T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK GNSS ALICISI İLE YAPI SAĞLIĞI İZLEMELERİNDE FARKLI GNSS ALGORİTMALARININ TEST EDİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

MERT BEZCİOĞLU
DOKTORA TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK GNSS ALICISI İLE YAPI SAĞLIĞI İZLEMELERİNDE FARKLI GNSS ALGORİTMALARININ TEST EDİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

MERT BEZCİOĞLU

DOKTORA TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

DANIŞMANI
PROF. DR. CEMAL ÖZER YİĞİT
II. DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ AHMET ANIL DİNDAR

GEBZE
2022

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

TESTING AND COMPARISON OF DIFFERENT GNSS ALGORITHMS IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING USING A STAND-ALONE GNSS RECEIVER

MERT BEZCIOGLU

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY

DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING

GEODESY AND GEOGRAPHICAL INFORMATION TECHNOLOGIES PROGRAM

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. CEMAL OZER YIGIT

II. THESIS SUPERVISOR

ASSIST. PROF. DR. AHMET ANIL DINDAR

GEBZE

2022

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/07/2022 tarih ve 2022/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 19/07/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mert BEZCİOĞLU'nun tez çalışması Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI)	: Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT
ÜYE	: Prof. Dr. Burak AKPINAR
ÜYE	: Prof. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU
ÜYE	: Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU
ÜYE	: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin PEHLİVAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

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

ÖZET

Bu tez çalışmasında tek GNSS alıcısı ile yapı sağlığı izleme çalışmalarında uygulanması mümkün olan farklı GNSS algoritmalarının performansı incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı zamanlarda iki farklı test senaryosu gerçekleştirilmiş ve SF-PPP, DF-PPP, RT-PPP, PPP-AR ve Varyometrik Yaklaşım/VADASE yöntemlerinin yatay yönlü dinamik hareketleri tespit edebilme yetenekleri değerlendirilmiştir. Tüm test senaryolarında yatay düzlemde hareket etme kabiliyetine sahip bir sarsma tablası kullanılarak üretilen 0.10 Hz-8.00 Hz aralığında frekans ve 5 mm-10 mm aralığında genlik değerlerine sahip harmonik salınımlar izlenmiştir. Bu harmonik salınımlara ek olarak çoklu frekans ve genlik değerlerine sahip bindirmeli hareket de yöntemlerin performansını incelemek için ayrıca incelenmiştir. Söz konusu yöntemlerin GPS-sismolojisi uygulamalarındaki performansını test etmek için El Centro, Kobe, Loma Prieta ve Düzce depremleri simüle edilmiş, yöntemlerin kalıcı ya da ko-sismik deformasyonları tespit edebilme yeteneğini değerlendirmek amacıyla adım fonksiyonu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan GNSS gözlemleri, 20 Hz'lik örnekleme aralığına sahip alıcılar ile 10°'lik kesme açısı altında toplanmıştır. Deney sırasında gerçek-zamanlı ve deney sonrasında değerlendirme sonrası olarak işlenen veriler frekans ve zaman alanında LVDT ve rölatif konum belirleme verileri referans alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ilgili tüm yöntemlerin LVDT ile karşılaştırılabilir olduğunu, harmonik salınımları başarılı bir şekilde yakalayabildiğini ve ayrıca, gerçek-zamanlı ve yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS tekniğinin güvenilir bir şekilde yapı sağlığı izleme ve deprem/tsunami erken uyarı sistemlerine entregre edilebileceğini göstermektedir. Çalışmayı öne çıkaran bir diğer özellik ise, Avustralya/Pasifik bölgesinde henüz test aşamasında olan ikinci-nesil SBAS sisteminin, RT-PPP tekniğinin ve bu tez çalışmasının ortaya çıkarılmasına kadar genellikle GNSS-sismolojisi alanında çalışılan VADASE tekniğinin gerçek-zamanlı olarak yapı sağlığı izleme çalışmalarına entegrasyonun incelenmiş olmasıdır.

Anahtar Kelimeler: RT-PPP, PPP-AR, SBAS, Varyometrik Yaklaşım, VADASE, Yapı Sağlığı İzlemeleri.

SUMMARY

In this thesis, two different test scenarios were carried out at different times and the ability of SF-PPP, DF-PPP, RT-PPP, PPP-AR and Variometric Approach/VADASE methods to detect horizontal dynamic movements were evaluated. Harmonic oscillations with frequency in the range of 0.10 Hz-8.00 Hz, and amplitude values between 5 mm and 10 mm, generated by using a shake table in all scenarios. Furthermore, superimposed motion with multiple-frequency and amplitude values was also investigated to examine the performance of the methods. El Centro, Kobe, Loma Prieta and Duzce earthquakes were simulated to test the performance of all methods in GPS-seismology applications, and step function experiments were counducted to evaluate the ability of the methods to detect permanent displacements. The GNSS observations were collected under a 10° cut-off angle employed a three receivers at a 20 Hz sampling interval. The data processed in real-time during the experiment and post-processed after the experiment were compared with reference to LVDT and relative positioning in both the frequency and time domains. The results show that all employed methods are comparable to LVDT, and they can successfully detect the harmonic motions, and the real-time and high-rate GNSS technique can also be reliably integrated into Structural Health Monitoring and earthquake/tsunami early warning systems. Another highlight of the study is the real-time integration of the second-generation SBAS system, which is still under testing in the Australia/Pacific region, RT-PPP technique, and the VADASE technique, which was commonly studied in the field of GNSS-seismology, into Structural Health Monitoring studies was examined.

Key Words: RT-PPP, PPP-AR, SBAS, Variometric Approach, VADASE, Structural Health Monitoring.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, yaşamım boyunca beni karşılıksız seven, her türlü desteği veren, yaşamımla ilgili aldığım tüm kararları destekleyerek şu an olduğum kişi olmamda çok büyük payları olan ve tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini yanımda her zaman hissettiğim çok değerli anne ve babama,

lisansüstü eğitimim boyunca yanında çalışmaktan ve asistanı olmaktan büyük onur duyduğum, sahip olduğu bilgi birikimini benden esirgemeyen, lisansüstü eğitimim süresince yurtdışı deneyimi kazanmamda büyük emeği, desteği ve teşviği olan, ailemden biri olarak gördüğüm değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT'e,

değerli bilgi birikimleri ile bu çalışmanın geliştirilmesinde çok büyük payı olan eş danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Anıl DİNDAR'a,

tez çalışmalarım sırasında desteklerini her zaman arkamda hissettiğim başta Arş. Gör. Dr. Hasan TONBUL ve Arş. Gör. Rabia BOVKIR olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma,

varyometrik yaklaşım çözümlerinin gerçekleştirilmesinde ve elde edilen sonuçların yorumlanmasında sağladıkları katkı için Sapienza University of Rome'dan Prof. Dr. Mattia Giovanni CRESPI, Prof. Dr. Augusto MAZZONI ve Marco FORTUNATO'ya,

ikinci-nesil SBAS sisteminin gerçek-zamanlı yörünge ve saat ürünlerini paylaştığı için Curtin University'den Prof. Dr. Ahmed EL-MOWAFY'ye,

VADASE özellikli Leica GR30 GNSS alıcısı desteği için Sistem A.Ş., Leica Geosystems AG ve Özgür Avcı'ya,

saha çalışmalarındaki desteği için Arş. Gör. Barış KARADENİZ'e,

2020-A-102-20 Nolu Bilimsel Araştırma Projesi desteği için Gebze Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne,

ve son olarak, bu tezin ortaya çıkış sürecinde en büyük katkıyı sağlayan, beni daima motive eden ve desteğini hissetmediğim tek bir gün bile olmayan çok değerli eşim Gözde BEZCİOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLOLAR DİZİNİ	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Çalışması	2
1.2. Tezin İçeriği ve Amacı	12
1.3. Tezin Genel Yapısı ve Çıktıları	16
2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)	18
2.1. GNSS Tarihçesi	19
2.2. GNSS Bölümleri	22
2.3. Uluslararası GNSS Servisi (IGS)	23
2.4. GNSS Gözlemleri	24
2.4.1. Kod Gözlemleri	25
2.4.2. Taşıyıcı Dalga Faz Gözlemleri	26
2.4.3. Ölçü Hataları	27
2.4.4. Fark Gözlemleri	28
2.4.5. Lineer Kombinasyonlar	29
2.5. Uydu Yörüngeleri	31
2.5.1. Yayın Efemerisi Bilgileri	31
2.5.2. Hassas Efemeris Bilgileri	35
3. HASSAS NOKTA KONUMLAMA (PPP)	36
3.1. PPP Tekniği	36
3.2. PPP-AR Tekniği	37
3.2.1. Ayrıştırılmış Saat (Decoupled Clock) Modeli	41

3.2.2. Uydular Arası Tekli Farklar (Single Difference Between Satellites) Modeli 44
3.3.3. Tam Sayı Faz Saati (Integer Phase Clock) Modeli 46
3.3. Sonradan-Değerlendirme ve Gerçek-Zamanlı PPP ve PPP-AR Tekniği 47
3.4. İkinci-Nesil SBAS (Second-Generation Satellite-Based Augmentation System) Tekniği 51
4. YÜKSEK ZAMANSAL ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GNSS, YAPI SAĞLIĞI İZLEMELERİ VE GNSS-SİSMOLOJİSİ 53
4.1. GNSS Sisteminin Geofizik Çalışmalarına Katkısı 54
4.2. GNSS Sisteminin Yapı Sağlığı İzleme Çalışmalarına Katkısı 55
4.3. GNSS Sisteminin Sismoloji Çalışmalarına Katkısı 58
4.4. Yüksek Zamansal Çözünürlüklü GNSS, Güncel Çalışmalar ve Varyometrik Yaklaşım 61
5. VADASE (VARIOMETRIC APPROACH FOR DISPLACEMENT ANALYSIS STAND-ALONE ENGINE) TEKNİĞİ 63
5.1. Varyometrik Yaklaşım ve Matematiksel Modeli 63
6. UYGULAMA 68
6.1. Harmonik Salınım Testleri 69
6.1.1. 1 nolu Harmonik Salınım Testi ve GNSS Verilerinin Toplanması 69
6.1.2. 2 nolu Harmonik Salınım Testi ve GNSS Verilerinin Toplanması 70
6.2. Deprem Simülasyonu Testleri 71
6.3. GNSS Verilerinin İşlenmesi 73
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 80
7.1. Erken Tehlike Uyarısı ve Dinamik Hareketlerin Algılanması Uygulamalarında İkinci-Nesil SBAS Destekli Gerçek-Zamanlı GPS-PPP Tekniğinin Performansı 81
7.1.1. 1995 Kobe ve 1999 Düzce Deprem Simülasyon Testleri Sonuçları 88
7.2. Yapısal Deplasmanların ve Güçlü Yer Hareketlerinin Tespitinde Tek-Frekanslı Hassas Nokta Konumlama (SF-PPP) Tekniğinin İncelenmesi 91
7.2.1. Deprem Simülasyon Testi 98
7.3. Gerçek-Zamanlı Yapı Sağlığı İzlemeleri ve Hızlı Yapı Riski Değerlendirilmesi Çalışmalarında Tek-Frekanslı GPS/Galileo Varyometrik Yaklaşımın Performansı 100
7.3.1. Gerçek-Zamanlı Uygulamalar için Epoklar Arası Deplasman Sonuçları 101

7.3.2. Hızlı Risk Değerlendirmesi için Deplasman Alanı Sonuçları 106
7.3.3. Deprem Simülasyon Testi 113
7.4. Yüksek zamansal çözünürlüklü (20 Hz) GPS Gözlemlerine Dayalı Dinamik Deplasmanların İzlenmesinde Gerçek-Zamanlı Varyometrik Yaklaşım ve Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin Değerlendirilmesi 115
7.4.1. Erken Uyarı Sistemleri ve Deprem İzleme Uygulamalarında RT-PPP ve VADASE Yaklaşımlarının Performansı 121
7.4.2. Statik veya Yarı-Statik Deplasmanların ve Deformasyonların İzlenmesinde RT-PPP ve VADASE Yaklaşımlarının Performansı 125
7.5. Yatay Yönlü Dinamik Davranışların Belirlenmesinde Farklı IGS Ürünlerine Dayalı RT-PPP Tekniğinin Karşılaştırmalı Bir Analizi 127
7.5.1. Erken Uyarı Sistemleri ve Deprem İzleme Uygulamalarında Farklı RT-PPP Yaklaşımlarının Performansı 133
7.5.2. Statik veya Yarı-Statik Deplasmanların ve Deformasyonların İzlenmesinde Farklı RT-PPP Yaklaşımlarının Performansı 138
7.6. Gerçek-Zamanlı VADASE Yaklaşımının Dinamik Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi ve Bu Yönteme Çoklu-GNSS Gözlemlerinin Katkısı 140
7.7. Yapı Sağlığı İzlemeleri Uygulamalarında Yüksek Zamansal Çözünürlüklü GNSS-PPP ve PPP-AR Tekniklerinin Performansının İncelenmesi 147
7.7.1. Sonuçlar ve Tartışma 147
7.7.2. Harmonik Salınım Testi Sonuçları 149
7.7.3. Kobe Deprem Simülasyonu Testi Sonuçları 152
7.7.4. Adım Fonksiyou Testi Sonuçları 153
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 155

KAYNAKLAR 165
ÖZGEÇMİŞ 182
EKLER 183

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
r	:	GNSS Alıcısı
s	:	Hedef Uydu
t^s	:	Hedef Uydudan Sinyalin GNSS Alıcısına Gönderildiği An
t_r	:	GNSS Alıcısında Hedef Uydudan Gönderilen Sinyalin Alındığı An
c	:	Boşluktaki Işık hızı
P_r^s	:	Uydu ve Alıcı Arasındaki Gerçek Mesafe
δt^s	:	Uydu Saat Hatası
δt_r	:	Alıcı Saat Hatası
ρ_r^s	:	Uydu ve Alıcı Arasındaki Geometrik Mesafe
X^s, Y^s, Z^s	:	Uydu Koordinatları
X_r, Y_r, Z_r	:	Alıcı Koordinatları
t_0	:	Ölçü Başlangıç Epoğu
N, N_r^s	:	Başlangıç Faz Belirsizliği
ϕ_r^s	:	Uydu ve Alıcı Arasındaki Faz Gözlemi
λ_i	:	Taşıyıcı Fazın Dalga Boyu
$\Delta\phi_r^s$	:	Tamsayı Döngüsündeki Kesirli Kısım
T_r^s	:	Troposferik Gecikme
I_r^s	:	İyonosferik Gecikme
m_r^s	:	Multipath hatası
$\varepsilon_{r,P}^s, \varepsilon_{r,L}^s$	:	Kod ve Faz Gözlemlerindeki Gürültüler
L_{LC}	:	Temel Lineer Kombinasyon
α, β	:	Temel Lineer Kombinasyon katsayıları
L_1, L_2	:	Ham GNSS gözlemleri
σ_0	:	Gözlem Gürültüsü
λ_{IF}	:	İyonosfer-Bağımsız Denklemin Dalga Boyu
M_0	:	Ortalama Anomali
Δn	:	Ortalama Hareketin Hesaplanan Değerden Farkı
e	:	Dış Merkezlilik

$\sqrt{A}$	:	Büyük Yarı Eksenin Karekökü
Ω_0	:	Yükselen Düğüm Noktasının Boylamı
i_0	:	Eğim Açısı
w	:	Perigeenin Argümanı
$\dot{\Omega}$	:	Yükselen Düğüm Noktası Rektasansiyonundaki Değişim Oranı
$IDOT$	:	Eğim Açısı Değişim Oranı
C_{rc}, C_{rs}	:	Jeosentrik Uzaklık İçin Düzeltme Katsayıları
C_{uc}, C_{us}	:	Perigee Argümanı İçin Düzeltme Katsayıları
C_{ic}, C_{is}	:	Eğim Açısı İçin Düzeltme Katsayıları
t_{oe}	:	GPS Referans Epoğu
$IODE$	:	Efemeris Verisinin Üretildiği Zaman
a_0	:	Uydu Saati Gecikmesi
a_1	:	Uydu Saati Kayıklığı
a_2	:	Uydu Frekansı Kayıklığı
$\dot{\Omega}_e$	:	Yerin Dönme Hızı
μ	:	WGS84 için Yer Çekimi Sabiti
n_0	:	Ortalama hareket
n	:	Gerçek ortalama hareket
M_k	:	Düzeltilmiş ortamala hareket
E_k	:	Dış merkezlilik anomalisi
v_k	:	Gerçek anomali
u_k	:	Düzeltilmiş perigee argümanı
r_k	:	Düzeltilmiş jeosentrik uzaklık
i_k	:	Düzeltilmiş eğim
x_k, y_k	:	Yörünge düzlemindeki X ve Y koordinatları
Ω_k	:	DüzeltilmişYükselen düğüm noktasının Boylamı
X_{ECEF}	:	ECEF düzlemindeki X Koordinatı
Y_{ECEF}	:	ECEF düzlemindeki Y Koordinatı
Z_{ECEF}	:	ECEF düzlemindeki Z Koordinatı
$(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})_{S+M}$	:	Ay ve Güneş Çekiminin Düzensizliklerinden Kaynaklanan İvme
a_e	:	Dünya'nın büyük yarı ekseni
J_0^2	:	İkinci Dereceden Jeopotansiyel Katsayısı

P_3, L_3	:	İyonosfer-bağımsız Kod ve Faz Gözlemler
b_{P3}^r, b_{L3}^s	:	İyonosfer-bağımsız Uydu ve Alıcı Faz Biasları
b_{A4}^r, b_{A4}^s	:	MW Fonksiyonundaki Uydu ve Alıcı Biasları
dt_{P3}^s, dt_{L3}^s	:	Uydu Kod ve Faz Saati
b_{code}^s	:	Uydu Kod Biası
dt_{P3}^r, dt_{L3}^r	:	Alıcı Kod ve Faz Saati
b_{code}^r	:	Alıcı Kod Biası
C_{P_1}, C_{P_2}	:	Ham Kod Gözlemlerinin Varyansları
$C_{L_1}, \ C_{L_2}$	:	Ham Faz Gözlemlerinin Varyansları
Δ_{ssr}	:	Gerçek-zamanlı Yörünge Düzeltmeleri
$\delta_r, \delta_{\dot{r}}$	:	Gerçek-zamanlı Yörünge Düzeltmesinin Radial Yönü ve Hızı
$\delta_a, \delta_{\dot{a}}$	:	Gerçek-zamanlı Yörünge Düzeltmesinin Along-Track Yönü ve Hızı
$\delta_c, \ \delta_{\dot{c}}$	:	Gerçek-zamanlı Yörünge Düzeltmesinin Cross-Track Yönü ve Hızı
IOD	:	Gerçek-zamanlı Efemeris Yayın Zamanını
e_A	:	Yörünge Düzeltmelerinin Along-Track Yönündeki Birim Vektörü
e_c	:	Yörünge Düzeltmelerinin Cross-Track Yönündeki Birim Vektörü
e_r	:	Yörünge Düzeltmelerinin Radial Yönündeki Birim Vektörü
$r, \dot{r}$	:	Yayın Efemerisi Yardımıyla Elde Edilen Uydu Konumu ve Hız Konumu Vektörleri
c_0, c_1, c_2	:	Polinom Katsayıları
$\Delta\rho_{orbit}$	:	Uydu Koordinatındaki Yörünge Hatası
Δ	:	Epoklar Arası Tekli Fark
ξ	:	Alıcının Maruz Kaldığı 3B Yer Değiştirme Etkisi
e_r^s	:	Uydu-Alıcı Arası Birim Vektörü
•	:	Skaler Çarpım
TZD_{SB}	:	Troposferik Zenith Gecikmesi
Z_r^s	:	Uydu-Alıcı Arasındaki Zenith Açıcı
ε	:	Dönüklük Açısı
φ, λ	:	Coğrafi Koordinatlar
e, n, u	:	Toposentrik Kartezyen Koordinatlar
x^{bar}, y^{bar}	:	Tabla Düzlemi Koordinatları
m	:	Metre
cm	:	Santimetre

mm	:	Milimetre
Hz	:	Hertz
Mhz	:	Megahertz
GHz	:	Gigahertz
sn	:	Saniye
yr	:	Year
ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
APC	:	Antenna Phase Center
APL	:	Applied Physics Laboratory
AR	:	Ambiguity Resolution
ASCII	:	American Standard Code for Information Interchange
AUSPOS	:	US National Geodetic Survey Opus and the GeoScience Australia
BEIDOU	:	BeiDou Navigation Satellite System
CDDIS	:	The Crustal Dynamics Data Information System
CNES	:	Centre National d'Etudes Spatiales
CODE	:	Center for Orbit Determination in Europe
CoM	:	Center of Mass
CORS	:	Continuously Operating Reference Stations
DMFC	:	Dual-Frequency Multi-Constellation
DoD	:	Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı
ECEF	:	Earth-Centered Earth-Fixed
EGNOS	:	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESA	:	European Space Agency
FCBs	:	Fractional-cycle Bias
FTP	:	File Transfer Protocol
GAGAN	:	Indian GPS aided GEO Augmented Navigation
GALILEO	:	European Global Navigation Satellite
GBAS	:	Ground-based Augmentation Systems
GEO	:	Geostationary
GFZ	:	German Research Centre for Geosciences
GLONASS	:	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	:	Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri
GPS	:	Küresel Konum Belirleme Sistemi

IAG	:	International Association of Geodesy
IGS	:	Uluslararası GNSS Servisi
IPC	:	Integer Phase Clock
JPL	:	Jet Propulsion Laboratory
JPO	:	Joint Program Office
LLR	:	Lunar Laser Ranging
LVDT	:	Linear Variable Differential Transformer
MADOCA	:	Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis
MEMS	:	Micro-electromechanical Systems
MGEX	:	The Multi-GNSS Experiment
MSAS	:	Multi-functional Satellite Augmentation System
MW	:	Melbourne-Wubbena
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	:	ABD NAVigation Satellite Time and Ranging
NGS	:	US National Geodetic Survey
NL	:	Narrow Line
NRL	:	Naval Research Laboratory
NTRIP	:	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PPP	:	Precise Point Positioning
PZ90	:	Parametry Zemli 1990
RINEX	:	Receiver INdependent EXchange
RT	:	Real-Time
RTCM	:	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	:	Real-Time Kinematic
RTPP	:	Real-Time Pilot Project
RTS	:	Real-Time Services
RTX	:	Real-Time eXtended
RTWG	:	Real-Time Working Group
S/A	:	Selective Availability
SAMSO	:	Space and Missile System Organization
SBAS	:	Satellite-Based Augmentation System
SDBS	:	Single-Differences Between Satellites

SDCM	:	Russian System for Differential Correction and Monitoring
SINEX	:	Solution INdependent EXchange
SLR	:	Satellite Laser Ranging
SP3	:	Standard Products 3
SSR	:	State Space Representation
TEC	:	Total Electron Content
TIMATION	:	TIMe navigATION
TRANSIT	:	Navy Navigation Satellite System
UTC	:	Coordinated Universal Time
VA	:	Variometric Approach
VADASE	:	Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine
VLBI	:	Very-Long Baseline Interferometry
WAAS	:	Wide-area Augmentation Systems
WGS84	:	World Geodetic System 84
WL	:	Wide Line
WSB	:	Wide-lane Satellite Bias
YSİ	:	Yapı Sağlığı İzlemeleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	IGS ağı istasyonlarının küresel dağılımı.	23
4.1:	Mühendislik yapılarının beklenen frekans aralığı.	53
6.1:	Tez çalışması kapsamında kullanılan sarsma tablası.	68
6.2:	1 nolu deney anından bir görünüm.	70
6.3:	2 nolu deney anından bir görünüm.	71
7.1:	Tüm GPS tabanlı yöntemlerden türetilen deplasman (sol) ve epoklar arası deplasman zaman serileri (sağ).	83
7.2:	Tüm GPS tabanlı yöntemlerden türetilen filtrelenmiş deplasman zaman serileri.	83
7.3:	Dördüncü durum için tüm GPS tabanlı yöntemlerden türetilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serileri.	84
7.4:	Dördüncü durum için tüm GPS tabanlı yöntemlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman FFT spektrumları.	85
7.5:	Dördüncü durum için GPS tabanlı yöntemlerden elde edilen filtrelenmiş deplasman zaman serileri (sol) ve FFT spektrumları (sağ).	85
7.6:	Filtrelenmiş ve filtrelenmemiş sonuçlar için deplasman alanında GPS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri.	88
7.7:	Düzce depremi için tüm yöntemlerden elde edilen deplasman (üst) ve epoklar arası deplasman (alt) zaman serileri ve her iki zaman alanı için tartışılan tüm yöntemler ve LVDT sensörü arasındaki KOH değerleri	89
7.8:	Düzce depremi için çalışmada tartışılan tüm sensörlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları.	90
7.9:	Kobe depremi için tüm yöntemlerden elde edilen deplasman (üst) ve epoklar arası deplasman (alt) zaman serileri ve her iki zaman alanı için tartışılan tüm yöntemler ve LVDT sensörü arasındaki KOH değerleri	90

7.10:	Kobe depremi için çalışmada tartışılan tüm sensörlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları.	91
7.11:	SF-RP- (kırmızı), IGS Final tabanlı SF-PPP- (yeşil), IGS-RT tabanlı SF-PPP- (lacivert), MDC tabanlı SF-PPP- (turuncu) ve İkinci-Nesil destekli SF-PPP- (gökyüzü- mavisi)-den elde edilen deplasmanlar.	93
7.12:	Filtrelenmiş SF-RP ve SF-PPP den türetilen deplasmanlar.	94
7.13:	Durum 11 için deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ).	94
7.14:	Durum 17 için deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ).	95
7.15:	Deplasman değerlerinden elde edilen tepe frekansına karşılık gelen genlik değerleri	97
7.16:	Tüm durumlar için KOH değerleri.	98
7.17:	Düzce depremi simülasyonunda farklı ürünlere dayalı SF-PPP, SF-RP ve LVDT kaynaklı yer değiştirmelerin karşılaştırılması.	99
7.18:	Düzce deprem simülasyonu için LVDT ile SF-RP (kırmızı), IGS-Final tabanlı SF-PPP (yeşil), IGS-RT tabanlı SF-PPP (lacivert), MDC tabanlı SF-PPP (turuncu) ve SBAS tabanlı SF-PPP (gök mavisi) yöntemleri arasındaki farkların histogramları.	100
7.19:	RP ve VA tekniklerinden elde edilen epoklar arası deplasman değerleri.	102
7.20:	RP ve VA teknikleri arasındaki farkların histogramı.	103
7.21:	Durum 4 için LVDT, RP ve VA çözümlerinin epoklar arası deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ).	103
7.22:	Tüm durumlar için tepe frekansına karşılık gelen genlik değerleri.	104
7.23:	Tüm durumlar için KOH değerleri.	105
7.24:	Tüm durumlar için KOH değerleri.	106
7.25:	VA ve RP'den türetilmiş deplasmanlar.	108
7.26:	VA ve RP'den türetilmiş ve filtrelenmiş deplasmanlar.	108
7.27:	Filtrelenmiş RP ve VA arasındaki deplasman farklarının histogramları.	109

7.28: Durum 4 için deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ). 110
7.29: Tepe frekansının deplasman genliği ve LVDT ile filtrelenmemiş /filtrelenmemiş sonuçlar arasındaki farklar. 111
7.30: Tüm durumlar için RP, VA ve LVDT arasındaki deplasman farklarının KOH değerleri. 112
7.31: Tüm durumlar için RP, VA ve LVDT arasındaki deplasman farkı hatalarının yüzde dağılımı. 113
7.32: Kobe depremi simülasyonundan elde edilen RP, VA ve LVDT sensörlerine ait epoklar arası deplasman ve deplasman zaman serilerinin karşılaştırılması. 113
7.33: Kobe deprem simülasyonu için LVDT ile RP ve VA sensörleri arasındaki epoklar arası deplasman ve deplasman farklarının histogramları. 114
7.34: Çalışmada tasarlanan tüm deneyler için RP- (üst panel), RT-PPP- (üstten ikinci panel) ve VADASE- (üstten üçüncü panel) den elde edilen deplasmanlar. 117
7.35: Tüm GPS tabanlı yaklaşımların filtrelenmiş deplasman zaman serileri. 117
7.36: Durum 15 için deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ). 118
7.37: GPS-tabanlı teknikler ve LVDT arasındaki deplasman farklarının KOH değerleri. 120
7.38: Kobe deprem simülasyonunda LVDT, RP, RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması (üst) ve GPS-tabanlı deplasmanlar ile LVDT arasındaki farkların histogramları (alt). 122
7.39: Loma Prieta deprem simülasyonunda LVDT, RP, RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması (üst) ve GPS-tabanlı deplasmanlar ile LVDT arasındaki farkların histogramları (alt). 122
7.40: El Centro deprem simülasyonunda LVDT, RP, RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması (üst) ve 123

GPS-tabanlı deplasmanlar ile LVDT arasındaki farkların histogramları (alt).

