıyıcılar kullanılarak bölünmesi (E5a ile E5b arasında 61.38 MHz, E1 bandında 40.92 MHz genişlik) multipath etkilerine karşı dayanıklılığı artırmakta ve diğer GNSS sistemleriyle entegrasyonu güçlendirmektedir [**Hofmann-Wellenhof vd., 2007**], [**Pırtı vd., 2021**], [**Web 4**].



Şekil 2.9: Galileo sinyallerinin güç spektral yoğunlukları [**Hofmann-Wellenhof vd., 2007**].

Galileo sinyal yapısı, İkili Ofset Taşıyıcı (Binary Offset Carrier) modülasyonunu kullanarak farklı sinyal bileşenlerinin aynı frekans bandında birbirine karışmadan iletilmesini sağlarken, diğer GNSS sistemleriyle uyumlu çalışabilirliği artırmaktadır. Ayrıca, Sağ El Dairesel Polarizasyon (Right-Hand Circular Polarization) tekniği sayesinde atmosferik bozulmalar en aza indirgenerek, yüksek doğruluklu ve güvenilir konumlandırma hizmeti sunulmasına katkı sağlamaktadır. Böylece, Galileo sinyalleri yüksek doğruluklu konum belirleme, düşük gecikmeli zaman senkronizasyonu ve kararlı navigasyon performansı sunarak kullanıcıların çeşitli ihtiyaçlarını karşılamakta; bu özellikleri sayesinde Galileo sistemi, yüksek hassasiyetli

konumlandırma hizmeti sunma kapasitesiyle küresel ölçekte üçüncü navigasyon sistemi olarak konumlandırılmıştır [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Pırtı vd., 2021].

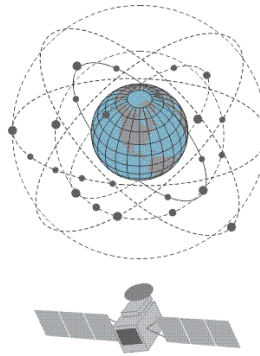
2.5. BeiDou (Compass) Uydu Konumlandırma Sistemi

BeiDou Uydu Navigasyon Sistemi (BDS), Çin'in bağımsız bir küresel navigasyon altyapısı oluşturma hedefi doğrultusunda, 1983 yılında akademisyen Chen Fangyun tarafından önerilmiş ve Çift Yıldız Konumlandırma ve Haberleşme Sistemi (Double Star Positioning and Communications System) adıyla gündeme getirilmiştir. Bu sistem, ABD'nin GPS, Rusya'nın GLONASS ve Avrupa Birliği'nin Galileo sistemlerine alternatif olarak tasarlanmış olup, Çin'in bağımsız navigasyon teknolojileri alanındaki stratejik hedeflerini yansıtmaktadır. "BeiDou" adı, Çince'de Büyük Ayı Takımyıldızını ifade eder. Bu isim, sistemin küresel ölçekte yüksek doğruluk ve güvenilirlik ile konumlandırma hizmetleri sunma misyonunu simgelemektedir. Başlangıçta hem askeri hem de sivil ihtiyaçları karşılamayı amaçlayan bu proje, 1986 yılında geliştirme aşamasına alınmış ve 1989'da iki adet DHF-2 Yer-sabit yörüngeli (Geostationary Earth Orbit, GEO) iletişim uydusunun kullanıldığı ilk deneysel gösterimi gerçekleştirmiştir. Resmi geliştirme süreci, 1994 yılında Çin Genelkurmay Başkanlığı Harita Bürosu'nun sponsorluğunda başlatılarak, sistemin haritalama, havacılık, denizcilik, acil durum müdahalesi ve ulusal savunma gibi çeşitli alanlarda hizmet vereceği vurgulanmıştır [Kaplan ve Hegarty, 2006].

Birinci nesil BeiDou-1 sistemi, Çin'in ilk uydu navigasyon sistemi girişimi olarak 2000 yılında hizmete girmiştir. Bu sistem, 1 adet yedek ve 3 adet GEO uydusu kullanarak yalnızca Çin ve çevresindeki belirli bir bölgeye hizmet verecek şekilde tasarlanmış; uyduların Dünya'nın sabit bir noktasının üzerinde bulunması nedeniyle kapsama alanı yaklaşık 70° Doğu ile 140° Doğu boylamları ve 5° Kuzey ile 55° Kuzey enlemleri arasında sınırlı kalmıştır. Sistem, başlangıçta B1A, B1B ve üç yıl sonra eklenen B1C GEO uydularına dayanmaktadır; B1A uydusu 140°E, B1B ise 80°E boylamında konumlandırılmış, üç yıl sonra 110.5°E boylamında B1C uydusu eklenmiştir. 2007 yılında fırlatılan dördüncü uydu, BeiDou-1 sistemini bölgesel olarak operasyonel hale getirerek, askeri amaçlarla geliştirilen sistemin sivil kullanıcılar için de konumlandırma, zamanlama ve navigasyon ihtiyaçlarına da kısmi çözümler sunmasını mümkün kılmıştır. Ancak uydu sayısının azlığı ve sınırlı bölgesel kapsama, global

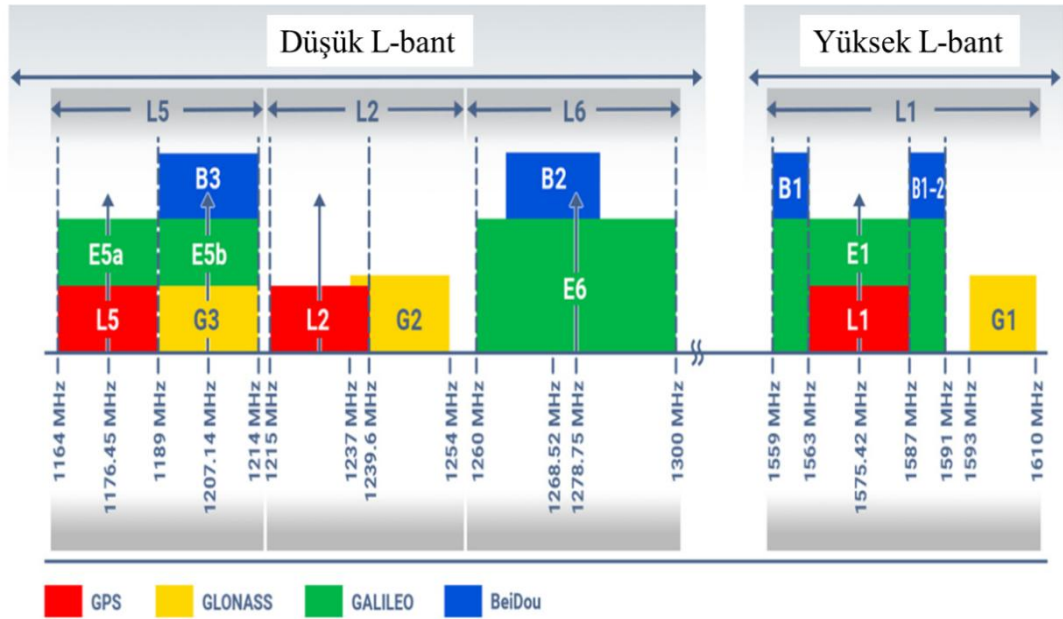
ölçekte yüksek doğruluk ve sürekli hizmet sağlama kapasitesinde yetersizliklere neden olmuştur. Bu eksiklikler, sonraki nesil sistemler olan BeiDou-2 (Compass) ve BeiDou-3'ün geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. 2007–2012 yılları arasında uygulamaya konulan BeiDou-2 aşaması, MEO, GEO ve Eğimli Jeosenkron Yörüngeler (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) kullanarak kapsama alanını genişletmiş, 2011 sonlarında deneme operasyonlarına girerek hizmet kapsamını artırmıştır **[Kaplan ve Hegarty, 2006], [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Teunissen vd., 2017]**.

İkinci nesil BeiDou-2 (Compass) sistemi, Çin'in bölgesel BeiDou-1 sistemini küresel ölçekte yenileme hedefi doğrultusunda 2007 yılında duyurulmuş ve geliştirilmiştir. İlk BeiDou-2 uydusu olan Compass-M1, 55,5° eğimle 21.525 km irtifada dairesel bir MEO yörüngesine yerleştirilirken yörünge periyodunu 12 saat 53 dakika 24 saniyede tamamlamaktadır. 2007–2012 yılları arasında M6'ya (M2 hariç) kadar sıralı olarak adlandırılan toplamda 5 uydu MEO yörüngesine ve 2009–2012 döneminde, Compass-G1'den G6'ya kadar 8 uydu GEO yörüngesi üzerine konumlandırılmıştır. Ek olarak, 2010–2011 yıllarında, yaklaşık 38.000 km irtifada ve 55° eğimli yörüngede yerleştirilen, Compass-IGS01'den IGS05'e kadar sıralı olarak adlandırılmış 5 adet uydu Yüksek Dünya Yörüngesine (High Earth Orbit, HEO), üç tanesinin yaklaşık 120°E, diğer iki tanesinin ise yaklaşık 95°E boylamlarında konumlandırılmasıyla Çin bölgesinde kesintisiz kapsama sağlamıştır. Sistemin deneme operasyonları 2011 sonlarında başlamış ve sonraki aşamalarda hizmete alınan FOC uyduları ile aktif olarak işletilmektedir. Bu uyduların tümü, fazlı dizi anten, yerleşik retro-reflektör, C bandı korna anten ve S/L bandı çanak anten ile donatılarak yüksek hassasiyetli konumlandırma ve navigasyon hizmetleri sunmaktadır **[Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Teunissen vd., 2017], [Web 4]**.



Şekil 2.10: BeiDou takımıyıldızı **[Web 4]**.

BeiDou sisteminin en gelişmiş versiyonu olan BeiDou-3, küresel navigasyon altyapısının tamamlanması için hayata geçirilen en son aşamadır. Toplam 35 uydudan oluşacak bu sistemde, 27 MEO, 3 IGSO ve 5 GEO uydusu stratejik olarak konumlandırılmıştır [Teunissen vd., 2017]. 31 Temmuz 2020'de FOC sistemine geçen BeiDou-3, **Şekil 2.10**'da gösteriliği gibi günümüzde 6 yörünge düzleminde toplam 44 uydusu (7 GEO, 27 MEO ve 10 IGSO) ile kullanıcılarına metre seviyesinden desimetre seviyesine kadar değişen yüksek hassasiyetli, gerçek zamanlı ve güvenilir hizmetler sağlamaktadır [Web 4]. Çin, Beidou uydusu navigasyon sisteminin 4. neslini geliştirmek amacıyla çalışmalara başlamıştır. Bu çalışmalar kapsamında, 2027 yılında üç test uydusunun fırlatılması ve 2035 yılına kadar sistemin tamamlanması hedeflenmektedir. Yeni nesil Beidou sistemi, metre seviyesinden desimetre seviyesine kadar yüksek hassasiyetli, gerçek zamanlı ve güvenilir navigasyon hizmetleri sunmayı amaçlamaktadır [Web 8].



Şekil 2.11: GNSS frekans sinyalleri [Web 15].

BDS, **Şekil 2.11**'de gösterildiği gibi çok bantlı sinyal yapısı sayesinde kapsamlı konumlandırma hizmetleri sunmaktadır. Sistem, B1, B1-2, B2 ve B3 bantları üzerinden çalışarak; B1 bandı 1561.098 MHz merkez frekansında temel navigasyon sinyallerini, B2 bandı 1268.520 MHz merkez frekansında yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalara yönelik optimizasyonu ve B3 bandı 1207.140 MHz frekanslarıyla

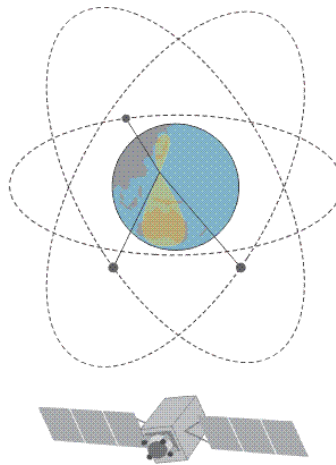
özellikle iyonosferik gecikmelerin düzeltilmesine yönelik katkıları sağlamaktadır. B1-2 bandı ise, ek frekans bantlarından biri olarak yaklaşık 1589.742 MHz merkez frekansında işlemektedir. Bu bant, temel B1 bandı ile çalışarak sinyal redundansını artırmakta ve çift frekanslı ölçümler sayesinde iyonosferik gecikme hatalarının düzeltilmesine katkı sağlamaktadır. BeiDou sistemi Radyo Belirleme Uydu Hizmeti (Radio Determination Satellite Service, RDSS) ve Radio Navigasyon Uydu Servisi (Radio Navigation Satellite Service, RNSS) olmak üzere iki temel hizmeti de desteklemektedir. BeiDou RNSS kapsamında, kullanıcıların konum, navigasyon ve zamanlama ihtiyaçlarını karşılamak üzere 5 yeni nesil sinyal sunmaktadır. Bu sinyaller, B1A ve B1C (her ikisi de 1575.42 MHz), B2a (1176.45 MHz), B2b (1207.14 MHz) ve B3A (1268.52 MHz) frekanslarında iletilmektedir. BeiDou sinyalleri Galileo ve GPS sistemleriyle uyum içinde çalışabilmesi için, CDMA teknolojisi ile modüle edilip Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Key) modülasyonu kapsamında faz içi (in-phase, I) ve kuadrafaz (quadrature phase, Q) bileşenleri kullanılarak işlenmekte olup, bu frekans bantları GPS L1, Galileo'nun E2-L1-E1, GPS L5, Galileo'nun E5a, E5b ve E6 sinyalleri ile örtüşmektedir. Bu yapı, BeiDou'nun hem açık hem de yetkilendirilmiş hizmetler sunarak yüksek hassasiyetli konum belirleme, navigasyon ve zaman senkronizasyonu sağlamasını mümkün kılmaktadır. RDSS, BeiDou-1 ile uyumluluğu garanti altına alarak Çin ve çevresinde iki yönlü kısa mesaj iletişimi sağlarken, RNSS ise GPS ve Galileo'ya benzer yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunmaktadır [Kaplan ve Hegarty, 2006], [Web 4], [Web 9].

2.6. Quasi-Zenith Uydu Sistemi (QZSS)

QZSS'nin geliştirilmesi fikri, 2000'li yılların başında Japonya'da GNSS'e olan bağımlılığı azaltmak ve özellikle yoğun şehirleşme bölgelerinde yaşanan GPS sinyal kesintilerini en aza indirmek amacıyla yeni bir uydu navigasyon sistemi geliştirme çalışmalarına başlamıştır. Japonya'nın coğrafi yapısı, yüksek binaların yoğun olduğu metropoller ve dağlık bölgelerden oluştuğu için, GPS sinyallerinin blokajı (sinyal kaybı) ve multipath önemli bir problem olarak öne çıkmaktadır. Japonya bu sorunları gidermek ve konum belirleme doğruluğunu artırmak için, GPS ile tam uyumlu ancak bölgesel ölçekte optimize edilmiş QZSS'yi geliştirme kararı almıştır. QZSS'nin geliştirilmesi için ilk adımlar Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (Japan Aerospace Agency, JAXA), Japonya Kabine Ofisi ve diğer ilgili devlet kurumlarının

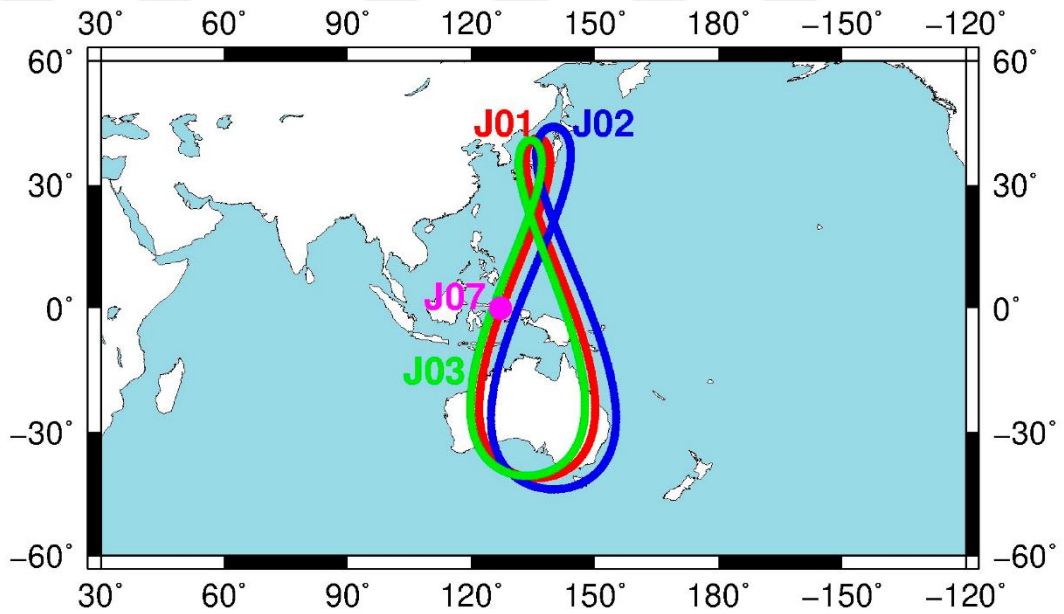
ortak çalışmalarıyla atılmıştır. 2002 yılında, Japonya hükümeti QZSS'nin fizibilite çalışmalarına başlamış ve projenin teknik ve operasyonel detayları üzerine yoğunlaşmıştır. 2006 yılında ise, Japon hükümeti resmi olarak QZSS'nin geliştirilmesi için destek sağlayacağını duyurmuştur **[Kaplan ve Hegarty, 2006], [Hofmann-Wellenhof vd., 2007]**.

QZSS uydusunun gelişimi, 11 Eylül 2010 tarihinde Tanegashima Uzay Merkezi'nden H-IIA roketi ile fırlatılan Michibiki-1 (QZS-1) uydusu ile başlamıştır **[Web 4]**. Bu uydusu, sistemin temel kavramlarının deneysel olarak test edilmesi ve Japonya üzerindeki sinyal performansının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Michibiki-1'in başarıyla işletilmesi sonrasında Japon hükümeti, QZSS'nin tam bir bölgesel uydu sistemi olarak geliştirilmesine devam etme kararı almıştır. 2013 yılında, Japonya Kabine Ofisi, QZSS'nin ticari ve kamu hizmetleri açısından genişletileceğini ve 2020'li yıllarda tam operasyonel bir sistem haline getirileceğini duyurmuştur. Bu plan doğrultusunda, 2017 yılında üç yeni QZSS uydusu (Michibiki-2, Michibiki-3 ve Michibiki-4) fırlatılmıştır. 1 Kasım 2018 itibarıyla, Japonya QZSS'nin resmi olarak hizmete başladığını duyurmuştur. Sistem, yalnızca Japonya'yı değil, Asya-Pasifik bölgesini kapsayacak şekilde optimize edilerek, geniş bir coğrafyada yüksek hassasiyetli konumlandırma hizmeti sunmaya başlamıştır. 2021 yılında Japon hükümeti, QZSS'yi genişletme planlarını duyurmuş ve 2024 yılına kadar 7 uyduya çıkarılacağını açıklamıştır. Bu genişleme, sistemin sürekliliğini ve doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır. Güncel olarak, 2025 yılı itibarıyla QZS-6 uydusu fırlatılarak toplamda 6 uydu sayısına ulaşılmıştır **[Xie vd., 2019], [Web 10]**.



Şekil 2.12: QZSS takımyıldızı [Web 4].

Günümüzde QZSS, 4 adet Yarı zenith uydu yörüngesi (Quasi zenith satellite orbit, QZO) ve 1 adet GEO yörüngede konumlandırılmış toplam 5 aktif uyduya sahiptir. **Şekil 2.12**'de gösterildiği gibi 3 farklı yörünge düzleminde yer alan en az 3 uydu, yaklaşık 23 saat 56 dakika 4 saniyelik bir sideral periyotla yörüngelerini tamamlamakta ve Japonya ile çevresindeki Asya-Pasifik bölgesinde sinyalin sürekli erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Uydular, yeryüzünde asimetrik bir sekiz (∞) şekilli iz oluşturan (**Şekil 2.13**) bir yörünge modeli izlemekte olup, bir GEO uydusu her zaman Japonya üzerinde yaklaşık 36.000 km irtifada, 70° 'den yüksek bir yükseklik açısında ve yaklaşık 127° Doğu boylamında sabit olarak konumlanmaktadır. Uydular, eşit güç dağılımına sahip sinyaller yayarak dünya yüzeyini kapsamakta ve rubidyum atom saatlerini zaman standardı olarak kullanmaktadır [Xie vd., 2019], [Web 10].



Şekil 2.13: QZSS uydu sisteminin yer küre üzerindeki izdüşümü [Xie vd., 2019].

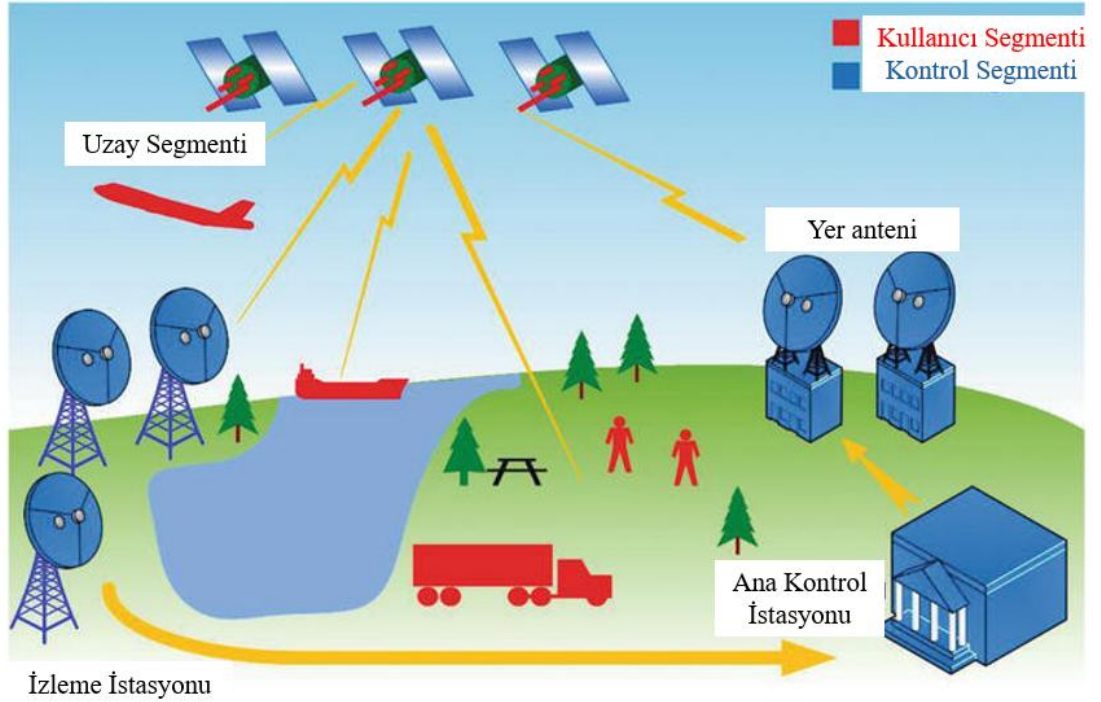
QZSS'in sinyal yapısı, GPS ile tam uyumlu çalışacak şekilde yapılandırılmış olup, özellikle kentsel kanyonlar ve dağlık bölgelerde konumlandırma, navigasyon ve zamanlama hizmetlerinin doğruluğunu artırmayı hedeflemektedir. Bu sistem, GPS ile tam uyumlu L1C/A, L1/C, L2C ve L5 gibi standart sinyallerin yanı sıra, Japonya'ya özgü L1-SAIF (bütünlük fonksiyonu ile altmetre sınıfı güçlendirme- Submeter-class Augmentation with Integrity Function, SAIF) ve deneysel L-band (L-Band Experiment, LEX) sinyallerini de yayınlamaktadır. L1-SAIF sinyali, 1575.42 MHz frekansında yayınlanarak, Japonya'daki kullanıcılara geniş alan diferansiyel GPS

düzeltilmeleri ve bütünlük bilgisi sağlamaktadır. LEX sinyali ise 1278.75 MHz frekansında yayınlanmakta olup, yüksek veri iletim hızıyla santimetre seviyesinde hassas konumlandırma hizmetleri sunmayı amaçlamaktadır. Bu çok bantlı sinyal yapısı sayesinde QZSS, özellikle yoğun kentsel alanlar ve dağlık bölgelerde yüksek doğrulukta konum belirleme imkânı sunmaktadır [Betz, 2015], [Xie vd., 2019], [Web 4], [Web 10].



3. GNSS BÖLÜMLERİ

GNSS, dünya genelinde kesintisiz konumlandırma, navigasyon ve zamanlama hizmeti sunabilmek için **Şekil 3.1**'de gösterildiği gibi uzay bölümü, kontrol bölümü ve kullanıcı bölümü olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin ilki olan uzay segmenti, Dünya yörüngesinde dolaşan bir uydu ağıdır ve bu uydular, taşıyıcı sinyaller aracılığıyla yüksek doğruluklu zaman ve konum bilgilerini kullanıcılara iletmektedir. Bir GNSS sisteminin küresel çapta erişim sağlayabilmesi için her noktadan aynı anda en az dört uydunun görünür olması gerektiğinden, yörünge tasarımı; kapsama alanı, uydu geometrisi ve hedeflenen konum doğruluğu kriterleri göz önünde bulundurularak optimize edilir [Seeber, 2003], [Kahveci ve Yıldız, 2017].



Şekil 3.1: GNSS segmenti [Karaim vd., 2018].

GNSS uyduları, tasarlanan sistemin çalışması için yüksek hassasiyetli atomik saatler, çift yönlü radyo alıcı-verici birimleri, yerleşik bilgisayarlar ve diğer yardımcı malzemelerle donatılmıştır. Bu donanım, uydu tarafından yayılan taşıyıcı sinyaller ve yörünge parametreleri içeren navigasyon mesajlarının alıcılarda işlenmesini sağlayarak, uydu-alıcı arasındaki sözde menzilin (pseudorange) hesaplanmasına ve böylece kesin konum belirlemeye olanak tanımaktadır. Ayrıca her uydu, rastgele anlar

için uydu konumunu hesaplamaya izin veren bir mesaj yayınlanmaktadır. Uyduların enerji ihtiyacı büyük ölçüde güneş panelleri aracılığıyla karşılanırken, sistem bütünlüğünü sağlamak amacıyla küçük iticilerle yörünge düzeltme manevraları gerçekleştirilebilir. Her bir uydu; fırlatma sırası, yörünge konumu ve Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'ne (National Aeronautics and Space Administration, NASA) ait uluslararası katalog numarası gibi tanımlayıcılar ile izlenir **[Kahveci ve Yıldız, 2012]**.

Kontrol bölümü, tüm sistemin yönlendirilmesinden sorumludur. Bu sorumluluklar, sistemin yörüngeye yerleştirilmesi ve bakımını, uydu takımyıldızının yörünge ve atomik saat parametrelerinin belirlenmesi amacıyla uyduların izlenmesini ve elde edilen verilerin yer antenleri yardımıyla uydulara gönderilmesini kapsamaktadır. Bir ana kontrol istasyonu ise diğer tüm izleme istasyonlarının faaliyetlerini kontrol etmektedir **[Hofmann-Wellenhof vd., 2007]**.

Kullanıcı bölümü ise sistemi farklı amaçlar için kullanan tüm kullanıcıları kapsamaktadır. Uydu takımyıldızlarını geliştiren ülkelerin askeri birlikleri, genellikle sisteme tam erişim hakkına sahiptir. Tam erişim hakkı, uydular tarafından yayınlanan tüm sinyallere erişimi olmayan sivil kullanıcılar için geçerli değildir. Kullanıcı bölümü, anten, alıcı-işlemci ve yüksek kararlılığa sahip dahili saat birimlerinden ibaret donanım ile yazılımları içerir; bu bileşenler, alınan GNSS sinyallerini işleyerek enlem, boylam, yükseklik ve zaman bilgilerini hesaplamaktadır **[Karaim vd., 2018]**, **[Web 2]**. GNSS durum bilgilerini, verilerini ve ürünlerini kullanıcılara ulaştırmak için çeşitli özel ve resmi hizmetler kurulmuştur. Örnek olarak, yer bilimleri araştırmalarını, çok disiplinli uygulamaları ve eğitimi desteklemek amacıyla GNSS için standart olarak en yüksek kalitede verileri sağlamayı taahhüt eden Uluslararası GNSS Servisi'nden (International GNSS Service, IGS) bahsetmek gerekmektedir. Günümüzde IGS servisi, The Multi-GNSS (Çoklu GNSS) Experiment (MGEX) projesi adı altında GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou takımyıldızlarına ait verileri kullanıcılar ile paylaşmaktadır **[Web 11]**.

3.1. GNSS Yapısı

GNSS, mühendislik, bilimsel çalışmalar, havacılık, navigasyon, araç takibi, askeri alanlar ve çok sayıda kullanıcıyı içeren çeşitli uygulama yelpazesine sahiptir. Bu uygulama alanlarında çok sayıda kullanıcısı vardır. GNSS, 125'e yakın uyduyla

çalışmakta olup, bunların çoğunluğu Rusya ve Amerika'ya aittir. Arazi ve atmosfer koşullarından bağımsız bir GNSS alıcısı ile gökyüzünün gözlemlenebildiği her noktada 3 boyutlu konumlandırma, zaman ve hız ölçümü kolayca elde edilir. Kullanıcılarına hızlı, düşük maliyetli ve güvenilir konumlandırma sağlayan GNSS, özellikle RTK ve PP-PPP yöntemlerinin geliştirilmesinde kullanılan konumlandırma yöntemidir [Mutlu ve Kahveci, 2019].

3.2. GNSS Referans Çerçeveleri

Bir jeodezik referans sisteminin uygulamadaki bütünlüğünü sağlayabilmek için hem göksel hem de karasal öğeleri kapsamaları zorunludur. Bu öğeler, göksel düzlemde kuasarlar ve diğer astronomik kaynaklar, karasal düzlemde ise sabit yer noktaları ve bu noktaların hız vektörlerine ilişkin gözlemsel ölçümler temel alınır. GNSS bu yaklaşımı esas alarak Dünya merkezli bir koordinat çerçevesi sunmaktadır. Dünya'nın şekli, dönüşü ve kütleçekimsel özellikleri, küresel referans çerçeveler tarafından belirlenen parametrelerle tanımlanmaktadır. Dünya Jeodezik Sistemi-1984 (World Geodetic System-1984, WGS84), bu sayede jeo-uzamsal veri alışverişi ve haritalama uygulamaları için evrensel bir temel referans çerçevesi olarak kabul edilmektedir [Rummel ve Peters, 2001].

3.3. GNSS Gözlemleri

GNSS tabanlı konum belirleme, yeryüzündeki bir alıcının yerini, konumu bilinen uydulara olan mesafelerin hesaplanmasına dayalı olarak belirleyen ve bu mesafe ölçümlerinden yararlanarak alıcının üç boyutlu (X, Y, Z) uzaydaki koordinatlarını hassas biçimde belirleyen bir yöntemdir. Bu nedenle, uydu hareketlerinin doğru bir şekilde modellenmesi, konumlama sonuçlarının güvenilirliği açısından kritik bir gerekliliktir. Başta yerçekimi (Güneş'in, Ay'ın ve Dünya'nın yerçekimi alanı) alanları olmak üzere, ayrıca yerçekimi olmayan (örn. Güneş radyasyon basıncından kaynaklanan kuvvet) etkiler de GNSS uydularının hareketinin bozulmasına ve yörüngelerinin uzayda eylemsiz olan bir Kepler elipsinden uzaklaşmasına neden olabilmektedir. GNSS'in çalışma mantığı, konumları önceden bilinen yerlerdeki alıcılarla yörüngedeki uydular arasındaki mesafelerin hesaplanmasına dayanmaktadır. GNSS alıcıları bu mesafeleri doğrudan ölçme yeteneğine sahip olmadığından, ölçülen

zaman gecikmelerine karşılık gelen pseudorange değerleri üzerinden üç boyutlu konumları çözülür. Alıcının yerel saati ile uydunun atom saati arasındaki fark, menzilde doğrudan hataya yol açtığından, bu saat farkı daha sonra metre cinsinden dönüştürülerek hesaplanan pseudorange değerine eklenir. Pseudorange hesaplaması, uydudan yayılan kod sinyalinin alıcının yerel ürettiği kodla çapraz korelasyonuna dayanarak ortaya çıkmaktadır. Bu yöntem, iki kod dizisi arasındaki en uygun zaman kaymasını bularak menzilin belirlenmesini sağlar. Ancak bu ham pseudorange ölçümleri hem alıcı hem de uydu saatlerindeki sapmalar ve iyonosfer ile troposfer gibi atmosferik etkiler nedeniyle yeterli doğruluğu sunmaz; bu yüzden tek başına jeodezik çözümlemelerde kullanılmazlar. Bu nedenle, genellikle diferansiyel kod verileri veya taşıyıcı faz gözlemleriyle birlikte değerlendirilerek yüksek hassasiyet elde edilmektedir [Özdemir, 2014].

Kod ve faz sinyalleri, GNSS tekniği ile konum elde edilmesinde sıklıkla kullanılan temel gözlemlerdir. Kod sinyali, uydu ve alıcı arasındaki mesafenin doğrudan ölçülmesine imkân tanıyan geniş bantlı bir işaret sunarken; faz sinyali, daha dar bantlı ve yüksek frekansta ölçüm yaparak milimetre mertebesinde hassasiyete ulaşmayı mümkün kılmaktadır. Konum belirleme algoritmaları, yalnızca kod gözlemlerini, yalnızca faz gözlemlerini veya her iki veri tipinin kombinasyonunu kullanarak pozisyon çözümü üretmektedir. Temel prensip, geriye kestirme yöntemine dayanır: Alıcı ile konumu bilinen bir uydu arasındaki uzaklık, alıcının yerel saati ile uydunun atom saati arasındaki zaman farkının ışık hızıyla çarpımı şeklinde tanımlanan pseudorange değerinden elde edilir. Faz ölçümlerinde ise, taşıyıcı dalga fazı ilerlemesi referans alınarak daha dar bantta gözlenen menzil sapmaları algılanır; ancak bu yöntemin kullanımı, tam dalga sayısının belirsizliğini çözülmesini (integer ambiguity resolution) gerektirmektedir. Böylelikle, kodun sağladığı mutlak menzil ölçümleri ile fazın sunduğu yüksek doğruluk birbirini tamamlar ve entegre çözümler hem kısa hem de uzun menzilli uygulamalarda yüksek konumlama performansı sağlamaktadır. [Seeber, 2003], [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Teunissen vd., 2017].

3.3.1. Tez Kapsamında Kullanılan GNSS Gözlem Cihazları

Bu bölümde, tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulamalarda kullanılan GNSS alıcıları ve akıllı mobil cihazlara ilişkin teknik detaylar sunulmaktadır. Araştırma kapsamında, yüksek hassasiyetli GNSS verilerinin elde edilmesi amacıyla CHC I80

ve Trimble MB-2 OEM GNSS alıcısı (Şekil 3.2) tercih edilmiştir. OEM alıcısı için NovAtel GPS-702-GG-HV anteni entegre edilmiştir. Ayrıca, güncel mobil teknolojiye sahip olan Xiaomi 11T Pro (128 ve 256 GB) model akıllı mobil cihazları kullanılarak çift frekanslı ham GNSS verileri toplanmıştır. **Tablo 3.2**'de CHC I80 alıcısının, **Tablo 3.3**'te OEM alıcısının, **Tablo 3.4**'te NovAtel antenin ve **Tablo 3.1**'de akıllı mobil cihazların teknik özelliklerini içeren bilgiler sunulmuştur.



Şekil 3.2: Uygulama kapsamında kullanılan cihazlar.

Tablo 3.1: Xiaomi 11T Pro (128 ve 256 GB) mobil cihazlarının teknik özellikleri

Temel Donanım	Yonga Seti: Qualcomm® Snapdragon™ 888 (5 nm)
	İşletim Sistemi: Android 12
	GPU: Adreno 660
	CPU: 8 çekirdekli (1x 2.84 GHz Kryo 680, 3x 2.42 GHz Kryo 680, 4x 1.80 GHz Kryo 680)
	İşlemci Mimarisi: 64-bit
	Depolama: 128 GB veya 256 GB UFS 3.1
	RAM: 8 GB veya 12 GB LPDDR5
	Batarya Kapasitesi: 5000 mAh
	5G Desteği: Var
Navigasyon Özellikleri	GPS (L1+L5), Galileo (E1+E5a), GLONASS (G1), BeiDou, QZSS A-GPS desteği var Elektronik pusula var Kablosuz ve veri ağı konumlama var

Tablo 3.2: CHC I80 GNSS alıcısının teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
Kanal Sayısı	336 kanal (tüm uydu sinyallerini aynı anda takip edebilme)
GNSS Sistemleri	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, SBAS
Desteklenen Frekanslar	GPS: L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5; GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3; Galileo: E1, E5a, E5b; BeiDou: B1, B2; QZSS: L1C/A, L2C, L5
SBAS Sinyal Desteği	L1C/A, L5
GNSS Düzeltme Sistemleri	RTCM 2.x, RTCM 3.x, CMR, CMR+, NTRIP
Statik Konumlama	Yatay: 2.5 mm + 0.5 ppm KOH Düşey: 5 mm + 0.5 ppm KOH
PPK (Post-Processed Kinematic)	Yatay: 8 mm + 1 ppm KOH Düşey: 15 mm + 1 ppm KOH
RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik)	Yatay: 8 mm + 1 ppm KOH Düşey: 15 mm + 1 ppm KOH
Ağ RTK	Yatay: 8 mm + 0.5 ppm KOH Düşey: 15 mm + 0.5 ppm KOH
SBAS (Diferansiyel Konumlama)	0,5 m KOH
Güncelleme Hızı	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz (maksimum 20 Hz)
Hız Doğruluğu	0.03 m/s KOH
Heading (Yönelim)	Çift antenli destek Doğruluk: 0.2°/m baseline
İletişim	Bluetooth 4.0, Wi-Fi, Seri port, USB, dahili UHF modem (410-470 MHz), GSM/4G LTE (isteğe bağlı)
Hafıza	8 GB dahili, harici microSD kart desteği
Batarya	Çift batarya yuvası, 10-15 saat çalışma
Boyut	160 mm x 160 mm x 76 mm
Ağırlık	1.35 kg (yaklaşık)
Koruma Sınıfı	IP67 (suya ve toza dayanıklı), 2 m'ye kadar düşmeye dayanıklı
Öne Çıkan Özellikler	Hızlı RTK başlatma, ağ RTK, NTRIP istemci, zorlu arazi koşullarına dayanıklılık, mobil internet ve kablosuz veri aktarımı, entegre web arayüzü

Tablo 3.3: Trimble MB-2 OEM GNSS alıcısının teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
Kanal Sayısı	240 Takip Kanalı (Çift GNSS sensörü, tüm uydu sistemlerini aynı anda izleyebilir)
GNSS Sistemleri	GPS (L1/L2), GLONASS (L1/L2), Galileo (E1/E5b), BeiDou (B1/B2), QZSS (L1/L2), SBAS (L1)
Frekanslar	Çift Frekans (Dual frequency)
RTK Doğruluk	L1+L2 (sabit çözüm): Yatay: < 8 mm + 1 ppm L1 (sabit çözüm): Yatay: < 12 mm + 1.5 ppm Initialization: < 1 dakika (L1/L2), < 10 dakika (L1 only)
RTK İşletim Mesafesi	L1/L2: > 40 km (sabit çözüm), L1: < 10 km
SBAS Konumlama	0.50 m
Heading (Yönelim)	KOH: 0.2°/1 m baseline Başlatma süresi: < 10 sn En fazla baseline: < 100 m
Pozisyon Güncelleme	50 Hz'e kadar pozisyon/vektör/hız çıkışı
Gecikme (Latency)	< 10 ms
Hız Doğruluğu	0.02 m/s
İletişim	3 x LVTTL seri port, USB 2.0, CAN bus, 1x Ethernet LAN (web GUI, raw veri stream, NTripCaster/NTripServer)
Boyut	71 mm x 46 mm x 11 mm
Ağırlık	24 g
Güç Tüketimi	<1.2 Watt, 3.2–4.5 V DC

Tablo 3.4: GPS-702-GG-HV Anteninin teknik özellikleri

Özellik	Açıklama
Desteklenen Sistemler	GPS (L1, L2), GLONASS (G1, G2)
Desteklenen Frekanslar	GPS+GLONASS L1/L2
Faz Merkezi Kararlılığı	Son derece kararlı faz merkezi
Multipath Reddi	Mükemmel multipath reddi (Pinwheel teknolojisi)
Çalışma Ortamı	Zorlu dış ortam koşullarına uygun
Koruma Sınıfı	IP67 (suya ve toza dayanıklı)
Boyut	Çap: 185 mm, Yükseklik: 69 mm
Ağırlık	600 g (yaklaşık)
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ile +85°C arası
Montaj	5/8" x 11 dişli dişli montaj adaptörü

3.4. GNSS Veri İşleme Yazılımları

3.4.1. Bilimsel, Ticari ve Açık Kaynak Kodlu Veri İşleme Yazılımları

GNSS veri işleme yazılımları, genellikle üniversitelerin ve jeodezi laboratuvarlarının yürüttüğü kapsamlı araştırma projeleri temel alınarak geliştirilmektedir. **Tablo 3.5**'te yer alan GNSS işleme yazılımları, başarıyla konum çözümleri üretebilmek için bir dizi ileri düzey fonksiyonu bir arada sunmaktadır. Bu kapsamda, uydu ve alıcı gözlemlerinin güvenilirliğini temin etmek amacıyla ayrıntılı ölçüm modellemeleri ve hassas yörünge entegrasyon modülleri bulunmaktadır. Ölçüm verilerindeki döngü kaymaları ve aykırı değerlerin otomatik olarak tespit edilip düzeltilmesine yönelik algoritmalar, çözüm güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca hem sabit hem de hareketli istasyonların koordinatlarının birlikte tahmin edildiği çoklu istasyon analizi, büyük ölçekli ağ ayarlamaları yapılmasına imkân tanımaktadır. İyonosferik ve troposferik gecikme etkilerinin modellenmesi ve bu parametrelerin eş zamanlı olarak kestirilmesi; sinyal frekanslarının oluşturduğu çift frekans çözümlemeleriyle birleştirilir. Taşıyıcı faz belirsizliklerinin çözülmesine odaklanan belirsizlik çözüm yöntemleri, milimetre altı hassasiyete ulaşmayı sağlar. Son olarak, elde edilen konum verilerinin farklı jeodezik referans çerçeveleri arasında tutarlı biçimde dönüşümü için gerekli parametre tahminleri de yazılım paketlerinin ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır [**Özdemir, 2014**], [**Teunissen vd., 2017**].

Özellikle ham GNSS verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan PPP tekniği için kullanılan bu yazılımlar, başlangıçta yalnızca IGS ve IGS çatısı altında hizmet veren analiz merkezlerinin belirli bir gecikmeyle sağladığı hassas uydu yörünge ve saat düzeltme ürünlerini temel alacak şekilde geliştirilmiştir; bu nedenle ilk sürümler, ham GNSS verilerinin toplanması sonrasında işlenip değerlendirilmesine ve konum çözümlerinin yalnızca PP yaklaşımıyla hesaplanmasına olanak tanıyacak biçimde yapılandırılmıştır. Nisan 2013'te IGS, dünya çapındaki izleme istasyonları ve veri merkezlerinden derlediği gerçek zamanlı GNSS gözlemleri ile hassas yörünge ve uydu saati düzeltmelerini, kod bazlı pseudorange ve taşıyıcı faz sapmalarını kullanıcılarına saniyeler mertebesinde gecikmeyle ulaştıran Gerçek Zamanlı Servis (Real Time Service, RTS) uygulamasını devreye almıştır. RTS, yayın efemerisi dahil tüm hassas veri setlerini kesintisiz biçimde sunarak, PP-PPP'ye ek olarak gerçek zamanlı (Real

Time, RT) PPP konumlandırma yazılımlarının geliştirilmesi için gerekli altyapıyı oluşturmuştur [Agrotis vd., 2017], [Web 12].

Tablo 3.5: Bilimsel, ticari ve açık kaynak kodlu veri işleme yazılımları.

Yazılımlar	Geliştiren Birim/Ülke
Bernese GNSS	Bern Üniversitesi Astronomi Enstitüsü/İsviçre
GIPSY-OASIS II	Jet Propulsion Laboratory- Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü
RTKLIB	Tokyo Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Üniversitesi/Japonya
TerraPos	Terra Tec A.Ş ve Norveç Hidrografi Servisi/Norveç
GPSTk	Uzay ve Jeofizik Laboratuvarı/ABD
Net_Diff	Shanghai Astronomical Observatory/Çin
PRIDE PPP-AR	Wuhan Üniversitesi GNSS Araştırma Merkezi/Çin
WaPPP	Lambert Wanninger/Almanya
gLAB	Katalonya Teknik Üniversitesi Astronomi ve Geomatik Araştırma Grubu/İspanya
BKG Ntrip Client (BNC)	Federal Kartoğrafya ve Jeodezi Ajansı/Almanya
GrafNav	NovAtel Limited Şirket/Kanada
PANDA	Wuhan Üniversitesi/Çin
EPOS-RT	Alman Yerbilimler Araştırma Merkezi/Almanya
GAMIT-GLOBK	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü/ABD
RTNet	GPS Solutions Limited Şirketi/ABD
RETINA	Avrupa Uzay Ajansı
PPP-WIZARD	Ulusal Uzay Araştırma Merkezi/Fransa
GNSMART	Geo++ şirketi/Almanya

3.4.2. Web Tabanlı Online Veri İşleme Yazılımları

Son yıllarda, dünya çapında ve bölgesel ölçekte kurulan GNSS referans istasyon ağlarının yaygınlaşması ve bu istasyonlardan toplanan verilerin internet üzerinden ücretsiz olarak çevrimiçi paylaşılması, başta Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi'nin (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) geliştirdiği Çevrimiçi Konumlandırma Kullanıcı Hizmeti (Online Positioning User Service, OPUS) ve

Geoscience Australia'nın geliştirdiği AUSPOS sistemi olmak üzere, hem bilimsel hem ticari GNSS yazılımları kadar teknik bilgi gerektirmeyen kullanıcı dostu web tabanlı GNSS gözlem verilerini işlemeye yardımcı hizmetlerin (**Tablo 3.6**) ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Bu servisler, kullanıcıların Alıcıdan Bağımsız Değişim formatındaki (Receiver Independent Exchange Format, RINEX) gözlem dosyalarını web arayüzleri üzerinden sisteme yükleyerek, sabit veya hareketli alıcılarının konumlarını referans istasyon ağına göre mutlak veya bağıl konumlama prensibiyle çözmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca, kullanıcı müdahalesini en aza indirerek basit bir dosya yükleme süreci sonrası sonuç raporlarını e-posta veya tarayıcı üzerinden sunmaktadır. Gelişmiş GNSS gözlem verilerini işleme yazılımları gibi ayrıntılı modellemeler ve veri işleme ayarlamaları; arka planda bu web tabanlı servislerin işlem motorlarında otomatik olarak gerçekleştirilmekte, kullanıcılar ise teknik karmaşıklığa girmeden santimetre altı düzeyde hassasiyet elde edebilmektedir [Guo, 2015], [Alkan vd., 2016], [Bahadur ve Nohutcu, 2018], [Tabar ve Şişman, 2023], [Web 13].

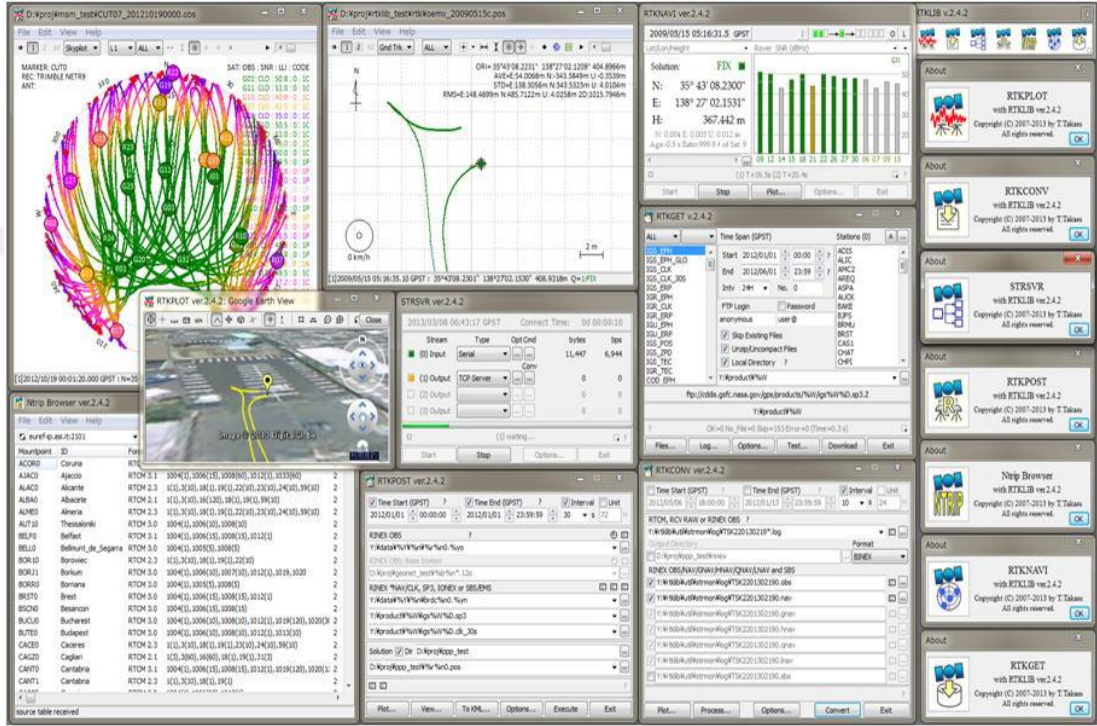
Tablo 3.6: Web tabanlı online veri işleme yazılımları.

Servis Adı	Organizasyon/Ülke
CSRS-PPP	Canadian Spatial Reference System/Kanada
GAPS Report	New Brunswick Üniversitesi/Kanada
AUSPOS	Geoscience Australia/Avustralya
OPUS	National Oceanic and Atmospheric Administration/ABD
APPS	NASA-JPL/ABD
Magic-GNSS	GMV/İspanya
Trimble Center Point RTX	Trimble/ABD
PPPH Online	Hacettepe Üniversitesi Geomatik Mühendisliği/Türkiye
Net_Diff Online	Shanghai Astronomical Observatory/Çin

3.5. RTKLIB Veri İşleme Yazılımı

RTKLIB, Tokyo Üniversitesi Deniz Bilimi ve Teknolojisi bölümü tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu ve modüler mimarisi sayesinde GNSS veri analizine esneklik kazandıran bir kütüphane olarak öne çıkmaktadır. RTKLIB yazılımı, RT ve

PP yöntemlerini kullanarak yüksek hassasiyetli konum doğruluğu sunmayı amaçlayan algoritmalar sağlamaktadır. Bu özelliği sayesinde hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Açık kaynak kodlu ve modüler mimarisi sayesinde, farklı GNSS sistemlerinden elde edilen ham verileri entegre biçimde işlemeye ve kullanıcıların kendi gereksinimlerine uygun parametre ayarlamaları yaparak optimizasyon gerçekleştirmesine imkân tanımaktadır [Web 14].



Şekil 3.3: RTKLIB arayüzü [Web 14].

RTKLIB yazılımı, Şekil 3.3'te gösterilen Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface, GUI) ve Karakter Kullanıcı Arayüzü (Character User Interface, CUI) modüllerini içermektedir. GUI ve CUI modüllerinin gerçekleştirdikleri işlevler Tablo 3.7'de listelenmiştir. Bu modüller, kullanıcıların ham ölçümleri (pseudorange, taşıyıcı faz, Doppler) ile navigasyon mesajlarını birleştirerek atmosferik gecikme, saat hataları ve multipath sinyal bozulmaları gibi belirsizlikleri istatistiksel yöntemlerle çözümlenerek minimize edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, yazılımın iyonosferik hata eliminasyonu ve troposferik modelleme gibi gelişmiş özellikleri, özellikle uzun baz hatlarında kararlı çözümler üretmek için kritik rol oynamaktadır [Web 14].

RTKLIB, akıllı mobil cihazlardan toplanan ham GNSS verilerinin işlenmesi ve analiz edilmesi sürecinde, akademik araştırmalar için özgün ve esnek bir çözüm sunmaktadır.

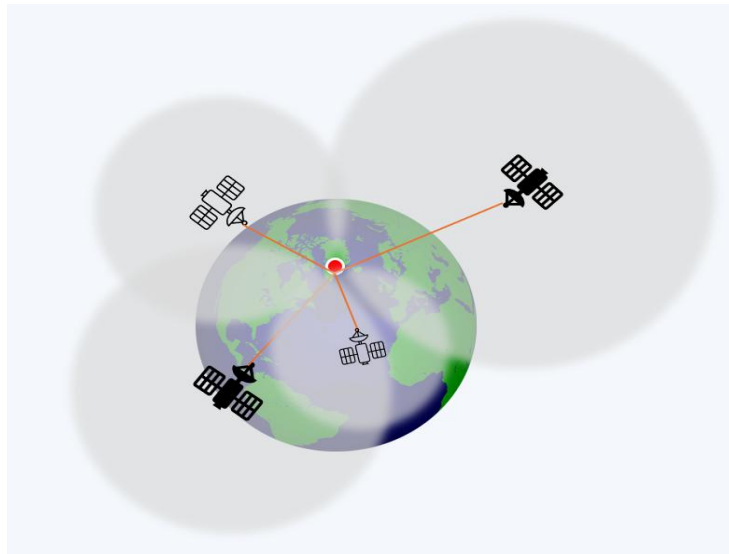
Açık kaynak kodlu mimarisi sayesinde, kullanıcılar akıllı mobil cihazların donanım sınırlamalarına rağmen yüksek doğruluklu sonuçlar üretebilmek amacıyla algoritmaları özgün gereksinimlere göre uyarlayabilmektedir. Yazılımın çoklu frekans desteği ile GPS, Galileo, GLONASS ve BeiDou gibi farklı GNSS sistemleriyle uyumlu çalışabilmesi, mobil cihazlardan elde edilen çeşitli veri setlerinin bütüncül biçimde işlenmesini mümkün kılmakta ve bu sayede konum belirleme doğruluğunu anlamlı ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, tez çalışmam kapsamında akıllı mobil cihazlardan elde edilen ham GNSS verilerinin değerlendirilmesinde, esnek parametre ayarları ve çoklu frekans desteği gibi avantajları sayesinde verilerin tutarlı biçimde işlenebilmesi amacıyla RTKLIB yazılımı tercih edilmiştir.

Tablo 3.7: RTKLIB yazılımına ait modüller [Web 14].

	İşlev	GUI modülleri	CUI modülleri
1	Uygulama Başlatıcısı	RTKLAUNCH	-
2	Gerçek Zamanlı Konumlandırma	RTKNAVI	RTKRCV
3	İletişim Sunucusu	STRSVR	STR2STR
4	Sonradan değerlendirme analizi	RTKPOST	RNX2RTKP
5	RINEX dönüştürücü	RTKCONV	CONVBIN
6	Grafik çözümleri ve gözlem verileri	RTKPLOT	-
7	GNSS verileri indirme	RTKGET	-
8	NTRIP Tarayıcısı	SRCTBLBROWS	-

4. GNSS KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ

GNSS konum belirleme yöntemleri, dünya yörüngesinde düzenli aralıklarla konumlandırılmış uyduların kesintisiz olarak yaydığı navigasyon mesajı, kod ve taşıyıcı faz sinyallerinin yeryüzündeki bir alıcı tarafından algılanması ve analiz edilmesine dayalı bir matematiksel çözümleme yöntemidir. Bu yöntemde, her bir uydu ile alıcı arasındaki mesafeyi ifade eden pseudorange değeri, uydu tarafından gönderilen sinyalin alıcıya ulaşma süresi ile ışık hızının çarpımı şeklinde hesaplanmaktadır. Bu sürenin belirlenmesi ise uydunun yüksek hassasiyetli atom saati ile alıcının yerel saat bilgisi arasındaki zaman farkının doğru biçimde ölçülmesini gerektirmektedir. Alıcı, en az dört farklı uydudan (**Şekil 4.1**) bu tür sinyalleri alarak, hem üç boyutlu konumunu (X, Y, Z) hem de saat ofsetini eşzamanlı olarak çözümleyebilmektedir. Geriye kestirme (trilaterasyon, üçgenleme) mantığına dayanan bu süreç, GNSS teknolojisinin temelini oluşturmakta ve zaman, konum ile navigasyon uygulamalarında yüksek doğruluklu çözümler sunmasına olanak sağlamaktadır. GNSS teknolojisi; havacılıktan deniz ulaştırmasına, hassas tarımdan acil durum müdahalelerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde hem sivil hem de askeri kullanıcıların navigasyon ve zamanlama ihtiyaçlarını karşılayarak modern konum belirleme yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır [Leick, 2004], [Misra ve Enge, 2012].



Şekil 4.1: GNSS konum belirleme için gerekli minimum uydu gereksinimi.

GNSS, L-bandında (1,2–1,6 Gigahertz) yayılan taşıyıcılar üzerinde modüle edilmiş, Sözde Rastgele Gürültü (Pseudo Random Noise, PRN) olarak adlandırılan C/A ve P kodlarını ileten L1 (1575,42 MHz) ile L2 (1227,60 MHz) frekanslarını kullanarak, yer yüzeyindeki alıcılara eş zamanlı olarak hem gerçek zamanlı kod tabanlı konum ve hız bilgisi hem de faz tabanlı yüksek doğruluklu ölçümler sunmaktadır [Misra ve Enge, 2012]. Alıcı ile uydu arasındaki pseudorange gözlemleri metre düzeyinde konum hassasiyeti sağlarken, taşıyıcı faz gözlemlerinde ise santimetre veya milimetre ölçeğinde hassasiyet sağlanabilmesi için tamsayı belirsizliklerinin çözülmesini gerektirmektedir. Pseudorange ve taşıyıcı faz gözlemleri, Tek Nokta Konumlandırma (Single Point Positioning, SPP), DGPS (Diferansiyel GPS), RTK ve PPP gibi çeşitli konumlama yöntemlerinde tek başına veya birlikte uygulanmaktadır. Böylelikle GNSS, her türlü atmosferik ve çevresel koşul altında küresel referans sistemlerine dayalı olarak geniş bir kullanım alanında hem gerçek zamanlı hem de sürekli olarak yüksek hassasiyetli konumlandırma ve zamanlama hizmeti sunabilmektedir [Leick, 2004], [Abdallah, 2016].

4.1. Kod Pseudorange (Sözde Menzil) Gözlemleri

GNSS, yeryüzündeki alıcıların konumlarını belirlemek için uydulardan yayılan sinyalleri kullanır. Bu sistemlerde, sivil kullanıcılar için tasarlanmış C/A kodu, 300 m dalga boyuna sahip birinci uydu taşıyıcı fazı L1 frekansı üzerinde modüle edilirken, daha hassas askeri uygulamalar için geliştirilen P kodu, 30 m dalga boyuna sahip L2 taşıyıcı frekansı üzerinde modüle edilmiştir. Bu kodlar, binary formatta olup, sinyalin uydudan gönderildiği (t^S) ve alıcı tarafından alındığı zaman (t^R) arasındaki farkın (Δt) ışık hızıyla (c) çarpılmasıyla elde edilen (4.1) eşitliğindeki pseudorange ölçümlerine dayanarak hesaplanan mesafe değerleridir [Abdallah M., 2016].

$$r = c. (t^R - t^S) = c. \Delta t \quad (4.1)$$

Üç boyutlu uzayda iki nokta arasındaki en kısa doğru mesafe Öklid uzaklığı ile tanımlanmaktadır. Uydu ile alıcı arasındaki Öklid uzaklığı GNSS alıcılarının temel ölçüm denklemlerinin ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır. Uydu koordinatı (X^S, Y^S, Z^S) ve alıcı koordinatı (X^R, Y^R, Z^R) olarak verildiğinde, aralarındaki gerçek geometrik mesafe (r), (4.2) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$r = \sqrt{(X^S - X^R)^2 + (Y^S - Y^R)^2 + (Z^S - Z^R)^2} \quad (4.2)$$

Pseudorange ölçümleri, uydu ve alıcı saatlerinin GPS zamanıyla tam senkronize olmaması durumunda **Şekil 4.2**'de sunulan sapmaları (bias) içerebilmektedir. Uydu saatindeki sapmalar (δ^S), navigasyon mesajlarında yer alan düzeltme parametreleri veya hassas uydu saat ürünleri yardımıyla düzeltilebilirken, alıcı saat sapması (δ^R) konum hesaplaması sırasında giderilmektedir. Bu nedenle, hesaplanan pseudorange değeri, uydu ile alıcı arasındaki gerçek mesafeyi tam olarak yansıtmak yerine, yaklaşık bir ölçüm sonucu sunmaktadır. Bu ölçüm üzerindeki hataların (ε) başlıca kaynakları arasında; iyonosfer ve troposfer tabakalarından geçen sinyallerin gecikmeye uğraması, sinyallerin yapı yüzeylerinden yansiyarak alıcıya ulaşması (multipath etkisi) ve uyduya ait yörünge ile saat bilgilerindeki doğruluk sınırlamaları yer almaktadır [Kaplan and Hegarty, 2006], [Hofmann-Wellenhof vd., 2007], [Abdallah M., 2016]. Belirtilen koşullar dikkate alındığında, ölçülen pseudorange uzunluğu Eşitlik 3.3'te sunulmuştur.

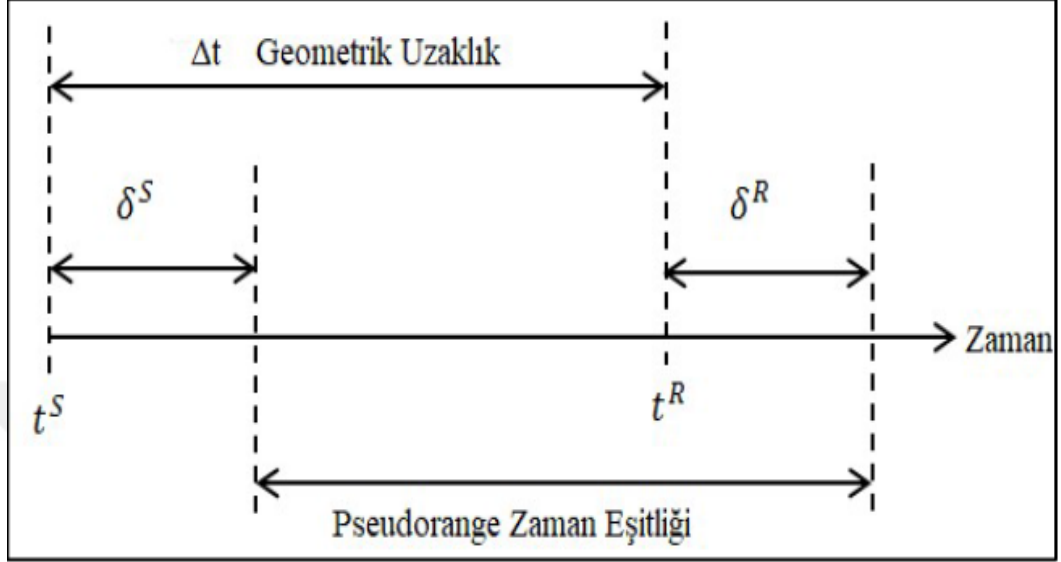
$$\rho = c((t^R + \delta^R) - (t^S + \delta^S)) + \varepsilon \quad (4.3)$$

Modellenmemiş hata terimleri göz önünde bulundurulduğunda, (4.3) numaralı eşitlik hataları da içerecek biçimde (4.4) numaralı eşitliğe genişletilebilir.

$$\rho = r + c(\delta^R - \delta^S) + \Delta_{iono} + \Delta_{trop} + \Delta_{sol} + \Delta_{pol} + \Delta_{ocn} + \Delta_{atm} + \Delta_{mul} + \varepsilon_p \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte, Δ_{iono} terimi iyonosfer tabakasının neden olduğu gecikmeyi temsil ederken, Δ_{trop} troposferik gecikme kaynaklı hatayı ifade etmektedir. Yer kabuğundaki katı gelgit hareketlerinin sebep olduğu deformasyonlar Δ_{sol} ile ifade edilirken, kutup hareketlerine bağlı olarak ortaya çıkan yer değiştirmeler Δ_{pol} terimi aracılığıyla dikkate alınmaktadır. Okyanus yüklemesi kaynaklı yüzey deformasyonları Δ_{ocn} ile modellenirken, atmosferik basınç değişimlerinden kaynaklanan yüklenme etkisi Δ_{atm} parametresiyle temsil edilmektedir. Ayrıca, sinyallerin çevredeki nesnelerden yansiyıp alıcıya ulaşması sonucu oluşan multipath etkisi Δ_{mul} terimiyle dikkate alınmakta ve ölçüm kalitesine doğrudan etki etmektedir. Son olarak, sistematik olarak

modellenemeyen ve rastgele karakteristikler gösteren kod gözlem hataları ise ε_ρ parametresi ile ifade edilmekte olup, çözüm doğruluğu üzerinde belirli bir belirsizlik oluşturabilmektedir [Abdallah M., 2016].



Şekil 4.2: Geometrik uzaklık ölçülerinin zamanla ilişkisi [Abdallah M., 2016].

4.2. Faz Pseudorange Gözlemleri

GNSS faz pseudorange gözlemleriyle uydu-alıcı mesafesinin hesaplanması, GNSS alıcısının taşıyıcı dalga fazındaki hem tam hem de kesirli çevrim sayısını dalga boyu (λ) ile çarpılarak elde edilen mesafe ölçümüdür. Bu toplam, sinyalin yayılma süresince kat ettiği tam faz döngüleri ile alıcıda tespit edilebilen kesirli faz farkının birleşiminden oluşmaktadır. Ancak sinyalin uydudan tam olarak ne zaman gönderildiği bilgisi doğrudan bilinemediğinden, bu tam faz döngüsü sayısı belirsizdir ve bu belirsizlik N sembolüyle ifade edilen başlangıç tam sayı faz belirsizliği (integer ambiguity) olarak tanımlanmaktadır. Alıcı, yalnızca sinyalin kesirli kısmını yüksek doğrulukla tespit edebilir; bu da faz gözleminin yüksek duyarlılığına katkıda bulunur. Ayrıca her bir uydu sinyali taşıyıcı dalga olarak benzer formda üretildiğinden, alıcı sinyalin hangi döngü parçasını ölçtüğünü belirleyemez. Bu nedenle alıcı, yalnızca gönderilen sinyal ile alıcının kendi ürettiği sinyal arasındaki faz farkını ölçebilir. Eğer taşıyıcı faz sinyalinde herhangi bir kesinti (loss of lock) ya da faz süreksizliği (cycle slip) meydana gelmezse, başlangıç tam sayı faz belirsizliği sabit kabul edilir ve konum çözümlemesi sırasında çeşitli algoritmalar yardımıyla güvenilir şekilde tahmin edilebilir. Ancak

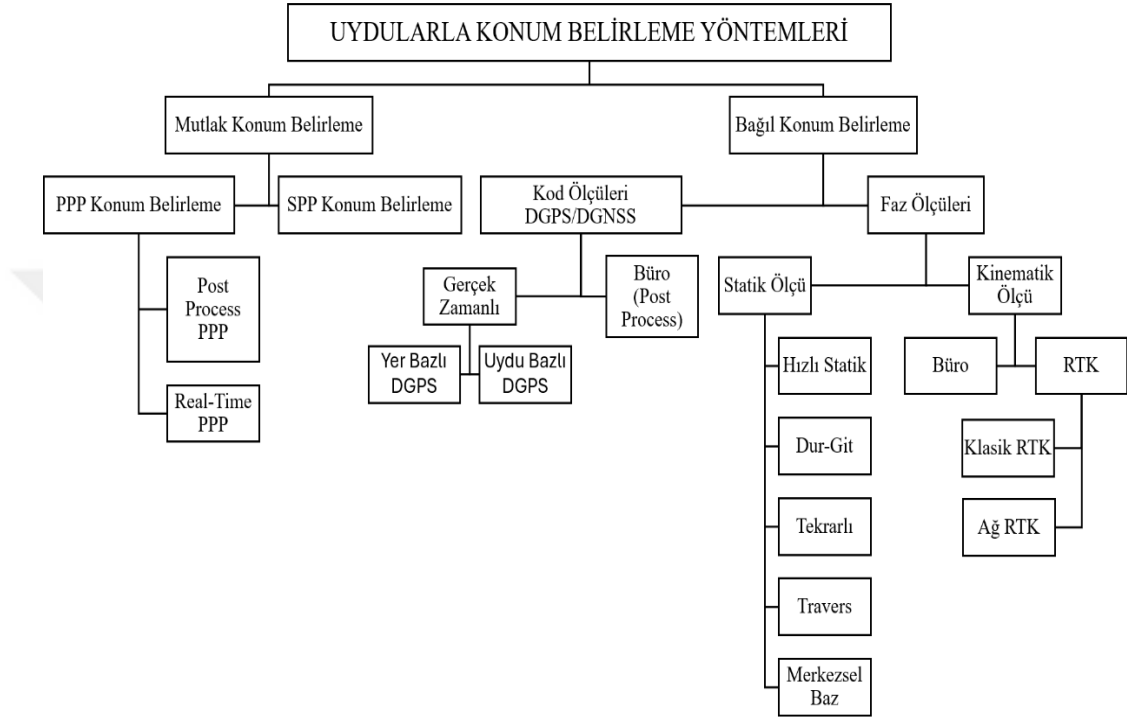
GNSS ölçümlerinde kesinti oluşumu, çeşitli çevresel ve sistemsel faktörlerden kaynaklanabilmektedir. Bunlar arasında; ağaçlar, binalar veya köprüler gibi yapılar nedeniyle uydu sinyalinin doğrudan engellenmesi, atmosferik etkiler, multipath, alıcının yüksek dinamik hareketleri veya düşük uydu yükseklik açıları gibi nedenlerle Sinyal-Gürültü Oranının (Signal to Noise Ratio, SNR) azalması ve son olarak da alıcı yazılımındaki olası arızalar yer almaktadır. Bu tür durumlar, ölçümlerde faz süreksizliğine neden olarak konum çözüm doğruluğunu ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, GNSS veri işleme süreçlerinde döngü kaymalarının zamanında tespit edilmesi ve uygun düzeltme yöntemleriyle giderilmesi, güvenilir ve hassas konum belirlemenin temel bir gerekliliği olarak kabul edilmektedir [El-Rabbany, 2002], [Hofmann-Wellenhof vd., 2012], [Abdallah M., 2016].

Bir uydu tarafından t^S anında yayınlanan Φ^S fazı ile alıcıda t^R anında üretilen Φ^R fazı arasındaki fark, gözlenen faz ölçümünü vermektedir. Faz gözlemlerinin kod pseudorange gözlemlerine kıyasla en büyük avantajı hassasiyetidir: L1 taşıyıcı dalgasının yaklaşık 0.19 m'lik dalga boyu, milimetre düzeyinde doğruluk sağlamaktadır [Misra ve Enge, 2012]. Taşıyıcı dalga faz ölçümünün metre cinsinden hesaplanması aşağıdaki temel denklemde (4.5) sunulmuştur.

$$\lambda\Phi = r + c(\delta^R - \delta^S) - \Delta_{iono} + \Delta_{trop} + \lambda N + \Delta_{sol} + \Delta_{pol} + \Delta_{ocn} + \Delta_{atm} + \Delta_{pcv} + \Delta_{mul} + \lambda w + \varepsilon_\Phi \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte, Φ taşıyıcı faz gözlemini, r uydu ile alıcı arasındaki gerçek geometrik uzaklığı, λ ise ilgili taşıyıcı frekansın dalga boyunu temsil eder. N , faz gözlemindeki başlangıç tam sayı faz belirsizliğini ifade ederken; Δ_{iono} iyonosfer kaynaklı kırılma gecikmesini, Δ_{trop} ise troposfer kaynaklı kırılma etkisini düzeltmek amacıyla matematiksel modele dahil edilir. Bunun yanı sıra, Δ_{sol} katı yeryüzü gelgitlerinden, Δ_{pol} kutup hareketlerinden, Δ_{ocn} okyanus yüklemelerinden, Δ_{atm} atmosferik basınç değişimlerinden kaynaklanan etkiler için düzeltme sağlar. Uydu ve alıcı antenlerine ait faz merkezi konum farklılıkları (Phase Center Variation) Δ_{pcv} terimi ile, antenin kendi ekseninde dönmesi sonucu oluşan faz sarması etkisi ise w ile ifade edilir. Δ_{mul} multipath etkisine yönelik düzeltmeyi içerirken, ε_Φ ise modellenemeyen, sistematik olmayan ve rastgele kalan diğer faz gözlem hatalarını temsil etmektedir.

Uydular aracılığıyla yapılan konum belirleme uygulamalarında, temel olarak iki farklı yaklaşım öne çıkmaktadır: Bunlar, "Mutlak Konum Belirleme" ve "Görelî Konum Belirleme" yöntemleridir (Şekil 4.3). Her iki yöntem de farklı uygulama alanlarına ve doğruluk gereksinimlerine yanıt vermek üzere geliştirilmiş olup, GNSS tabanlı konumlandırmanın temelini oluşturmaktadır.



Şekil 4.3: Uydu tabanlı konum belirleme yöntemleri [Kahveci vd., 2011].

4.3. Mutlak Konum Belirleme Yöntemi

Mutlak konum belirleme yöntemi, GNSS teknolojisinde tek bir alıcıdan alınan pseudorange gözlem verileriyle gerçekleştirilen temel konumlandırma tekniğidir. Bu yöntem, en az 4 dört (Şekil 4.1) GNSS uydusundan alınan sinyaller yardımıyla, alıcı ve uydu arasındaki mesafe ölçümleri kullanılarak nokta koordinatlarının uzay geriden kestirme prensibiyle belirlenmesine dayanmaktadır. Mesafelerin belirlenmesinde kullanılan gözlem türlerine bağlı olarak, kod tabanlı ve faz tabanlı yöntemler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır: SPP ve PPP. Kod gözlemlerine dayanan SPP yönteminde, uydu ve alıcı arasındaki pseudorange değerleri, uydu tarafından yayınlanan efemeris (uydu yörünge ve saat düzeltmelerini içeren) bilgileri ile

değerlendirilerek gerçek zamanlı olarak metre seviyesinde konum belirleme sağlanmaktadır. Çift frekanslı kod ve faz gözlemleriyle desteklenen PPP yöntemi ise yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. PPP yönteminde, GNSS uydularının yörünge ve saat hatalarını minimize eden yüksek doğruluklu düzeltme ürünleri kullanılmaktadır. Bu düzeltmeler, IGS tarafından sağlanan yayın efemerisleriyle gerçek zamanlı veya ölçüm sonrasında değerlendirme şeklinde kullanıcılarla paylaşılmaktadır. Tek frekanslı pseudorange gözlemlerine dayanan basit SPP tekniğinde, iyonosfer kaynaklı gecikmeler gibi büyük hatalar, navigasyon mesajlarındaki modeller ya da harici modeller aracılığıyla azaltılırken, çift veya çok frekanslı gözlemler iyonosfer etkisini daha etkin bir şekilde gidererek santimetre seviyesine yakın konumlandırma doğruluğuna ulaşılabilir. GNSS ile mutlak konumlandırmada SPP ve PPP yöntemleri, uygulamanın hassasiyet ve doğruluk gereksinimlerine bağlı olarak seçilir. SPP yöntemi, metre düzeyindeki doğruluğu nedeniyle yüksek hassasiyet gerektirmeyen navigasyon uygulamalarında tercih edilirken, PPP yöntemi yüksek doğruluk ve güvenilirlik gerektiren hassas uygulamalar için tercih edilmektedir [Abdallah M., 2016], [Kahveci, 2017], [Teunissen vd., 2017].

4.4. Bağlı Konum Belirleme Yöntemi

Bağlı konum belirleme yöntemlerinde, kullanıcıların kesin konumu, uydulardan alınan sinyallerin yanı sıra koordinatları hassas olarak bilinen bir referans istasyonundan ya da eş zamanlı olarak ölçüm yapan hassas GNSS cihazlarından elde edilen düzeltme bilgileri yardımıyla belirlenmektedir. Bu yaklaşımda, biri koordinatları kesin olarak bilinen referans istasyonunda, diğeri ise ölçüm yapılacak noktada olacak şekilde en az iki alıcı eş zamanlı olarak veri toplar ve ölçümler arasındaki farklar yardımıyla hedef alıcının kesin koordinatları belirlenir. Böylece, mutlak konum belirlemeye kıyasla çok daha yüksek doğruluk seviyelerine ulaşmak mümkün olmaktadır. Mutlak konum belirlemeye kıyasla çok daha yüksek doğruluk sunan bu yöntemde hem kod hem de taşıyıcı faz gözlemleri kullanılabilir. Özellikle kod ölçülerine dayalı olarak gerçekleştirilen ve metre seviyesinde hassasiyet sunan sistemler, DGNSS olarak adlandırılır. DGNSS, klasik haritacılık uygulamaları için yeterli doğruluk sağlasa bile, daha hassas ölçümler gerektiğinde kod yerine faz gözlemlerinin tercih edilmesi gerekmektedir. Ancak faz gözlemlerinin kullanımı, faz belirsizliği gibi ek problemlerin

çözümünü gerektirmektedir. Yöntem, PP veya RT çözüm olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bağıl konum belirleme, mutlak konum belirlemeye göre daha yüksek hassasiyet sunarken; zaman, maliyet ve operasyonel kolaylık bakımından süreçte çeşitli geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Teknolojik ilerlemelerle birlikte, konum belirleme yöntemleri; kullanılan cihaz ve ekipman, donanım özellikleri, seçilen ölçüm modu (statik veya kinematik), tercih edilen gözlem türü (kod veya faz ölçümleri) ve uygulanan veri işleme teknikleri açısından önemli ölçüde çeşitlenmiş ve gelişmiştir [Kahveci vd., 2011], [Abdallah M., 2016], [Kahveci, 2017].

Mobil iletişim sistemlerinde, belirli bir doğruluk düzeyinde konum bilgisinin elde edilmesini sağlayan yöntemler arasında DGNSS öne çıkmaktadır. DGNSS, geleneksel haritalama ve navigasyon uygulamalarında metre seviyesinde konum doğruluğu sunarken, daha karmaşık ve yüksek hassasiyet gerektiren senaryolarda bu doğruluk yetersiz kalmakta ve farklı tekniklerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu gereksinim doğrultusunda, kod tabanlı ölçümler yerine taşıyıcı faz gözlemlerinin kullanılması yaygınlaşmıştır. Ancak, faz ölçümlerinin kullanılmasının avantajı yüksek duyarlılık sağlarken, temel dezavantajı ise faz farklarının doğru şekilde tespit edilmesi gerekliliğidir. GNSS tabanlı konumlandırma yöntemleri, kullanıcıya hızlı ve yüksek doğruluklu sonuçlar sunmaları nedeniyle en çok tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, mutlak konumlandırma sistemlerinde elde edilen ham verilerin hassasiyeti, yüksek doğruluk gerektiren mühendislik uygulamaları için çoğu zaman yetersiz kalabilmektedir. Özellikle faz tabanlı ölçümlerde, en yüksek doğruluk genellikle aynı noktada birden fazla GNSS alıcısıyla eş zamanlı olarak yapılan statik ölçümlerle sağlanır; bu yöntem santimetre veya milimetre seviyesinde duyarlılık imkânı tanır. Ancak, statik ölçüm verilerinin değerlendirilmesi ve sonradan işlenmesi ek zaman gerektirmektedir [Yalçın vd., 2008].

5. HASSAS NOKTA KONUMLANDIRMA (PPP)

PPP yöntemi, ilk olarak 1970’li yıllarda uydu tabanlı konumlandırma çalışmaları kapsamında gündeme gelmiştir. Richard J. Anderle’nin 1976 yılında gerçekleştirdiği öncü çalışma, tek bir alıcıdan elde edilen Doppler uydu gözlemleri ve hassas yörünge bilgilerinin bir araya getirilerek mutlak konum belirleme olanağı sunabileceğini göstermiştir. Ancak, PPP tekniği uzun süre geniş bir uygulama alanı bulamamıştır. 1990’lı yılların sonlarına gelindiğinde, GPS verilerinin zamanla artan doğruluğu ve uluslararası GNSS servislerinin gelişmesiyle birlikte, PPP yeniden ilgi görmeye başlamıştır. 1994 yılında IGS yüksek hassasiyetli uydu yörünge ve saat ürünlerini araştırmacıların kullanımına sunması, jeodezik uygulamalarda santimetre düzeyinde konum doğruluğunun tek bir alıcı ile elde edilmesini mümkün kılmıştır. Bu gelişmeler, PPP yönteminin teorik bir fikir olmaktan çıkıp uygulamada etkin ve yüksek doğruluklu bir konumlandırma tekniği olarak benimsenmesini sağlamıştır **[Kouba, 2003], [Rizos vd., 2012]**.

PPP tekniğinin GPS ile etkin ve uygulanabilir bir yöntem olarak ortaya çıkışı, 1990’ların sonlarında NASA bünyesinde yürütülen bilimsel çalışmalar sayesinde gerçekleşmiştir. Zumberge ve arkadaşlarının 1997 yılında Journal of Geophysical Research dergisinde yayımladıkları makalede, ilk kez çok geniş GNSS ağlarından elde edilen verilerin alıcılar arası fark almaksızın (undifferenced), “sıfır fark” yaklaşımıyla (yani alıcılar arası fark almadan) analiz edilmesiyle PPP tekniği uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, geleneksel ağ çözümleriyle karşılaştırılabilir doğrulukta konum bilgisi elde edilebildiğini göstermiş ve bu yönüyle PPP’nin pratikte kullanılabilirliğini bilimsel olarak ortaya koymuştur. Yapılan doğrulamalar, doğru bir şekilde modellenmiş PPP çözümleriyle statik uygulamalarda santimetre düzeyinde, kinematik uygulamalarda ise desimetre seviyesinde doğruluk sağlanabileceğini göstermiştir **[Zumberge vd., 1997], [Grinter ve Roberts, 2013]**.

2000’li yılların başında, Kanada Doğal Kaynaklar Kurumu’ndan **Kouba ve Héroux (2001)** tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, IGS tarafından sağlanan hassas uydu yörünge ve saat bilgileri ile çift frekanslı kod ve faz verilerinin kullanımını detaylandırarak PPP yönteminin uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmıştır. Bu yaklaşım, tek bir GPS alıcısının IGS’in kesin yörünge ve saat ürünleri ile kapsamlı matematiksel modellerden yararlanarak santimetre mertebesinde koordinat

hassasiyetine ulaşabileceğini göstermiştir. Aynı dönem içerisinde, **Gao ve Shen (2002)** tarafından yürütülen çalışmalar, taşıyıcı faz gözlemlerine dayalı yeni PPP teknikleri önererek, özellikle kinematik uygulamalarda hem çözüm doğruluğunu hem de yakınsama süresini iyileştirmeye odaklanmıştır. Tüm bu araştırmalar, PPP yönteminin teorik altyapısının güçlenmesini ve pratikte tek bir alıcı ile santimetre seviyesinde kesin konumlanmanın mümkün olduğunun yaygın şekilde kabul görmesini sağlamıştır.

PPP tekniği, çoklu GNSS uydu sistemlerinin entegrasyonu ve taşıyıcı faz kayması belirsizliklerinin tamsayı olarak çözülmesine olanak sağlayan PPP-AR (Ambiguity Resolution) gibi yenilikçi yaklaşımlarla önemli ölçüde geliştirilmiştir. 2007 yılında IGS tarafından başlatılan gerçek RT-PPP pilot projesiyle kullanıcılara gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltmelerinin sunulması sağlanmış, böylece anlık PPP çözümlerinin elde edilmesi mümkün hale gelmiştir [**Grinter ve Roberts, 2013**].

Ayrıca, **Collins (2008)** ve **Laurichesse (2009)** tarafından gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar, PPP tekniğinin hem doğruluğunda hem de güvenilirliğinde önemli iyileşmelerin önünü açmıştır. Bu gelişmelerin odağında, taşıyıcı faz gözlemlerinde yer alan tamsayı faz belirsizliğinin doğru biçimde modellenmesi ve çözülmesi bulunmaktadır. Collins'in önerdiği "Decoupled Clock Model" yaklaşımında, kod ve faz sinyallerine ait saat parametreleri birbirinden ayrıştırılarak değerlendirilmiş ve bu sayede faz belirsizliklerinin tamsayıya dönüştürülmesi kolaylaştırılmıştır. Laurichesse ve çalışma arkadaşlarının geliştirdiği "Integer Recovery Clock" yöntemi ise, uydu saat düzeltmelerine faz sapmalarının entegre edilmesiyle taşıyıcı faz gözlemlerindeki belirsizliklerin tamsayı olarak güvenle çözümlenebilmesini mümkün kılmıştır. Böylece PPP çözümlerinde karşılaşılan kesirli faz belirsizlikleri, bu yeni modeller sayesinde tamsayı biçiminde belirlenebilmekte; bu da PPP uygulamalarında hem konumlandırma hassasiyetini hem de çözümün yakınsama hızını anlamlı ölçüde artırmaktadır. Sonuç olarak, Collins ve Laurichesse'in katkıları, GNSS tabanlı hassas konum belirleme uygulamalarının daha kısa sürede ve daha yüksek doğrulukla gerçekleştirilmesini sağlayan önemli bir dönüm noktası olmuştur. Günümüzde PPP tekniği, PP modunda jeodezik çalışmalar için standart bir çözüm yöntemi haline gelmiş olup, aynı zamanda RT uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyet ve esneklik sunan bu yenilikçi yöntem, konumlandırma teknolojilerinde hem bilimsel hem de uygulamalı alanlarda önemli bir yer edinmiştir.

5.1. PPP Yönteminin Matematiksel Modeli

PPP tekniğinde, tek bir GNSS alıcısından elde edilen çift frekanslı ham gözlemler temel alınmaktadır. Özellikle L1 ve L2 taşıyıcı frekanslarındaki pseudorange ve faz ölçüleri, fark alınmamış biçimde doğrudan değerlendirilir. Bu yöntemde, iki frekansın birlikte kullanılması, iyonosfer kaynaklı birinci dereceden gecikme etkilerinin neredeyse tamamını ortadan kaldıran iyonosferden bağımsız (ionosphere-free) lineer kombinasyonların oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu kombinasyon, kod ölçülerinde gecikmeyi ve faz ölçülerinde ise fazda oluşan fazlalığı büyük oranda elimine ederek konum çözümündeki başlıca hata kaynağını azaltmaktadır. Ancak, bu işlem sonrasında dahi sinyalde daha düşük düzeyli, yüksek mertebeden iyonosferik etkiler kalabilmektedir; dolayısıyla milimetre hassasiyetinde çözümler elde etmek için ikinci ve üçüncü derece iyonosfer düzeltmeleri de modele eklenmektedir. PPP yönteminin matematiksel modeli, çift frekanslı fark alınmamış gözlemlerin, hassas yörünge ve uydu saat düzeltmeleriyle ileri hata modellerinin birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu modelleme yaklaşımı, özellikle iyonosferik etkilerin giderilmesinde çift frekansın avantajlarından yararlanılmasını mümkün kılmıştır [Kouba ve Héroux 2001], [Elsobeiey ve El-Rabbany, 2009], [Xu vd., 2011].

PPP'nin temel gözlem denklemleri, klasik pseudorange ve taşıyıcı faz ölçümlerinin daha gelişmiş ve detaylı bir biçimde modellenmiş versiyonudur. Bu denklemler, GNSS ölçümlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla hassas yörünge ve saat düzeltmeleri ile çeşitli atmosferik ve sistematik hata bileşenlerini de kapsamaktadır. Bu doğrultuda, L1 ve L2 taşıyıcı frekanslarında elde edilen ham kod ve taşıyıcı faz gözlemleri, bir GNSS alıcısı ile bir GPS uydusu arasındaki ilişkiyi aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade etmek mümkündür.

$$P_i = \rho' + c(dt^r - dt^s) + (b_{P_i}^r - b_{P_i}^s) + \Delta_{trop_i} + \Delta_{iono_i} - v + PCV_i^s + APC_i^r + \varepsilon_{P_i} \quad (5.1)$$

$$\Phi_i = \rho' + c(dt^r - dt^s) + (b_{\Phi_i}^r - b_{\Phi_i}^s) + \Delta_{trop_i} - \Delta_{iono_i} - v + PCV_i^s + APC_i^r + \lambda_i N_i + \frac{\lambda_i}{2\pi} \phi_\omega + \varepsilon_{\Phi_i} \quad (5.2)$$

Yukarıdaki 5.1 ve 5.2 denklemlerinde, P_i taşıyıcı sinyalin pseudorange ölçüsünü, Φ_i ise faz ölçüsünü, i alt simgesi frekans indeksini belirtir. ρ' sembolü, alıcı ile uydu arasındaki geometrik mesafeyi (metre cinsinden), c ışık hızını temsil eder. Alıcı ve uydu saat hatalarını sırasıyla dt^r , dt^s değerleri saniye cinsinden ifade eder. Alıcı ve uydu pseudorange gecikmelerini $b_{P_i}^r$, $b_{P_i}^s$ değerleri, alıcı ve uydu faz gecikmelerini ise $b_{\Phi_i}^r$, $b_{\Phi_i}^s$ değerleri ifade etmektedir. Δ_{trop} troposferik gecikmeyi, Δ_{iono} iyonosferik gecikmeyi temsil eder; v rölatiflik etkilerini dikkate alır. PCV_i^s uydu faz merkezi varyasyonu hatasını, APC_i^r ise alıcı anten faz merkezi hatalarını belirtir. ε_{P_i} ve ε_{Φ_i} multipath ve alıcı gürültüsünü sırasıyla kod ve faz ölçümleri için göstermektedir. Değerlerin tümü metre cinsindendir. Döngülerin tamsayı belirsizliği N_i ile sembolize edilir ve faz dönme etkisi ϕ_ω radyan cinsinden ölçülmektedir. Alıcı ile uydu arasındaki geometrik mesafeyi ifade eden ρ' sembolünün üzerindeki üst simge olarak kullanılan $(\cdot)$ işaret, hesaplanan mesafenin yalnızca gerçek uydu-alıcı geometrisine değil; aynı zamanda Sagnac etkisi, uydu yörünge hataları ve istasyon yer değiştirmeleri gibi çeşitli sistematik etkilere de maruz kaldığını ifade etmektedir. Buna ek olarak, eğer uydu konumu veya düzeltmeleri uydu kütle merkezi (Center of Mass) esas alınarak tanımlanmışsa, bu mesafe aynı zamanda uydu faz merkezi ofsetini de içermektedir. Bu nedenle, gözlenen mesafe; yalnızca saf geometrik uzaklığı değil, çeşitli fiziksel ve jeodezik hata kaynaklarının bileşimini temsil etmektedir [Kouba 2003], [Elsheikh vd., 2023].

GNSS sinyalleri, uzaydan Dünya'ya ulaşırken iyonosfer tabakasında gecikmeye uğrar ve bu, özellikle tek frekanslı alıcılar için önemli bir hata kaynağıdır. Ancak, GNSS uydularının farklı frekanslarda yayın yapması sayesinde, L1 ve L2 gibi iki taşıyıcıda alınan ölçümlerin uygun lineer kombinasyonu ile iyonosferin birinci mertebeden etkisi tamamen ortadan kaldırılabilir. Böylece, çift frekanslı alıcılarla iyonosferik hatalar büyük ölçüde giderilmiş olur [Elsheikh vd., 2023]. Bu doğrultuda denklemler aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P_{if} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 = \rho + c(dt_r - dt_s) + \Delta_{trop} + M_p + \varepsilon_p \quad (5.3)$$

$$\Phi_{if} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2 = \rho + c(dt_r - dt_s) + \Delta_{trop} + \lambda_{if} N_{if} + M_\Phi + \varepsilon_\Phi \quad (5.4)$$

Burada P_{if} ve Φ_{if} sırasıyla iyonosferden arındırılmış pseudorange ve taşıyıcı fazı ifade etmektedir; f_1 ve f_2 taşıyıcı sinyallerin başlangıç frekansları; P_1 , P_2 , Φ_1 ve Φ_2 ise sırasıyla f_1 ve f_2 frekanslarında alınan kod ve taşıyıcı faz ölçümleridir. ρ , GPS uyduları ile gezici alıcı arasındaki geometrik mesafedir; c , ışık hızını temsil eder; dt_r ve dt_s sırasıyla alıcı saat ve uydu saat hatalarını ifade eder; Δ_{trop} troposferik gecikmeyi gösterir. M_p ve M_Φ sırasıyla kod ve taşıyıcı faz ölçümlerindeki diğer hata bileşenlerinin toplamıdır; ε_p ve ε_Φ sırasıyla kod ve taşıyıcı faz ölçümlerindeki gürültüyü ifade etmektedir. λ_{if} ve N_{if} sırasıyla (Denklem 5.5 ve 5.6) iyonosferden arındırılmış dalga boyu ve faz belirsizliğidir; N_1 ve N_2 ise sırasıyla λ_1 ve λ_2 dalga boylarındaki faz belirsizlikleridir [Ge vd., 2008], [Xu vd., 2011].

$$\lambda_{if} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 \quad (5.5)$$

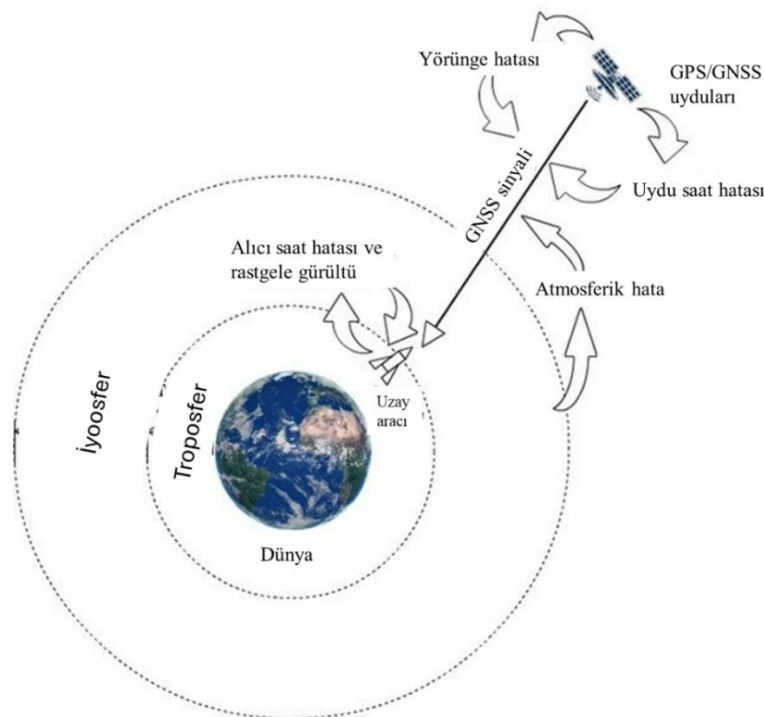
$$N_{if} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} N_2 \quad (5.6)$$

İyonosferden bağımsız PPP modeli, bazı avantajlarının yanı sıra belirli dezavantajlara da sahiptir. Öncelikle, bu modelde yalnızca birinci dereceden iyonosferik etkiler ortadan kaldırılabilirken, daha yüksek dereceli iyonosferik etkiler tamamen elimine edilememektedir. Her ne kadar bu etkiler çok düşük seviyede olsa da iyonosferden geçen sinyalin elektron yoğunluğundaki zamansal değişimler, uydu-alıcı mesafesinin santimetre düzeyinde hatalı hesaplanmasına yol açabilmektedir. Bununla birlikte, kod ve faz gözlemlerinin lineer kombinasyonları kullanıldığında, elde edilen gözlemlerin gürültü seviyesi ham kod ve taşıyıcı faz gözlemlerine kıyasla daha yüksek olmaktadır. Ayrıca, faz ölçümlerinde yer alan tam sayı faz belirsizliği, L1 ve L2 taşıyıcı faz

kombinasyonunda kısmen çözülebildiğinden, PPP çözümünde yakınsama süresi uzayabilmektedir. Bu durum, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda modelin performansını sınırlayan temel etkenler arasında yer almaktadır [Gao ve Shen, 2002].

5.2. GNSS ile Konum Belirlemede Hata Kaynakları

GNSS teknolojileri doğası gereği rastgele ve sistematik hatalarla kusurludur. Bu hataları ortadan kaldırmak veya azaltmak için hatanın davranışını ve büyüklüğünü anlamak çok önemlidir. Bu tür hata kaynakları, uydu ile alıcı arasındaki görünür geometriye bağlı olarak, yani uydunun azimut ve yükseklik açısına göre değişkenlik gösterir. Yüksek hassasiyet gerektiren jeodezik uygulamalarda bu hataların etkilerinin matematiksel modeller yardımıyla sistemden ayrıştırılması gerekmektedir. Bu noktada, En Küçük Kareler (Least Squares, LS) yöntemi devreye girer; çünkü LS yöntemi hata kaynaklarının nokta koordinatları üzerindeki etkisini hesaplayarak model optimizasyonunu sağlamaktadır. Böylece, sistematik sapmaların azaltılması ve koordinat güvenilirliğinin artırılması mümkün hale gelmektedir [Santerre, 1991], [Mutlu ve Kahveci, 2019].



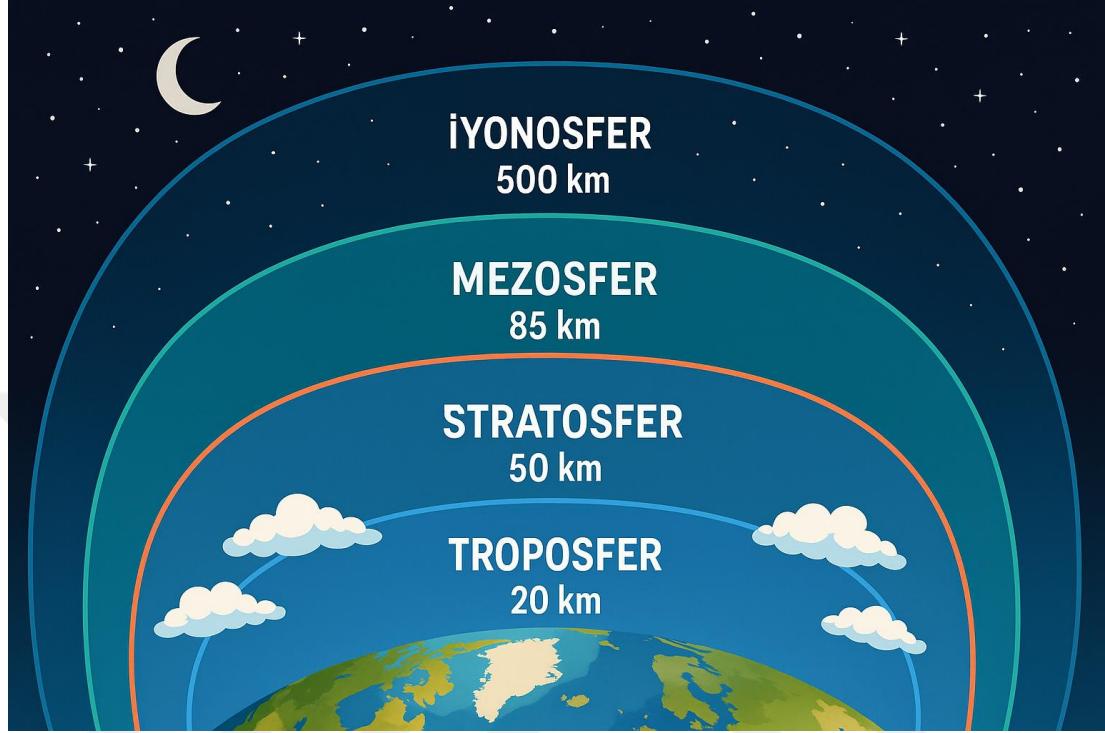
Şekil 5.1: GNSS hata kaynakları.

GNSS ölçümlerinde konum doğruluğunu doğrudan etkileyen **Şekil 5.1**'deki hata kaynakları, genellikle uydu sistemine, alıcı donanımına ve çevresel koşullara bağlı olarak üç ana başlıkta incelenmektedir. Bu bağlamda, iyonosferik gecikmeler, GNSS sinyalinin serbest elektron yoğunluğu yüksek atmosfer tabakasından geçerken maruz kaldığı gecikmeleri temsil ederken; troposferik etkiler, sinyalin alt atmosferdeki su buharı ve basınca bağlı olarak uğradığı kırılmaları ifade etmektedir. Çevresel kaynaklı bir diğer önemli hata ise sinyalin binalar, ağaçlar veya zemin gibi yüzeylerden yansyarak alıcıya ulaşmasıyla oluşan multipath etkisidir. Ayrıca, uydu yörünge hataları ve uydu/alıcı saat senkronizasyonundaki tutarsızlıklar da sinyalin alıcıya geliş süresinin yanlış hesaplanmasına neden olabilmektedir. GNSS konumlamasında kullanılan uyduların mekânsal dağılımı, yani uydu geometrisi (Dilution of Precision, DOP) kavramı ile ifade edilir ve bu da ölçüm doğruluğu üzerinde doğrudan etkili bir unsurdur. Alıcı antenlerinin faz merkezi konumundaki belirsizlikler ile taşıyıcı dalga fazında oluşabilecek belirsizlikler ve faz kesintileri de konum hesaplamalarında dikkat edilmesi gereken diğer hata bileşenleridir. Bu hata kaynaklarının modellenmesi, filtrelenmesi veya düzeltici ürünlerle minimize edilmesi, yüksek hassasiyetli GNSS uygulamaları için kritik bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır [Misra ve Enge, 2012], [Karaim vd., 2018], [Elsheikh vd., 2023].

5.2.1. İyonosferik ve Troposferik Etki

GNSS sinyalleri, yeryüzüne ulaşmadan önce atmosferin farklı katmanlarından geçerken çeşitli fiziksel etkilere maruz kalmaktadır. Bu katmanlardan özellikle iyonosfer ve troposfer, sinyalin yayılma hızını etkileyerek konum belirlemede hatalara neden olabilen başlıca atmosferik engellerdendir. **Şekil 5.2**'de gösterildiği üzere, GNSS uyduları atmosferin bu katmanlarının dışında yer almakta ve sinyaller yeryüzündeki alıcılara ulaşmadan önce sırasıyla iyonosfer ve troposferden geçmektedir. İyonosfer, iyonize parçacıklardan oluşan yapıyla sinyalin frekansına bağlı olarak değişken gecikmelere yol açarken; troposfer, sıcaklık, basınç ve nem gibi meteorolojik faktörlere bağlı olarak sinyalin gecikmesine neden olmaktadır. Bu atmosferik etkiler, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda konum doğruluğunu ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, GNSS sinyallerinin bu katmanlardaki davranışlarının modellenmesi ve etkilerinin düzeltilmesi, konum belirleme doğruluğunun artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda,

iyonosfer ve troposferin fiziksel yapıları ile GNSS sinyalleri üzerindeki etkilerinin detaylı olarak anlaşılması, hata düzeltme modellerinin etkinliğini doğrudan belirlemektedir [Karaim vd., 2018].



Şekil 5.2: Atmosferin Katmanları.

İyonosfer, atmosferin en üst katmanlarından biri olup, içerisinde yüksek yoğunlukta serbest elektron barındırması nedeniyle elektromanyetik dalgaların yayılımını doğrudan etkileyen bir yapıya sahiptir. Bu katman, güneşten gelen ultraviyole ve X-ışını radyasyonu sonucunda atom ve moleküllerin iyonlaşması ile oluşmaktadır. İyonosferdeki serbest elektron yoğunluğu, güneş radyasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterir; bu değişim, GNSS sinyallerinin iletim hızında sapmalara neden olur. Bununla birlikte, iyonosferin kırılma indisi mevsimsel döngülere ve gün içindeki saat dilimlerine göre farklılık göstermekte, bu da GNSS sinyallerinin doğrusal yol boyunca yayılmasında kırılma ve gecikme etkilerini beraberinde getirmektedir. İyonosferin fiziksel yapısı ve zamanla değişen iyonlaşma yoğunluğu, konum belirleme doğruluğunu doğrudan etkileyen önemli bir hata kaynağı olarak değerlendirilmekte ve bu nedenle GNSS uygulamalarında modellenmesi gereken kritik bir atmosferik katman olarak öne çıkmaktadır [Karaim vd., 2018].

Uydu ile alıcı arasındaki mesafenin belirlenmesinde kullanılan GNSS sinyalleri, iyonosferden geçerken gecikmeye uğradığından, ölçülen yol uzunluğu gerçek geometrik mesafeyi yansıtmaz. Bu gecikme miktarı, sinyalin frekansına ters orantılı olarak değişmekte olup, Δ_{iono} iyonosferik hata genellikle aşağıdaki matematiksel ifade ile modellenmektedir:

$$\Delta_{iono} = \pm \frac{40.28}{f^2} TEC \quad (5.7)$$

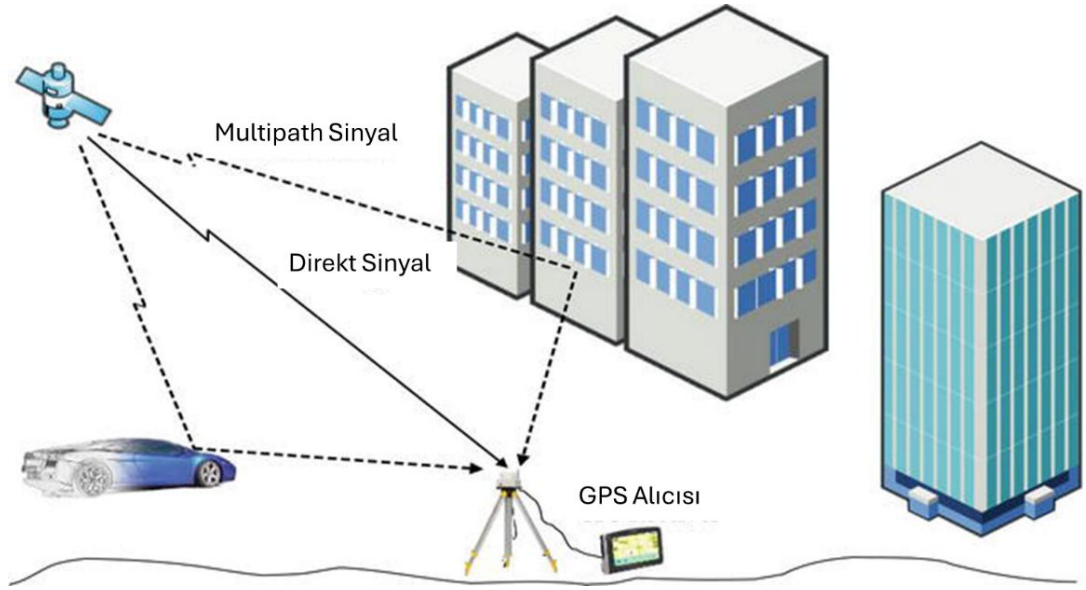
Burada f sinyal frekansını, TEC (Total Electron Content) ise uydu ile alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca bulunan Toplam Elektron Yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu formülasyon, iyonosferik gecikmenin nicel olarak hesaplanmasına olanak sağlayarak GNSS ölçümlerinde düzeltme yapılmasına katkı sunmaktadır [Karaim vd., 2018].

GNSS sinyallerinin yeryüzüne ulaşma sürecinde iyonosfer tabakasının neden olduğu etkiler, kod ve taşıyıcı faz gözlemleri üzerinde farklı biçimlerde ortaya çıkmaktadır. Kod gözlemlerinde sinyal, iyonosferden geçerken grup gecikmesine uğrarken; faz gözlemlerinde ise sinyalin fazı hızlanmış gibi görünür. Bu durum, alıcı ile uydu arasındaki mesafe hesabında önemli sapmalara yol açabilmektedir. Ayrıca, gözlenen uydunun yükselme açısı da iyonosferik etkinin büyüklüğünü belirleyen önemli bir parametredir. Yüksek açılarda iyonosferik etki azalmakla birlikte, troposfer kaynaklı hataların artmasına neden olabilir. Bu nedenle iyonosferik etkiyi azaltmaya yönelik çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bunlar arasında çift frekanslı GNSS alıcılarının kullanımı, farklı takviye sistemlerinin entegrasyonu ve iyonosferik modellemeler (örneğin tek frekanslı sistemler için Klobuchar ya da NeQuick) yer almaktadır [Angrisano vd., 2013]. Her ne kadar çift frekanslı sistemler iyonosferik etkileri önemli ölçüde azaltabilse de, modellerin ortalama başarı oranı yaklaşık %50 düzeyindedir. Buna karşılık, troposferin GNSS sinyalleri üzerindeki etkisi iyonosferden farklıdır. Troposfer, atmosferin yere en yakın ve su buharı ile kuru hava karışımından oluşan katmandır ve yaklaşık 20 km yüksekliğe kadar uzanır. Bu katmanda iyonosferdeki gibi serbest elektron bulunmadığından, troposferik etki frekansa bağımlı değildir. Bu da, hem L1 hem de L2 frekanslarının troposferden eşit derecede etkilenmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, troposferik hatalar hem kod hem de faz gözlemlerinde aynı büyüklükte sapmalara yol açar ve bu etkilerin modellenmesi GNSS konum doğruluğu açısından kritik önem taşımaktadır [Karaim vd., 2018].

Troposferin GNSS sinyalleri üzerindeki etkisi, büyük ölçüde sinyalin alıcıya geliş açısına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle zenit doğrultusuna yakın açılardan gelen sinyaller troposferik etkilerden daha az etkilenirken, ufka yakın açılardan gelen sinyaller atmosferin daha kalın bir katmanından geçerek daha büyük gecikmelere uğramaktadır. Bu nedenle, yükselme açısı azaldıkça sinyalin troposferde katettiği mesafe artmakta ve gecikmenin büyüklüğü de doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu etkiyi modelleyip düzeltmek amacıyla, günümüzde GNSS analizlerinde çeşitli troposferik modeller kullanılmaktadır. Bu modeller genellikle deniz seviyesi referans alınarak belirlenen sıcaklık, basınç ve bağıl nem verileri temelinde geliştirilmektedir. Uygulamada ise, alıcının bulunduğu yükseklik dikkate alınarak bu parametreler yeniden hesaplanır ve modele uyarlanır. Bu şekilde, troposferik gecikmenin etkisi azaltılarak konum belirlemede daha yüksek doğruluk sağlanması hedeflenmektedir [Kahveci ve Yıldız, 2017].

5.2.2. Sinyal Yansıma (Multipath) Etkisi

GNSS alıcıları ve alıcılarda kullanılan antenler, aynı anda her açıdan sinyal alabilme özelliğine sahiptir. Multipath hatası olarak bilinen çoklu yol hatasında, **Şekil 5.3**'te gösterildiği gibi uydulardan gelen sinyaller yansıtıcı bir yüzey tarafından yansyarak ana sinyale dahil edilir ve bu da bir hataya neden olmaktadır. Aynı hata, görelî konum belirlemede kısa bazlar için her iki alıcı için de geçerli olduğundan, bu konum belirleme yönteminde sinyal yansıma hatası ortadan kaldırılır [Kahveci ve Yıldız, 2017]. Sinyal yansıma hatası, alıcının çevre koşullarına ve ilgili uydunun hareketine bağlıdır. Sinyal, öncelikle alıcının etrafındaki ışığı yansıtan yüzeylerden etkilenir. Sinyaller üzerindeki ikincil etki kaynağı ise uyduların yansıtıcı özellikleridir. Bir sinyalin gücünün yansıması, diğer hata kaynakları ortadan kaldırılmasına rağmen konumlandırmanın doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. En olumsuz durumlarda, sinyal yansıma hatası 100 m'ye kadar sahte bir hataya yol açabilmektedir. [Borre vd., 2007], [Karaim vd., 2018].



Şekil 5.3: Direkt ve multipath sinyaller [Karaim vd., 2018].

Zaman ve mekânda oluşan geometrik durumların çeşitliliği nedeniyle sinyal yansıma hatasının tekil bir modeli mevcut değildir. Uzun süreli statik oturumlar sırasında, anlık sinyallerin yansıması son değerler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmayacaktır [Hofmann-Wellenhof vd., 2007]. Bunun dışında, birkaç gün süren tekrarlanan oturumlar sırasında birincil multipath etkisi hesaplanarak ölçümler değiştirilebilir [Kahveci ve Yıldız, 2017].

Sinyallerle ilişkili yansıma hatasını azaltmanın bir yolu alıcı veya antenin tasarımıdır. Polarizasyondan yararlanan bir anten seçmek bunlardan biridir. Ek olarak, birden fazla anten tekniği kullanan alıcılar yalnızca birincil sinyali takip edecek ve diğer tüm sinyalleri engelleyecek şekilde yapılandırılabilir [Daneshmand vd., 2013], [Karaim vd., 2018]. Önerilen bir diğer önlem de düşük yükseklik açılarında ölçüm yapmaktan kaçınmaktır. Bu güvenlik önlemlerinin dışında, bir sinyal yansıma hatası olasılığını azaltmanın en etkili yolu, sorunlu sinyallerin yüksek konsantrasyonda olduğu alanlardan kaçınmak veya yansıma neden olan yansıtıcı yüzeyleri (mümkünse) kaldırmaktır.

5.2.3. Uydu Yörünge Hataları

Gök günlüğü; uydunun yörüngesi için Kepler sisteminin bileşenlerini içeren ve uydunun koordinatlarının zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanmasına izin veren parametrelerdir. Bu bilgi, navigasyon için mesaj dosyasında alıcıya iletilir ve ikiye

ayrılır: yayın gök günlüğü ve kesin gök günlüğü. Yayın gök günlüğü uydudan alıcıya anında iletilir, gerçek zamanlı uygulamalarda da yaygın olarak kullanılır. Kesin gök günlüğü, uluslararası kuruluşlar ve kurumlar tarafından yüksek derecede hassasiyetle belirlenir ve hizmete sunulur, bu, yüksek derecede doğruluk gerektiren uygulamalar için son işlemcide kullanılır. Uydunun gök günlüğü ile ilişkili küçük hatasına rağmen, taban 100 kilometre veya daha uzun olduğunda görüntüler üzerinde önemli bir etkiye sahip olacaktır [Kahveci ve Yıldız, 2017].

5.2.4. Uydu ve Alıcı Saati Hataları

GNSS sistemlerinde konum belirleme süreci, temelde uydu sinyallerinin alınma zaman farkına dayanmaktadır. Bu bağlamda zamanlama doğruluğu, konum hassasiyetini doğrudan etkileyen kritik bir unsurdur. GNSS uyduları, son derece hassas atomik saatlerle donatılmış olsalar da, bu saatlerin GPS sistem zamanına göre mikro saniyeler düzeyinde küçük sapmalar göstermesi kaçınılmazdır. Bu tür sapmalar, ışık hızında yayılan sinyaller göz önüne alındığında, birkaç metrelik konum hatalarına neden olabilmektedir. Uydu saat hataları, sistemin ana kontrol merkezi tarafından sürekli izlenmekte ve gerekli düzeltmeler navigasyon mesajları aracılığıyla alıcılara iletilmektedir. Bu düzeltmeler, uydu saat hatasını temsil eden Denklem 5.8'deki matematiksel işlemler yardımıyla modellenmektedir [Kahveci ve Yıldız, 2017], [Karaim vd., 2018].

$$dt^s = a_0 + a_1(t_T - t_0) + a_2(t_T - t_0)^2 + \Delta t_r \quad (5.8)$$

Uydu saat hatası (dt^s) denkleminde, a_0 saat hatası, a_1 saat kayması, a_2 frekans kayması, t_T uydudan sinyalin çıktığı an, t_0 referans zamanı, Δt_r rölativistik etkilerden kaynaklanan düzeltmeyi ifade edilmektedir. Denklemdaki a_0 , a_1 ve a_2 değerleri navigasyon kütüğünden, t_0 referans zamanı ise almanak kütüğünden alınmaktadır [Hofmann-Wellenhof vd., 2007].

GNSS alıcılarında karşılaşılan saat hataları, genellikle alıcı içerisinde bulunan kuvars kristal osilatörlerin sınırlı zamanlama doğruluğundan kaynaklanmaktadır [El-Rabbany, 2002]. Atomik saatlere kıyasla daha düşük maliyetli ve daha az hassas olan bu osilatörler, sıcaklık değişimleri ve çevresel koşullardan kolayca etkilenmekte ve bu da zaman ölçümlerinde sapmalara neden olmaktadır. Uydu sinyalinin seyahat

süresindeki küçük bir zamanlama hatası bile, ışık hızında yayılan sinyaller göz önüne alındığında, metre düzeyinde konum hatalarına yol açabilmektedir **[Hofmann-Wellenhof vd., 2007]**. GNSS sisteminde konum belirleme, uydular ile alıcı arasında geçen sürenin doğru ölçümüne bağlı olduğundan, alıcı saat hatalarının doğru şekilde modellenmesi kritik öneme sahiptir. Bu tür belirsizliklerin giderilmesi amacıyla, genellikle en az dört uydu sinyali eşzamanlı olarak değerlendirilerek, hem üç boyutlu konum bileşenleri hem de alıcı saat hatası eş zamanlı olarak çözülmektedir. PPP tekniğinde ise, uydular arasındaki saat hataları analiz merkezlerinin sağladığı düzeltmelerle telafi edilmekte, alıcı saat hatası ise konum çözüm denklemlerine bilinmeyen parametre olarak dahil edilerek ek gözlemler yardımıyla belirlenmektedir **[Kouba, 2003]**.

PPP çözümünün başarıyla uygulanabilmesi için, uydu yörünge ve saat düzeltme bilgilerinin yüksek hassasiyetle tanımlanması gerekmektedir **[Karaim vd., 2018]**. Yayın efemeris verileriyle yapılan çözümlerde bu düzeltmelerin eksikliği, konum belirleme doğruluğunu düşürmekte ve sistemin avantajlarını sınırlamaktadır **[Witchayangkoon, 2000]**. Bu nedenle, PPP yönteminde kullanılan uydu saat hatalarının güvenilir şekilde telafi edilebilmesi için, IGS gibi uluslararası kuruluşların sağladığı doğrulanmış düzeltme ürünlerinin kullanımı zorunlu hale gelmiştir. IGS bünyesindeki analiz merkezleri, farklı istasyonlardan toplanan verilerle uydu saat hatalarını yüksek doğrulukla hesaplayarak, bu ürünleri küresel kullanıcı topluluğuna açık erişimle sunmakta ve PPP tekniğinin yüksek doğruluk potansiyelinin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır **[Choy, 2009]**.

5.2.5. Uydu Geometrisi

Uydu tasarımının GNSS doğruluğu üzerindeki etkisi, duyarlılık kaybı (DOP) faktörleri ile ortaya çıkar. Sonuç olarak, DOP, gözlem konumundaki alıcının ve gözlemlenen uyduların göreceli konumları tarafından belirlenir.

5.2.6. Anten Faz Merkezi Hatası

Faz hatası merkezi anten tipine bağlıdır ve hatanın büyüklüğü birkaç mm ile 1-2 cm arasındadır. Sonuç olarak, yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda dikkate alınması gereken bir hata türü olarak kabul edilir. Bir GNSS uydusundan gelen her sinyal belirli

bir elektriksel faz merkezine ayrılmıştır. Bu merkez ve geometrik faz merkezi adı verilen alıcının ortalama elektriksel faz merkezi, mutlaka aynı yerde değildir [Hofmann-Wellenhof vd., 2007]. Bu sapma, antenin faz merkezinin alıcı ile uyumsuz olmasına neden olur. Faz merkezinde teorik olarak bulunmayan bu tutarsızlık, antenin polarizasyonunun uydunun sinyallerinin yönüne (azimut ve yükseklik) bağlı olmasından kaynaklanır; pratikte bu, her frekans için (L1, L2 gibi) değişir.