7.41: Düzce deprem simülasyonunda LVDT, RP, RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması (üst) ve GPS-tabanlı deplasmanlar ile LVDT arasındaki farkların histogramları (alt). 124

7.42: Tüm deprem simülasyonları için GPS-tabanlı çözümlerden elde edilen deplasmanların LVDT'den olan farklarının yüzde dağılımı. 125

7.43: Adım fonksiyonu deneylerinde RP–, RT-PPP- ve VADASE-den türetilen deplasmanların karşılaştırılması. 126

7.44: PPP-Final, RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'den türetilen deplasman zaman serileri. 128

7.45: PPP-Final, RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'den türetilen filtrelenmiş deplasman zaman serileri. 129

7.46: Durum 15 için LVDT, filtrelenmemiş ve filtrelenmiş RT-PPP tabanlı yaklaşımlardan elde edilen deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları. 131

7.47: Tüm durumlardan elde edilen LVDT ve PPP tabanlı yaklaşımlar arasındaki farkların KOH değerleri. 133

7.48: Kobe depremi simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serileri (üst) ve LVDT ile PPP-tabanlı yöntemler arasındaki farkların histogramları ve KOH değerleri (alt). 134

7.49: Loma Prieta depremi simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serileri (üst) ve LVDT ile PPP-tabanlı yöntemler arasındaki farkların histogramları ve KOH değerleri (alt). 135

7.50: El Centro depremi simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serileri (üst) ve LVDT ile PPP-tabanlı yöntemler arasındaki farkların histogramları ve KOH değerleri (alt). 136

7.51: Düzce depremi simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serileri (üst) ve LVDT ile PPP-tabanlı yöntemler arasındaki farkların histogramları ve KOH değerleri (alt). 137

7.52: Tüm deprem simülasyonları için PPP tabanlı yaklaşımlarından elde edilen deplasmanların LVDT'den olan farklarının yüzde 138

dağılımı.
7.53: Adım fonksiyonu deneylerinde PPP-Final, RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'den türetilen kalıcı deplasmanların karşılaştırılması. 139
7.54: Örnek durum zaman serileri (sol) ve FFT spektrumları (sağ). 143
7.55: Tüm durumlar için GNSS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri. 145
7.56: Kobe depremi simülasyondan elde edilen zaman serileri (üst) ve LVDT ile GNSS sensörleri arasındaki hataların histogram ve KOH değerleri (alt). 146
7.57: Kobe depremi için LVDT ile GNSS sensörleri arasındaki hataların yüzdesel dağılımı. 146
7.58: Rölatif konum belirleme, PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde edilen deplasmanlar. 148
7.59: Rölatif konum belirleme ile PPP ve PPP-AR tekniğinden elde edilen deplasman farklarının zaman serileri ve histogramları. 149
7.60: Durum 5 için LVDT, rölatif konum belirleme, PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde edilen deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları. 150
7.61: LVDT ve GNSS çözümleri için FFT spektrumlarından elde edilen tepe frekanslarının genliği ve LVDT ile GNSS tabanlı yöntemler arasındaki farklılıklar. 151
7.62: Tüm durumlar için LVDT ve GNSS tabanlı yöntemlerin farkları arasındaki KOH değerleri. 152
7.63: Kobe deprem simülasyonunda PPP, PPP-AR, rölatif konum belirleme ve LVDT'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması. 152
7.64: Kobe deprem simülasyonu için LVDT ve GNSS tabanlı yöntemler arasındaki deplasman farklarının histogramları. 153
7.65: Adım fonksiyon testlerinde rölatif konum belirleme, PPP ve PPP AR tekniklerinden türetilen deplasmanların karşılaştırılması. 154

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
2.1:	GPS, Galileo ve Beidou takımyıldızları için yayın efemerisinde yer alan Kepler elemanları.	32
2.2:	GPS, Galileo ve Beidou takımyıldızları için pozisyon bilgilerinin hesabı.	33
2.3:	GLONASS-M uydularına iletilen koordinatların ve hızların doğruluğu.	34
6.1:	RTKLIB yazılımı ile rölatif konum belirleme çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.	73
6.2:	RTKLIB yazılımı ile geleneksel-PPP çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.	75
6.3:	gLAB yazılımı ile geleneksel SF-PPP çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.	76
6.4:	RTKLIB yazılımı ile geleneksel RT-PPP çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.	77
6.5:	Net_Diff yazılımı ile PPP-AR çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.	78
7.1:	Çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği.	82
7.2:	Çalışmada tartışılan yöntemlerden elde edilen genlik değerlerinin LVDT'den olan farkları.	86
7.3:	Epoklar arası deplasman alanında GPS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri.	87
7.4:	Çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği.	92
7.5:	Tüm durumlar için yer değiştirmelerin tepe frekansı ve genliği (Köşeli parantez içindeki genlik değerleri filtrelenmiş sonuçları temsil ederken, diğer değerler filtrelenmemiş sonuçları gösterir).	96
7.6:	Tüm durumlar için maksimum ve KOH değerleri (Köşeli parantez içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları temsil ederken, diğer değerler filtrelenmemiş sonuçları gösterir).	97
7.7:	Bu çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği.	101
7.8:	Tüm durumlar için tepe frekansı ve genlik değerleri.	104

7.9: Tüm durumlar için LVDT ile RP ve VA teknikleri arasındaki farkların maksimum ve KOH değerleri. 105
7.10: Tüm durumlar için deplasman değerlerinin tepe frekansı ve genliği 110
7.11: Tüm durumlar için maksimum ve KOH değerleri. 112
7.12: Harmonik salınım deneylerinde üretilen frekanslar ve genlikler. 115
7.13: Harmonik salınım deneylerinde elde edilen frekanslar ve genlikler. 119
7.14: Tüm yöntemlerden elde edilen tahmini kalıcı deplasmanlar ve standart sapmaları. 126
7.15: Harmonik salınım deneylerinde tüm yaklaşımlardan elde edilen frekanslar ve genlikler. 132
7.16: Tüm yöntemlerden elde edilen tahmini kalıcı deplasmanlar ve standart sapmaları. 140
7.17: Bu çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği. 142
7.18: Tüm durumlar için FFT spektrumu değerleri. 143
7.19: Bu çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği. 147
7.20: Tüm durumlar için tepe frekansı ve genliği (parantez içinde). 151

1. GİRİŞ

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS), tıpkı Küresel Konum Belirleme Sistemi (GPS) gibi pek çok amaca hizmet eden ve çeşitli ülkelerin uydu tabanlı konum belirleme sistemlerini içeren şemsiye bir terimdir. GPS, başlangıçta Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Savunma Bakanlığı (DoD) tarafından askeri amaçlar için geliştirilmiş olsa da günümüzde pek çok kullanıcı navigasyon amacıyla araçlarında ya da mobil cihazlarında GPS uydularından destek almaktadır. Günlük ihtiyaçlara ek olarak, GPS sistemi birçok teknik ve bilimsel çalışmada da önemli bir role sahiptir. Tüm dünyada herhangi bir zamanda ve yerde üç boyutlu hassas konum bilgisi sağlayan bu sistem, haritalama faaliyetlerine, Dünya'nın tektonik hareketlerine ilişkin çalışmalara ve atmosferik yapının araştırmalarına büyük katkıda bulunmaktadır.

GPS sisteminin geliştirilmesinin ilk aşamasından bu yana yapılan çalışmalar, GPS istasyonlarının Dünya yüzeyine kapsamlı bir şekilde yerleştirilmesinin jeodezi ve jeodinamik alanındaki birçok çalışmayı geliştireceğini açıkça ortaya çıkarmıştır ve bu durum, GPS alıcısının koordinatlarının belirlenmesinde elde edilen yüksek doğruluk seviyesi kazanımına yol açmıştır. Başlangıçta GPS gözlemleri genel olarak 30 saniye veya daha düşük bir örneklem aralığında elde edilir, toplanan bu gözlemler günün sonunda konum bilgisi elde etmek için birleştirilir, elde edilen çözümlerin koordinat ve zaman bilgileri ise daha sonrasında zaman serisi olarak işlenirdi. Bu sayede GPS sisteminin kabuk deformasyonları gibi uzun süreli ve büyük ölçekli jeofizik ve jeodinamik olayları izlemek ve incelemek için paha biçilmez bir araç olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak, deprem kaynağından yayılan dalgaların ürettiği çok daha büyük deplasmanlar, düşük örneklem aralığı ve günlük çözümlerden edilen zaman serilerinin düşük zamansal çözünürlüğüne sahip olması nedeniyle gözlenememiştir.

1990'lı yılların ortasından itibaren gelişen teknoloji sayesinde GPS alıcılarının veri depolama kabiliyeti ve örneklem aralığı artmış, gözlem verilerini yüksek örnekleme oranında ($\geq$1 Hz) kaydedip her bir gözlem dönemi (epok) için alıcı konumunu çözme yeteneğine sahip geleneksel jeodezik alıcılar ortaya çıkmıştır. Bu gelişmeler yüksek zamansal çözünürlüklü GPS verilerinin kullanılması ve alıcının gerçek-zamanlı kinematik konum bilgisi sağlaması olarak ele alındığında, GPS ile

Yapı Sağlığı İzlemeleri (YSİ) ve GPS-sismolojisi çalışma alanlarını ortaya çıkarmıştır.

Son yıllarda birçok çalışma, bir depremin neden olduğu sismik dalga formlarını birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar doğruluklarla tahmin etmede GPS sisteminin oldukça etkin bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, büyük depremlere yakın sismometreleri ve ivmeölçerleri yaygın olarak etkileyen doygunluk (saturation) sorunları olmaksızın, GPS tekniğinin önemli sismik parametrelerin (örneğin sismik moment ve büyüklük) elde edilmesinde söz konusu sensörlere oldukça güçlü bir alternatif olabileceğini ileri sürmüştür. Bununla birlikte, bir mühendislik yapısının deprem, heyelan, rüzgâr gibi bir doğal afet ya da trafik etkisi gibi yükler sonrası olası yatay veya düşey deformasyonunun yüksek hassasiyetteki tespitinin ilgili sensörler ile sağlanması oldukça zahmetlidir. Söz konusu analizleri gerçekleştirmek ve mümkün olduğunca iyi sonuç elde etmek için son 20 yılda iyi bilinen ve günümüzde sıklıkla kullanılan GPS veri işleme stratejileri (rölatif konum belirleme ve hassas nokta konumlama) geliştirilmiştir.

1.1. Literatür Çalışması

GNSS Tekniği, 1979-1980 yıllarında yapılan önemli çalışmalar ile 30 sn aralıkla konum bilgisi toplayarak, hassas konum bilgisi ve yüzey deformasyonlarının belirlenmesine olanak sağlamış ve bilim dünyasında oldukça önemli bir hale gelmiştir. GNSS tekniği ile hem statik hem de hareket eden nesneler üzerinde ölçüm yapabileceği ve birkaç saniye içinde cm mertebesinde koordinat bilgisi sağlanabileceği ispat edilmiştir [MacDoran, 1979], [Counselman and Shapiro, 1979], [Bossler et al., 1980], [Reomondi ,1985]. Hirahara et al., sismoloji alanında kinematik GPS'in önemini vurgulamak için "GPS-sismolojisi" terimini ortaya atmıştır [Hirahara et al., 1994]. Ancak dinamik hareketlerin algılanması, sismik dalgaların toplanması ve yapı sağlığı izlemeleri veya deprem/tsunami erken uyarı sistemlerinde kullanılacak olan GNSS alıcıları için 30 sn. örneklem aralığı yetersizdir. Günümüzde geliştirilen 1 Hz-100 Hz arasında veri toplama ve depolama yeteneğine sahip olan GNSS donanımlarıyla aracılığı ile deprem kaynaklı yüzey hareketlerinin tespit edilmesi ve yapı sağlığı izleme çalışmaları karşımıza

çıkmaktadır [Kato et al., 2000], [Larson et al., 2003], [Avallone et al., 2011], [Moschas and Stiros, 2015], [Wang et al., 2016].

Rölatif (bağıl) GNSS yöntemi ile yapılardaki dinamik deplasman ölçmeleri, biri yapı üzerinde, diğeri ise yakındaki bir referans istasyonunda ya da koordinatı önceden bilinen bir nokta üzerinde olmak üzere en az iki GNSS alıcısı ile gerçekleştirilmektedir. GNSS ile rölatif konum belirleme doğruluğu, GNSS sinyalinin kalitesi, gözlenen uydu sayısı ve geometrisi ile alıcılar etrafındaki çevresel faktörler gibi etkenlere bağlı olarak santimetre seviyesindedir. Rölatif kinematik GPS yönteminin performansı yüksek yapıların [Çelebi, 2000], [Tamura et al., 2002], [Kijewski-Correa et al., 2006], [Li et al., 2006], [Breuer et al., 2008], [Park et al., 2008], [Yigit et al., 2010], [Pehlivan et al., 2013], [Yi et al., 2013a], uzun açıklıklı asma köprülerin [Nakamura, 2000], [Xu et al., 2002], [Roberts et al., 2004], [Erdoğan et al., 2007], [Meng et al., 2007], [Yi et al., 2013b], orta açıklıklı [Meo et al., 2006], [Yu et al., 2014] ve kısa açıklıklı köprülerin [Moschas and Stiros, 2011],[Moschas and Stiros, 2014], [Psimoulis and Stiros, 2013] dinamik davranışlarının belirlenmesinde test edilmiştir. Bu çalışmalara ilave olarak, kinematik GPS in yapı sağlığı izleme uygulamalarındaki performansları doğruluk açısından deneysel çalışmalar yapılarak da araştırılmıştır [Chan et al., 2006], [Nickitopoulou et al., 2006], [Psimoulis et al., 2008], [Psimoulis and Stiros 2008], [Wang et al., 2012]. Larson et al., 2002 yılında meydana gelen Mw 7.9 büyüklüğündeki Denali depreminin oluşturduğu sismik dalgaların 1 Hz örneklem aralığına sahip Kinematik GNSS yöntemi ile başarılı bir şekilde toplanılabileceğini ispat etmiştir [Larson et al., 2003]. Söz konusu bu çalışmaların açtığı yol sayesinde, günümüzde yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS çalışmaları birbirini takip etmiş ve bu çalışmalar, yüksek zamansal çözünürlüklü rölatif GNSS tekniğinin yatayda 1-2 mm, düşeyde ise 1 cm doğrulukla dinamik davranışları belirlemeye imkân sağladığını ileri sürmüşlerdir [Ji et al., 2004], [Genrich and Bock, 2006], [Ning et al., 2009], [Wang et al., 2012].

Büyük (mega) depremlerin yaşanması durumunda rölatif yöntem için sabit nokta şartının sağlanamaması deprem kaynaklı yer sarsıntılarının rölatif yöntemle belirlenememesine sebep olmaktadır. Bu durumdan dolayı Kinematik GNSS tekniğinin erken uyarı sistemleri için tespit edilmesi zorunlu olan mutlak deplasman hareketlerinin yakalanması konusunda başarısız olacağı açıktır [Shu et al., 2017]. Tek bir GNSS alıcısının konum bilgisini başka bir referans alıcısına gerek duymaksızın yüksek doğrulukla hesaplayabilen Hassas Nokta Konumlama (PPP)

tekniği oldukça güçlü bir yöntemdir ve tüm sistematik hataların modellenmesi ve düzeltilmesi durumunda GNSS-PPP'nin rölatif konum belirleme ile aynı hassasiyete sahip olduğu ortaya atılmıştır [Malys and Jensen, 1990], [Zumberge et al., 1997], [Kouba and Heroux, 2001]. Burada PPP hassasiyetiyle ifade edilmek istenen şey, 20-30 dakika boyunca yüksek zamansal çözünürlükte veri toplayıp, faz başlangıç belirsizliğinin yakınsaması gerçekleştikten sonra hesaplanan GNSS istasyonu koordinatlarının tekrar edilebilirliğidir [Kouba and Heroux, 2001], [Xu et al., 2013]. PPP yönteminin herhangi bir referans alıcıya ihtiyaç duymaması rölatif yöntem ile kıyaslandığında büyük bir avantaj sağlamaktadır. PPP yöntemi, hassas konum bilgisi üretmek için hassas uydu yörünge bilgisi, uydu saat hataları düzeltmeleri, katı yer yuvarı gelgitleri gibi ürünlere ihtiyaç duymaktadır. Rölatif konum belirlemenin aksine, PPP tekniği ile konum belirlemede başlangıç tam sayı faz belirsizliği bilinmeyen olarak alındığından santimetre mertebesinde konum bilgisi sağlamak için ölçü süresinin uzun olmasına ihtiyaç vardır.

Kouba, büyük depremlerin ürettiği sismik dalgaların, yüksek zamansal çözünürlüklü PPP tekniği ile 1 sn aralıklı veri toplayarak tespit edilebildiğini ifade etmiştir [Kouba, 2003]. İlerleyen yıllarda 10 Hz örnekleme aralığına sahip GPS verileri Kinematik-PPP tekniği ile değerlendirilmiş ve diğer sensör verileri ile karşılaştırıldığında kinematik PPP yönteminin yaklaşık 1 cm seviyesinde bir doğruluğa ulaştığı bildirilmiştir [Avallone et al., 2011]. Hefty and Gerhatova, yatay harmonik hareket üretebilen bir mekanik aletin üzerine GNSS anteni monte etmiş, 1 Hz örneklem aralığında toplanan GPS verileri PPP yöntemi ile değerlendirmiş ve sonuçlar filtrelenmiştir. Değerlendirmeler sonunda kuzey bileşeninde 5.1 mm, doğu bileşeninde 7.7 mm ve yükseklik bileşeninde ise 11.8 mm karesel ortalama hata değerleri elde edilmiştir [Hefty and Gerhatova, 2012]. Sismik dalgaların tespit edilmesinde 50 Hz örneklem aralığında GNSS-PPP yönteminin uygulanabilirliğini göstermek için, 2010 yılında Wuhan Üniversitesinde bir dizi deney yapılmış ve bu deney sonucunda yüksek zamansal çözünürlüklü PPP yönteminin yatayda 2-4 mm, düşeyde ise cm altında doğrulukla sismik dalgaları yakaladığı belirlenmiştir [Xu et al., 2013]. Yigit, Yigit and Gurlek, yüksek zamansal çözünürlüklü Kinematik GNSS-PPP tekniğinin yatay ve düşey yönlü dinamik hareketleri izleyebilme performansını esnek çubuk modelleri kullanarak ve 10 Hz örneklem aralığına sahip GNSS alıcısı ile veri toplayarak test etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, rölatif yöntem ile karşılaştırılmış ve yüksek zamansal çözünürlüklü kinematik PPP tekniğinin çok kısa

bir sürede yatay ve düşey yönlü deplasmanları yakalayabildiğini ortaya çıkarmışlardır [Yigit 2016], [Yigit and Gurlek, 2017].

Geleneksel-PPP yönteminde zaman içerisinde meydana gelen tüm gelişmelerine rağmen, geleneksel-PPP yaklaşımındaki yakınsama süresi hala önemli ölçüde uzundur. Başlangıç faz belirsizliğinin tamsayı olarak çözülememesi iki olumsuz etkiye neden olmaktadır. İlk olarak, belirsizlik parametrelerinin yakınsaması oldukça uzun zaman alır. İkincisi, kesirli sayı ile tam sayı arasındaki fark olarak tanımlanan kesirli belirsizlik bölümü, belirsizlik yakınsamasından sonra bile hala kesirli sayı olarak kalır. Ayrıca, kesirli belirsizlik bölümü koordinatlar ve troposferik gecikme gibi diğer parametrelerin doğruluklarını azaltacaktır. Bu iki sınırlamanın üstesinden gelmek için, 2000'li yılların başından beri PPP tamsayı belirsizlik çözümüne yönelik daha fazla çaba gösterilmiştir. Gao and Shen, PPP belirsizliklerinin tamsayı özelliğini araştırmak için bir P1-P2-CP modeli önermiştir [Gao and Shen, 2002]. Bu model, PPP'de tamsayı belirsizlik çözünürlüğü sağlamak için belirsizliği sabitleme yöntemini ileri sürümüştür. Bununla birlikte, PPP tamsayı belirsizlik çözümünü sınırlayan faktör teorik bir şekilde açıklanmadığından, çözülen tamsayı belirsizliği her zaman yeterli güven ile doğru değildir. Başka bir deyişle, başlangıç belirsizliğinin tamsayı özelliği teorik olarak geri kazanılamamaktadır.

2000'li yılların ortasında başlayan çalışmalar ile araştırmacılar, başlangıçtaki artık faz biaslarını kalibre ederek PPP başlangıç tam sayı belirsizliği problemini çözmeye odaklanmışlardır. Wang and Gao, uydu ve alıcıdaki faz biaslarını sıfır ve uydu biası sıfır ama alıcı faz biası sıfır olmayan iki durumu simule etmiştir [Wang and Gao, 2006]. Simule edilen sonuçlar, başlangıç tamsayı belirsizliği çözümünün bazı ideal koşullar altında mümkün olabileceğini ve buna bağlı olarak belirsizliğin çözümü ile konumlandırma doğruluklarının önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, Wang and Gao, alıcı ve uydu fazı biaslarını büyüklüğünü araştırmışlardır [Wang and Gao, 2007]. Sonuçlar, alıcılar arasındaki tekli farklarda faz biaslarının stabil olmadığını ancak uydular arasındaki tekli farklarda ortaya çıkan faz biaslarının ardışık birkaç gün boyunca sabit olduğunu ileri sürmüştür. Sonuç olarak, uydu biasları kalibre edilebildiğinde, uydular arasındaki tekli farkların başlangıç tamsayı belirsizliği çözümüne olanak sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Wang, uydular arası tekli farklar yöntemini gerçek veri kümelerine uygulamış, uydu geniş bantlı (WL) ve dar bantlı (NL) faz biaslarının kalibrasyonunun ardından PPP tekniğinin başlıca problemlerinden biri olan başlangıç tamsayı belirsizliği çözümünü

önemli ölçüde geliştirilmiş ve yöntemin konumlandırma doğruluğu yükselmiştir [Wang, 2009].

Ge et al., tekli farklar çözümünde alıcı biaslarını elemine ederek oluşturulan "Uydular Arası Tekli Farklar" (SDBS) yöntemini önermiştir [Ge et al., 2008]. Bu yöntemde, tamsayı özelliğinin sağlanması için fractional-cycle bias (FCBs)'lar uyduların geniş ve dar bantlarında düzeltilmektedir. Collins, "Ayrıştırılmış Saat Modeli"ni ortaya atmış ve faz başlangıç belirsizliğinin kesirli kısmının oluşmasında kod biaslarının da etkisi olduğunu kanıtlamıştır [Collins, 2008]. Bu modelde, uydu ayrıştırılmış saat düzeltmeleri kullanılarak ve alıcı ayrıştırılmış saat parametreleri tahmin edilerek hem geniş bant aralığındaki undifferenced integer (N4) hem de N1 faz başlangıç değeri doğrudan elde edilmektedir. Laurichesse et al., kod ve faz gözlemleri için farklı saat terimlerini içeren "Tamsayı Faz Saati" modelini geliştirmiştir [Laurichesse et al., 2008]. Bu model, geniş bant aralığındaki belirsizlik değerini çözebilmek için wide-lane satellite bias (WSB) düzeltmelerini kullanmakta ve N1 ambiguity değerini tam sayı olarak doğrudan çözebilmektedir. Shi and Gao, söz konusu bu üç yöntemin birbirine göre üstünlüklerini ve eksi yönlerini teorik olarak araştırmışlardır [Shi and Gao, 2014]. Bunun yanında çoklu-GNSS sistemlerinin PPP-AR (Ambiguity Resolution) yöntemine olan katkısını statik yöntemle araştıran bazı çalışmalar mevcuttur [Katsigianni et al., 2019a], [Katsigianni et al., 2019b], [Li et al.,2020]. Bezcioglu vd. ve Bezcioglu et al., Antarktika Yarımadasında bulunan Livingston Island'da bir Zodyak botu ile iki farklı günde statik ve kinematik GNSS ölmeleri gerçekleştirmiş, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniği ile işlenen GNSS verileri rölatif konum belirleme tekniği ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP yöntemine olan üstünlüğünü açıkça göstermiştir [Bezcioglu vd., 2019a], [Bezcioglu et al., 2019b]. Pan et al., Wuhan üniversitesinin yayınladığı ultra-rapid ve final bias ürünlerini kullanarak 146 istasyonun 30 saniye aralıklı GPS verilerini, temel olarak SDBS yöntemini kullanan Pride PPP-AR yazılımı ile M_w 7.1 büyüklüğündeki Ridgecrest, California depreminin tespiti amacıyla değerlendirmiş ve ultra-rapid ürünlerinin başarılı bir şekilde deprem kaynaklı hareketleri yakalayabildiğini öne sürmüşlerdir [Pan et al., 2020].

Son 20 yılda yapılan çalışmalara bakıldığında çift-frekanslı PPP çözümleri ile statik modda mm, kinematik modda ise cm mertebesine ulaşıldığı görülmektedir [Li et al., 2011], [Li et al., 2013a]. Alıcı donanımları ve veri işleme teknolojilerinin

gelişmesi ile birlikte L1 sinyalini kullanarak metre hassasiyetinde çözüm üreten, tek-frekanslı ve düşük maliyetli GPS/GNSS alıcıları geliştirilmiş olup, oldukça yaygın bir şekilde navigasyon uygulamalarında kullanılmaktadır [Ovstedal, 2002], [Montenbruck, 2003], [Mosavi and Azarbad 2013], [Tsakiri et al., 2018] .Düşük maliyetli konumlama teknikleri 1990'ların sonunda OEM tipi alıcıların tanıtılması ile ortaya çıkmıştır [Masella et al., 1997], [Söderholm, 2005], [Saeki and Hori, 2006]. Çift-frekanslı GNSS alıcıları ile karşılaştırıldığında tek-frekanslı GNSS sadece maliyet olarak değil, aynı zamanda batarya tüketimi olarak da oldukça ekonomiktir. Bu gelişmelerin ışığında tek-frekanslı GPS/GNSS-PPP geliştirilmiş olup bazı çalışmalarda söz konusu bu yöntemin konum belirleme performansı araştırılmıştır [Cai, 2009], [Cai et al., 2013], [Li et al., 2013b], [Sterle et al., 2015], [Choy, 2009], [de Bakker and Tiberius, 2016], [Pan et al., 2017], [Farah, 2017], [Odolinski and Teunissen, 2017], [Nie et al., 2020].

Bu çalışmaların yanı sıra tek-frekanslı GNSS alıcıları ile toplanılan veriler hem rölatif hem de PPP yöntemi ile değerlendirilerek deprem kaynaklı yer hareketlerinin tespit edilmesinde kullanılmıştır. Li et al., M_w 8.0 büyüklüğündeki Wenchuan, M_w 9.0 büyüklüğündeki Tohoku-Oki ve M_w 6.6 büyüklüğündeki Lushan yer sarsıntılarını belirlemek için tek-frekanslı 1 Hz örneklem aralığına sahip GPS alıcısı kullanmış, verileri gerçek-zamanlı olarak önerdikleri mutlak hız tespiti modeli ile değerlendirmiş ve önerilen yöntemin yatayda 1-2 mm/s ile sarsıntı hızlarının belirlenebileceğini ifade etmişlerdir [Li et al., 2015]. Guo et al., M_w 7.6 büyüklüğündeki Nicoya yarımadasındaki yer sarsıntısını tespit etmek için tek-frekanslı 5 Hz örneklem aralığına sahip GPS alıcısı kullanmış, verileri gerçek-zamanlı olarak değerlendirmiş ve tek-frekanslı GNSS alıcılarının sismik dalgalarının belirlenmesinde kullanılabileceğini ortaya çıkarmıştır [Guo et al., 2015]. Chen et al., 2011 yılında gerçekleşen M_w 9.0 büyüklüğündeki Tohoku depremini tespit etmek için tek-frekanslı 1 Hz örneklem aralığında GPS alıcısı kullanmış, verileri önerdikleri yeni bir yöntem ve rölatif yöntem kullanarak değerlendirmiş, yatayda 2 cm düşeyde ise 3 cm hassasiyet ile söz konusu sarsıntıyı tespit etmişlerdir [Chen et al., 2015]. Tu et al., kinematik bir deney düzeneğinde tek-frekanslı GNSS alıcısı ve micro-electromechanical systems (MEMS) sensörlerini kullanarak topladığı verileri çift-frekanslı GNSS ve video kamera verileri ile karşılaştırmış, yatayda 2-3 cm doğrulukla yatay hareketleri söz konusu sistemin tespit edebildiğini ileri sürmüştür [Tu et al., 2013]. Chen et al., Longitudinal Valley Fault dinamik davranışlarını

incelemek için 55 adet düşük maliyetli tek-frekanslı CORS istasyonlarından elde ettikleri sonuçları 52 adet çift-frekanslı CORS istasyonu verileri ile karşılaştırmış ve iki sistem arasındaki farkların yatayda 3mm/yr, düşeyde ise 6 mm/yr olduğunu göstermiştir [Chen et al., 2019]. Huang and Wang, tek-frekanslı GPS ile deformasyonların belirlenmesinde kısa bazlarda iyonosfer hatasını elemine edecek yeni bir veri işleme stratejisi önermiş, bu yöntemi iki farklı köprü üzerinde gerçekleştirilen 24 saatlik GPS ölçüleri ile test etmişlerdir [Huang and Wang, 2015]. Lee et al., gerçek-zamanlı deformasyon belirleme çalışmaları için yeni bir veri işleme yöntemi önermiş, yeni veri işleme stratejisi ile yüksek zamansal çözünürlüklü L1-GNSS yönteminin performansını çift-frekanslı GNSS ölçüleri ile karşılaştırmış ve yöntemin gerçek-zamanlı olarak volkan hareketlerinin izlenmesinde kullanabileceğini öne sürmüşlerdir [Lee et al., 2015].

Cosser et al., rölatif yöntem ile elde ettiği tek- ve çift- frekanslı GPS ölçü sonuçlarını karşılaştırmış, köprü çökmesi ve titreşimlerinin izlenmesi çalışmalarında tek-frekanslı GPS yönteminin kullanılabileceğini fakat faz sıçraması ve başlangıç faz belirsizliğinin oldukça önemli bir sorun olduğunu vurgulamışlardır [Cosser et al., 2003]. Lee et al., tek-frekanslı GPS ile yapı sağlığı izleme çalışmalarındaki ölçü modelinin iyileştirilmesini araştırmış ve en az iki referans istasyonu gerekliğinden söz etmişlerdir [Lee et al., 2016]. Schaal and Lorocca, dar açıklıklı bir asma köprü üzerinde tek-frekanslı GPS ile ölçü toplamış, elde edilen çözümleri frekans ve zaman alanında deplasman dönüştürücüsü (KIOWA DT 100) sonuçları ile karşılaştırmış ve düşük bütçeli GPS alıcıları ile yapı sağlığı izlemelerinin mümkün olduğunu ileri sürmüşlerdir [Schaal and Lorocca, 2009]. Jo et al., yapı sağlığı izlemelerinde düşük bütçeli GPS alıcılarının performansını araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirmiş, 20-30 cm'e kadar düşük dinamik hareketlerin tek-frekanslı alıcılar ile yakalanabileceğini rapor etmişlerdir [Jo et al., 2013].

Günümüzde IGS ve çeşitli analiz merkezleri kullanıcılara File Transfer Protocol (FTP) aracılığıyla ultra-rapid, rapid ve final olmak üzere üç farklı şekilde hassas yörünge ve saat ürünleri sağlamaktadır [Kouba, 2009]. Rapid ve final ürünler, sırasıyla bir önceki Coordinated Universal Time (UTC) gününün bitiminden yaklaşık 17 saat ve çözüm haftasının bitiminden 13 gün sonra kullanıcılara sunulmaktadır ki bu da gerçek-zamanlı uygulamalar için kullanılamayacakları anlamına gelmektedir [Caissy et al., 2012]. Yakın gerçek-zamanlı uygulamalar için ultra-rapid ürünler mevcut olsa da doğruluğu yüksek hassasiyetli PPP uygulamaları için yeterince iyi

değildir. Ultra-rapid ürünleri genellikle 48 saati kapsamakta ancak gerçek gözlemler kullanılarak ürünlerin yalnızca ilk 24 saati oluşturulmaktadır. İkinci 24 saat ise ilk 24 saatlik gözlemler kullanılarak tahmin edilmektedir [Wang et al., 2018]. Gerçek-zamanlı ve yüksek hassasiyetli konum bilgisi elde etme ve bu alandaki uygulamalara yönelik artan ihtiyaçları karşılamak için 2001 yılında IGS çatısı altında Real-Time Working Group (RTWG) kurulmuştur [Caissy and Agrotis, 2011]. 2007 Yılında ise Real-Time Pilot Project (RTPP) adlı projesini başlatan IGS, 2013 yılından bu yana Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) ve Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) temelli GPS ve GLONASS uydu takımlarına yörünge ve saat düzeltmeleri sağlayarak IGS ürünlerine gerçek-zamanlı erişim gerektiren uygulamaları destekleme kabiliyetini genişletmiştir [Chen et al., 2018]; [Liu and Wang, 2014]; [Wang et al., 2018]. IGS'e ek olarak Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), European Space Agency (ESA) gibi çeşitli analiz merkezleri de GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu takımlarına gerçek-zamanlı uydu ve yörünge desteği sağlamaktadır. Söz konusu bu ürünler yörünge ve saat biaslarını hesaplamak için dünya çapındaki IGS istasyonlarının gözlem verilerinden yararlanmakta ve kullanıcılara yaklaşık 25 sn'lik bir zaman gecikmesi ve 0.1 ns–0.3 ns doğrulukla yayın yapmaktadır [Wang et al., 2020].