Bu hatanın simüle edilmesi karmaşıktır çünkü her anten için farklıdır. Antenin faz merkezi yatay ve dikey bileşenler için farklıdır. Sapmalar genellikle yatay ve dikey yönlerde 0,5 ile 1,5 cm arasındadır [Mader, 1999], [Hofmann-Wellenhof vd., 2007]. Antenin faz merkezi genellikle yatay eksen için antenin fiziksel merkeziyle aynıdır. Dikey eksen için durum böyle olmadığından, sahada antenin yüksekliğinin ölçümü son derece dikkatli yapılmalıdır. Her anten tipi için anten faz merkezi değişiminin miktarı, IGS tarafından hazırlanan ve kullanıcıya ücretsiz olarak sunulan ofisteki son işlemci hesaplamalarında mevcuttur.

5.2.7. Taşıyıcı Dalga Faz Belirsizliği ve Faz Kesiklikleri

Bilindiği üzere GNSS uygulamaları, alıcı ile uydu arasındaki mesafeyi hesaplamak için faz veya kod bilgisinden yararlanır. Faz ölçümlerinde, uydudan alıcıya ulaşan sinyalin uzunluğu ölçülür ve frekans tarafından kabul edilen dalga boyuyla çarpılarak uydu ile alıcı arasındaki mesafe hesaplanır. Sayısal kodlardan daha doğru sonuçlar veren bu yöntem basittir, ancak bazı sorunları vardır. Alıcı açıldığında tetiklenen bir sayaç, uydunun alıcı fazı 0'dan 2π 'ye değiştiğinde $+1/-1$ oranında artar veya azalır. Sonuç olarak, fazın tam sayı dalga boyu bilinmesine rağmen, alıcı ilk etkinleştirildiğinde uydu ile alıcı arasındaki taşıyıcı dalganın fazı hakkında bilgiye ulaşılamaz. Bu sorun, başlangıç taşıyıcı dalga fazı belirsizliği veya kısaca faz belirsizliği olarak bilinir. N ile gösterilen bu hatanın tutarlı bir değer olmasını önlemek için, alıcının ölçüm için durmadan her uyduyu gözlemlemesi gerekir [Hofmann-Wellenhof vd., 2007].

Ölçüm hatası nedeniyle sinyal kaybı (döngü kaymaları veya kontrol kaybı) faz gözlemleri sırasında oluşan bir diğer sorundur. Fazın süresi, oluştuğu ve takip eden dönemden etkilenir. Bir örnekte, tripodun fazı bozulur ve bu yalnızca ilgili dönemi etkiler. Bu hatayı ortadan kaldırmak için, faz sınırının oluştuğu dönemde ve takip eden dönemlerde gerekli değişiklikler yapılmalıdır. Faz kesintilerinin nedenleri, uydunun

sinyalini engelleyebilecek alıcının yakınında bulunan doğal ve insan yapımı nesneler, iyonosferdeki kötü çevre koşulları, sinyal yansıma hataları ve alıcıdaki yazılım hatalarıdır [Mader, 1999], [Hofmann-Wellenhof vd., 2007].



6. SONRADAN DEĞERLENDİRME (PP) PPP

Uydu tabanlı konum belirleme sistemlerinde, GPS uydularının tam işlevsellik kazandığı dönemden itibaren, konumlandırma işlemlerinde temel yaklaşım; eş zamanlı olarak aynı uydulara gözlem yapan en az iki GNSS alıcısının kullanılması üzerine kurulmuştur. Bu yöntemde, iki alıcı arasında oluşturulan baz vektörü aracılığıyla bağlı koordinatlar yüksek doğrulukla hesaplanabilmektedir. Alıcılardan biri, konumu hassas olarak bilinen referans (sabit) istasyonu olarak kabul edilirken, diğeri konumu belirsiz olan ve statik ya da kinematik modda çalışan gezici alıcıyı temsil etmektedir. Son yıllarda, PPP yönteminde elde edilen doğruluk seviyelerini iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmalar, bu tekniğin yalnızca profesyonel GNSS alıcılarında değil, aynı zamanda akıllı mobil cihazlarda da değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

PPP yöntemi, tek bir alıcı ile santimetre seviyesinde doğrulukta konum belirleme imkânı sunmakta olup, bu yönüyle diferansiyel GNSS yöntemine kıyasla daha az altyapı gereksinimi ve daha geniş bir uygulama esnekliği sağlamaktadır. Özellikle sabit referans istasyonu gerektirmemesi ve baz uzunluğu gibi kısıtlamalardan bağımsız çalışabilmesi, PPP yöntemini akıllı mobil cihazlar için potansiyel bir çözüm haline getirmiştir. Ancak, akıllı mobil cihazlarda gerçek zamanlı PPP tekniği günümüzde gerçekleştirilemediği için mobil uygulamalar sayesinde ham GNSS gözlem verileri elde edilerek PP-PPP yöntemiyle çözümlemeler yapılmakta ve analiz edilmektedir. PP-PPP tekniği kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, akıllı mobil cihazlardan elde edilen ham GNSS gözlem verileri, uydu yörünge ve saat düzeltmeleri ile iyonosferik ve troposferik gecikmeler gibi çeşitli yardımcı düzeltme ürünleri kullanılarak analiz edilmektedir. Bu düzeltme ürünleri, IGS tarafından sağlanmakta olup, IGS bünyesindeki farklı analiz merkezleri tarafından üretilen alternatif ürün setleri kullanıcıya sunulmaktadır. Bu sayede, PP-PPP analizlerinde kullanılan düzeltme ürünleri ihtiyaca ve doğruluk beklentisine göre seçilerek konum belirleme hassasiyeti optimize edilebilmektedir.

6.1. Uluslararası GNSS Servisi (IGS)

Amerika Birleşik Devletleri merkezli olarak 1992'den bu yana GNSS yörünge ve saat düzeltmeleri gibi hassas konumlandırma verilerini herkese açık şekilde sunan IGS, son

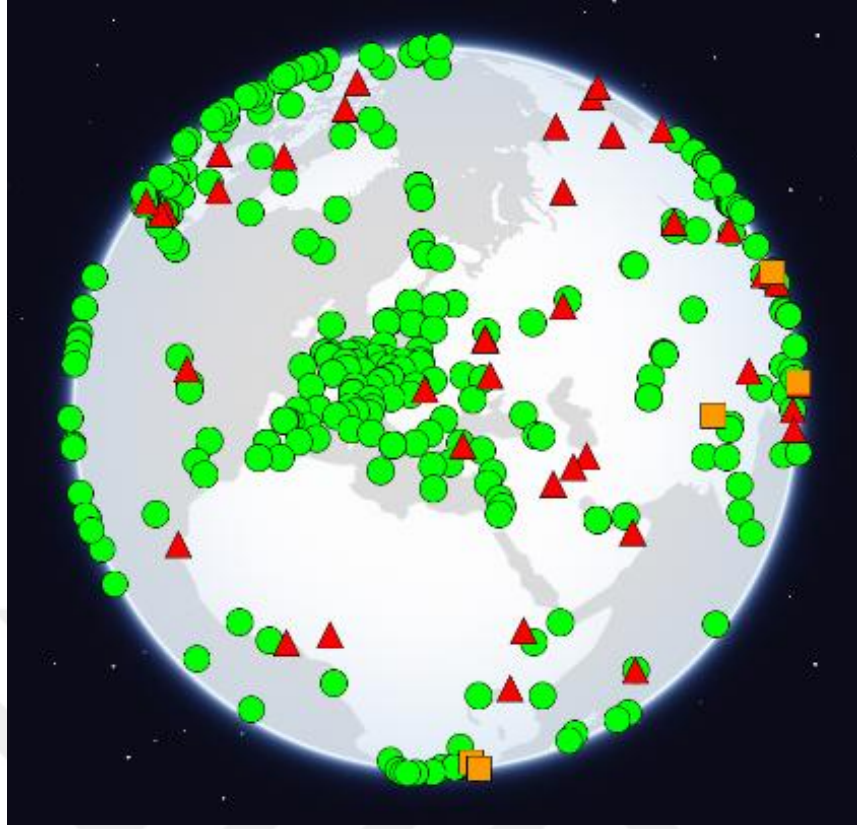
yıllarda küresel ölçekte 80'den fazla ülke ve 200'ün üzerinde kuruluşla güçlü bir iş birliği ağı haline gelmiştir. IGS, Uluslararası Jeodezi Derneği (International Association of Geodesy) bünyesinde faaliyet gösteren bir organizasyon olarak, GNSS teknolojileri aracılığıyla yüksek doğrulukta yerküre gözlemleri gerçekleştirilmesini desteklemektedir. Başta ABD'nin geliştirdiği GPS olmak üzere, farklı GNSS sistemlerinden elde edilen verilerle bilimsel araştırmaların daha hassas yürütülmesi amaçlanmaktadır. IGS'nin temel hedefi; konumlandırma, jeodinamik analizler, Dünya'nın dönüş hareketlerinin izlenmesi ve karasal referans sistemlerinin geliştirilmesi gibi jeodezik uygulamalarda kullanılmak üzere yüksek doğruluklu GNSS veri ve ürünleri sunmaktır. Ayrıca IGS, küresel jeodezide milimetre düzeyinde doğruluğa ulaşılabildiğini hedefleyen Küresel Jeodezik Gözlem Sistemi'nin (Global Geodetic Observation System) gelişimini destekleyerek, ilgili bilimsel disiplinler arasında teknik uyumun sağlanmasına da katkı sunmaktadır. İklim değişikliği, deniz seviyesi takibi, atmosfer ve uzay hava koşullarının izlenmesi gibi birçok disiplinler araştırma alanında IGS verileri kritik bir rol oynamaya devam etmektedir [Beutler vd., 1999], [Dow vd., 2009].

IGS, GNSS verilerinin yüksek doğrulukla işlenmesi ve standartlaştırılması amacıyla çeşitli analiz merkezleriyle iş birliği içinde çalışmaktadır. **Tablo 6.1**'de sunulan analiz merkezleri, IGS ağına dahil sabit GNSS istasyonlarından elde edilen gözlemleri kullanarak uydu yörünge bilgileri, saat düzeltmeleri ve kutup hareketi parametreleri gibi pek çok düzeltme ürününü üretmekte ve bunları kullanıcıların erişimine sunmaktadır. Düzeltme ürünleri farklı zaman duyarlılıklarında ve doğruluk seviyelerine göre ücretsiz olarak internet üzerinden yayımlanmaktadır. IGS tarafından sunulan bu düzeltme ürünleri; hızlı (rapid), kesin (final), ultra-hızlı (ultra-rapid) ve gerçek zamanlı (real-time) olmak üzere dört ana veri formatında kullanıcıya ulaştırılmaktadır. Bu ürünlerin her biri, içerdiği verilerin güncellenme sıklığı, örnekleme aralığı ve doğruluk seviyesi açısından birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Bu yapı sayesinde, hem araştırma temelli hem de uygulamalı GNSS çalışmaları için farklı doğruluk ihtiyaçlarına uygun çözüm alternatifleri sağlanabilmektedir. **Web 11**'de bulunan internet adresinden IGS hakkında kapsamlı ve güncel bilgilere ulaşabilirsiniz.

Tablo 6.1: IGS bünyesindeki farklı analiz merkezleri **Web 11.**

Analiz Merkezi ID	Analiz Merkezi
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
EMR	Natural Resources Canada
ESA	European Space Agency /ESOC
GFZ	Geo Forschungs Zentrum Potsdam
GOP-RIGTC	Geodetic Observatory Pecny
GRG	Space geodesy team of the CNES/CLS
IGS	IGS Analysis Center Coordinator
JAX	Japan Aerospace Agency
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NGS	NOAA/National Geodetic Survey
SHA	Shanghai Observatorye
SIO	Scripps Institution of Oceanography
TUM	Technical University of Munich
USNO	U.S. Naval Observatory
WUM	Wuhan University

GNSS alanında temel bir altyapı sağlayıcısı olan IGS, dünya çapında sürekli işleyen referans istasyonlarından oluşan kapsamlı bir ağın kurulması ve sürdürülmesini teşvik etmektedir. Bu ağ, IGS'nin yüksek hassasiyetli yörünge, saat ve diğer ürünleriyle birlikte değerlendirildiğinde, elde edilen ham GNSS verileri; bilimsel keşiflerden (jeodinamik, atmosfer araştırmaları) pratik uygulamalara (mühendislik, hassas tarım, afet izleme) kadar geniş bir yelpazede mevcut ve gelecekteki coğrafi veri kullanımının vazgeçilmez kaynağı haline gelmiştir. Günümüzde bu ağın kapsamı ve yoğunluğu önemli ölçüde artmış olup, istasyonların dünya üzerindeki güncel dağılımı **Şekil 6.1**'de gösterilmektedir.



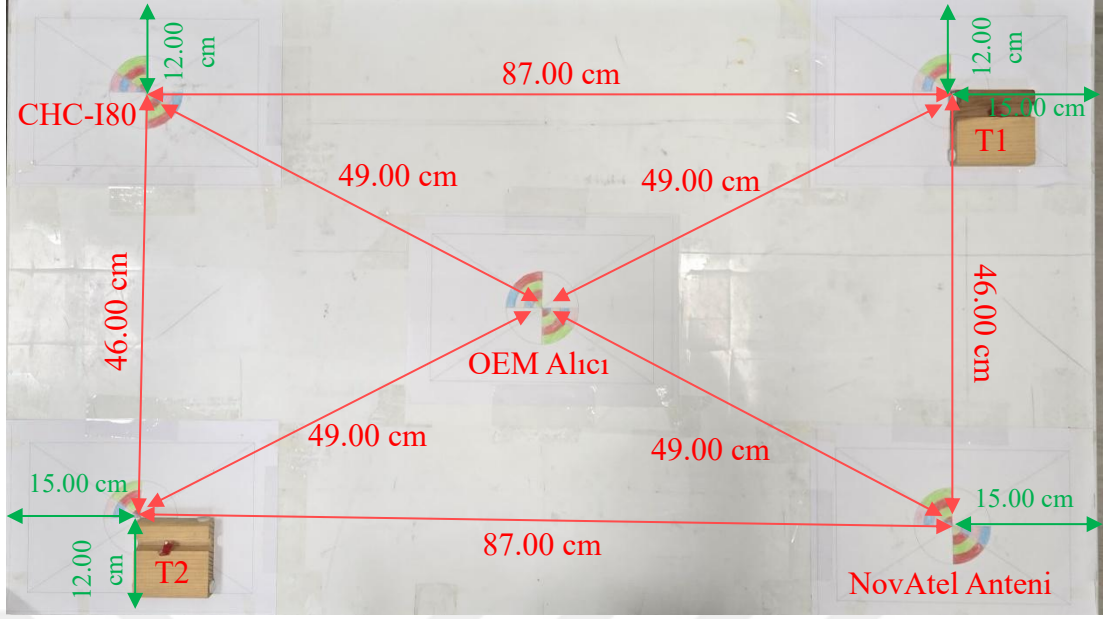
Şekil 6.1: IGS bünyesindeki küresel GNSS izleme istasyonları (Web 11)

7. UYGULAMA

7.1. GNSS Ölçüm Düzenineğin Tasarımı

Günümüzde modern teknolojilerin hızla gelişmesiyle birlikte GNSS teknolojisindeki yenilikler, akıllı mobil cihazların konumlandırma doğruluğu, hassasiyeti ve performansının değerlendirilmesi için kapsamlı karşılaştırmalar yapılabilmesine imkân sağlamıştır. Bu bağlamda, bu çalışma, akıllı mobil cihazlarda GNSS konumlandırma performansının, hassas GNSS alıcıları ile karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmanın temel hedefi, bir GNSS gözlem düzeneği tasarlanarak, halihazırda kullanılmakta olan GNSS alıcıları ile piyasaya yeni sürülmüş güncel akıllı mobil cihazların konumlandırma performanslarını çevresel koşullar altında analiz etmek ve bu cihazların GNSS alıcılarına göre potansiyel kullanım olanaklarının değerlendirilmesidir.

Akıllı mobil cihazlarının konumlandırma performanslarının değerlendirileceği bu çalışma için, Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) Harita Mühendisliği Bölüm binasının çatısı tercih edilmiştir. GNSS gözlemlerinin 05.06.2023 tarihinde gerçekleştirilebilmesi için, **Şekil 7.1'** de gösterilen hassas ölçüm düzeneği gözlem tarihinden önce hazırlanmıştır. Cihazların masa üzerindeki konumlarının sabit kalması ve ölçüm hassasiyetinin sağlanması amacıyla, renklendirilmiş ve ölçeklendirilmiş işaretler, **Şekil 7.1'** de gösterildiği şekilde masa üzerine düzenli bir şekilde yapıştırılmıştır. Cihazlar, GNSS gözlemlerinin gerçekleştirileceği alanda, masa üzerindeki işaretler ve bu işaretler arasındaki mesafeler dikkate alınarak masa üzerine yerleştirilmiştir. Bu yöntem sayesinde, cihazlar yerinden oynatılsa dahi işaretlerin sabit kalmasıyla cihazların aynı konumlarına yerleştirilmesi sorunsuz bir şekilde sağlanmıştır. Gözlem süreci boyunca, cihazların performansının atmosferik koşullardan minimum şekilde etkilenmesi için güneşli ve bulutsuz bir gün tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra, cihazların batarya sorunu yaşamamaları ve performans kaybına uğramamaları için şarjları tam olarak doldurulmuştur. Akıllı mobil cihazlar da ise, arka plan uygulamaları kapatılarak GNSS veri alımını etkileyebilecek uygulamaların etkisi en aza indirilmiştir. Cihazlardan alınan verilerin güvenilirliğini ve tutarlılığını arttırmak amacıyla bu işlemler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.1: GNSS gözlemleri için hazırlanan ölçüm düzeneği.

7.2. Ölçüm Planı ve GNSS Verilerinin Toplanması

Akıllı mobil cihazlar ve GNSS alıcıları kullanılarak gerçekleştirilen bu deneysel gözlemlerde, dört adet CHC I80 GNSS alıcısı, bir adet Trimble MB-2 OEM alıcısı (NovAtel GPS-702 anteni ile bağlantılı) ve bir adet Xiaomi 11T Pro 128 GB (T1) ile bir adet Xiaomi 11T Pro 256 GB (T2) model akıllı mobil cihazlar kullanılmıştır. GNSS ölçümleri için Şekil 7.2'deki ölçüm planı yapılmıştır. Şekil 7.1'de gösterilen ölçüm düzeneğinin, çatı üzerinde koordinatları bilinen referans noktalara yerleştirilebilmesi amacıyla Şekil 7.2'de hazırlanan planda, çatıya birbirine hizalı ve iki adet eşkenar üçgen oluşturacak şekilde noktalar atılmıştır. Üçgenlerin köşe noktaları C11, C12, C21, C22, C51 ve C52 olarak adlandırılmıştır. Bu adlandırmada "C1", "C2" ve "C5" cihaz numaralarını belirtirken, sonundaki "1" ve "2" rakamları ise aynı cihaza ait ölçüm sırasını temsil etmektedir (örneğin, C1 cihazı için yapılan birinci ölçüm C11 olarak ifade edilmiştir). Şekil 7.2'de görülen C11-C12, C21-C22 ve C51-C52 noktaları arasındaki mesafeler, ölçüm düzeneğine ait masanın uzun kenar ölçüsü olan 1.17 m referans alınarak çatı üzerinde belirlenmiştir. Ayrıca, planlama aşamasında üçgenler eşkenar olacak şekilde tasarlanmış ve bu doğrultuda her bir üçgenin kenar uzunluğu 8 m olacak şekilde çatı üzerinde noktaların yerleşimi yapılmıştır. Şekil 7.2'de gösterildiği gibi düzenlenen bu noktalar, nokta bazlı değerlendirmelerin dışında

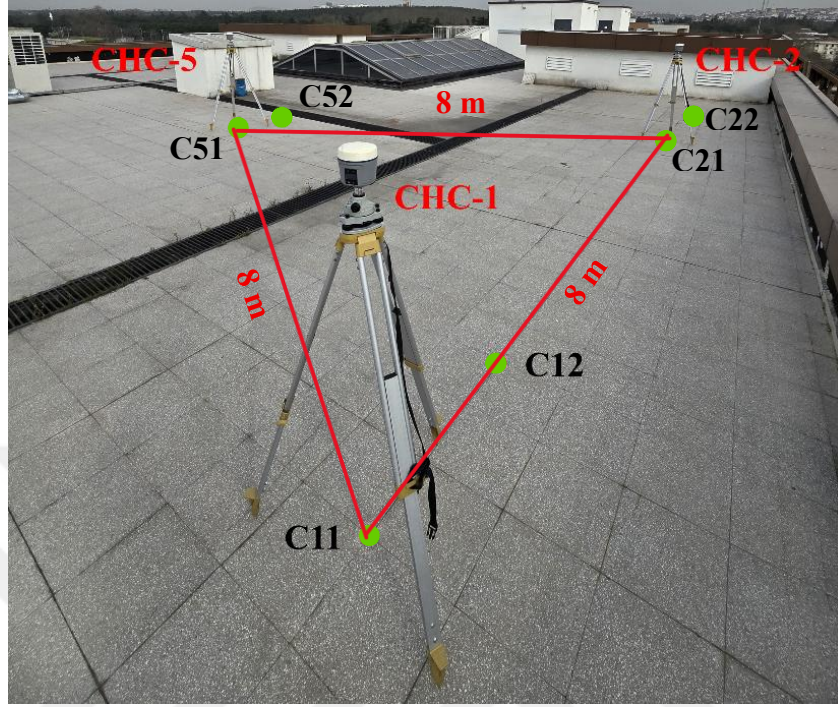
üçgensel bir alan oluşturularak alan bazlı değerlendirmelerin de yapılabilmesi amacıyla konumlandırılmıştır.



Şekil 7.2: GNSS ölçüm düzeneğine ait plan.

Çatı üzerinde belirlenen referans noktaların koordinatlarının tespiti amacıyla, dört adet CHC alıcısı kullanılarak eşzamanlı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, üç alıcı Şekil 7.3'te gösterilen birinci üçgenin köşe noktaları olan C11, C21 ve C51 üzerine yerleştirilirken, dördüncü alıcı ise koordinatları kesin olarak bilinen pilye noktasına kurulmuştur. Birinci üçgenin köşe noktalarında 90 dakika veri toplandıktan sonra, cihazlar sökülerek ikinci üçgenin köşe noktalarına (C12, C22 ve C52) yerleştirilmiş ve 60 dakikalık yeni bir ölçüm periyodu uygulanmıştır. Bu noktalardan elde edilen ham GNSS verilerinin çözülmesinde, açık kaynak kodlu RTKLIB

yazılımının b34k sürümü kullanılmıştır. Statik koordinat belirleme yöntemi kullanılarak referans noktaların koordinatları belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 7.3. Ölçüm planında kullanılan referans noktalar: (a) Çatı üzerinde belirlenen noktalara kurulan CHC alıcıları, (b) Koordinatı kesin olarak bilinen pilye üzerine kurulum.

Statik konum belirleme yöntemi kullanılarak çatı üzerindeki referans noktaların koordinatları belirlendikten sonra değerlendirilecek cihazlar, **Şekil 7.1**'de gösterilen düzenlemeye uygun olarak **Şekil 7.4**'teki gibi masa üzerine yerleştirilmiştir. Ölçüm düzeneğinin hassas bir şekilde kurulabilmesi için, masanın köşelerine bağlanan şakuller kullanarak zeminde belirlenen referans noktalarına dikkatlice hizalanmış ve düzenek konumlandırılmıştır. Bu yöntemle, masanın iki köşesi çatı üzerinde oluşturulan eşkenar üçgenlerin köşe noktalarına hassas bir şekilde hizalanmış ve her bir köşe için GNSS ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 7.4: Ölçüm düzeneğinin planı: (a) ve (b) 1. noktanın, (c) ve (d) 2. noktanın, (e) ve (f) 3. noktanın kurulum yerlerini ve düzenini göstermektedir.

GTÜ Harita Mühendisliği Bölüm binasının çatısında, 05.06.2023 tarihinde 09.00-13.15 saatleri arasında gerçekleştirilen GNSS ölçümleri, 4 farklı cihaz kullanılarak,

her bir nokta minimum 60 dakikalık ölçüm süresi, 1 Hz örnekleme aralığında ve 10° yükseklik açısıyla statik Multi-GNSS verileri şeklinde toplanmıştır. Multi GNSS yöntemi, GPS, GALİLEO, GLONASS, QZSS ve BeiDou uydu sistemlerinden gelen sinyallerin entegre bir şekilde toplanmasını sağlamıştır. Bu sayede, konum doğruluğunun artırılması ve uydu görünürlüğünün optimize edilmesi hedeflenmiştir. Akıllı mobil cihazlardan ham GNSS verilerinin toplanıp kaydedilmesi amacıyla, Android işletim sistemi için geliştirilmiş GNSSlogger uygulaması kullanılmıştır. Cihazlardan elde edilen ham GNSS verilerinin statik ve PPP-Statik yöntemleri kullanılarak çözümlenmesinde, RTKLIB yazılımının b34k sürümü kullanılmıştır.

7.3. Statik Konum Belirleme Yöntemiyle Referans Noktaların Koordinatlarının Belirlenmesi

Statik yöntem kullanılarak referans noktaların koordinatlarının belirlenmesi aşamasında, kesin koordinatları bilinen pilye üzerine **Şekil 7.3**'te gösterildiği gibi kurulan ve çatıdaki diğer cihazlarla eşzamanlı ölçüm yapan CHC-6 cihazının verileri RTKLIB yazılımında baz istasyonu görevi görmüştür. Pilyenin kesin koordinatları Evrensel Transvers Merkator (Universal Transver Merkator, UTM) 6° projeksiyon sisteminde ve Uluslararası Yersel Referans Sistemi'nin (International Terrestrial Reference Frame, ITRF2020) 2023.5 epoğunda, Sağa: 699213.7929 m, Yukarı: 4520070.0258 m ve Elipsoidal Yükseklik: 47.3979 m olarak tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında bu koordinatlar, Dünya merkezli, Dünya sabit (Earth-centered, Earth-fixed, ECEF) koordinat sistemine çevrilmiş (X: 4213575.5879 m, Y: 2370525.2940 m, Z: 4146295.1944m) ve bu değerler, CHC-6 alıcısına ait RINEX veri dosyasının başlık bölümündeki "APPROX POSITION XYZ" satırına girilerek ilgili kayıtlar güncellenmiştir. Bu koordinat güncelleme işlemi, veri değerlendirme sürecinde referans istasyonu olarak tanımlanan pilye noktasının koordinat bilgisinin yüksek doğrulukla sisteme tanımlanabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. RINEX veri dosyasının başlık kısmında yer alan bu koordinat bilgileri, düzeltme algoritmalarının hesaplama sürecinde baz istasyonunun mutlak konumunu referans alarak çözüm üretmesini sağlamakta ve dolayısıyla çatı üzerinde konumlandırılan noktaların koordinat doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, referans istasyonuna ait kesin ECEF koordinatlarının ilgili veri dosyasına doğru ve tutarlı biçimde işlenmesi, çözüm sonuçlarının hem hassasiyeti hem de güvenilirliği açısından önemlidir.

Statik çözümlerde, alıcı (rover) kısmına çatı üzerine kurulan cihazların verileri, baz istasyonu kısmına ise Approx Position kısmı güncellenmiş CHC-6 verileri girilerek çözümler gerçekleştirilmiştir. Düzeltme parametreleri olarak Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) sitesi üzerinden alınan hassas düzeltme ürünleri kullanılmıştır. Hassas düzeltme ürünleri olarak CODE analiz merkezine ait final ürünleri kullanılmıştır.

Statik konum belirleme yöntemiyle çatı üzerindeki referans noktaların kesin koordinatlarının belirlenmesinin ardından, **Şekil 7.5**'te sunulan görselde, CHC alıcıları ile referans noktalarında gerçekleştirilen 90 ve 60 dakikalık GNSS gözlemleri sonucunda elde edilen koordinat verilerinin dağılımı gösterilmiştir.

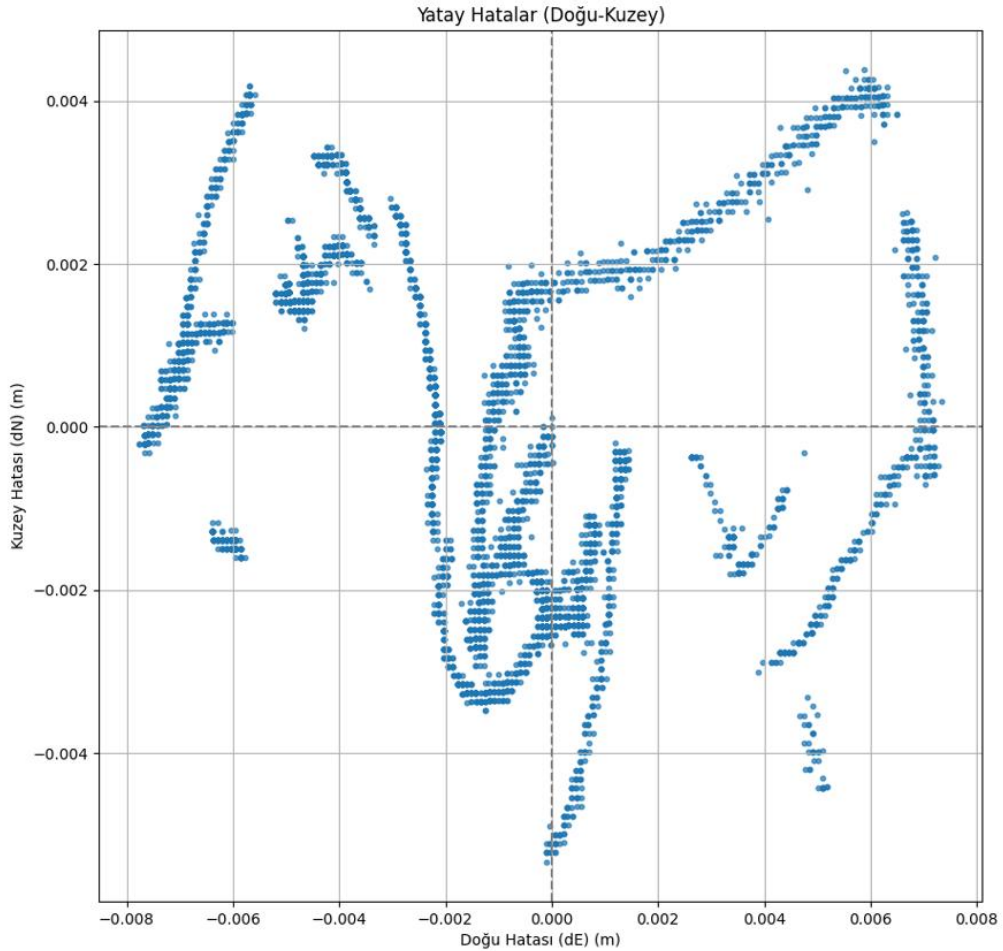


Şekil 7.5: Referans noktalara ait ham verilerin RTKLIB yazılımındaki statik çözüm sonuçlarının CAD gösterimi.

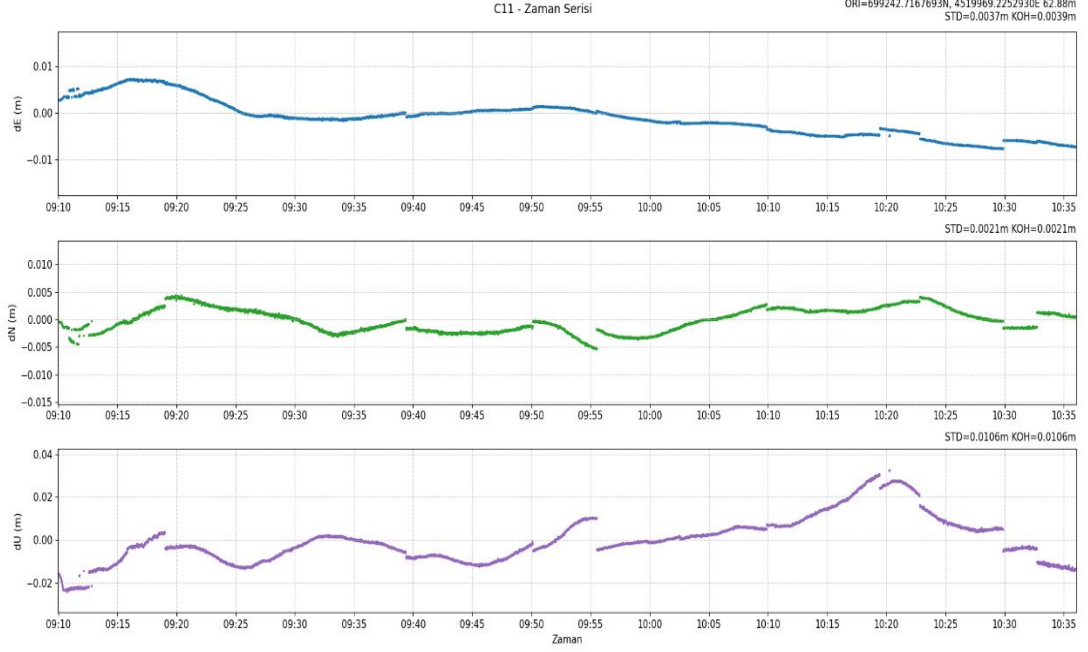
Referans noktalarına ait GNSS verilerinin değerlendirilmesinde, konum hatalarının istatistiksel dağılımı ve doğruluk metrikleri sistematik bir yaklaşımla analiz edilmiştir. Bu kapsamda, gözlemlerin doğu (dE) ve kuzey (dN) bileşenlerindeki standart sapmalarına (STD) ait yatay yöndeki hata dağılım grafikleri üzerinden değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, her bir bileşene ait zaman serisi grafikleri

oluşturularak, ölçüm süresi boyunca elde edilen noktaların zamana bağlı dağılımları gösterilmiştir.

Birinci üçgenin C11 noktasına ait grafikler **Şekil 7.6**'da sunulmuştur. C11 noktası için statik konum belirleme yöntemiyle elde edilen koordinat verilerinin hata dağılımlarına ait grafikler incelendiğinde, yatay bileşenlerin dE yönünde 0.0037 m STD ve 0.0040 m KOH; dN yönünde 0.0021 m STD ve KOH değerleri hesaplanmıştır. dU bileşende ise STD ve KOH değerleri yaklaşık 0.0106 m olarak hesaplanmıştır. Ölçüm süresi boyunca kaydedilen koordinat bileşenlerindeki hataların zamana bağlı değişimi, zaman serisi grafiği üzerinde gösterilmiştir. Yatay ve düşey bileşenlerde minimum ve maksimum hata değerleri sırasıyla dE yönünde -0.0078 m ile 0.0073 m, dN yönünde -0.0053 m ile 0.0044 m ve dU -0.0239 m ile 0.0324 m arasında değişmektedir.



(a)

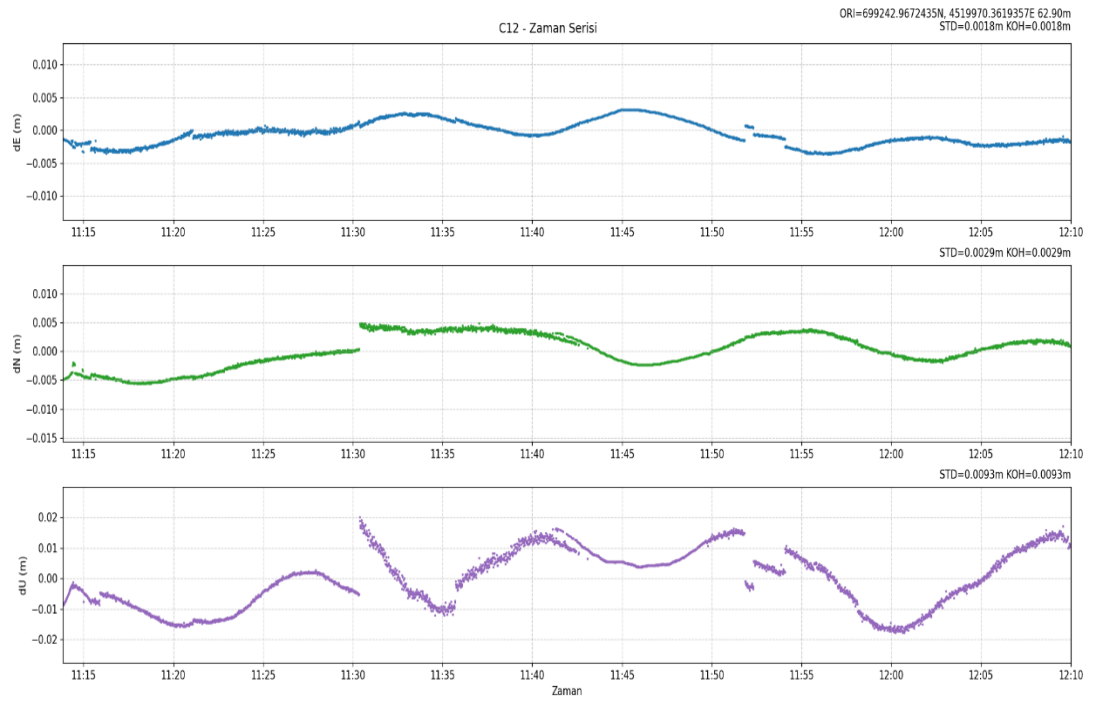
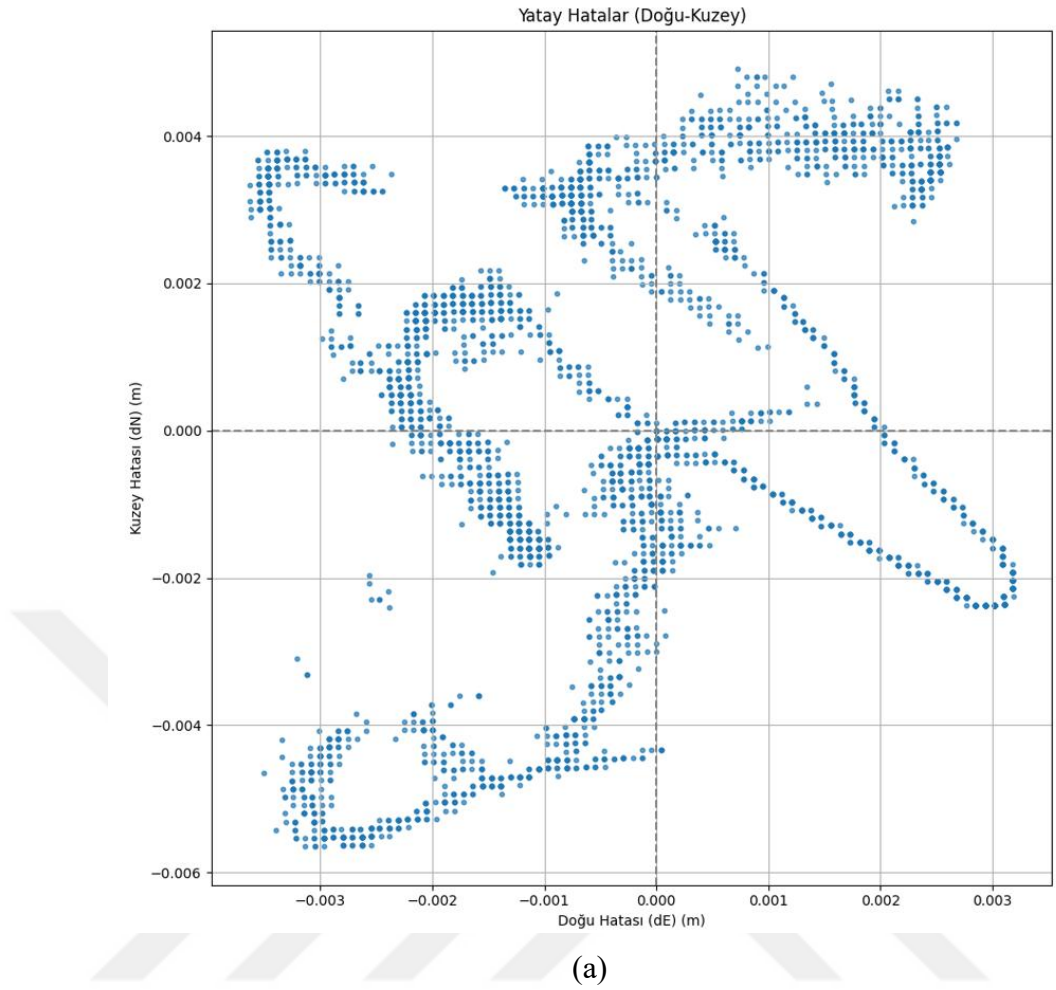


(b)

Şekil 7.6: C11 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.

Ölçüm düzeneği için oluşturulan ikinci üçgenin C12 noktasına ait grafikler **Şekil 7.7**'de sunulmuştur. C12 noktası için statik konum belirleme yöntemiyle elde edilen koordinat verilerinin hata dağılımlarına ait grafikler incelendiğinde, yatay bileşenlerin dE yönünde STD ve KOH değerleri yaklaşık olarak 0.0018 m; dN yönünde STD ve KOD değerleri 0.0029 m; dU bileşeninde ise STD ve KOH değerleri 0.0093 m olarak hesaplanmıştır.

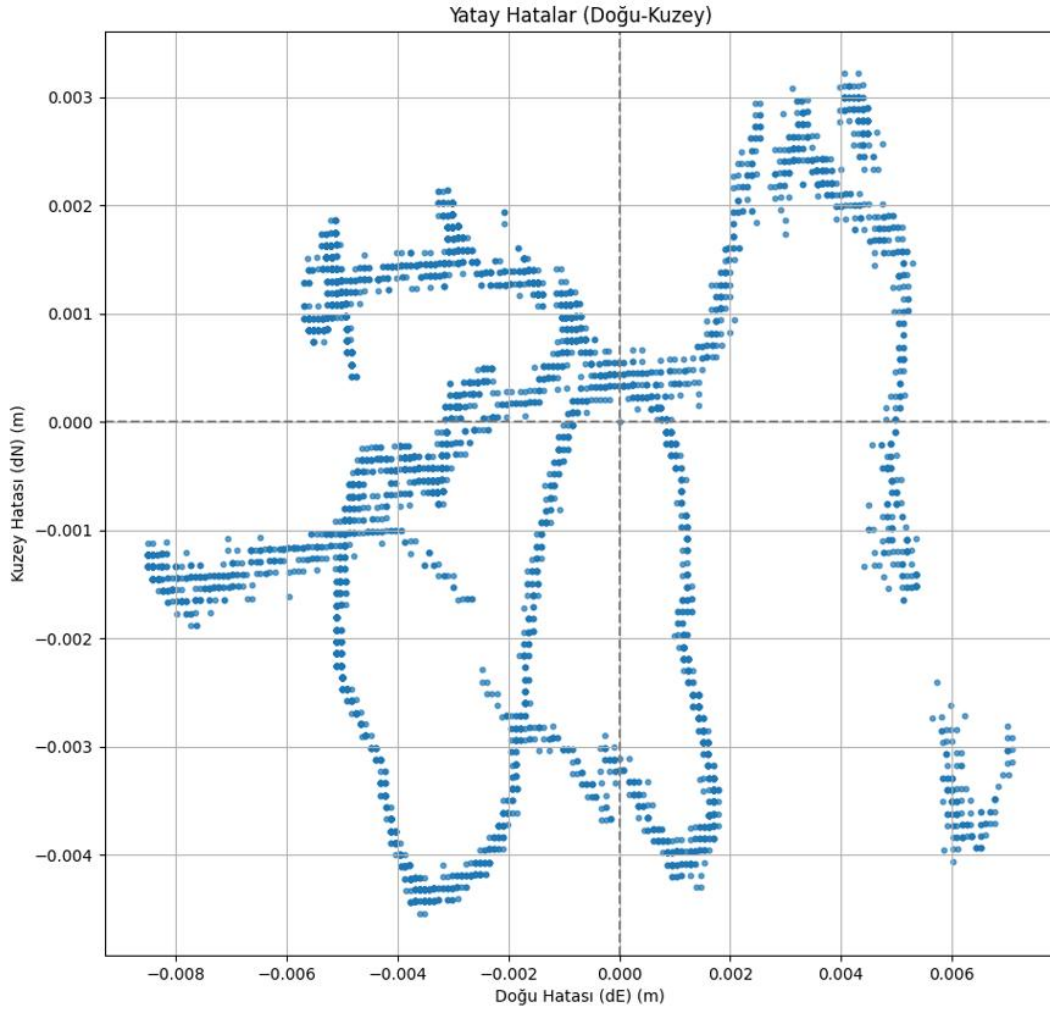
Ölçüm süresi boyunca kaydedilen koordinat bileşenlerindeki hataların zamana bağlı değişimi, **Şekil 7.7**'de zaman serisi grafiği üzerinde gösterilmiştir. Yatay ve düşey bileşenlerde minimum ve maksimum hata değerleri sırasıyla dE yönünde -0.0036 m ile 0.0032 m, dN yönünde -0.0056 m ile 0.0049 m ve dU -0.0177 m ile 0.02 m aralığında değişim göstermiştir. Bu analizler sonucunda, **Şekil 7.5**'te gösterilen Test-1 köşesine ait C11 ve C12 referans noktalarının kesin koordinatları belirlenerek **Tablo 7.1**'de sunulmuştur.

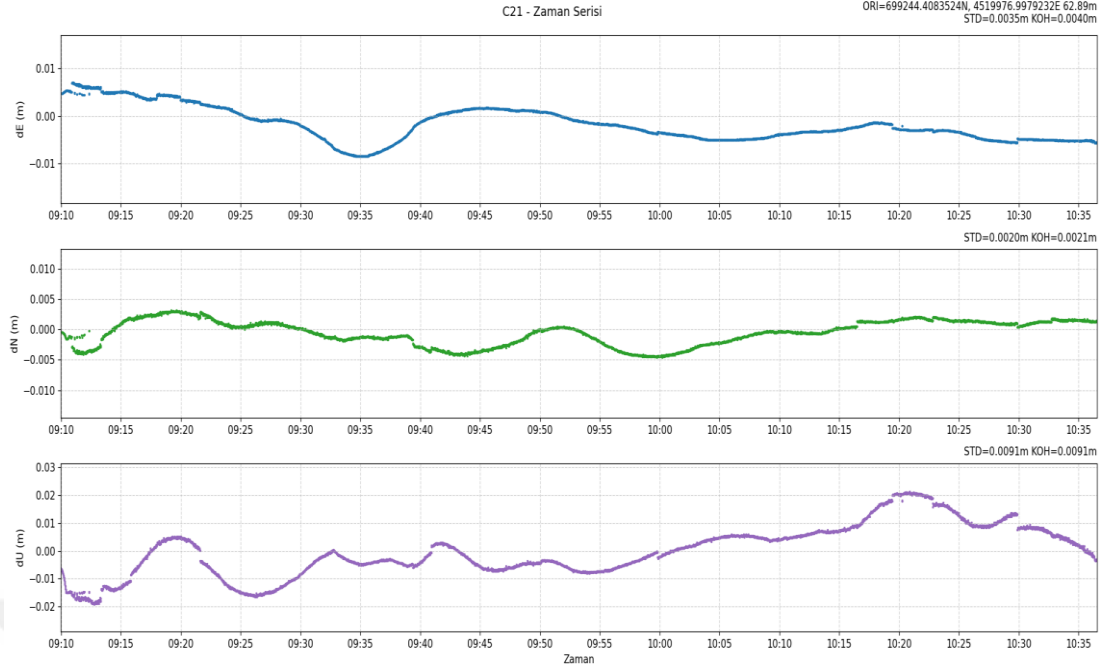


(b)

Şekil 7.7: C12 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.

Ölçüm düzeneğinin kurulduğu Test-2 köşesinde bulunan C21 noktasına ait grafikler **Şekil 7.8**'de sunulmuştur. C21 noktası için statik konum belirleme yöntemiyle elde edilen koordinat verilerinin hata dağılımlarına ait grafikler incelendiğinde, yatay bileşenlerin dE yönünde 0,0035 m STD ve 0.0040 m KOH; dN yönünde STD ve KOH değerleri yaklaşık 0,0021 m olarak hesaplanmıştır. Düşey bileşende ise STD ve KOH değerleri 0,0106 m olarak hesaplanmıştır. Zaman serisi grafiği incelendiğinde, yatay ve düşey bileşenlerde minimum ve maksimum hata değerleri sırasıyla dE yönünde -0.0078 m ile 0,0073 m, dN yönünde -0,0053 m ile 0,0044 m ve dU yönünde -0.0239 m ile 0.0324 m aralığında noktaların dağıldığı görülmüştür.

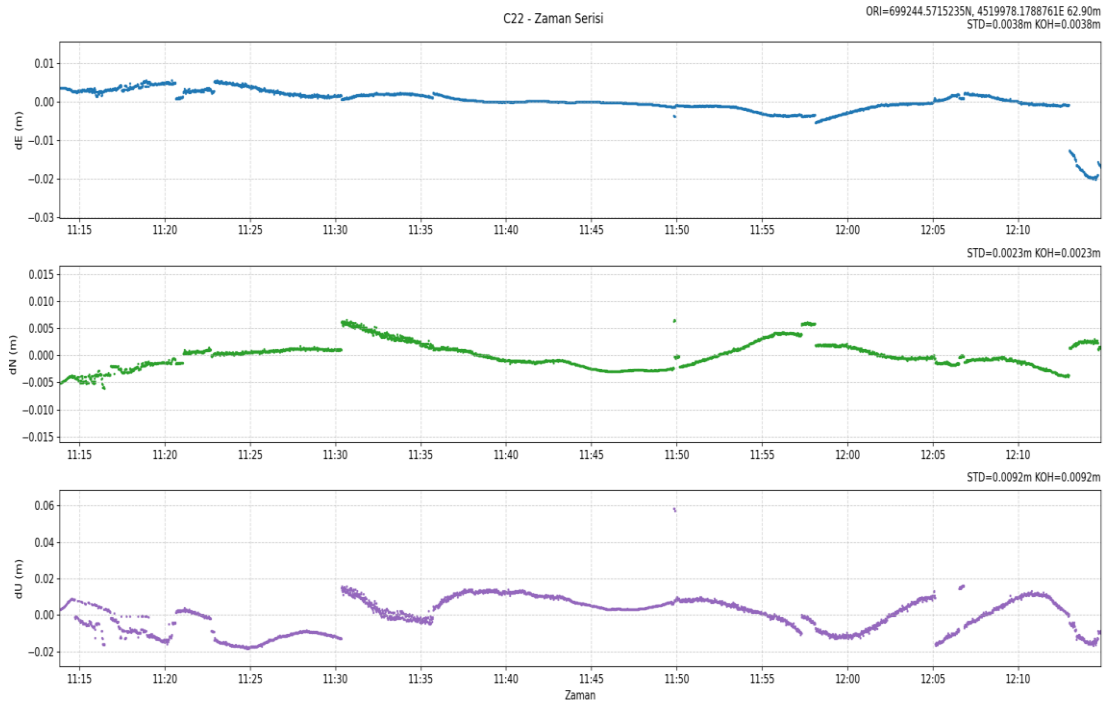
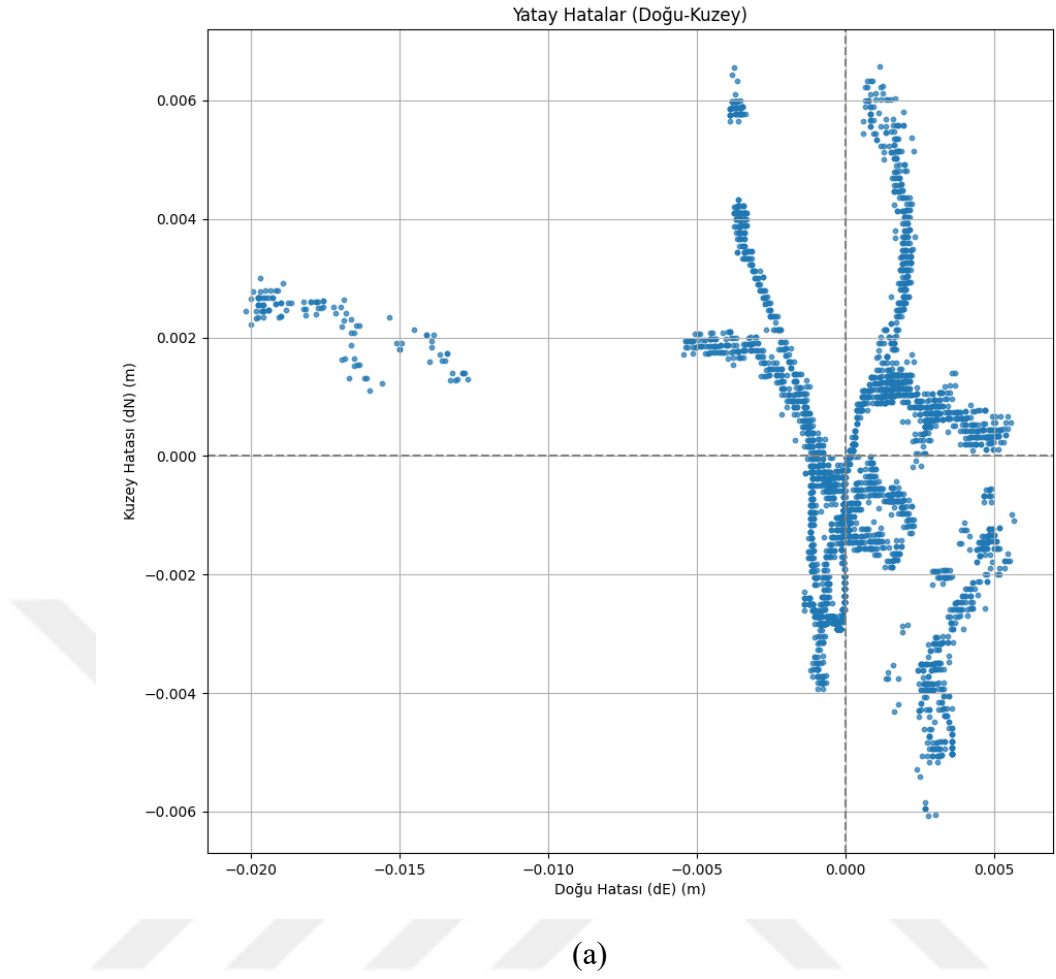




(b)

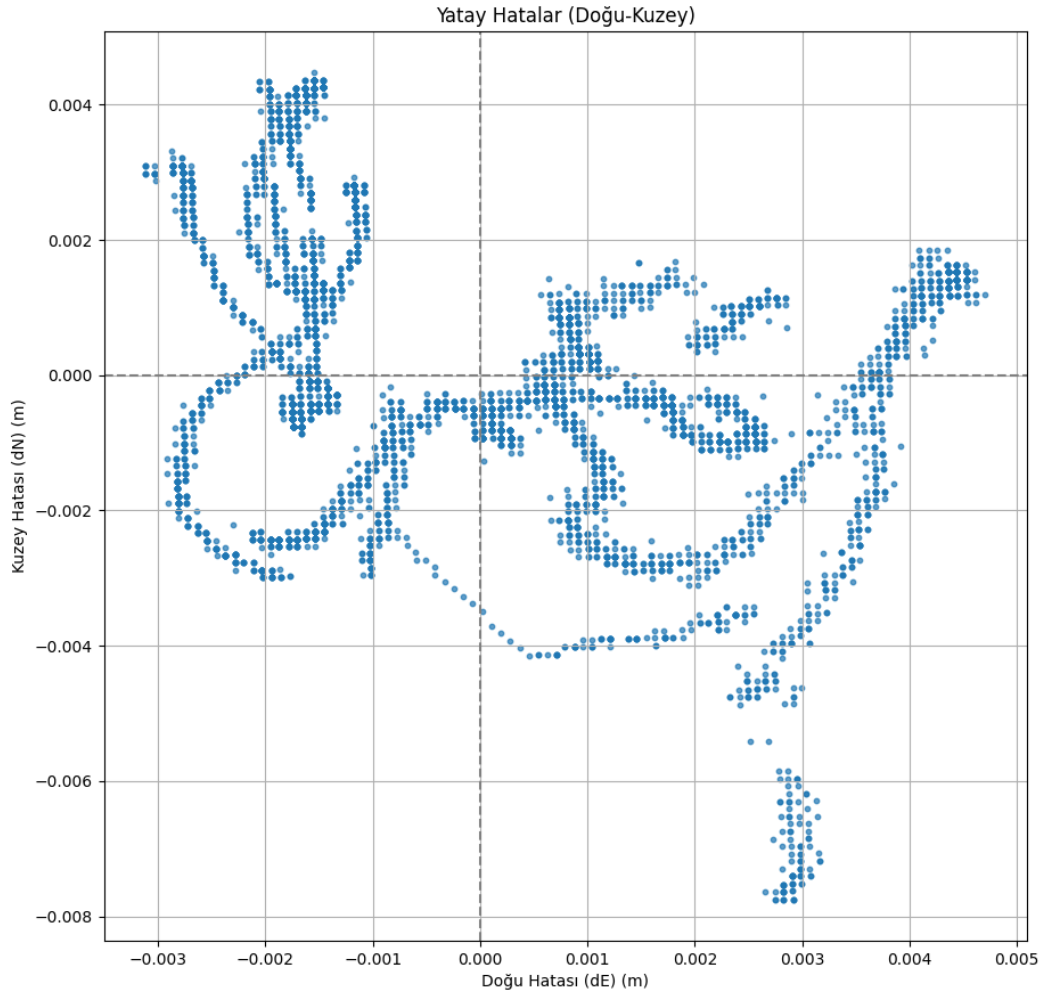
Şekil 7.8: C21 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.

Test-2 köşesinde bulunan C22 noktasına ait grafikler **Şekil 7.9**'da sunulmuştur. C22 noktası için statik konum belirleme yöntemiyle elde edilen koordinat verilerinin hata dağılımlarına ait grafikler incelendiğinde, yatay bileşenlerin dE yönünde STD ve KOH değerleri 0,0038 m; dN yönünde 0,0023 m olarak hesaplanmıştır. dU bileşeninde ise STD ve KOH değerleri 0,0092 m olarak elde edilmiştir. Zaman serisi grafiği incelendiğinde, yatay ve düşey bileşenlerde minimum ve maksimum hata değerleri sırasıyla dE bileşeninde -0,0202 m ile 0,0057 m, dN bileşeninde -0,0061 m ile 0,0065 m, dU bileşeninde ise -0,0184 m ile 0,0585 m aralığında noktaların dağıldığı görülmektedir. Bu analizler sonucunda, **Şekil 7.5**'te gösterilen Test-2 köşesine ait C21 ve C22 referans noktalarının kesin koordinatları belirlenmiştir.

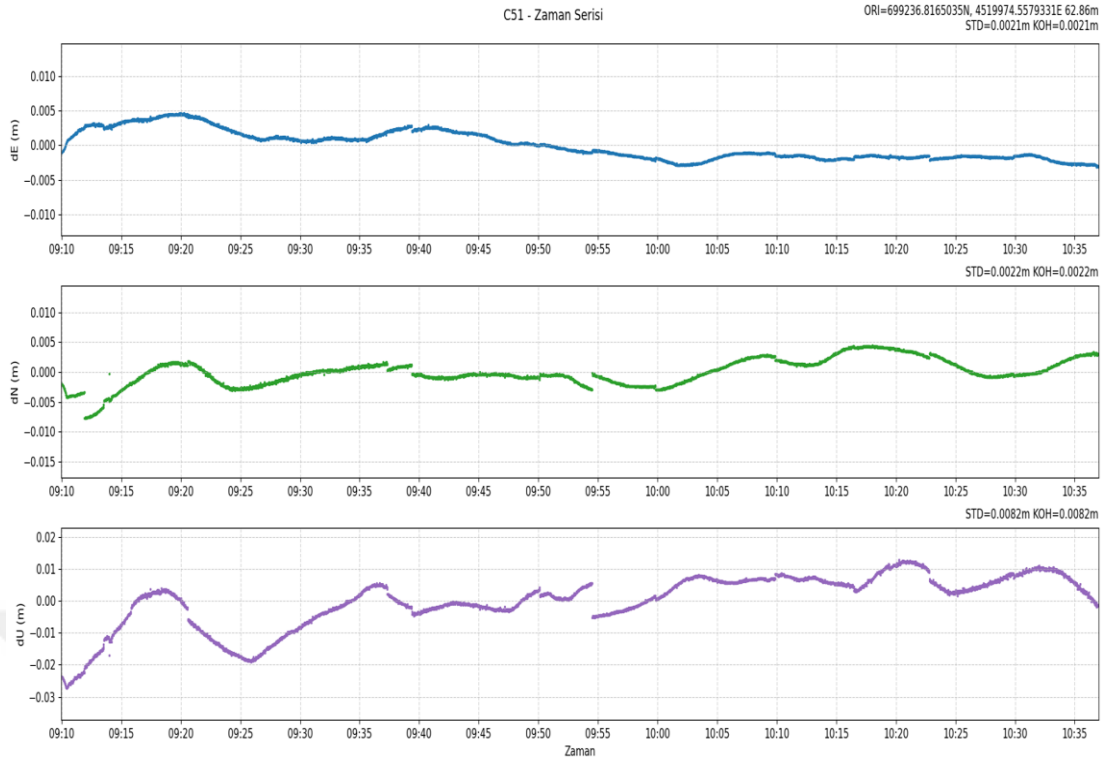


Şekil 7.9: C22 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.

Ölçüm düzeneğinin son olarak kurulduğu Test-3 köşesindeki C51 noktasına ait grafikler **Şekil 7.10**'da sunulmuştur. C51 noktası için statik konum belirleme yöntemiyle elde edilen koordinat verilerinin hata dağılımlarına ait grafikler incelendiğinde, yatay bileşenlerin dE yönünde STD ve KOH değerleri 0,0021 m; dN yönünde 0,0022 m olarak hesaplanmıştır. dU bileşeninde ise STD ve KOH değerleri 0,0082 m olarak elde edilmiştir. Zaman serisi grafiği incelendiğinde, yatay ve düşey bileşenlerde minimum ve maksimum hata değerleri sırasıyla dE bileşeninde -0,0031 m ile 0,0047 m, dN bileşeninde -0,0077 m ile 0,0045 m, dU bileşeninde ise -0,0273 m ile 0,0128 m aralığında noktaların dağıldığı görülmektedir.



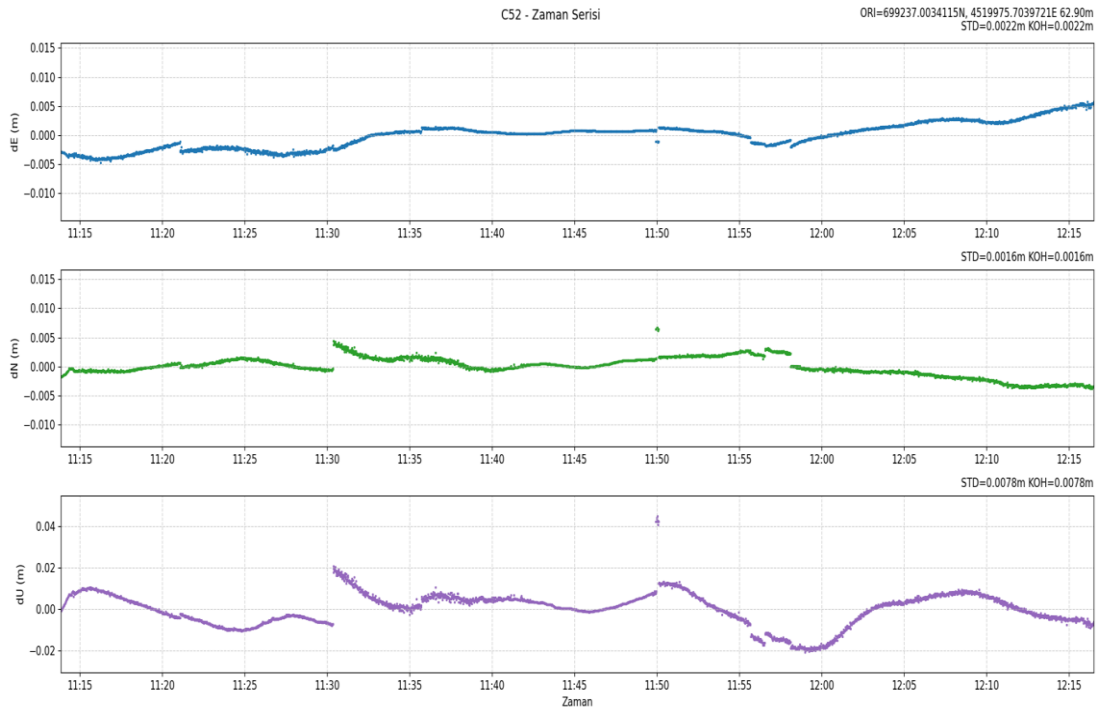
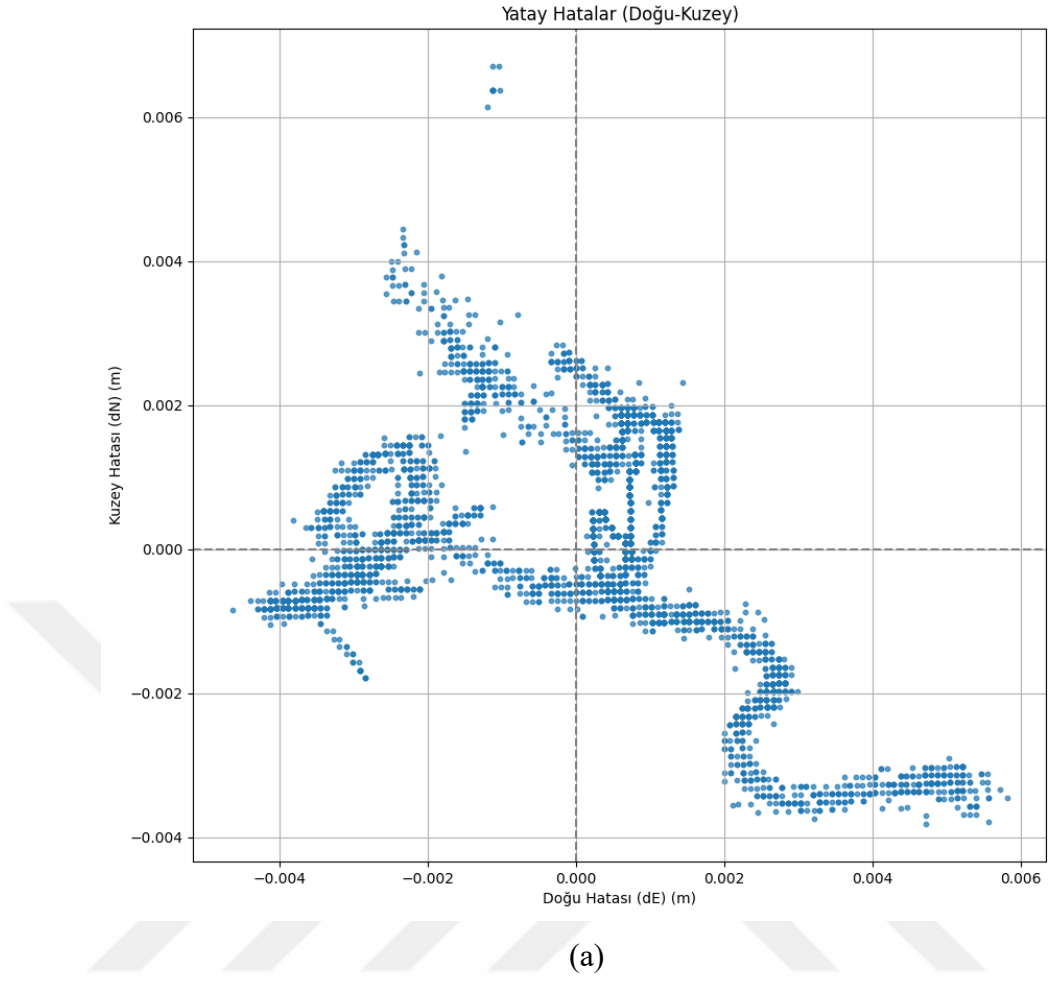
(a)



(b)

Şekil 7.10: C51 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.

Test-3 köşesinde bulunan C52 noktasına ait grafikler **Şekil 7.11**'de sunulmuştur. C52 noktası için statik konum belirleme yöntemiyle elde edilen koordinat verilerinin hata dağılımlarına ait grafikler incelendiğinde, yatay bileşenlerin dE yönünde STD ve KOH değerleri 0,0022 m; dN yönünde 0,0016 m olarak hesaplanmıştır. dU bileşeninde ise STD ve KOH değerleri 0,0078 m olarak elde edilmiştir. Zaman serisi grafiği incelendiğinde, yatay ve düşey bileşenlerde minimum ve maksimum hata değerleri sırasıyla dE bileşeninde -0,0046 m ile 0,0058 m, dN bileşeninde -0,0038 m ile 0,0067 m, dU bileşeninde ise -0,0209 m ile 0,0447 m aralığında noktaların dağıldığı görülmektedir. Bu analizler sonucunda, **Şekil 7.5**'te gösterilen Test-3 köşesine ait C51 ve C52 referans noktalarının koordinatları belirlenmiştir.



Şekil 7.11: C52 noktasının analizlerine ait grafikler: (a) Yatay hata dağılımları ve (b) Zaman serileri.

RTKLIB yazılımında statik konum belirleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu hesaplamalar sonucunda, C11, C12, C21, C22, C51 ve C52 referans noktalarının ITRF96 koordinat sisteminin 2023.5 epoğuna ait UTM 6° projeksiyonundaki koordinatları belirlenmiştir. Referans noktalarının koordinatları **Tablo 7.1**'de verilmiştir.

Tablo 7.1: Referans noktalarının 2023.5 epoğundaki koordinatları.

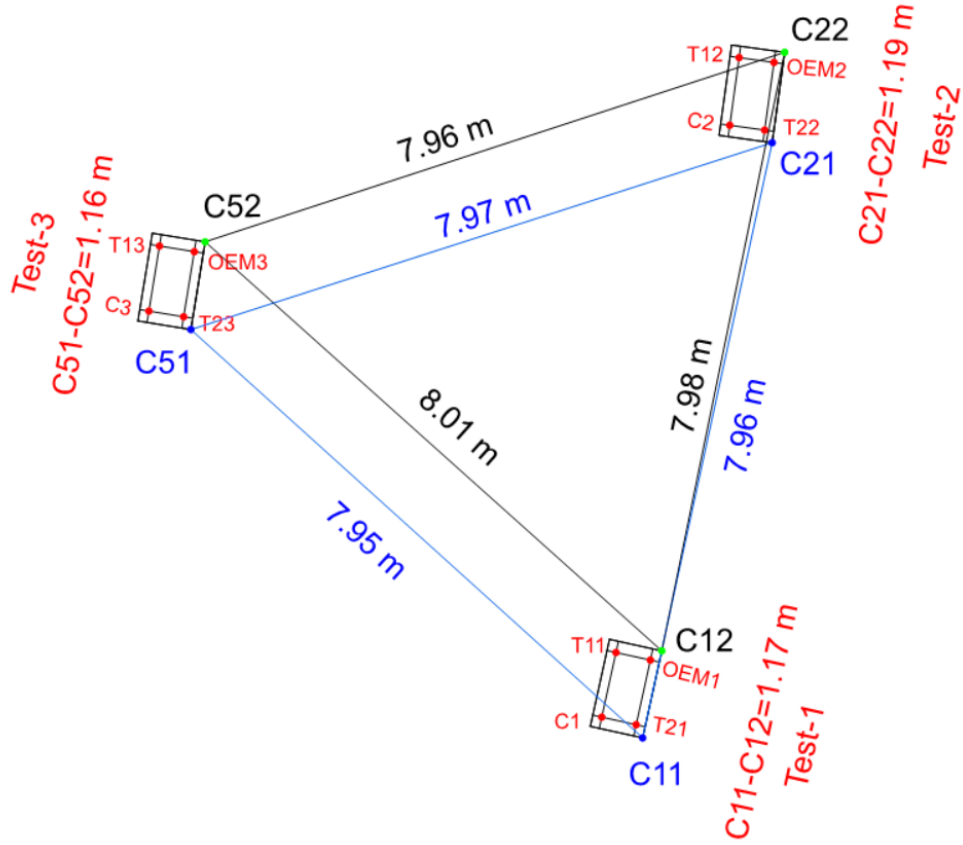
Noktalar	Sağa (m)	Yukarı (m)	Elipsoidal Yükseklik (m)
C11	699242.7168	4519969.2253	62.8850
C12	699242.9672	4519970.3619	62.9043
C21	699244.4084	4519976.9979	62.8923
C22	699244.5715	4519978.1789	62.8961
C51	699236.8165	4519974.5579	62.8587
C52	699237.0034	4519975.7040	62.9026

Referans noktalarının kesin koordinatları yukarıdaki hesaplamalar sonucunda belirlendikten sonra, Test-1, Test-2 ve Test-3 köşelerinde kurulan ölçüm düzeneğinin üzerinde bulunan cihazlara ait koordinatlar, **Şekil 7.1**'de belirtilen mesafe değerleri ve cihazların anten yükseklikleri düşülerek düzeneğin çatı zemininden olan yüksekliği (0.70 m) hesaba katılarak belirlenmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda ITRF96 koordinat sisteminin 2023.5 epoğuna ait UTM 6° projeksiyonunda elde edilen koordinatlar **Tablo 7.2**'de sunulmuştur.

Tablo 7.2: Test-1-2-3 köşelerinde kurulan ölçüm düzeneğinin üzerinde bulunan cihazların koordinatları.

Köşeler	Cihazlar	Sağa (m)	Yukarı (m)	Elipsoidal Yükseklik (m)
Test-1	C1	699242.182638699	4519969.49659453	62.1034
	OEM1	699242.817775056	4519970.24127419	
	T11	699242.368552862	4519970.34026621	
	T21	699242.631860892	4519969.39760251	
Test-2	C2	699243.8543412	4519977.22589599	62.1122
	OEM2	699244.4321233	4519978.04671074	
	T12	699243.97645233	4519978.10967078	
	T22	699244.310012171	4519977.16293595	
Test-3	C3	699236.26821071	4519974.79933551	62.1009
	OEM3	699236.860830956	4519975.57524322	
	T13	699236.40682918	4519975.64928636	
	T23	699236.722212486	4519974.72529237	

Test alanı için oluşturulan üçgenlerin köşelerine ait referans noktalarının ve bu üçgenlerin köşe noktalarına denk gelecek şekilde konumlandırılan ölçüm düzeneğinin üzerinde bulunan cihazlara ait koordinatların belirlenmesi sonucundaki ölçüm planına ait şematik gösterim **Şekil 7.12**'de sunulmuştur.



Şekil 7.12: Referans noktalara ait koordinatlar kullanılarak oluşturulan ölçüm planı.

RTKLIB yazılımında statik konum belirleme yöntemi kullanılarak belirlenen referans nokta koordinatları ile ölçüm düzeneğinde yer alan cihazların koordinat değerleri esas alınarak, ilerleyen bölümlerde GNSS gözlem verileri ile bu doğrulanmış koordinatlar arasındaki sapmaların istatistiksel olarak incelenmesi sunulmuştur.

7.4. Düzeltme Ürünlerinin İndirilmesi ve RTKLIB Parametre Ayarları

Ölçüm verilerinin değerlendirilmesi için gerekli olan düzeltme ürünleri CDDIS'in yayınladığı arşiv verilerinden sağlanmıştır [Web 1]. Bu ürünlerin CDDIS sitesi üzerinden doğru bir şekilde indirilmesini sağlamak amacıyla, Ek A1'de sunulan bir Python kodu geliştirilmiştir. Bu kod, ölçüm verilerindeki GNSS zaman bilgilerini kullanarak, belirlenen analiz merkezlerine ait ürünlerin otomatik olarak indirilmesini gerçekleştirmiştir. Bu sayede, manuel indirme işlemlerinde karşılaşılabilecek hatalar minimize edilmiş ve veri indirme süreci önemli ölçüde hızlandırılmıştır.

Şekil 7.13: GNSS veri indirme otomasyonu

Kod için geliştirilen arayüz, **Şekil 7.13**'te gösterilmektedir. Bu arayüz, geliştirilen otomasyonun CDDIS sitesine giriş yapabilmesi için gerekli kullanıcı bilgilerinin girileceği bir alan, ham GNSS verilerine ait RINEX dosyasının girdi olarak seçileceği bir sekme, indirilecek verilerin bilgisayar üzerinde hangi dizine kaydedileceğinin belirlenebileceği bir seçenek ve indirme işlemini başlatmak, iptal etmek, duraklatmak veya devam ettirmek için tasarlanmış kontrol sekmelerinden oluşmaktadır. Bu sayede, indirilen düzeltme ürünleri dosya adlandırma yapılarına göre düzenli bir şekilde klasörlere otomatik olarak ayrılarak kaydedilmiştir.

Akıllı mobil cihazlardan elde edilen ham GNSS gözlemlerinin konumlandırma performansının değerlendirilmesinde ve doğruluk analizinde kullanılan konum belirleme yöntemlerinden statik ve PP-PPP-Statik yöntemi, literatürdeki çalışmalara paralel olarak bu tez kapsamında da kullanılmıştır. Cihazlardan elde edilen ham GNSS verilerinin kapsamlı ve çok kriterli bir şekilde RTKLIB yazılımında değerlendirilmesi için, CDDIS sitesi üzerinden sağlanan CODE, IGS, GFZ, GRG ve JAX analiz merkezlerine ait uydu yörünge ve saat düzeltmeleri, Dünya Yönelim Parametreleri (Earth Orientation Parameters, EOP), Diferansiyel Kod Sapmaları (Differential Code Biases, DCB), iyonosfer düzeltmeleri ve navigasyon mesajlarını içeren düzeltme ürünleri kullanılmıştır. Bu analiz merkezleri, farklı gecikme sürelerine ve doğruluk seviyelerine sahip 4 veri tipi sunmaktadır: final (FIN), opsiyonel final (OPSFIN), rapid (RAP) ve ultra-rapid (ULT). ham GNSS verilerinin değerlendirilmesi sürecinde,

analizlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak amacıyla bu veri tipleri kullanılmaktadır. IGS analiz merkezi tarafından yapılan değerlendirmeler sonucunda, en hassas konumlandırma doğruluğunu sağlayan veri tipi final ürünleri kullanıldığında elde edildiği belirlenmiştir. Farklı analiz merkezilerine ait ürünler kullanılarak değerlendirmelerin yapılacağı bu tez kapsamında da final veri tipine ait ürünlerin kullanılması tercih edilmiştir. **Tablo 7.3**'te değerlendirmeler için kullanılacak olan analiz merkezleri ve ürünlerine ait bilgiler bulunmaktadır. Ürünlerin adlandırılmasına ait detaylı bilgiler CDDIS sitesinde [Web 1] açıklanmıştır.

Tablo 7.3: Analiz merkezleri ait ürünler

Analiz Merkezleri	Veri Tipi	Veri Formatı	Ürünler
CODE	Final	CLK3	COD0MGXFIN_20231560000_01D_30S_CLK.CLK
		SP3	COD0MGXFIN_20231560000_01D_05M_ORB.SP3
		EOP	COD0MGXFIN_20231560000_01D_12H_ERP.ERP
		IONEX	COD0OPSFIN_20231560000_01D_01H_GIM.INX
GFZ		CLK3	GFZ0OPSFIN_20231560000_01D_30S_CLK.CLK
		SP3	GFZ0OPSFIN_20231560000_01D_05M_ORB.SP3
		EOP	GFZ0OPSFIN_20231550000_07D_01D_ERP.ERP
		DCB	GFZ0OPSRAP_20231560000_01D_01D_DCB.BIA
GRG (CNES)		CLK3	GRG0OPSFIN_20231560000_01D_30S_CLK.CLK
		SP3	GRG0OPSFIN_20231560000_01D_05M_ORB.SP3
		EOP	GRG0OPSFIN_20231550000_07D_01D_ERP.ERP
		ERP	GRG0OPSULT_20231560000_02D_01D_ERP.ERP
IGS		CLK3	IGS0OPSFIN_20231560000_01D_30S_CLK.CLK
		SP3	IGS0OPSFIN_20231560000_01D_15M_ORB.SP3
		EOP	IGS0OPSFIN_20231550000_07D_01D_ERP.ERP
		IONEX	IGS0OPSFIN_20231560000_01D_02H_GIM.INX
JAX		CLK3	JAX0MGXFIN_20231560000_01D_30S_CLK.CLK
		SP3	JAX0MGXFIN_20231560000_01D_05M_ORB.SP3
		EOP	JAX0MGXFIN_20231560000_01D_01D_ERP.ERP

Analiz merkezlerine ait düzeltme ürünleri, Test-1 köşesinin C1 noktasında hassas bir şekilde veri kaydı yapan CHC I80 GNSS alıcısının elde ettiği gözlem verileri üzerinde uygulanarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sırasında, iyonosfer düzeltmelerine ait veriler yalnızca CODE ve IGS analiz merkezlerinde bulunduğundan, diğer analiz merkezlerinin değerlendirmelerinde iyonosfer düzeltmesi olarak CODE analiz merkezine ait veriler kullanılmıştır. Aynı şekilde, DCB ürünü yalnızca Çin Bilimleri Akademisi (Chinese Academy of Sciences, CAS) ve GFZ analiz merkezlerinde bulunduğundan, GFZ analiz merkezi ile yapılan değerlendirmelerde GFZ'ye ait DCB ürünü, diğer analiz merkezlerinde ise CAS analiz merkezine ait DCB ürünü kullanılmıştır.

Statik ve PP-PPP-Statik olarak gerçekleştirilecek olan değerlendirmeler, yukarıdaki bilgilendirmeler doğrultusunda **Tablo 7.3**'te belirtilen ürünler kullanılarak ve RTKLIB yazılımının RTKpost modülüne ait **Tablo 7.4**'de verilen parametre ayarları uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler 5 farklı analiz merkezine ait ürünlerle çok kriterli olarak gerçekleştirildiği için, analiz sonuçları sistematik bir dosya adlandırma yöntemiyle kaydedilmiştir. Bu yaklaşım, kullanılan ürünler ve parametre ayarlarının karıştırılmasını önleyerek, gereksiz tekrarlı analizlerin yapılmasının önüne geçilmesini sağlamıştır.

Tablo 7.4: RTKLIB'de gerçekleştirilen PP-PPP statik analizi için parametre ayarları.

Veri Girişi	Örnekleme aralığı (s)	1.00
	Gözlem dosyası (Rover): Sabit	Ölçüm cihazlarına ait rinex dosyası
	Gözlem dosyası (Baz istasyonu)	Referans noktasının rinex dosyası
	Navigasyon dosyası (.rx)	ISTA00TUR_R_20231560000_01D_MN.rnx
	Saat dosyası (clk3)	Tablo 7.3 'te bulunan ürünlere ve açıklamalara göre düzenlenmiştir.
	Yörünge dosyası (sp3)	
	İyonosfer dosyası (INX)	
Ayarlar-1	Konumlama Modu	Statik / PPP-Statik
	Frekanslar	L1+L2/E5b+L5/E5a
	Filtre tipi	Combined
	Kesme açısı (°)/SNR maskesi (dBHz)	10°/OFF
	Alıcı dinamikleri/Katı yeryuvarı gelgit düzeltmesi	OFF/SOLID-OTL
	İyonosferik düzeltme	Broadcast/Iono-Free LC/Estimate Tec
	Troposferik düzeltme	Estimate ZTD+Grad
	Uydu efemeris/saat	Precise
	Uydu anteni faz merkezi düzeltmesi	✓
	Alıcı anteni faz merkezi düzeltmesi	✓
	Faz sıçrama etkisi düzeltmesi	✓
	Gölgelenen uyduları reddet (GPS Block IIA için)	✓
	Alıcı-Özerk Bütünlük Takibi (RAIM) Hata Tarama ve Giderme (FDE)	✓
	DCB Düzeltmesi	✓
	Uydular	GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, BeiDou

Tablo 7.4 Devamı: RTKLIB’de gerçekleştirilen PP-PPP statik analizi için parametre ayarları.

Ayarlar-2	Tamsayı belirsizlik çözümü	PPP-AR ve FIX-HOLD/ON/ON (*)
	Sabit çözüm (fix) elde etmek için gereken minimum oran	5 - (PPP-AR çözümde kapalı)
	Belirsizliği sabitlemek için min. kitlenme/yükseklik açısı (°)	10/10
	Belirsizliğin sıfırlanması için kaç uydu kaybı gerekli/ Faz kaymalarını tespit etmek için kullanılan eşik değeri (m)	5/0.050
	Gezici ile sabit arasındaki farkların maksimum zamanı (s)	30.0/ON (RTK işlemlerinde kullanılmaktadır)
	GDOP eşiği/ inovasyon (yenilik) eşiği (m)	30.0/30.0
	Maksimum AR iterasyonu/Filtre iterasyon sayısı	5/5
	Fix çözüm için min. uydu sayısı/Fix çözüm korunduğunda gerekli olan min. uydu sayısı	6/5
	AR için maksimum konum varyansı/ AR filtre	0.1000/ON
	Fix belirsizlik çözümünün korunması için varyans eşiği	0.1000
Çıktı	Çözüm formatı	Lat/Lon/Height
	Çıktı başlığı/İşlem seçenekleri/Hız	ON/ON/OFF
	Zaman biçimi/Ondalık sayısı	ss:dd:ss GPST/3
	Enlem boylam biçimi/Alan ayırıcı	ddd.ddddd
	Çözüm kesintisi durumunda tek çözüm ver / Maksimum çözüm standart sapması (m)	OFF/0
	Datum/Yükseklik	WGS84/Elipsoidal
	Geoit model	EGM2008-SE(2.5'')
	Statik mod için çözüm	All
	Çıkış çözümü durumu / Çıkış hata ayıklama izi	Residual/OFF
Ölçü Hataları	Kod/Taşıyıcı faz hata oranları L1/L2	300.0/300.0
	Taşıyıcı faz hatası temel terimi a+b/yüksekliğe bağlı terimi sinEl (m)	0.003/0.003
	Taşıyıcı Faz/Baz uzunluğu (m/10km)	0.000
	Doppler frekansı (Hz)	1.000
Proses Gürültüleri	Alıcı ivmesi yatay/düsey (m/s2)	3.00E+00/1.00E+00
	Taşıyıcı faz biası (devir)	0.0001
	Düsey iyonosferik gecikme (m/10km)	0.001
	Zenit troposferik gecikme (m)	0.0001
	Uydu saat sürekliliği	5.00E-12
Dosyalar	Uydu/Alıcı anten faz merkezi kayıklığı dosyası	Igs20_2221.atx (T1 ve T2 için alıcı bilgisi yok)
	Geoit veri dosyası	Girilmedi
	DCB veri dosyası	Tablo 2.1 'de bulunan ürünlere ve açıklamalara göre düzenlenmiştir.
	EOP veri dosyası	
	Ionosphere veri dosyası	
	OTL BLQ dosyası	Girilmedi

Değerlendirmelerde, konumlandırma doğruluğuna ve hassasiyetine önem verildiğinden, analiz merkezlerine ait ürünlerin yanı sıra RTKLIB yazılımın RTKpost modülünde yer alan çeşitli analiz çözüm yöntemleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, İyonosferden Arındırılmış Lineer Kombinasyon (Iono-Free LC, IF) ve Estimate TEC (EM) iyonosferik düzeltme çözümleri ele alınmış, her bir çözümün etkisi ayrı ayrı analiz edilmiştir. Ayrıca, PPP-Statik değerlendirmeler için gerekli olan tamsayı belirsizlik çözümü iki farklı yöntemle (FIX-HOLD ve PPP-AR çözümleri) analiz edilerek, farklı çözüm yöntemlerinin konumlandırma performansına etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Bu çok kriterli uygulama çalışması,

konumlandırma analizlerinde daha kapsamlı bir değerlendirme sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

7.5. Koordinat Dönüşümü ve CAD Ortamına Aktarılması

RTKLIB yazılımı ile gerçekleştirilen veri analiz sürecinde, gözlem verileri küresel referans sistemi olarak kullanılan WGS84 datumunda, coğrafi koordinatlar (enlem, boylam, elipsoidal yükseklik) formatında kaydedilmiştir. Değerlendirmelerin hassasiyetini ve doğruluğunu sağlamak amacıyla, WGS84 datumunda coğrafi koordinatlar olarak kaydedilen veriler, ITRF2020 datumunda UTM 6° koordinat sistemine dönüştürülmüştür. RTKLIB yazılımından elde edilen tüm çıktı verilerinin (.pos uzantılı) hızlı ve etkin bir şekilde ITRF2020 datumunda UTM 6° koordinat sistemine dönüştürülmesini sağlamak amacıyla Ek A2’de verilen Python kodu geliştirilmiştir. Bu kod, ‘.pos’ uzantılı RTKLIB dosyasından elde edilen coğrafi koordinatlı gözlem verilerini alarak ITRF2020 datumunda UTM 6° koordinatlarına dönüştürmekte ve Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design, CAD) yazılımlarından biri olan NetCAD programında, koordinatlı bir şekilde ve gerçek konumlarında görselleştirilmesini sağlamak amacıyla verileri NetCAD formatında da kaydetmektedir. NetCAD ortamına aktarılan veriler uydu görüntüsü ile desteklenerek analizlerin sayısal ortamda görüntülenmesi sağlanmıştır. Geliştirilen bu kod sayesinde, GNSS verilerinin değerlendirilmesinde otomasyon sağlanarak, manuel işlemlerden kaynaklanabilecek olası hatalar en aza indirilmiş, veri işleme süreci hızlandırılmış ve verilerin CAD ortamında koordinat verilerine göre görselleştirilmesi sağlanmıştır. Ölçüm verilerinin gerçek koordinatlara olan sapmalarını CAD ortamında görselleştirebilmek amacıyla, her bir cihazın kaydettiği koordinat bileşenlerinin aritmetik ortalamaları alınarak orijin noktaları tanımlanmıştır. Daha sonra bu orijin noktalar ile gerçek referans koordinatlar arasında çizilen doğrusal bazlar aracılığıyla yatay düzlemdeki mesafe hataları görsel olarak sunulmuştur.

7.6. GNSS Gözlem Verilerinin Hata Analizleri

GNSS gözlem verilerinin hata analizlerinde, verilerin ortalama değerlerinden ne kadar sapma gösterdiğini ortaya koyan STD ve analiz edilen değerlerin gerçek değerlerden ne kadar saptığını belirleyen Root Mean Square Error (Karesel Ortalama Hata, KOH)

olmak üzere iki farklı hata analiz yöntemi kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Hata analiz yöntemlerinin her bir gözlem verisine hızlı ve kolay bir şekilde uygulanabilmesi için Ek A3'te sunulan Python kodu geliştirilmiştir. Bu kod sayesinde, hata analizlerinin GNSS gözlem verilerine uygulanması otomatikleştirilmiş ve işlem süreci hızlandırılmıştır.

7.7. Analiz Merkezlerinin PP-PPP-Statik Değerlendirmeleri

7.7.1. C1 Gözlem Verilerinin CODE Ürünleriyle Analizleri

GNSS gözlem verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan analiz merkezlerine ait ürünler, deneysel çalışmanın ilk aşamasında, CHC I80 GNSS alıcısının Test-1 konumundaki C1 noktasında elde edilen verilere uygulanmıştır. Başlangıçta analiz merkezlerinin değerlendirilmesindeki temel amaç, farklı analiz merkezlerine ait ürünlerin hassas CHC GNSS alıcısından elde edilen veriler üzerinde uygulanarak, en hassas ve doğru sonucu veren analiz merkezinin belirlenmesidir. Bu sayede, diğer cihazlar ve her bir nokta için gereksiz işlem yükü ortadan kaldırılarak, analiz sürecinin daha sistematik ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

CHC I80 GNSS (C1) alıcısına ait Test-1 konumundaki gözlem verileri, **Tablo 7.3**'te belirtilen CODE, GRG, GFZ, IGS, JAX analiz merkezlerine ait ürünler ile **Tablo 7.4**'teki parametre ayarları kullanılarak RTKLIB yazılımında çözümlenmiştir. Değerlendirmeler sonucunda elde edilen veriler, Ek-3A'da verilen kod yardımıyla STD ve KOH hata analizleri yapılmıştır.

CHC alıcısıyla ölçüm düzeneğinin Test-1 konumundaki C1 noktasına ait 05.06.2023 tarih ve 09:10-10:40 saatleri arasında 1 Hz örneklem aralığındaki ölçüm verileri, CODE analiz merkezine ait ürünler kullanılarak işlenmiş ve bu kapsamda toplam 4 farklı çözüm yöntemi uygulanmıştır. Bu çözüm yollarına ait hata analizleri, **Tablo 7.5**'te detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bu tablo, CODE analiz merkezinin final ürünleriyle birlikte iki farklı iyonosfer düzeltme yaklaşımı (IF ve EM) kullanılarak gerçekleştirilen PPP-AR ve FIX-HOLD tamsayı belirsizlik çözüm yöntemlerine ait istatistiksel sonuçları içermektedir. Elde edilen analiz çıktıları, yalnızca sayısal değerlerle değil, aynı zamanda grafiksel gösterimlerle de desteklenerek yorumlanmıştır. Analizlerin değerlendirilme akışı, **Tablo 6.5**'te üstten alta doğru

sıralanmış olup, bu kapsamda ilk olarak IF iyonosfer düzeltmesiyle ve PPP-AR tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemiyle elde edilen sonuçlar ele alınmıştır.

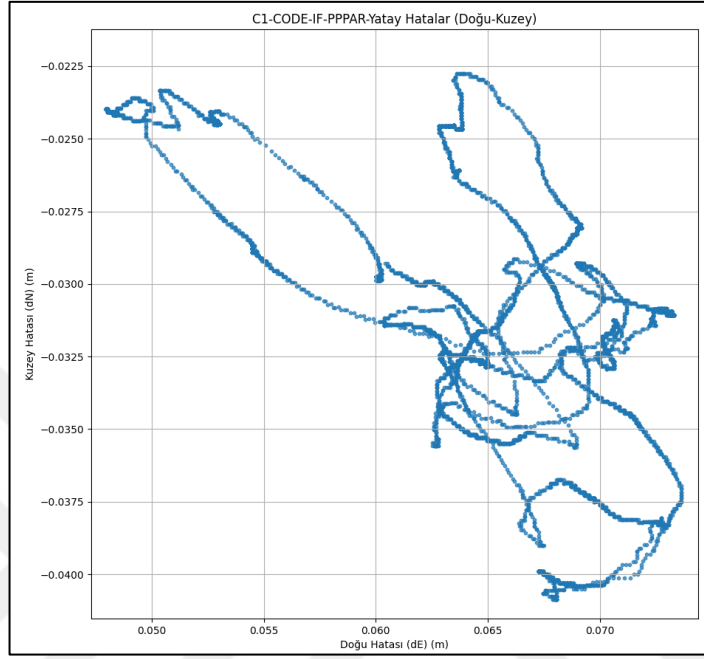
Tablo 7.5: CODE ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.

Analiz Merkezi	Ölçüm Cihazı	Ürün Türü	İyonosfer Düzeltmesi	Tamsayı Belirsizlik Çözüm Yöntemi	Koordinat Bileşeni	STD (m)	KOH (m)	Orijin Koordinatları
Center for Orbit Determination in Europe (CODE)	CHC I80 GNSS Alıcısı (C1)	Final	Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00637	0.06467	699242.2470
					Yukarı (dN)	0.00437	0.03146	4519969.4654
					Elipsoidal Y. (dU)	0.00843	0.18383	62.2870
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.01812	0.08174	699242.2623
					Yukarı (dN)	0.00939	0.03387	4519969.4641
					Elipsoidal Y. (dU)	0.02800	0.21347	62.3150
			Estimate TEC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00555	0.27246	699242.4550
					Yukarı (dN)	0.00418	0.03258	4519969.4643
					Elipsoidal Y. (dU)	0.02309	0.32811	62.4307
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.03060	0.29158	699242.47261
					Yukarı (dN)	0.01684	0.05374	4519969.44557
					Elipsoidal Y. (dU)	0.04164	0.37506	62.47614

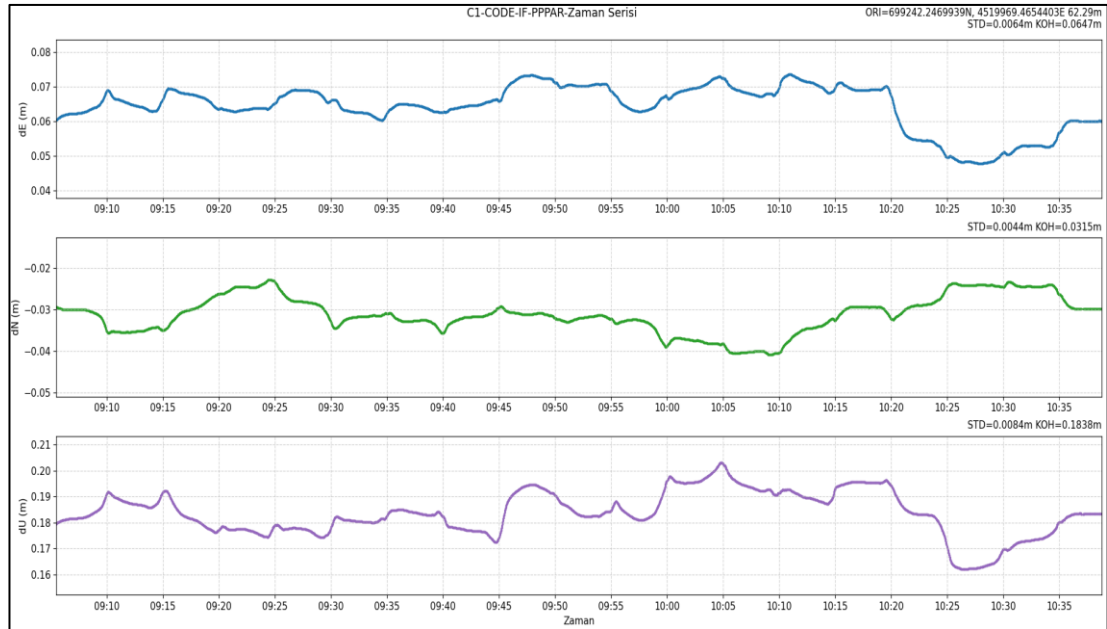
7.7.1.1. Iono-Free-LC ile PPP-AR Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

CHC alıcısıyla ölçüm düzeneğinin Test-1 konumundaki C1 noktasında gözlemlenen verilerin, CODE ürünleriyle IF ve PPP-AR parametreleri kullanılarak yapılan çözümün zaman serisine ve yatay yöndeki hatalarına ait grafikler **Şekil 7.14**'te verilmiştir. Grafikler ve istatistiksel veriler detaylı olarak incelendiğinde, ölçüm sisteminin yatay ve düşey bileşenlerde oldukça yüksek konumlandırma doğruluğu olduğu ortaya konulmuştur. Yatay bileşenlerin sağa yönünde 0.006 m STD ve 0.065 m'lik KOH; yukarı yönünde 0.004 m STD ve 0.031 m KOH; düşey bileşende ise 0.008 m STD ve 0.183 m KOH değerleri hesaplanmıştır. C1 noktasına ait bu hata değerleri ihmal edilebilir derecede düşük olduğunu göstermektedir. Zaman serisi grafiği incelendiğinde, yatay ve düşey bileşenlerde minimum ve maksimum hata değerleri sırasıyla dE yönünde 0.048 m ile 0.074 m, dN yönünde -0.041 m ile -0.023 m ve dU 0.16 m ile 0.20 m arasında değişmektedir. Bu değerlendirmelere göre, düşey

yöndeki hataların yatay yöndeki hatalara göre biraz daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. CODE ürünleriyle IF ve PPP-AR parametreleri kullanılarak uygulanan bu çözüm yönteminde ölçüm süresi boyunca sapmaların neredeyse sabit kaldığı, ani sıçramalar göstermediği görülmektedir.



(a)

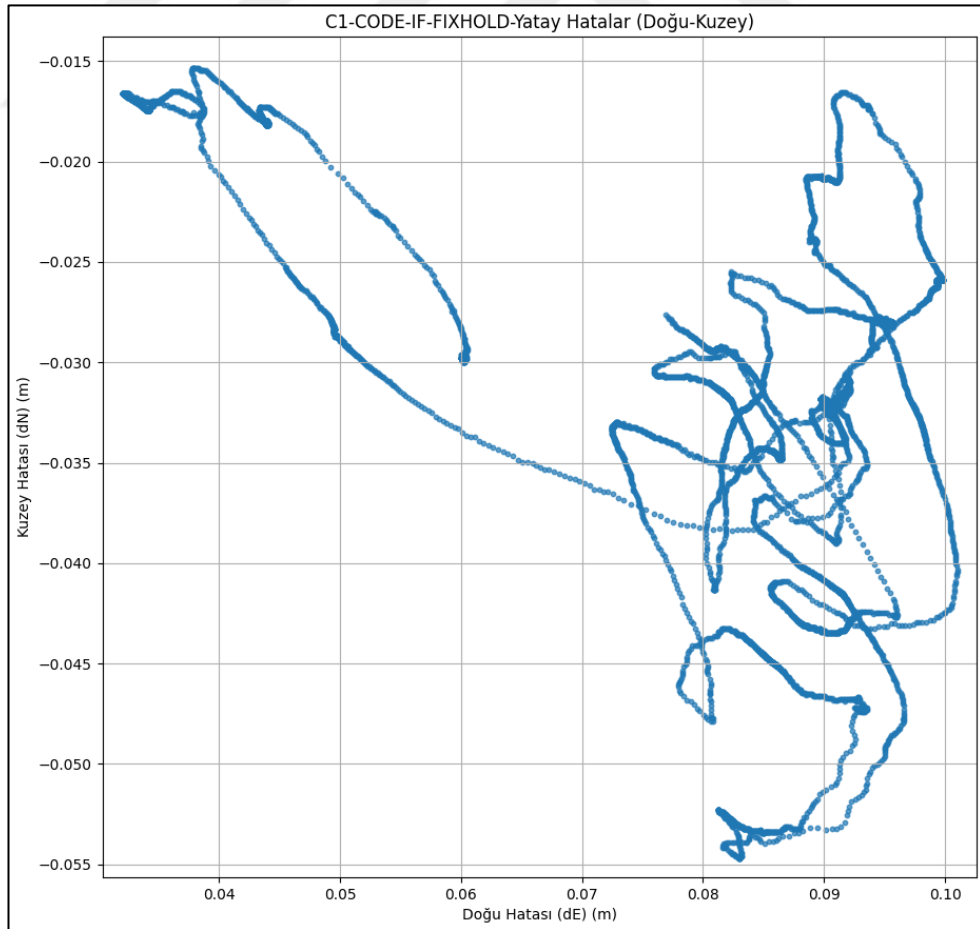


(b)

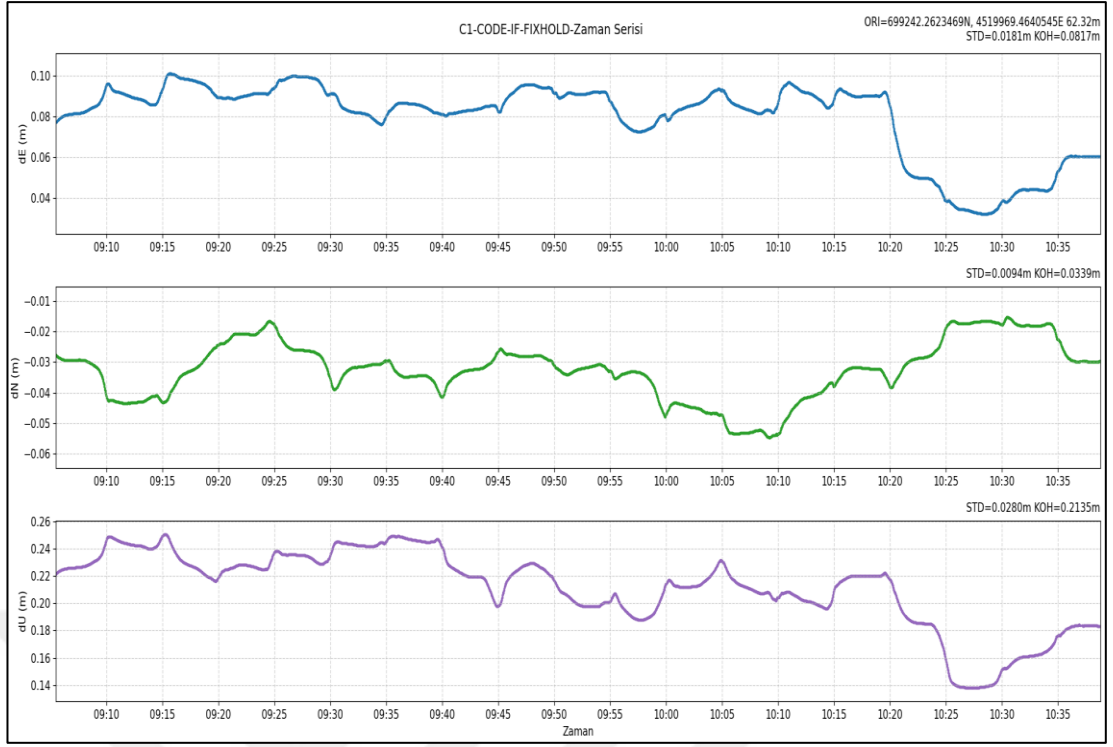
Şekil 7.14: C1 cihazına ait ölçüm verilerinin CODE ürünleriyle Iono-Free-LC ve PPP-AR parametreleri kullanılarak yapılan analiz grafikleri: (a) Yatay yöndeki hatalar ve (b) Zaman serisi.

7.7.1.2. Iono-Free-LC ile FIX-HOLD Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

CHC alıcısıyla ölçüm düzeneğinin Test-1 konumundaki C1 noktasında gözlemlenen verilerin, CODE ürünleriyle IF ve FIX-HOLD parametreleri kullanılarak yapılan çözümün zaman serisine ve yatay yöndeki hatalarına ait grafikler Şekil 7.15'te verilmiştir. Ölçüm verilerinin analizleri incelendiğinde Bölüm 6.7.1.1'deki hata analizlerine yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. Yatay bileşenlerin sağa yönünde 0.018 m STD ve 0.082 m'lik KOH; yukarı yönünde 0.009 m STD ve 0.034 m KOH; düşey bileşende ise 0.028 m STD ve 0.213 m KOH değerleri hesaplanmıştır. Zaman serisi grafiği incelendiğinde, bu hataların zaman içinde belirgin bir değişim göstermeyerek sabit kaldığını ortaya koymaktadır. Yatay ve düşey bileşenlerin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, sırasıyla dE yönünde 0.032 m ile 0.101 m, dN yönünde -0.055 m ile -0.015 m ve dU 0.138 m ile 0.251 m arasında dalgalanmalar göstermektedir. Bu çözüm yolu Bölüm 6.7.1.1'deki çözüm yoluna kıyasla azda olsa daha yüksek sapmalar göstermiştir.



(a)



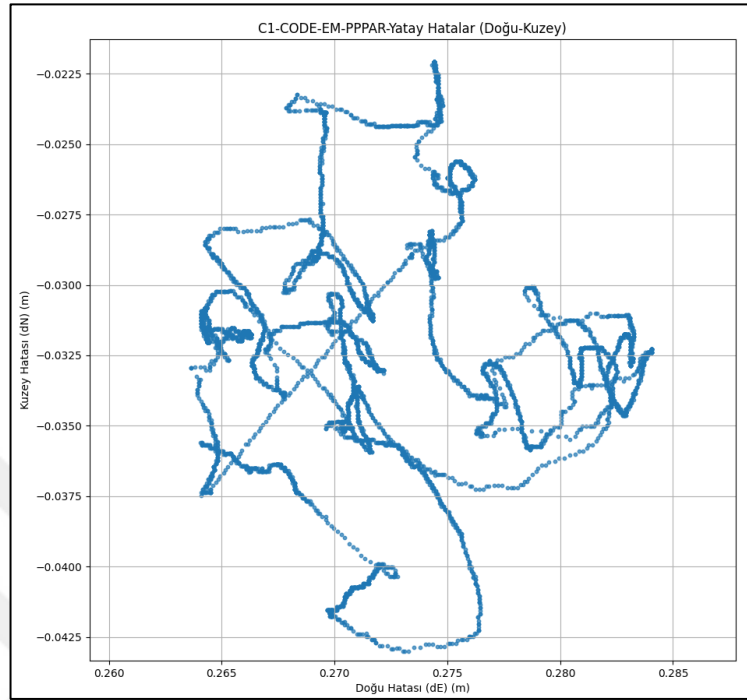
(b)

Şekil 7.15: C1 cihazına ait ölçüm verilerinin CODE ürünleriyle Iono-Free-LC ve FIX-HOLD parametreleri kullanılarak yapılan analiz grafikleri: (a) Yatay yöndeki hatalar ve (b) Zaman serisi.

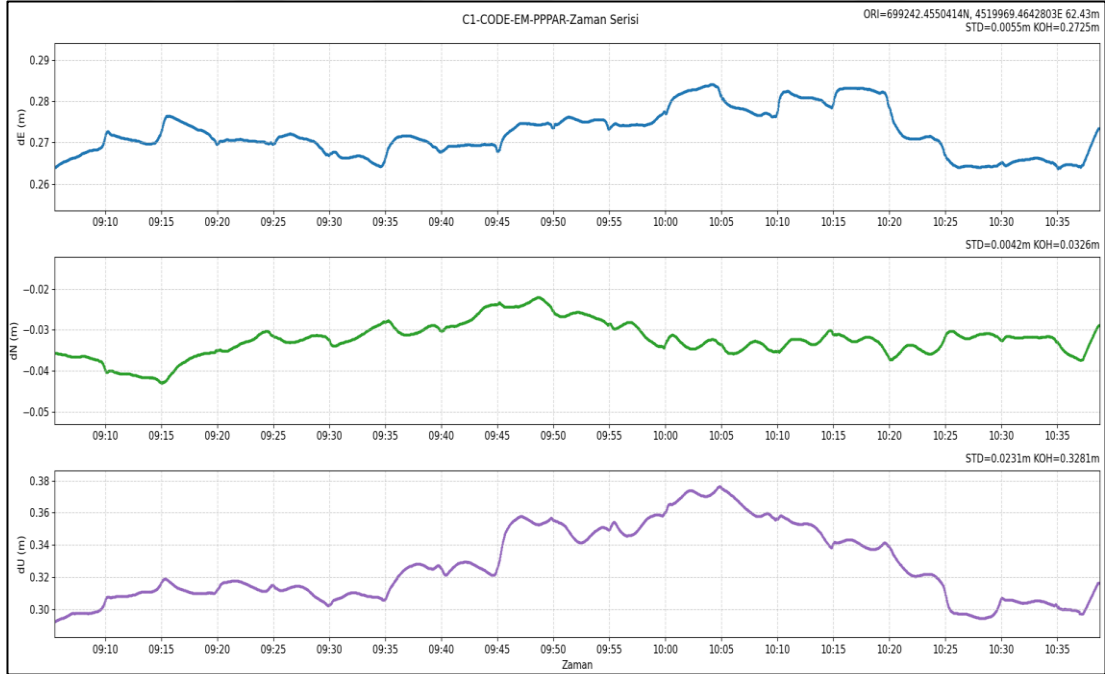
7.7.1.3. Estimate TEC ile PPP-AR Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

CHC alıcısıyla ölçüm düzeneğinin Test-1 konumundaki C1 noktasında gözlemlenen verilerin, CODE ürünleriyle EM ve PPP-AR parametreleri kullanılarak yapılan çözümün hata analizlerine ait grafikler Şekil 7.16'da verilmiştir. EM iyonosfer düzeltmesi ve PPP-AR tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu analizde, yatay bileşenlerin sağa yönünde 0.006 m STD ve 0.272 m'lik KOH; yukarı yönünde 0.004 m STD ve 0.033 m KOH; düşey bileşende ise 0.023 m STD ve 0.328 m KOH değerleri hesaplanmıştır. Zaman serisi grafiği incelendiğinde, bu çözüm yolundaki hataların diğerlerine kıyasla daha belirgin bir değişim göstererek konumlandırma performansının düştüğünü ortaya koymaktadır. Yatay ve düşey bileşenlerin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, sırasıyla dE yönünde 0.264 m ile 0.284 m, dN yönünde -0.043 m ile -0.022 m ve dU 0.292 m ile 0.376 m arasında dalgalanmalar göstermektedir. Bu çözüm yolu özellikle

sağa ve düşey bileşenlerindeki sapmalarla diğer çözüm yollarına kıyasla daha yüksek sapmalar göstermiştir.



(a)

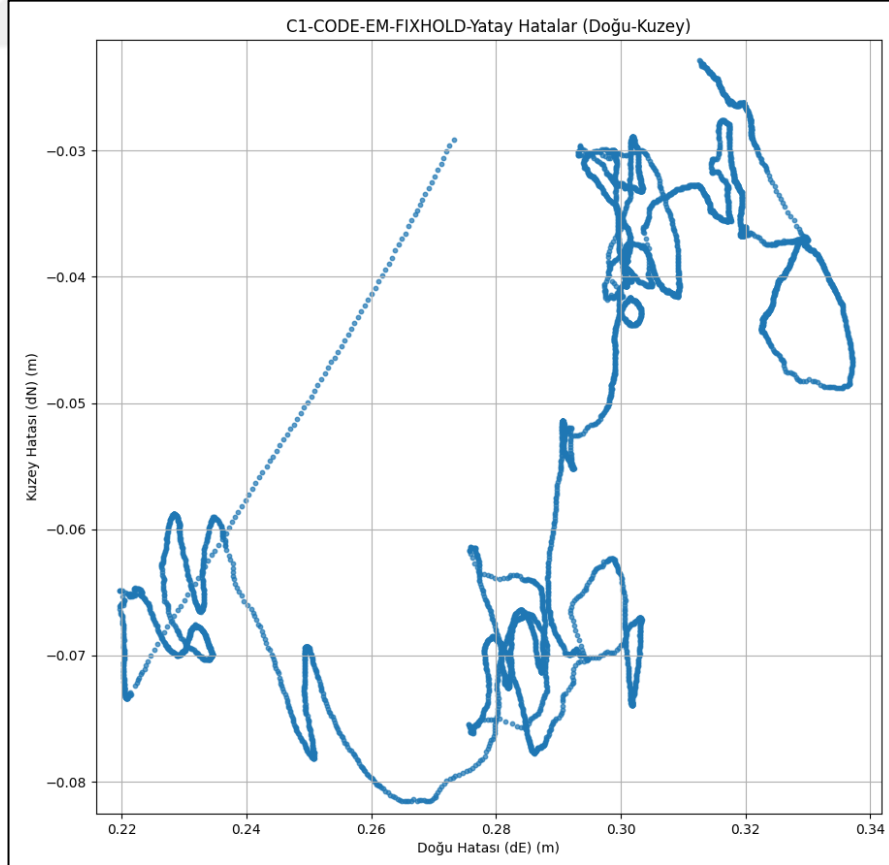


(b)

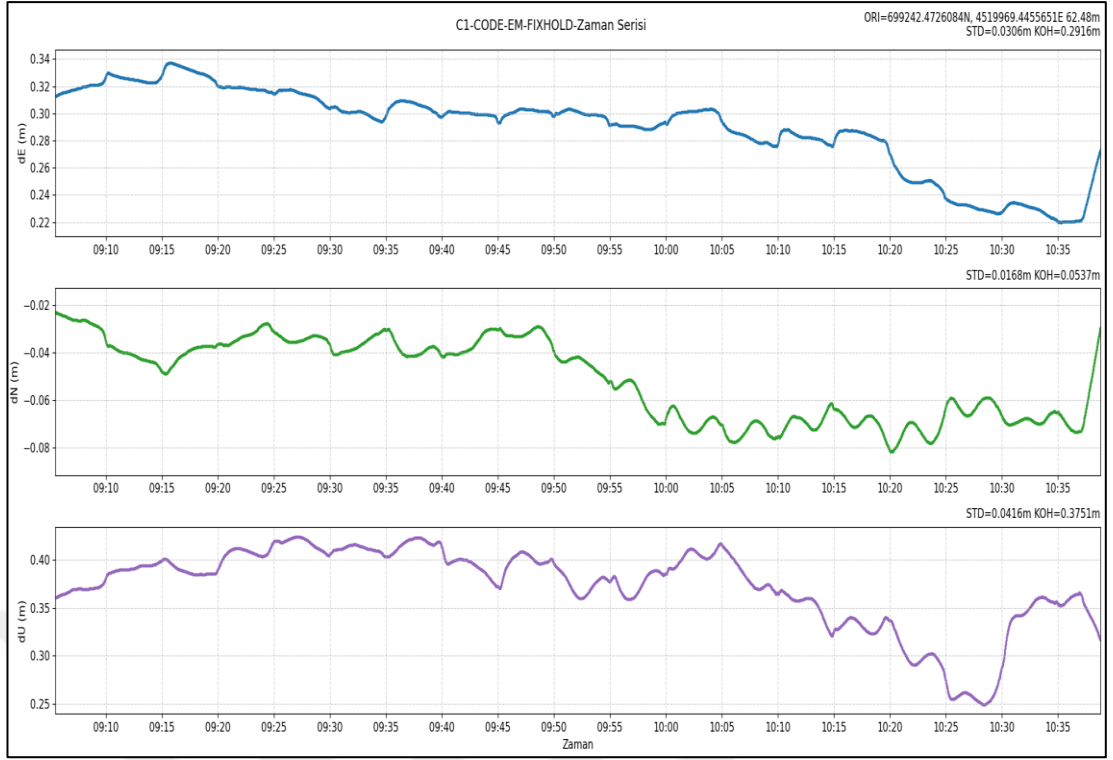
Şekil 7.16: C1 cihazına ait ölçüm verilerinin CODE ürünleriyle Estimate TEC ve PPP-AR parametreleri kullanılarak yapılan analiz grafikleri: (a) Yatay yöndeki hatalar ve (b) Zaman serisi.

7.7.1.4. Estimate TEC ile FIX-HOLD Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

CHC alıcısıyla ölçüm düzeneğinin Test-1 konumundaki C1 noktasında gözlemlenen verilerin, CODE ürünleriyle EM ve FIX-HOLD parametreleri kullanılarak yapılan çözümün hata analizlerine ait grafikler Şekil 7.17’de verilmiştir. EM iyonosfer düzeltmesi ve FIX-HOLD tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu analizde, yatay bileşenlerin sağa yönünde 0.031 m STD ve 0.292 m’lik KOH; yukarı yönünde 0.017 m STD ve 0.054 m KOH; düşey bileşende ise 0.042 m STD ve 0.375 m KOH değerleri hesaplanmıştır. Zaman serisi grafiği incelendiğinde, bu çözüm yolunun daha yüksek hatalar göstererek konumlandırma performansını oldukça düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Yatay ve düşey bileşenlerin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, sırasıyla dE yönünde 0.220 m ile 0.337 m, dN yönünde -0.082 m ile -0.023 m ve dU yönünde ise 0.249 m ile 0.424 m arasında dalgalanmalar göstermektedir. CODE analiz merkezine ait ürünler kullanılarak gerçekleştirilen bu çözüm yolu, diğer çözüm yollarına kıyasla daha yüksek sapmalar göstererek en düşük konumlandırma performansı sunmuştur.