Gerçek-zamanlı (RT) ürünler, GPS sistemine yörünge bilgisi için 5 cm ve saat bilgisi için 0.3 ns doğrulukta destek vermektedir [Hadas and Bosy, 2015]; [Liu and Wang, 2014]. Bununla birlikte gerçek-zamanlı ürünlerin kinematik ve statik moddaki doğruluklarının test edildiği çalışmalar mevcuttur. [El-Diasty and Elsobeiey, 2015]; [Wang et al., 2019]; [Nie et al., 2018]; [Elsobeiey and Al-Harbi, 2016]; [Nie et al., 2019]. Ayrıca RT-PPP yöntemi, deprem/tsunami erken uyarı sistemleri ve yapı sağlığı izleme çalışmaları için oldukça önemli bir tekniktir [Takahashi et al., 2014]; [Tang et al., 2017]; [Tu et al., 2017]. Li et al., RT-PPP tekniğinin ko-sismik deformasyonları tespit edebilme kabiliyetini El Mayor-Cucapah depremi verileri ile incelemişlerdir. Çalışmada 5 Hz örneklem aralığını sahip GPS gözlemleri kullanılmış, gerçek-zamanlı ürünler ise German Research Centre for Geosciences (GFZ)'nin EPOS-RT yazılımı ile simülasyon sonucu elde edilmiştir. Çalışmanın sonuçları RT-PPP tekniğinin uygulanabilirliğini açık bir şekilde ortaya çıkarmıştır [Li et al., 2013]. Capilla et al., RT-PPP tekniğinin deformasyon izlemelerinde kullanılabilirliğini 1 Hz örneklem aralığına sahip bir alıcı ile araştırmış ve yöntemin ± 2 cm hassasiyetle 5 cm'ye kadar olan deformasyonları tespit edebileceğini ifade

etmişlerdir [Capilla et al., 2016]. Tang et al., 10 Hz ve 20 Hz örneklem aralığında veri toplayabilen GNSS alıcıları ile RT-PPP tekniğinin köprü izlemelerindeki performansını değerlendirmiş ve yöntemin rölatif yönteme güçlü bir alternatif olabileceğini ileri sürmüşlerdir [Tang et al., 2017]. Zheng et al., M_w 7.9 büyüklüğündeki Alaska depreminin verilerini tek-frekanslı 1 Hz örneklem aralığındaki GPS gözlemleri ile değerlendirmiş ve çalışmada RT-PPP çözümleri için kullanılan ürünler EPOS-RT yazılımı ile simülasyon sonucu elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda tek-frekanslı RT-PPP tekniğinin üç bileşen için sırasıyla 4.8, 5.4 ve 7.3 mm hassasiyetinde ko-sismik deformasyonları tespit edebildiğini ileri sürmüşlerdir [Zheng et al., 2019]. Li et al., M_w 6.5 büyüklüğündeki Jiuzhaigou depremi sırasında kaydedilen 1 Hz örneklem aralığındaki GPS, GLONASS ve BeiDou gözlemlerini GFZ istasyonundan elde edilen gerçek-zamanlı ürünler ile değerlendirmiş ve çoklu-GNSS RT-PPP tekniğinin deprem kaynaklı güçlü yer sarsıntılarını yakalama konusunda etkili bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir [Li et al., 2019]. Su and Jin, anlık hız ve ivme tespiti için Dynamic-PPP adlı bir model önermişler ve bu modelin deprem erken uyarı ve hızlı risk değerlendirme çalışmaları için fayda sağlama potansiyeline sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir [Su and Jin, 2020].

Geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri hassas yörünge, saat ve bias ürünlerine ihtiyaç duyduğu için post-process (değerlendirme sonrası) tabanlıdır. Bu da verilerin gerçek-zamanlı olarak analiz edilmesine olanak sağlamamaktadır. Buna ek olarak, Real-Time Services (RTS) ürünlerinin de belirli sınırlamaları vardır. RTS ürünleri, büyük miktarda yer gözlemi kullanılarak elde edildiğinden, çok fazla bilgi işlem kaynağı gerektirir. Aynı zamanda, kullanıcı ile iletişim (internet) zayıf olduğunda ve/veya RTS verileri alınamadığında, RT-PPP uygulaması ciddi şekilde etkilenmektedir [Nie et al., 2018]. İnternet akışı üzerinden kullanıcıya sağlanan gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmelerine dayanan RT-PPP tekniğinin sahip olduğu sınırlamalar, geostationary (GEO) uydularının sahip olduğu L bandı aracılığıyla kullanıcılara düzeltmeler sağlayabilen Trimble Real-Time eXtended (RTX) destekli RT-PPP servisleri gibi teknolojiler ile aşılabilmektedir. Ancak, anlık olarak düzeltme gönderen sistemlerden biri olan RTX tekniğinin ücretli olması saha maliyetlerini arttırmaktadır. İkinci-Nesil SBAS Sistemi (Second-Generation Satellite-Based Augmentation System) ise tek nokta konumlandırmanın (SPP) konum belirleme performansını iyileştirmek amacıyla GNSS sisteminin uydu

gözlemlerini farklı bölgelerde kullanılan bir sistemdir. SBAS sistemleri, GPS için L1/L5 ve Galileo uydu takımı için E1/E5a frekanslarına doğru ve güvenilir düzeltmeleri (yörünge ve saat düzeltmeler, bölgesel iyonosferik düzeltmeler) kullanıcılara iletmek için GEO uydularını kullanmakta ve gerçek-zamanlı veri elde etmeyi ücretsiz olarak sağlama imkânı sunmaktadır. Söz konusu sistemin statik modda konum belirleme performansı birkaç çalışmada test edilmiştir [Sobreira et al., 2018], [Barrios et al., 2018], [Cogdell et al., 2018], [Khaki and El-Mowafy, 2020], [Wu et al., 2020]. Bu çalışmaların yanı sıra El-Mowafy et al., ikinci-nesil SBAS sisteminin kinematik modda performansını test etmiştir. Bu çalışmada, üzerine GNSS alıcısı monte edilmiş bir araç, yüksek binaların bulunduğu şehir içi, yüksek ağaçların yoğunlukla bulunduğu ormanlık alan ve uydu görüşünün açık olacağı bir otoyol üzerinde bir güzergahı takip etmiştir. Ölçüler L1/L5 olarak toplanmış ve sonuçlar L1 ve L1/L5 olarak bir yazılım yardımı ile ikiye bölünmüştür. Elde edilen gerçek-zamanlı ikinci-nesil SBAS sistemi sonuçları, geleneksel-PPP sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ormanlık alanlarda metreye varan doğruluklar elde edilirken, uydu görüşünün açık olduğu alanlarda dm hassasiyetinde doğruluk elde edilmiştir [El-Mowafy et al. 2019a].

Geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemleri ile GNSS alıcısının zamana bağlı yer değişimleri belirlenmektedir. Colosimo et al., tarafından ortaya atılan VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) yaklaşımı ise anlık olarak elde edilen ham GNSS ölçülerinin yayın efemeris bilgileri yardımı ile epok-epok farklarını alarak GNSS alıcısını hız ölçer olarak kullanmakta ve bu sayede söz konusu alıcının zamana bağlı hız değişimlerini, RT-PPP tekniğinin aksine herhangi bir internet bağlantısı gerektirmeden belirleyebilmektedir [Colosimo et al., 2011]. VADASE yaklaşımı, tek- veya çift-frekanslı olarak anlık hız bilgisini gerçek-zamanlı sağlamaktadır. VADASE yaklaşımının GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performansını test eden bazı çalışmalar güncel literatürde mevcuttur [Benedetti et al., 2014], [Hung et al., 2017], [Fratarcangeli et al., 2018]. Li et al., M_w 9.0 büyüklüğündeki Tohoku-Oki depremi sırasında toplanan 1 Hz örneklem aralığındaki GPS verilerini Temporal Point Positioning (TPP), Varyometrik Yaklaşım (VA) ve geleneksel-PPP tekniği ile değerlendirmiş, TPP ve VA tekniklerinin PPP yöntemi kadar güvenilir olduklarını vurgulamışlardır [Li et al., 2014]. Geng et al., M_w 7.8 büyüklüğündeki Nepal depremi sırasında toplanan gözlemler ile GPS-VA yaklaşımına BeiDou sisteminin katkısını araştırmış ve çoklu-GNSS VA yönteminin

etkinliğinin ifade etmişlerdir [Geng et al., 2016]. Shu et al., iki büyük deprem sırasında kaydedilen 50 Hz örneklem aralığına sahip tek-frekanslı GPS verilerini kullanarak deprem kaynaklı deplasmanları tahmin etmek için VA tekniğinin performansını incelemiş ve VA yönteminin sonradan-değerlendirme PPP tekniğine kıyasla Doğu, Kuzey ve yukarı bileşenlerde sırasıyla 4.0, 2.0 ve 7.0 cm'ye kadar doğrulukla sismik yer değiştirmeleri tahmin edebildiğini göstermişlerdir (Shu et al., 2018a). Shu et al., VA yöntemi kullanılarak elde edilen 1 Hz örnekleme hızındaki deplasman ve hız bilgisi ile 200 Hz örnekleme hızındaki ivme verisinden elde edilen deplasman ve hız değerlerinin entegrasyonuna dayanan yeni bir yöntem ileri sürmüş ve bu yaklaşımın daha kesin hız ve deplasman bilgisi sağlayabildiğini ifade etmişlerdir (Shu et al., 2018b). Zang et al., farklı analiz merkezleri tarafından üretilen yayın efemerisi bilgileri ile VA tekniğinin sismoloji alanındaki performansını 1 Hz örneklem aralığı ile farklı uydu kombinasyonları açısından da test etmiş, CNES ürünlerine dayalı çoklu-GNSS VA tekniğinin üstünlüğünden söz etmişlerdir [Zang et al., 2020]. Zhang et al., RTS ve Center for Orbit Determination in Europe (CODE) ürünlerine dayalı TPP tekniğini ve Boradcast ürünlerine dayalı VA yönteminin ko-sismik hareketleri tespit edebilme alanında değerlendirmiş, TPP tekniğinin VA tekniğinden kısmen daha iyi olduğunu vurgularken yöntemlerin hızlı risk değerlendirmesi ve deprem erken uyarı sistemlerini desteklemek için güçlü bir araç olduklarını vurgulamışlardır [Zhang et al., 2021]. Branzanti et al., VADASE yaklaşımında birtakım değişikliler yaparak Kin-VADASE yöntemini ortaya koymuş ve bu metodun kinematik uygulamalarda da kullanılabileceğini ifade etmiştir [Branzanti et al., 2017]. Fortunato et al., VADASE yaklaşımının dinamik hareketleri tespit etmesindeki performansını incelemek amacıyla android tabanlı akıllı telefon ile 1 Hz aralığında veri toplamış, toplanan veriler VADASE ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar VADASE yönteminin düşük titreşimdeki hareketleri yakalayabileceğini göstermiştir [Fortunato et al., 2019].

1.2. Tezin İçeriği ve Amacı

Varyometrik yaklaşım ile ilgili bölüm 1.1'de listelenen çalışmaların birçoğu en fazla 1 Hz örnekleme oranı ile toplanmış verilerle deprem ya da bir aracın hızının ve rotasının belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca bu çalışmalarda VA sonuçları

çift-frekanslı GPS veya GPS/Galileo gözlemlerine dayalı gerçek-zamanlı şartlar altında sonradan değerlendirilerek elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında yukarıda ifade edilen çalışmalardan farklı olarak varyometrik yaklaşımın gerçek-zamanlı şartlar altında tek-frekanslı gözlemlerle dinamik hareketleri tespit edebilme yeteneği yapı sağlığı izlemele ve GNSS-sismolojisi uygulamaları açısından ele alınmış ve tek-frekanslı (SF)-VA yaklaşımına Galileo gözlemlerinin katkısı araştırılmıştır. Çalışmayı bu alandaki diğer araştırmalardan ayıran en önemli özelliklerden biri de varyometrik yaklaşımın gerçek-zamanlı şartlarda sonradan-değerlendirme performansına ek olarak çift-frekanslı gözlemlere dayalı anlık, yani gerçek-zamanlı olarak dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğinin ortaya çıkarılması ve çoklu-GNSS gözlemlerinin gerçek-zamanlı VA tekniğinin dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğine olan katkısının incelenmesidir.

Mevcut literatürde bulunan çalışmalarda RT-PPP yönteminin yapı sağlığı izlemeleri alanında çalışılmadığı, GNSS-sismolojisi alanındaki çalışmalarda ise gerçek-zamanlı şartlar altında sonradan değerlendirildiği görülmektedir. Bu durum RT-PPP yönteminin anlık olarak gerçek-zamanlı bir şekilde yapısal titreşimleri belirleyebilme kabiliyetinin araştırılamaya açık bir alan olduğunu göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında literatürde yapılmış olan çalışmalardan farklı olarak, sarsma tablası üzerinde bir dizi yüksek-frekanslı titreşimler ve deprem yer hareketleri üretilmiş, 20 Hz örneklem aralığında IGS gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmeleri, GPS gözlemlerine dayalı olarak toplanmıştır. Böylece RT-PPP yönteminin yapısal ve deprem kaynaklı titreşimleri belirleyebilme potansiyeli ortaya çıkarılmıştır.

Jeodezik çalışmalarda kullanılan çift-frekanslı GPS alıcıları yaklaşık olarak 10000 $ veya daha fazlası iken, tek-frekanslı alıcılar bu miktarın yalnızca bir kısmına, yani 1000 $ veya altına mal olmaktadır [Lee et al., 2015]. Bölüm 1.1'de listelenen çalışmalarda tek-frekanslı PPP yöntemi genellikle deprem izleme amaçlı ve en fazla 1 Hz örneklem oranlı GNSS verileri ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı gerçek-zamanlı ürünlerin tek-frekanslı PPP tekniğine olan etkisinde de henüz söz edilmemiştir. Bu durum RT SF-PPP yönteminin 0.5 Hz ve daha yüksek-frekanslı davranışları, özellikle de yapısal titreşimleri belirleyebilme kabiliyetinin araştırılamaya açık bir alan olduğunu ve farklı gerçek-zamanlı ürünlerin yönteme olan etkisinin incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında literatürde yapılmış olan çalışmalardan farklı olarak sarsma tablası üzerinde bir dizi

yüksek-frekanslı titreşimler ve deprem yer hareketleri üretilmiş, 20 Hz örneklem aralığında toplanan GPS gözlemleri farklı gerçek-zamanlı ürünlere dayalı SF-PPP tekniği ile çözülerek yönteminin yapısal ve deprem kaynaklı titreşimleri belirleyebilme potansiyeli araştırılmıştır. Böylelikle SF-PPP yönteminin araştırılmamış bir yönü, yani yöntemin yüksek-frekanslı titreşimleri yakalayabilme kabiliyeti ortaya çıkarılmıştır.

Güncel literatür incelendiğinde görülmektedir ki tek- ve/veya çift-frekanslı ikinci nesil-SBAS sisteminin yapı sağlığı izlemeleri ve GNSS-sismolojisi alanındaki performansı henüz test edilmemiştir. Bu çalışma kapsamında mevcut çalışmalardan farklı olarak, sarsma tablası üzerinde yüksek-frekanslı titreşimler ve deprem yer hareketleri üretilmiş, 20 Hz örneklem aralığında GPS verisi toplanmıştır. Toplanan veriler sonradan değerlendirilerek hem tek-frekanslı hem de çift-frekanslı ikinci-nesil SBAS sisteminin yapısal ve deprem kaynaklı titreşimleri belirleme performansı ilk defa araştırılmış ve incelenmiştir. Bu tez çalışması ile ikinci-nesil SBAS sisteminin araştırılmamış bir yönü ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmayı öne çıkaran bir diğer özellik ise ikinci nesil-SBAS tekniğinin dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğinin farklı gerçek-zamanlı ürünler ile karşılaştırmalı olarak incelenmesidir.

Literatürde geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin dinamik hareketleri tespit edebilme performansı karşılaştırmalı olarak henüz test edilmemiştir. Bir mühendislik yapısının yükler altındaki davranışlarının veya deprem yer hareketlerinin olay sonrası detaylı incelenmesinde geleneksel-PPP ve PPP-AR yaklaşımlarının etkinliği ve dinamik hareketleri tespit edebilme kabiliyetleri henüz detaylı olarak incelenmemiştir. Bu tez çalışması kapsamında, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin yüksek zamansal çözünürlüklü kinematik uygulamalarda, özellikle yapısal ve yer sarsıntısı kaynaklı titreşimleri yakalayabilme kabiliyeti ve PPP-AR tekniğinin geleneksel PPP yönteminden üstün bir yanının olup olmadığı detaylı bir şekilde incelenmiştir.

İlgili literatür incelendiğinde görülmektedir ki, çalışmanın mevcut literatüre sağlayacağı katkı oldukça yüksektir. Jeodezik GNSS alıcılarının çift-frekanslı olması veya anlık düzeltme gönderen sistemlerin (TUSAGA-Aktif, Trimble-RTX, vb.) ücretli olması saha maliyetlerini arttırmaktadır. Yapı sağlığı izleme ve deprem erken uyarı sistemlerinin tek-frekanslı alıcılardan oluşması veya kullanıcılara anlık olarak ücretsiz konumlama imkânı sağlayan ikinci nesil-SBAS gibi sistemlerinin kullanılması durumunda ölçü maliyetleri kayda değer bir şekilde azalacaktır.

Bununla birlikte, TUSAGA-Aktif sisteminin 1 Hz destekli çözüm sağlaması ve yüksek zamansal çözünürlüklü çözüm olanağı sunan Trimble-RTX, vb. gibi sistemlerin ise ücretli olması VA/VADASE ve IGS destekli RT-PPP yaklaşımlarının harmonik salınımları belirleme kabiliyetinin araştırılmasının gerekliğini ortaya koymaktadır. Bu tez çalışmasının temel amaç ve hedefleri aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır;

- Tek- ve çift-frekanslı VA/VADASE yönteminin gerçek-zamanlı olarak yerkabuğu ve mühendislik yapılarındaki titreşimleri belirleyebilme kabiliyeti ortaya çıkarılacaktır. Bu şekilde hem standart hem de düşük maliyetli VADASE özellikli tek bir alıcının deprem, doğal afet veya mühendislik yapılarının sürekli izlemesinde ve erken uyarı sistemlerinde kullanılmasında etkili bir yöntem olup olmadığı ortaya konulacaktır. Buna ek olarak yönteme çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı araştırılacaktır.
- Farklı gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmeleri ile gerçekleştirilen tek- ve çift-frekanslı PPP çözümlerinin düşük ve yüksek-frekanslı dinamik davranışları belirleyebilme kabiliyeti değerlendirilecektir. Bu tez çalışması ile herhangi bir deprem veya yükler altındaki yapının davranışları, gerçek-zamanlı ürünler ile olayın hemen sonrasında veya final ürünler ile iki hafta sonrasında değerlendirildiğinde bir farklılık gösterip göstermediği incelenecektir. Bu durum, özellikle bir doğal afet sonrasında hasar görmüş yapıların bir olaydan hemen sonra durumlarının tespit edilip olası felaketlerin önlenmesi için kritiktir.
- Çalışma kapsamında tek- ve çift-frekanslı SBAS destekli PPP yönteminin yüksek zamansal çözünürlüklü ve gerçek-zamanlı yerkabuğu ve mühendislik yapılarındaki dinamik davranışları belirleyebilme kabiliyeti ortaya çıkarılacak ve ikinci-nesil SBAS düzeltmelerini toplayabilen tek bir alıcının deprem, doğal afet veya mühendislik yapılarının sürekli izlemesinde ve erken uyarı sistemlerinde kullanılmak için etkili bir yöntem olup olmadığı ortaya konulacaktır. Gerçek-zamanlı IGS, Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA) ve CNES ürünleri ile İkinci-Nesil SBAS destekli PPP tekniğinin yapı sağlığı izlemeleri ve GPS-sismoloji çalışmalarında bir farklılık yaratıp yaratmadığı araştırılacak, farklı gerçek-zamanlı ürünlere dayalı SF-PPP ve DF-PPP tekniklerinin yerkabuğu ve

mühendislik yapılarındaki yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme kabiliyeti ortaya çıkarılacaktır. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ile gerçek-zamanlı izlemelerin etkinliği net bir şekilde ortaya çıkarılacak ve literatüre değerli ve önemli bir katkı sağlanacaktır.

- Geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin düşük ve yüksek-frekanslı titreşimleri belirleyebilme kabiliyeti karşılaştırmalı olarak değerlendirilecek, böylelikle dinamik hareketlerin belirlenmesinde PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine karşı bir üstünlüğü olup olmadığı net bir şekilde ortaya çıkarılacaktır.

Söz konusu yöntemlerin hepsi Linear Variable Differential Transformer (LVDT) ve rölatif konum belirleme çözümleri referans alınarak değerlendirilecektir. Ayrıca yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıf yönleri ayrıntılı bir şekilde ortaya çıkarılacaktır.

1.3. Tezin Genel Yapısı ve Çıktıları

Tez çalışması yapı olarak 8 farklı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde GPS/GNSS uygulamalarının yapı sağlığı izlemeleri ve sismoloji alalındaki katkısı, kullanılabilirliği ve avantajları incelenmiş, güncel literatür çalışmaları detaylı bir şekilde irdelenmiş ve oluşturulan tez çalışmasının özgün değeri ortaya çıkarılmıştır.

İkinci bölüm ise iki ana başlıkta incelenebilir. Başlangıçta GNSS sistemlerinin kısa bir tarihçesinden ve teknolojinin hızlı gelişmesiyle birlikte sistemde meydana gelen ilerlemelerden bahsedilmiş, ikinci bölümde ise IGS hakkında bilgiler verilip GNSS sistemlerinin çözümlerinde kullanılan temel gözlem eşitlikleri ele alınmıştır. İkinci kısmı sonuçlandıran bölümler ise GNSS çözümlerinde oldukça önemli bir rol oynayan yayın ve hassas yörünge bilgileri hakkındaki tartışmalar olmuştur.

Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan yöntemler olan geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin detaylı açıklamalarına, matematiksel eşitliklerine, farklılıklarına ve çözüm yöntemlerine dair bilgiler verilmiştir. İlk olarak geleneksel-PPP yöntemi ve rölatif konum belirlemeye olan üstünlükleri incelenmiştir. Geleneksel-PPP yönteminin dezavantajlarından bahsedilmiş ve PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine kıyasla hangi farklılıkları içerdiği ve hangi sorunları

çözdüğü açıklanmıştır. Sonrasında ise PPP-AR tekniğinin üç farklı matematiksel modeli tartışılmış ve RT-PPP ve RT PPP-AR tekniklerinden bahsedilmiştir.

GNSS sistemlerinin geofizik, yapı sağlığı izlemeleri ve sismolojiye olan katkıları ise dördüncü bölümde tartışılmıştır. Bu bölümde, GNSS tekniğinin ilgili alanlardaki kullanımından, avantaj ve dezavantajlarından detaylı bir şekilde bahsedilmiş, ivmeölçer ve hızölçer sensörleri ile olan kıyasına da ayrıca yer verilmiştir. Ayrıca, yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS verilerinin söz konusu alanlara olan katkısı detaylı bir şekilde incelenmiş, tez çalışmasında kullanılan yöntemlerin ilgili alanlara olan katkısının altı çizilmiştir.

Beşinci bölüm ise tez çalışması kapsamında kullanılan VADASE yaklaşımının fonksiyonel stokastik modelini içermektedir. Başlangıçta taşıyıcı dalga faz gözlemlerinin varyometrik yaklaşımda nasıl kullanıldığı anlatılmış, daha sonra ise en küçük kareler ağı yardımıyla hız tahminlerinin nasıl gerçekleştirildiğinden söz edilmiştir.

Altıncı bölüm tez çalışmasında gerçekleştirilen yedi farklı uygulamanın tasarımını içermektedir. Bu bölümde ilgili deneylerin tasarımından detaylıca bahsedilmiş, GNSS gözlemlerinin toplanması ve işlenmesinin nasıl gerçekleştirildiği her bir deney için detaylıca açıklanmıştır.

Yedinci bölüm, çalışma kapsamında tartışılan tüm algoritmaların, LVDT ve rölatif konum belirleme sensörleri ile hem zaman hem de frekans alanında detaylı bir şekilde karşılaştırılmasına ve dolayısıyla, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm bulgu ve analizlere yer vermektedir.

Sekizinci ve son bölüm, yedinci bölümde elde edilen bulgulardan yararlanılarak ulaşılan sonuçların özetleyici bir dille değerlendirilmesini kapsamaktadır.

2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)

GNSS, günümüzde birçok farklı uygulama için kullanılan yapay uydu takımlarının genel ismidir. Bu sistem, dünyanın çevresindeki uydulardan yayımlanan sinyaller yardımıyla kullanıcılara anlık olarak üç boyutlu konum, hız ve zaman bilgisi sağlamak için tasarlanmıştır. İlk GNSS uydu takımı, askeri amaçlar için Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı (DoD) tarafından tasarlanan ve yörüngeye yerleştirilen Amerika Birleşik Devletleri (ABD) NAVigation Satellite Time and Ranging (NAVSTAR) Küresel Konum Belirleme Sistemi (GPS) sistemidir [Seeber, 1993]. Sistemin kullanılmaya başladığı ilk yıllarda, bu takım yıldızından yalnızca ABD ordusunun yararlanabilmesi hedeflenmiş ve bu amaç için GPS sinyalleri, Selective Availability (S/A) sinyalleri ile bozulmuştur. Böylece sivil kullanıcılar konum bilgisi elde etmek için GPS sistemine başvurduğunda oldukça hatalı konum bilgisi elde etmişlerdir. Söz konusu bu durum 1 Mayıs 2000 tarihine kadar sürmüş ve bu tarihte ABD S/A kodunu kapatmaya karar vermiştir [Web 1, 2021]. Bunun sonucunda GPS sistemi ile elde edilen konum doğruluğu 150 m veya fazlasından 10 m'nin altına inmiş ve bunun sonucunda GPS sistemi aynı zamanda ticari bir sisteme dönüşmüştür [Teunissen and Montenbruck, 2017].

GPS takım yıldızının dünya çapındaki geniş başarısı farklı ülkelerin de dünya yörüngesine kendi geliştirdiği uydu takımlarını entegre etme çalışmalarına sebep olmuş, çeşitli ülkelerin Dünya yörüngesine yerleştirdiği uydu takımlarının hepsine ise genel olarak GNSS adı verilmiştir. GPS sistemine alternatif sistemlerin geliştirilmesinin temel nedeni, ülkelerin savaş zamanlarında veya ulusal çaptaki acil durumlarda orduya etkileri olan GNSS sinyallerine her şartta ve her zamanda ulaşılabilmesi, ülkenin içinde bulunan sivillerin dışa bağımlı kalmadan GNSS sistemini kullanmasını sağlamaktır [Blewitt, 2007].

Günümüzde, GNSS endüstrisinin milyarlarca dolar olduğu tahmin edilmektedir [Web 2, 2021]. Modern çağda, neredeyse her akıllı telefonda ya da arabalarda GNSS sistemi bulunmaktadır. Bunlara ek olara, Google Earth gibi birçok bilgi sistemi de GNSS sistemlerinden yararlanmaktadır. Büyük pazarların yanı sıra, GNSS sistemleri konumlama, navigasyon, haritalama, tektonik hareketler, yapı sağlığı izlemeleri, deprem erken uyarı sistemleri ve atmosferik yapının araştırılması gibi birçok teknik ve bilimsel çalışmalarda da önemli bir rol oynamaktadır.

2.1. GNSS Tarihçesi

Uydu teknolojisinin mevcut durumu ve uydu tabanlı uygulamaların hayatımızı nasıl etkilediği düşünülürse, tüm bu gelişmelerin milyarlarca yıllık dünya yaşamının sadece altmış yılını kapsaması oldukça etkileyicidir. Uydu teknolojilerinin insan yaşamına girişi, 4 Ekim 1957 tarihinde Sputnik-I adlı ilk insan yapımı uydunun Sovyetler Birliği tarafından Dünya yörüngesine yerleştirilmesi ile olmuştur [Marreiros, 2012].

Sputnik-I, dört uzun anteni ile Dünya'ya yayın yapmak için yerleşik bir verici içeren metalik bir küreden ibaretti. Uydunun yörüngeye yerleştirilmesinden birkaç gün sonra, Applied Physics Laboratory (APL) de çalışan iki bilim adamı, Guier ve Weiffenbach, uydunun ufuktan ufka geçiş sinyallerinin tamamını daha sonra saf doppler etkisi (pure doppler shift) olarak adlandıracakları, 20 Mhz frekansında bir veriyi modülasyon olmadan almayı ve kaydetmeyi başardıklarını bildirmişlerdir. Sputnik-I uydusundan yaklaşık olarak bir ay sonra yörüngeye fırlatılan Sputnik-II uydusundan gelen sinyallerden de faydalanarak, Dünya'ya yakın bir uydu için Kepler yörünge parametrelerinin tek bir Doppler etkisi (Doppler shift) verisi yardımı ile yüksek bir doğrulukla elde edilebileceğini, problemin tersine çevrilmesiyle ise uydu konumunun hesaplanabileceğini fark etmişler ve bu aşamaya direkt problem (direct problem) adını vermişlerdir.

Bu bilgiler ise Navy Navigation Satellite System (TRANSIT) uydu sisteminin temellerini ortaya çıkarmıştır. Böylelikle, yörünge bilgileriyle kodlanmış iki frekansta yayın yapan kutupsal yörüngeli uydular, bu yayınları toplayabilen, aynı zamanda direkt problemi çözebilme yeteneğine sahip ve ortaya çıkan yörünge parametrelerini her uyduya iletmek için görevlendirilmiş bir istasyon yardımı ile askeri birlikler navigasyon alıcıları kullanarak, Dünya üzerindeki konumlarını yaklaşık olarak saatte bir kez belirleyebilmişlerdir [Guier and Weiffenbach, 1998].

Alıcı tarafından herhangi bir sinyal yayılmadığı için TRANSIT pasif bir sistemdi ve bu sistemi kullanan askeri birlikler konumlarını düşman birliklerin ele geçiremeyeceği bir şekilde elde edebiliyordu. 1960'lı yıllarda ABD askeri birlikleri tarafından geliştirilen TRANSIT sisteminin deneysel çalışmaları tamamladıktan sonra 5 Aralık 1963 tarihinde ilk uydusu yörüngeye yerleştirildi ve 1964 yılında ilk konum belirleme ölçüsü gerçekleştirildi [Danchik, 1998]. Sistem askeri amaçlar için

tasarlanmış olsa da başlangıçta tasarlanan altı uydunun yörüngeye yerleştirildiği 1967 yılında halka sunulmuş, oşinograflar, balıkçı filoları ve petrol arama şirketleri tarafından yaygın olarak kullanılmıştır [Parkinson et al., 1995]. TRANSIT takım yıldızındaki her bir uydu, iyonosfer hatasını elemine etmek için 150 MHz ve 400 MHz büyüklüğünde iki farklı taşıyıcı dalga faz sinyali yaymakta ve çift-frekanslı alıcılar ile kullanıcının pozisyon bilgisi yaklaşık olarak 20 m hassasiyetinde sağlanmaktaydı. Buna ek olarak, TRANSIT ile elde edilen yükseklik bilgisi o kadar kötüydü ki, bu sistem ile sadece iki boyutlu konum bilgisi elde edilebiliyordu [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

1996 yılından beri artık faaliyette olmayan TRANSIT sisteminin başarısının ardından uydular yardımıyla elde edilen konum bilgisinin doğruluklarını iyileştirme ve üç boyutlu konum bilgisi amacıyla gereken süreyi kısaltılmak için çalışmalara başlamış olan ABD ile arasındaki farkı kapatmayı amaçlayan Sovyetler Birliği, 1974 yılında ilk uydusunun yörüngeye yerleştiği ve yaklaşık olarak on uydusu olan, çalışma prensibinin ise TRANSIT sistemine benzediği Tsikada takım yıldızını geliştirmiştir. Ancak, ilerleyen yıllarda bu sistem yerini Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) uydu sistemine bırakacaktır [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

Naval Research Laboratory (NRL) çalışanı Rogerl L. Easton, Nisan 1964 tarihinde uydulardan iletilen sinyalleri kullanarak hedef uydulara olan mesafenin, erken yörünge tahmini yaparak ölçülebileceğini ifade etmiştir. Bu ifade, uydular arası mesafe ölçümünü temel alan ve TIMe navigATION (TIMATION) olarak adlandırılan yeni nesil uydu tabanlı konumlama sisteminin geliştirilmesine neden olmuştur. Roger L. Easton kontrolündeki TIMATION projesi, uydular için quartz frekansı standardının geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve dünya çapında kapsama sağlamak için en etkili uydu takımyıldızının belirlenmesine odaklanmıştır [Web 3, 2021].

Aynı dönemde, Aerospace Corporation, daha sonra Sistem 621B olarak adlandırılan ve hızlı hareket eden araçlar için üç boyutlu konum belirlemeyi geliştirmek amacıyla Dünya'nın yörüngesine yerleştirilen uyduları kullanan yeni bir sistem tasarlamaya başladı. Bu sistem planlanırken sınırsız sayıda kullanıcıya küresel kapsama alanı sağlamak ve askeri ihtiyaçları karşılamak gibi temel gereksinimler göz önüne alındı. Aerospace Corporation tarafından yapılan çalışmalar, iki Pseudorandom Noise (PRN) sinyali (C/A ve P) kullanarak pozisyon için 5 m ve hız

için 0.3 m/sn den az olacak şekilde, sistemin konum ve hız bileşenlerinin elde edilebileceğini ileri sürdü [O'Brien and Griffin, 2007].