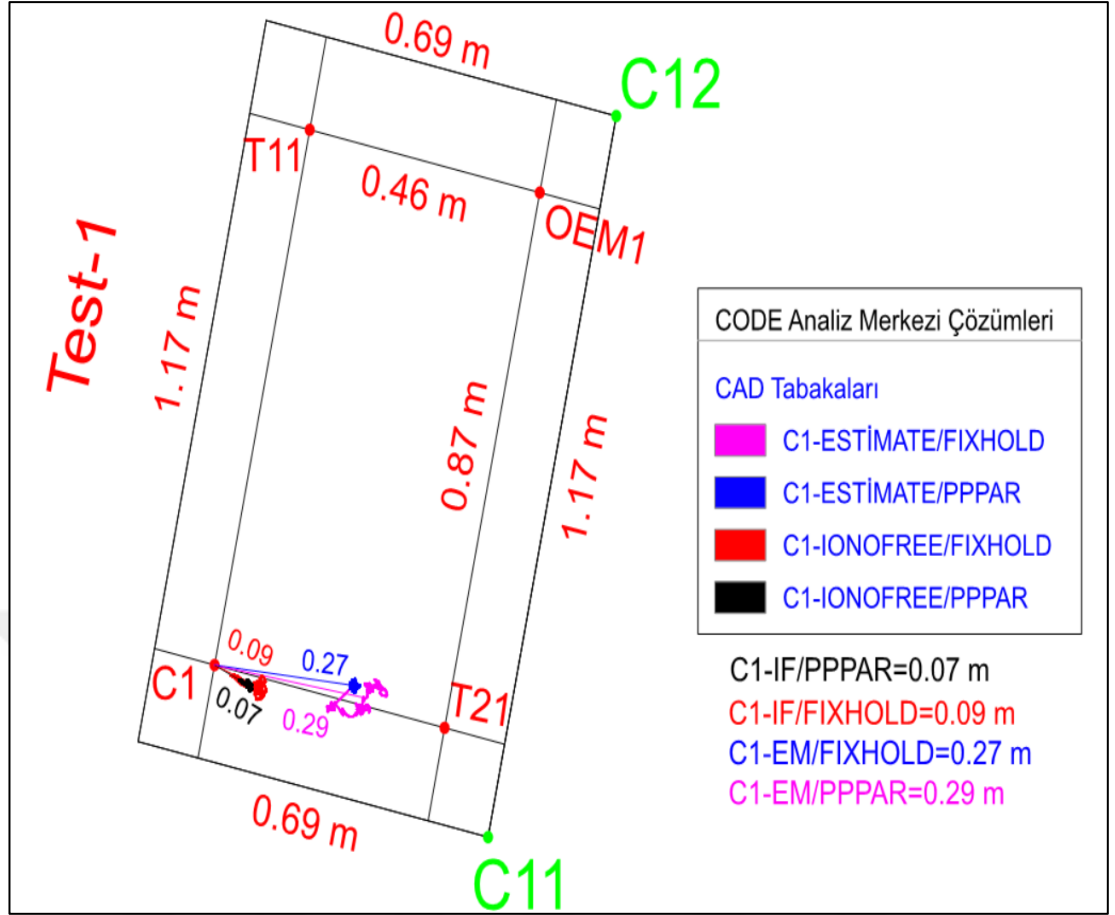
(a)



(b)

Şekil 7.17: C1 cihazına ait ölçüm verilerinin CODE ürünleriyle Estimate TEC ve Fix-Hold parametreleri kullanılarak yapılan analiz grafikleri: (a) Yatay yöndeki hatalar ve (b) Zaman serisi.

CHC I80 GNSS alıcısı ile 05.06.2023 tarihinde 09.10-10.40 saatleri arasında C1 noktasında gözlemlenen verilerin, CODE ürünleri kullanılarak çözümlenen sonuçların CAD ortamındaki çizimi Şekil 7.18’de verilmiştir. Bu görselde, farklı çözüm yollarına ait analiz sonuçlarının doğrulukları, her bir çözüm yönteminin C1 noktasına olan mesafelerine göre renkli olarak gösterilmiştir. Çözüm sonuçlarına bakıldığında, IF/PPP-AR çözümünde elde edilen hata 0.07 m olarak hesaplanmış ve bu sonuç siyah renkle gösterilmiştir. IF/FIXHOLD çözümünde ise 0.09 m’lik bir hata değeri kaydedilmiş ve kırmızı renkte belirtilmiştir. En yüksek hata değerleri, EM/PPP-AR ve EM/FIXHOLD çözümlerinde mavi ve pembe renklerde ifade edilerek sırasıyla 0.27 m ve 0.29 m olarak kaydedilmiştir.



Şekil 7.18: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait CODE analiz sonuçlarının CAD gösterimi.

CODE ürünleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, PPP-AR ve FIX-HOLD tamsayı belirsizlik çözüm yöntemleri arasındaki değerlendirmeler sonucunda, PPP-AR yöntemi, FIX-HOLD yöntemine kıyasla daha düşük hata içerdiği görülmüştür. STD değerlerine bakıldığında, FIX-HOLD yöntemiyle çözümlenen gözlemlerin daha geniş bir aralıkta dağıldığı ve daha az güvenilir olduğu görülmüştür. Bu analizler, FIX-HOLD çözüm yönteminin, PPP-AR çözüm yöntemine göre tüm koordinatlarda daha yüksek hatalar içerdiğini, PPP-AR yönteminin ise daha düşük STD ve KOH değerleriyle daha tutarlı ve kesin çözümler sunduğu tespit edilmiştir. İyonosfer düzeltme parametrelerine göre yapılan analizlerde, IF parametresi kullanılarak gerçekleştirilen hata analizlerinin, EM parametresine kıyasla daha hassas ve doğru sonuçlar sağladığı gözlemlenmiştir.

Referans noktalarına ait koordinat verileri kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, C1 noktasındaki CHC I80 GNSS alıcısına ait verilerin, CODE analiz merkezinin ürünleriyle gerçekleştirilen 4 farklı analizde, IF iyonosfer düzeltme

parametresi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yönteminin, diğer çözüm yöntemlerine kıyasla daha hassas ve doğru sonuçlar sağladığı belirlenmiştir.

7.7.2. C1 Gözlem Verilerinin GFZ Ürünleriyle Analizleri

CHC alıcısıyla C1 noktasında 05.06.2023 tarihinde 09.10-10.40 saatleri arasında 1 Hz örneklem aralığında gözlemlenen veriler, GFZ analiz merkezine ait ürünler kullanılarak değerlendirilmiş ve bu süreçte toplamda 4 farklı çözüm yöntemi uygulanmıştır. Bu çözüm yollarına ait hata analizleri, **Tablo 7.6**'da ayrıntılı bir şekilde sunulmaktadır. Söz konusu tablo, GFZ analiz merkezinin final ürünleriyle birlikte IF ve EM iyonosfer düzeltme yaklaşımları kullanılarak gerçekleştirilen PPP-AR ve FIX-HOLD tamsayı belirsizlik çözüm yöntemlerine ait istatistiksel sonuçları içermektedir.

Tablo 7.6: GFZ ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.

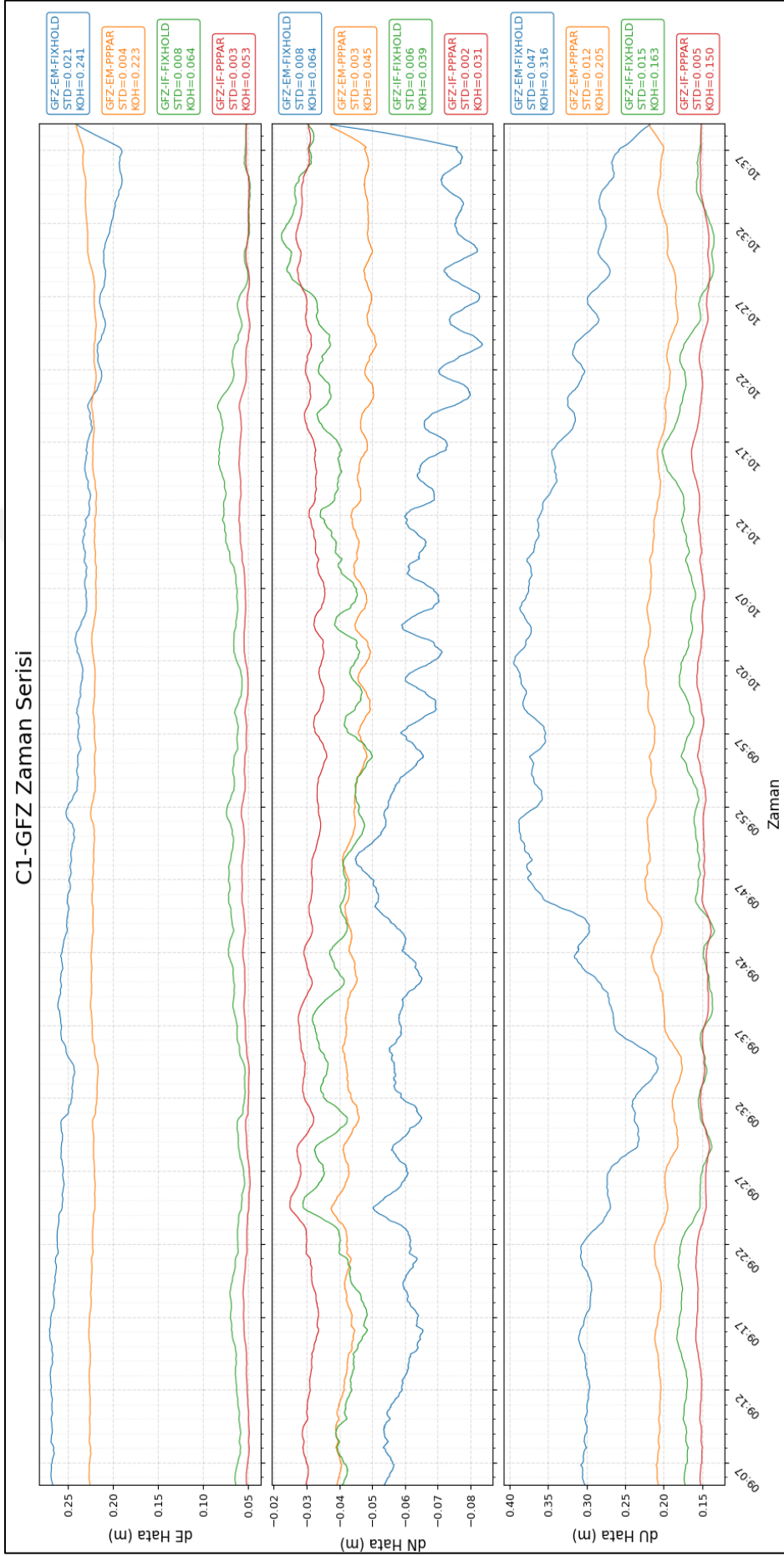
Analiz Merkezi	Ölçüm Cihazı	Ürün Türü	İyonosfer Düzeltmesi	Tamsayı Belirsizlik Çözüm Yöntemi	Koordinat Bileşeni	STD (m)	KOH (m)	Orijin Koordinatları
Geo Forschungs Zentrum (GFZ)	CHC I80 (C1)	Final	Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00301	0.05286	699242.2354
					Yukarı (dN)	0.00232	0.03114	4519969.4655
					Elipsoidal Y. (dU)	0.00510	0.14988	62.2532
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.00798	0.06399	699242.2461
					Yukarı (dN)	0.00619	0.03904	4519969.4580
					Elipsoidal Y. (dU)	0.01492	0.16273	62.2654
			Estimate TEC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00372	0.22266	699242.4053
					Yukarı (dN)	0.00315	0.04494	4519969.4518
					Elipsoidal Y. (dU)	0.01171	0.20494	62.3080
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.02118	0.24117	699242.4229
					Yukarı (dN)	0.00837	0.06391	4519969.4332
					Elipsoidal Y. (dU)	0.04735	0.31589	62.4157

GFZ ürünleri kullanılarak gerçekleştirilen çözüm yollarına ilişkin zaman serisi sonuçları, toplu olarak **Şekil 7.19**'da sunulan grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu grafik, farklı parametre ve çözüm yollarının konumlandırma performanslarını aynı anda değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Grafik ve tablodaki istatistiksel sonuçlar incelendiğinde, GFZ-IF-PPPAR çözüm yolu, 0.003 m dE, 0.002 m dN ve 0.005 m dU STD; 0.053 m dE, 0.031 m dN ve 0.150 m dU değerlerinde KOH değerleriyle yüksek

doğruluk sunarak en başarılı çözüm yolu olarak öne çıkmaktadır. Yatay ve düşey bileşenlerin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.048 m ile 0.060 m, dN yönünde -0.036 m ile -0.025 m ve dU yönünde ise 0.138 m ile 0.164 m arasında dalgalanmalar göstermektedir. GFZ-IF-FIXHOLD çözüm yolunda ise dE yönünde 0.008 m, dN yönünde 0.006 m ve dU yönünde 0.015 m STD; 0.064 m dE, 0.039 dN ve 0.163 m dU değerlerinde KOH değerleri gözlemlenmiştir. Koordinat bileşenlerinin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.047 m ile 0.084 m, dN yönünde -0.050 m ile -0.022 m ve dU yönünde ise 0.134 m ile 0.202 m arasında sapmalar göstererek PPP-AR çözüm göre daha yüksek hatalar elde edilmiştir.

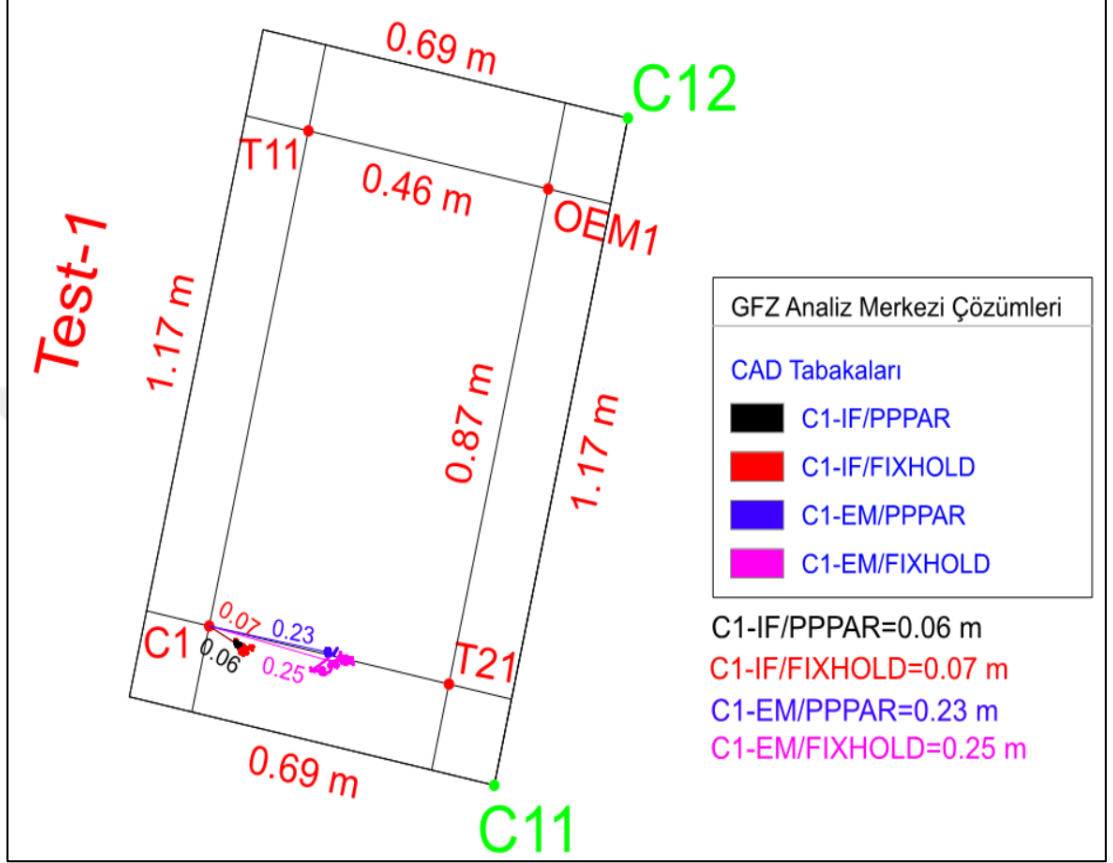
EM iyonosfer düzeltme parametresi kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerde ise, GFZ-EM-PPPAR çözüm yolunda, dE yönünde 0.004 m, dN yönünde 0.003 m ve dU yönünde 0.012 m'lik STD ile 0.223 m dE, 0.045 m dN ve 0.205 m dU değerlerinde KOH değerleriyle IF parametresine göre daha yüksek hatalar tespit edilmiştir. Minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.217 m ile 0.240 m, dN yönünde -0.051 m ile -0.037 m ve dU yönünde ise 0.176 m ile 0.225 m arasında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. GFZ-EM-FIXHOLD çözümünde ise dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.021 m, 0.008 m ve 0.047 m STD ile 0.241 m, 0.064 m ve 0.316 m'lik KOH değerlerinde hatalar bulunmuştur. Minimum ve maksimum hata değerlerinde ise, dE yönünde 0.189 m ile 0.270 m, dN yönünde -0.084 m ile -0.038 m ve dU yönünde ise 0.207 m ile 0.395 m arasında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında, GFZ-IF-PPPAR çözüm yolu en düşük hata seviyelerine sahip olup, GFZ analiz merkezi kullanılarak yapılan çözümlerde konumlandırma doğruluğu açısından en başarılı sonuçları sağladığı belirlenmiştir.

Şekil 7.20'de görülen CAD çizimi, C1 noktasında yapılan ölçümlerle elde edilen verilerin, GFZ analiz merkezine ait ürünlerle çözümlenen sonuçlarını temsil etmektedir. Bu çözüm yollarının her biri, C1 noktasındaki konum doğruluğu açısından farklı sonuçlar vermektedir. GFZ-IF-PPPAR çözümü 0.06 m, GFZ-IF-FIXHOLD çözümü 0.07 m, GFZ-EM-PPPAR çözümü 0.23 m ve GFZ-EM-FIXHOLD çözümü 0.25 m'lik değerlerde yatay yönlü hatalar elde edilmiştir. **Tablo 7.6**'daki STD ve KOH değerlerine göre CAD gösterimi incelendiğinde, FIXHOLD çözümlerinin PPP-AR çözümlerine kıyasla daha geniş bir dağılım göstererek daha düşük konumlandırma



Şekil 7.19: GFZ ürünleri ve iyonosfer düzeltme parametreleri ile tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin zaman serisi grafiği.

performansı sunduğunu ortaya koymaktadır. İyonosfer düzeltme yöntemlerine bakıldığında ise, GFZ ürünleriyle gerçekleştirilen IF çözüm yönteminin EM yöntemine kıyasla oldukça iyi konumlandırma performansı sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.20: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait GFZ analiz sonuçlarının CAD gösterimi.

Koordinatları bilinen C1 noktasındaki CHC I80 GNSS alıcısına ait verilerin, GFZ analiz merkezinin ürünleriyle gerçekleştirilen 4 farklı analizde, IF iyonosfer düzeltme parametresi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yöntemi kullanılarak yapılan analiz, diğer çözüm yöntemlerine kıyasla daha hassas ve doğru sonuçlar sağladığı belirlenmiştir.

7.7.3. C1 Gözlem Verilerinin GRG Ürünleriyle Analizleri

CHC alıcısıyla C1 noktasında 05.06.2023 tarihinde 09.10-10.40 saatleri arasında toplanan gözlem verileri bu aşamada, GRG analiz merkezine ait ürünler kullanılarak

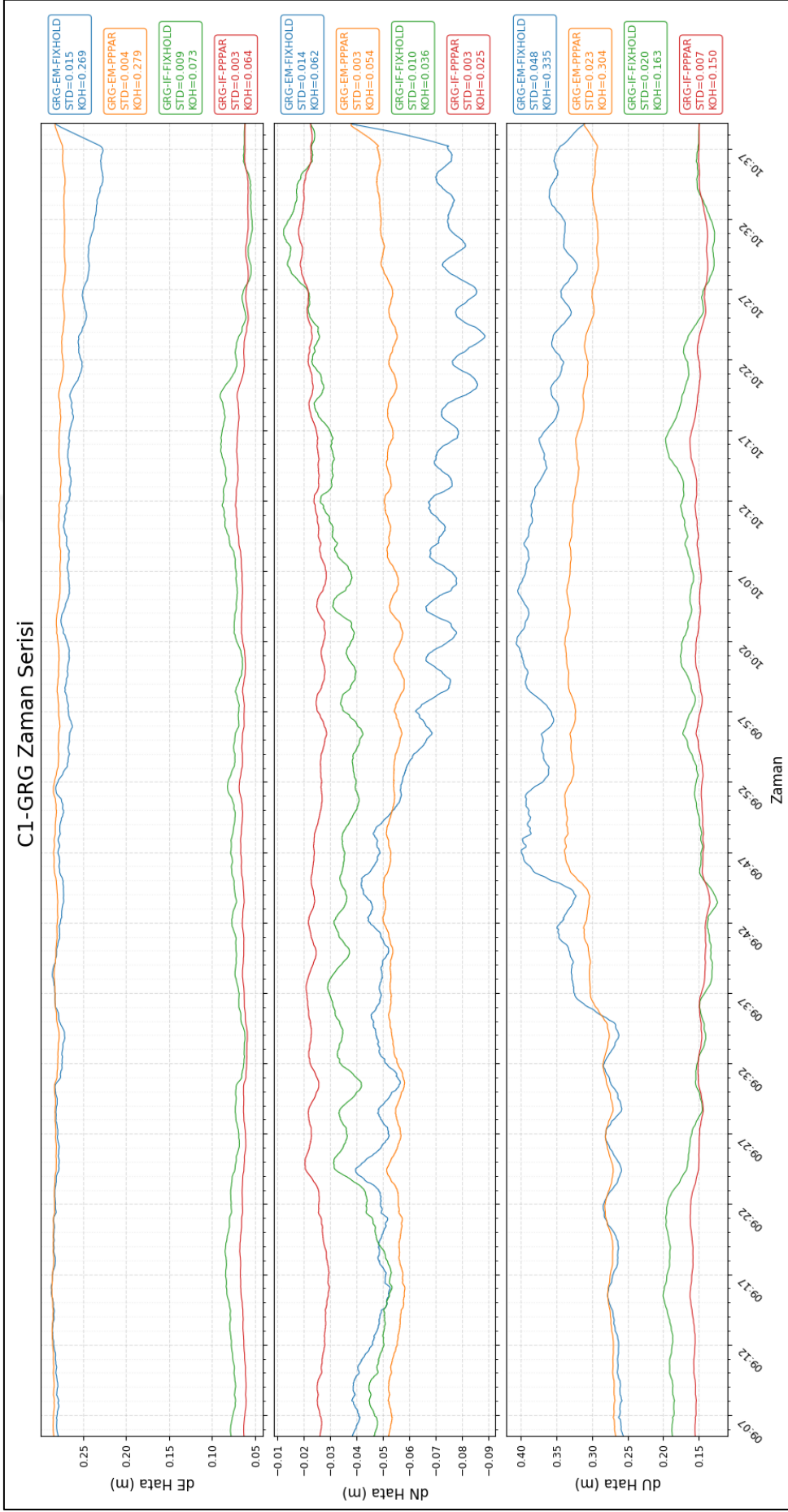
değerlendirilmiş ve bu süreçte toplamda 4 farklı çözüm yöntemi uygulanmıştır. Bu çözüm yollarına ait hata analizleri, **Tablo 7.7**'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 7.7: GRG ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.

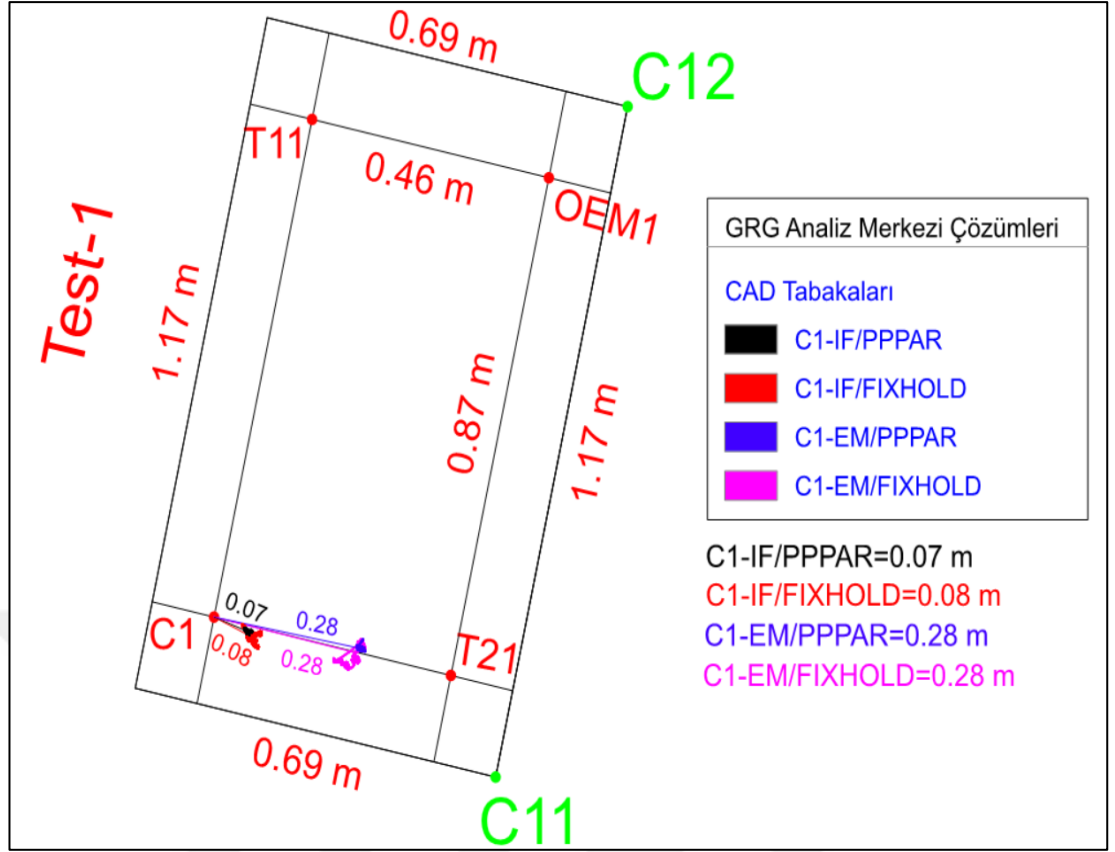
Analiz Merkezi	Ölçüm Cihazı	Ürün Türü	İyonosfer Düzeltmesi	Tamsayı Belirsizlik Çözüm Yöntemi	Koordinat Bileşeni	STD (m)	KOH (m)	Orijin Koordinatları
Centre national d'études spatiales (GRG, CNES)	CHC I80 GNSS Alıcısı	Final	Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00344	0.06395	699242.2465
					Yukarı (dN)	0.00271	0.02466	4519969.4721
					Elipsoidal Y. (dU)	0.00651	0.14967	62.2529
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.00865	0.07333	699242.2555
					Yukarı (dN)	0.00963	0.03571	4519969.4622
					Elipsoidal Y. (dU)	0.01998	0.16347	62.2656
			Estimate TEC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00419	0.27924	699242.4618
					Yukarı (dN)	0.00282	0.05357	4519969.4431
					Elipsoidal Y. (dU)	0.02329	0.30374	62.4062
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.01474	0.26930	699242.4515
					Yukarı (dN)	0.01400	0.06221	4519969.4360
					Elipsoidal Y. (dU)	0.04850	0.33533	62.4352

GRG ürünleri kullanılarak gerçekleştirilen çözüm yollarına ilişkin zaman serisi grafikleri **Şekil 7.21**'de sunulan grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafik ve tablodaki istatistiksel sonuçlar incelendiğinde, IF iyonosfer düzeltme parametresi kullanılarak gerçekleştirilen GRG-IF-PPPAR çözüm yolunda dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.003, 0.003 ve 0.007 m değerlerinde STD ile 0.064, 0.025 ve 0.150 m'lik KOH değerleriyle yüksek doğruluk sunmuştur. Yatay ve düşey bileşenlerin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.058 ile 0.073 m, dN yönünde -0.030 ile -0.018 m ve dU yönünde ise 0.134 ile 0.163 m arasında dalgalanmalar göstermiştir. GRG-IF-FIXHOLD çözüm yolunda ise dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.009, 0.010 ve 0.020 m STD değerleriyle 0.073, 0.036 ve 0.163 m'lik KOH değerleri gözlemlenmiştir. Koordinat bileşenlerinin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.053 ile 0.091 m, dN yönünde -0.054 ile -0.012 m ve dU yönünde ise 0.124 ile 0.200 m arasında sapmalar göstererek PPP-AR çözüm yoluna göre daha yüksek hatalar elde edilmiştir.

EM iyonosfer düzeltme parametresi kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerde ise, GRG-EM-PPPAR çözüm yolunda dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.004, 0.003 ve 0.023 m değerlerinde STD ile 0.279, 0.054 ve 0.304 m'lik KOH değerleri göstererek IF parametresine göre daha yüksek hatalar tespit edilmiştir. Minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.270 ile 0.286 m, dN yönünde -0.058 m ile -0.038 m ve dU yönünde 0.266 ile 0.339 m arasında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. GRG-EM-FIXHOLD çözümünde ise dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.015, 0.014 ve 0.049 m değerlerinde STD ile 0.269, 0.062 ve 0.335 m'lik KOH değerlerinde hatalar bulunmuştur. Minimum ve maksimum hata değerlerinde ise dE yönünde 0.226 ile 0.287 m, dN yönünde -0.089 ile -0.038 m ve dU yönünde 0.255 ile 0.407 m arasında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında, GRG-IF-PPPAR çözüm yolu en düşük hata seviyelerine sahip olup, GRG analiz merkezi kullanılarak yapılan çözümlerde de IF iyonosfer düzeltme parametresi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yöntemlerinin kullanılması konumlandırma performansı açısından en başarılı sonuçları sağladığı sonucuna varılmıştır. Özellikle düşey yönde EM iyonosfer düzeltme parametresine göre oldukça düşük hata değerleri gösterdiği görülmektedir.



Şekil 7.21: GRG ürünleri ve iyonosfer düzeltme parametreleri ile tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin zaman serisi grafiği.



Şekil 7.22: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait GRG analiz sonuçlarının CAD gösterimi.

Şekil 7.22’de verilen CAD çizimi, C1 noktasında gerçekleştirilen gözlem verilerinin, GRG analiz merkezi ürünleri kullanılarak elde edilen 4 farklı çözüm yoluna ait sonuçları temsil etmektedir. Her bir çözüm yolunun, koordinatları belirlenen C1 noktasına uzaklığı: C1-IF/PPPAR = 0,07 m (siyah çizgi), C1-IF/FIXHOLD = 0,08 m (kırmızı çizgi), C1-EM/PPPAR = 0,28 m (mavi çizgi) ve C1-EM/FIXHOLD = 0,28 m (pembe çizgi) olarak yatay yönlü sapmalar göstermiştir. Şekil 7.22, IF/PPPAR çözüm yolunun en düşük yatay sapmaya sahip olduğunu ve diğer tüm yöntemlere kıyasla daha dar bir hata yayılımı sunduğunu göstermektedir. Buna karşın EM iyonosfer düzeltmesine ait çözümler, her iki tamsayı belirsizlik çözüm yönteminde de 0,28 m yatay sapma göstererek daha geniş bir dağılım sergilemiştir. Bu durum iyonosfer etkilerinin EM çözüm yoluna ait yaklaşımlarla giderilmesinde sınırlı bir performans olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, GRG analiz merkezi ürünleriyle yapılan analizlerde, CODE ve GFZ analiz merkezlerinin ürünleriyle yapılan analizlerde olduğu gibi, IF-PPPAR çözüm yolu daha düşük STD ve KOH değerleri sunarak daha güvenilir bir konumlandırma performansı sağladığı tespit edilmiştir.

7.7.4. C1 Gözlem Verilerinin IGS Ürünleriyle Analizleri

CHC alıcısıyla C1 noktasında 05.06.2023 tarihinde 09.10-10.40 saatleri arasında toplanan gözlem verileri bu aşamada, IGS analiz merkezine ait ürünler kullanılarak değerlendirilmiş ve bu süreçte toplamda dört farklı çözüm yöntemi uygulanmıştır. Bu çözüm yollarına ait hata analizleri, **Tablo 7.8**'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

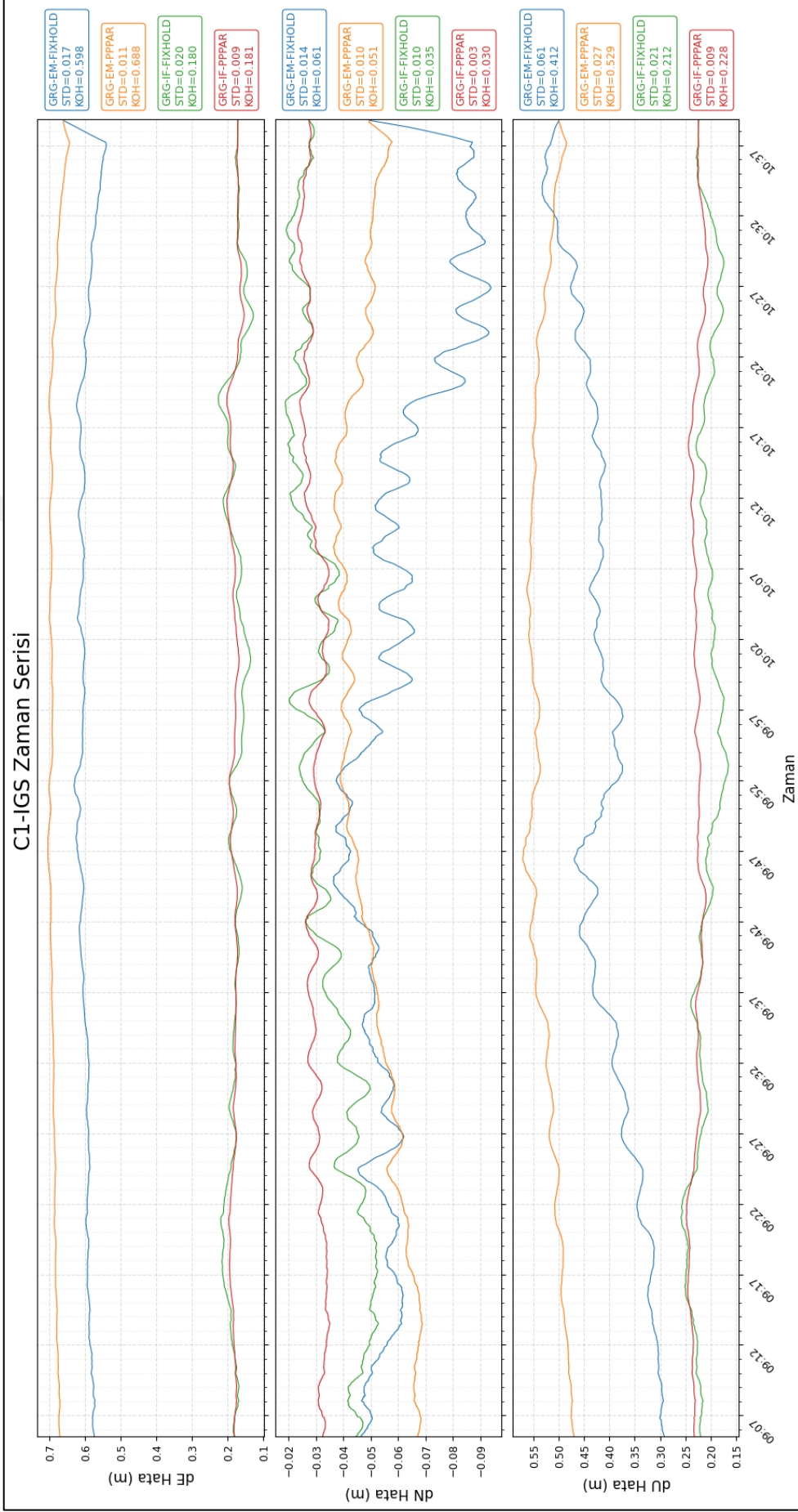
Tablo 7.8: IGS ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.

Analiz Merkezi	Ölçüm Cihazı	Ürün Türü	İyonosfer Düzeltmesi	Tamsayı Belirsizlik Çözüm Yöntemi	Koordinat Bileşeni	STD (m)	KOH (m)	Orijin Koordinatları
International GNSS Service (IGS)	CHC I80 GNSS Alıcısı	Final	Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00947	0.18147	699242.3639
					Yukarı (dN)	0.00293	0.02977	4519969.4670
					Elipsoidal Y. (dU)	0.00948	0.22762	62.3308
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.01974	0.18030	699242.3619
					Yukarı (dN)	0.00980	0.03515	4519969.4628
					Elipsoidal Y. (dU)	0.02131	0.21155	62.3139
			Estimate TEC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.01126	0.68753	699242.8701
					Yukarı (dN)	0.00964	0.05137	4519969.4461
					Elipsoidal Y. (dU)	0.02653	0.52867	62.6314
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.01686	0.59830	699242.7807
					Yukarı (dN)	0.01443	0.06111	4519969.4372
					Elipsoidal Y. (dU)	0.06063	0.41160	62.5105

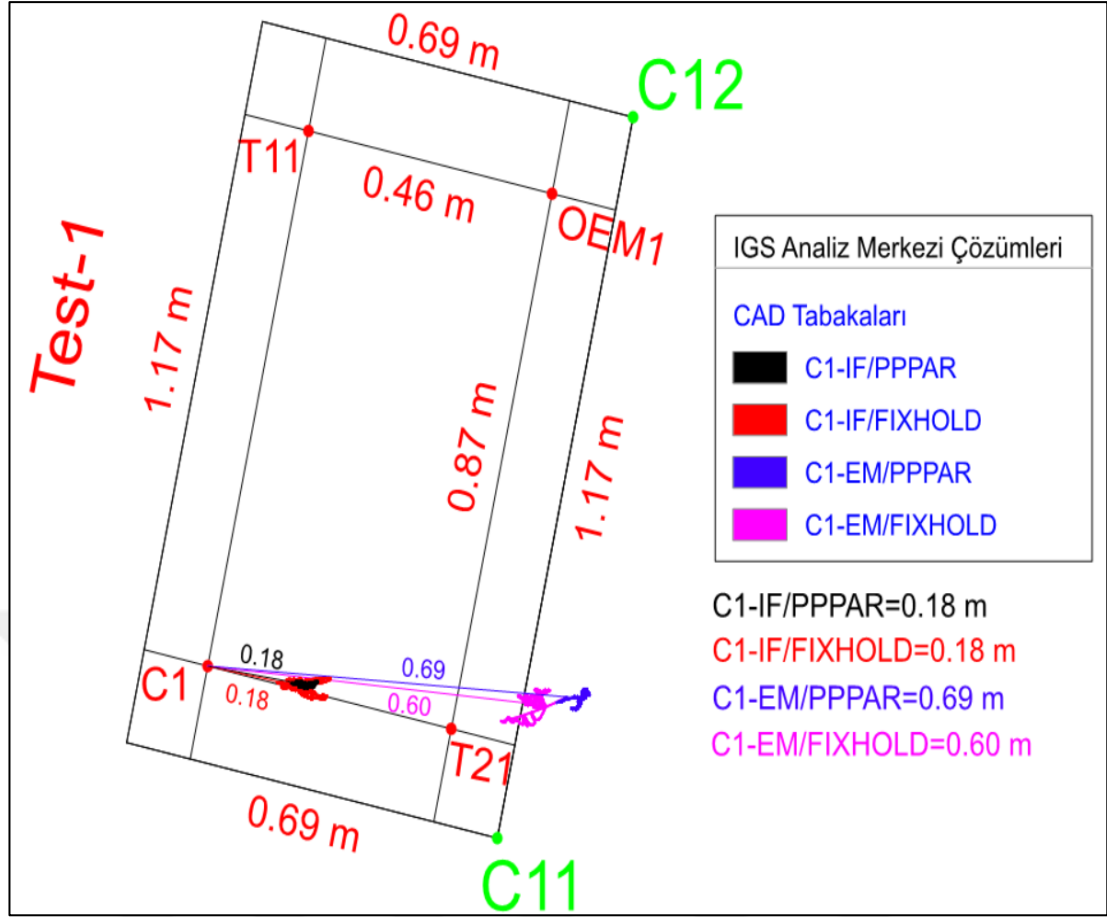
IGS ürünleri kullanılarak gerçekleştirilen çözüm yollarına ilişkin **Tablo 7.8**'de sunulan hata değerleri ve bu değerlere ait **Şekil 7.23**'te verilen zaman serisi grafikleri birlikte incelendiğinde, IF iyonosfer düzeltme parametresi kullanılarak gerçekleştirilen IGS-IF-PPPAR çözüm yolunda dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.009, 0.003 ve 0.009 m değerlerinde STD ile 0.181, 0.030 ve 0.228 m'lik KOH değerlerinde konumlandırma performansı sunmuştur. Yatay ve düşey bileşenlerin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.154 ile 0.203 m, dN yönünde -0.035 ile -0.023 m ve dU yönünde ise 0.205 ile 0.248 m arasında yüksek sapmalar göstermiştir. IGS-IF-FIXHOLD çözüm yolunda ise dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.020, 0.010 ve 0.021 m STD değerleriyle 0.180, 0.035 ve 0.212 m'lik KOH değerleri gözlemlenmiştir. Koordinat bileşenlerinin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.128 ile 0.227 m, dN yönünde -0.053 ile -0.019 m ve dU

yönünde ise 0.165 ile 0.258 m arasında sapmalar göstererek PPP-AR çözüm yoluna göre daha yüksek hatalar elde edilmiştir.

EM iyonosfer düzeltme parametresi kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerde ise, IGS-EM-PPPAR çözüm yolunda dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.011, 0.010 ve 0.027 m değerlerinde STD ile 0.689, 0.051 ve 0.529 m'lik KOH değerleri göstererek IF düzeltme yöntemine göre daha yüksek hatalar tespit edilmiştir. Minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.644 ile 0.705 m, dN yönünde -0.069 ile -0.036 m ve dU yönünde 0.469 ile 0.572 m arasında sapmalar gözlemlenmiştir. IGS-EM-FIXHOLD çözümünde ise dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.017, 0.014 ve 0.061 m değerlerinde STD ile 0.598, 0.061 ve 0.412 m'lik KOH değerlerinde hatalar bulunmuştur. Minimum ve maksimum hata değerlerinde ise dE yönünde 0.541 ile 0.661 m, dN yönünde -0.094 ile -0.036 m ve dU yönünde 0.290 ile 0.533 m arasında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında, IGS-IF-PPPAR çözüm yolu en düşük hata seviyelerine sahip olup, IGS analiz merkezi kullanılarak yapılan çözümlerde de IF iyonosfer düzeltme parametresi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yöntemlerinin kullanılması konumlandırma performansı açısından en başarılı sonuçları sağladığı sonucuna varılmıştır. Ancak diğer analiz merkezleriyle kıyaslandığında oldukça yüksek hatalar elde edilmiş ve konumlandırma performansının düştüğü görülmüştür.



Şekil 7.23: IGS ürünleri ve iyonosfer düzeltme parametreleri ile tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin zaman serisi grafiği.



Şekil 7.24: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait IGS analiz sonuçlarının CAD gösterimi.

Şekil 7.24'te IGS analiz merkezi ürünleri kullanılarak C1 noktasında elde edilen gözlemlere ait dört farklı çözüm yolu CAD ortamında gösterilmiştir. Yatay konum sapmaları incelendiğinde, IF düzeltmesi kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerin her ikisi de 0,18 m düzeyinde sapma değeriyle yatay doğrulukta eşit ve tutarlı bir performans sergilemiştir. Buna karşılık EM düzeltmesine dayalı çözüm yollarında, IGS-EM-PPPAR ile 0.69 m, IGS-EM-FIXHOLD ile 0.60 m sapma göstererek IF yöntemine kıyasla oldukça yüksek yatay hata değerleri ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, yatay doğruluk açısından iyonosfer düzeltmesinde IF yaklaşımının belirleyici bir avantaj sunduğunu, EM düzeltmesinin ise yatay sapmaları artırdığını net biçimde ortaya koymaktadır. Bu bulgular, IGS ürünleri kullanılarak da IF iyonosfer düzeltmeli PPP-AR çözüm yönteminin yatay ve düşey doğrulukta daha yüksek konumlandırma performansı sağladığını göstermiştir. Ancak, IGS analiz merkezi en iyi çözüm yolunda bile 0.18 m'lik yatay hata göstererek diğer analiz merkezlerine kıyasla daha düşük bir konumlandırma performansı sağlamıştır.

7.7.5. C1 Gözlem Verilerinin JAX Ürünleriyle Analizleri

CHC alıcısıyla C1 noktasında 05.06.2023 tarihinde 09.10-10.40 saatleri arasında toplanan gözlem verileri bu aşamada, JAX analiz merkezine ait ürünler kullanılarak değerlendirilmiş ve bu süreçte toplamda dört farklı çözüm yöntemi uygulanmıştır. Bu çözüm yollarına ait hata analizleri, **Tablo 7.9'**da ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

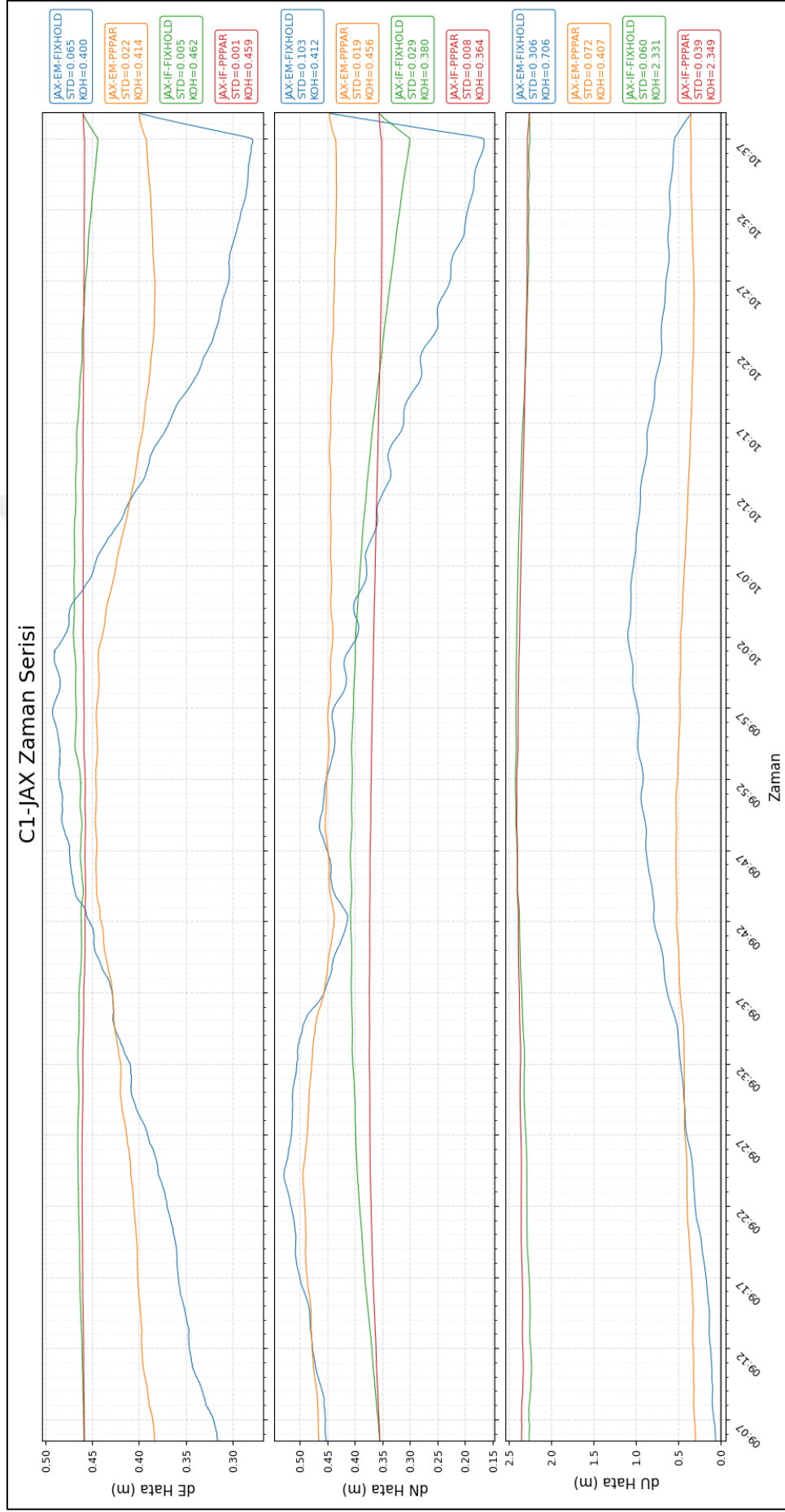
Tablo 7.9: JAX ürünleri kullanılarak değerlendirilen C1 ölçümlerinin hata analizleri.

Analiz Merkezi	Ölçüm Cihazı	Ürün Türü	İyonosfer Düzeltmesi	Tamsayı Belirsizlik Çözüm Yöntemi	Koordinat Bileşeni	STD (m)	KOH (m)	Orijin Koordinatları
Japan Aerospace Exploration Agency (JAX)	CHC I80 GNSS Alıcısı	Final	Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00094	0.45893	699242.6416
					Yukarı (dN)	0.00786	0.36401	4519969.8605
					Elipsoidal Y. (dU)	0.03865	2.34888	64.4520
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.00542	0.46227	699242.6449
					Yukarı (dN)	0.02920	0.37970	4519969.8752
					Elipsoidal Y. (dU)	0.06018	2.33060	64.4332
			Estimate TEC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.02199	0.41394	699242.5960
					Yukarı (dN)	0.01887	0.45572	4519969.9519
					Elipsoidal Y. (dU)	0.07183	0.40743	62.5045
				FIX-HOLD	Sağa (dE)	0.06541	0.39972	699242.5770
					Yukarı (dN)	0.10273	0.41150	4519969.8951
					Elipsoidal Y. (dU)	0.30579	0.70648	62.7403

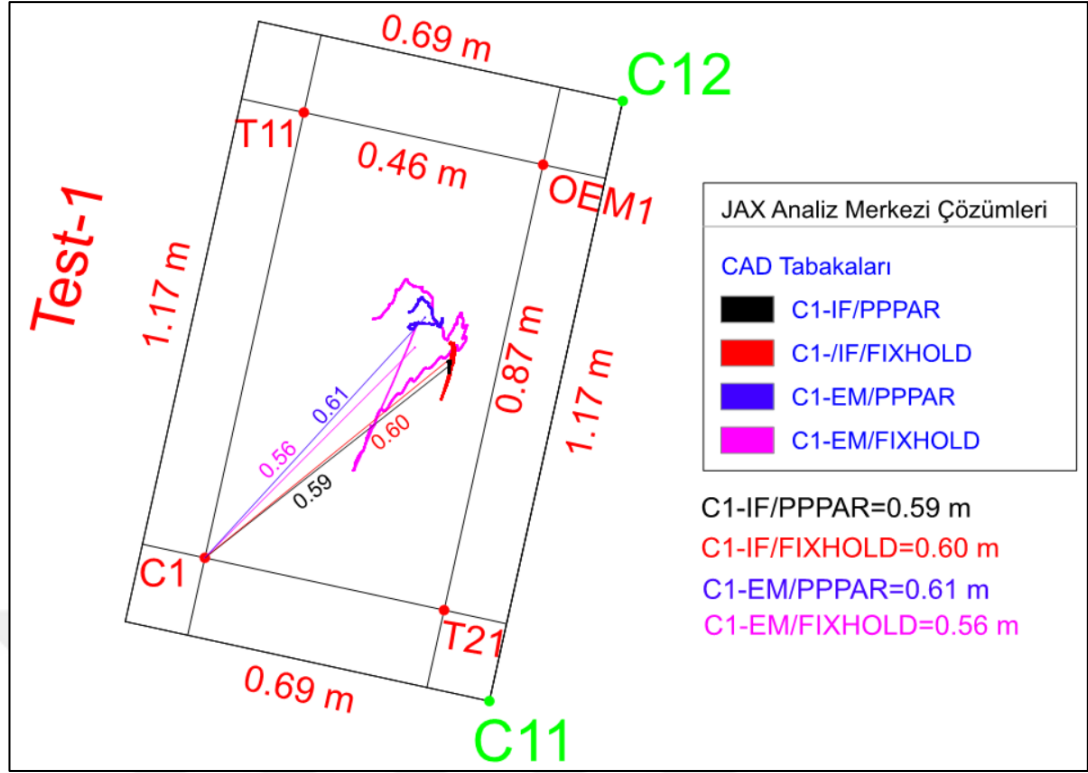
JAX ürünleri kullanılarak gerçekleştirilen çözüm yollarına ilişkin **Tablo 7.9'**da sunulan hata değerleri ve bu değerlere ait **Şekil 7.25'**te verilen zaman serisi grafikleri birlikte incelendiğinde, IF iyonosfer düzeltme parametresi kullanılarak gerçekleştirilen JAX-IF-PPPAR çözüm yolunda dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.0009, 0.008 ve 0.039 m değerlerinde STD ile 0.459, 0.364 ve 2.331 m'lik KOH değerlerinde oldukça yüksek hatalarla konumlandırma performansı sunmuştur. Yatay ve düşey bileşenlerin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.457 ile 0.461 m, dN yönünde 0.351 ile 0.374 m ve dU yönünde ise 2.259 ile 2.409 m arasında oldukça yüksek hatalar göstermiştir. JAX-IF-FIXHOLD çözüm yolunda ise dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.005, 0.029 ve 0.060 m STD değerleriyle 0.462, 0.380 ve 2.331 m'lik KOH değerleri gözlemlenmiştir. Koordinat bileşenlerinin minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde

0.444 ile 0.470 m, dN yönünde 0.30 ile 0.408 m ve dU yönünde ise 2.231 ile 2.425 m arasında sapmalar göstererek diğer analiz merkezlerine ait çözüm yolları kıyasla daha yüksek hatalar elde edilmiştir. Özellikle düşey yönde birkaç metre seviyesinde sapmaların olması JAX analiz merkezi ürünleriyle sistematik hatalar elde edildiğini göstermektedir.

EM iyonosfer düzeltme parametresi kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerde ise, JAX-EM-PPPAR çözüm yolunda dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.022, 0.019 ve 0.072 m değerlerinde STD ile 0.414, 0.456 ve 0.407 m'lik KOH değerleri göstererek yüksek hatalar tespit edilmiştir. Minimum ve maksimum hata değerlerine bakıldığında, dE yönünde 0.383 ile 0.447 m, dN yönünde 0.433 ile 0.494 m ve dU yönünde 0.292 ile 0.524 m arasında sapmalar gözlemlenmiştir. JAX-EM-FIXHOLD çözümünde ise dE, dN ve dU yönlerinde sırasıyla 0.065, 0.103 ve 0.306 m değerlerinde STD ile 0.400, 0.412 ve 0.706 m'lik KOH değerlerinde hatalar elde edilerek en düşük konumlandırma performansı bu çözüm yolu göstermiştir. Minimum ve maksimum hata değerlerinde ise dE yönünde 0.278 ile 0.492 m, dN yönünde 0.165 ile 0.528 m ve dU yönünde 0.053 ile 1.093 m arasında oldukça yüksek dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında, JAX analiz merkeziyle gerçekleştirilen çözüm yolları en yüksek hata seviyelerine sahip olup, özellikle düşey eksende konumlandırma performansı açısından başarısız sonuçlar sağladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.25: JAX ürünleri ve iyonosfer düzeltme parametreleri ile tam sayı faz belirsizlik çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin zaman serisi grafiği.



Şekil 7.26: C1 noktasındaki ölçüm verilerine ait JAX analiz sonuçlarının CAD gösterimi.

Şekil 7.26’da, JAX analiz merkezi ürünleri kullanılarak C1 noktasında elde edilen ölçümlere ait dört farklı çözümün CAD gösterimi yer almaktadır. Yatay konum sapmaları incelendiğinde, JAX-EM-PPPAR yöntemi 0,61 m’lik en yüksek sapma değeriyle öne çıkarken; JAX-IF-PPPAR 0,59 m, JAX-IF-FIXHOLD 0,60 m ve JAX-EM-FIXHOLD 0,56 m sapmalar göstermiştir. Bu analiz sonucunda, JAX analiz merkeziyle gerçekleştirilecek olan çözümlerin yeterli düzeyde konumlandırma performansı sağlayamadığı belirlenmiştir.

05.06.2023 tarihinde 09:10–10:40 saatleri arasında Test-1 konumundaki C1 noktasında, CHC I80 GNSS alıcısından 1 Hz örnekleme aralığıyla toplanan veriler; CODE, GRG, GFZ, IGS ve JAX analiz merkezlerine ait final ürünler kullanılarak RTKLIB yazılımında işlenmiş, Estimate TEC ve Iono-Free LC iyonosfer düzeltme parametreleri ile PPP-AR ve FIXHOLD tam sayı belirsizlik çözüm yöntemleri çerçevesinde yürütülen ayrıntılı analizlerin değerlendirmeleri Bölüm 6.7 kapsamında detaylı bir şekilde sunulmuştur.

RTKLIB yazılımı kullanılarak farklı analiz merkezlerine ait ürünlerle işlenen GNSS gözlem verilerinde, PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yöntemi; hata modellerini,

atmosferik gecikmeleri ve sinyal gürültülerini daha etkin biçimde modelleyerek hem yatay hem de düşey bileşenlerde üstün doğruluk ve hassasiyet sağlamıştır. Buna karşın FIX-HOLD yöntemi, daha sınırlı algoritmik işleyişi nedeniyle belirgin ölçüde yüksek hata değerleri üretmiştir. İyonosferik düzeltme yöntemlerinin etkileri değerlendirildiğinde ise EM düzeltme yöntemi kullanıldığında, IF düzeltme yöntemine kıyasla daha yüksek hata değerlerine yol açtığı tespit edilmiştir.

CHC I80 GNSS alıcısı ile C1 noktasında elde edilen GNSS gözlem verilerinin CODE, GRG, GFZ, IGS ve JAX analiz merkezlerine ait final ürünleri kullanılarak yapılan kapsamlı değerlendirmeler sonucunda, en yüksek yatay konumlandırma doğruluğu ve hassasiyetini sağlayan çözüm yöntemlerine ait analiz sonuçları **Tablo 7.10**'da düzenlenmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Sağa yönündeki analizlerde, en düşük KOH değerini GFZ analiz merkezi (KOH=0.05286 m, STD=0.00301) sağlamış ve en tutarlı sonucu vermiştir. CODE (KOH=0.06467 m) ve GRG (KOH=0.06395 m) merkezleri GFZ ile oldukça yakın ancak biraz daha düşük konumlandırma performansı göstermiştir. JAX analiz merkezi (KOH=0.39972 m, STD=0.06541 m) en yüksek konumlandırma hatası elde edilen merkez olarak belirlenmiştir.
- Yukarı yönündeki analizlerde, en düşük KOH (0.025 m) değeriyle GRG analiz merkezi tarafından sağlanmış olup en doğru konumlandırma performansını sergilemiştir. GFZ ve CODE merkezleri 0,031 m KOH değeriyle GRG'ye çok yakın sonuçlar sunmuştur. En yüksek hata değerleri yine JAX analiz merkezinin ürünleriyle yapılan çözümlerde elde edilmiştir.
- Düşey yöndeki analizlerde de en düşük KOH değeri GRG analiz merkezi tarafından sağlanmış olup GFZ ile aralarında fark yok denebilecek kadar az olduğu görülmüştür.

Analiz merkezinin belirlenmesine yönelik yapılan bu değerlendirme aşamasında, konumlandırma performansı açısından sırasıyla GFZ, GRG CODE analiz merkezlerinin düşük STD ve KOH değerleriyle öne çıktığı sonucuna varılmıştır. Bu analiz merkezleri arasında neredeyse mm altı seviyesinde farkların olduğu ve bu farkların önemsiz sayılabilecek seviyede olduğu görülmüştür. JAX analiz merkezi, özellikle düşey doğrulukta diğer analiz merkezlerine göre belirgin bir şekilde daha yüksek hata değerlerine sahip olup, bu tez çalışması kapsamında GNSS gözlem

verilerinin değerlendirilmesinde tercih edilebilir bir konumlandırma performans sunamamıştır.

Tablo 7.10: C1 noktasındaki CHC gözlem verilerinin CODE, GFZ, GRG, IGS ve JAX analiz merkezlerine ait en doğru konumlandırma performansı sağlayan çözümler.

Ölçüm Cihazı	Analiz Merkezi	Ürün Türü	İyonosfer Düzeltmesi	Tamsayı Belirsizlik Çözüm Yöntemi	Koordinat Bileşeni	STD (m)	KOH (m)	Orijin Koordinatları
CHC I80 GNSS Alıcısı	CODE	FİNAL	Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00637	0.06467	699242.2470
					Yukarı(dN)	0.00437	0.03146	4519969.4654
					Elipsoidal Y. (dU)	0.00843	0.18383	62.2870
	GFZ		Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00301	0.05286	699242.2354
					Yukarı(dN)	0.00232	0.03114	4519969.4655
					Elipsoidal Y. (dU)	0.00510	0.14988	62.2532
	GRG		Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00344	0.06395	699242.2465
					Yukarı(dN)	0.00271	0.02466	4519969.4721
					Elipsoidal Y. (dU)	0.00651	0.14967	62.2529
	IGS		Iono-Free LC	PPP-AR	Sağa (dE)	0.00947	0.18147	699242.3639
					Yukarı(dN)	0.00293	0.02977	4519969.4670
					Elipsoidal Y. (dU)	0.00948	0.22762	62.3308
	JAX		Estimate TEC	FIXHOLD	Sağa (dE)	0.06541	0.39972	699242.5770
					Yukarı(dN)	0.10273	0.41150	4519969.8951
					Elipsoidal Y. (dU)	0.30579	0.70648	62.7403

C1 noktasında CHC alıcısı ile gerçekleştirilen ölçüm verilerinin kapsamlı değerlendirmeleri sonucunda, ölçüm planında yer alan Test-1, Test-2 ve Test-3 noktalarında diğer cihazlardan elde edilen GNSS gözlem verilerinin analizinde, yatay konum doğruluğu bakımından en iyi performansı sergileyen GFZ veya GRG analiz merkezlerine ait ürünlerin kullanılması düşünülmüştür. Ancak, akıllı mobil cihazların konumlandırma performansının belirlenebilmesi için deneme amaçlı olarak gerçekleştirilen analizlerde, GFZ ve GRG analiz merkezlerinin ürünleri kullanılarak yapılan çözümler CODE ürünleriyle yapılan çözümler kadar hassas sonuçlar vermediği görülmüştür. Bu bulguya göre, akıllı mobil cihazların analizlerinde CODE analiz merkezinin ürünleriyle daha iyi konumlandırma performansı sağlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen kısımlarında yapılacak analizlerde

CODE analiz merkezinin ürünleri, IF iyonosfer düzeltmesi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Böylelikle sonraki analizlerde sistematik hata ve tutarsızlıkların minimize edilerek daha güvenilir ve tutarlı konumlandırma performanslarının elde edilmesi hedeflenmiştir.

7.8. Ölçüm Cihazlarına Ait Verilerin PPP Statik Analizleri

Uygulamanın ilk aşamasında, ölçüm cihazlarından elde edilen GNSS gözlem verilerinin değerlendirilmesinde kullanılacak analiz merkezi ürünleri, iyonosfer düzeltme parametresi ve tamsayı belirsizlik çözüm yöntemi belirlenmiştir. Bu doğrultuda, CHC I80 alıcısı ile Test-1 konumundaki C1 noktasında toplanan veriler detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, CODE analiz merkezine ait final ürünleriyle IF iyonosfer düzeltmesi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yönteminin, diğer çözüm yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığı tespit edilmiştir. Uygulamanın ikinci aşamasında, birinci aşamada belirlenen çözüm yöntemi esas alınarak, **Şekil 7.1**'de gösterilen ölçüm düzeneği doğrultusunda Test-1, Test-2 ve Test-3 noktalarında 60'ar dakikalık gözlem süreleriyle gerçekleştirilen GNSS ölçümleri, RTKLIB yazılımında PPP Statik yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, CHC I80 GNSS alıcısı, OEM alıcı, T2 ve T1 model akıllı mobil cihazlardan elde edilen ölçüm verileri analiz edilmiştir.

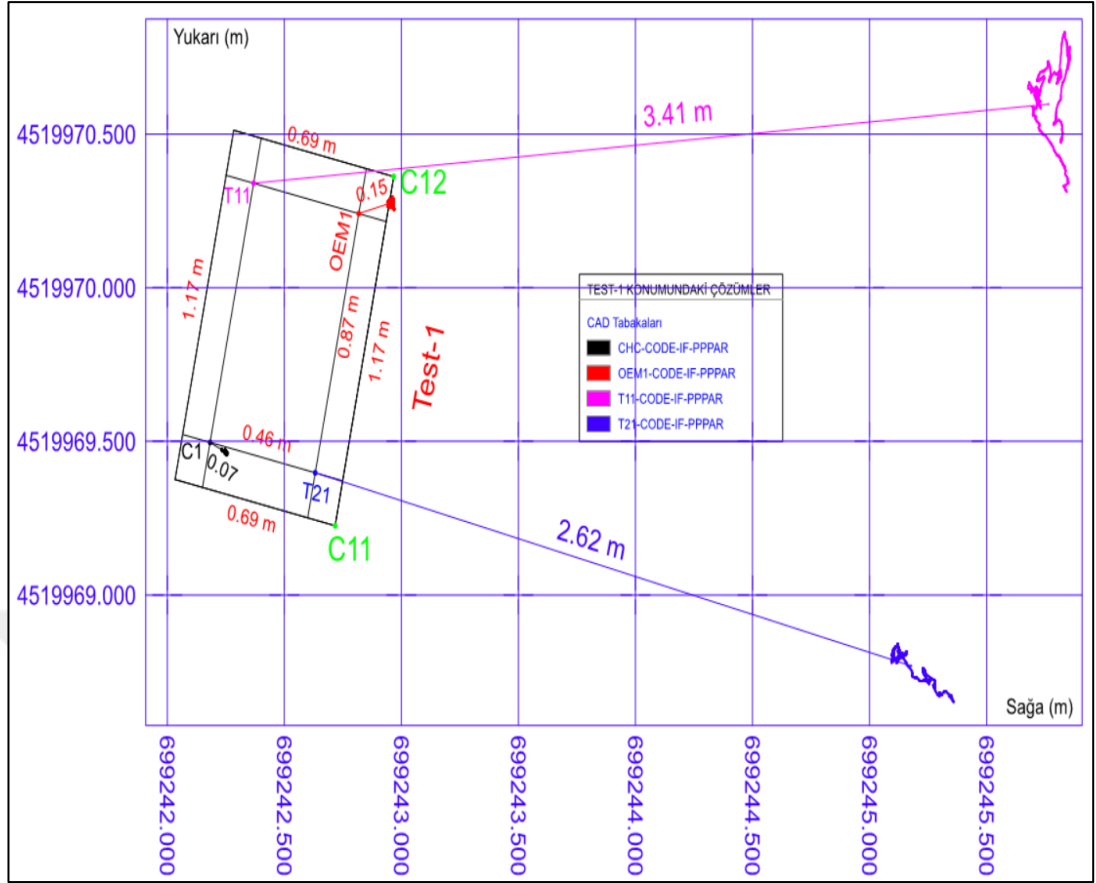
7.8.1. Test-1 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

Test-1 konumunda, **Şekil 7.1**'de gösterilen ölçüm düzeneği üzerine yerleştirilen CHC ve OEM GNSS alıcıları ile T1 ve T2 model akıllı mobil cihazlardan elde edilen GNSS gözlemleri, Bölüm 6.3'te tanımlanan kurulum noktalarına ait referans koordinatlarla karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda, C1, T11, T21 ve OEM1 noktaları cihazların ölçüm anındaki gerçek konumlarını ifade etmektedir. Bu noktaların gerçek koordinatları ise, pilye noktasının kesin değerlerine dayanarak statik konum belirleme yöntemiyle belirlenen C11 ve C12 referans noktalarından, **Şekil 7.1**'deki ölçüm düzenine uygun şekilde ötelenerek belirlenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen hata analizleri **Tablo 7.11**'de verilmiştir. CHC cihazının C1 noktasına ait değerlendirmeleri Bölüm 6.7 kapsamında detaylı bir şekilde incelendiği için bu kısımda tekrardan açıklanmamıştır. Diğer cihazların değerlendirmeleri aşağıda sunulmuştur.

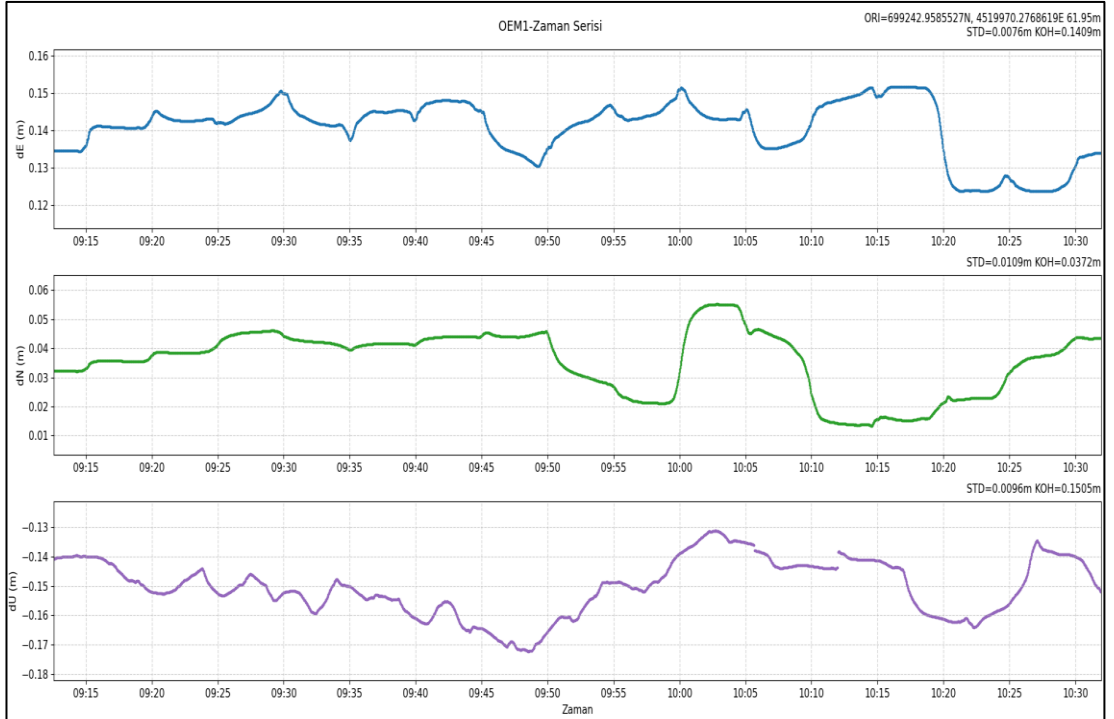
Tablo 7.11: Test-1 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile PPP-Statik değerlendirmeleri sonucunda elde edilen hata analizleri.

Ölçüm Cihazı	Koordinat Bileşeni	Gerçek Koordinatları (m)	Orijin Koordinatları (m)	STD (m)	KOH (m)
OEM (OEM1)	Sağa (dE)	699242.8179	699242.9586	0.00758	0.14086
	Yukarı(dN)	4519970.2413	4519970.2769	0.01089	0.03719
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1034	61.9532	0.00959	0.15052
T1 (T11)	Sağa (dE)	699242.3686	699245.7639	0.05379	3.39569
	Yukarı(dN)	4519970.3403	4519970.5975	0.11729	0.28267
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1034	66.0993	0.78400	4.07208
T2 (T21)	Sağa (dE)	699242.6319	699245.1777	0.08593	2.54728
	Yukarı(dN)	4519969.3976	4519968.7690	0.05405	0.63088
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1034	67.5049	0.65891	5.44154
CHC (C1)	Sağa (dE)	699242.1826	699242.2470	0.00637	0.06467
	Yukarı(dN)	4519969.4966	4519969.4654	0.00437	0.03146
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1034	62.2870	0.00843	0.18383

OEM alıcısının Test-1 konumundaki OEM1 noktasında elde edilen ölçüm verileri, CODE-IF-PPPAR çözümü kullanılarak gerçek koordinatlarıyla karşılaştırıldığında cm seviyesinde konumlandırma performansı sergilemiştir. **Şekil 7.27**'deki CAD görselinde, OEM1 cihazının gerçek koordinatı ile CODE-IF-PPPAR çözümlenmesine ait noktalar arasındaki mesafe kırmızı doğrultu ile gösterilmiştir. OEM1 verilerinin çözümü sonucunda yatay düzlemde 0,15 m'lik yatay sapma hesaplanmıştır. Sağa yönünde 0,008 m STD ve 0,141 m KOH, yukarı yönde 0,011 m STD ve 0,037 m KOH değerleriyle oldukça düşük hatalar göstermiştir. Düşey yönde ise, 0,010 m STD ve 0.151 m KOH değeriyle hassas bir konumlandırma sağlamıştır. **Şekil 7.28**'deki zaman serisi grafiği ise 09:10–10:35 aralığında sağa bileşeninin 0,123 ile 0,152 m, yukarı bileşeninin 0.013 ile 0.055 m ve düşey bileşeninin ise -0.172 ile -0.131 m arasında cm düzeyinde sapmalar göstermiştir. Bu veriler, OEM1 noktasında gerçekleştirilen gözlemlerin yatay ve düşey bileşenlerde oldukça hassas ve tutarlı konumlandırma performansı sunduğunu göstermiştir.

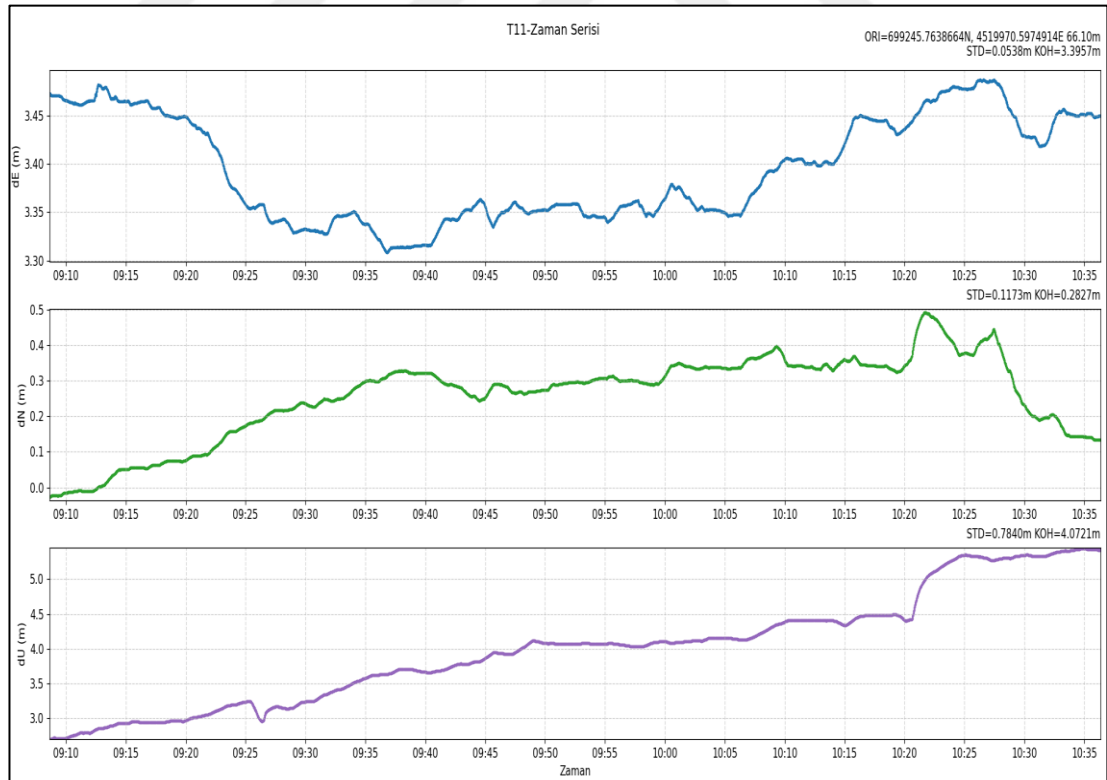


Şekil 7.27: Test-1 konumundaki C1, OEM, T1 ve T2 cihazlarına ait gözlem verilerinin ve gerçek konumlarının yatay düzlemde gösterimi.



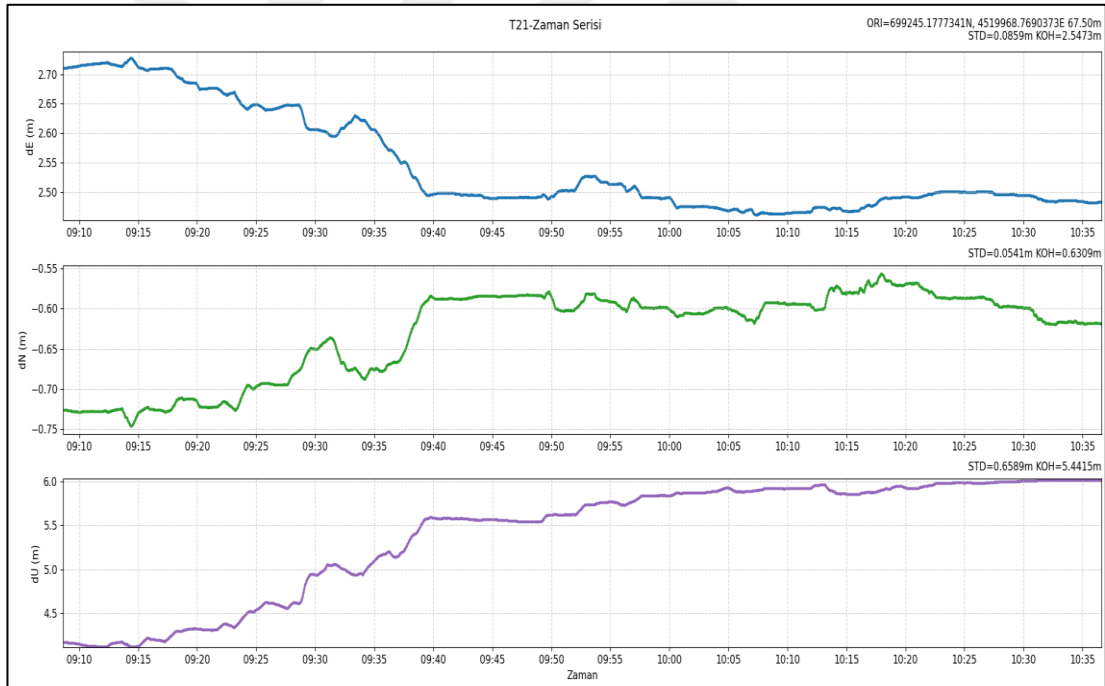
Şekil 7.28: OEM1 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

T1 model akıllı mobil cihazının Test-1 konumundaki gerçek konumu (T11) ile CODE-IF-PPPAR çözümü kullanılarak elde edilen gözlem verilerine ait koordinat bileşenleri analiz edildiğinde, sağa yönünde 0,054 m STD ve 3,396 m KOH ile belirgin bir hata göstermiştir. Yukarı yönünde, 0,117 m STD ve 0,283 m KOH değeriyle yatay doğruluktaki tutarsızlığı sürdürürken, düşeyde 0,784 m STD ve 4,072 m KOH değeriyle diğer cihazlara kıyasla oldukça kötü düşey performans ortaya koymuştur. **Şekil 7.29**'daki zaman serisi grafikleri incelendiğinde, ölçüm süresince sağa yönündeki sapmalar 3,308 ile 3,487 m; yukarı yönündeki sapmalar -0.027 m ile 0,492 m ve düşey yönünde ise 2.704 ile 5,448 m aralığında oldukça yüksek dalgalanmalar ortaya koymuştur. Bu veriler, T1 cihazının yatay ve düşey bileşenlerde belirgin bir ofset ve zamanla artan sapma eğilimleri göstermiştir. **Şekil 7.27**'deki CAD gösteriminde, T1 cihazının gerçek koordinatı ile CODE-IF-PPPAR çözümlenmesine ait noktalar arasındaki mesafe pembe doğrultu ile gösterilmiştir. T11 verilerinin çözümü sonucunda yatay düzlemde 3.41 m'lik yatay sapma ile düşük bir konumlandırma performansı göstermiştir.



Şekil 7.29: T11 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

T2 model akıllı mobil cihazının Test-1 konumundaki gerçek konumu (T21) ile CODE-IF-PPPAR çözümü kullanılarak elde edilen gözlem verilerine ait koordinat bileşenleri analiz edildiğinde, sağa yönde 0,086 m STD ve 2,547 m KOH değerlerinde bir hata ile T1'e yakın bir performans sunmuştur. Yukarı yönde 0,054 m STD ve 0,6301 m KOH değerleriyle yatayda nispeten daha iyi bir doğruluk elde edilmiş, düşeyde ise 0,659 m STD ve 5,442 m KOH değeriyle yüksek sapmalar kaydedilmiştir. **Şekil 7.30**'daki zaman serisi grafikleri incelendiğinde dE bileşeninin 2.461 ile 2,728 m aralığında; dN bileşeninin 0,746 m ile -0.556 m aralığında; düşey bileşeninin ise ölçüm süresi boyunca 4.119 ile 6.022 aralığında sapmalarla kabul edilemeyecek düzeyde hatalar sergilemiştir. **Şekil 7.27**'deki CAD gösteriminde, T2 cihazının gerçek koordinatı ile CODE-IF-PPPAR çözümlenmesine ait noktalar arasındaki mesafe mavi doğrultu ile gösterilmiştir. T21 verilerinin çözümü sonucunda yatay düzlemde 2.62 m'lik yatay sapma ile düşük bir konumlandırma performansı göstermiştir.



Şekil 7.30: T21 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

Test-1 konumunda yapılan kapsamlı analizler, CHC I80 ve OEM GNSS alıcılarının akıllı cihazlara kıyasla belirgin üstünlük sağladığını ortaya koymuştur. **Şekil 7.27**'de görüldüğü üzere CHC I80 alıcısı, yatay ekseninde yalnızca 0,07 m'lik hata sunarken; OEM alıcısı yatayda 0,15 m ile makul bir performans sergilemiştir. Akıllı mobil cihazlar arasında T1 modeli, yatayda 3,41 m hata ile en kötü performansı sunarken; T2

modeli ise 2,62 m yatay hata değeriyle T1'e göre nispeten daha iyi sonuç vermiştir. Ancak her iki cihaz da profesyonel GNSS alıcılarının sağladığı doğruluk seviyesini yakalayamamış ve kabul edilemeyecek düzeyde konumlandırma performansı göstermiştir.

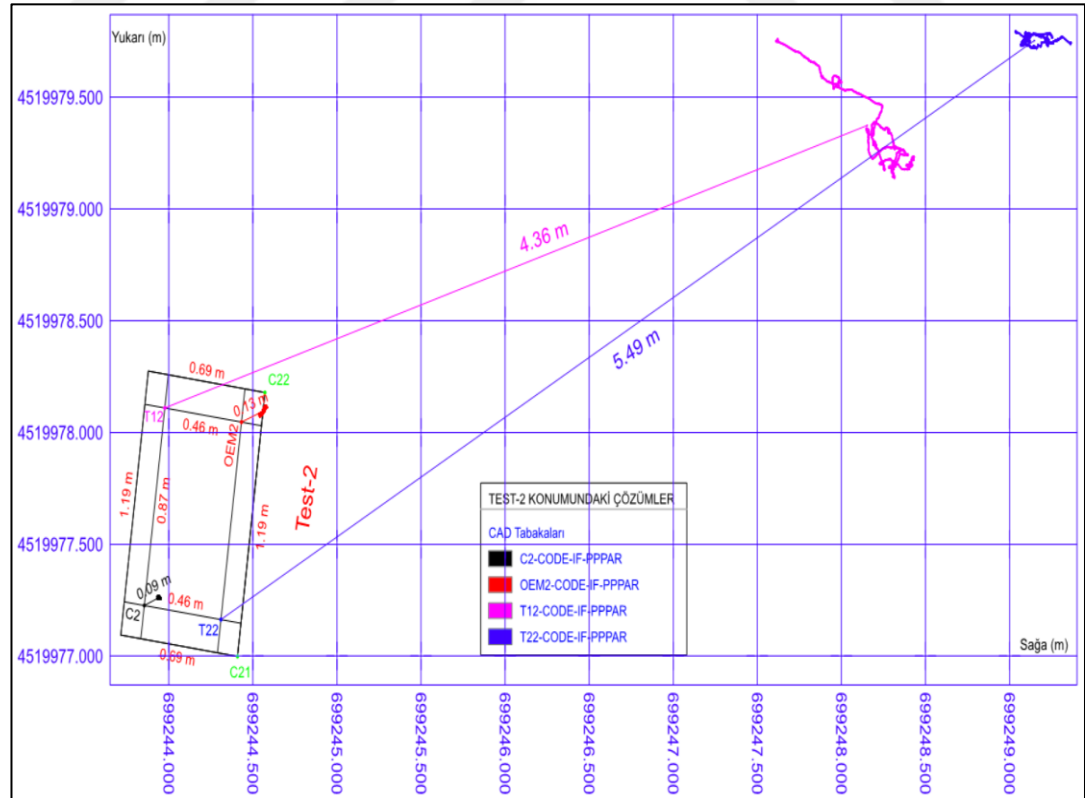
7.8.2. Test-2 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

Test-1 konumunda gerçekleştirilen GNSS gözlemlerinin ardından, ölçüm düzeneği aynı özenle Test-2 konumuna taşınmış ve kurulumu birebir korunarak yeniden gerçekleştirilmiştir. Bu sayede cihazların konumlandırma hassasiyeti korunarak tutarlı ölçümler elde edilmesi sağlanmıştır. GNSS verilerinin değerlendirilmesinde, Test-1 konumunda uygulanan çözüm yöntemleriyle tutarlılık sağlamak amacıyla, Test-2 konumunda da CODE analiz merkezine ait final ürünü, IF iyonosfer düzeltme parametresi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu kısımda, C2, T12, T22 ve OEM2 noktaları cihazların ölçüm anındaki gerçek konumlarını ifade etmektedir. Bu noktaların gerçek koordinatları ise, pilye noktasının kesin değerlerine dayanarak statik konum belirleme yöntemiyle belirlenen C21 ve C22 referans noktalarından, **Şekil 7.1**'deki ölçüm düzenine uygun şekilde ötelenerek belirlenmiştir. Bu doğrultuda, Test-2 alanındaki cihazlara ait gözlem verilerinin hata analizleri **Tablo 7.12**'de sunulmuştur.

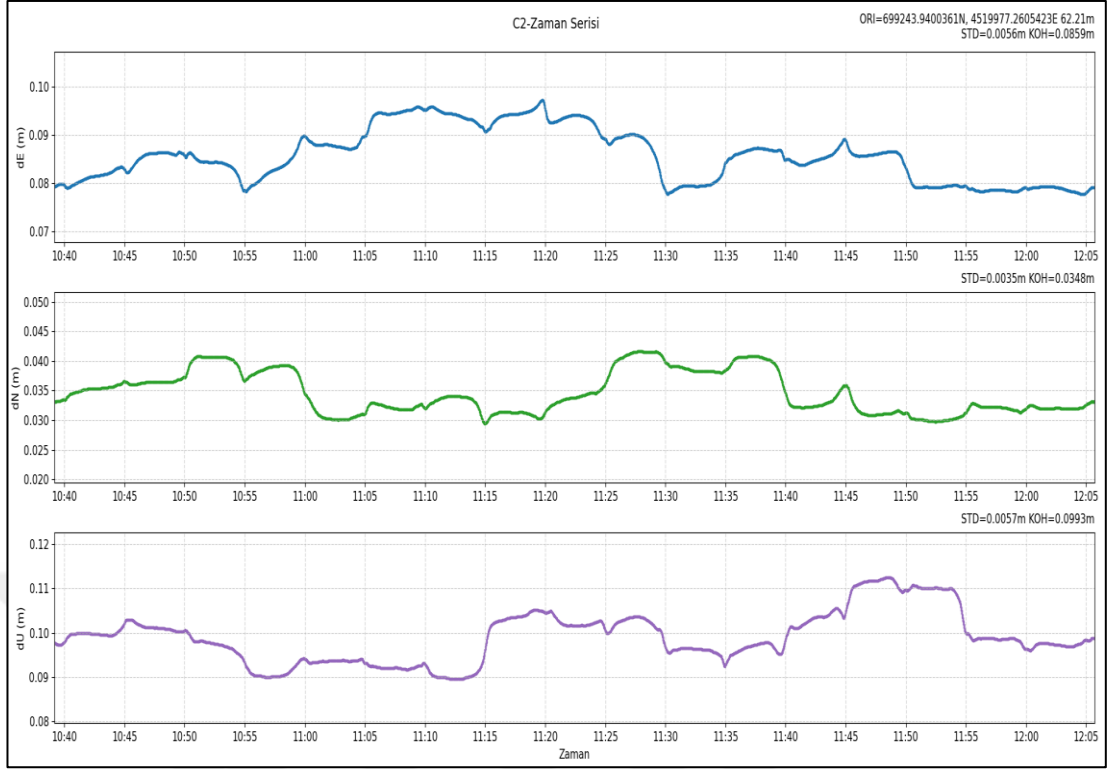
C2 noktasında CODE-IF-PPPAR çözümü ile elde edilen sonuçlar, yatay düzlemin sağa bileşeninde 0.006 m STD ve 0.086 m KOH; yukarı bileşeninde ise 0.0036 m STD ve 0.035 m KOH değerleriyle, C1 noktasında sağlanan konumlandırma performansı ile benzerlik göstermiştir. Düşey bileşende ise 0.0057 m STD ve 0.099 m KOH değeriyle hassas bir konumlandırma sağlamıştır. **Şekil 7.31**'deki CAD görselinde, C2 cihazının gerçek koordinatı ile CODE-IF-PPPAR çözümlenmesine ait noktalar arasındaki mesafe siyah doğrultu ile gösterilmiştir. C2 verilerinin çözümü sonucunda yatay düzlemde 0,09 m'lik yatay sapma hesaplanmıştır. **Şekil 7.32**'deki zaman serisi grafikleri incelendiğinde dE ekseninde 0.078 ile 0.097 m; dN ekseninde 0.029 ile 0.042 m; dU ekseninde 0.090 ile 0.113 m aralığında cm düzeyinde kararlı sapmalar göstermiştir. Bu veriler, statik konum belirleme yöntemiyle referans koordinatları belirlenen C2 noktasındaki gözlemlerin, PP-PPP-Statik çözümleriyle elde edilen sonuçlarla oldukça hassas ve tutarlı konumlandırma performansı sunduğunu göstermiştir.

Tablo 7.12: Test-2 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile PPP-Statik değerlendirmeleri sonucunda elde edilen hata analizleri.

Ölçüm Cihazı	Koordinat Bileşeni	Gerçek Koordinatları (m)	Orijin Koordinatları (m)	STD (m)	KOH (m)
OEM (OEM2)	Sağa (dE)	699244.4321	699244.5573	0.01373	0.12593
	Yukarı(dN)	4519978.0467	4519978.0939	0.01267	0.04885
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1122	62.0024	0.00951	0.11025
T1 (T12)	Sağa (dE)	699243.9764	699248.1530	0.22319	4.18260
	Yukarı(dN)	4519978.1097	4519979.3738	0.18287	1.27726
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1122	64.7322	1.04324	2.82001
T2 (T22)	Sağa (dE)	699244.3100	699249.1470	0.07359	4.83760
	Yukarı(dN)	4519977.1629	4519979.7535	0.02056	2.59068
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1122	58.5903	0.67679	3.58635
CHC (C2)	Sağa (dE)	699243.8543	699243.9400	0.00559	0.08592
	Yukarı(dN)	4519977.2259	4519977.2605	0.00355	0.03482
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1122	62.2113	0.00570	0.09926

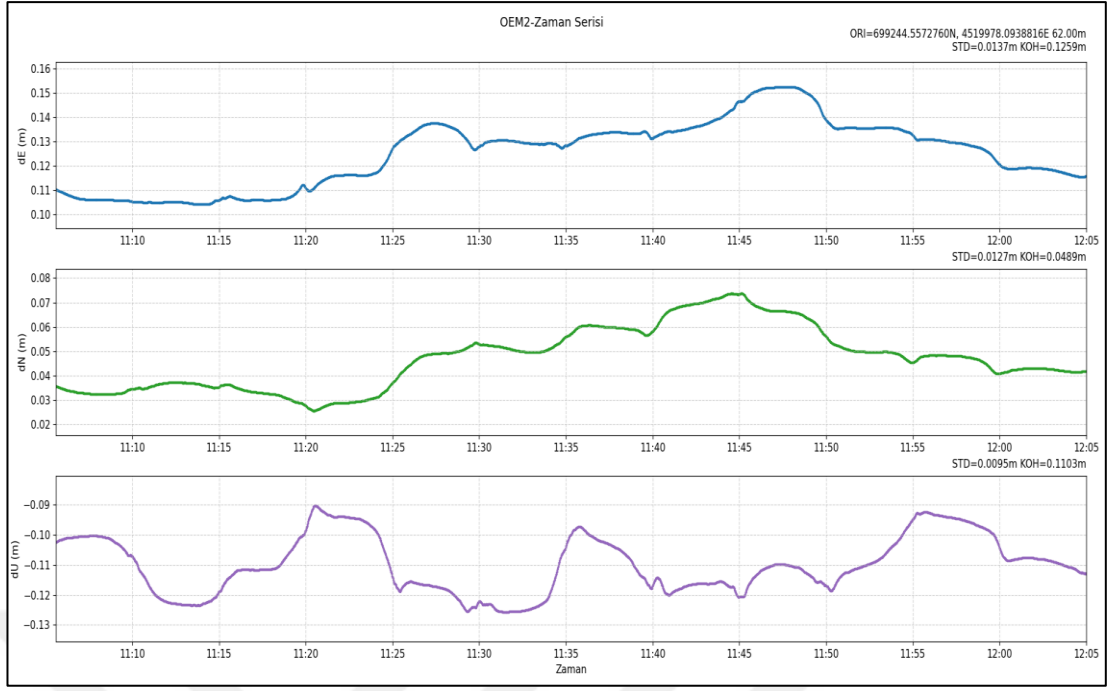


Şekil 7.31: Test-2 konumundaki C2, OEM, T1 ve T2 cihazlarına ait gözlem verilerinin ve gerçek konumlarının yatay düzlemde gösterimi.



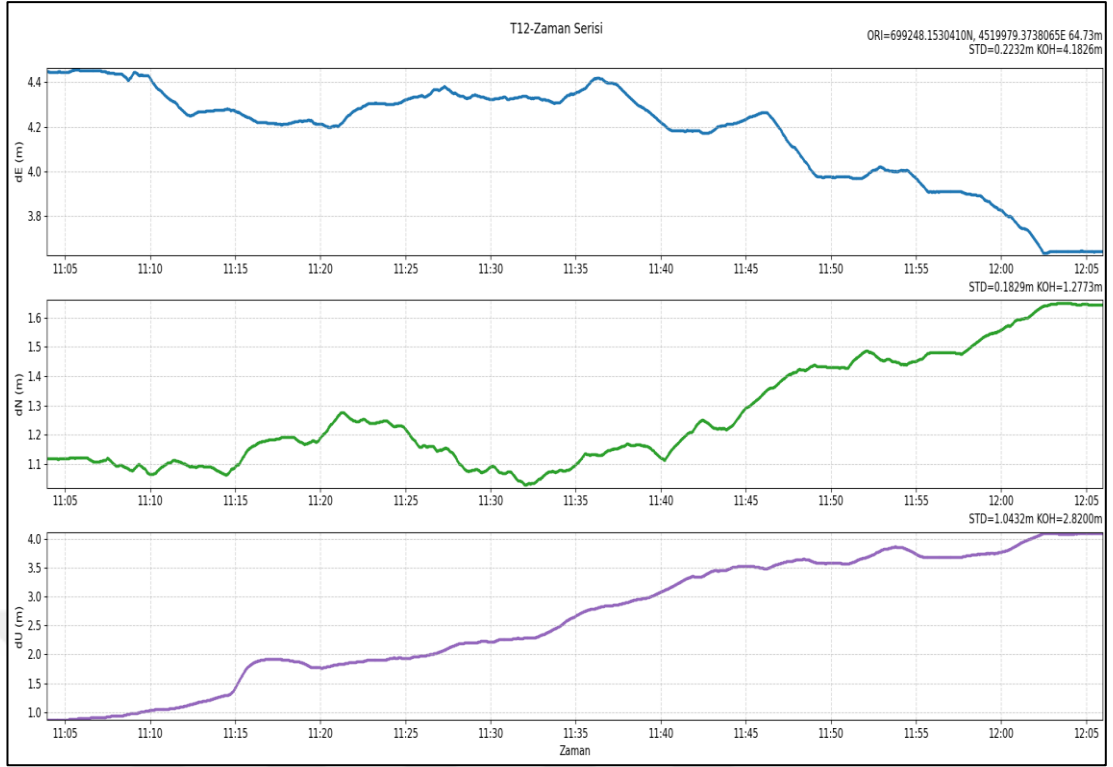
Şekil 7.32: C2 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

Test-2'deki OEM2 noktasında CODE-IF-PPPAR çözümüyle işlenen OEM alıcısının gözlemleri, referans koordinatlarıyla kıyaslandığında yatay düzlemin sağa bileşeninde 0.014 m STD ve 0.126 m KOH; yukarı bileşeninde ise 0,0127 m STD ve 0,049 m KOH değerleri elde edilerek her iki bileşende de dalgalanmaların sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, OEM1'in Test-1'deki konumlandırma performansına eşdeğer tutarlılık sergilediğini göstermektedir. Düşey ekseninde ise 0.010 m STD ve 0.110 m KOH değeriyle yüksek konumlandırma performansı sağlamıştır. **Şekil 7.33**'teki zaman serisi grafiği incelendiğinde, sağa bileşeninin 0.104 ile 0.153 m aralığında dalgalanırken, yukarı bileşenin 0.026 ile 0.074 m aralığında hafif dalgalanmalar göstermiştir. Düşey bileşenin ise -0.126 ile -0.090 m aralığında kararlı bir hassasiyet izlediğini ortaya koymuştur. CAD ortamındaki kırmızı doğrultu (**Şekil 7.31**) OEM2 referans konumu ile çözüm noktaları arasındaki yatay sapmanın yaklaşık 0,13 m olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, OEM GNSS alıcısının farklı konumlarda konumlandırma hassasiyetini koruyabildiğini ve yüksek konumlandırma performansı sağladığını ortaya koymaktadır.



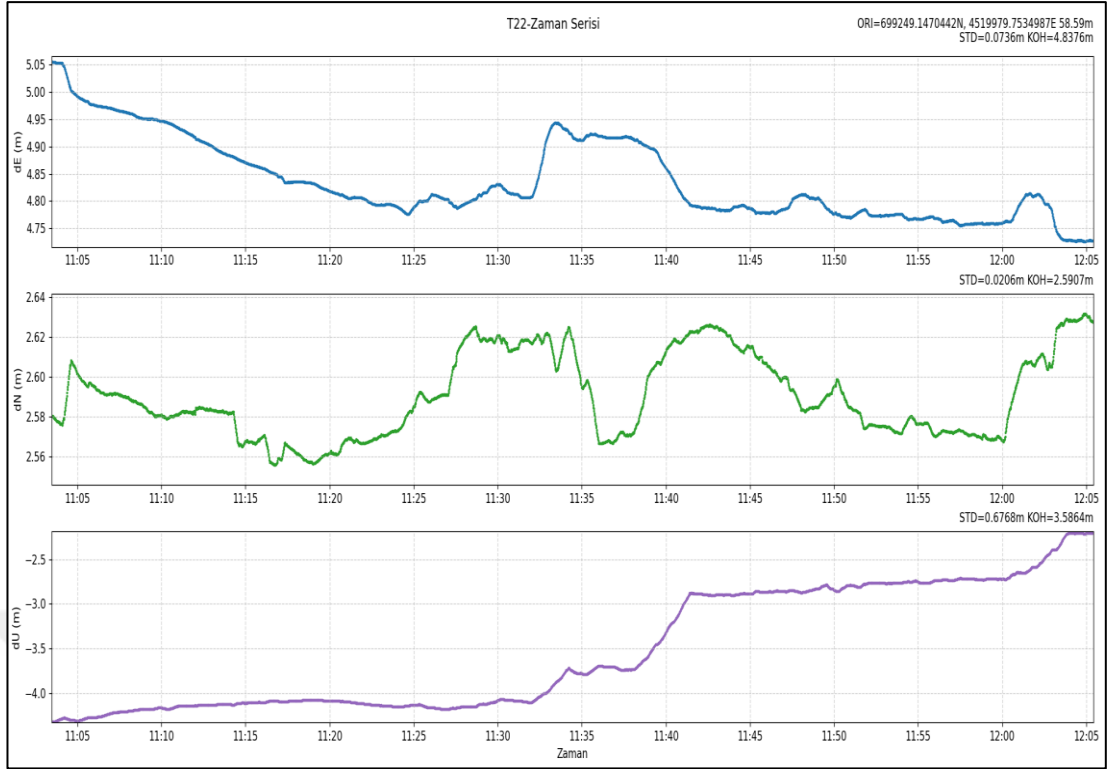
Şekil 7.33: OEM2 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

T1 model akıllı mobil cihazının Test-2 konumundaki gerçek konumu ile CODE-IF-PPPAR çözümü kullanılarak elde edilen gözlem verilerine ait koordinat bileşenleri incelendiğinde, yatay düzlemin sağa bileşeninde 0.223 m STD ve 4.183 m KOH; yukarı bileşeninde 0.183 m STD ve 1.277 m KOH değerleri ortaya çıkmıştır. Test-1 konumundaki T11'e kıyasla çok daha yüksek bir yatay sapma sergilemiştir. Düşey ekseninde ise 1.043 m STD ve 2.820 m KOH değerlerinde hatalar göstermiştir. **Şekil 7.34**'teki zaman serisi grafikleri incelendiğinde dE bileşeninin ölçüm süresi boyunca yaklaşık 3.635 ile 4.455 m aralığında sapmalar gösterirken, dN bileşeni 1.030 m ile 1.650 m aralığında sapmalar göstermiştir. dU bileşeninin ise 0.873 m ile 4.099 m aralığında sapmalar oluşturmıştır. CAD görselindeki pembe doğrultu (**Şekil 7.31**) ise T12 verilerinin gerçek konumu ile çözüm noktaları arasındaki yatay sapmanın yaklaşık 4.36 m olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, T2 model akıllı cihazın Test-2 koşullarında yatay ve düşey doğruluk açısından profesyonel GNSS alıcılarının çok gerisinde kaldığını ortaya koymaktadır. Test-2 konumundaki T12 gözlem verileri, T11 analizleriyle kıyaslandığında daha yüksek hata değerlerine sahip olduğu ve dolayısıyla daha düşük bir konumlandırma performansı sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 7.34: T12 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

T2 model akıllı mobil cihazın Test-2 konumundaki referans konumu (T22) ile CODE-IF-PPPAR çözümü kullanılarak elde edilen gözlem verilerine ait koordinat bileşenleri analiz edildiğinde, sağa bileşenin 0.074 m STD ve 4.838 m KOH; yukarı bileşenin 0.021 m STD ve 2.591 m KOH değerleriyle belirgin bir yatay sapma sergilemiştir. Düşey ekseninde ise 0.677 m STD ve 3.586 m KOH değeriyle yüksek bir konumlandırma hatası ortaya koymuştur. **Şekil 7.35**'teki zaman serisi grafikleri incelendiğinde dE bileşeninin ölçüm süresince 4.726 ile 5.056 m aralığında dalgalandığı; dN bileşeninin 2.556 ile 2.632 m ve dU bileşeni ise -4.326 ile -2.199 m aralığında yüksek sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.31**'deki mavi doğrultu, T22 cihazının gerçek konumu ile CODE-IF-PPPAR çözüm noktalarına olan yatay sapmanın yaklaşık 5.49 m olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, T2 model akıllı mobil cihazın Test-2 konumunda hem yatay hem de düşey ekseninde Test-1 konumundaki analizinin çok gerisinde kaldığını göstermiştir.



Şekil 7.35: T22 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

Test-2 konumunda gerçekleştirilen kapsamlı analizler sonucunda, CHC I80 alıcısının Test-1 ve Test-2 konumlarındaki yatay hata değerleri 0.07 ve 0.09 m; OEM alıcısı 0.15 ile 0.13 m değerlerinde yatay sapmalar göstererek tutarlı ve hassas konumlandırma sağlanmıştır. Buna karşılık akıllı mobil cihazlar Test-2’de daha da gerileyen performans sergilemiştir. T1 modeli yatayda 3.41 m’den 4.36 m’ye, T2 modeli ise 2.62 m’den 5.49 m’ye yükselen sapma değerleriyle hassas GNSS alıcılarının konumlandırma performanslarından daha da uzak kalmıştır.

7.8.3. Test-3 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

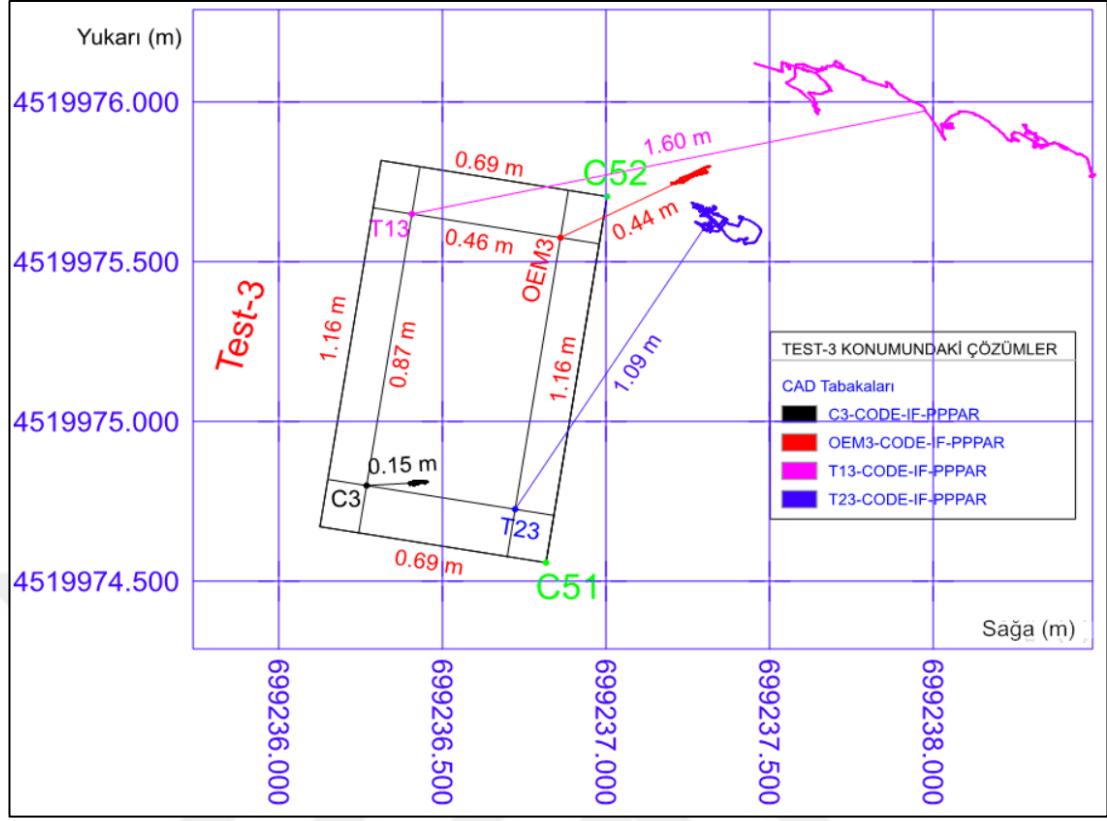
Test-1 ve Test-2 konumunda gerçekleştirilen GNSS gözlemlerinin ardından, ölçüm düzeneği son olarak Test-3 konumuna taşınmış ve kurulumu birebir korunarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. GNSS verilerinin değerlendirilmesinde, diğer değerlendirmelerde olduğu gibi CODE analiz merkezine ait final ürünü, IF iyonosfer düzeltme parametresi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu doğrultuda, Test-3 konumundaki ölçüm düzeneğinin gerçek konumu ve cihazlardan elde edilen gözlem verilerinin çözümlerine ait CAD gösterimi Şekil 7.36’da sunulmuştur. C51 ve C52 noktaları statik konum belirleme yöntemiyle belirlenen

referans noktalarını, C3, T13, T23 ve OEM3 noktaları cihazların ölçüm anındaki gerçek konumlarını ifade etmektedir. Test-3 ölçümlerine ait analiz sonuçları **Tablo 7.13**'te sunulmuştur.

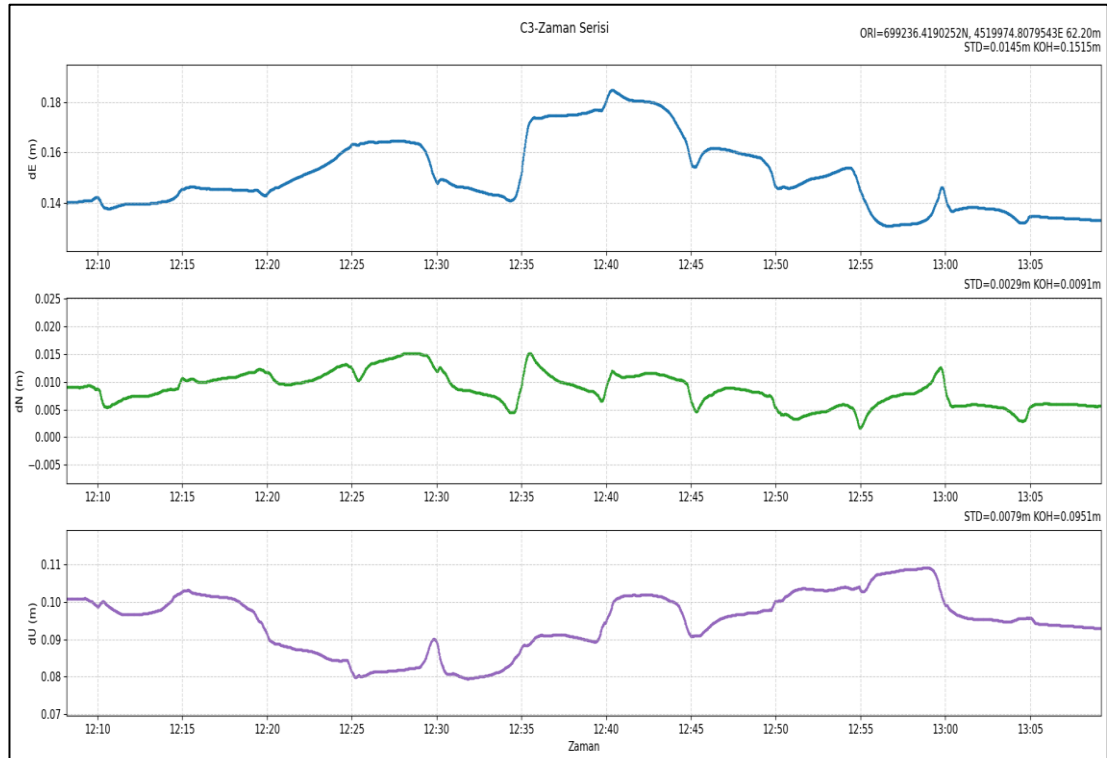
Tablo 7.13: Test-3 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile PPP-Statik değerlendirmeleri sonucunda elde edilen hata analizleri

Ölçüm Cihazı	Koordinat Bileşeni	Gerçek Koordinatları (m)	Orijin Koordinatları (m)	STD (m)	KOH (m)
OEM (OEM3)	Sağa (dE)	699236.8608	699237.2555	0.03425	0.39622
	Yukarı(dN)	4519975.5752	4519975.7656	0.01637	0.19110
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1009	61.9018	0.01688	0.19981
T1 (T13)	Sağa (dE)	699236.4068	699237.9778	0.32597	1.60443
	Yukarı(dN)	4519975.6493	4519975.9710	0.10923	0.33977
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1009	60.9574	0.69051	1.33575
T2 (T23)	Sağa (dE)	699236.7222	699237.3227	0.03809	0.60166
	Yukarı(dN)	4519974.7253	4519975.6398	0.02894	0.91494
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1009	54.9391	0.36141	7.17090
CHC (C3)	Sağa (dE)	699236.2682	699236.4190	0.01450	0.15152
	Yukarı(dN)	4519974.7993	4519974.8080	0.00295	0.00914
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1009	62.1957	0.00789	0.09508

CHC I80 GNSS alıcısının Test-3 konumundaki gerçek konumu (C3) ile CODE-IF-PPPAR çözümü kullanılarak elde edilen gözlem verilerine ait koordinat bileşenlerinin analizleri incelendiğinde, yatay eksenin sağa bileşeninde 0.015 m STD ve 0.152 m KOH; yukarı bileşeninde ise 0.003 m STD ve 0.009 m KOH değerleriyle C1 ve C2 noktalarında sağlanan konumlandırma performansına çok yakın bir düzeyde tutarlılık göstermiştir. Düşey bileşende 0,008 m STD ve 0.095 m KOH değerleriyle hassas bir konumlandırma sağladığı görülmektedir. **Şekil 7.36**'da CAD ortamındaki siyah doğrultu, C3 cihazının gerçek konumu ile çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 0.15 m olduğunu göstermektedir. **Şekil 7.37**'deki zaman serisi grafikleri incelendiğinde, sağa bileşen 0.131 ile 0.185 m aralığında; yukarı bileşen 0.002 ile 0.015 m aralığında oldukça düşük sapmalar göstermiştir. Düşey bileşenin ise 0.080 ile 0.109 m arasında dar bir aralıkta tutarlı bir sapma göstererek yüksek bir konumlandırma performansı sağlamıştır.

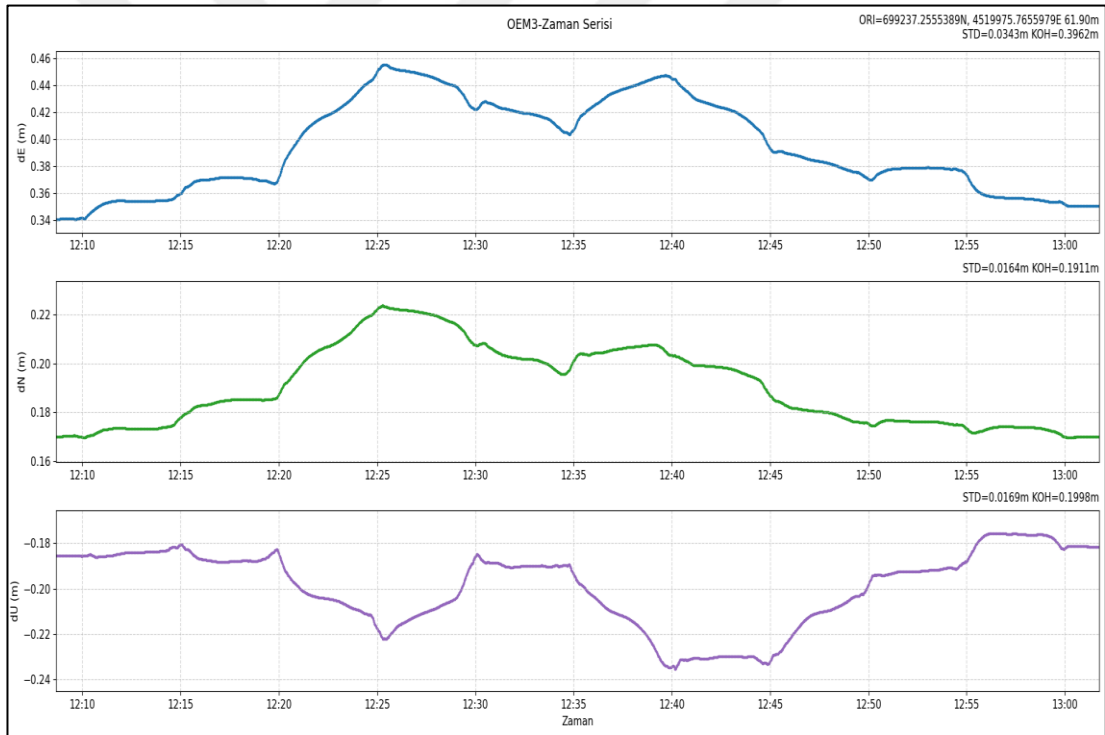


Şekil 7.36: Test-3 konumundaki C3, OEM3, T1 ve T2 cihazlarına ait gözlem verilerinin ve gerçek konumlarının yatay düzlemde gösterimi.



Şekil 7.37: C3 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

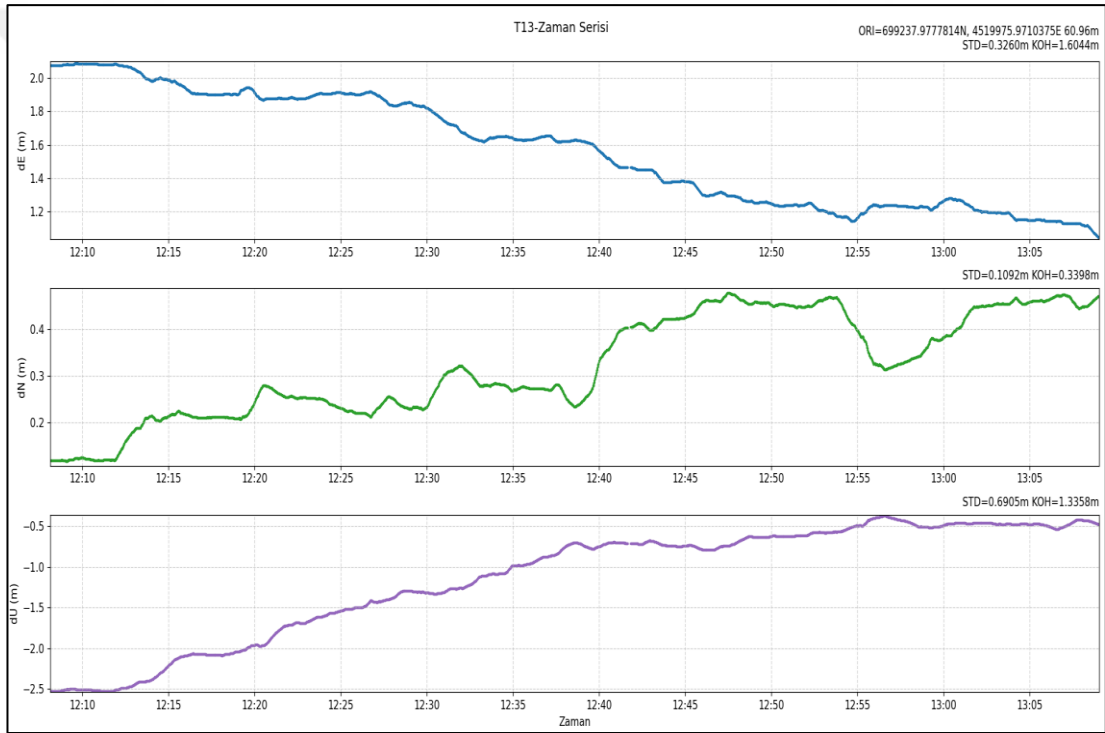
Test-3 konumundaki OEM3 noktasında CODE-IF-PPPAR çözümüyle işlenen OEM alıcısının gözlemlerinin analizleri incelendiğinde, yatay düzlemin sağa bileşeninde 0.034 m STD ve 0.396 m KOH değerleri; yukarı bileşeninde 0.016 m STD ve 0.191 m KOH değerleri elde edilmiştir. Düşeyde ise 0.017 m STD ve 0.200 m KOH değerlerinde sapmalar elde edilirken, Test-1 ve Test-2 noktalarındaki OEM performanslarına göre daha yüksek hata değerleri göstermiştir. **Şekil 9.36**'daki CAD gösteriminde kırmızı doğrultu, OEM cihazının gerçek konumu ile çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 0,44 m olduğunu göstermektedir. **Şekil 7.38**'deki zaman serisi grafikleri incelendiğinde dE bileşeninin 0.340 ile 0.455 aralığında; dN bileşeninde ise 0.170 ile 0.224 m aralığında diğer çözümlere kıyasla yüksek sapmaların olduğunu göstermektedir. dU bileşeninde ise -0.235 ile -0.176 m arasında sapma izlediği görülmektedir.