Bu noktada, uydu sistemleri ile ilgili bireysel olarak izlenen programların kontrolsüz bir şekilde çoğalmasını önlemek ve aynı zamanda geliştirme ve üretim maliyetlerini en aza indirmek için ABD Savunma Bakanı yardımcısı, tüm farklı faaliyetleri bir öncü kuruluş (Los Angeles Hava İstasyonu'nda bulunan Space and Missile System Organization (SAMSO) da konuşlanacak olan Joint Program Office (JPO)) adı altında birleştirmek için harekete geçti. Bu büyük atılımdan sonra, 1973 tarihinde JPO'ya ABD Savunma Bakanlığı tarafından, o sırada çeşitli kuruluşlar tarafından yürütülen farklı programlar sırasında elde edilen tüm bilgi birikimini bir araya getirebilecek bir uydu tabanlı konum belirleme sistemi kurması, geliştirmesi, test etmesi talimatı verildi [Parkinson et al., 1995]. Bu gelişmelerden sonra ortaya çıkan NAVSTAR GPS programının ilk uydusu 1978'de fırlatıldı ve 1995 tarihinde sistem neredeyse tamamlanmıştı. Bu tarihlerde, 24 GPS uydusu yerleştirilen yörüngelerde çalışır durumdaydı ve askeri birlikler için performansı test ediliyordu [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

Sonuç olarak GPS sistemi, tam operasyonel kapasiteye ulaşan ilk uydu sistemidir ve uzun süredir sivil kullanıcılar ve bilim camiası arasında açık ara en çok kullanılan yapay takım yıldızı olmuş durumdadır. Rusya tarafından geliştirilmiş olan GLONASS takım yıldızı ilk kez 1996 yılında 24 uydulu tam kapasitesine ulaşmasına rağmen, Rusya'yı vuran güçlü ekonomik kriz nedeniyle sistemin uydu sayısı hemen düşürülmüştür. 1999 yılına kadar yeni uydular fırlatılmaması ve GPS uydularına göre GLONASS uydularının ömrünün kısalması nedeniyle aktif GLONASS uydularının sayısı 10'un altına inmiştir [Harvey, 2007].

Günümüzde küresel ve bölgesel uydu tabanlı konumlandırma sistemlerine sürekli bir yenisi eklenmektedir. European Global Navigation Satellite (Galileo) veya BeiDou Navigation Satellite System (BeiDou) gibi yeni GNSS sistemleri, halihazırda mevcut olan GPS ve GLONASS takımyıldızlarına dahil olmuştur. Bu sistemlere ek olarak, söz konusu uydu takımlarından yararlanan Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS), Wide-area Augmentation Systems (WAAS), European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) ve Ground-based Augmentation Systems (GBAS) gibi sistemler de bulunmaktadır. Söz konusu bu sistemler daha önce de bahsedildiği gibi, günlük ihtiyaçlara ek olarak birçok teknik ve bilimsel çalışmada önemli bir role sahiptir.

2.2. GNSS Bölümleri

Her GNSS takım yıldızı uzay bölümü, kontrol bölümü ve kullanıcı bölümü olmak üzere üç farklı bölümden oluşur. Kesintisiz olarak küresel çapta navigasyon olanağı sağlamak için her GNSS sistemi, en az dört uydunun Dünya'nın her yerinde, her zaman görünür olmasını sağlayan bir uydu takımyıldızı geliştirmelidir. Dünya'nın etrafına yerleştirilen uyduların tasarımı ise kapsama alanı, kullanıcının elde edeceği konum doğruluğu ve uydu geometrisini hesaba katan çeşitli optimizasyon kriterlerini takip etmelidir [Seeber, 2003].

GNSS uyduları, tasarlanan sistemin çalışması için atomik saatler, radyo alıcı-vericileri, bilgisayarlar ve diğer yardımcı malzemelerle donatılmıştır. Uzaydan uydular aracılığı ile kullanıcıya gönderilen sinyaller, uydu-alıcı arasındaki olan mesafenin (pseudorange) ölçülmesine olanak tanır. Ayrıca her uydu, rastgele anlar için uydu konumunu hesaplamaya izin veren bir mesaj yayınlar. Ana güç kaynağı güneş panelleri tarafından sağlanır. Uydularda yer alan küçük bir itiş sistemi, uydunun kendi yörüngesini ayarlamak için manevra yapmasına izin verir. Uyduların fırlatma sıra numarası, yörünge konum numarası, National Aeronautics and Space Administration (NASA) katalog numarası gibi birkaç tanımlama numarası vardır [Kahveci ve Yıldız, 2012].

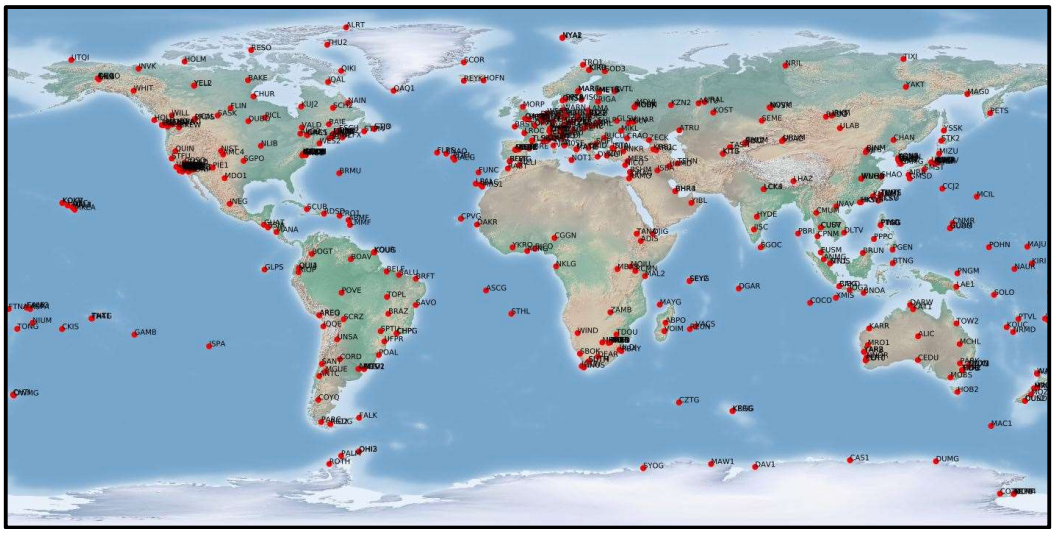
Kontrol bölümü, tüm sistemin yönlendirilmesinden sorumludur. Bu sorumluluklar, sistemin yörüngeye yerleştirilmesi ve bakımını, yörünge ve saat parametrelerinin belirlenmesi amacıyla uyduların izlenmesini ve elde edilen verilerin yer antenleri yardımıyla uydulara yüklenmesini kapsar. Bir ana istasyon ise diğer tüm izleme istasyonlarının faaliyetlerini kontrol eder [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

Kullanıcı bölümü ise sistemi farklı amaçlar için kullanan tüm kullanıcıları kapsamaktadır. 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. 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 (IGS) servisinden bahsetmek gerekmektedir. Günümüzde IGS servisi, The Multi-GNSS Experiment

(MGEX) projesi adı altında GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou takımyıldızlarına ait verileri kullanıcılar ile paylaşmaktadır [Web 4, 2021].

2.3. Uluslararası GNSS Servisi (IGS)

IGS, Ocak 1994'te International Association of Geodesy (IAG) çatısı altında kurulmuştur. Kuruluşun ilk adı olan Uluslararası GPS Servisi, faaliyetlerinin çoklu-uydu sistemlerini de kapsadığını kabul etmek için 2005 yılında günümüzdeki adı ile değiştirilmiştir [Web 5, 2021]. IGS, dünya çapında yaklaşık 200 istasyonu ile beraber ticari olmayan bir kurum olarak faaliyet göstermektedir. Eylül 2021 tarihi itibariyle aktif olarak hizmet veren IGS istasyonlarının dağılımı Şekil 2.1'de gösterilmiştir [Web 6, 2021].



Şekil 2.1: IGS ağı istasyonlarının küresel dağılımı.

IGS'nin misyonu, yersel referans çerçevesini, Dünya rotasyonunu, Dünya gözlem ve araştırmalarını, konumlandırmayı, navigasyonu ve topluma fayda sağlayan diğer uygulamaları destekleyen en yüksek kalitede GNSS verilerini ve ürünlerini sağlamak olarak ifade edilmektedir [Dow et al., 2008]. IGS servisinin başarısının ve bilim camiasındaki popülerliğinin temelinde veri paylaşımı kültürü vardır. IGS servisindeki çeşitli istasyonlardan GNSS kod ve faz gözlemleri, yayın efemerisi bilgileri, hassas saat ve yörünge bilgileri gibi oldukça geniş bir veri seti internet aracılığıyla kullanıcılar ile paylaşılmaktadır. Bu kapsamlı veri paylaşımını kolaylaştırmak için bir dizi standart dosya formatı oluşturulmuştur. Bu dosya

formatları arasında çoklu-GNSS kod ve faz gözlermlerini içeren Receiver INdependent EXchange (RINEX), IGS istasyonlarının konum ve hız çözümlerini içeren Solution INdependent EXchange (SINEX), çoklu-GNSS yörünge ve saat bilgilerini içeren Standard Products 3 (SP3) gibi dosya formatları bulunmaktadır [Web 7, 2021].

Katılımcı kurumların çok sayıda olması nedeniyle altyapı günümüzde oldukça karmaşık hale gelmiştir. Mevcut GNSS ürünlerinin üretimini verimli bir şekilde organize etmek ve değerlendirmek için bir dizi çalışma grubu oluşturulmuştur. Ayrıca, yeni IGS ürünlerinin üretilmesine yol açabilecek ve gelecekteki olası gelişmeleri araştıran birkaç pilot proje bulunmaktadır. Bu projeler arasında öne çıkanlardan birisi de IGS GNSS ağından elde edilen gözlemleri ve bunlardan türetilmiş ürünleri gerçek-zamanlı olarak kullanıcılara dağıtmayı veya gerçek-zaman şartlarında sonradan-değerlendirmeye olanak sağlamak için ürünler üretmeyi, gerçek-zamanlı veri toplama, veri yayma veya türetilmiş ürünlerin kullanıcılar ile paylaşımı için standartları ve formatları araştırmayı amaçlayan Real-Time Pilot Project (RTPP)'dir [Dow et al., 2007]. Eylül 2021 tarihi itibariyle IGS'in gerçek-zamanlı çözümler için birçok farklı kanalı bulunmakla beraber gerçek-zamanlı şartlar altında sonradan değerlendirmeye olanak sağlayan ürünleri, IGC01 kanalından türetilmektedir [Web 8, 2021].

2.4. GNSS Gözlemleri

Kod ve faz sinyalleri, GNSS tekniği ile konum elde edilmesinde sıklıkla kullanılan temel gözlemlerdir. Konum belirleme uygulamaları için yalnızca kod, yalnızca faz veya her iki gözlem türünün kombinasyonları kullanılarak pozisyon bilgisi elde etmeyi amaçlayan farklı algoritmalar mevcuttur. Genel olarak uydu tabanlı konum belirleme konsepti, bilinen konumdaki noktalara olan mesafeleri ölçerek konum belirleme yöntemi olan uzunluklar ile geriden kestirme ilkesine dayanmaktadır [Blewitt, 2007]. GNSS gözlemlerinde ise bilinen noktalar gözlemlenen uyduların konumları olacaktır ve mesafeler, alıcının bulunduğu konumdaki yerel saat ile gözlem yapılan bir uydudaki atom saati arasındaki zaman farkının ışık hızıyla çarpımı olarak ölçülebilmektedir [Seeber, 2003]. GNSS tekniğinin temel gözlemlerinden Bölüm 2.4.1 ve Bölüm 2.4.2'de detaylıca bahsedilmiştir.

2.4.1. Kod Gözlemleri

Kod gözlemleri r alıcısı ve s uydusu arasındaki mesafenin ölçümüne dayanmakta ve bu ölçüye pseudorange adı verilmektedir. Bu uzunluğu ölçmek için hedef uydudan sinyalin gönderildiği an olan t^s ve alıcıda bu sinyalin alındığı an olan t_r anı bilinmelidir. Basit bir ifade ile, uydudan sinyalin gönderildiği ve bu sinyalin alıcıda alınan anın farkı alınır ve söz konusu uzunluğu elde etmek için ışık hızı c ile çarpılmaktadır. Pratikte ise, sinyal uyduyu terk edip alıcıya ulaşana kadar geçen zaman uydu ve alıcıda üretilen PRN kodlarının eşleştirilmesi ile elde edilir. Başka bir deyişle, alıcı dahili olarak kendi içinde kodun özdeş bir kopyasını oluşturur ve iki kodu denk getirmek için gerekli zaman kaymasını hesaplar. Bu işlem için uydudan gelen sinyallere çapraz korelasyon tekniğini uygulanmaktadır. Her iki kodun eşleşmesi için geçen zaman farkı ışık hızıyla çarpıldığında, pseudorange ölçümünü gerçekleşmiş olur. Uydu ve alıcı üzerindeki saatler için ortak bir referans zaman sistemi olduğu varsayılırsa, her iki saatin de bir gecikmeye veya bir hataya maruz kalması kaçınılmazdır ve bunun sonucunda, ölçülen uzunluk ile gerçek uzunluk arasında bir miktar hata olacaktır. Pseudorange uzaklığı, uydudan alıcılara ulaşan sinyallerin herhangi bir etkiye maruz kalmadığı ve aynı zamandan uydu ve alıcı saatlerinde herhangi bir hata olmadığı varsayılırsa, eşitlik 2.1'de belirtildiği gibi elde edilebilir.

$$P_r^s(t_r) = c(t_r - t^s) = c(t_r + \delta t_r - t^s - \delta t^s) \tag{2.1}$$

Eşitlik 2.1'de, P_r^s uydu ve alıcı arasındaki mesafeyi ifade ederken, t_r sinyalin alıcıya ulaştığı zamanı, δt_r alıcı saat hatasını, t^ssinyalin uydudan çıktığı zamanı, δt^sise uydu saat hatasını ifade etmektedir. c ise boşluktaki ışık hızını temsil etmektedir. Eşitlik 2.1'deki t_r ve t^s aynı zaman sistemindedir ve aralarındaki fark olan Δt sinyalin seyahat süresini ifade etmektedir. Bu fark ışık hızıyla çarpılırsa, uydunun t^s anındaki konumu ile alıcının t_r anındaki konumu arasındaki geometrik mesafe olan $\rho_r^s(t^s)$ değeri elde edilir. Ancak bu ifade aşağıda belirtilen eşitlik 2.2'deki gibi de ifade edilebilir.

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} \tag{2.2}$$

Denklem 2.2'de X^s, Y^s ve Z^suydunun üç boyutlu koordinatlarını ifade ederken, X_r, Y_r ve Z_r ise alınıcın konum bilgilerini temsil etmektedir. Böylece, boşlukta yayılan bir sinyal için sonuç pseudorange eşitliği aşağıda ifade edilmiştir [Kahveci ve Yıldız, 2012].

$$P_r^s(t_r) = \rho_r^s(t^s) + c(\delta t_r - \delta t^s) \tag{2.3}$$

2.4.2. Taşıyıcı Dalga Faz Gözlemleri

Taşıyıcı faz gözlemleri, uydulardan yayımlanan ve üzerine kod ölçüsünün modüle edildiği taşıyıcı dalganın fazı ile alıcı tarafından dahili olarak üretilen ve alıcı saati ile senkronize olan bir sinyalin fazı arasındaki farktan elde edilir [Blewitt, 2007]. Alıcı ile yapılan ilk ölçü t_0 epoğunda başladığı varsayılırsa, alıcı uydudan gelen taşıyıcı fazın yalnızca kesirli kısmını ölçebilir. Bu nedenle, uydu ile alıcı arasındaki t_0 epoğundaki taşıyıcı dalga fazının kaç tane tam sayı içerdiği bilinmemektedir. Bu bilinmeyene başlangıç faz belirsizliği (N) adı verilmektedir. Cycle birimindeki taşıyıcı faz eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi_r^s(t_r) = \frac{f_i}{c}\rho_r^s(t^s) + N_r^s + f_i\delta t_r - f_i\delta t^s \tag{2.4}$$

Eşitlik 2.4'te ϕ_r^s r alıcısı ve s uydusu arasındaki faz gözlemini, c boşluktaki ışık hızını, ρ_r^s t^sanındaki uydu ve t_r anındaki alıcı arasındaki geometrik mesafeyi, N_r^s başlangıç faz belirsizliğini, δt_rve δt^s ise sırasıyla alıcı ve uydu saat hatasını ifade etmektedir. Taşıyıcı faz, eşitlik 2.4'teki taşıyıcı fazın dalga boyu ($\lambda_i = c/f_i$) ile çarpılarak uzunluğa çevrilebilir.

$$L_r^s(t_r) = \rho_r^s(t^s) + \lambda_i N_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) \tag{2.5}$$

Bu denklemde N_r^s başlangıç tamsayı faz belirsizliğinin değerini ifade ederken, t_0 ise söz konusu bilinmeyenin başlangıç epoğundaki değeridir ve ilgili uydudan alınan gözlemler ardışık epoklarda kesilmediği sürece gözlem periyodu boyunca sabit kalır. Bu nedenle, t epoğundaki genel taşıyıcı faz gözlemi denklemi şu şekilde ifade edilebilir.

$$\phi_r^s(t) = \Delta\phi_r^s|_{t_0}^t + N_r^s \tag{2.6}$$

Bu eşitlikte $\Delta\phi_r^s$, t epoğundaki taşıyıcı fazın, ilk t_0 epoğundaki geçen tamsayı döngüsündeki kesirli kısmıdır. Bu sayı, alıcı açıldığı anda ilk olarak sıfıra ayarlanır ve ilk faz gözlemleri kaydedilir. Ardından, kesirli faz 2π'den 0'a her değiştiğinde bir döngü artırılır [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. Alıcının uyduya olan kilitlenmesinin kaybolması durumunda, bu sayı sıfırlanır ve bu durum faz gözleminde bir sıçramaya neden olur. Bu sıçramaya faz sıçraması denir. Taşıyıcı dalga faz gözlemleri, kod gözlemlerinden daha duyarlıdır. Bununla birlikte, taşıyıcı dalga faz gözleminin en büyük dezavantajı, jeodezik konumlandırmada mümkün olan en iyi doğruluğu elde etmek için tam olarak çözülmesi gereken tamsayı faz belirsizliğindedir. [Seeber, 2003].

2.4.3. Ölçü Hataları

Bölüm 2.4.1 ve 2.4.2'de ele alınan gözlem denklemlerinde uydudan alıcıya ulaşan sinyallerin boşlukta sorunsuz bir şekilde yol aldığı göz ardı edilerek irdelenmiştir. Ayrıca, alıcı ve uydu donanımlarından kaynaklanan elektronik gürültüler, diğer sistematik etkilerle birlikte ihmal edilmiştir. Sinyalleri ve dolayısıyla ölçü kalitelerini etkileyen etkiler, uydu yörünge hatası, uydu saat hatası, iyonosferik ve troposferik gecikmeler, alıcı saat hatası, görelilik etkisi, anten faz merkezi hatası ve multipath etkisi olarak ifade edilebilir. Bu etkilerden bazıları modellenebilir ve gözlem denklemlerine eklenmesi ile giderilebilir. Öte yandan, iyonosferik gecikme gibi bazı sistematik etkiler, gözlemlerin uygun kombinasyonları uygulanarak ortadan kaldırılabilir veya büyük ölçüde azaltılabilir. Bu terimlerin kod ve taşıyıcı dalga faz gözlemlerindeki etkisini irdelemek için eşitlik 2.3 ve 2.4 aşağıdaki şekilde düzenlenebilir. Söz konusu iki eşitlikte yer alan $T_r^s(t_r)$ troposferik gecikmeyi, $I_r^s(t_r)$ iyonosferik gecikmeyi, $m_r^s(t_r)$ multipath hatasını, $\varepsilon_{r,P}^s$ ve $\varepsilon_{r,L}^s$ ise sırasıyla kod ve faz gözlemlerindeki gürültüleri temsil etmektedir.

$$P_r^s(t_r) = \rho_r^s(t^s) + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s(t_r) + I_r^s(t_r) + m_r^s(t_r) + \varepsilon_{r,P}^s \tag{2.7}$$

$$L_r^s(t_r) = \rho_r^s(t^s) + \lambda_i N_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s(t_r) - I_r^s(t_r) + m_r^s(t_r) + \varepsilon_{r,L}^s \tag{2.8}$$

Troposferik gecikme, Dünya atmosferinin nötr (yani iyonize olmayan) kısmından kaynaklanır. Bu bölge, Dünya yüzeyinden itibaren 50 km'ye kadar uzanır ve hava ile ilgili olayların çoğunun meydana geldiği bölgedir. Troposferik gecikme, sinyal yolu boyunca troposferik koşullara bağlıdır ve taşıyıcının frekansından bağımsızdır ve bu koşul, 15 GHz değerine kadar geçerlidir. Troposferik gecikme gözlemlerde farklı modeller kullanılarak elemine edilebilir.

İyonosferik gecikme, Dünya atmosferinin yaklaşık 70 km ile 3000 km civarındaki serbest elektronlardan kaynaklanır. İyonosferin kod ve faz ölçülerine olan etkisi farklı olmakla beraber, GNSS sinyallerini dağıtıcı bir rol oynamaktadır. GNSS sinyallerinin iyonosfer tabakasındaki ilerleme hızı sinyalin frekansına bağlıdır. Bu nedenle, iki frekansın doğrusal bir kombinasyonu ile iyonosferik gecikmenin ölçü kalitesine olan etkisi büyük ölçüde azaltılabilir. İyonosfer, kod ölçülerinde gecikmeye sebep olurken faz ölçülerinde ise hızlanma etkisi göstermektedir.

Multipath etkisi, uydu sinyallerinin alıcıya doğrudan değil, alıcının çevresindeki yansıtıcı yüzeylerden dolayı bir veya daha fazla yol izleyerek esas sinyale karışması ile alıcıya ulaşan sinyallerden kaynaklanır. Bu etki, yansıtıcı özellik barındırmayan alanların seçilmesi ve alıcı için uygun anten seçimi ile önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca, multipath hatası frekansa bağlı olduğundan ölçüye olan etkisi, farklı frekanslarda kod ve taşıyıcı dalga faz gözlemlerinin bir kombinasyonu kullanılarak tahmin edilebilir.

Donanım ve gözlem gürültüleri ise sinyalin dalga boyuna (λ_i) ve uydu-alıcı donanımlarına bağlıdır [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

2.4.4. Fark Gözlemleri

GNSS gözlemlerinde, bir önceki bölümde açıklanan sistematik etkilerin bazılarını azaltmak veya ortadan kaldırmak için, eşitlik 2.7 ve 2.8'de ifade edilen pseudorange ve taşıyıcı dalga faz gözlemlerini kullanarak tekli, ikili veya üçlü farklar almak mümkündür. Hataların farklar alınarak elemine edilmesi, söz konusu eşitliklerdeki bilinmeyen sayısının önemli ölçüde azaltılması avantajına sahip olsa da ortadan kaldırılan parametreler için herhangi bir tahmin, yani hatanın değeri elde edilemeyecektir. Tez çalışması kapsamında tek GNSS alıcısı ile farklı algoritmaların

performansı değerlendirildiği için bu bölümde, kod ve taşıyıcı dalga faz gözlemlerinde tekli farklar irdelenecektir.

Tekli fark, iki gözlemin lineer kombinasyonundan elde edilen yeni bir gözlem denklemidir ve az üç tür tekli fark eşitliği oluşturmak mümkündür. Bunlardan birincisi alıcılar arasında tekli farklardır ve aynı uyduya iki farklı alıcıdan eşzamanlı olan ölçümlerin farkları alınarak elde edilir. Bu durumda uydu saati hatası (δt^s) büyük oranda elemine edilir. İkincisi ise uydular arasında tekli farklardır ve tek bir alıcıdan iki farklı uyduya yapılan gözlemlerin farkının alınması ile elde edilir. Bu işlem sonucunda alıcı saat hatası (δt_r) elemine edilmektedir. Üçüncüsü ise ölçü epokları arasındaki tekli farklardır. Aynı alıcı ve aynı uydudan iki farklı epokta gerçekleştirilen gözlemleri kullanarak alınan farklardır. İki epok arasında herhangi bir faz kesikliği yok ise başlangıç tamsayı faz belirsizliği N_r^s elemine edilir. Tez çalışması kapsamında kullanılan algoritmalardan biri olan varyometrik yaklaşımın matematiksel modelinin incelendiği beşinci bölümde, epoklar arası tekli farkların söz konusu algoritmadaki kullanımı açıklanmıştır.

2.4.5. Lineer Kombinasyonlar

Taşıyıcı dalga faz ya da kod gözlemlerinin lineer kombinasyonları genellikle sistematik hataları ortadan kaldırmak veya parametre tahminini kolaylaştırmak için kullanılmaktadır. Lineer kombinasyonların en büyük dezavantajı ise bu kombinasyon sonucu elde edilen ölçü gürültüsünün başlangıçta gözlemlenen değerinden daha yüksek olmasıdır. Temel lineer kombinasyon ise aşağıda yer alan eşitlik 2.9'da ifade edilmiştir.

$$L_{LC} = \alpha L_1 + \beta L_2 \tag{2.9}$$

Eşitlik 2.9'da ifade edilen α veβ, lineer kombinasyonun katsayılarını temsil ederken, L_1 ve L_2 ise ham GNSS gözlemlerini ifade etmektedir. Her gözlemin de aynı gürültü seviyesine (σ_0) sahip olduğu varsayımıyla lineer kombinasyonun gürültüsü eşitlik 2.10'da belirtildiği gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_{LC} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}\,\sigma_0 \tag{2.10}$$

İyonosfer-bağımsız kombinasyon ise farklı frekanslarda iki sinyal kullanarak iyonosferik gecikmeyi ortadan kaldırmak için en etkili yöntemdir. Bu yöntem, GNSS sinyallerinin (en az) iki farklı frekansta yayınlanmasının ana nedeni olarak düşünülebilir. İyonosfer-bağımsız kombinasyon, aşağıdaki katsayılar yardımıyla denklem 2.9 kullanılarak oluşturulur.

$$\alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \;\; \beta = \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \;\; f_1 = 154 f_0, f_2 = 120 f_0, f_0 = 10.23 Mhz \tag{2.11}$$

Bu kombinasyonun iyonosferik gecikmeyi ortadan kaldırmadaki etkinliğini göstermek için iyonosferik gecikmenin (I_r^s) sinyal frekansına bağımlılığını ve Total Electron Content (TEC) ile doğru orantılı olduğu açık gösterimi ile taşıyıcı dalga faz gözlem denklemi 2.8 de yerine yazaılırsa aşağıda belirtilen denklem 2.12 elde edilir.

$$L_{r,IF}^s = \rho_r^s + \lambda_i N_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s(t_r) - I_r^s(t_r) - 40.3 \frac{TEC_s^r}{f_i^2} \tag{2.12}$$

Denklem 2.12'de multipath hatası ve gürültü terimleri, eşitliği sadeleştirmek adına elimine edilmiştir. Eşitlik 2.11 ve 2.12'den yararlanılarak çift-frekanslı taşıyıcı dalga faz gözlemleri için iyonosfer-bağımsız kombinasyon aşağıda yer alan denklem 2.13'te ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} L_{r,IF}^s = \alpha L_1 + \beta L_2 &= \rho_r^s + \lambda_{IF} N_{r,IF}^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s(t_r) \\ &+ \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{-40.3\, TEC_s^r}{f_1^2} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{-40.3\, TEC_s^r}{f_2^2} \right) \end{aligned} \tag{2.13}$$

Eşitlik 2.13'te, IF kısaltması iyonosfer-bağımsız terimini ifade ederken, λ_{IF} ifadesi ise yeni oluşan gözlem denkleminin dalga boyuna karşılık gelmektedir. Eşitlik 2.13'te de ifade edildiği gibi, iyonosfer-bağımsız kombinasyon iyonosferik gecikmeyi elemine etmektedir. Ancak iyonosfer-bağımsız kombinasyonun en büyük dezavantajı, aşağıdaki denklemde de gösterildiği gibi başlangıç faz belirsizliğinin artık bir tamsayı olmamasıdır [Shi and Gao, 2013].

$$N_{r,IF}^s = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \lambda_1 N_{r,1}^s - f_2^2 \lambda_2 N_{r,2}^s) \tag{2.14}$$

2.5. Uydu Yörüngeleri

Konum belirleme uygulamalarından Dünya üzerindeki çeşitli alanların gözlemlenmesine kadar uydu tabanlı tüm çalışmalar, uydu yörüngelerinin belirli bir doğruluk düzeyinde bilinmesini gerektirir. Konum belirleme amacıyla tek bir GNSS alıcısı kullanılması durumunda, herhangi bir yörünge hatası, konum hassasiyetini fazlasıyla etkileyecektir [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. Bir uydunun yörünge hareketi, uyduya etki eden tüm kuvvetlerin sonucudur ve bu etkilerin arasında Dünya'nın yerçekimi en önemlisidir. Matematiksel açıdan bakıldığında, uydular için hareket denklemleri, zamana bağlı sayısal entegrasyon ile çözülen diferansiyel denklemlerdir [Montenbruck and Gill, 2000].

GNSS uydu konumları, yayın efemerisi (broadcast ephemerides) olarak adlandırılan bir formatta navigasyon mesajının özel bir parçası olarak gerçek-zamanlı olarak kullanıcılara sunulmaktadır. Bu yayın efemerisi ile yapılan hesaplamalar sonucunda uydu pozisyonları bir metreden birkaç metreye kadar değişen bir doğrulukla elde edilebilmektedir. Yayın efemerisleri, ilgili kontrol bölümünün izleme istasyonlarında elde edilen gözlemler kullanılarak tahmin edilir. Bu parametreler, 12 ile 36 saat arasında değişen bir süre için uydu yörüngelerini etkin bir şekilde tanımlamaktadır [Kahveci ve Yıldız, 2012].

Uydu yörünge bilgileri belirli bir süre sonrasında kullanıcılara daha kesin bir şekilde sunulmaktadır ve bunlara hassas efemeris (precise ephemerides) adı verilmektedir. Hassas efemeris bilgileri her on beş dakikada bir uydu konumlarını ve saat hatalarını listeleyen American Standard Code for Information Interchange (ASCII) dosyalarından oluşur. Hassas efemeris dosyalarına Jet Propulsion Laboratory (JPL), Center for Orbit Determination in Europe (CODE), The Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) gibi araştırma merkezlerinden ya da IGS gibi uluslararası kuruluşların web sayfalarından ücretsiz olarak erişim sağalama imkânı bulunmaktadır.

2.5.1. Yayın Efemerisi Bilgileri

Yayın efemerisi, ilgili kontrol bölümünün izleme istasyonları tarafından elde edilen kod gözlemlerine dayanmaktadır. Ana istasyon ise efemeris bilgilerini hesaplama ve uydulara yükleme ile görevlendirilmiştir. Yayın efemerisleri uydu,

yörünge ve uydu saati hakkında kayıtlar içerir. GPS, Galileo ve BeiDou takımyıldızlarına ait yayın efemerislerinde bulunan yörünge bilgisi, Kepler parametrelerini ve bunların zamana bağlı varyasyonlarını içermektedir. Bunlara ek olarak, yayın efemerisindeki uydu saati ile ilgili bilgiler, saat gecikmesini ikinci dereceden polinomlarla modellemek için kullanılabilecek katsayılar cinsinden verilmiştir. GPS, Galileo ve BeiDou takımyıldızları için yayın efemerisinde yer alan Kepler elemanları Tablo 2.1'de detaylı olarak ifade edilmiştir [Teunissen and Montenbruck, 2017].

Tablo 2.1: GPS, Galileo ve BeiDou takımyıldızları için yayın efemerisinde yer alan Kepler elemanları.

Parametre	**Açıklama**	**Birim**
M_0	Ortalama Anomali	Yarım çember (sc)
Δn	Ortalama Hareketin Hesaplanan Değerden Farkı	sc/saniye
e	Dış Merkezlilik	-
$\sqrt{A}$	Büyük yarı eksenin karekökü	$\sqrt{metre}$
Ω_0	Yükselen düğüm noktasının Boylamı	sc
i_0	Eğim Açısı	sc
w	Perigeenin Argümanı	sc
$\dot{\Omega}$	Yükselen Düğüm Noktası rektasansiyonundaki değişim oranı	sc/saniye
$IDOT$	Eğim açısı değişim oranı	sc/saniye
C_{rc}, C_{rs}	Jeosentrik uzaklık için düzeltme katsayıları	metre
C_{uc}, C_{us}	Perigee argümanı için düzeltme katsayıları	radyan
C_{ic}, C_{is}	Eğim açısı için düzeltme katsayıları	radyan
t_{oe}	Referans epoğu	saniye
$IODE$	Efemeris verisinin üretildiği zaman	-
a_0	Uydu saati gecikmesi	saniye
a_1	Uydu saati kayıklığı	saniye/saniye
a_2	Uydu frekansı kayıklığı	saniye/saniye^2

Tablo 2.1'de verilen yayın efemerisi parametreleri kullanılarak uydunun Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) koordinat sistemindeki konum bilgileri hesaplanabilmektedir. Söz konusu takım yıldızlarına ait bir uydunun ECEF koordinatlarını hesaplamadan önce yerin dönme hızı oranı ($\dot{\Omega}_e$) bilinmelidir. World Geodetic System 84 (WGS84) datumu için bu oran $\dot{\Omega}_e = 7.2921151467x10^{-5}\, rad/sn$ olarak verilmektedir. Bu bilgilere ek olarak hesaplamalarda kullanmak üzere WGS84 için yer çekimi sabiti de bilinmelidir ki bu değer $\mu = 3.986004418x10^{14}\, m^3/s^2$ olarak ifade edilmektedir. GPS, Galileo ve BeiDou uydularının yayın efemerisi bilgileri kullanılarak koordinatlarının hesaplaması, Tablo 2.2'de açıklanan denklemler yardımıyla gerçekleştirilir [Teunissen and Montenbruck, 2017].

Tablo 2.2: GPS, Galileo ve BeiDou takımyıldızları için pozisyon bilgilerinin hesabı.

Denklemler	**Açıklama**
$t_k = t - t_{oe}$	Referans epoğundan beri geçen süre
$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}}$	Ortalama hareket
$n = n_0 + \Delta_n$	Gerçek ortalama hareket
$M_k = M_0 + nt_k$	Düzeltilmiş ortamala hareket
$E_k^{(1)} = M_k + esin(E_k^{(0)})$ $E_k^{(2)} = M_k + esin(E_k^{(1)})$	Dış merkezlilik anomalisi
$v_k = artan\left(\frac{\sqrt{1-e^2}\sin(E_k)}{\cos(E_k)-e}\right)$	Gerçek anomali
$u_k = v_{k+}\omega_0 + C_{us}\sin\big(2(v_{k+}\omega_0)\big) + C_{uc} * \cos\,(2(v_{k+}\omega_0))$	Düzeltilmiş perigee argümanı
$r_k = A\big(1 - ecos(E_k)\big) + C_{rs}\sin\big(2(v_{k+}\omega_0)\big) + C_{rc} * \cos\,(2(v_{k+}\omega_0))$	Düzeltilmiş jeosentrik uzaklık
$i_k = i_0 + i * t_k + C_{is}\sin\big(2(v_{k+}\omega_0)\big) + C_{ic} * \cos\,(2(v_{k+}\omega_0))$	Düzeltilmiş eğim
$x_k = r_k\text{os}\,(u_k)$	Yörünge düzlemindeki X koordinatı
$y_k = r_k\sin\,(u_k)$	Yörünge düzlemindeki Y koordinatı
$\Omega_k = \Omega_0 + \big(\dot{\Omega} - \Omega_e\big)t_k - \Omega_e t_{oe}$	DüzeltilmişYükselen düğüm noktasının Boylamı
$X_{ECEF} = x_k\cos(\Omega_k) - y_k\cos\,(i_k)\sin\,(\Omega_k)$	ECEF düzlemindeki X koordinatı
$Y_{ECEF} = x_k\sin(\Omega_k) + y_k\cos\,(i_k)\cos\,(\Omega_k)$	ECEF düzlemindeki Y koordinatı
$Z_{ECEF} = y_k\sin\,(i_k)$	ECEF düzlemindeki Z koordinatı
$\delta t^s(t) = a_0 + a_1 t_k + a_2 t_k^2$	Uydu Saat Hatası

Uydu saati GPS saatine senkronize olmadığından dolayı, Tablo 2.2'de yer alan t_{oe} ifadesi GPS zamanına göre düzeltilmelidir. t_{oe} referans zamanı her GPS haftası cumartesiyi pazara bağlayan gece yarısı sıfır değerinden başlamaktadır. Böylece t_{oe} bir hafta süresince alacağı maksimum değer 604800 saniye olacaktır [Kahveci ve Yıldız, 2012].

GLONASS navigasyon mesajı ise genellikle Parametry Zemli 1990 (PZ90) yer merkezli kartezyen koordinat sisteminde ifade edilen yarım saatlik bir uydu durum vektörü olarak iletilir [Stewart and Tsakiri, 1998]. Efemeris parametreleri periyodik olarak hesaplanır ve kontrol segmenti tarafından uydulara yüklenir. Uyduların iletilen koordinatlarının ve hızlarının standart sapmaları Tablo 2.3'te verilmiştir [Web 9, 2021].

Tablo 2.3: GLONASS-M uydularına iletilen koordinatların ve hızların doğruluğu.

Hata Bileşeni	**Standart Sapma**	
	Koordinat (m)	**Hız (cm/saniye)**
Uydu Yörüngesi Boyunca (Along Track)	7.0	0.03
Uydu Yörüngesi Doğrultusuna Dik (Across Track)	7.0	0.03
Uydu ve Dünya Yer Merkezini Birleştiren Doğrultu (Radial)	1.5	0.20

GLONASS yayın efemerisinde, t_b epoğundaki durum vektörü belirliyken, $|t_b - t_0| \leq 15\, dak.$ olması ile birlikte t_0 epoğundaki uydu konum ve hızları, uyduların hareketini tanımlayan bileşenler yardımıyla hesaplanabilir. PZ90 sistemindeki uydunun hareket denklemleri aşağıdaki gibidir [Web 10, 2021], [Stewart and Tsakiri, 1998].

$$\ddot{x} = -\frac{\mu}{r^3}x - \frac{3}{2}J_0^2 - \frac{\mu a_e^2}{r^5}x\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + w^2x + 2w\dot{y} + \ddot{x}_S + {}_M \tag{2.15}$$

$$\ddot{y} = -\frac{\mu}{r^3}y - \frac{3}{2}J_0^2 - \frac{\mu a_e^2}{r^5}y\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + w^2y + 2w\dot{x} + \ddot{y}_S + {}_M \tag{2.16}$$

$$\ddot{z} = -\frac{\mu}{r^3}z - \frac{3}{2}J_0^2 - \frac{\mu a_e^2}{r^5}z\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \ddot{z}_S + {}_M \tag{2.17}$$

Eşitlik 2.15, 2.16 ve 2.17'de yer alan $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})_{S+M}$, ay ve güneş çekiminin düzensizliklerinden kaynaklanan ivmedir ve iterasyon boyunca sabit kalır. μ, bir önceki bölümdede belirtildiği üzere yerçekimi sabitidir. a_e Dünya'nın büyük yarı

ekseni, J_0^2 ise ikinci dereceden jeopotansiyel katsayısını ifade etmektedir. Söz konusu eşitliklerdeki w terimi ise yerin dönme hızıdır. İndirgenmiş denklemlerin hesaplanması için başlangıç değerleri, t_b epoğundaki uydu vektörünün $(x(t_b), y(t_b), z(t_b), \dot{x}(t_b), \dot{y}(t_b), \dot{z}(t_b))$ bileşenleridir. İterasyon adımları ise 4. derece Runge-Kutta tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir [Web 10, 2021], [Press et al., 1992].

2.5.2. Hassas Efemeris Bilgileri

Hassas efemeris bilgisi, genellikle 15 dakikalık eşit aralıklar boyunca uyduların konum, hız ve saat hatalarını içeren ASCII dosyasından oluşmaktadır. Hassas efemeris dosyaları, belirli analiz merkezlerinin web sayfalarından herkese açık olarak erişilebilmekte ve kullanıcıya 18 güne varan bir gecikme ile sunulmaktadır [Web 11, 2021]. Uluslararası GNSS Servisi (IGS)'ne bağlı kuruluşlar tarafından üretilen hassas efemeris bilgileri tüm kullanıcılar için ücretsizdir ve standart SP3 formatı ile yayımlanır. SP3 formatı, GNSS uydularının hassas yörünge ve saat verilerinin kullanıcılara sağlanması için yaygın olarak kullanılan bir standardı tanımlar. RINEX gözlem verilerinin yanı sıra, SP3 yörünge ve saat bilgisi Hassas Nokta Konumlama (PPP) tekniği uygulamalarının temelini oluşturur. SP3 veri formatı US National Geodetic Survey (NGS) tarafından geliştirilen iki tür GPS yörünge veri formatından (SP1, SP2) türetilmiştir. Yalnızca yörünge verileriyle sınırlı olan öncüllerinin dışında, SP3 ayrıca saat verilerini ve doğruluk bilgilerini de içermektedir [Teunissen and Montenbruck, 2017].

Dosyada sunulan epoklar arasında yer alan t epoğunda bir uydunun konum ve hız vektörünü elde etmek için enterpolasyon tekniği kullanılmaktadır. En çok kullanılan enterpolasyon teknikleri, polinomal fonksiyonlarına dayanan Lagrange enterpolasyonu ve GNSS yörüngelerinin periyodik yapısını kullanan trigonometrik enterpolasyondur [Teunissen and Montenbruck, 2017]

3. HASSAS NOKTA KONUMLAMA (PPP)

PPP tekniği, tek GNSS alıcısının konum bilgisini eş zamanlı bir referans alıcıya gerek duymadan oldukça yüksek doğrulukla hesaplayabilen etkili bir yöntemdir [Malys and Jensen, 1990], [Zumberge et al., 1997], [Kouba and Heroux, 2001]. Rölatif konum belirleme ile kıyaslandığında, PPP tekniğinin tek GNSS alıcısı ile hassas konum belirlemesi ve dolayısıyla herhangi bir referans alıcıya ihtiyaç duymaması büyük bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle mega depremler sırasında rölatif konum belirleme için sabit nokta şartının sağlanamaması deprem kaynaklı yer sarsıntılarının rölatif yöntemle belirlenememesine sebep olmaktadır [Shu et al., 2017]. Başka bir durum olarak, yüksek yapıların yoğunlukta olduğu metropolitan bölgelerde Yapı Sağlığı İzlemeleri (YSİ) için gözlemlenen objeye yakın olan, hareketsiz ve açık uydu görüşüne sahip bir referans noktası bulunması oldukça zor bir koşuldur. Bu sebeplerden dolayı, GNSS-sismolojisi ve YSİ uygulamalarında, PPP tekniği rölatif konum belirlemeye göre büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, PPP tekniği hassas konum bilgisi üretmek için hassas uydu yörünge ve saat bilgileri, anten faz merkezi ofseti, alıcı ve uydu anteni faz dönmesi, katı yeryuvarı gelgitleri, okyanus gelgit yüklemesi gibi doğrudan temin edilen ürünlere ihtiyaç duymaktadır. Buna ek olarak, rölatif konum belirlemenin aksine, geleneksel-PPP yönteminde başlangıç faz belirsizliği bilinmeyen olarak ele alındığından (yani faz başlangıç belirsizliği tam sayı değil kesirli bir sayı olarak çözüldüğünden) santimetre düzeyinde konum hassasiyeti elde etmek için biraz daha uzun süreli ölçü toplamaya gerek vardır. Bu nedenle, bazı araştırmacılar başlangıç faz belirsizliğinden kaynaklı yakınsama süresini kısaltmak ve konum doğruluğunu iyileştirmek amacıyla başlangıç faz belirsizliğini tam sayı olarak kestirmek için bazı yöntemler geliştirmiştir [Ge et al., 2008]; [Laurichesse et al., 2009b]; [Collins et al., 2010]; [Geng et al., 2010].

3.1. PPP Tekniği

PPP tekniğinin matematiksel modeli, tez çalışması kapsamında Bölüm 2.4.1 ve 2.4.2'de irdelenen, Bölüm 2.4.3'te ise 2.7 ve 2.8 eşitliklerinde ifade edilen kod ve faz gözlemlerine dayanmaktadır. PPP tekniği iyonosfer hatasını elemine etmek için Bölüm 2.4.4'te detaylıca açıklanan iyonosfer-bağımsız lineer kombinasyonu

kullanmaktadır. Eşitlik 2.7 ve 2.8'deki iyonosfer-bağımsız kod ve faz gözlemlerindeki ifadeler biraz revize edilerek aşağıda tekrar belirtilmiştir;

$$P_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T + b^r_{P3} - b^s_{P3} + \varepsilon_{P3} \quad (3.1)$$

$$L_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T - \lambda_3 N_3 + b^r_{L3} - b^s_{L3} + \varepsilon_{L3} \quad (3.2)$$

Söz konusu eşitliklerde P_3 ve L_3 iyonosfer-bağımsız kod ve faz gözlemlerini ifade ederken, ρ uydu ve alıcı arasındaki geometrik mesafeyi, c ışığın boşluktaki hızını, dt^r ve dt^s sırasıyla alıcı ve uydu saat hatasını, T troposferik gecikmeyi, b^s_* ve b^r_* uydu ve alıcı biasını, ε_{P3} ve ε_{L3} ise kod ve faz ölçülerindeki donanım ve multipath kaynaklı gürültüyü ifade etmektedir. Bu eşitliklerdeki bahsedilen hatalar başlangıç faz belirsizliğini etkilemektedir. Bunun dışında kalan hataların (uydu görelilik etkisi, anten faz merezi hatası ve değişimi, faz salınım etkisi, alıcı anteni faz merkezi hatası ve değişimi, sagnac etkisi) düzeltmeleri ham gözlemlere düzeltme olarak getirilmelidir. Sonuç olarak 3.1 ve 3.2 eşitlikleri geleneksel-PPP tekniğinin fonksiyonel modelini oluşturmaktadır [Cai, 2009].

3.2. PPP-AR Tekniği

Geleneksel-PPP çözümünde başlangıç faz belirsizliği tam sayı olarak değil, kesirli sayı olarak çözülmektedir. Bu yöntemde tahmin edilen faz belirsizliği parametresi tam sayı çözümünün, alıcı ve uydu biaslarının bir kombinasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu ifade, çözüm gerçekleştiğinde belirsizlik parametresinin tam sayı özelliğini kaybetmesi anlamına gelmektedir. Özetlemek gerekirse, geleneksel-PPP modelini kullanarak başlangız faz belirsizliğini tamsayı olarak çözmek mümkün değildir. Uydu alıcı uzaklığını sabitleme tamsayı çözümü ve simule edilmiş veriler ile tamsayı belirsizlik çözümü üzerine yapılan araştırmaların ardından, son yıllarda gerçek veri setleri ile birlikte çeşitli PPP tamsayı belirsizlik çözüm yöntemleri geliştirilmiştir [Gao and Shen, 2002]; [Wang and Gao, 2006]; [Wang and Gao, 2007].

Ge et al., tekli farklar çözümünde alıcı biaslarını elemine ederek oluşturulan uydular arası tekli farklar yöntemini (single difference between-satellites) yöntemini önermiştir [Ge et al., 2008]. Bu yöntemde, tamsayı özelliğinin sağlanması için kesirli

dalga gecikmeleri (fractional-cycle bias (FCBs)) uyduların geniş ve dar bantlarında (wide-lane (WL) and narrow-lane (NL)) düzeltilmektedir.

Collins, ayrıştırılmış saat modelini (decoupled clock model) ortaya atmış ve faz başlangıç belirsizliğinin kesirli kısmının oluşmasında kod biaslarınında etkisi olduğunu kanıtlamıştır [Collins, 2008]. Bu modelde, uydu ayrıştırılmış saat düzeltmeleri kullanılarak ve alıcı ayrıştırılmış saat parametreleri tahmin edilerek hem geniş bant aralığındaki iyonosfer-bağımsız eşitliğin WL katsayıları kullanılarak elde edilmesi sonucu ortaya çıkan N4, hem de N1 faz başlangıç değeri doğrudan çözülebilmektedir.

Laurichesse et al., kod ve faz gözlemleri için farklı saat terimlerini içeren tamsayı faz saati modelini (integer phase clock model) geliştirmiştir [Laurichesse et al., 2008]. Bu model, geniş bant aralığındaki belirsizlik değerini çözebilmek için geniş aralık uydu bias (wide-lane satellite bias (WSB)) düzeltmelerini kullanmakta ve N1 ambiguity (belirsizlik parametresi) değerini tam sayı olarak doğrudan çözebilmektedir.

Geleneksel-PPP tekniğide kullanılan temel model eşitlik 3.1 ve 3.2'de ifade edilmiştir. Bu eşitliklerde yer alan iyonosfer-bağımsız uydu ve alıcı faz biasları aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$b_{P3}^{r} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{P1}^{r} + \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{P2}^{r} \tag{3.3}$$

$$b_{L3}^{s} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{L1}^{s} + \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{L2}^{s} \tag{3.4}$$

İyonosfer-bağımsız kod ve faz eşitliklerine ek olarak, yaygın olarak kullanılan diğer bir lineer fonksiyon, geniş bandlı faz ile dar bantlı kod gözlemleri arasındaki fark olarak tanımlanan Melbourne-Wubbena (MW) eşitliğidir. WL faz kombinasyonu, başlangıç faz belirsizliği çözümüne büyük ölçüde katkı sağlayabilen, 80.6 cm uzunluğunda bir dalga boyuna sahiptir. $a = \frac{f_1}{f_1 - f_2}$ ve $\beta = \frac{-f_2}{f_1 - f_2}$ WL katsayıları ile oluşturulan L_4 eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned} L_4 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T - \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} I_1 + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} I_2\right) - \lambda_4 N_4 \\ + \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} b_{L1}^{r} + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} b_{L2}^{r}\right) - \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} b_{L1}^{s} + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} b_{L2}^{s}\right) + \varepsilon_{L4} \end{aligned} \tag{3.5}$$

İyonosferin $I_2 = \frac{f_1^2}{f_2^2} I_1$ şeklindeki dağılma özelliği dikkate alınırsa L_4 şu hale gelir;

$$L_4 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T + \frac{f_1}{f_2} I_1 - \lambda_4 N_4 + \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} b_{L1}^r + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} b_{L2}^r\right) - \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} b_{L1}^s + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} b_{L2}^s\right) + \varepsilon_{L4} \quad (3.6)$$

NL ve WL aynı geometrik ve iyonosferik gecikmelere sahip olduğu için her zaman beraber kullanılırlar. $\alpha = \frac{f_1}{f_1 + f_2}$ ve $\beta = \frac{f_2}{f_1 + f_2}$ NL katsayıları ile oluşturulan NL kod gözlemi olan P_6 eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$P_6 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T - \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} I_1 + \frac{f_2}{f_1 + f_2} I_2\right) + \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{P1}^r + \frac{f_2}{f_1 + f_2} b_{P2}^r\right) - \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{P1}^s + \frac{f_2}{f_1 + f_2} b_{P2}^s\right) + \varepsilon_{P6} \quad (3.7)$$

İyonosferin $I_2 = \frac{f_1^2}{f_2^2} I_1$ özelliği dikkate alınırsa P_6;

$$P_6 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T + \frac{f_1}{f_2} I_1 + \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{P1}^r + \frac{f_2}{f_1 + f_2} b_{P2}^r\right) - \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{P1}^s + \frac{f_2}{f_1 + f_2} b_{P2}^s\right) + \varepsilon_{P6} \quad (3.8)$$

L_4 ve P_6 eşitliklerine bağlı olarak oluşturulan MW kombinasyonu A_4 aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$A_4 = L_4 - P_6 = -\lambda_4 N_4 + \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} b_{L1}^r + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} b_{L2}^r - \frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{P1}^r - \frac{f_2}{f_1 + f_2} b_{P2}^r\right) - \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} b_{L1}^s + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} b_{L2}^s + \frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{P1}^s + \frac{f_2}{f_1 + f_2} b_{P2}^s\right) + \varepsilon_{A4} \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.6 aracılığı ile tüm geometrik terimler ve iyonosferik gecikmeler elemine olmaktadır ve söz konusu bu denklemde, sadece WL başlangıç faz belirsizliği ile uydu ve alıcı biasları yer almaktadır. MW fonksiyonundaki b_{A4}^r ve b_{A4}^s uydu ve alıcı biasları ise aşağıda belirtilen eşitlik 3.10 ve eşitlik 3.11'de ifade edilmektedir;

$$b_{A4}^{r} = \frac{f_1}{f_1 - f_2} b_{L1}^{r} + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} b_{L2}^{r} - \frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{P1}^{r} - \frac{f_2}{f_1 + f_2} b_{P2}^{r} \quad (3.10)$$

$$b_{A4}^{s} = \frac{f_1}{f_1 - f_2} b_{L1}^{s} + \frac{-f_2}{f_1 - f_2} b_{L2}^{s} + \frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{P1}^{s} + \frac{f_2}{f_1 + f_2} b_{P2}^{s} \quad (3.11)$$

olarak tanımlanır ise A_4 eşitliği aşağıdaki gibi olur;

$$A_4 = -\lambda_4 N_4 + (b_{A4}^{r} - b_{A4}^{s}) + \varepsilon_{A4} \quad (3.12)$$

Tekrar etmek gerekirse, geleneksel-PPP tekniğinde kullanılan matematiksel model eşitlik 3.1 ve 3.2'de belirtilmiştir. Söz konusu eşitliklerde de görüldüğü gibi geleneksel-PPP modelinde 4 uydu alıcı ve saat biası bulunmaktadır. İyonosfer-bağımsız kod ve faz gözlemlerinde aynı alıcı ve uydu saati kullanılır ise eşitlik 3.1 ve 3.2 aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$P_3 = \rho + d_{orb} + c((dt^r + b_{P3}^{r}) - (dt^s + b_{P3}^{s})) + T + \varepsilon_{P3} \quad (3.13)$$

$$L_3 = \rho + d_{orb} + c\big((dt^r + b_{P3}^{r}) - (dt^s + b_{P3}^{s})\big) + T - \lambda_3 N_3 + (b_{L3}^{r} - b_{P3}^{r}\big) - (b_{L3}^{s} - b_{P3}^{s}) + \varepsilon_{P3} \quad (3.14)$$

Uydu saat hatası olan $(dt^s + b_{P3}^{s})$ değeri IGS saat ürünleri ile kalibre edilebilir. Geleneksel-PPP modelindeki bilinmeyen parametreler alıcı koordinat bilgisi, alıcı saat hatası, artık troposferik hata ve iyonosfer-bağımsız ambiguity olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel-PPP modelindeki alıcı $(dt^r + b_{P3}^{r})$ ve uydu $(dt^s + b_{P3}^{s})$ saatleri, uydu ve alıcı kod biaslarını içeren doğal kod saatlerine göredir. Bu kod saatleri, iyonosfer-bağımsız faz gözlemlerinde kullanıldığında hem uydu/alıcı kod hem de uydu/alıcı faz biasları başlangıç faz belirsizliği terimi tarafından absorbe edilecektir. Bunun sonucunda hesaplanan belirsizlik parametresi alıcı/uydu faz ve kod biaslarının bir kombinasyonu olarak karşımıza çıkacaktır $(-\lambda_3 N_3 + (b_{L3}^{r} - b_{P3}^{r}) - (b_{L3}^{s} - b_{P3}^{s}))$.

Sonuç olarak, alıcı ve uydu iyonosfer-bağımsız kod ve faz biaslarını da içererek hesaplanan başlangıç faz belirsizliği parametresi kesirli bir sayı olacaktır. Bu yüzden başlangıç faz belirsizliği parametresini eşitlik 3.13 ve eşitlik 3.14'te özetlenen geleneksel-PPP algoritmasını kullanarak tamsayı olarak çözmek mümkün değildir.

3.2.1. Ayrıştırılmış Saat (Decoupled Clock) Modeli

Eşitlik 3.13 ve 3.14'te belirtildiği gibi geleneksel-PPP modeli uydu ve alıcı kod/faz biaslarını içerdiği için ambiguity parametresini tam sayı olarak çözmek mümkün değildir. Ancak söz konusu biaslar giderildikten sonra ambiguity belirsizliği tamsayı olarak elde edilebilir. Collins, tarafından ortaya atılan ayrıştırılmış saat modelinde uydu/alıcı kod ve faz biasları ambiguity belirsizliğinden ayrılmıştır [Collins, 2008]. Decoupled Clock modeli iyonosfer–bağımsız eşitlikler olan ve sırasıyla 3.12, 3.13 ve 3.14 denklemlerinde ifade edilen P_3, L_3, A_4 eşitliklerinden oluşmaktadır. Bu denklemlerdeki bilinmeyen parametreler, alıcı koordinatı, troposferik gecikme, uydu ve alıcı saati, gözleme bağlı uydu ve alıcı biasları ve ambiguity parametresidir. Bu modelde, bilinmeyen sayısı gözlem sayısından büyük olduğu için datum defekti sorunu ortaya çıkmaktadır. Datum defekti sorunu çözülmeden önce, Eşitlilk 3.14'teki N_3 iyonosfer-bağımsız ambiguity terimine ayrıştırma işlemi uygulanmalıdır;

$$\begin{aligned}\lambda_3 N_3 &= \frac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}\lambda_1 N_1 + \frac{-f_2^2}{f_1^2-f_2^2}\lambda_2 N_2 = \frac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}\frac{c}{2f_1f_0}N_1 + \frac{-f_2^2}{f_1^2-f_2^2}\frac{c}{2f_1f_0}N_2 \\ &= \frac{c}{2f_0(f_1^2-f_2^2)}(77N_1 - 60N_2) = \lambda_3(77N_1 - 60N_2) \\ &= \lambda_3[17N_1 + (60N_1 - 60N_2)] = \lambda_3(17N_1 + 60N_4)\end{aligned} \tag{3.15}$$

Bu ayrıştırmada yapılan işlem, 6 mm'lik kısa dalga boylu bir başlangıç faz belirsizliği çözünürlüğünün, sırasıyla 10.7 cm ve 37.8 cm olan uzun dalga boylu iki ayrı başlangıç faz belirsizliği çözünürlüğüne dönüşmesidir. Datum defekti sorununu çözmek için iki spesifik işlem adımı gereklidir. Bunlardan birincisi parametreleri yeniden inşaa etme adımıdır. IGS ürünleri ile kombine bir şekilde çözülen saat hataları ve uydu/alıcı kod/faz biasları ayrıştırılarak modele yeniden dahil edilmektedir.

$$\begin{aligned} dt_{P3}^r &= dt^r + b_{P3}^r \qquad dt_{P3}^s = dt^s + b_{P3}^s \\ dt_{L3}^r &= dt^r + b_{L3}^r \qquad dt_{L3}^s = dt^s + b_{L3}^s \end{aligned} \tag{3.16}$$

Eşitlik 3.15 ve 3.16 kullanılarak eşitlik 3.12, eşitlik 3.13 ve eşitlik 3.14 yeniden düzenlenir;

$$P_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r_{P3} - dt^s_{P3}) + T + \varepsilon_{P3} \quad (3.17)$$

$$L_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r_{L3} - dt^s_{L3}) + T - \lambda_3\,(17N_1 + 60N_4) + \varepsilon_{P3}$$

$$A_4 = -\lambda_4\,N_4 + (b^r_{A4} - b^s_{A4}) + \varepsilon_{A4}$$

Eşitlik 3.17 ile 3.12, 3.13 ve 3.14 eşitlikleri kıyaslandığında görülmektedir ki bilinmeyen parametre sayısı azlmıştır. Fakat bilinmeyen parametre sayısı hala gözlem sayısından fazladır. n adet uydu gözlemlediğimizi düşünürsek, 3n gözlem modeli oluşacaktır ki bu da 3 koordinat bilgisi, 1 troposferik gecikme, 3 alıcı decoupled clock, 3n uydu decoupled clock ve 2n başlangıç faz belirsizliği parametresi olmak üzere 7+5n bilinmeyen demektir. Bu yüzden datum defekti sorunu hala mevcuttur. Datum defekti sorununu ortadan kaldırmak için parametrelerin yeniden düzenlenmesine ek olarak gereken ikinci işlem adımı ise çözümü iki adet datuma sabitlemektir. Bu iki datumdan birincisi, referans alıcı seçerek ve kod/faz saat hatalarını ve kod/faz biaslarını sıfır olarak ayarlanarak uygulanan saat datumudur. Referans saat datumu belirlenmesi işlemi en küçük kareler yönteminde yapılan tahmindeki artıkları minimize etmektedir. Örneğin IGS'in AMC2 istasyonu decoupled clock modelinde referans saat olarak kullanılmaktadır. İkinci datum ise başlangıç faz belirsizliği parametresi datumudur ve bu da referans bir uydu seçilerek bu uydunun N_1 ve N_4 değerleri rastgele bir tamsayı değeri verilerek sağlanır. Bilinmeyen parametrelerin yeniden düzenlenmesi ve saat/ambiguity datumunun belirlenmesi ile eşitlik 3.17'deki datum defecti sorunu ağ çözümlerinde ortadan kalkmaktadır. Ayrılmış uydu saatlerinin belirlenmesi, birden fazla alıcının referans ağına dayanmalıdır. Uydu saati yayın yükünü azaltmak için Eşitkik 3.17'deki uydu kod saati dt^s_{P3}, uydu faz saati dt^s_{L3} artı uydu kod biası b^s_{code} şeklinde ayrıştırılabilir. Sonuç olarak üç uydu decoupled saati dt^s_{L3}, b^s_{code} ve b^s_{A4} şeklinde ifade edilebilir. Benzer şekilde, alıcı kod saati dt^r_{P3}, alıcı faz saati dt^r_{L3} ve alıcı kod biası b^r_{code} şeklinde ayrıştırılabilir. Bu yüzden eşitlik 3.17 aşağıda belirtildiği gibi şekilde yeniden yazılabilir;

$$P_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r_{L3} + b^r_{code}) - (dt^s_{L3} + b^s_{code}) + T + \varepsilon_{P3} \quad (3.18)$$

$$L_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r_{L3} - dt^s_{L3}) + T - \lambda_3\,(17N_1 + 60N_4) + \varepsilon_{P3}$$

$$A_4 = -\lambda_4\,N_4 + (b^r_{A4} - b^s_{A4}) + \varepsilon_{A4}$$

Ağ çözümünde belirlenen uydu ayrıştırılmış saatleri kullanıcı alıcısına yayınlanacaktır. Uydu saat hatalarının dt_{L3}^{s}, b_{code}^{s} ve b_{A4}^{s} ile kalibre edilmesinin ardından kullanıcı çözümünde koordinatlar, alıcı ayrıştırılmış saatleri, troposferik gecikme ve başlangıç faz belirsizliklerini içeren dört farklı bilinmeyen parametre grubu tahmin edilmektedir.

Kullanıcı çözümünde ise, uydu ayrıştırılmış saatleri bilinen terimlerle birlikte kullanıldığından, saat datumu korunmakta, bu da kullanıcı alıcının ağ çözümü ile aynı saat referansını paylaştığı anlamına gelmektedir. İkincisi, başlangıç faz belirsizliği datumu ayrıca bir referans uydunun seçilmesi ve N_1 ve N_4 başlangız faz belirsizliklerinin rastgele tamsayı değerleri olarak seçilmesi de gereklidir. Kullanıcı çözümünde seçilen referans uydunun, ağ çözümünde seçilen referans uyduyla aynı olması zorunlu değildir. Aslında, her kullanıcı alıcısı kendi referans uydusunun başlangıç faz belirsizliği verilerini tanımlamalıdır. Başlangıç faz belirsizliği verisi farkı, alıcı ayrıştırılmış saatleri tarafından tarafından absorbe edilecektir. Bu açıdan bakıldığında, alıcı ayrıştırılmış saatleri, GPS zamanına göre artık mutlak bir zaman değildir. Bunun yerine başlangıç faz belirsizliği datumuna bağlı olarak göreli saatlerdir.