Şekil 7.38: OEM3 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

T1 model akıllı mobil cihazın Test-3 konumundaki gerçek konumu ile CODE-IF-PPPAR çözümü kullanılarak elde edilen gözlem verilerine ait koordinat bileşenlerinin analizleri incelendiğinde, sağa bileşeninde 0.326 m STD ve 1.604 m KOH; yukarı bileşeninde 0.109 m STD ve 0.340 m KOH değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, T11 ve T12 ölçümlerine göre yatay konumlandırma daha iyi konumlandırma

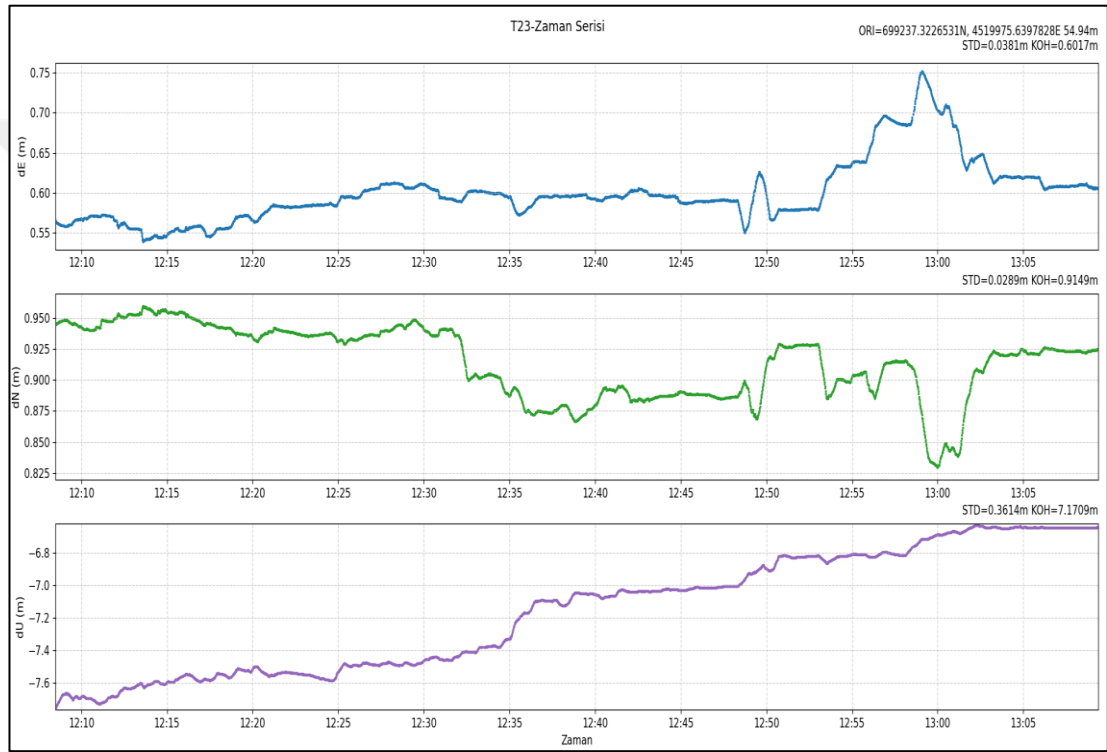
performansı sağladığını göstermektedir. Düşeyde ise 0.691 m STD ve 1.34 m KOH değeriyle düşük bir konumlandırma performansı ortaya koymuştur. **Şekil 7.36**'daki CAD çiziminde pembe doğrultu, T13 gerçek konumu ile çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 1.60 m olduğunu göstermektedir. **Şekil 7.39**'daki zaman serisi grafikleri incelendiğinde dE bileşeni 1.048 ile 2.088 m aralığında; dN bileşeni 0.117 ile 0.478 m aralığında; dU bileşeni ise -2.531 ile -0.369 m aralığında sapmalar göstermiştir. Test-3 konumundaki T13 gözlem verileri, T11 ve T12 analizleriyle kıyaslandığında daha düşük hata değerlerine sahip olduğu ve dolayısıyla daha yüksek bir konumlandırma performansı sergilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.39: T13 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

Test-3 konumunda T2 cihazına ait gözlem verilerinin CODE-IF-PPPAR çözümü, yatay düzlemde önemli bir iyileşme kaydetmiştir: Sağa bileşeninde 0.038 m STD ve 0.602 m KOH; yukarı bileşeninde 0.029 m STD ve 0.915 m KOH değerleri görülmüştür. Bu sonuçlar Test-1 ve Test-2'deki sapmalara kıyasla yatay doğrulukta belirgin bir gelişme gösterdiğini ifade etmektedir. Ancak düşeyde 0.361 m STD ve 7.171 m KOH değeriyle yüksek bir hata göstermiştir. **Şekil 7.40**'taki zaman serisi grafikleri incelendiğinde dE bileşeninin 0.539 ile 0.752 m aralığında; dN bileşeninin

0.830 ile 0.960 m aralığında; dU bileşeninin ise -7.754 ile -6.633 m aralığında sapmalar görülmektedir. **Şekil 7.36**'daki CAD gösteriminde mavi doğrultu, T23 gerçek konumu ile çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 1.09 m olduğunu göstermektedir. Yatay düzlemde yüksek bir konumlandırma performansı sağlarken, düşey ekseninde bu doğruluk ve hassasiyet korunamayıp yüksek hata değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak, T2 akıllı mobil cihazı Test-3 konumunda yatay konumlandırmada Test-1 ve Test-2 konumlarına göre daha iyi konumlandırma performansı göstermiştir.



Şekil 7.40: T23 gözlemlerine ait PPP-Statik çözümlerin zaman serisi.

T1 ve T2 model akıllı mobil cihazlarının Test-1 ve Tes-2 konumlarındaki GNSS gözlemlerine kıyasla Test-3 konumunda sağlanan performans artışı, cihazların konumlandırma performansındaki değişkenliğin analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Bu durum, ölçüm koşulları, çevresel faktörler ve analiz süreçlerinin konum doğruluğu üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanınması açısından önemli bir bulgu olarak değerlendirilmiştir.

7.9. Ölçüm Cihazlarına Ait Verilerin Statik Analizleri

Uygulamanın üçüncü aşamasında, Bölüm 6.8’de sunulan PPP Statik analiz sonuçlarıyla doğrudan karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, RTKLIB yazılımında statik konum belirleme yöntemi kullanılarak Test-1, Test-2 ve Test-3 konumlarında gerçekleştirilen ölçümlere ait gözlem verileri işlenmiştir. Böylece, aynı test konumlarında hem statik hem de PPP-Statik yaklaşımlarının GNSS konumlandırma performansına dair farklar değerlendirilmiştir. Bu kapsamda statik yöntem kullanılarak gerçekleştirilen analizlere ait sonuçlar aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

Statik yöntem kullanılarak gerçekleştirilen bu analizler için, RTKLIB yazılımında farklı parametre ayarlamaları yapılmıştır. Statik konum belirleme yaklaşımı, ölçüm verilerine düzeltme sağlamak için mutlaka bir baz istasyonundan gelen verileri gerektirdiğinden, Test-1, Test-2 ve Test-3 konumlarında eş zamanlı olarak ölçüm yapan cihazlardan biri baz istasyonu olarak tanımlanmıştır. Bu amaçla, CHC I80 alıcısına ait gözlem verileri baz istasyonu olarak kullanılmış; diğer tüm cihazlar (OEM, T1, T2) kendi Rinex verilerini CHC I80 verileri tarafından sağlanan baz düzeltmeleriyle işleyerek statik analizleri gerçekleştirilmiştir. CHC I80’e ait gözlem verilerinin değerlendirilmesinde ise, OEM GNSS alıcısına ait gözlem verileri baz istasyonu olarak kullanılmıştır. Ayrıca statik yöntem, baz ve gezici arasındaki ortak uydu kaynaklı hataları ve iyonosferik gecikmeleri ortadan kaldırdığından ek bir iyonosfer düzeltmesi gerektirmemektedir. Bu nedenle ayrı bir iyonosfer düzeltmesine teknik olarak gerek duymamaktadır. Ancak, yerel iyonosferik değişimlerin tamamen ortadan kaldırılamadığı durumlarda düzeltmelerin sağlanabilmesi için, statik değerlendirmelerinde Broadcast (BC) iyonosfer düzeltme parametresi kullanılmıştır. Bu düzenlemelerle gerçekleştirilen analizler sonucunda, PPP Statik sonuçlarıyla doğrudan karşılaştırılabilir nitelikte, statik tabanlı konumlandırma çözümleri elde edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

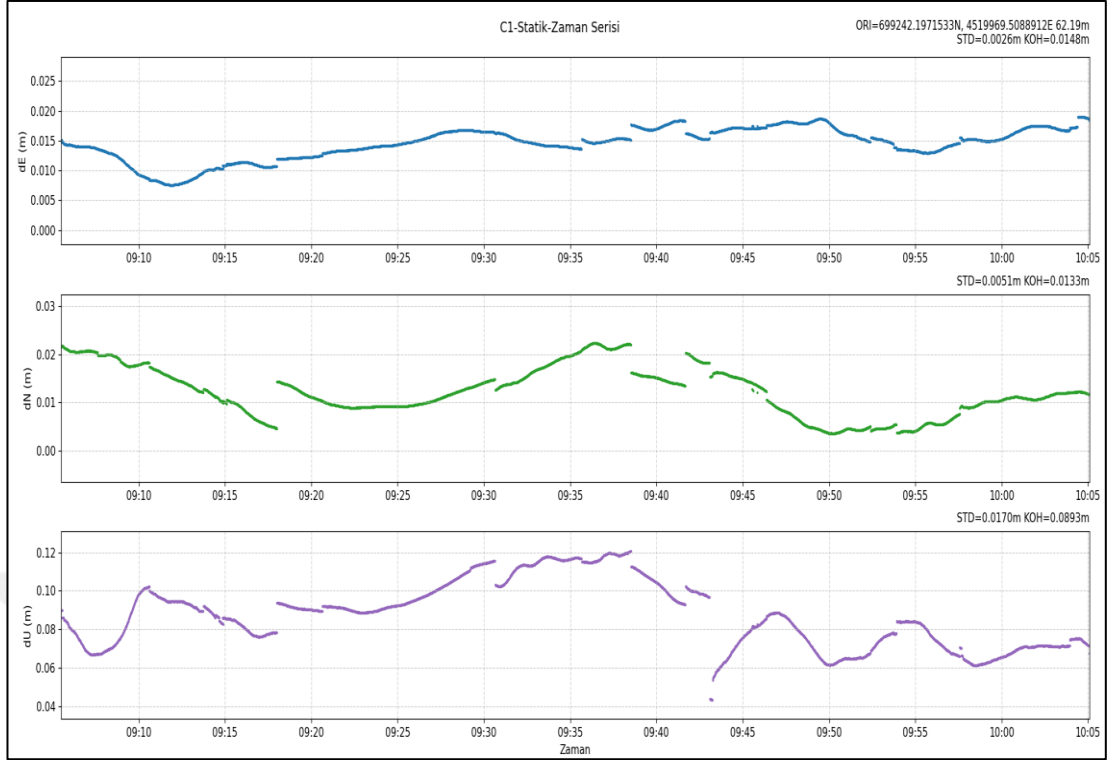
7.9.1. Test-1 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

Test-1 konumunda CHC ve OEM GNSS alıcıları ile T1 ve T2 model akıllı mobil cihazlarla toplanan gözlem verileri, statik konum belirleme yöntemiyle çözümlenerek analiz edilmiştir. GNSS verilerinin değerlendirilmesinde, CODE analiz merkezine ait final ürünleri, BC iyonosfer düzeltme parametresi ve PPP-AR tamsayı belirsizlik

çözüm yöntemi kullanılmıştır. Statik yöntem iyonosferden bağımsız işlemler gerçekleştirdiği için BC düzeltme yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, ölçümlerin zamana bağlı sapmalarını gösteren zaman serileri ve CAD ortamındaki görselleştirmeler kullanılarak ayrıntılı hata analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin hata değerlendirmeleri için STD ve KOH değerleri hesaplanarak sonuçlar **Tablo 7.14**'te sunulmuştur. Test-1 konumundaki cihazların gerçek konumları ve gözlem verilerinin statik çözümleri, **Şekil 7.41**'deki CAD gösteriminde sunulmuştur. Siyah nokta bulutu, CHC I80 alıcısının C1 noktasındaki gözlem verilerine ait statik çözümleri (C1_Statik); kırmızı, OEM1_Statik çözümleri; pembe, T11_Statik çözümleri; mavi renk ise T21_Statik çözümleri temsil etmektedir.

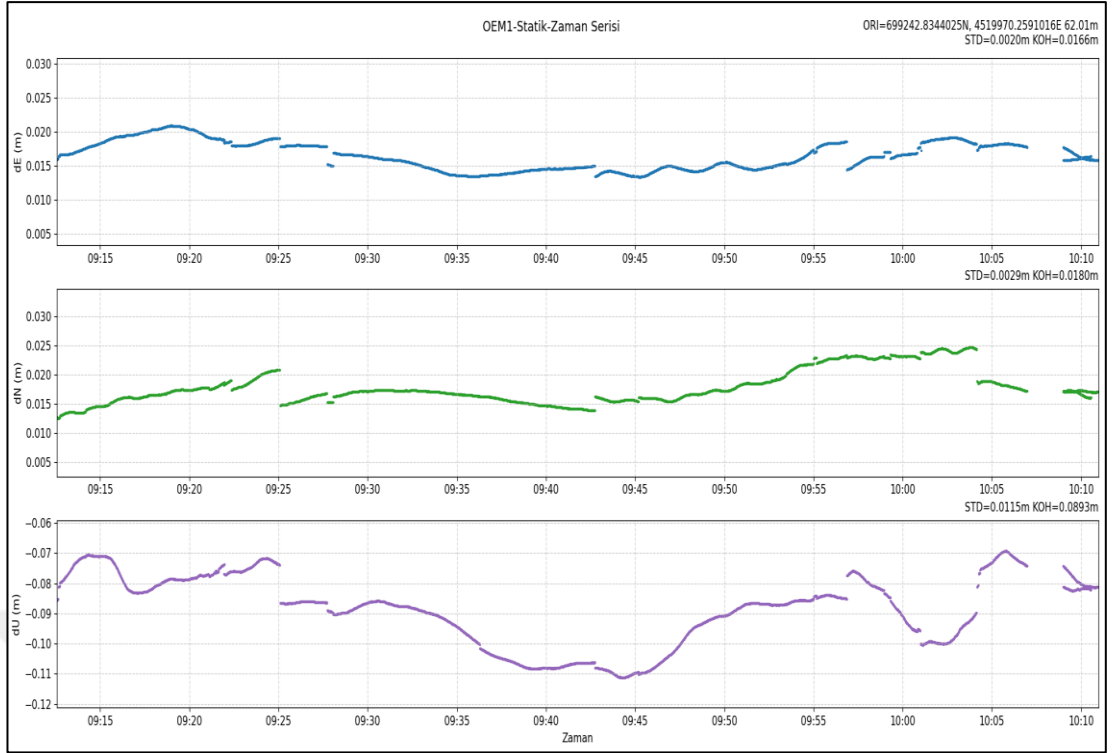
Tablo 7.14: Test-1 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile statik çözümleri sonucunda elde edilen hata analizleri

Ölçüm Cihazı	Koordinat Bileşeni	Gerçek Koordinatları (m)	Orijin Koordinatları (m)	STD (m)	KOH (m)
OEM (OEM1)	Sağa (dE)	699242.8179	699242.8344	0.00203	0.01663
	Yukarı(dN)	4519970.2413	4519970.2591	0.00289	0.01804
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1034	62.0148	0.01154	0.08930
T1 (T11)	Sağa (dE)	699242.3686	699242.5761	0.01775	0.20828
	Yukarı(dN)	4519970.3403	4519970.9898	0.02831	0.65007
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1034	62.2768	0.07927	0.19068
T2 (T21)	Sağa (dE)	699242.6319	699242.6927	0.01462	0.06251
	Yukarı(dN)	4519969.3976	4519970.2838	0.09334	0.89106
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1034	59.6696	0.16046	2.43909
CHC (C1)	Sağa (dE)	699242.1826	699242.1972	0.00264	0.01479
	Yukarı(dN)	4519969.4966	4519969.5089	0.00505	0.01329
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1034	62.1911	0.01697	0.08932



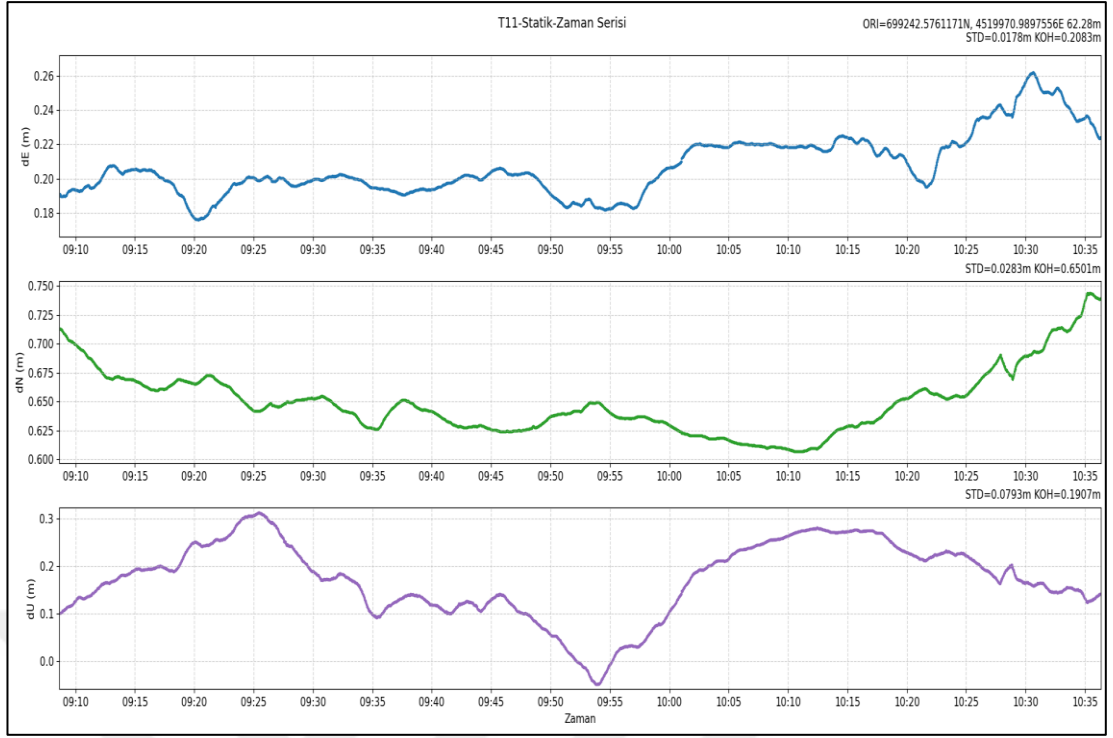
Şekil 7.42: C1 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

OEM1 noktasının statik çözümlerine ait **Tablo 7.14**'teki değerler incelendiğinde dE yönünde 0.002 m STD ve 0.017 m KOH; dN yönünde 0.003m STD ve 0.018 m KOH; dU yönünde ise 0.012 m STD ve 0.089 m KOH değerleri elde edilmiştir. **Şekil 7.41**'deki CAD gösteriminde, OEM alıcısının OEM1 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasında 0.02 m ile çok düşük bir yatay sapma göstererek CHC I80 alıcısıyla aynı hassasiyeti sağlamıştır. **Şekil 7.43**'teki zaman serisi incelendiğinde, yatay yöndeki dE bileşeninde 0.013 ile 0.021 m aralığında; dN bileşeninde 0.012 ile 0.025 m aralığında düşük sapmalar ortaya çıkmıştır. Düşey bileşende ise -0.111 ile -0.069 m aralığında düşük sapmalar göstermiştir. Bu sayısal bulgular, OEM1 alıcısına ait statik çözümlerin oldukça düşük sapmalar göstererek CHC I80 GNSS alıcısına eşdeğer yüksek bir konumlandırma hassasiyet sunmuştur.

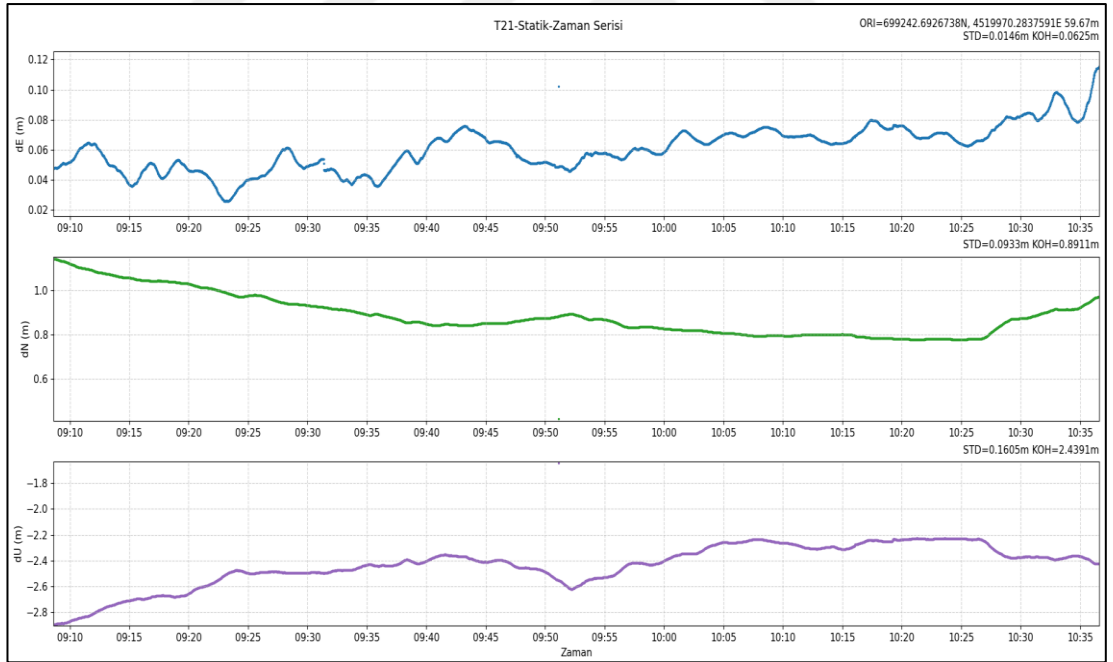


Şekil 7.43: OEM1 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

T11 noktasına ait statik çözümlerin **Tablo 7.14**'teki hata değerleri incelendiğinde, yatay düzlemin dE bileşeninde 0.018 m STD ve 0.208 m KOH; dN bileşeninde ise 0.028 m STD ve 0.650 m KOH değerleriyle düşük sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.41**'deki CAD gösteriminde, T1 cihazının T11 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasında 0.68 m değeriyle metre altı düzeyde yatay sapma göstermiştir. Düşey bileşende ise 0.079 m STD ve 0.191 m KOH değeriyle GNSS alıcılarına yakın konumlandırma performansı sağlamıştır. **Şekil 7.44**'teki zaman serileri incelendiğinde dE yönünde 0.176 ile 0.262 m aralığında; dN yönünde 0.607 ile 0.744 m aralığında; düşey yönde ise ölçüm süresi boyunca -0.048 ile 0.314 m arasında oldukça düşük sapmalar göstermiştir. Statik çözüm yöntemiyle T11 verilerinin yatayda metre altı düzeyde, düşeyde ise hassas GNSS alıcılarına yakın bir değerde konumlandırma performansı sağladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.44: T11 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.



Şekil 7.45: T21 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

T21 noktasına ait statik çözümlerin **Tablo 7.14**'teki hata değerleri incelendiğinde dE bileşeninde 0.015 m STD ve 0,063 m KOH; dN bileşeninde 0.093 m STD ve 0.891 m KOH değerleri elde edilmiştir. **Şekil 7.41**'deki CAD gösteriminde, T2 cihazının T21 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasında

0.89 m değeriyle metre altı düzeyde yatay sapma göstermiştir. **Şekil 7.45**'teki zaman serisi grafikleri incelendiğinde dE yönündeki sapmaların 0.026 ile 0.115 m aralığında; dN yönünde 0.419 ile 1.142 m aralığında sapmalarla T1 cihazına kıyasla daha yüksek hatalar ortaya koymuştur. Düşey bileşende ise 0.160 m STD ve 2.439 m KOH değerleriyle -2.896 ile -1.643 m arasında oldukça yüksek hatalar göstermiştir. Test-1 konumunda gerçekleştirilen gözlemlerin statik çözümlerinde, T2 cihazı ile T1 cihazı yatay düzlemde yakın değerlerde sapmalar göstererek metre altı düzeyinde konumlandırma performansı sağlamışlardır. Ancak, T2 cihazı düşey yönde bu hassasiyeti koruyamayarak yüksek bir hata göstermiştir.

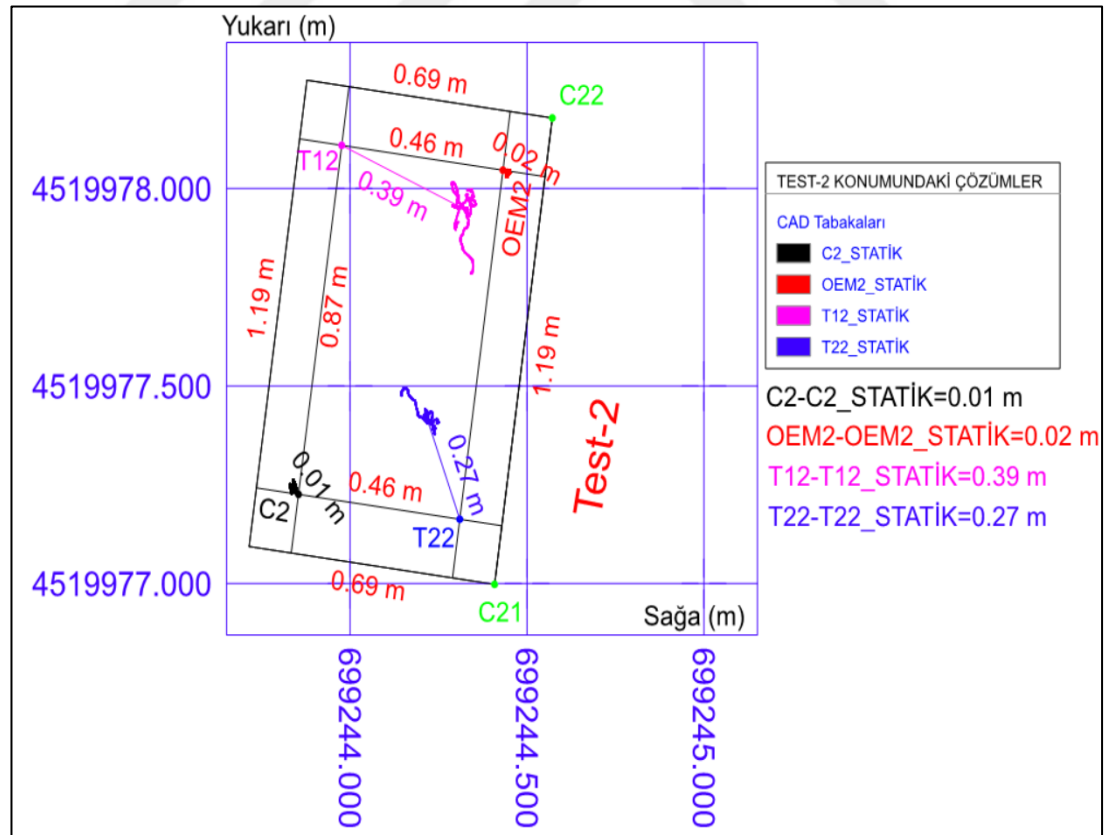
Test-1 konumundaki gözlemlerin RTKLIB yazılımındaki statik çözümleriyle PPP-Statik çözümleri karşılaştırıldığında, CHC ve OEM cihazları hem yüksek kararlılık hem de tutarlı sonuçlar sunmuştur. T1 ve T2 cihazlarına uygulanan statik çözümler PPP statik çözümleriyle karşılaştırıldığında, belirgin bir şekilde daha iyi konumlandırma performansı sağladığı görülmüştür.

7.9.2. Test-2 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

Test-1 konumunda statik çözüm yöntemiyle yürütülen analiz adımları, Test-2 konumundaki verilere de uygulanmıştır. Cihazlardan toplanan veriler statik çözüm yöntemiyle değerlendirilerek STD ve KOH değerleri hesaplanmış ve sonuçlar **Tablo 7.15**'te sunulmuştur. Değerlendirmelere yönelik analizler aşağıda açıklanmıştır. **Şekil 7.46**'da Test-2 konumunda bulunan cihazlara ait statik çözüm yöntemiyle elde edilen sonuçların CAD ortamındaki dağılımları gösterilmiştir. OEM2, T12 ve T22 cihazlarının nokta bulutları, baz istasyonu olarak eş zamanlı veri toplayan CHC I80'e (C2) göre hesaplanan koordinat sapmalarını; CHC I80'in nokta bulutu ise baz istasyonu olarak kullanılan OEM2'ye göre belirlenen sapmaları yansıtmaktadır. Siyah nokta bulutu, CHC I80 alıcısının C2 noktasındaki gözlem verilerine ait statik çözümlerini (C2_Statik); kırmızı, OEM2_Statik çözümlerini; pembe, T12_Statik çözümlerini; mavi renk ise T22_Statik çözümlerini temsil etmektedir.

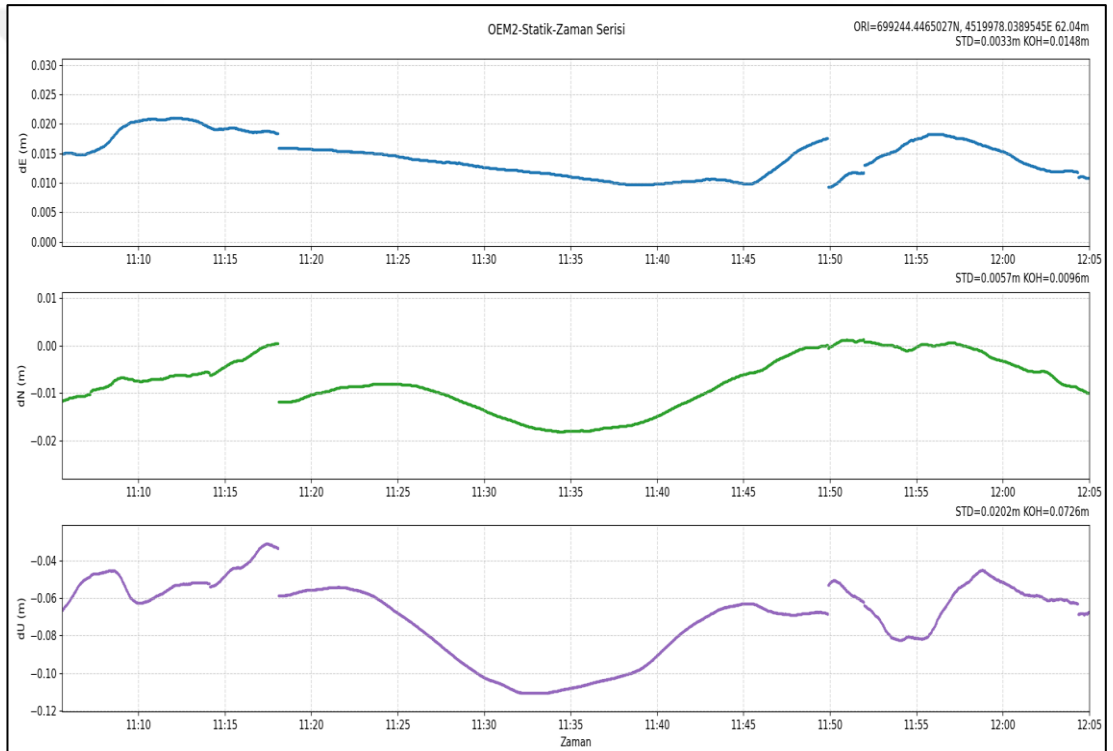
Tablo 7.15: Test-2 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile statik çözümleri sonucunda elde edilen hata analizleri

Ölçüm Cihazı	Koordinat Bileşeni	Gerçek Koordinatları (m)	Orijin Koordinatları (m)	STD (m)	KOH (m)
OEM (OEM2)	Sağa (dE)	699244.4321	699244.4465	0.00330	0.01478
	Yukarı(dN)	4519978.0467	4519978.0390	0.00568	0.00960
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1122	62.0425	0.02021	0.07258
T1 (T12)	Sağa (dE)	699243.9764	699244.3257	0.01841	0.34982
	Yukarı(dN)	4519978.1097	4519977.9469	0.04383	0.16860
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1122	61.9334	0.07135	0.19255
T2 (T22)	Sağa (dE)	699244.3100	699244.2173	0.02150	0.09512
	Yukarı(dN)	4519977.1629	4519977.4187	0.02393	0.25690
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1122	59.9855	0.03586	2.12697
CHC (C2)	Sağa (dE)	699243.8543	699243.8414	0.00504	0.01386
	Yukarı(dN)	4519977.2259	4519977.2424	0.00943	0.01903
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1122	62.1714	0.03107	0.06689



Şekil 7.46: Test-2 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin statik çözümleri.

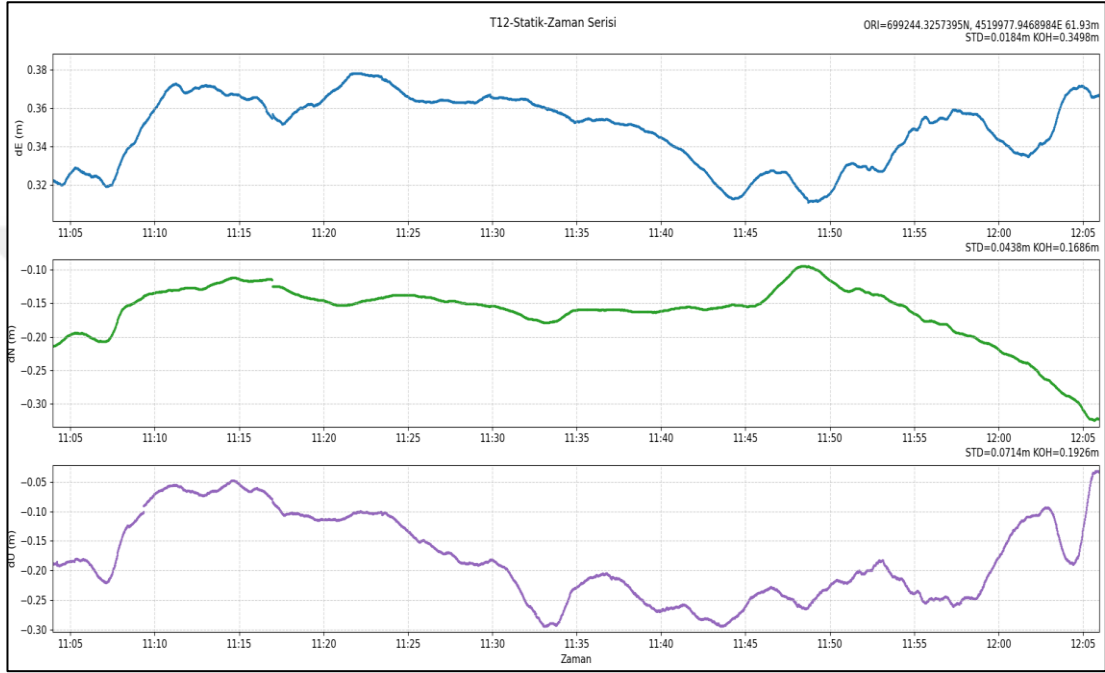
sonuçlar sağlanmıştır. **Şekil 7.48**'deki zaman serisine göre değerlendirmeler yapıldığında ise, dE sapmalarının 0.009 ile 0.021 m aralığında; dN sapmalarının -0.018 ile 0.001 m aralığında düşük sapmalar göstermektedir. Düşey bileşende ise -0.11 ile -0.031 m aralığında 0.020 m STD ve 0.073 m KOH değeriyle yatay düzleme yakın sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.46**'daki CAD gösteriminde, OEM alıcısının OEM2 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 0.02 m olması, cm düzeyinde sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Bu bulgular, baz istasyonu olarak CHC alıcısına ait verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen OEM2 noktasının statik çözümlerinin, PPP-Statik çözümlerine kıyasla daha iyi konumlandırma performansı sağladığını göstermiştir.



Şekil 7.48: OEM2 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

T12 noktasında elde edilen verilerin statik çözümlerine ait **Tablo 7.15**'teki değerler incelendiğinde, sağa bileşeninde 0.018 m STD ve 0.350 m KOH; yukarı bileşeninde 0.044 m STD ve 0.169 m KOH; düşey bileşende ise 0.071 m STD ve 0.193 m KOH değerleriyle oldukça düşük sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.49**'da T12 noktasının zaman serisi incelendiğinde, dE sapmalarının 0.331 ile 0.378 m arasında yayıldığını; dN sapmaları -0.325 ile 0.094 m aralığında yayılmıştır. Düşey bileşende ise -0.294 ile -0.032 m arasında sapmalar gözlenerek 0.071 m STD ve 0.193 m KOH değerleri elde

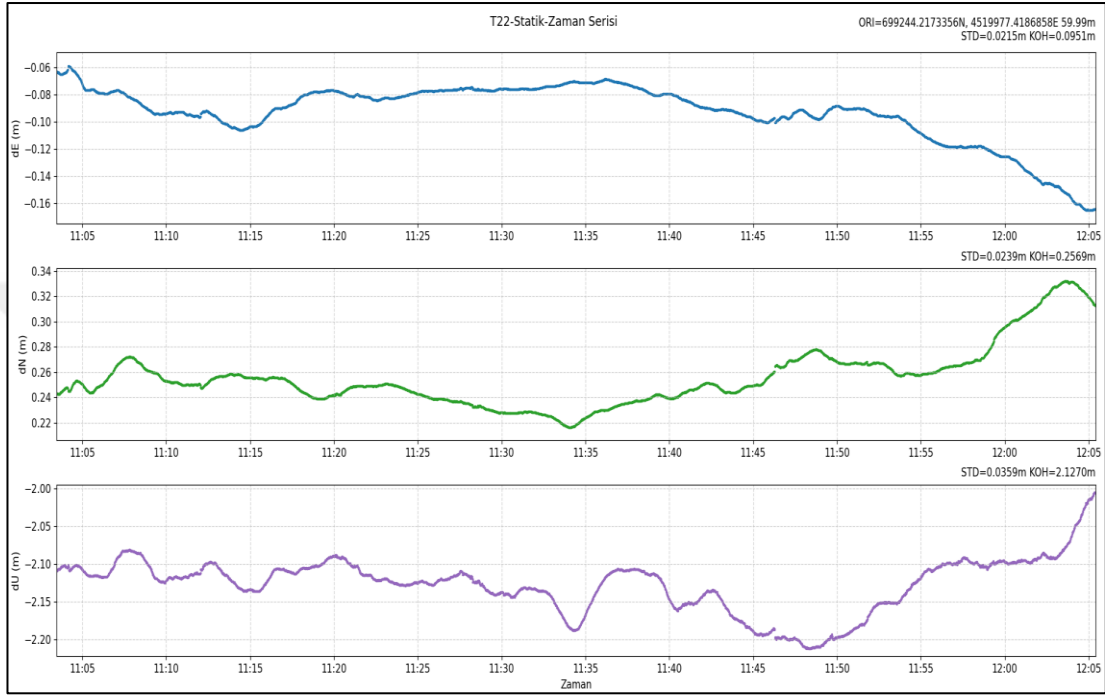
edilmiştir. **Şekil 7.46**'daki CAD gösteriminde, T1 cihazının T12 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 0.39 m olması, metre altı düzeyde kabul edilebilir bir hassasiyet sağladığı görülmüştür. Bu bulgular, baz istasyonu olarak CHC alıcısına ait verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen T12 noktasının statik çözümlerinin, PPP-Statik çözümlerine kıyasla çok daha iyi konumlandırma performansı sağladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.49: T12 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

T2 cihazının T22 noktasında elde edilen verilerinin statik çözümlerine ait **Tablo 7.15**'teki değerler incelendiğinde, sağa bileşeninde 0.022 m STD ve 0.095 m KOH; yukarı bileşeninde 0.024 m STD ve 0.257 m KOH; düşey bileşende ise 0.036 m STD ve 2.127 m KOH değerleri göstermiştir. T2 cihazı yatay düzlemde T1 cihazının T12 çözümlerine kıyasla daha iyi bir hassasiyet sağlarken düşeyde bu hassasiyeti sağlayamamıştır. **Şekil 7.50**'de T22 gözlemlerinin zaman serisi grafiği incelendiğinde, dE sapmalarının -0.165 ile -0.059 m arasında yayıldığını; dN sapmaları 0.216 ile 0.332 m aralığında yayılmıştır. Düşey bileşende ise -2.212 ile -2.005 m arasında sapmalar elde edilmiştir. **Şekil 7.46**'daki CAD gösteriminde, T2 cihazının T22 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 0.27 m olması, metre altı düzeyde yüksek bir hassasiyet sağladığı görülmüştür. Ancak, T2 cihazı düşey ekseninde birkaç metreyi aşan sapmalar nedeniyle

sınırlı bir doğruluk sunarak yatay yönde sağladığı hassasiyeti sağlayamamıştır. Bu bulgular, baz istasyonu olarak CHC alıcısına ait verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen T22 noktasının statik çözümlerinin, özellikle yatay yönde PPP-Statik çözümlerine kıyasla çok daha iyi konumlandırma performansı sağladığı sonucuna varılmıştır.



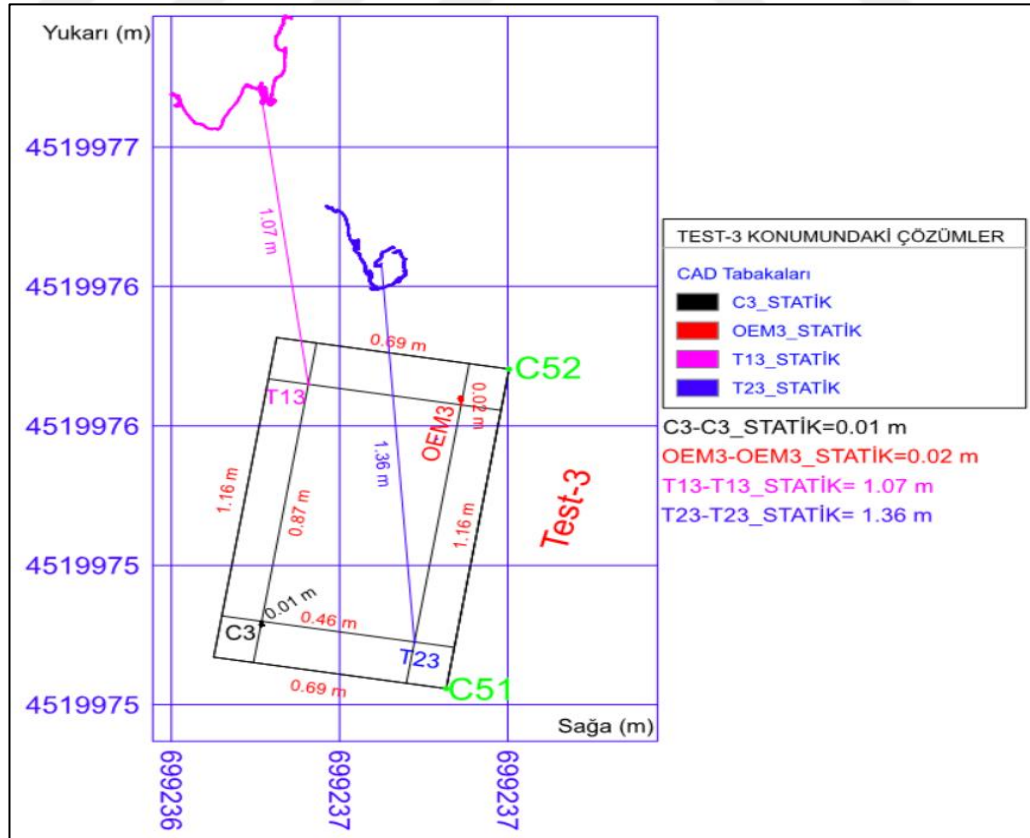
Şekil 7.50: T22 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

7.9.3. Test-3 Konumundaki Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

Test-1 ve Test-2 konumlarında statik çözüm yöntemiyle yürütülen analiz işlemleri, aynı şekilde Test-3 konumunda elde edilen verilere de uygulanmıştır. Cihazlardan toplanan verilerin analizleri **Tablo 7.16**'da sunulmuştur. Değerlendirmelere yönelik analizler aşağıda açıklanmıştır. **Şekil 7.51**'de Test-3 konumunda bulunan cihazlara ait statik çözüm yöntemiyle elde edilen sonuçların CAD ortamındaki dağılımları gösterilmiştir. OEM3, T13 ve T23 cihazlarının nokta bulutları, baz istasyonu olarak eş zamanlı veri toplayan CHC I80'e (C3) göre hesaplanan koordinat sapmalarını; CHC I80'in nokta bulutu ise baz istasyonu olarak kullanılan OEM3'ye göre belirlenen sapmaları yansıtmaktadır. Renklendirmeler önceki analizlerde olduğu gibi kullanılmıştır.

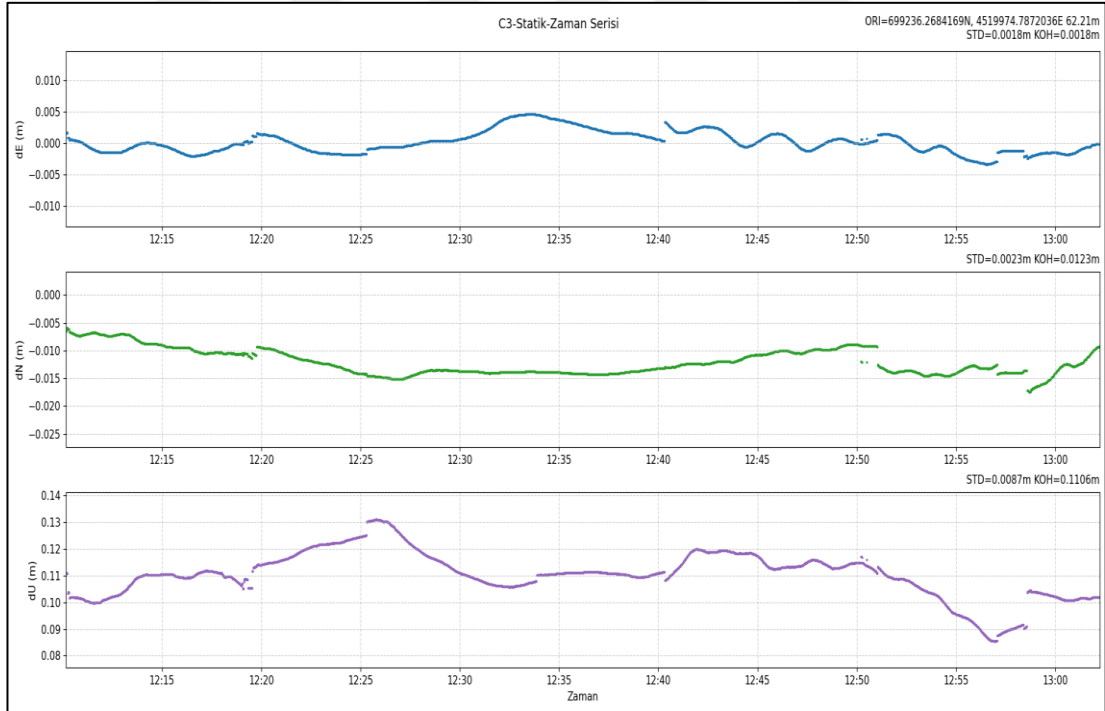
Tablo 7.16: Test-3 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin gerçek konumları ile statik çözümleri sonucunda elde edilen hata analizleri

Ölçüm Cihazı	Koordinat Bileşeni	Gerçek Koordinatları (m)	Orijin Koordinatları (m)	STD (m)	KOH (m)
OEM (OEM3)	Sağa (dE)	699236.8608	699236.8603	0.00180	0.00187
	Yukarı(dN)	4519975.5752	4519975.5973	0.00310	0.02229
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1009	61.9863	0.00726	0.11479
T1 (T13)	Sağa (dE)	699236.4068	699236.2632	0.08672	0.16771
	Yukarı(dN)	4519975.6493	4519976.7110	0.09007	1.06548
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1009	61.6310	0.21507	0.51679
T2 (T23)	Sağa (dE)	699236.7222	699236.6242	0.06471	0.11741
	Yukarı(dN)	4519974.7253	4519976.0824	0.07078	1.35897
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1009	62.9824	0.13669	0.89201
CHC (C3)	Sağa (dE)	699236.2682	699236.2684	0.00176	0.00178
	Yukarı(dN)	4519974.7993	4519974.7872	0.00231	0.01232
	Elipsoidal Y. (dU)	62.1009	62.2112	0.00869	0.11065



Şekil 7.51: Test-3 konumundaki cihazlara ait gözlem verilerinin statik çözümleri.

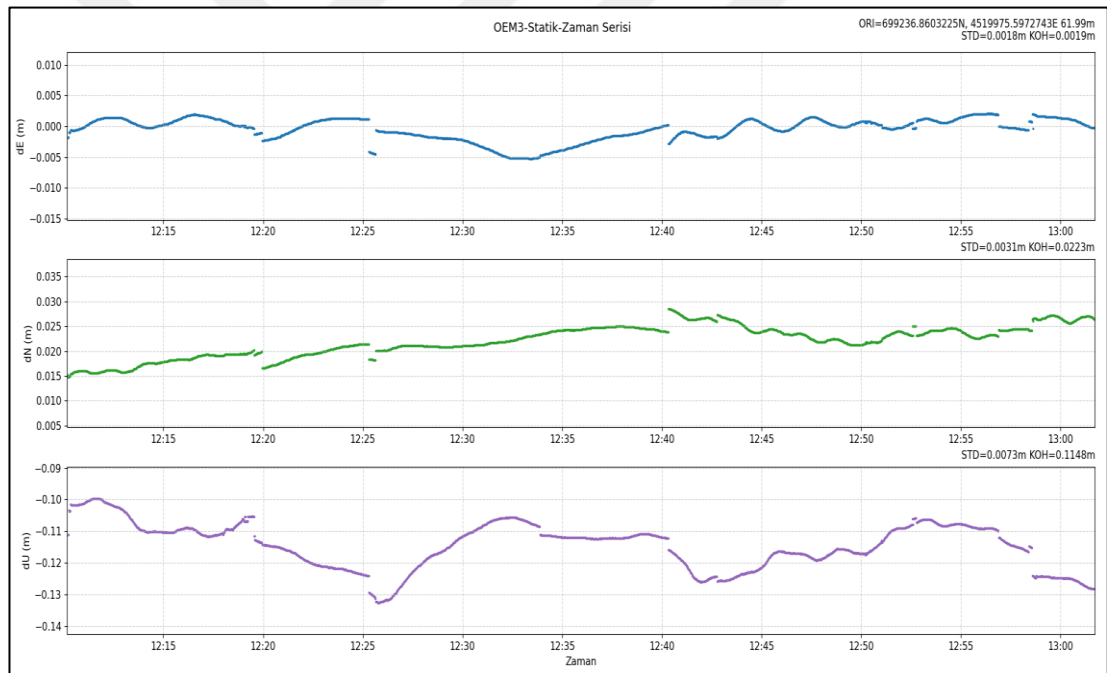
CHC alıcısından C3 noktasında elde edilen verilerin statik çözümlerine ait **Tablo 7.16**'daki değerler incelendiğinde, dE bileşeninde 0.002 m STD ve 0.002 m KOH; yukarı bileşeninde 0.002 m STD ve 0.012 m KOH değerleri göstererek Test-1 ve Test-2 gözlemleriyle tutarlı sonuçlar sağlamıştır. **Şekil 7.52**'deki zaman serisine göre değerlendirmeler yapıldığında ise, dE sapmalarının -0.003 ile 0.005 m aralığında; dN sapmalarının -0.017 ile 0.006 m aralığında düşük ve tutarlı sapmalar göstermektedir. Düşey bileşende ise 0.085 ile 0.131 m aralığında 0.009 m STD ve 0.111 m KOH değeriyle yatay düzleme yakın sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.51**'deki CAD gösteriminde, CHC alıcısının C3 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 0.01 m olması, cm altı düzeyde sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Bu bulgular, baz istasyonu olarak OEM alıcısına ait verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen C3 noktasının statik çözümlerinin, PPP-Statik çözümlerine kıyasla daha iyi konumlandırma performansı sağladığını göstermiştir.



Şekil 7.52: C3 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

OEM alıcısından OEM3 noktasında elde edilen verilerin statik çözümlerine ait **Tablo 7.16**'daki değerler incelendiğinde, dE bileşeninde 0.002 m STD ve 0.002 m KOH; yukarı bileşeninde 0.003 m STD ve 0.022 m KOH değerleri göstererek Test-1 ve Test-

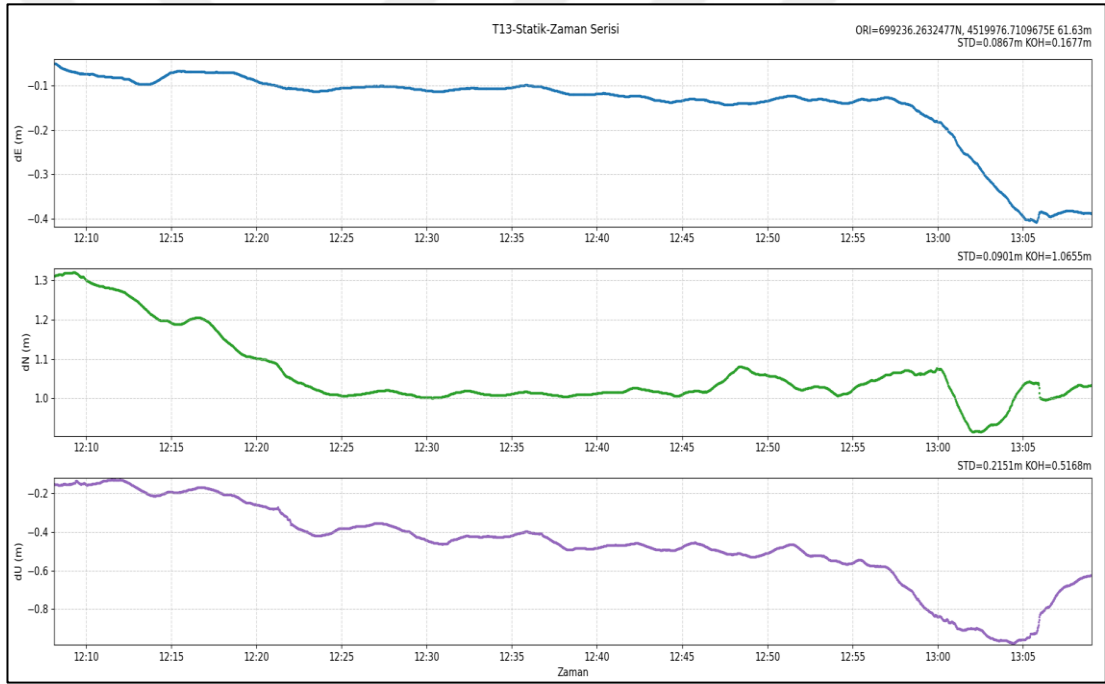
2 gözlemleriyle tutarlı sonuçlarla hassas bir konumlandırma sağlamıştır. **Şekil 7.53**'teki zaman serisine göre değerlendirmeler yapıldığında ise, dE yönündeki sapmaların -0.005 ile 0.002 m aralığında; dN sapmalarının 0.015 ile 0.028 m aralığında düşük ve tutarlı sapmalar göstermiştir. Düşey bileşende ise -0.133 ile -0.100 m aralığında 0.007 m STD ve 0.115 m KOH değeriyle yatay düzlemde biraz fazla sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.51**'deki CAD gösteriminde, OEM alıcısının OEM3 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 0.02 m olması, cm düzeyinde sonuçlar elde edildiğini ve CHC alıcısıyla aynı düzeyde hassasiyeti sağlayabildiği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, baz istasyonu olarak CHC alıcısına ait verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen OEM3 noktasının statik çözümlerinin, PPP-Statik çözümlerine kıyasla daha iyi konumlandırma performansı sağladığını göstermiştir.



Şekil 7.53: OEM3 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

T13 noktasında elde edilen verilerin statik çözümlerine ait **Tablo 7.16**'daki değerler incelendiğinde, sağa bileşeninde 0.087 m STD ve 0.168 m KOH; yukarı bileşeninde 0.090 m STD ve 1.065 m KOH; düşey bileşende ise 0.215 m STD ve 0.517 m KOH değerleriyle yatayda metre düzeyinde, düşeyde ise metre altı düzeyde sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.54**'te T13 noktasının zaman serisi incelendiğinde, dE sapmalarının -0.408 ile -0.050 m arasında yayıldığını; dN sapmaları 0.915 ile 1.320 m

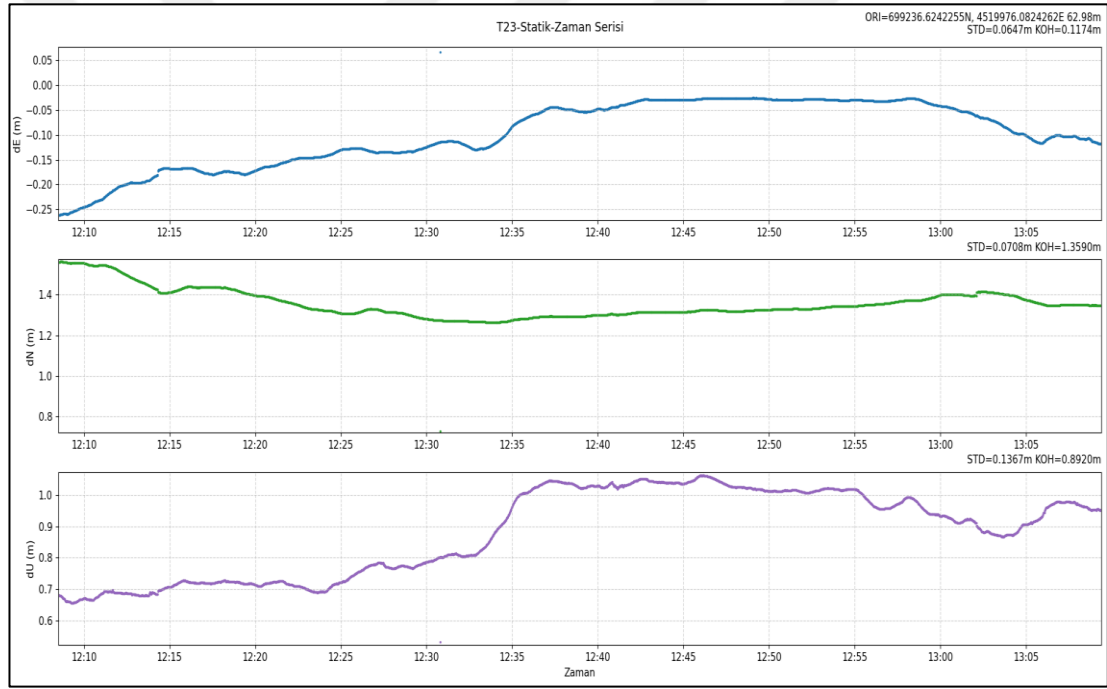
aralığında yayılmıştır. Düşey bileşende ise -0.977 ile -0.129 m arasında sapmalar gözlenerek 0.215 m STD ve 0.517 m KOH değerleriyle T11 ve T12 çözümlerine kıyasla daha yüksek sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.51**'deki CAD gösteriminde, T1 cihazının T13 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 1.07 m olması, metre düzeyinde hassasiyet sağlayarak bu gözlem anında konumlandırma performansının düştüğü görülmüştür. Bu bulgular, baz istasyonu olarak CHC alıcısına ait verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen T13 noktasının statik çözümlerinin, PPP-Statik çözümlerinden iyi konumlandırma performansı sağladığı sonucuna varılmıştır. Ancak, T13 verilerinin statik çözümleri T11 ve T12 gözlemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında konumlandırma performansının düştüğü görülmüştür.