$a = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, b = \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, c = \frac{f_1}{f_1 - f_2}, d = \frac{f_2}{f_1 - f_2}, e = \frac{f_1}{f_1 + f_2}, f = \frac{f_2}{f_1 - f_2}$ belirlenerek ve hata yayılma yasası uygulanarak stokastik model şu şekilde yazılabilir;

$$C = \begin{bmatrix} a^2 C_{P_1} b^2 C_{P_2} & 0 & -aeC_{P_1} - bfC_{P_2} \\ 0 & a^2 C_{L_1} b^2 C_{L_2} & acC_{L_1} - bdC_{L_2} \\ -aeC_{P_1} - bfC_{P_2} & acC_{L_1} - bdC_{L_2} & e^2 C_{P_1} + f^2 C_{P_2} + c^2 C_{L_1} + d^2 C_{L_2} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.19'da yer alan $C_{P_1}, C_{P_2}, C_{L_1}, C_{L_2}$ değerlerinin, P_1, P_2, L_1, L_2 GNSS kod ve faz gözlemlerinin varyansları olduğu ifade edilmelidir. Özet olarak, ayrıştırılmış saat modelinin temel fonksiyonlarının eşitlik 3.18 ve eşitlik 3.19 olduğu belirtilmelidir.

Kullanıcı çözümünde $dt^s + b_{P3}^{S}$, $dt^s + b_{L3}^{S}$ ve b_{A4}^{S} uydu saat hataları düzeltilmektedir. n adet uydu gözlemi yapıldığı düşünüldüğünde, bilinmeyen parametreler üç koordinat+3 alıcı kod saati+troposferik gecikme+2(n-1) tane iyonosfer-bağımsız başlangıç faz belirsizliği olacak şekilde 3+3+1+2(n-1) olmaktadır.

3.2.2. Uydular Arası Tekli Farklar (Single Difference Between Satellites) Modeli

Uydular Arası Tekli Farklar (SDBS) modeli Ge et al., tarafından önerilmiştir [Ge et al., 2008]. Decoupled Clock modelinin aksine SDBS modeli ilk olarak kesirli İyonosfer-bağımsız N3 değerini tahmin eder ve ondan sonra uydu FCBs düzeltmelerini kullanarak tamsayı özelliğini sağlar. Modelin ana denklemi eşitlik 3.1 ve 3.2'de ifade edilen geleneksek-PPP yöntemi ile benzerdir. Ancak söz konusu bu eşitlikte yer alan iyonosfer-bağımsız N_3 değeri daha uzun dalga boylarına sahip N_1 ve N_4 belirsizliklerine dönüştürülür;

$$P_3 = \rho + d_{orb} + c((dt^r + b_{P3}^r) - (dt^s + b_{P3}^s) + T + \varepsilon_{P3} \tag{3.20}$$

$$L_3 = \rho + d_{orb} + c\big((dt^r + b_{P3}^r) - (dt^s + b_{P3}^s) + T \\ -\lambda_3\,(17N_1 + 60N_4) + (b_{L3}^r - b_{P3}^r\big) - (b_{L3}^s - b_{P3}^s) + \varepsilon_{P3}$$

Datum defekti sorunundan dolayı N_1 ve N_4 değerleri eşitlik 3.20'de eş zamanlı olarak çözülemeyeceği için, sırasıyla çözülürler. WL ambiguity değeri olan N_4 değeri bu yöntemde uzun dalga boyuna (86.9 cm) sahip olduğu için ilk olarak oldukça kısa bir gözlem sonucunda çözülür. Çözülmüş ambiguity değeri bilinen bir tamsayı olarak kabul edilir ve 10.7 cm dalga boyuna sahip N_3 değeri N_1 değerine dönüştürülür. SDBS yöntemi ilk olarak eşitlik 3.12'de bahsedilen MW fonksiyonunu ele alır. Tekli farklar işlemi her uydu çifti için kullanılır;

$$\Delta A_4^{j,i} = -\lambda_4 \Delta N_4^{j,i} + \left(-\Delta b_{A4}^{s^{j,i}}\right) + \varepsilon_{A4}^{j,i} \tag{3.21}$$

Uydulardaki WL biasları, ardışık günlerde sabit olduğu bilinmektedir. Bunun bir sonucu olarak, epok ortalama yöntemi WL biaslarını belirlemek için kullanılabilir. WM kombinasyonunun yakınsaması için belirli bir süre gerekmektedir. Bu süre geçtikten sonra WL başlangıç faz belirsizliği değeri, kesirli olarak elde edilen WL değerini en yakın tam sayıya yuvarlayarak elde edilebilir;

$$\Delta N_4^{j,i} = -\frac{1}{\lambda_4}\left(< \Delta A_4^{j,i} >\right) \tag{3.22}$$

$\Delta N_4^{j,i}$ WL başlangıç faz belirsizliği değeri tam sayı olarak elde edildikten sonra uydu FCBs değeri metre biriminde hesaplanır;

$$\Delta b_4^{s^{j,i}} = \Delta A_4^{j,i} - \lambda_4 \Delta N_4^{j,i} = -\frac{1}{\lambda_4}\left(\Delta A_4^{j,i}\right) + \frac{1}{\lambda_4}(< \Delta A_4^{j,i} >) \tag{3.23}$$

Eşitlik 3.23, uydu WL FCBs değerini tek alıcı ile belirlemek için kullanmaktadır. Çok alıcılı ağlarda bu değerin ortalaması alınarak bu değer yüksek hassasiyette belirlenmekte ve ağdaki kullanıcılar ile paylaşılmaktadır. Ağ çözümüne benzer bir şekilde, SDBS yönteminin MW kullanıcı çözümü aşağıdaki gibidir;

$$\Delta A_{4\_user}^{j,i} = -\lambda_4 \Delta N_{4\_user}^{j,i} + \left(-\Delta b_{A4}^{s^{j,i}}\right) + \varepsilon_{A4\_user}^{j,i} \tag{3.24}$$

Uydu WL FCBs $\Delta b_{A4}^{s^{j,i}}$, eşitlik 18'deki MW fonksiyonuna eklenir;

$$\Delta A_{4\_user}^{j,i} + \Delta b_{A4}^{s^{j,i}} = -\lambda_4 \Delta N_{4\_user}^{j,i} + \left(-\Delta b_{A4}^{s^{j,i}}\right) + \Delta b_{A4}^{s^{j,i}} \tag{3.25}$$

Eşitlik 3.25, aşağıdaki denkleme dönüşür;

$$\Delta A_{4\_user}^{j,i} + \Delta b_{A4}^{s^{j,i}} = -\lambda_4 \Delta N_{4\_user}^{j,i} \tag{3.26}$$

$\Delta b_{A4}^{s^{j,i}}$ değeri ağ çözümünde belirlendiği için başlangıç faz belirsizliği değerinin tam sayı özelliği teorik olarak kullanıcı çözümünde elde edilmektedir. Kullanıcı çözümünde N_1 değerini elde etmek içinse eşitlik 3.21, her bir uydu çiftine göre farkları alınarak uygulanır;

$$\Delta A_{1\_user}^{j,i} = -17\lambda_3 \Delta N_1^{j,i} - \Delta b_{A1}^{s^{j,i}} + \varepsilon_{L3\_user}^{j,i} \tag{3.27}$$

Ağ çözümünde elde edilen N_1 FCBs değeri eşitlik 3.27'ye eklenir ve sonuç olarak başlangıç faz belirsizliğini tam sayı olarak elde edilmeye olanak sağalayacak olacak olan eşitlik 3.28 aşağıdaki gibi yazılır;

$$\Delta\Delta A_{1\_user}^{j,i} + \Delta b_{A1}^{s^{j,i}} = -17\lambda_3 \Delta N_{1\_user}^{j,i} \tag{3.28}$$

$\Delta b_{A1}^{s^{j,i}}$ değeri ağ çözümünde belirlendiği için N_1 ambiguity değerinin tam sayı özelliği teorik olarak kullanıcı çözümünde elde edilir.

3.3.3. Tam Sayı Faz Saati (Integer Phase Clock) Modeli

SDBS yönteminin aksine, Tam Sayı Faz Saati (IPC) yönteminde herhangi bir fark alınmamaktadır. Bunun aksine, MW fonksiyonunun tam sayı ve kesirli kısmı MW fonksiyonunda ayrılır ve bir referans alıcının MW biasları sıfıra sabitlenerek uydunun MW biasları hesaplanmaktadır;

$$b_{A4}^{s} = A_4 - < A_4 > \tag{3.29}$$

Uydu MW biasları, diğer alıcıların MW biaslarını hesaplamak için bilinen olarak kabul edilir ve ağ çözümünde bir WL uydu biası ve tüm alıcıların WL biasları hesaplanır. IPC modelinin kullanıcı çözümünde, MW eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$A_{4\_users} = -\lambda_4 N_{4\_users} + (b_{A4\_users}^{r} - b_{A4}^{s}) \tag{3.30}$$

IPC modelinin ağ çözümünde belirlenen b_{A4}^{s} uydu biası eşitlik 3.30'a eklenirse eşitlik 3.31 elde edilmektedir;

$$A_{4\_users} + b_{A4}^{s} = -\lambda_4 N_{4\_users} + b_{A4\_users}^{r} \tag{3.31}$$

Fakat eşitlik 3.31'de görüldüğü gibi başlangıç faz belirsizliği çözümü hala alıcı biaslarından etkilenmektedir. Bu yüzden alıcı biasları, tüm uydudalardan gözlem yaparak elde edilen kesirli sayı başlangıç faz belirsizliğ değerlerinin kesirli kısmı atılıp ortalaması alınarak hesaplanmalıdır. m, gözlemlenen ambiguity sayısını ifade eder ise;

$$b_{A4\_users}^{r} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}[\left(A_{4_{users}} + b_{A4}^{s}\right) - (< A_{4_{users}} + b_{A4}^{s} >)] \tag{3.32}$$

Eşitlik 3.32'deki alıcı biasları eşitlik 3.30'a eklenirse kullanıcı WL ambiguity değerini tam sayı olarak elde edebilir [Shi and Gao, 2014];

$$A_{4\_users} + b_{A4}^{s} - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left[\left(A_{4_{users}} + b_{A4}^{s}\right) - \left(< A_{4_{users}} + b_{A4}^{s} >\right)\right] = \lambda_4 N_{4\_users} \quad (3.33)$$

3.3. Sonradan-Değerlendirme ve Gerçek-Zamanlı PPP ve PPP-AR Tekniği

Çeşitli analiz istasyonlarından temin edilen hassas yörünge ve saat bilgileri, hassas konum bilgisi elde etmek için PPP tabanlı hizmetleri geliştirme ve uygulama fırsatı sağlamıştır. Hem statik hem de kinematik konumlandırma için sonradan-değerlendirme (PP) PPP hizmetlerinin, birçok farklı uygulama için yararlı ve verimli olduğu yapılan çalışmalar ile birlikte kanıtlanmıştır. İnternet tabanlı PP-PPP hizmetleri çeşitli kurumlar tarafından sunulmakla beraber, birçok açık kaynak kodlu paket yazılım da bulunmaktadır. Son yıllarda birçok gerçek-zamanlı (RT) PPP tabanlı veri istasyonları da ortaya çıkmış durumdadır. RT-PPP istasyonlarının işletilmesi genellikle daha maliyetli olmakla beraber, deprem-tsunami erken uyarı sistemleri gibi hizmetler için aktif olarak kullanılmaktadır. Ancak bu bölümde, web tabanlı PPP hizmetleri ile web tabanlı rölatif konum belirlemeye dayalı hizmetler arasında ayrım yapmak gerekmektedir. Yalnızca bir web sayfasından GNSS verilerini göndermesi gereken kullanıcılara bu hizmetler aynı görünebilseler bile bu hizmetler temel olarak farklılık göstermektedirler. US National Geodetic Survey Opus and the GeoScience Australia (AUSPOS) gibi rölatif konum belirleme tabanlı hizmetler, veri çözme algoritmalarının gerektirdiği ikili farkları oluşturmak için birkaç istasyondan gelen verilere ihtiyaç duymaktadır. Bu veriler, ulusal Continuous Operating Reference Stations (CORS) ağlarından veya IGS küresel ağından elde edilmektedir. Kullanıcılar tarafından elde edilen sabit istasyon verilerine ek olarak bir veya daha fazla baz istasyonundan alınan verilere güvenmenin hem avantajları hem de bazı dezavantajları vardır. Rölatif konum belirleme tekniği, yeterli sayıda istasyon mevcut olduğu sürece, daha sağlam faz sıçraması tespiti ve onarımının yanı sıra daha basit ve kolay bir şekilde başlangıç faz belirsizliğinin çözümü imkânı sumaktadır. Yeterli sayıda sabit istasyon şartının sağlanmaması veya deprem kaynaklı yer

sarsıntısı sırasında referans istasyonun belirli bir frekansta hareket etmesi rölatif konum belirleme tekniğinin uygulanabilirlik alanını azaltacaktır.

PP-PPP tekniği genellikle RT-PPP uygulamalarından daha hassastır ve mutlak doğruluk ve hassasiyet gerektiren uygulamalar için genelde PP-PPP tekniği kullanılmaktadır. Orta veya kısa bazlarda (<1000 km) rölatif konum belirleme kadar hassas olmasa da özellikle jeodezik kontrol noktalarının seyrek olarak dağıldığı veya hiç olmadığı uzak bölgelerde jeodezik kontrol sağlamak için PP-PPP tekniği hızla benimsenmektedir. Ek olarak bazı yörünge ve saat ürünlerinin hassasiyeti nedeniyle, PP-PPP tekniği rölatif konum belirleme ile elde edilen doğruluklara oldukça yaklaşmakla birlikte jeodinamik uygulamalar için uzun vadeli istasyon hız tahminleri sağlamaktadır. Genellike, PP-PPP uygulamaları için kullanıcılar tek bir noktadan elde edilen GNSS verilerini internet üzerinden belirli bir sunucuya gönderir ve normal olarak e-posta yoluyla dakikalar içinde analiz bilgileri ile birlikte kestirilen konumu elde eder. Hizmete bağlı olarak, GNSS veri gönderimi için Receiver INdependent EXchange (RINEX) gibi çeşitli formatlar kullanılabilir. PP-PPP sonuçlarının kullanıcıya sunulması için şu anda çok az standardizasyon mevcuttur. GNSS verileri, ana sunucuya alındıktan sonra, hizmet sağlayıcısı tarafından hesaplanan veya IGS gibi üçüncü bir taraftan elde edilen GNSS yörünge ve saat düzeltmeleri kullanılarak PPP tekniğine göre işlenir. Yörünge ve saat düzeltmelerine ek olarak, PPP tekniği için mutlak anten faz merkezi ofseti, alıcı ve uydu anteni faz dönmesi, katı yeryuvarı gelgitleri, okyanus gelgit yüklemesi gibi düzeltmeleri de dikkate almaktadır. Web tabanlı hizmetlere ek olarak, PPP tekniği günümüzde bazı GNSS ekipmanı üreticileri tarafından paket yazılımların bir modülü olarak sunulmaktadır. Hesaplamalar, programın kendi içinde veya mevcut bir web tabanlı hizmete gönderilen GNSS verileri içinde gerçekleştirilebilir. Her iki durumda da sonuçlar, bu paketler tarafından sunulan raporlara entegre edilir. Web tabanlı servis ve paket yazılımlara ek olarak açık kaynak kodlu akademik yazılımlarda bulunmaktadır. Bu yazılımlardan bazıları Windows tabanlı çalışırken bazıları Linux tabanlı çalışmaktadır. Bu yazılımları kullanan kullanıcılar, PPP tekniği için gerekli düzeltmeleri ister kullanılan program vasıtasıyla isterse de bireysel olarak elde edip programa tanıtılabilmektedir [Teunissen and Montenbruck, 2017].

Günümüzde web tabanlı hizmetlerden biri olan CSRS-PPP, 01.01.2018 tarihinden itibaren elde edilen ve belirli frekansları içeren RINEX verilerini Decoupled Clock modeli kullanarak PPP-AR tekniği ile çözüp kullanıcılarına detaylı

bir rapor sunmaktadır [Web 12, 2021]. Bunun dışında geleneksel-PPP tekniği ile kullanıcılara hizmet veren APPS, GAPS, MAGIC GNSS ve Trimble RTX gibi hizmetlerde bulunmaktadır. Web tabanlı hizmetlerin bir dezavantajı, çözüm parametrelerinin sunucu tarafından belirlenmesidir. Ancak açık kaynak kodlu akademik yazılımlar ile gerçekleştirilenPPP çözümlerinde kullanıcılar işlem parametrelerine erişim ve değiştirme imkanına sahiptir. Bu yazılımlar arasında GAMP, RTKLIB, Net_diff ve gLAB programlar bulunmakla beraber bu yazılımlar kullanıcılara geleneksel-PPP ve/veya PPP-AR tekniği ile çözümler sunmaktadır.

GNSS gözlem verilerini merkezi bir sunucuya gönderen veya akademik/ticari paket yazılımlar yolu ile gerçekleştirilen ve kullanıcılara dayanan PP-PPP hizmetlerinin aksine, çoğu gerçek-zamanlı uygulama, GNSS yörünge ve saat düzeltmelerinin veri toplama noktasına gerçek-zamanlı olarak gönderilmesini gerektirmektedir. PPP tekniği ile konum bilgisinin elde edilmesi, daha sonra GNSS alıcıları içinde veya bir bilgisayarda bulunan yazılımın içine gömülü PPP algoritmalarına ile gerçekleştirilir. RT-PPP için gerçek-zamanlı düzeltmelerin iletimi genellikle internet üzerinden, Networked Transport of Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)) NTRIP gibi internet protokolü aracılığıyla bu amaç için geliştirilmiş veri iletim protokolleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. IGS gerçek-zamanlı veri akışları, söz konusu veri iletim protokollerini kullanarak gözlem sırasında elde edilen yayın efemerislerine göre yörünge ve saatlerin düzeltmelerini içermektedir. Gerçek-zamanlı yörünge düzeltmeleri Δ_{ssr} olarak gösterilmekte ve referans epoğunda (t_0) RTCM-SSR (State Space Representation) formatında dünya yer merkezini birleştiren doğrultu boyunca (radial (δ_r)), uydu yörüngesi boyunca (along-track (δ_a) ve uydu yörüngesi doğrultusuna dik (cross-track (δ_c)) doğrultuda hızları ($\delta_{\dot{r}}, \delta_{\dot{a}}, \delta_{\dot{c}}$) ile birlikte kullanıcıya sunulur ve aynı zamanda efemeris yayın zamanını (IOD) içermektedir [Hadas and Bosy 2015], [El-Mowafy et al. 2016].

$$\Delta_{ssr} = (t_0, IOD) = (\delta_r, \delta_a, \delta_c, \delta_{\dot{r}}, \delta_{\dot{a}}, \delta_{\dot{c}}, c_0, c_1, c_2) \tag{3.34}$$

Eşitlik 3.34'te c_0, c_1 ve c_2 katsayıları saat düzeltmelerini hesaplamak için kulllanılan polinom katsayılarıdır. Böylece, t epoğundaki doğrultu boyunca, uydu yörüngesi boyunca ve uydu yörüngesi doğrultusuna dik doğrultudaki yörünge düzeltmeleri eşitlik 3.35 kullanılarak hesaplanabilir:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta A \\ \delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_a \\ \delta_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{\dot{r}} \\ \delta_{\dot{a}} \\ \delta_{\dot{c}} \end{bmatrix} (t - t_0) \tag{3.35}$$

Söz konusu düzeltmeler uydu-sabit koordinat sisteminde kullanıcıya sağlandığı için elde edilen yörünge düzeltmelerinin along-track, cross-track and radial yönlerdeki birim vektörleri (e_A, e_c, e_r) kullanılarak ECEF referans çerçevesine dönüştürülmesi gerekmektedir.

$$e_A = \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|},\ e_c = \frac{r\ x\ \dot{r}}{|r\ x\ \dot{r}|},\ e_R = e_A\ x\ e_c \tag{3.36}$$

Eşitlik 3.36'da ifade edilen r ve $\dot{r}$ simgeleri yayın efemerisi yardımıyla elde edilen uydu konumu ve hız konumu vektörleridir. Gerçek-zamanlı olarak kesin yörünge konumu, düzeltmelerin uydu-sabit sistemden jeosentrik sisteme dönüştürülmesinden sonra hesaplanabilir:

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_R & e_A & e_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta A \\ \delta C \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

Eşitlik 3.37'de ifade edilen alt simge b ve p, sırasıyla yayın (broadcast) ve kesin (precise) konumu ifade etmektedir. Elde edilen yörünge düzeltmelerinin referans noktasının kütle merkezi (CoM) veya anten faz merkezi (APC) olabileceğini belirtmekte fayda vardır. CoM koordinatları ek faz merkezi ofseti (kayıklığı) gerektirirken uydu APC koordinatları doğrudan konumlandırma için kullanılmaktadır. Ölçü epoğundaki kesin saat bilgisini hesaplamak içinse polinom katsayıları (c_0, c_1, c_2) kullanılır. Aşağıdaki eşitlikte T_p ve T_b, sırasıyla gerçek-zamanlı hassas ve yayın efemerisinde belirlenen saat düzeltmesini belirtmektedir.

$$dT_p = dT_b + \frac{c_0 + c_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2}{c} \tag{3.38}$$

RT-PPP hizmetlerinin yüksek hızlı internete erişimi olmayan bölgelerde bile kullanılabilir olmasını sağlamak için, bazı sağlayıcılar, hizmet maliyetlerini büyük ölçüde artıran coğrafi iletişim uydularını kullanarak düzeltmeler de dağıtmaktadır.

Çoğu RT-PPP hizmeti şu anda ticari işletmeler tarafından bir maliyet karşılığında sunulmaktadır. Bu hizmetlerin maliyetleri genellikle bölgeye ve gerekli doğruluk derecesine göre değişmektedir. PP-PPP hizmetleri gibi, RT-PPP hizmetleri için de şu anda çok az standardizasyon mevcuttur [Teunissen and Montenbruck, 2017].

Bunlara ek olarak Trimble-RTX gibi gerçek-zamanlı PPP tekniğine olanak sağlayan, GNSS ekipmanı üreticileri tarafından geliştirilmiş ücretli hizmetlerde bulunmnaktadır. Akademik çalışmalarda ise genellikle BNC, RTKLIB gibi yazılımlar tercih edilmektedir. IGS tarafından akademik çalışmalarda bulunan kullanıcılara sağlanan kullanıcı adı ve şifre ile belirli gerçek-zamanlı protokollere erişim imkânı sağlayan araştırmacılar, ilgili yazılımlar yardımıyla RT-PPP çözümlerini elde etmektedir. Net_diff yazılımı ise kullanıcılarına RT PPP-AR tekniği ile çözüm sağlama imklanı sunmaktadır. Ancak burada RT PPP-AR ile ifade edilmek istenen şey gerçek-zamanlı şartlarda üretilen ürünler ile elde edilen sonradan-değerlendirme PPP-AR çözümüdür.

3.4. İkinci-Nesil SBAS (Second-Generation Satellite-Based Augmentation System) Tekniği

RT-PPP tekniğinin çoğunlukla ücretli ve internet bağımlı olması bazı ülkeleri bu sorunları ortadan kaldırma arayışına itmiştir. Bu arayışların sonucundan biri de İkinci-Nesil SBAS (Second-Generation Satellite-Based Augmentation System) sistemidir. Bu sistem RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansını iyileştirmek amacıyla doğru ve güvenilir düzeltmeleri kullanıcılara iletmek için geostationary (GEO) uydularını kullanır [Sobreira et al., 2018].

Şu anda kürsel çapta çalışmakta olan ilk SBAS sistemi, Wide Area Augmentation System (WAAS), the European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), the Japanese Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS), Russian System for Differential Correction and Monitoring (SDCM) ve Indian GPS aided GEO Augmented Navigation (GAGAN) sistemlerini içermektedir. Bu sistemlerden MSAS hariç, şu anda tek-frekanslı alıcıları desteklemektedir fakat ilerleyen yıllarda EGNOS V3 gibi çift-frekanslı çoklu-uydu sistemlerini kullanarak alıcılara hizmet verecektir [Choy et al., 2017].

Eylül 2017'de, Avustralya ve Yeni Zelanda (AUS/NZ), Asya-Pasifik ve Avusturalya bölgesinde yeni SBAS sisteminin testlerine başlandığını

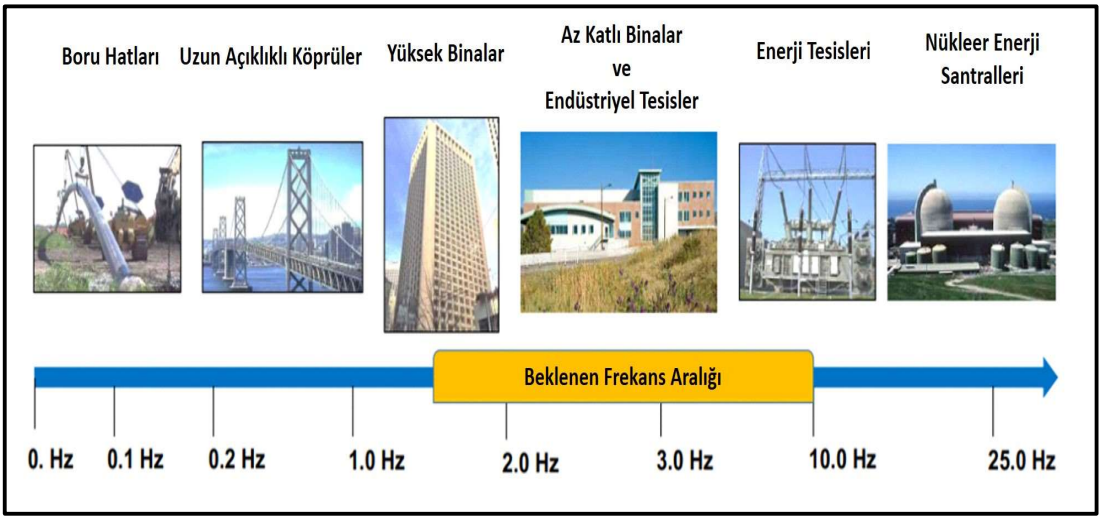
duyurmuşlardır. Bu SBAS, birkaç yıl içinde tamamen işlevsel hale gelecek olan ikinci nesil SBAS hizmetinin ön hazırlığını oluşturmaktadır. İkinci-nesil SBAS sistemi ilk SBAS sisteminden farklı olarak L1 frekansına getirilen düzeltmelere ek olarak L5 frekansını da desteklemektedir. Bunlara ek olarak, sadece GPS sistemine değil Galileo takımlarına da destek vermektedir. Eski nesil SBAS sistemi RTCA/DO-229 standardında hizmet verirken yeni nesil SBAS sistemi WG62 GAL GPS SBAS MOPS v0.6.1 prototipinde hizmet verecektir. WG62, gelecekteki çoklu frekans çoklu uydu takımı hizmetlerini (DMFC) tanımlayan bir taslak standarttır. Bant genişliği sınırlamaları nedeniyle, AUS / NZ DFMC servisi, düzeltmelerin ve güvenilir verilerin bulunması sebebiyle yalnızca GPS ve Galileo uydu takımlarını desteklemektedir. İkinci-nesil SBAS hizmeti, Avustralya ve Yeni Zelanda bölgelerinin tamamını kapsayan yörünge, saat ve iyonosferik gecikme düzeltmelerini iletirken, SBAS DFMC, genel olarak GEO uydularının görüş alanına giren her yerde kullanılabilen GPS ve Galileo çift-frekanslı düzeltmelerini kullanmaktadır [Sobreira et al., 2018].

AUS / NZ SBAS sistemi ayrıca hassas efemeris ve saat düzeltmeleri desteği sağlayarak 5-20 cm hassasiyetli gerçek-zamanlı PPP çözümüne de olanak sağlamaktadır [Zumberge et al., 1997]; [Heroux et al., 2004]; [El-Mowafy et al., 2017]. Düzeltmeler GPS için L1 ve L5, Galileo için E1/E5a frekansları üzerinden iletilmektedir. Bu hizmet, geleneksel-PPP'ye kıyasla PPP yöntemini daha etkin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Geleneksel gerçek-zamanlı PPP yöntemi düzeltmeleri almak için internet'e bağımlıdır ve bu nedenle internet'in kullanılabilir olduğu alanlarla sınırlıdır. Fakat bu yeni nesil SBAS sistemi Avustralya-Asya pasifik bölgesinin herhangi bir yerinde RT-PPP'ye olanak sağlarken aynı zamanda Avustralya çevresindeki geniş nüfuslu alanlara uydular üzerinden PPP hizmeti vermektedir [Sobreira et al., 2018].

İkinci-Nesil SBAS tekniğinin temel amacı, kullanıcılara gerçek-zamanlı uydu yörünge ve saat hataları ile iyonosferik gecikme düzeltmelerini de paylaşarak kullanıcının elde ettiği konum bilgisini iyileştirmektir. Anlık konum bilgisi sağlamaya ek olarak ikinci-nesil SBAS sistemi ile değerlendirme-sonrası çözüm gerçekleştirmek de mümkündür.

4. YÜKSEK ZAMANSAL ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GNSS, YAPI SAĞLIĞI İZLEMELERİ VE GNSS SİSMOLOJİSİ

Yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS tekniği, yüksek hassasiyetli faz gözlemlerini kullanarak ve saniyede bir kez veya daha yüksek örneklem aralığında veri toplayarak konum bilgisinin hesaplandığı bir tekniktir. Uluslararsı GNSS Servisi (IGS) ağındaki istasyonlar genellikle 30 sn aralıklı veri toplamaktadır ki bu da yaklaşık olarak 0.033 Hz değerine karşılık gelmektedir. Ancak bu örneklem aralığının deprem kaynaklı güçlü yer sarsıntılarını yakalama konusundaki başarısızlığı mevcut literatürdeki çalışmalar ile ortaya çıkarılmıştır [Kouba, 2003]. Ayrıca, Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) çalışmalarında incelenen mega yapılarda Nyquist teoremi dikkate alınmaktadır. Bu teorem ışığında, bir yapının frekansının çeşitli sensörler ile izlenmesi sonucu elde edilebilmesi için seçilen örneklem aralığının, yapıda beklenen frekans değerinin minimum 2 katı olması gerekmektedir [Yiğit, 2010]. Bu bilgi göz önüne alındığında 30 sn aralıklı bir GNSS gözlemi ile yaklaşık olarak 0.016 Hz'den büyük frekansa sahip yapıların izlenemeyecği açıktır. Şehirleşmenin yoğunlukta olduğu metropolitan alanlarda ve artan insan popülasyonunun kaçınılmaz bir sonucu olarak inşaa edilen tesislerin frekans aralığı göz önüne alındığında 30 sn aralıklı GNSS gözlemlerinin YSİ çalışmalarında etkisiz kalması kaçınılmazdır. Mühendislik yapılarının beklenen frekans aralığı ise şekil 4.1'de ifade edilmiştir [Web 13, 2021].



Şekil 4.1: Mühendislik yapılarının beklenen frekans aralığı.

4.1. GNSS Sisteminin Geofizik Çalışmalarına Katkısı

Lunar Laser Ranging (LLR), Very-Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR) ve GNSS gibi jeodezik uzay teknikleri, 1970'li yılların başından beri, klasik yersel ölçme yöntemlerinin sahip olduğu kısıtlamaların üstesinden gelmek ve küresel çapta referans yüzeyi belirlemek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [Blewitt, 2007]. Mevcut literatürde yapılan çalışmalar ile beraber GNSS teknolojisi kullanılarak cm/mm düzeyinde bir hassasiyetle yersel istasyon koordinatlarını ve hızlarını belirlenebileceği ifade edilmiştir [Dong and Bock, 1989], [Larson, 1991], [Blewitt et al., 1992].

GNSS tabanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılan veri işleme yöntemi ise eş zamanlı bir referans ve gezici alıcı ölçüsü gerektiren, temeli ikili farklara dayanan rölatif konum belirleme tekniğidir. Bu yaklaşımda, sabit ve gezici alıcıda gözlemlenen taşıyıcı dalga faz gözlemlerinin lineer kombinasyonu, uydu ve alıcı saat hatalarını elemine etmek ve iki GNSS alıcısı arasındaki baz mesafesini tespit etmek için kullanılır. Ardından, referans istasyonu koordinatlarının bilindiği varsayılarak, gezici alıcının konumu elde edilebilir. Bu yöntemdeki en büyük kısıtlamalardan biri gözlem toplanan referans ve gezici istasyonlarda eş zamanlı ölçü toplanması gerektiğidir. Bu yöntemdeki diğer kısıtlamalar ise oldukça uzun baz mesafesi veya fazla istasyon içeren büyük ağlar için rölatif konum belirlemenin doğruluğunu kısıtlayan yörünge hatasıdır [Beutler et al., 1998]. Ayrıca, baz mesafesi tahminindeki hatanın yörünge hatasının doğrudan bir fonksiyonu olduğu ve baz mesafesi uzunluğu ile arttığı aşağıda belirtmektedir [Bauersima, 1983];

$$\Delta\rho_{coord} \approx \frac{l}{d}\Delta\rho_{orbit} \tag{4.1}$$

Eşitlik 4.1'de, $\Delta\rho_{orbit}$ uydu koordinatındaki yörünge hatasını, $\Delta\rho_{coord}$ elde edilen kooridnat bileşeninin hatasını, l baz mesafesinin yaklaşık uzunluğunu, d ise alıcı ve uydu arasındaki yaklaşık uzunluğu göstermektedir. Eşitlik 4.1, $l \approx$1200 km olan bir baz mesafesini tahmin etmek için 1 m doğruluklu yayın efemesi bilgilerinin kullanılması durumunda, uydu alıcı uzaklığının yaklaşık olarak 25000 km olduğu da göz önüne alınırsa hemen hemen 0.5m'lik bir hata ile baz mesafesinin belirlenmesi anlamına gelmektedir. Bu durum, yayın yörünge bilgilerinin kullanılmasının

konumlandırma doğruluğunu ciddi şekilde etkilediği ve uydu koordinatlarının daha hassas belirlenmesini gerektiğini çok açık bir şekilde ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, 1994 yılında, kesin veya hassas yörüngeler olarak adlandırılan, 10-18 günlük bir zaman gecikmesiyle uydu yörünge bilgilerini hassas bir şekilde üretmek ve kullanıma sunmak için önemli bir kurum olan IGS servisi hayata geçirilmiştir. IGS hakkında detaylı bilgi bu tez çalışması kapsamında Bölüm 2.3'te verilmiştir.

Hassas yörünge bilgilerinin ortaya çıkmasıyla beraber ilk olarak rölatif konum belirlemede karşılaşılan uydu yörünge tabanlı hatalar neredeyse ortadan kaldırılmıştır [Kouba, 2009]. Buna ek olarak hassas yörünge ve saat bilgilerinin yüksek doğruluk seviyesinden yararlanılarak, rölatif konum belirlemeye alternatif olarak kullanılan ve Hassas Nokta Konumlama (PPP) olarak adlandırılan başka bir konum belirleme yaklaşımı da geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, hassas yörünge ve saat bilgileri, kod ve taşıyıcı dalga faz gözlemleri ile santimetre düzeyinde doğrulukla tek bir alıcının konumunu belirlemek için kullanılmaktadır. İki farklı istasyondan eş zamanlı gözlem zorunluluğuna sahip olan rölatif konum belirlemenin sahip olduğu bu en büyük dezavantaj, söz konusu bu yöntem ile giderilmektedir. Ayrıca GNSS gözlemlerini etkileyen ve bu tez çalışması kapsamında Bölüm 2 ve Bölüm 3'te belirtilen bazı hatalar PPP tekniğinde modellenmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümüne kadar irdelenen her iki yaklaşım da günümüzde sıklıkla kullanılan bilimsel konum belirleme yazılımlarında yer almaktadır ve tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde tartışılacağı gibi, jeofizik çalışmaları için GNSS verileri işlenirken birbirlerine alternatif olarak benimsenmektedir. Son olarak, yüksek hassasiyetli GPS yörünge ve saat ürünleri temin etmede IGS'in oynadığı temel rolün değeri oldukça fazladır. Bu ürünler, bir sonraki bölümlerde tartışılacak olan GNSS-sismolojisi ve YSİ gibi birçok GNSS uygulamasının gelişimini de desteklemiştir

4.2. GNSS Sisteminin Yapı Sağlığı İzleme Çalışmalarına Katkısı

Binalar modern insan toplumu için en aktif alanlardan biridir ve bu nedenle binaların güvenliği, insanların canı ve sahip olduğu mal varlıkalıyla doğrudan ilişkildir. Binanın mevcut kalitesi, rüzgâr gibi yükler veya deprem gibi dış etkenlerin mevcudiyeti, bina yapısını etkilemekte ve bu olaylar insanların can ve mal

güvenliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Bahsedilen bu etkilerden dolayı söz konusu bu yapıların izlenmesi büyük önem taşımaktadır.

İnsan yapımı mega yapıların çeşitli sensörler yardımıyla izlenmesi, bu izlemeler sonucunda bir hasar tanımlama stratejisi ve hasarın giderilme süreci, YSİ olarak adlandırılmaktadır [Farrar and Worden, 2006]; [Sohn et al., 2002]; [Manzini et al., 2018]. YSİ, yapıların yaşatılması ve güvenliği için oldukça etkili bir alan olmakla beraber birçok çalışmada etkinliği ortaya çıkarılmıştır. Moss and Marrhews ve Mita and Takhira, YSİ çalışmalarının gerekliliklerini derinlemesine araştırmış ve YSİ çalışanlarının karşılaması gereken ihtiyaçları belirlemiştir. Bunlar, yapıların davranışlarını bozucu etki gösteren dış etkilerin yapısal olarak izlenmesi, uzun vadeli etkiler nedeniyle yapının deformasyonunun izlenmesi ve deprem sonrası yapının davranşlarının incelenmesi olarak belirtilmiştir [Moss and Marrhews, 1995], [Mita and Takhira, 2003]. Buradan yola çıkarak YSİ çalışmalarının, yapıların dinamik davranışlarını izleme ve uzun vadeli gözleme gereksinimlerini karşılaması gerektiği açıkça dile getirilmelidir. Brownjohn, YSİ çalışmalarının motivasyonu kapsamlı bir şekilde tanıtılmakta, YSİ uygulamalarında karşılaşılan problemler listelenmekte ve YSİ uygulamalarını, çeşitli sensörler yardımıyla toplanan zamana bağlı verileri kullanılarak yapısal model parametrelerini tanımlayan sürekli bir sistem olarak kabul etmektedir. YSİ verileri, yapıların sahip olduğu titreşimlerden veya uzun vadeli gözlem gerektiren kuasi-statik hareketlerden elde edilebilir [Brownjohn, 2007]; [Chang, 2003]. YSİ çalışmalarının gelişimi, sistemin güvenilirliği, veri depolama, çevresel faktörler, gözlem gürültüsü gibi birçok faktöre bağımlıdır.

GNSS tabanlı deformasyon izleme tekniği, yapıların hem uzun süreli hem de kısa süreli izleme gereksinimlerini büyük oranda karşılamaktadır. Geleneksel izleme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, GNSS tabanlı deformasyon izleme tekniği gerçek-zamanlı izleme, hava şartlarından bağımsızlık, yüksek hassasiyet, dinamik ve uzun vadeli deformasyon izlenmesi gibi avantajlara sahiptir. Sahip olduğu bu avantajlar nedeniyle, GNSS sistemleri insan yapımı binaların deformasyonunun tespiti için yaygın olarak kullanılmış ve YSİ uygulamalarındaki etkinliği mevcut literatürdeki birçok çalışma ile ortaya çıkarılmıştır. Ogaja et al., 1997 ve 2006 arasındaki YSİ çalışmalarında GNSS sisteminin etkinliği gözden geçirmişlerdir. Bu çalışmada, 10 yılllık bir süre içerisinde GNSS alıcısı örnekleme aralığının 10 Hz değerinden 100 Hz'e kadar çıktığına dikkat çekilmiş, buna ek olarak YSİ uygulamlarında GNSS teknolojisi ve ivme ölçer sensörü arasındaki tamamlayıcı ilişki analiz edilmiştir. Bu

kapsamda ivme ölçer ve GNSS sisteminin YSİ çalışmalarında tespit edebileceği frekans alanına da yer verilmiştir [Ogaja et al., 1997].

GNSS tabanlı izleme teknolojisi, ilk testlerden mevcut üretim uygulamalarına kadar köprü izleme çalışmalarında da yaygın olarak uygulanmıştır. Doğal faktörler ve artan trafik etkisi, köprü üzerindeki yükü artırmakta, bu da köprü tamamlandıktan sonra YSİ sistemlerinin kurulumunu gerektirmektedir [Yi et al., 2010a]; [Yi et al., 2010b]. İzleme sistemleri ve düzenli bakım eksikliği nedeniyle, 14 Ağustos 2018'de İtalya'nın Geona kentinde 50 yaşın üzerinde olan Ponte Morandi köprüsü çökmüş ve 43 kişinin ölümüne yol açmıştır. Ancak, İtalya'daki bu feci olayın sadece 20 gün öncesinde 27 Temmuz 2018'de Çin'in Sichuan kentindeki Minjiang Köprüsü'nün çökmesi hiçbir ölüme ve mal kaybına neden olmamıştır. Bunun nedeni, köprünün sürekli olarak izlenmesi, bu izleme sisteminin büyük bir deplasmanı tespit etmesi ve ardından karar vericilerin köprü faaliyetinin durdurulması önerisiyle bu gergin eğik askılı köprünün can kaybına neden olmadan zamanında kapatılmasıdır. Yakın geçmişte yaşanan bu iki olay köprülerin mevcut durumunu izlemek ve köprü yönetimlerinin zamanında ve doğru kararlar almalarına yardımcı olmak için sürekli veri toplayan YSİ sistemlerinin kurulmasının son derece önemli olduğunu işaret etmektedir [Xi et al., 2020].

Real-Time Kinematik (RTK) tekniği, yirmi yılı aşkın bir süredir YSİ uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve oldukça hassas sonuç üreten bir GNSS teknolojisidir. YSİ çalışmalarında RTK için tipik uygulama senaryoları arasında köprü ve yüksek yapıların izlemenmesi yer almaktadır. Yüksek yapıların dinamik izlemesi için, Singapur'daki Republic Plaza Binasının 66. katında RTK tabanlı bir çevrimiçi YSİ sistemi tasarlanmıştır. Sistem çift-frekanslı bir GNSS alıcısından oluşan referans istasyonu, söz konusu binanın 66. katında gezici istasyon görevi gören iki adet çift-frekanslı alıcı ve izleme yazılımını çalıştırmak için bir kontrol merkezinden oluşmaktadır [Ogaja et al., 2001]. Bununla birlikte, RTK tekniğinin YSİ çalışmalarında yaygın uygulamasının yanı sıra maliyet, teknik sınırlamalar gibi birçok eksikliği vardır. Bu eksikler şöyle genişletilebilmektedir; referans istasyonunun sabit bir yerde konuşlandırılması gereksinimi bulunmaktadır ancak referans istasyonu da deformasyon bölgesindeyse RTK tekniği başarısız olacaktır. Referans ve gezici istasyonların aynı anda ölçü toplanması gerekmektedir, aksi takdirde yöntemin herhangi bir etkinliği olmayacaktır. Referans istasyonu alıcısı, izleme maliyetlerini artıracaktır ve en önemlisi gezicinin konum doğruluğunun

referans istasyonuna olan mesafeye bağımlı olmasıdır [Vollath et al, 2002]; [Rizos, 2002]. Detaylıca özetlenen bu kısıtlamalar, geleneksel-RTK tekniğinin YSİ uygulamalarının gereksinimlerini karşılayamamasına sebep olmaktadır. RTK tekniğnin bir uzantısı olarak, Ağ-RTK tekniği, geleneksel-RTK'nın eksikliklerini telafi edebilmektedir.

Ağ-RTK hizmetleri büyük oranda bir hizmet sağlayıcısı tarafından sağlanır. Kullanıcılar genellikle Ağ-RTK hizmetlerini kiralama şeklinde alırlar. Geleneksel-RTK ile karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar, referans istasyonu kurulmasına gereksinim olmaması, atmosferik düzeltmeler için ağ modellemesi kapsamının geleneksel-RTK'dan daha geniş olması olarak görülmektedir [Vollath et al, 2002]; [Vollath et al., 2000]. Ancak, Ağ-RTK tekniğine dayalı mevcut dinamik izleme araştırmaları yeterince ayrıntılı değildir ve ağ yoğunluğu ve izleme konumunun etkisi gibi birçok sorun, üzerinde çalışılmayı beklemektedir [Shen et al., 2019].

RTK tekniklerinin sahip olduğu kısıtlamaları ortadan kaldırmak amacıyla ortaya atılan PPP tekniği, referans istasyonu gereksinimi olmaksızın tek bir alıcı kullanarak hassas konum belirleme gerçekleştiren bir yaklaşımdır [Bisnath and Gao, 2009]. PPP tekniğinin dinamik yer değiştirmeleri tespit etme konusundaki performasnı üzerine birçok çalışma yapılmıştır [Moschas et al., 2014]; [Yigit, 2016]. GNSS tekniklerine ek olarak kullanılan diğer harici sensörler hakkında bilgiler bir sonraki bölümde kapsamlıca incelenecektir.

4.3. GNSS Sisteminin Sismoloji Çalışmalarına Katkısı

Elde edilen yüksek doğruluk seviyesi göz önüne alındığında, GNSS istasyonlarının tüm dünyaya yaygın şekilde yerleştirilmesinin jeodezi ve jeodinamikteki birçok görevi iyileştireceği ve kolaylaştırılacağı oldukça açıktır. GPS sisteminin kullanılmaya başladığı ilk yıllarda gerçekleştirilen gözlemler 30 saniye veya daha düşük bir örneklem aralığında elde edilmiş ve veriler gün sonunda konum bilgisi elde etmek için birleştirilip işlenmiştir. Elde edilen koordinat bileşenleri daha sonrasında zaman serisi haline getirilmiş ve en sonunda bu bilgilerin, kabuk deformasyonu, deniz seviyesi değişimleri, ko-sismik ve post-sismik

deformasyonların tespiti gibi uzun dönemli, aynı zamanda büyük ölçekli jeofizik ve jeodinamik olayları izlemek için paha biçilmez bir araç olduğu ortaya çıkmıştır.

Sürekli çalışan bir dizi GPS alıcısından gelen gözlemler, 1992'de meydana gelen 7.2 büyüklüğündeki Landers, California depreminin neden olduğu sismik deplasmanların tespiti için kullanılmıştır [Blewitt et al., 1993], [Bock et al., 1993]. Bu çalışmada belirtilen veri toplama stratejisiyle gözlemlenmek istenen deplasmanların, zaman serilerinde bir mutlak deplasman, yani post-sismik olarak elde edilmesinin mümkün olduğu belirtilmelidir. Bu nedenle, deprem kaynağından yayılan elastik dalgaların sebep olduğu ko-sismik deformasyonlar düşük örneklem aralığı ve koordinat bileşenlerinin düşük zamansal çözünürlüğü nedeniyle gözlenememiştir [Nikolaidis, et al., 2001].

1990'lı yılların sonlarında GPS alıcı teknolojisinde kaydedilen önemli gelişmeler ve artan veri depolama kapasitesi ile birlikte uydu gözlemlerini çok daha yüksek örnekleme aralığı ile elde etmek mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmeler ile doğal afetlerin neden olduğu yersel dalga formlarının tespiti için GNSS alıcısını bir sismometre olarak kullanmak, GNSS sistemlerinin uygulama alanlarının büyümesine neden olmuştur. 1999 yılında ise, Avustralya'da bulunan New South Wales Üniversitesi'nde gerçekleştirilen deneyler oldukça umut verici sonuçları içemektedir. Bu çalışmada büyük deplasmanları doğrudan ölçmek için bir GNSS alıcısını sismometre olarak kullanmanın uygulanabilirliğini test etmek için 10 Hz örneklem aralığına sahip RTK modunda çalışan iki Leica CRS1000 GPS alıcısını kullanılmıştır. Alıcılardan biri, belirli genlik ve frekansta titreşimler üretebilen mekanik bir sarsma tablasına, diğeri ise 160 km uzağa yerleştirilmiştir. GNSS alıcısına ek olarak, incelenen yöntemin performansını test etmek ve bağımsız bir referans sağlamak için gezici GNSS anteninin üzerine bir ivme ölçer yerleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, sarsma tablası tarafından belirli bir frekans ve genlikte üretilen salınımların RTK tekniği ile başarılı bir şekilde toplanabildiği ve yöntemden elde edilen zaman serilerinin ivme ölçer ile oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. [Ge, 1999]. Yukarıda tartışılan bu deney ve mevcut literatürde bulunan çalışmalar, yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS tekniğinin deplasman değerlerini doğrudan tespit etmek için bir sismometre olarak kullanılabileceğini göstermiştir [Ge et al., 2000].

GNSS verilerinin yüksek zamansal çözünürlükte toplanıp analiz edilmesi GNSS-sismolojisinin doğuşu olarak kabul edilmektedir [Larson, 2009]. Bu noktada,

hız ölçerler veya ivme ölçerler gibi sismoloji alanında oldukça yaygın bir şekilde kullanılan sensörlere kıyasla yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS tekniğinin sunduğu avantajların neler olduğu sorgulanabilmektedir. Bunun cevabını vermek için iki sensörün temel farklılıklarını ve benzerliklerini hatırlamakta fayda vardır. Atalet sensörleri olan sismometreler bir iç kütle ile alet çerçevesi arasındaki bağıl hareketleri ölçen elektromekanik sistemlerdir [Nikolaidis et al., 2001]. Bu tür sistemler, doğrudan titreştiklerinde cihaz tipine göre hız veya ivme bilgisi üretmektedir. Fakat bu hız veya ivme tahminleri kısa bir zaman aralığı için doğrudur, çünkü atalet sensörlerinde zaman içinde birikimli bir şekilde kaymalar meydana geldiğinden ölçülen ivme veya hız hataları zamanla büyümektedir [Norrdine et al., 2016]. Bu bilgiye ek olarak, elde edilen ivme degerleriden deplasman bilgisine geçiş ise, çift katlı integral ara işlemini ve aynı zamanda integral sabiti parametrelerinin ise doğru seçilmesini gerektirmektedir [Li, 2006]; [Roberts et al., 2004]. Öte yandan GNSS alıcıları, uydulara yapılan uydu-alıcı mesafesi ölçümlerini kaydetmekte ve anteninin konumunu bu mesafe yardımıyla hesaplayabilmektedir [Bilich et al., 2002]. Bu nedenle, GNSS cihazlarının ilk avantajı, büyük depremlere yakın olan sismometrelerde gözlemlenen saturasyona (doygunluğa) sebep olmamalarıdır. GNSS alıcılarının bir dezavantajı ise, sismik yer hareketlerine karşı duyarlılıklarının sismometrelerin sahip olduğu kadar iyi olmamasıdır. Bu açıdan Larson, GPS'in büyük genliklere sahip yer hareketlerinin tespiti amacıyla kullanıldığında sismolojiye en etkili şekilde katkıda bulunabileceğini öne sürmüştür [Larson, 2009]. Bu şu anlama gelmektedir; ham sismometre sinyallerinden elde edilmeye çalışan deplasman tespiti oldukça zor ve zahmetlidir. GNSS alıcıları ise bu kısıtlamaya sahip değildir. GNSS alıcıları herhangi bir entegrasyona ihtiyaç duymadan deplasman bilgisini doğrudan elde edebilmekte ve bu nedenle, büyük deplasmanları yüksek doğrulukla tespit etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, iki cihaz tarafından kullanılan referans sisteminde dikkate değer bir fark vardır. Sismometreler, belirsiz referans düzleminde sinyalleri kaydederken, GNSS alıcıları küresel bir karasal referans yüzeyine göre konum bilgisi ve deplasmanları elde etmektedir.

Sonuç olarak, her iki sensöründe kendi kabiliyetleri doğrultusunda avantajları ve dezavantajları olduğu açıktır. Başka bir bakış açısı olarak, sürekli olarak yer istasyonlarından gözlem gerçekleştiren gerçek-zamanlı ve yüksek zamansal çözünürlükl GNSS alıcılarının Dünya yüzeyindeki dağılımı ve farklı nitelikteli geoteknik sensörlerin hiç bulunmadığı yerlerin varlığı göz önüne alındığında, GNSS

sisteminin sismoloji çalışmalarına oldukça önemli katkılarda bulunduğunu belirtmekte fayda vardır.

4.4. Yüksek Zamansal Çözünürlüklü GNSS, Güncel Çalışmalar ve Varyometrik Yaklaşım

Yeni teknolojiler, analiz yöntemleri, GNSS alıcılarında artan örnekleme aralığı ile birlikte yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS sensörlerinin uygulama alanlarını genişlemektedir. Daha açık ifade etmek gerekirse, yüksek zamansal çözünürlüklü verilere sahip olmanın avantajı, Dünya'nın yaşadığı doğal süreçlerin gözlemlerinde zamansal çözünürlüğü geliştirme olasılığına sahip olmak olarak ifade edilebilir. Ayrıca, bir veri merkezinde toplanan ve gerçek-zamanlı yüksek zamansal çözünürlüklü veriler, doğal afetlere karşı hızlı tepkiler vermeye ve çabuk koordine olmaya olanak tanır. Birçok araştırma alanı, bu yüksek zamansal çözünürlüklü verilerin kullanılabilirliğinden faydalanmıştır [Web 14, 2021]. Ayrıca yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS gözlemlerinin sismik olayların değerlendirilmesini ve anlaşılmasını nasıl geliştireceğini, bu katkının deprem/tsunami erken uyarı sistemlerini nasıl etkileyeceğinin altını çizmek yeterlidir. Çalışmanın önceki bölümlerinde de bahsedildiği üzere köprü ve bina izlemelerinde de yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS tekniğinin etklinliği son derece açıktır.

Bugüne kadar, YSİ ve GNSS-sismolojisi uygulamalarında, daha önceki bölümlerde detaylıca bahsedilen PPP ve rölatif konum belirleme yaklaşımları benimsenmiştir. Ko-sismik deplasmanlar, IGS veya farklı kuruluşlar tarafından sağlanan yüksek hassasiyetli yörünge ve saat ürünleri ile birlikte çeşitli bilimsel yazılımlar kullanılarak sonradan-değerlendirme yaklaşımıyla tahmin edilmiştir. Ancak konum belirleme için gerekli olan hassas ürünler belirli bir gecikme ile kullanıcıya sunulmaktadır [Web 11, 2021]. İlgili ürünlerin temininde yaşanan gecikmeden dolayı gerçek-zamanlı deplasman tahminlerini engelleyen uzun bir bekleme süresi bulunmaktadır.

Gerçek-zamanlı PPP tekniği ise internet bağımlı ve gecikme problemi olan bir tekniktir. Sahip olunan internet ve düzeltme kalitesine bağlı olarak doğrulukların yakınsama süresi göz ardı edildiğinde 5-10 cm arasında değişmektedir [Alçay, 2019]. Blewitt et al., bir yer sarsıntısını takip eden üç dakika içinde, gerçek-zamanlı GNSS

tekniği ile 1 cm hassasiyette sismik deplasman doğruluklarına ulaşma hedefinden söz etmektedir [Blewitt et al., 2009].

Bu tez çalışması kapsamında incelenen algoritmalardan biri olan varyometrik yaklaşım, küresel referans çerçevesinde gerçek-zamanlı olarak hız ve deplasman bilgilerini tahmin etmek için yeni bir yaklaşımı içermektedir. Yaklaşım, GNSS-sismolojisi için yukarıda bahsedilen ve şu anda benimsenen iki yaklaşımın gösterdiği bazı zorlukların üstesinden gelebilecek tek bir GNSS istasyonu tekniğine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, tek bir GNSS alıcısından elde edilen gözlemleri "varyometrik" olarak adlandırılan bir teknikle işlemektedir. VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) yaklaşımı ek teknolojik karmaşıklık, veri merkezi ya da verilerin işlenmesi için bir internet bağlantısı gerektirmediğinden, bir GNSS alıcı içine gömülü olarak çalışabilir ve böylece YSİ uygulamalarında ve deprem/tsunami erken uyarı sistemlerinin işletilmesinde önemli bir katkı sağlamaktadır [Colosimo, 2012].

5. VADASE (VARIOMETRIC APPROACH FOR DISPLACEMENT ANALYSIS STAND-ALONE ENGINE) TEKNİĞİ

Colosimo et al., tarafından ortaya atılan VADASE (Varıometrıc Approach For Dısplacement Analysıs Stand-Alone Engine) ya da varyometrik yaklaşım yöntemi, uydu ve alıcı arasında gerçekleştirilen ham gözlemlerin ardışık epoklardaki farklarının alınması ile hesaplanan hız bilgilerinin elde edilmesine dayanan bir yaklaşımdır. Hassas Nokta Konumlama (PPP) tekniğinin aksine VADASE yaklaşımı, tek- veya çift-frekanslı GNSS alıcıları tarafından ölçü esnasında üretilen yayın efemerisi bilgilerini ve gözlem dosyalarını kullanarak çözüm gerçekleştirmektedir. VADASE, herhangi bir teknolojik karmaşıklık veya ölçülerin aktarılıp analiz edildiği harici bir veri merkezi gerektirmediğinden, GNSS alıcısı yazılımına gömülebilmekte ve böylece tsunami, deprem erken uyarı sistemlerine entegre olarak önemli bir katkı sağlamaktadır [Colosimo et al., 2011].

5.1. Varyometrik Yaklaşım ve Matematiksel Modeli

VADASE tekniği, eşitlik 2.7'de bahsedilen temel ham taşıyıcı dalga faz gözlemlerine dayanmaktadır. Çift-frekasnlı GNSS gözlemlerini faz kesikliği hatasından arındırıldığını düşünürsek ve ikinci dereceden iyonosferik hatayı iyonosfer-bağımsız eşitliği uygulayarak elemine edilebilirsek, t ve $t+1$ epokları arasında eşitlik 2.7'nin farkını aldığımızda iyonosfer-bağımsız tekli fark denklemi aşağıdaki şekilde oluşacaktır;

$$\begin{aligned} &\alpha[\lambda\Delta\phi_r^s(t,t+1)]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^s(t,t+1)]_{L2} \\ &= \Delta\rho_r^s(t,t+1) + c\big(\Delta\delta t_r(t,t+1) - \Delta\delta t^s(t,t+1)\big) \\ &+\Delta T_r^s(t,t+1) + \Delta p_r^s(t,t+1) + \Delta m_r^s(t,t+1) \\ &+\Delta\varepsilon_r^s(t,t+1) \end{aligned} \tag{5.1}$$

Eşitlik 5.1'de $\alpha = (f_{L1}^2/(f_{L1}^2 - f_{L2}^2))$ ve $\beta = (-f_{L2}^2/(f_{L1}^2 - f_{L2}^2))$ terimleri iyonosfer-bağımsız kombinasyonun standart katsayılarını temsil etmektedir. İlk olarak, GNSS alıcısının bir Yer Merkezli Yer Sabit (ECEF) referans çerçevesinde sabitlendiğini varsayarsak $\Delta\rho_r^s(t,t+1)$ terimi, uydunun yörünge hareketi ve

Dünya'nın dönüşü nedeniyle geometrik aralığın değişmesine bağlıdır ($[\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_{OR}$). Bununla birlikte, Dünya çekim etkisi ve okyanus yüklmesi etkisine de bağlı olduğu söylenebilir ($[\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_{EtOl}$). [McCarthy ve Petit, 2004]. Öyleyse $\Delta\rho_r^s(t,t+1)$ terimi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta\rho_r^s(t,t+1) = [\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_{OR} + [\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_{EtOl} \tag{5.2}$$

Öte yandan, alıcının $(t,t+1)$ aralığında ECEF referans çerçevesinde üç boyutlu (3B) ($\Delta\xi_r(t,t+1)$) deplasmana maruz kaldığını varsayarsak, $\Delta\rho_r^s(t,t+1)$ terimi yüksek zamansal çözünürlüklü (≥1 Hz) gözlemlerde de kullanılıyorsa, birbirini izleyen iki epok (t ve $t+1$) için yaklaşık olarak aynı olan, görüş hattı boyunca gözlemlenen $\Delta\xi_r$ etkisini de içerir;

$$\begin{aligned}\Delta\rho_r^s(t,t+1) &= [\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_{OR} + [\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_{EtOl} + [\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_D \\ &= [\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_{OR} + [\Delta\rho_r^s(t,t+1)]_{EtOl} + e_r^s \bullet \Delta\xi_r(t,t+1)\end{aligned} \tag{5.3}$$

Eşitlik 5.3'te, e_r^s t zamanında uydu-alıcı arasındaki birim vektörü temsil ederken • sembolü, e_r^s ve $\Delta\xi_r(t,t+1)$ vektörleri arasındaki skaler çarpımı belirtmektedir. Burada, deplasmanın $\Delta\xi_r(t,t+1)$ ardışık epoklar arasındaki zaman aralığına bölünmesi halinde, zaman aralığının ortalama hızına eşit olduğunun belirtilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, uzunluk birimleri olarak ifade edilen deplasman, $\Delta\xi_r(t,t+1)$ temel olarak bir hıza eşdeğerdir ve bu temel olarak "hız" terimi ile ifade edilebilmektedir. Sonuç olarak VADASE algoritmasını, 1 Hz'lik örneklem aralığına sahip bir GNSS alıcısı kullanılması durumunda, söz konusu alıcıyı bir hızölçer olarak kullandığını söyleyerek özetleyebiliriz. Buna ek olarak, 1 Hz örneklem aralığından daha yüksek veya düşük bir örneklem aralığı kullanılması durumunda, söz konusu algoritma ile epoklar arası deplasman değerleri hesaplanmaktadır.

Ayrıca, troposferik terim $\Delta T_r^s(t,t+1)$, t ve t+1 zaman aralığında troposferik gecikmenin varyasyonunu temsil etmekte ve mapping function (1/cos(Z)) kullanılarak bu denklemde Saastamoinen modeline göre Troposferik Zenith Gecikmesini (TZD_{SB}) hesaplayarak aşağıdaki şekilde modellenmektedir [Saastamoinen, 1972];

$$\Delta T_r^s(t,t+1) = TZD_{SB}[1/\cos(Z_r^s(t+1)) - 1/\cos(Z_r^s(t))] \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.4'te, Z_r^s terimi, uydu ve alıcı arasındaki zenit açısını ifade etmektedir. Denklem 5.3 ve denklem 5.4, eşitlik 5.1'in içine $(t,t+1)$ gösterimi atlanarak eklenirse aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir;

$$\begin{aligned}\alpha[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L2} = {} & [\Delta\rho_r^s]_{OR} + [\Delta\rho_r^s]_{EtOl} + e_r^s \bullet \Delta\xi_r \\ & + c(\Delta\delta t_r - \Delta\delta t^s) + TZD_{SB}[1/\cos(Z_r^s(t+1)) \\ & - 1/\cos(Z_r^s(t))] + \Delta\rho_r^s + \Delta m_r^s + \Delta\varepsilon_r^s\end{aligned} \quad (5.5)$$

Eşitlik 5.5'te gerekli düzenlemeler yapılarak varyometrik yaklaşımının temel denklemine şu şekilde elde edilir;

$$\begin{aligned}\alpha[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L2} = {} & (e_r^s \bullet \Delta\xi_r + c\Delta\delta t_r) + ([\Delta\rho_r^s]_{OR} - c\Delta\delta t^s \\ & + TZD_{SB}[1/\cos(Z_r^s(t+1)) - 1/\cos(Z_r^s(t))]) \\ & + ([\Delta\rho_r^s]_{EtOl} + \Delta\rho_r^s) + \Delta m_r^s + \Delta\varepsilon_r^s\end{aligned} \quad (5.6)$$

$\alpha[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L2}$, zaman alanında tekli farkı alınmış iyonosfer-bağımsız gözlemi, $(e_r^s \bullet \Delta\xi_r + c\Delta\delta t_r)$, terimleri 3B hız bileşenleri ve alıcı saat hatası varyasyonunu içeren dört bilinmeyenli parametreyi, $TZD_{SB}[1/\cos(Z_r^s(t+1)) - 1/\cos(Z_r^s(t))]$, saat ve yörünge elemanlarına dayalı olarak hesaplanabilen troposferik modeli, $([\Delta\rho_r^s]_{EtOl} + \Delta\rho_r^s)$, dikkate alınan tüm etkiler için uygun modellerle hesaplanabilen uydu-alıcı vektörlerinin varyasyonunun artık kısmını, $\Delta m_r^s + \Delta\varepsilon_r^s$ ifadesi ise sırasıyla multipath ve gürültü bileşenlerini ifade etmektedir.