Şekil 7.54: T13 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

T2 cihazının T23 noktasında elde edilen verilerinin statik çözümlerine ait **Tablo 7.16**'daki değerler incelendiğinde, sağa bileşeninde 0.065 m STD ve 0.117 m KOH; yukarı bileşeninde 0.071 m STD ve 1.359 m KOH değerleriyle Test-3 konumunda akıllı mobil cihazlarla gerçekleştirilen gözlemlerde sapmaların arttığı görülmüştür. T2 cihazı, Test-3 konumunda T1 cihazının çözümlerine kıyasla daha yüksek sapmalar göstermiştir. **Şekil 7.55**'te T23 gözlemlerinin zaman serisi grafiği incelendiğinde, dE sapmalarının -0.262 ile 0.067 m arasında yayıldığını; dN sapmaları 0.728 ile 1.564 m

aralığında geniş bir yayılım göstermiştir. Düşey bileşende ise 0.532 ile 1.063 m arasında sapmalarla T21 ve T22 çözümlerine kıyasla daha iyi bir hassasiyet elde edilmiştir. **Şekil 7.51**'deki CAD gösteriminde, T2 cihazının T23 noktasındaki gerçek konumu ile statik çözüm noktalarına ait orijin koordinatı arasındaki yatay sapmanın 1.36 m olması, metre düzeyinde hassasiyet sağladığı görülmüştür. Düşeyde ise Test-3 konumunda metre altı düzeyde hassasiyet sağlayabilmiştir. Bu bulgular, baz istasyonu olarak CHC alıcısına ait verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen T23 noktasının statik çözümlerinin, yatay yönde PPP-Statik çözümlerine yakın konumlandırma performansı sağlarken, düşeyde çok daha iyi sonuç göstermiştir. Ancak, T23 verilerinin statik çözümleri T21 ve T22 gözlemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında konumlandırma performansının düştüğü görülmüştür.



Şekil 7.55: T23 gözlemlerine ait statik çözümlerin zaman serisi.

Test-1, Test-2 ve Test-3 konumlarında hassas GNSS alıcıları ve akıllı mobil cihazlar kullanılarak gerçekleştirilen gözlemlerden elde edilen ham GNSS verileri, RTKLIB yazılımı aracılığıyla Statik ve PPP-Statik yöntemlerle, CODE analiz merkezinin düzeltme ürünleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, hem profesyonel GNSS alıcılarının hem de akıllı mobil cihazların statik çözüm yöntemiyle, PPP-Statik çözüme kıyasla daha yüksek doğrulukta konumlandırma performansı sergilediği belirlenmiştir.

8. SONUÇLAR

GNSS alıcıları ile akıllı mobil cihazların konum belirleme performanslarının incelenmesi üzerine gerçekleştirilen bu tez çalışması kapsamında, CHC I80 ve Trimble MB-2 OEM GNSS alıcıları ile Xiaomi 11T Pro (128 GB ve 256 GB modelleri) akıllı mobil cihazlarının konum belirleme performansları, RTKLIB yazılımında statik ve PPP Statik çözüm yöntemleri kullanılarak kapsamlı ve detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı; farklı GNSS analiz merkezlerinden (CODE, GFZ, GRG, IGS ve JAX) sağlanan düzeltme ürünlerinin, PPP-Statik yöntemiyle gerçekleştirilen çözümlerin konumlandırma performansları üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve yüksek doğruluk gerektiren GNSS uygulamaları için en uygun düzeltme ürünlerini sağlayan analiz merkezini belirleyerek, bu analiz merkezine ait düzeltme ürünleriyle farklı cihaz türlerinin konumlandırma performansını ayrıntılı olarak incelemektir. Bu doğrultuda, belirlenen analiz merkezinin düzeltme ürünleri ile statik ve PPP statik yöntemleri profesyonel GNSS alıcılarının yanı sıra, günümüzde yaygın olarak kullanılan akıllı mobil cihazlara da uygulanarak konumlandırma performansları detaylı olarak incelenmiştir. Bu sayede farklı tipteki cihazların performansları, çeşitli çözüm yöntemleri ve düzeltme teknikleriyle karşılaştırılarak uygulama alanlarına yönelik önemli bulgular elde edilmiştir. Böylece, çalışmada gerçekleştirilen analizlerin GNSS tabanlı konumlandırma çalışmalarında kullanılan düzeltme ürünleri ve çözüm yöntemlerinin seçiminde yol gösterici olacak bulguların elde edilmesi hedeflenmiştir.

Analiz merkezleri tarafından sağlanan düzeltme ürünlerinin GNSS gözlem verileri üzerindeki değerlendirmelerinde, özellikle yüksek hassasiyetli konumlandırma uygulamaları için kritik bir öneme sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan kapsamlı analizlerde, GFZ, GRG ve CODE analiz merkezlerinin ürünleri kullanıldığında, neredeyse milimetre düzeyinde farklarla konumlandırma performansları elde edilmiştir. Bu analiz merkezlerinin ürünleri, özellikle yatay doğruluk açısından yüksek tutarlılık ve kararlılık sunarken, düşey doğruluk açısından da diğer analiz merkezlerine göre daha düşük ve kararlı sapmalar sergileyerek güvenilir sonuçlar sağlamıştır. Farklı analiz merkezlerine ait ürünlerin karşılaştırılmasının temel amacı, en doğru ve güvenilir düzeltme verileri sağlayan analiz merkezinin belirlenerek, yüksek hassasiyet gerektiren GNSS uygulamalarında kullanılacak ürünlerin seçiminde yol gösterici

olmaktır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, analiz merkezlerinin sağladığı düzeltme ürünlerinin seçiminde dikkatli olunmasının ve uygulama amacına göre en doğru kombinasyonun kullanılmasının gerekliliği açıkça belirlenmiştir. Bu bağlamda, tez çalışmasının bulguları, GNSS analiz merkezleri arasından GFZ, GRG ve CODE ürünlerinin, yüksek hassasiyetli konumlandırma için en uygun seçenek olduğunu göstermiş ve diğer analizlerde CODE ürünlerinin kullanılması tercih edilerek işlemlerin gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

PPP Statik değerlendirmelerinde kullanılan tam sayı faz belirsizliği çözüm teknikleri olan PPP-AR ve FIXHOLD yöntemleri, tez kapsamında ayrıntılı olarak karşılaştırılmış ve bu tekniklerin cihazların konumlandırma doğruluğu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, PPP-AR yönteminin taşıyıcı faz ölçümlerinde bulunan tamsayı belirsizliğini etkin biçimde çözerek hem yatay hem de düşey konumlandırma doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. PPP-AR uygulamasında, belirsizliğin ortadan kaldırılması sayesinde analizlerde daha düşük sapmalar ve yüksek tutarlılık elde edilmiştir. Buna karşılık, FIXHOLD yöntemi ise, tamsayı faz belirsizliğinin çözümünde tam anlamıyla kalıcı bir doğruluk sağlamamakta; bazı gözlem dönemlerinde daha geniş dağılım ve daha yüksek hata değerleriyle sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak, yüksek doğruluk gerektiren GNSS konumlandırma uygulamalarında PPP-AR çözümünün FIXHOLD yöntemine göre açıkça üstün olduğu ve tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

RTKLIB yazılımıyla gerçekleştirilen bu analizlerde, uydu sinyallerine etki eden atmosferik hataları en aza indirmek için iyonosfer düzeltme yöntemleri arasından Iono-Free LC ve Estimate TEC çözümleri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. PPP-Statik olarak gerçekleştirilen çözümlerde, Iono-Free LC yöntemi, farklı frekanslardaki GNSS sinyallerinin lineer kombinasyonunu kullanarak iyonosferik gecikme etkilerini büyük oranda ortadan kaldırmış ve bu sayede hem yatay hem de düşey konumlandırma doğruluğunda belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Özellikle, yüksek doğruluk gerektiren profesyonel GNSS uygulamalarında Iono-Free LC yönteminin analizlerin hassasiyetini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Estimate TEC yaklaşımı ise, toplam elektronik içerik değerlerini modelleyerek iyonosferik gecikmenin dinamik olarak düzeltilmesini mümkün kılmış ve pek çok durumda Iono-Free LC yöntemine yakın doğruluk seviyelerine ulaşmıştır. Bununla birlikte hem Iono-Free LC hem de Estimate TEC yöntemlerinin PPP-Statik ile gerçekleştirilen GNSS gözlemlerinde

iyonosfer etkilerini minimize etmede etkin ve güvenilir çözümler sunduğu tespit edilmiştir. Özellikle bu yöntemlerin, PPP-AR ile kullanılması halinde analizlerde minimum sapma ve maksimum tutarlılık sağladığı görülmüştür.

Ölçüm cihazlarına ait statik ve PPP-Statik çözüm yöntemleriyle gerçekleştirilen analizler hem profesyonel GNSS alıcılarının hem de akıllı mobil cihazların konumlandırma doğruluğu ve hassasiyetini çok yönlü olarak ortaya koymuştur. Analizler sonucunda, Profesyonel GNSS alıcıları, PPP-Statik yöntemi ile yapılan analizlerde yatay düzlemde oldukça yüksek doğruluk sağlamıştır. Özellikle CHC I80 ve Trimble MB-2 OEM cihazlarının, farklı test konumlarında yapılan ölçümlerde referans koordinatlara olan yatay ve düşey yöndeki sapmaları santimetre düzeyinde kalmış ve oldukça düşük STD değerleriyle gerçekleşmiştir.

Akıllı mobil cihazların PPP-Statik analiz sonuçları incelendiğinde, ölçüm anındaki gerçek koordinatlarına göre kıyaslandığında yatay düzlemde elde edilen sapmalar, test noktalarının büyük bölümünde 2 metreyi aşan değerlerle kendini göstermiştir. Yalnızca Test-3 konumunda gerçekleştirilen gözlemlerde 2 metrenin altında sonuçlar elde edilmiştir. Analizler sonucunda, Xiaomi 11T Pro (128 ve 256 GB) akıllı mobil cihazlarının, profesyonel GNSS alıcılarına kıyasla anlamlı derecede daha yüksek yatay hata değerleri ürettiği ve bu hataların, cihazların farklı kurulum noktalarında önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Düşey doğruluk açısından ise, akıllı mobil cihazların performansı, yatay eksene kıyasla çok daha tutarsız ve kararsız bir yapı göstermiştir. Özellikle T1 cihazı, test noktalarının çoğunda T2 modele göre daha yüksek hata değerleri üretmiş ve cihaz içi donanım farklılıklarının konumlandırma performansına etki edebileceği düşünülmüştür.

Statik çözüm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen değerlendirmelerde, baz istasyonu verisi olarak profesyonel GNSS alıcılarının kullanılması sayesinde, tüm cihazlarda anlamlı doğruluk artışları elde edilmiştir. Özellikle profesyonel GNSS alıcıları, statik çözüm yöntemi ile yapılan analizlerde hem yatay hem de düşey doğruluk açısından son derece tutarlı ve güvenilir sonuçlar vermiştir. CHC I80 ve Trimble OEM cihazlarının statik çözümlerine ait değerler ile gerçek koordinatlar arasındaki yatay sapmalar, santimetre ve altı düzeyde hassasiyet göstermiştir. Akıllı mobil cihazlarla statik çözüm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizler neticesinde, konumlandırma performansında dikkat çekici bir iyileşme sağlanmıştır. Akıllı mobil cihazların PPP-Statik çözümlerinde birkaç metreyi aşan yatay sapmalara kıyasla, statik

özüm yönteminde önemli ölçüde iyileşmeler görölerek düşük sapmalar elde edilmiştir. T1 ve T2 cihazlarıyla Test-1, Test-2 ve Test-3 konumlarında gerçekleştirilen analizlerde, T1 cihazı sırasıyla 0.68, 0.39 ve 1.07 m; T2 cihazı ise 0.89, 0.27 ve 1.36 m yatay sapmalar göstererek çoğunlukla metre altı düzeyde hassasiyetle konumlandırma performansı sağlanmıştır. Akıllı mobil cihazların düşey konumlandırma performansı incelendiğinde, PPP-Statik yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde birkaç metreyi bulan yüksek hata değerleri elde edilmiştir. Statik özüm yöntemi kullanıldığında ise, T1 cihazı için metre altı seviyesinde sonuçlara ulaşılmış, T2 cihazı için ise PPP-Statik yöntemine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen metre altı hassasiyet sağlanamamıştır. Bu analizler sonucunda, özellikle akıllı mobil cihazlarla konum belirleme süreçlerinde, statik çözüm yönteminin PPP-Statik yaklaşıma kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığı ortaya konmuştur.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında ham GNSS verileriyle gerçekleştirilen konumlandırma performansı analizleri, kullanılan düzeltme ürünleri ile tercih edilen çözüm yöntemlerinin konum doğruluğu üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, yüksek hassasiyetli konumlandırma uygulamalarında yöntem ve veri seçiminin ne denli kritik olduğunu açıkça göstermektedir. Yapılan değerlendirmeler, uygun düzeltme ürünleri ve çözüm yöntemleri ile analiz edildiğinde, akıllı mobil cihazların temel düzey GNSS uygulamalarında belirli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur. Ancak elde edilen bulgular, bu cihazların hassas konumlandırma gerektiren profesyonel uygulamalar için henüz yeterli doğruluk seviyesine ulaşamadığını da açıkça göstermektedir. Bu tez alışması, GNSS tabanlı konum belirlemede yüksek doğruluk ve güvenilirlik gerektiren alanlarda profesyonel GNSS alıcılarının önemini bir kez daha vurgularken, aynı zamanda teknolojik gelişmelerin devam etmesiyle birlikte, akıllı mobil cihazların belirli koşullarda uygun maliyetli alternatifler olarak değerlendirilebileceğine işaret etmektedir. Gelişen yazılım, donanım ve sinyal işleme teknolojileri sayesinde, gelecekte bu cihazların konumlandırma doğruluğunda daha yüksek başarı sağlayarak çok daha geniş bir uygulama yelpazesinde yer alması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdallah A. T. M., (2016), “Precise Point Positioning for Kinematic Applications to Improve Hydrographic Survey”, Doktora Tezi, Universität Stuttgart. <https://doi.org/10.18419/opus-9026>.
- Adams P. M., Ashwell G. W. B., Baxter R., (2003). Location-based services—an overview of the standards. *BT Technology Journal*, 21 (1), 34–43. <https://doi.org/10.1023/A:1022572210026>.
- Aggrey J., Bisnath S., Naciri N., Shinghal G., Yang S., (2019), “Use of PPP processing for next-generation smartphone GNSS chips: Key benefits and challenges”, 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), 3862–3878, Miami, FL, USA, September. <https://doi.org/10.33012/2019.17073>.
- Agrotis L., Schönemann E., Enderle W., Caissy M., Rülke A., (2017), “The IGS Real Time Service”, DVW Seminar GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft, 121–131, Potsdam, Almany, 21–22 Februar.
- Alkan R. M., Ilci V., Ozulu I. M., (2016), “Web-based GNSS data processing services as an alternative to conventional processing technique”, *FIG Working Week*, 1–35, Christchurch, New Zealand, 2–6 May.
- Angrisano A., Gaglione S., Gioia C., Massaro M., Robustelli U., (2013). Assessment of NeQuick ionospheric model for Galileo single-frequency users. *Acta Geophysica*, 61(6), 1457–1476. <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0116-2>.
- Babaoğlu T. Ş., Baltacı İ. T., Pehlivan H., (2021). Development of a location-based mobile application for smartphones using open-source technologies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 79–82. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W5-2021-79-2021>.
- Bahadur B., Nohutcu M., (2018). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, 22(113), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0777-z>
- Banville, S., & Van Diggelen, F. (2016). Precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones. *GPS World*, 27(11), 43–48.
- Betz J. W., (2015), “Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: Global Navigation Satellite Systems, Signals, and Receivers”. IEEE Press, John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119141167>.
- Beutler G., Rothacher M., Schaer S., Springer T. A., Kouba J., Neilan R. E., (1999). The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth sciences. *Advances in Space Research*, 23 (4), 631–635. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00160-X).

Bhatta B., (2021), “Global Navigation Satellite Systems: New Technologies and Applications”, 2nd Edition, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003148753>.

Brimicombe A., Li C., (2009), “Location-Based Services and Geo-Information Engineering”, John Wiley & Sons.

Borre, K., Akos, D. M., Bertelsen, N., Rinder, P., & Jensen, S. H. (2007), “A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach”, Springer Science & Business Media.

Casademont J., López-Aguilera E., Paradells J., Rojas A., Calveras A., Barceló F., Cotrina J., (2004). Wireless technology applied to GIS. *Computers & Geosciences*, 30(6), 671–682. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.02.004>.

Chen, B., Gao, C., Liu, Y., Sun, P. (2019). Real-time precise point positioning with a Xiaomi MI 8 Android smartphone. *Sensors*, 19(12), 2835. <https://doi.org/10.3390/s19122835>.

Choy, S. (2009), “Investigation into the accuracy of single frequency precise point positioning (PPP)”, Doctoral dissertation, RMIT University.

Clarke K. C., (2001), “Cartography in a mobile internet age”, 20th International Cartographic Conference, 6-10, Santa Barbara, CA, USA, August.

Çolak M., (2019), “GPS Tarihçesi ve Çalışma Prensipleri”, Lisans Bitirme Tezi, Karabük Üniversitesi.

Collins, P. (2008), “Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities”, In Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, 720-732, San Diego, CA, 28-30 January.

Dabove, P., Di Pietra, V. (2019a). Towards high accuracy GNSS real-time positioning with smartphones. *Advances in Space Research*, 63(1), 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.025>.

Dabove, P., Di Pietra, V. (2019b). Single-baseline RTK positioning using dual-frequency GNSS receivers inside smartphones. *Sensors*, 19(19), 4302. <https://doi.org/10.3390/s19194302>.

Daneshmand, S., Broumandan, A., Sokhandan, N., Lachapelle, G. (2013). GNSS multipath mitigation with a moving antenna array. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 49(1), 693–698. <https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6404136>.

Dow, J. M., Neilan, R. E., Rizos, C. (2009). The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, 83 (3), 191–198. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3>.

El-Rabbany, A. (2002), “Introduction to GPS: The global positioning system”, Artech House.

Elsheikh, M., Iqbal, U., Noureldin, A., Korenberg, M. (2023). The implementation of precise point positioning (PPP): A comprehensive review. *Sensors*, 23(21), 8874. <https://doi.org/10.3390/s23218874>.

Elsobeiey M., El-Rabbany A., (2010), “Rigorous modelling of GPS residual errors for Precise Point Positioning”, Proceedings of the XXXVIIIth ISPRS Congress, 80-194, İstanbul, Turkey, 12-23 July.

European GNSS Agency, (2017), “Using GNSS Raw Measurements on Android Devices: Towards Better Location Performance in Mass Market Applications”, White Paper No: GSA-WP-Android-01, Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2878/449581>.

Farid, Z., Nordin, R., & Ismail, M. (2013). Recent advances in wireless indoor localization techniques and system. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013 (1), 185138. <https://doi.org/10.1155/2013/185138>.

Fouda, Y. E. S. (2004). Urban planning advanced analytic techniques and the human role: A challenge or a complement. *Alexandria Engineering Journal*, 43(6), 809-819.

Gao, Y., & Shen, X. (2002). A new method for carrier-phase-based precise point positioning. *Navigation*, 49(2), 109–116. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2002.tb00260.x>.

Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., & Liu, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7), 389–399. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4>.

Grinter, T., & Roberts, C. (2013), “Real time precise point positioning: Are we there yet?”, IGNS Symposium, Gold Coast, Qld, Australia, 16-18 July.

Guo, Q. (2015). Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation. *GPS solutions*, 19(4), 537-544. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0413-5>.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., (2007), “*GNSS Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*”, Springer Science & Business Media.

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

Huang H., Gartner G., Krisp J. M., Raubal M., Van de Weghe N., (2018). Location based services: Ongoing evolution and research agenda. *Journal of Location Based Services*, 12(2), 63–93. <https://doi.org/10.1080/17489725.2018.1508763>

Humphreys, T. E., Murrian, M., van Diggelen, F., Podshivalov, S., Pesyna, K. M. (2016), “On the feasibility of cm-accurate positioning via a smartphone’s antenna and

GNSS chip”, IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 232–242, Savannah, GA, USA, 11-14 April.
<https://doi.org/10.1109/PLANS.2016.7479707>.

Jiang B., Yao X., (2006). Location-based services and GIS in perspective. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6), 712–725.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2006.02.003>

Kahveci M., Karagöz H., Selbesoğlu M. O., (2011). Statik ve RTK GNSS ölçüm ve hesaplamalarının karşılaştırılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (104), 3-13.

Kahveci, M. ve Yıldız, F. (2017), “GNSS: Uydularla konum belirleme sistemleri: Teori ve uygulama”, 11. Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık.

Karadeniz, B., Pehlivan, H., Arı, B. (2023). Precise point positioning technique with single frequency raw GNSS observations using CNES and MADOCA real-time products on Android smartphones. *Engineering Applications*, 2(3), 225–234.

Kaplan E. D., Hegarty C. J., (2006), “Understanding GPS: Principles and Applications”, 2nd edition, Artech House.

Karaim, M., Elsheikh, M., Noureldin, A. (2018), “GNSS error sources”. In R. Rustamov, A. M. Hashimov, Editors, “Multifunctional operation and application of GPS”, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75493>.

Hof, J., Héroux, P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, 5(2), 12–28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.

Kouba J., (2003), “A guide to using International GPS Service (IGS) products”, Technical Report, Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Canada.

Langley, R. B. (2000). The evolution of the GPS receiver. *GPS World*, 11(4), 54–58.

Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J. P., Broca, P., Cerri, L. (2009). A real time PPP-AR implementation using undifferenced GPS phase observations. *Navigation*, 56(2), 135–145. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2009.tb01750.x>.

Lazović, V., Minić, N., & Tair, M. (2015), “Location-based applications for smartphones”, In Synthesis 2015 - International Scientific Conference of IT and Business-Related Research, 22-26, Belgrade, Singidunum University, Serbia.
<https://doi.org/10.15308/Synthesis-2015-22-26>.

Leick, A. (2004), “GPS satellite surveying”, 3rd edition, John Wiley & Sons.

Li B., Salter J., Dempster A. G., Rizos C., (2006), “Indoor positioning techniques based on wireless LAN”, First IEEE International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications, 113, Sydney, Australia, 13–16 March.

- Li, G., Geng, J. (2019). Characteristics of raw multi-GNSS measurement error from Google Android smart devices. *GPS Solutions*, 23(3), 90. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0885-4>.
- Liu, W., Shi, X., Zhu, F., Tao, X., Wang, F. (2019). Quality analysis of multi-GNSS raw observations and a velocity-aided positioning approach based on smartphones. *Advances in Space Research*, 63(8), 2358–2377. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.004>.
- Logsdon, J. M. (1995). The Navstar Global Positioning System: A case study in military-to-civilian technology transfer. *Acta Astronautica*, 37 (4-5), 389–398.
- Mader, G. L. (1999). GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*, 3(1), 50–58. <https://doi.org/10.1007/PL00012780>.
- Masiero, A., Guarnieri, A., Pirotti, F., Vettore, A. (2014). A particle filter for smartphone-based indoor pedestrian navigation. *Micromachines*, 5(4), 1012–1033. <https://doi.org/10.3390/mi5041012>.
- Misra, P., & Enge, P. (2012), “Global positioning system: Signals, measurements, and performance”, 2nd Edition, Ganga-Jamuna Press.
- Mutlu, İ., Kahveci, M. (2019). GNSS uydu dağılımının gerçek zamanlı kinematik GNSS ve ağ-RTK ölçülerindeki önemi. *Geomatik*, 4(3), 179–189. <https://doi.org/10.29128/geomatik.522343>.
- Netthonglang C., Thongtan T., Satirapod C., (2019), “GNSS precise positioning determinations using smartphones”, Proceedings of the 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), 401–404, Bangkok, Thailand, 11-14 November. <https://doi.org/10.1109/APCCAS47518.2019.8953132>.
- Onyıl, H. İ., Ulukavak, M. (2021). Açık kaynak kodlu yazılımlarla alternatif web tabanlı mobil mekânsal veri toplama arayüzü geliştirilmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 6(2), 111–120. <https://doi.org/10.46578/humder.892840>.
- Özdemir, S. (2014), “Analysis of GNSS time series obtained from Turkish National Permanent GNSS Stations Network-Active system using Hilbert-Huang transform”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Pace, S., Frost, G., Lachow, I., Frelinger, D., Fossum, D., Wassem, D. K., Pinto, M. (1995), “The global positioning system: Assessing national policies”, RAND Corporation.
- Parkinson, B. W., (1994). GPS Eyewitness: The Early Years. *GPS World*, 5(9), 32-38.
- Pehlivan, H., Karadeniz, B., Arı, B. (2023). Examination of the performance of precise point positioning technique with real-time products on smartphones. *Advanced Geomatics*, 3(1), 33–39.

Pırtı, A., Hoşbaş, R. G., Şenel, B., Köroğlu, M., Bilim, S. (2021). Galileo uydu sistemi ve sinyal yapısı. *Geomatik*, 6(3), 207-216. <https://doi.org/10.29128/geomatik.750469>.

Polischuk, G. M., Kozlov, V. I., Ilitchov, V. V., Kozlov, A. G., Bartenev, V. A., Kossenko, V. E., Anphimov, N. A., Revnivikh, S. G., Pisarev, S. B., Tyulyakov, A. E., Shebshaevitch, B. V., Basevitch, A. B., Vorokhovsky, Y. L. (2002), "The global navigation satellite system GLONASS: Development and usage in the 21st century". Proceedings of the 34th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 151-160, Reston, Virginia, 3-5 December.

Resch, B., Romirer-Maierhofer, P. (2005), "Global Positioning in Harsh Environments", Master's thesis, Halmstad University.

Pesyna, K. M., Heath, R. W., Humphreys, T. E. (2014), "Centimeter Positioning with a Smartphone-Quality GNSS Antenna", Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), 1568-1577, Tampa, FL, USA, 8-12 September. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=12308>.

Pontikakos, C., Glezakos, T., Tsiligiridis, T. (2005), "Location-based services: Architecture overview", In Proceedings of the International Congress on Information Technology in Agriculture, Food and Environment (ITAFE'05), Informatics Laboratory, Agricultural University of Athens, Greece.

Raper, J., Gartner, G., Karimi, H., Rizos, C. (2007). A critical evaluation of location based services and their potential. *Journal of Location Based Services*, 1(1), 5-45. <https://doi.org/10.1080/17489720701584069>.

Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C., Grinter, T. (2012), "Precise point positioning: Is the era of differential GNSS positioning drawing to an end?", Paper presented at the FIG Working Week 2012, 1-17, Rome, Italy, 6-10 May.

Robustelli, U., Baiocchi, V., Pugliano, G. (2019). Assessment of dual frequency GNSS observations from a Xiaomi Mi 8 Android smartphone and positioning performance analysis. *Electronics*, 8(1), 91. <https://doi.org/10.3390/electronics8010091>.

Rummel, R., Peters, T. (2001), "Reference systems in satellite geodesy", Technische Universität München, Deutschland.

Santerre R., (1991). Impact Of GPS Satellite Sky Distribution. *Manuscripta Geodaetica*, 16 (1), 28-53. <https://doi.org/10.1007/BF03655285>.

Seeber, G. (2003), "Satellite geodesy: Foundations, methods, and applications", 2nd Edition, Walter de Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110200089>.

Tabar, M. E., Şişman, Y. (2023), "Comparison of web based online GNSS data evaluation services", In Proceedings of the 6th Intercontinental Geoinformation Days, 216-219, Baku, Azerbaijan, 13-14 June.

Tatar, C. Ö., Yılmaz, E., Efe, A., Sönmez, B., Özdemir, Y., Danişan, B., Beyaz, H. İ., Yegnideir, E. (2024). Mobil haritalama amaçlı MobileNet tabanlı trafik işaretleri

tespit sistemi: Kitlemel coğrafi bilgi toplama sistemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(4), 2305–2315.
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1249165>.

Teunissen, P. J. G., Montenbruck, O., (2017), “Springer handbook of global navigation satellite systems”, 1st Edition, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>.

Yalçın, B., İnal, C., & Kalaycı, İ. (2008). GPS ölçü süresinin nokta konum doğruluğu ile ilişkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 19–26.

Zandbergen, P. A. (2009). Accuracy of iPhone locations: A comparison of assisted GPS, WiFi and cellular positioning. *Transactions in GIS*, 13(s1), 5–25.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01152.x>.

Zangenehnejad, F., Gao, Y. (2021). GNSS smartphones positioning: Advances, challenges, opportunities, and future perspectives. *Satellite Navigation*, 2(24).
<https://doi.org/10.1186/s43020-021-00054-y>.

Zhang, X., Tao, X., Zhu, F., Shi, X., Wang, F. (2018). Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. *GPS Solutions*, 22(3), 70.
<https://doi.org/10.1007/s10291-018-0736-8>.

Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017.
<https://doi.org/10.1029/96JB03860>.

Xie, W., Huang, G., Cui, B., Li, P., Cao, Y., Wang, H., Chen, Z., Shao, B. (2019). Characteristics and performance evaluation of QZSS onboard satellite clocks. *Sensors*, 19(23), 5147. <https://doi.org/10.3390/s19235147>.

Xu, C., Wang, J., Gao, J., Wang, J., Hu, H. (2011). Precise point positioning and its application in mining deformation monitoring. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(3), 499–505. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61632-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61632-X).

Wang S., Min J., Yi B. K., (2008), “Location based services for mobiles: Technologies and standards”, IEEE International Conference on Communication (ICC), Vol. 19, Piscataway, NJ, USA, May.

Witchayangkoon, B. (2000), “Elements of GPS precise point positioning”, Doctoral dissertation, University of Maine Graduate School.

Wu, Q., Sun, M., Zhou, C., Zhang, P. (2019). Precise point positioning using dual-frequency GNSS observations on smartphone. *Sensors*, 19(9), 2189.
<https://doi.org/10.3390/s19092189>.

Web 1, (2024), <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/rtp>, (Erişim Tarihi: 15/06/2024).

- Web 2, (2025), <https://www.gps.gov>, (Erişim Tarihi: 20/01/2025).
- Web 3, (2025), <https://www.navcen.uscg.gov>, (Erişim Tarihi: 20/01/2025).
- Web 4, (2025), <https://www.e-education.psu.edu/geog862>, (Erişim Tarihi: 11/01/2025).
- Web 5, (2025), https://glonass-iac.ru/en/about_glonass, (Erişim Tarihi: 11/01/2025).
- Web 6, (2025), https://www.esa.int/Applications/Satellite_navigation/Galileo, (Erişim Tarihi: 11/01/2025).
- Web 7, (2025), <https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>, (Erişim Tarihi: 01/02/2025).
- Web 8, (2025), <https://www.reuters.com/world/china/china-test-new-gen-beidou-network-rivalling-gps-2027-2024-11-28>, (Erişim Tarihi: 20/02/2025).
- Web 9, (2025), https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_Signal_Plan, (Erişim Tarihi: 20/02/2025).
- Web 10, (2025), <https://qzss.go.jp/en>, (Erişim Tarihi: 05/03/2025).
- Web 11, (2025), <https://igs.org/>, (Erişim Tarihi: 10/03/2025).
- Web 12, (2025), <https://igs.org/rtts>, (Erişim Tarihi: 21/04/2025).
- Web 13, (2025), <https://gge.ext.unb.ca/Resources/PPP/index.htm>, (Erişim Tarihi: 21/04/2025).
- Web 14, (2025), <https://www.rtklib.com>, (Erişim Tarihi: 21/04/2025).
- Web 15, (2025), <https://www.swiftnav.com/resources>, (Erişim Tarihi: 22/04/2025).

ÖZGEÇMİŞ

Barışcan ARI, ilkokul, ortaokul ve lise eğitimlerini Samsun'da tamamlayarak, 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimi süresince gösterdiği akademik başarı sonucunda 2020 yılında dereceyle mezun oldu. Lisans bitirme projesinde "Düşük Maliyetli İHA ile Küçük Çalışma Alanlarında 3B Bilgi Çıkarımı " üzerine çalışarak, uzaktan algılama ve fotogrametri alanına olan akademik bilgisini geliştirdi. Akademik bilgisini daha ileri seviyeye taşımak isteyen ARI, 2021 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri programında yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi kapsamında akıllı mobil cihazların konumlandırma performansı üzerine çalışmalar yaptı. Gelecek hedefleri arasında, akıllı mobil cihazların konumlandırma performanslarının iyileştirilmesi ve akıllı şehir uygulamalarında kullanımı üzerine Ar-Ge projelerinde yer almak ve doktora çalışmalarıyla uzmanlığını uluslararası düzeye taşımak bulunmaktadır.

TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Pehlivan H., Karadeniz B., Arı B. (2022), “Near-Real-Time Precise Point Positioning Technique with Single-Frequency Raw GNSS Observations on Android Smartphones”, 5th Intercontinental Geoinformation Days (IGD'2022), 82-85, New Delhi, India, 14-15 December.

Pehlivan, H., Bayata, H. F., Bilgili, E., Karadeniz, B., Arı, B. (2023), “Analysis of GNSS data quality and PPP positioning performance in navigation application of dual-frequency smartphone”, Paper presented at ASES II: International Conference of Applied Sciences, 40-48, Giresun, Türkiye, 28-30 April.

Karadeniz B., Pehlivan H., Arı B. (2023), “Precise Point Positioning Technique with Single Frequency Raw GNSS Observations Using Different Products on Android Smartphones”, 6th Advanced Engineering Days (AED'2023), 61-63, Mersin, Türkiye, 4-5 March.

Karadeniz, B., Pehlivan, H., Arı, B. (2023). Precise point positioning technique with single frequency raw GNSS observations using CNES and MADOCA real-time products on Android smartphones. *Engineering Applications*, 2(3), 225–234.

Pehlivan, H., Karadeniz, B., Arı, B. (2023). Examination of the performance of precise point positioning technique with real-time products on smartphones. *Advanced Geomatics*, 3(1), 33–39.

EKLER

Ek A1: CDDIS Sitesi Üzerinden GNSS Düzeltme Ürünlerinin Otomatik İndirilmesi

```
import os
import re
import time
from datetime import datetime
from selenium import webdriver
from selenium.webdriver.firefox.service import Service
from selenium.webdriver.firefox.options import Options
from selenium.webdriver.common.by import By
import requests
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog, messagebox, ttk
import threading
from cryptography.fernet import Fernet, InvalidToken

class DownloadApp:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("GNSS Veri İndirme Otomasyonu")
        self.root.geometry("400x400")
        self.cancel_download = False
        self.pause_download = False # Duraklatma bayrağı
        tk.Label(root, text="Earthdata Kullanıcı Adı:").pack()
        self.username_entry = tk.Entry(root, width=30)
        self.username_entry.pack()
        tk.Label(root, text="Earthdata Şifre:").pack()
        self.password_entry = tk.Entry(root, show="*", width=30)
        self.password_entry.pack()
        self.save_credentials_var = tk.BooleanVar()
        self.save_credentials_checkbox = tk.Checkbutton(
            root, text="Kimlik bilgilerini kaydet", variable=self.save_credentials_var)
        self.save_credentials_checkbox.pack()
        tk.Button(root, text="RINEX Dosyasını Seçin",
            command=self.select_rinex_file).pack(pady=5)
        tk.Button(root, text="İndirme Klasörünü Seçin",
            command=self.select_download_folder).pack(pady=5)
        self.progress = ttk.Progressbar(root, orient='horizontal', length=300,
            mode='determinate')
        self.progress.pack(pady=10)
        self.status_label = tk.Label(root, text="") # İndirme durumu için etiket
        self.status_label.pack()
        tk.Button(root, text="İndirmeyi Başlat",
            command=self.start_download_thread).pack(pady=5)
        tk.Button(root, text="İptal Et",
            command=self.cancel_download_process).pack(pady=5) # İptal butonu
```

```

        tk.Button(root, text="Duraklat",
command=self.pause_download_process).pack(pady=5) # Duraklatma butonu
        tk.Button(root, text="Devam Et",
command=self.resume_download_process).pack(pady=5) # Devam etme butonu
        self.rinex_file_path = None
        self.download_folder_path = None
        # Kimlik bilgilerini yükle
        self.load_credentials()
    def cancel_download_process(self):
        self.cancel_download = True # İptal bayrağını aktif hale getir
        messagebox.showinfo("İptal Edildi", "İndirme işlemi iptal edildi.") # İptal
durumunu bildirme
        self.root.destroy() # Tkinter ana penceresini kapat
    def pause_download_process(self):
        self.pause_download = True # Duraklatma bayrağını aktif hale getir
        self.status_label.config(text="İndirme duraklatıldı...")
    def resume_download_process(self):
        self.pause_download = False # Duraklatma bayrağını kaldır
        self.status_label.config(text="İndirme devam ediyor...")
    def select_rinex_file(self):
        file_path = filedialog.askopenfilename(
            title="RINEX Dosyasını Seçin",
            filetypes=[("RINEX Files", "*.23O *.rnx *.obs"), ("All Files", "*.*)])
        self.rinex_file_path = file_path
    def select_download_folder(self):
        folder_path = filedialog.askdirectory(title="İndirme Klasörünü Seçin")
        self.download_folder_path = folder_path
    def start_download_thread(self):
        self.cancel_download = False # İptal bayrağını sıfırla
        self.pause_download = False # Duraklatma bayrağını sıfırla
        download_thread = threading.Thread(target=self.start_download)
        download_thread.start()
    def load_credentials(self):
        try:
            if os.path.exists("secret.key") and os.path.exists("credentials.enc"):
                with open("secret.key", "rb") as key_file:
                    key = key_file.read()
                    cipher = Fernet(key)
                with open("credentials.enc", "rb") as file:
                    encrypted_credentials = file.read()
                    credentials = cipher.decrypt(encrypted_credentials).decode().split("\n")
                    if len(credentials) >= 2:
                        username = credentials[0]
                        password = credentials[1]
                        self.username_entry.insert(0, username)
                        self.password_entry.insert(0, password)
                        self.save_credentials_var.set(True)
            except (FileNotFoundError, InvalidToken):
                messagebox.showerror("Hata", "Kimlik bilgileri çözülemedi. Lütfen
bilgilerinizi yeniden girin.")

```

```

        if os.path.exists("secret.key"):
            os.remove("secret.key")
        if os.path.exists("credentials.enc"):
            os.remove("credentials.enc")
    def save_credentials(self, username, password):
        if not os.path.exists("secret.key"):
            key = Fernet.generate_key()
            with open("secret.key", "wb") as key_file:
                key_file.write(key)
        else:
            with open("secret.key", "rb") as key_file:
                key = key_file.read()
        cipher = Fernet(key)
        credentials = f'{username}\n{password}'.encode()
        encrypted_credentials = cipher.encrypt(credentials)
        with open("credentials.enc", "wb") as file:
            file.write(encrypted_credentials)
    def start_download(self):
        username = self.username_entry.get()
        password = self.password_entry.get()
        obs_file_path = self.rinex_file_path
        download_path = self.download_folder_path
        if not username or not password:
            messagebox.showerror("Hata", "Kullanıcı adı veya şifre girilmedi.")
            return
        if not obs_file_path:
            messagebox.showerror("Hata", "RINEX dosyası seçilmedi.")
            return
        if not download_path:
            messagebox.showerror("Hata", "İndirme klasörü seçilmedi.")
            return
        if self.save_credentials_var.get():
            self.save_credentials(username, password)
        year, month, day, _, _, _ = self.extract_rinex_time_info(obs_file_path)
        julian_day = self.get_julian_day(year, month, day)
        gps_week = (datetime(year, month, day) - datetime(1980, 1, 6)).days // 7
        year_short = str(year)[-2:]
        base_url = f"https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/{gps_week:04d}/"
        dcb_url = f"https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/mgex/dcb/{year}/"
        troposphere_url =
f"https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere/zpd/{year}/{julian_day:0
3d}/"
        nav_url =
f"https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/{year}/{julian_day:03d}/{year_short
}p/"
        driver = self.setup_firefox_driver()
        driver.get("https://urs.earthdata.nasa.gov/")
        time.sleep(3)
        driver.find_element(By.ID, "username").send_keys(username)
        driver.find_element(By.ID, "password").send_keys(password)

```

```

driver.find_element(By.NAME, "commit").click()
time.sleep(10)
if self.cancel_download:
    driver.quit()
    return
driver.get(base_url)
time.sleep(10)
file_list = self.get_file_list(driver, base_url)
driver.get(dcb_url)
time.sleep(10)
dcb_file_list = self.get_file_list(driver, dcb_url)
driver.get(troposphere_url)
time.sleep(10)
troposphere_file_list = self.get_file_list(driver, troposphere_url)
driver.get(nav_url)
time.sleep(10)
nav_file_list = self.get_file_list(driver, nav_url)
analysis_centers = ['COD', 'IGS', 'WUM', 'GRG', "GFZ"]
file_types = ['ORB.SP3.gz', 'ERP.ERP.gz', 'CLK.CLK.gz']
    regex_patterns = [
        rf'{center}.*{year} {julian_day:03d}\d{{4}}.*{file_type}'
        for center in analysis_centers for file_type in file_types]
matching_files = []
for pattern in regex_patterns:
    regex = re.compile(pattern)
    matching_files.extend([file for file in file_list if regex.search(file)])
dcb_regex_pattern = rf'{year} {julian_day:03d}.*DCB\BIA\.gz$'
dcb_regex = re.compile(dcb_regex_pattern)
dcb_matching_files = [file for file in dcb_file_list if dcb_regex.search(file)]
matching_files.extend(dcb_matching_files)
self.progress['maximum'] = len(matching_files)
cookies = driver.get_cookies()
session = requests.Session()
for cookie in cookies:
    session.cookies.set(cookie['name'], cookie['value'])
for file_url in matching_files:
    if self.cancel_download:
        driver.quit()
        return
    center_code = self.extract_center_code(file_url)
    sub_folder_name = self.extract_subfolder_name(file_url)
    # Dosya türüne göre klasör oluşturma
    if sub_folder_name:
        center_folder = os.path.join(download_path, center_code,
sub_folder_name)
        os.makedirs(center_folder, exist_ok=True)
    else:
        center_folder = os.path.join(download_path, center_code)
        os.makedirs(center_folder, exist_ok=True)

```

```

        self.status_label.config(text=f"İndiriliyor: {file_url.split('/')[-1]}")
        self.download_file_with_progress(session, file_url, center_folder)
        self.progress['value'] += 1
        self.root.update_idletasks()
    driver.quit()
    messagebox.showinfo("Tamamlandı", "İndirme işlemi tamamlandı!")
def download_file_with_progress(self, session, file_url, download_folder):
    local_filename = os.path.join(download_folder, file_url.split('/')[-1])
    if os.path.exists(local_filename):
        print(f'{file_url.split('/')[-1]} zaten mevcut, atlanıyor.")
        return False
    with session.get(file_url, stream=True) as r:
        r.raise_for_status()
        total_size = int(r.headers.get('Content-Length', 0))
        block_size = 8192 # 8 KB
        downloaded_size = 0
        self.progress['maximum'] = total_size # İlerleme çubuğu için toplam boyut
        with open(local_filename, 'wb') as f:
            for chunk in r.iter_content(chunk_size=block_size):
                if self.cancel_download:
                    return False
                while self.pause_download:
                    time.sleep(0.1)
                f.write(chunk)
                downloaded_size += len(chunk)
                self.progress['value'] = downloaded_size
                self.root.update_idletasks()
        return True
def extract_center_code(self, file_url):
    for center in ['COD', 'IGS', 'WUM', 'GRG', "GFZ"]:
        if center in file_url:
            return center
    return "Diğer"
def extract_subfolder_name(self, file_url):
    match = re.search(r'[A-Z]{3}0[A-Z]{3}([A-Z]{3})_', file_url)
    return match.group(1) if match else None
def extract_rinex_time_info(self, obs_file_path):
    with open(obs_file_path, 'r') as file:
        for line in file:
            if 'TIME OF FIRST OBS' in line or '>' in line:
                parts = line.split()
                offset = 0 if 'TIME OF FIRST OBS' in line else 1
                year = int(parts[0 + offset])
                month = int(parts[1 + offset])
                day = int(parts[2 + offset])
                hour = int(parts[3 + offset])
                minute = int(parts[4 + offset])
                second = float(parts[5 + offset])
                return year, month, day, hour, minute, second
    raise ValueError("TIME OF FIRST OBS not found in RINEX file")

```

```

def get_julian_day(self, year, month, day):
    return datetime(year, month, day).timetuple().tm_yday
def setup_firefox_driver(self):
    options = Options()
    options.headless = True
    service = Service(executable_path="C:/Users/Barişcan
ARI/AppData/Local/Programs/Python/Python313/geckodriver.exe")
    driver = webdriver.Firefox(service=service, options=options)
    return driver
def get_file_list(self, driver, base_url):
    driver.get(base_url)
    time.sleep(10)
    elements = driver.find_elements(By.XPATH, "//a[@href]")
    return [element.get_attribute("href") for element in elements if '.gz' in
element.get_attribute("href")]
if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = DownloadApp(root)
    root.mainloop()

```

Ek A2: RTKLIB Çıktı Dosyasının Koordinat Dönüşümü

```

import pandas as pd
from tkinter import Tk, filedialog
from pyproj import CRS, Transformer
from openpyxl import load_workbook
from openpyxl.utils import get_column_letter
import chardet
import xlwt
import os
def detect_encoding(file_path):
    with open(file_path, 'rb') as f:
        result = chardet.detect(f.read())
    return result['encoding']
def convert_file_to_excel():
    print("RTKLIB Sonucundaki POS Veri Dosyasını Seçin...")
    input_file_path = filedialog.askopenfilename(title="RTKLIB Sonucundaki POS
Veri Dosyasını Seçin...")
    if not input_file_path:
        print("POS dosyası seçilmedi. İşlem iptal edildi.")
        return None, None
    print("Çıktı Excel formatındaki POS dosyasını kaydetmek için bir yer seçin...")
    output_file_path = filedialog.asksaveasfilename(title="ÇIKTI POS Excel Veri
Dosyasını Kaydedileceği Yeri Seçin...", defaultextension=".xlsx",
filetypes=[("Excel Files", "*.xlsx")])
    if not output_file_path:
        print("Çıkış dosyası seçilmedi. İşlem iptal edildi.")
        return None, None
    encoding = detect_encoding(input_file_path)

```

```

print(f'Algılanan karakter kodlaması: {encoding}')
with open(input_file_path, 'r', encoding=encoding) as file:
    data = file.readlines()
    data = [line.strip().split() for line in data if line.strip()]
    max_columns = max(len(row) for row in data)
    df = pd.DataFrame(data, columns=[f'Column_{i+1}' for i in
range(max_columns)])
    df.to_excel(output_file_path, index=False, engine='openpyxl')
    print(f'Veriler Excel dosyasına başarıyla kaydedildi: {output_file_path}')

base_filename = os.path.splitext(os.path.basename(input_file_path))[0]
return output_file_path, base_filename
def process_rtk_file(input_file_path):
    print("ÇIKTI WGS84 Coğrafi Koordinat dosyasını kaydedeceğiniz yeri seçin...")
    output_file_path = filedialog.asksaveasfilename(title="ÇIKTI WGS84 Coğrafi
Koordinat dosyasını kaydedeceğiniz yeri seçin...", defaultextension=".xlsx",
filetypes=[("Excel Files", "*.xlsx")])
    if not output_file_path:
        print("Çıkış dosyası seçilmedi. İşlem iptal edildi.")
        return None
    df = pd.read_excel(input_file_path)
    expected_header = ["%", "GPST", "latitude(deg)", "longitude(deg)", "height(m)"]
    coordinate_start_index = None
    for idx, row in df.iterrows():
        if list(row[:len(expected_header)].values) == expected_header:
            coordinate_start_index = idx + 1
            break
    if coordinate_start_index is None:
        print("Koordinat başlıkları bulunamadı. İşlem iptal edildi.")
        return None
    coordinate_data = df.iloc[coordinate_start_index:]
    coordinate_data.columns = df.iloc[coordinate_start_index - 1]
    coordinate_data = coordinate_data.reset_index(drop=True)
    numeric_columns = ["latitude(deg)", "longitude(deg)", "height(m)"]
    for col in numeric_columns:
        if col in coordinate_data.columns:
            coordinate_data[col] = pd.to_numeric(coordinate_data[col], errors='coerce')
    coordinate_data.to_excel(output_file_path, index=False)
    print(f'Koordinat verileri işlendi ve kaydedildi: {output_file_path}')
    return output_file_path
def convert_itrf96_to_utm6(input_file_path, pos_filename):
    data = pd.read_excel(input_file_path)
    if 'latitude(deg)' not in data.columns or 'longitude(deg)' not in data.columns:
        print("Hata: Dosyada 'latitude(deg)' ve 'longitude(deg)' sütunları bulunmalıdır.")
        return None
    latitudes = data['latitude(deg)']
    longitudes = data['longitude(deg)']
    heights = data['height(m)'] if 'height(m)' in data.columns else [0] * len(latitudes)
    proj_string = "+proj=utm +zone=35 +datum=WGS84 +towgs84=0,0,0,0,0,0,0
+units=m +no_defs"

```

```

utm_crs = CRS.from_proj4(proj_string)
transformer = Transformer.from_crs("EPSG:4326", utm_crs, always_xy=True)

utm_x_list = []
utm_y_list = []
for lon, lat in zip(longitudes, latitudes):
    x, y = transformer.transform(lon, lat)
    utm_x_list.append(round(x, 5))
    utm_y_list.append(round(y, 5))
print("ITRF96 UTM6 Koordinat Verilerini Netcad formatındaki dosya olarak
kaydedin...")
output_file_path = filedialog.asksaveasfilename(title="ITRF96 UTM6 Koordinat
Verilerini Netcad formatındaki dosya olarak kaydedin...", defaultextension=".xlsx",
filetypes=[("Excel Files", "*.xlsx")])
if not output_file_path:
    print("Çıkış dosyası seçilmedi. İşlem iptal edildi.")
    return None
if 'GPST' in data.columns:
    nokta_no_list = data['GPST'].apply(lambda x: ".join(str(x).split(':')) if
pd.notnull(x) else ")
else:
    nokta_no_list = [""] * len(data)
df = pd.DataFrame({
    'A': nokta_no_list,
    'B': [f"{x:.5f}" for x in utm_x_list],
    'C': [f"{y:.5f}" for y in utm_y_list],
    'D': [f"{h:.5f}" for h in heights],
    'E': "",
    'F': "",
    'G': "",
    'H': pos_filename
})
df.to_excel(output_file_path, index=False, header=False)
print(f"Netcad formatındaki ITRF96 UTM6 dosya .xlsx olarak kaydedildi:
{output_file_path}")
xls_output_path = output_file_path.replace(".xlsx", ".xls")
workbook = xlwt.Workbook()
sheet = workbook.add_sheet("Sheet1")
for row_idx, row in df.iterrows():
    for col_idx, value in enumerate(row):
        sheet.write(row_idx, col_idx, value)
workbook.save(xls_output_path)
print(f"Netcad formatındaki ITRF96 UTM6 dosya .xls olarak kaydedildi:
{xls_output_path}")
return output_file_path
if __name__ == "__main__":
    Tk().withdraw()
    excel_path, pos_filename = convert_file_to_excel()
    if excel_path:
        rtk_path = process_rtk_file(excel_path)

```

```

if rtk_path:
    convert_itrf96_to_utm6(rtk_path, pos_filename)

```

Ek A3: Hata Analizlerini Gerçekleştiren Python Kodu

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import norm
from tkinter import Tk, Toplevel, Scrollbar, Canvas, ttk, Entry, Label
from tkinter.filedialog import askopenfilename, asksaveasfilename
from openpyxl import Workbook
from openpyxl.styles import Alignment, Border, Side, Font, PatternFill

# 1. Dosya seçme işlemi
def select_file():
    Tk().withdraw() # Tkinter GUI ekranını gizler
    file_path = askopenfilename(filetypes=[("Excel files", "*.xlsx")])
    return file_path

# 2. Tabloyu ayrı bir pencerede gösterme
def display_table(df, ref_x, ref_y, ref_z):
    table_window = Toplevel() # Yeni bir pencere oluştur
    table_window.title("Hata Değerlendirme Sonuçlarının Tablosu")
    table_window.geometry("800x350") # Pencere boyutunu genişleterek tüm verilerin
    sığmasını sağla
    frame = ttk.Frame(table_window)
    frame.pack(fill="both", expand=True)
    canvas = Canvas(frame)
    canvas.pack(side="left", fill="both", expand=True)
    scrollbar = Scrollbar(frame, orient="vertical", command=canvas.yview)
    scrollbar.pack(side="right", fill="y")
    canvas.configure(yscrollcommand=scrollbar.set)
    table_frame = ttk.Frame(canvas)
    canvas.create_window((0, 0), window=table_frame, anchor="nw")
    # Başlıklar ve veri hücrelerini doldur
    header_font = ("Arial", 12, "bold")
    cell_font = ("Arial", 10)
    bg_color = "#d3d3d3"
    # Tablo başlıklarını ekle
    row_headers = ["X", "Y", "Z", "Genel"]
    column_headers = ["Bias (m)", "Standart Sapma (m)", "KOH (m)"]
    # Sütun başlıklarını ekle
    for i, header in enumerate(column_headers):
        label = Label(table_frame, text=header, borderwidth=2, relief="ridge",
                      width=20, bg=bg_color, font=header_font)
        label.grid(row=0, column=i + 1, sticky="nsew", padx=5, pady=5)
    # Satır başlıklarını ekle
    for i, row_header in enumerate(row_headers):
        label = Label(table_frame, text=row_header, borderwidth=2, relief="ridge",
                      width=10, bg=bg_color, font=header_font)
        label.grid(row=i + 1, column=0, sticky="nsew", padx=5, pady=5)

```

```

# Veri hücrelerini doldur
for row_index, row in enumerate(df.itertuples(), start=1):
    for column_index, value in enumerate(row[1:]):
        formatted_value = f"{value:.6f}" if isinstance(value, (float, int)) else str(value)
        entry = Entry(table_frame, justify="center", font=cell_font)
        entry.insert(0, formatted_value)
        entry.grid(row=row_index, column=column_index + 1, sticky="nsew",
padx=5, pady=5)
# Orijin koordinatlarını ekle
labels = ["Orijin Koordinatları:",
          f"X: {orj_x:.6f}",
          f"Y: {orj_y:.6f}",
          f"Z: {orj_z:.6f}"]
for i, label_text in enumerate(labels):
    entry = Entry(table_frame, justify="center", font=header_font, bg=bg_color)
    entry.insert(0, label_text)
    entry.grid(row=len(df) + i + 1, column=0, colspan=len(column_headers) +
1,
              sticky="nsew", padx=5, pady=5)
# Kaydetme butonu ekle
save_button = ttk.Button(table_window, text="Tabloyu Kaydet",
                        command=lambda: save_table(df, ref_x, ref_y, ref_z))
save_button.pack(pady=10)
table_frame.update_idletasks()
canvas.config(scrollregion=canvas.bbox("all"))
# 3. Tabloyu dosya olarak kaydetme
def save_table(df, ref_x, ref_y, ref_z):
    save_path = asksaveasfilename(defaultextension=".xlsx", filetypes=[("Excel files",
"*.*xlsx")])
    if save_path:
        # Openpyxl ile yeni bir çalışma kitabı oluştur
        wb = Workbook()
        ws = wb.active
        ws.title = "Sonuçlar"
        # Sütun başlıkları
        headers = ["Bias (m)", "Standart Sapma (m)", "KOH (m)"]
        ws.append([""] + headers + ["Orijin Koordinatları"]) # E sütununa başlık eklendi
        # Satır başlıkları ve değerler
        row_headers = ["X", "Y", "Z", "Genel"]
        for idx, row_name in enumerate(row_headers):
            row_values = list(df.iloc[idx])
            ws.append([row_name] + row_values)
        # Orijin bilgilerini E sütununa ekle
        ws["E2"] = orj_x
        ws["E3"] = orj_y
        ws["E4"] = orj_z
        # Biçimlendirme
        thin = Side(border_style="thin", color="000000")
        for row in ws.iter_rows(min_row=1, max_row=ws.max_row, min_col=1,
max_col=5): # E sütununa kadar

```

```

        for cell in row:
            # Kenarlık
            cell.border = Border(top=thin, left=thin, right=thin, bottom=thin)
            # Hizalama
            cell.alignment = Alignment(horizontal="center", vertical="center",
wrap_text=True)
            # Yazı tipi
            if cell.row == 1:
                cell.font = Font(bold=True, size=12)
            else:
                cell.font = Font(size=11)
        # Başlık hücreleri renklendirme
        fill = PatternFill("solid", fgColor="D3D3D3")
        for cell in ws[1]:
            cell.fill = fill
        # Sütun genişliklerini ayarla
        ws.column_dimensions["A"].width = 12
        for col in ["B", "C", "D", "E"]:
            ws.column_dimensions[col].width = 20
        # Dosyayı kaydet
        wb.save(save_path)
        print(f'Sonuçlar başarıyla kaydedildi: {save_path}')
# 4. Dosya seçimi
file_path = select_file()
if file_path:
    # 5. Dosyayı okuma
    data = pd.read_excel(file_path)
    # 6. İlgili sütunları seçip yeniden adlandırma
    data = data.iloc[:, [0, 1, 2, 3]] # Nokta No, X, Y, Z sütunları
    data.columns = ['Nokta No', 'X', 'Y', 'Z']
    # 7. Referans koordinatlarının belirlenmesi
    ref_x = 446166.2706
    ref_y = 4519294.5801
    ref_z = 62.1957
    orj_x = data['X'].mean()
    orj_y = data['Y'].mean()
    orj_z = data['Z'].mean()
    # 8. Hata hesaplama
    data['dE'] = data['X'] - ref_x # Doğu yönündeki hata
    data['dN'] = data['Y'] - ref_y # Kuzey yönündeki hata
    data['dU'] = data['Z'] - ref_z # Yukarı yönündeki hata
    # 9. Bias, Standart Sapma ve RMS hesaplama
    bias_dE = data['dE'].mean()
    bias_dN = data['dN'].mean()
    bias_dU = data['dU'].mean()
    std_dE = data['dE'].std()
    std_dN = data['dN'].std()
    std_dU = data['dU'].std()
    rms_dE = np.sqrt((data['dE'] ** 2).mean())
    rms_dN = np.sqrt((data['dN'] ** 2).mean())

```

```

rms_dU = np.sqrt((data['dU'] ** 2).mean())
# 10. RMS Genel Değerini Hesaplama
bias_genel = np.sqrt(bias_dE**2 + bias_dN**2 + bias_dU**2)
std_genel = np.sqrt(std_dE**2 + std_dN**2 + std_dU**2)
rms_genel = np.sqrt(rms_dE**2 + rms_dN**2 + rms_dU**2)
# 11. Sonuçları bir tablo olarak gösterme
result = pd.DataFrame({
    'Bias (m)': [bias_dE, bias_dN, bias_dU, bias_genel],
    'Standart Sapma (m)': [std_dE, std_dN, std_dU, std_genel],
    'KOH (m)': [rms_dE, rms_dN, rms_dU, rms_genel]
}, index=['dE (Doğu)', 'dN (Kuzey)', 'dU (Yukarı)', 'Genel (RMS)'])
# Tabloyu ayrı bir pencerede göster
display_table(result, ref_x, ref_y, ref_z)
# 12. Grafikleri çizme
plt.figure(figsize=(12, 6))
# Yatay hata grafiği
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.scatter(data['dE'], data['dN'], s=10, alpha=0.7)
plt.axhline(0, color='gray', linestyle='--')
plt.axvline(0, color='gray', linestyle='--')
plt.xlabel('Doğu Hatası (dE) (m)')
plt.ylabel('Kuzey Hatası (dN) (m)')
plt.title('Yatay Hatalar (Doğu-Kuzey)')
plt.grid()
# Dikey hata grafiği
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.hist(data['dU'], bins=30, color='blue', alpha=0.7, density=True,
label="Histogram (dU)")

# Gaussian (Normal) dağılım eğrisi ekleme
mean_dU = data['dU'].mean()
std_dU = data['dU'].std()
x = np.linspace(data['dU'].min(), data['dU'].max(), 100)
pdf = norm.pdf(x, mean_dU, std_dU) # Normal dağılım
plt.plot(x, pdf, color='red', linewidth=2, label="Normal Dağılım Eğrisi")
plt.axvline(0, color='gray', linestyle='--')
plt.xlabel('Yukarı Hatası (dU) (m)')
plt.ylabel('Olasılık Yoğunluğu')
plt.title('Dikey Hata Dağılımı ve Normal Dağılım Eğrisi')
plt.legend()
plt.grid()
plt.tight_layout()
plt.show()
print("Hata Hesaplamaları Başarılı bir şekilde gerçekleştirildi.")
else:
    print("Hiçbir dosya seçilmedi.")

```