Eşitlik 5.6, en küçük kareler yönteminin fonksiyonel modelini temsil etmektedir. GNSS gözlemlerinin düşük görüş açısı altında yapılması durumunda gözlemlerin gürültülü olduğu varsayımı yapılırsa tüm gözlemlerin uydu zenit açısına (Z) göre ağırlıklandırılması gerekmektedir;

$$w = cos^2(Z) \quad (5.7)$$

3B hızların en küçük kareler yaklaşımı ile belirlenmesi, iki ardışık epok için yazılan varyometrik denklem eşitliğine (5.6) dayanmaktadır. Varyometrik denklemlerin sayısı ardışık iki epok için ortak olan uyduların sayısına bağlıdır ve her

ardışık epok çifti için bilinmeyen dört parametreyi tahmin etmek amacıyla en az dört uydudan gözlem gerekmektedir.

Burada çift-frekanslı gözlemlerde faz kesikliği olmaması durumunda rahatlıkla çözüm elde edilebileceğini belirtmek gerekmektedir. Aslında gerçek-zamanlı konum belirleme stratejisinde, kilitlenen uydulara ait faz kesiklikleri, tahmin edilen üç boyutlu hızların zaman serilerinin analizi sırasında kolaylıkla tanımlanabilir ve bu epoklar değerlendirmeden çıkarılabilir. Choi et al., tarafından önerildiği gibi pozisyona dayalı modifiye edilmiş bir gerçek-zamanlı filtreleme, multipath etkisini hafifletmek için kullanılabilir ancak, bu yöntemde bu etki ihmal edilmektedir [Choi et al., 2004].

VADASE algoritmasında en küçük kareler probleminin nasıl ele alındığına dair daha derin bir açıklama yapmak için u bilinmeyen ve n gözlem sayısını içeren doğrusallaştırılmış fonksiyonel modelini ele alalım. Varyometrik yaklaşımın gözlem matrisi eşitlik 5.8'de ifade edilmiştir;

$$y_{nx1} = \begin{bmatrix} \alpha[\lambda\Delta\phi_r^1]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^1]_{L2} \\ \alpha[\lambda\Delta\phi_r^2]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^2]_{L2} \\ \vdots \\ \alpha\left[\lambda\Delta\phi_r^i\right]_{L1} + \beta\left[\lambda\Delta\phi_r^i\right]_{L2} \\ \vdots \\ [\lambda\Delta\phi_r^n]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^n]_{L2} \end{bmatrix} \tag{5.8}$$

Varyometrik yaklaşımın tasarım matrisi eşitlik 5.9'da ifade edilmiştir;

$$A_{nx1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{r\,X}^1 & \varepsilon_{r\,Y}^1 & \varepsilon_{r\,Z}^1 & 1 \\ \varepsilon_{r\,X}^2 & \varepsilon_{r\,Y}^2 & \varepsilon_{r\,Z}^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varepsilon_{r\,X}^i & \varepsilon_{r\,Y}^i & \varepsilon_{r\,Z}^i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varepsilon_{r\,X}^n & \varepsilon_{r\,Y}^n & \varepsilon_{r\,Z}^n & 1 \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

Varyometrik yaklaşım algoritması aracılığıyla elde edilmek istenen u tane bilinmeyen parametreye sahip olan bilinmeyenler vektörü eşitlik 5.10'da ifade edilmiştir;

$$\hat{x}_{4x1} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \delta t_r \end{bmatrix} \tag{5.10}$$

Eşitlik 5.8, 5.9 ve 5.10'da n gözlem sayısını ifade etmektedir ve $u = 4$ bilinmeyenlerin sayısıdır. Denklem 5.6'da verilen variometrik algoritmanın eşitliği ile tutarlı olması için, bilinen terimleri içeren b vektörünü tanıtmak;

$$b_{nx1} = \begin{bmatrix} [\Delta\rho_r^1]_{OR} + \Delta T_r^1 - c\Delta\delta t^1 \\ [\Delta\rho_r^2]_{OR} + \Delta T_r^2 - c\Delta\delta t^2 \\ \vdots \\ [\Delta\rho_r^i]_{OR} + \Delta T_r^i - c\Delta\delta t^i \\ \vdots \\ [\Delta\rho_r^n]_{OR} + \Delta T_r^n - c\Delta\delta t^n \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

ve en küçük kareler yaklaşımının genel denkemini ($y = A\,x + l$) şu şekilde yeniden formüle etmek mümkündür;

$$y = A\,x + b + v \tag{5.12}$$

Gözlemlerin ilişkisiz olduğu varsayılır ve eşitlik 5.7'de bahsedildiği gibi uydu zenit açısının kosinüs karesi ile ağırlıklandırılır ise;

$$W_{nxn} = \begin{bmatrix} cos^2(Z_r^1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & cos^2(Z_r^1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & cos^2(Z_r^1) \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

Varyometrik yaklaşım tekniği ile elde edilmek istenen bilinmeyen parametrelerin en küçük kareler yaklaşımı ile tahmini şu şekilde gerçekleştirilir;

$$\hat{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W (y - b) \tag{5.14}$$

6. UYGULAMA

Bu tez çalışması kapsamında yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS tekniğinde uygulanması mümkün olan farklı algoritmalarının mega yapılardaki dinamik salınımı ve buna ek olarak büyük depremlerin neden olduğu güçlü yer sarsıntılarını belirleme ve tespit edebilme performanslarını incelemek, değerlendirmek ve test etmek amacıyla harmonik hareketlerin simülasyonunun üretilebildiği bir sarsma tablası kullanılmıştır. Bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda Bölüm 6.1.1 ve 6.1.2'de açıklanacak olan iki farklı farklı harmonik salınım deneyi tasarlanmış, söz konusu bu deneylerde kullanılan sarsma tablası ise Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Detaylıca açıklanacak olan harmonik salınım deneylerine ek olarak, bilgileri Bölüm 6.2'de verilecek olan olan dört farklı deprem simülasyonu da tez çalışması kapsamında ayrıca değerlendirilmiştir.



Şekil 6.1: Tez çalışması kapsamında kullanılan sarsma tablası.

Deneylerde kullanılan sarsma tablasının hareketi, GNSS alıcısının üzerine sabitlenebildiği, tek eksende hareketi 95 mm, toplam deplasmanı 190 mm ve maksimum hızı ise 400 mm/sn olan siyah düz bir plaka ve bu plakaya bağlı olan bir elektrik motoru ile gerçekleştirilmektedir. Tablanın yüksek-frekans ve genlikleri üretmesi durumundaki stabilitesi, platformun her iki tarafına yerleştirilen ağırlıklar ile sağlanmaktadır. Tablanın deplasman hareketi bilgileri, hareketli platformun altına gömülü, Windows işletim sistemi tabanlı çalışan 100 Hz frekansa sahip ve mm-altı

mertebde hassasiyet sağlayan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) sistemi ile elde edilir. Sarsma tablasının hareket modelleri harmonik ve rastgele değerler olarak düzenlenebilmektedir. Harmonik hareketler genlik, frekans ve döngü sayısı ile tanımlanan sinüsoidal dalgalardır. Rastgele değerler ivme veya deplasman işlevleri olarak tanımlanır. İvme değerleri, tepe değerlerinin stroke limitlerini aşıp aşmadığını görmek için başlangıçta deplasman zaman serisi grafiğine dönüştürülür. Tabla alt limitlerinin aşılması durumunda, deplasman-zaman değerleri tepeden tepeye değerleri ve deplasman limitleri arasındaki tutarlılığı sağlamak için optimal bir faktörle ölçeklendirilir. LVDT sensöründen elde edilen 100 Hz örneklem aralığına sahip veriler, GNSS yöntemleri ile karşılaştırılması amacıyla 20 Hz örneklem aralığına indirilmiştir.

6.1. Harmonik Salınım Testleri

L1/L1+L2 sinyallerine ve farklı uydu sistemlerinin kombinasyonuna dayalı yüksek zamansal çözünürlüklü VADASE, RT-PPP, geleneksel-PPP ve PPP-AR algoritmalarının YSİ çalışmalarındaki uygulanabilirliğini test etmek, sonuçlarının rölatif konum belirleme ve LVDT sensörleri ile karşılaştırılması amacıyla sırasıyla bölüm 6.1.1 ve 6.1.2'de açıklanacak olan iki farklı harmonik salınım deneyi gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. 1 nolu Harmonik Salınım Testi ve GNSS Verilerinin Toplanması

1 nolu harmonik salınım testi 27.04.2019 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde gerçekleştirilmiştir. Bu test kapsamında iki adet çift-frekanslı CHC I80 GNSS alıcısı kullanılmış olup GNSS alıcılarından biri sarsma masasına, diğer GNSS alıcısı ise sarsma tablasından yaklaşık olarak 60 m uzağa ve bilinen bir noktaya kurulmuştur. 1 nolu teste başlamadan önce sarsma tablası üzerindeki GNSS alıcısı geleneksel-PPP çözümünün hassasiyetini yükseltmek ve başlangıç tamsayı belirsizliği çözümünü elde etmek için yaklaşık olarak 25 dakika boyunca açık ve hareketsiz bir halde bekletilmiştir. GNSS gözlemleri 20 Hz örneklem aralığında ve 10° uydu kesme açısı kaydedilmiş, GPS, GLONASS ve Galileo gözlemleri toplanmıştır. Testin gerçekleştirildiği sırada gökyüzü oldukça açık ve hava rüzgârsız

olmakla beraber, test süresince 7 ila 9 arasında GPS, 6 ila 8 arasında GLONASS ve 5 ila 6 arasında Galileo uydusu gözlemlenmiştir. Şekil 6.2, deney sırasından bir anı göstermektedir.



Şekil 6.2: 1 nolu deney anından bir görünüm.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen 1 nolu harmonik salınım testi sırasında elde edilen veriler ile "Erken Tehlike Uyarısı ve Dinamik Hareket Algılama Uygulamalarında İkinci-Nesil SBAS Destekli Gerçek-Zamanlı GPS-PPP Tekniğinin Performansı", "Yapısal Deplasmanların ve Güçlü Yer Hareketlerinin Tespitinde Tek-Frekanslı Hassas Nokta Konumlama (SF-PPP) Tekniğinin İncelenmesi", "Gerçek-Zamanlı Yapı Sağlığı İzlemeleri ve Hızlı Risk Değerlendirmesi Çalışmalarında Tek-Frekanslı GPS/Galileo Varyometrik Yaklaşımın Performansı" ve "Yapı Sağlığı İzlemeleri Uygulamalarında Yüksek Zamansal Çözünürlüklü GNSS-PPP ve PPP-AR Tekniklerinin Performansının İncelenmesi" çalışmaları ortaya çıkarılmıştır.

6.1.2. 2 nolu Harmonik Salınım Testi ve GNSS Verilerinin Toplanması

2 nolu harmonik salınım testi 13.07.2021 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3, 2 nolu deney düzeneğini göstermektedir. Testler sırasında sarsma tablasına üç adet GNSS anteni monte edilmiştir. Bu antenlerden biri olan Novatel GPS-702, gerçek-zamanlı PPP çözümü için kullanılan Trimble MB-2 OEM alıcısına bağlanırken, diğer anten olan Leica CGA60, gerçek-zamanlı VADASE çözümü elde edebilme yeteneğine sahip Leica GR30 alıcısına bağlanmıştır. Üçüncü anten ise rölatif konum belirleme çözümü için kullanılan CHC

I80 bütünleşik alıcısıdır. Başka bir CHC I80 alıcısı ise rölatif konum belirleme çözümü elde etmek için yaklaşık 70 m uzakta bilinen bir noktaya kurulmuştur. Test sırasında tüm GNSS alıcıları 20 Hz örnekleme aralığına ve 10^{o} yükseklik açısına ayarlanmıştır. Gerçek-zamanlı PPP çözümü için RTKLIB yazılımının RTKNAVI modülü kullanılırken, Leica GR30 alıcısı ise VADASE çözümlerinden elde edilen deplasman değerleri gerçek-zamanlı olarak kaydetmiştir. RTKLIB yazılımının RTKPOST modülü de rölatif konum belirleme yöntemi için kullanılmıştır. Deneylerde üç farklı dinamik hareket formu oluşturulmuştur. Bu hareketler sırasıyla harmonik salınımlar, sismik yer dalgası hareketleri ve adım fonksiyonlarıdır. Tüm bu hareketlerin sarsma tablası kullanılarak oluşturulması yaklaşık olarak yarım saat sürmüştür.



Şekil 6.3: 2 nolu deney anından bir görünüm.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen 2 nolu harmonik salınım testi sırasında elde edilen veriler ile "Yüksek Zamansal Çözünürlüklü (20 Hz) GPS Gözlemlerine Dayalı Dinamik Deplasmanların İzlenmesinde Gerçek-Zamanlı Varyometrik Yaklaşım ve Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin Değerlendirilmesi", "Yatay Yönlü Dinamik Davranışların Belirlenmesinde Farklı IGS Ürünlerine Dayalı RT-PPP Tekniğinin Karşılaştırmalı Bir Analizi" ve "Gerçek-Zamanlı VADASE Yaklaşımının Dinamik Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi ve Bu Yönteme Çoklu-GNSS Gözlemlerinin Katkısı" çalışmaları ortaya çıkarılmıştır.

6.2. Deprem Simülasyonu Testleri

Bu tez çalışması kapsamında incelenen algoritmalarının deprem kaynaklı güçlü yer sarsıntılarının yarattığı titreşimleri tespit edebilme performansını test etmek

amacıyla gerçekleştirilen üç farklı deneyde de El Centro, Kobe, Loma Prieta ve Düzce depremleri sarsma tablasında simüle edilmiştir.

El Centro depremi 19 Mayıs 1940' tarihinde Güney Kaliforniya'da 05:35 UTC'de meydana gelmiştir. Deprem 6.9 Mw büyüklüğüne sahip olmakla birlikte, fay kırığının yakınlarında yer alan bir sismografla kaydedilen ilk büyük deprem olma özelliğini taşımaktadır. Depremin gerçekleştiği tarih dikkate alındığında Imperial Valley'de gerçekleşen en güçlü depremdir ve bölgedeki sulama sistemlerinin önemli derecede hasar almasına sebep olmuştur. Deprem merkezinin, Kaliforniya'nın Calexico kasabasının 8.0 km kuzeyinde yer alan Imperial Fayı'nda ortaya çıkan bir kırılma olduğu tespit edilmiştir. Deprem sırasında, maksimum deplasmanı yaklaşık olarak 4.5 m olan 40-60 km'lik yüzey yırtığı meydana gelmiş ve oluşan kırığın, yanal atılımlı fay özelliği gösterdiği ve düşey deplasmanının olmadığı gözlemlenmiştir.

"Büyük Hanşin Depremi" olarak da bilinen Kobe depremi, Japonya'nın Hyōgo Eyaletinin güney kesiminde 16 Ocak 1995'te saat 20:46 UTC'de meydana gelmiştir ve 6.9 Mw büyüklüğüne sahiptir. Bu çalışmada, güçlü deprem kaynaklı yer sarsıntısını temsil eden değerler, Kobe depremi sırasında Kakogawa-KKGW istasyonunda kaydedilen doğal bir dalga formundan alınmıştır. Depremin merkez üssü kayıt istasyonuna olan uzaklığı yaklaşık 20 km'dir ve kayıt, yüksek genlikli ve kısa süreli (~20 saniye) yakın-alan özelliklerine sahiptir. İvme verilerinden hesaplanan deplasman değerleri, sarsma tablasının deplasman limitleri dahilinde olması için 0.35 kat küçültülmüştür.

San Andreas fay hattı üzerindeki Mw 6.9 Loma Prieta depremi, 17 Ekim 1989'da meydana gelmiştir. Deprem yüzeye oldukça yakın ve mekanizması yanal atımlıdır. Depremin merkez üssü kırsal kesimde olmasına rağmen, kuvvetli yer hareketleri nedeniyle eyaletler arası otoyollar büyük ölçüde etkilenmiş, çok sayıda köprü, üst geçit ve viyadük kısmen veya tamamen çökmüştür. Bu çalışmada kullanılan yer hareketi verileri California Geological Survey (CGS) tarafından işletilen Gilroy #1 istasyonunda kaydedilmiştir. Kayıt istasyonu, merkez üssünden yaklaşık 30 km uzaktadır ve deprem sırasında kaydedilen verilerin Doğu-Batı bileşeni kullanılmıştır.

Kuzeybatı Türkiye, 1999 yılında Kuzey Anadolu Fayı üzerinde yanal atılım mekanizmalı iki büyük depremle sarsılmıştır. İlk deprem 17 Ağustos 1999'da İzmit'te (Mw=7.6), ikincisi ise 12 Kasım 1999'da (Mw=7.2) Düzce'de meydana gelmiştir. Her iki depremin merkez üssü arasındaki mesafe yaklaşık 120 km'dir. Meydana

gelen depremler sonrası oluşan mali kayıp yaklaşık 20 Milyar USD olarak tahmin edilmiştir. Her iki depremin merkez üssü arasında yer alan Sakarya ili depremlerden büyük ölçüde etkilenmiştir. Şehrin altyapı ağı, önemli ölçüde sıvılaşma nedeniyle tamamen çökmüştür. Binaların çoğu neredeyse tamamen hasar görmüş ve kimyasal fabrikalar, üretim tesisleri, elektrik iletim kuleleri ve köprüler gibi kritik yapılar da güvenlik sorunları nedeniyle kapalı tutulmuştur. Çalışmada kullanılan kullanılan yer hareketi verileri, Türkiye Ulusal Kuvvetli Hareket Ağı 5401 (Sakarya) istasyonunda kaydedilen, 12 Kasım 1999 Düzce depreminin Doğu-Batı bileşenidir.

6.3. GNSS Verilerinin İşlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında farklı GNSS algoritmalarının harmonik hareketleri algılama ve deprem kaynaklı güçlü yer sarsıntılarını tespit edebile yetenekleri değerlendirilmiştir. Söz konusu yöntemlerin performansının incelenmesi amacıyla elde edilen çözümler LVDT sensörünün yanı sıra rölatif konum belirleme tekniği ile de karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde tüm GNSS tabanlı çözümlerin nasıl elde edildiği açıklanacaktır.

Tablo 6.1: RTKLIB yazılımı ile rölatif konum belirleme çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.

Çözüm Parametreleri	Konumlama Modu	Kinematic
	Frekanslar / Filtre Tipi	L1, L1+L2 / Forward
	Kesme Açısı (°) / SNR Maskesi (dBHz)	10° / OFF
	Alıcı Dinamikleri / Katı Yer Gel-Git Düzeltmesi	OFF / OFF
	İyonosferik Düzeltme	Broadcast
	Troposferik Düzeltme	Saastamoinen
	Uydu Yörünge/Saat	Precise
Başlangıç Faz Belirsizliği Parametreleri ve Eşik Değerleri	Tamsayı Faz Belirsizliği Çözümü	Continuous
	Belirsizliği Çözmek için Min. Oran Testi Değeri	3
	Belirsizlik Çözümü için Min. Kitlenme/ Kesme Açısı (°)	0 / 0
	Belirsizliği Sıfırlamak için Kesinti/ Faz Sıçraması Eşik Değeri (m)	5 / 0.050
	İki İstasyon Arasındaki Farkların Maks. Değeri (s)	30.0
	GDOP Eşiği / Kalman Filtresi Innov. Eşiği (m)	30.0 / 30.0
	Maks. # Amb. İter. /# Filtre İter.	1 / 1
Ölçü Hataları (1-sigma)	Kod/Faz Hata Oranı L1/L2	100.0 / 100.0
	Kod/Faz Hatası a+b/sinEl (m)	0.003 / 0.003
	Kod/Faz Hatası /Baz Vektörü (m/10km)	0.000
	Doppler Frekansı (Hz)	10.000
Ölçü Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s))	Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s2)	10.0 / 10.0
	Taşıyıcı Faz (cycle)	0.0001
	Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)	0.001
	Zenith Troposferik Gecikme (m)	0.0001

Tez çalışması yedi farklı uygulamadan oluşmakta ve her bir deney setinde rölatif yöntem referans sensörlerden biri konumundadır. İkinci ve üçüncü uygulamalar olan "Yapısal Yer Değiştirmelerin ve Yer Hareketlerinin Tespitinde Tek-Frekanslı Hassas Nokta Konumlandırmanın (SF-PPP) Kullanılabilirliği" ve "Gerçek-zamanlı Yapı Sağlığı İzleme ve Hızlı Yapı Riski Değerlendirmesi Çalışmalarında Tek-Frekanslı GPS/Galileo Varyometrik Yaklaşımın Performansı" çalışmalarında kullanılan tek-frekanslı rölatif konum belirleme çözümleri için açık kaynak kodlu RTKLIB yazılımının RTKPOST modülü kullanılırken diğer dört uygulamada ise çift-frekanslı rölatif konum belirleme çözümleri yine aynı yazılım kullanılarak elde edilmiştir. Söz konusu bu çözümleri gerçekleştirmek için IGS-Final uydu ve saat hassas ürünleri kullanılmıştır. Elde edilen çözümlerin tüm epoklarında, tüm uydu kombinasyonları için başlangıç faz belirsizliği değerleri çözülmüştür. RTKPOST modülünde rölatif yöntem için kullanılan işlem parametreleri tablo 6.1'de ifade edilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde tek- ve çift- frekanslı ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin yatay yönlü dinamik davranışları tespit edebilme kabiliyeti incelenmiştir. İkinci-nesil SBAS sistemi şu an test amacıyla Avusturalya-Pasifik bölgesinde kullanılmakta olup günlük veriler Australian Government's National Positioning Infrastructure (NPI) tarafından depolanmaktadır. Curtin Üniversitesindeki GNSS Research Center'da bulunan araştırmacılar, gerçek-zamanlı olarak sonradan-değerlendirmeye olanak sağlayan SBAS sisteminin yörünge ve saat düzeltmelerini ikili anlaşma gereği ilgili kurumdan temin edebilmektedir. Bu tez kapsamında kullanılan düzeltmeler Curtin Üniversitesi'nden Prof. Dr. Ahmed El-Mowafy aracılığıyla temin edilmiştir. Tez çalışması kapsamında değerlendirilen çift-frekanslı ikinci-nesil SBAS destekli PPP çözümlerini elde etmek için açık kaynak kodlu yazılım olan RTKLIB yazılımının RTKPOST modülü kullanılmıştır. Tez çalışmasındaki uygulamalarda sonradan-değerlendirme geleneksel-PPP tekniğinin performansı ikinci-nesil SBAS destekli PPP, VADASE ve PPP-AR teknikleri ile karşılaştırılmıştır. Çift-frekanslı Geleneksel-PPP çözümleri için IGS-Final hassas yörünge/saat ürünleri kullanılmış ve sonuçlar yine RTKPOST modülü ile elde edilmiştir. Tez çalışmasının ilk çalışması olan "Erken Tehlike Uyarısı ve Dinamik Hareket Algılama Uygulamalarında İkinci-Nesil SBAS Destekli Gerçek-Zamanlı GPS-PPP Tekniğinin Performansı" uygulamasında ise Uluslararası GNSS Servisi (IGS), MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock

Analysis) ve CNES (Centre National D'Etudes Spatiales) tabanlı gerçek-zamanlı yörünge ve saat ürünlerinin performansı da ayrıca değerlendirilmiştir. RTKPOST modülünde çift-frekanslı geleneksel-PPP tekniği çözümleri için kullanılan işlem parametreleri tablo 6.2'de ifade edilmiştir.

Tablo 6.2: RTKLIB yazılımı ile geleneksel-PPP çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.

Çözüm Parametreleri	Konumlama Modu	PPP-Kinematic
	Frekanslar / Filtre Tipi	L1+L2 / Forward
	Kesme Açısı (°) / SNR Maskesi (dBHz)	10° / OFF
	Alıcı Dinamikleri / Katı Yer Gel-Git Düzeltmesi	OFF / Solid+OTL
	İyonosferik Düzeltme	Iono-Free LC
	Troposferik Düzeltme	Estimate ZTD+Grad
	Uydu Yörünge/Saat	Precise
	Uydu Anteni Faz Merkezi Düzeltmesi	✓
	Alıcı Anteni Faz Merkezi Düzeltmesi	✓
	Faz Salınım Etkisi Düzeltmesi	✓
	Gölgelenen Uyduları Reddet (GPS Block IIA için)	✓
	Alıcı-Özerk Bütünlük Takibi (RAIM) Hata Tarama ve Giderme (FDE)	✓
	DBC Düzeltmesi	✓
Eşik Değerleri	Belirsizliği Sıfırlamak için Kesinti/ Faz Sıçraması Eşik Değeri (m)	5 / 0.050
	GDOP Eşiği / Kalman Filtresi Innov. Eşiği (m)	30.0 / 30.0
	# Filtre İter.	1
Ölçü Hataları (1-sigma)	Kod/Faz Hata Oranı L1/L2	100.0 / 100.0
	Kod/Faz Hatası a+b/sinEl (m)	0.003 / 0.003
	Kod/Faz Hatası /Baz Vektörü (m/10km)	0.000
	Doppler Frekansı (Hz)	10.000
Ölçü Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s))	Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s2)	10.0 / 10.0
	Taşıyıcı Faz (cycle)	0.0001
	Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)	0.001
	Zenith Troposferik Gecikme (m)	0.0001

Tez çalışması kapsamında çift-frekanslı geleneksel-PPP ve ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniklerine ek olarak bu yöntemlerin tek-frekanslı çözümlerinin performansı da incelenmiştir. Tez çalışmasının ikinci uygulaması olan "Yapısal Yer Değiştirmelerin ve Yer Hareketlerinin Tespitinde Tek-Frekanslı Hassas Nokta Konumlandırmanın (SF-PPP) Kullanılabilirliği" çalışmasında MADOCA ve IGS analiz merkezleri tarafından kullanılan gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerine ek olarak ikinci-nesil SBAS yörünge/saat düzeltmeleri ve IGS-Final ürünü kullanılmıştır. Tez çalışmasının söz konusu ikinci uygulamasında tek-frekanslı PPP çözümlerini elde etmek için tek-frekanslı PPP çözümü elde etmeye olanak

sağlayan gLAB v5.5.1 yazılımı kullanılmıştır [Ibáñez et al., 2018]. SF-PPP için gLAB yazılımının işlem parametreleri Tablo 6.3'te ifade edilmiştir.

Tablo 6.3: gLAB yazılımı ile geleneksel SF-PPP çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.

Seçenek	PPP
Örneklem Aralığı	0.05 s/20 Hz
Uydu Yükseklik Açısı	10°
GDOP Eşiği	30
Gözlemler	Pseudorange + Carrier phase
Troposferik Düzeltme	Simple Nominal [RTCA-MOPS, 2006], Niell Mapping [Niell, 1996]
Frekans	L1
Gözlem Ayarları ve Gürültü	0.3 m for C1 (Fixed StdDev) 0.003 m for L1 (Fixed StdDev)
Faz Sıçraması Tespiti	L1-C1 difference
Islak Troposferik Bileşen Kalıntısını Tahmin Etme	✓
Uydu Saat Ofsetini Düzeltme	✓
Sinyal Uçuş Süresi Sırasında Uydu Hareketini Göz Önüne Al	✓
Sinyal Uçuş Süresi Sırasında Dünya Dönmesini Göz Önüne Al	✓
Uydu Kütle Merkezi - Anten Faz Merkezi Ofset Düzeltmesi	✓
Uydu Anteni Faz Merkezi Değişimi	✓
Alıcı Anteni Faz Merkezi Düzeltmesi	✓
Alıcı Anteni Referans Noktası Düzeltmesi	✓
Göreli Saat Düzeltmesi (yörünge eksentristesi)	✓
P1-C1 Düzeltmesisi	✓ (Flexible)
Salınım Etkisi Düzeltmesi (Sadece Taşıyıcı-Faz)	✓
Katı Yer Gel-Git Düzeltmesi	✓
Göreli Yol Aralığı Düzeltmesi	✓
Çözüm	Forward

Çalışma kapsamında tek- ve çift-frekanslı VADASE yönteminin performansı üç ayrı uygulamada değerlendirilmiştir. Tez çalışmasının üçüncü uygulaması olan "Gerçek-zamanlı Yapı Sağlığı İzleme ve Hızlı Yapı Riski Değerlendirmesi Çalışmalarında Tek-Frekanslı GPS/Galileo Varyometrik Yaklaşımın Performansı" çalışmasında 1 nolu harmonik salınım testi kapsamında elde edilen GNSS verileri Geodesy and Geomatics Division of the Sapienza University of Rome tarafından geliştirilen ve gerçek-zamanlı şartlar altında GPS ve Galileo gözlemlerini kullanarak sonradan-değerlendirmeye olanak sağlayan Varyometrik yaklaşım yazılımı kullanılmıştır. Tez çalışmasının dördüncü ve altıncı bölümlerinde ise gerçek-zamanlı VADASE çözümleri Leica GR30 GNSS alıcı kullanılarak elde edilmiştir. Gerçek-zamanlı VADASE çözümlerine ek olarak tez çalışması, gerçek-zamanlı PPP

tekniğinin yatay yönlü dinamik davranışlarını tespit edebilme kabiliyetini de incelemektedir. RT-PPP çözümü için gereken gerçek-zamanlı hassas saat ve yörünge düzeltmeleri, Products.igs-ip.net:2101 aracılığıyla IGC01 akışından elde edilmiş ve RT-PPP çözümü için RTKLIB yazılımının RTKNAVI modülü kullanılmıştır. Söz konusu akıştan gelen düzeltmeler ayrı olarak kaydedilip yakın gerçek-zamanlı PPP çözümü ise yine RTKLIB yazılımının RTKPOST modülü ile değerlendirilmiştir. RT-PPP tekniği çözümleri için kullanılan işlem parametreleri tablo 6.4'te ifade edilmiştir.

Tablo 6.4: RTKLIB yazılımı ile RT-PPP çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.

Çözüm Parametreleri	Konumlama Modu	PPP-Kinematic
	Frekanslar / Filtre Tipi	L1+L2 / Forward
	Kesme Açısı (°) / SNR Maskesi (dBHz)	10° / OFF
	Alıcı Dinamikleri / Katı Yer Gel-Git Düzeltmesi	OFF / Solid+OTL
	İyonosferik Düzeltme	Iono-Free LC
	Troposferik Düzeltme	Estimate ZTD+Grad
	Uydu Yörünge/Saat	Broadcast +SSR CoM
	Uydu Anten Faz Merkezi Düzeltmesi	✓
	Alıcı Anten Faz Merkezi Düzeltmesi	✓
	Faz Salınım Etkisi Düzeltmesi	✓
	Gölgelenen Uyduları Reddet (GPS Block IIA için)	✓
	Alıcı-Özerk Bütünlük Takibi (RAIM) Hata Tarama ve Giderme (FDE)	✓
	DBC Düzeltmesi	✓
Eşik Değerleri	Belirsizliği Sıfırlamak için Kesinti/ Faz Sıçraması Eşik Değeri (m)	5 / 0.050
	GDOP Eşiği / Kalman Filtresi Innov. Eşiği (m)	30.0 / 30.0
	# Filtre İter.	1
Ölçü Hataları (1-sigma)	Kod/Faz Hata Oranı L1/L2	100.0 / 100.0
	Kod/Faz Hatası a+b/sinEl (m)	0.003 / 0.003
	Kod/Faz Hatası /Baz Vektörü (m/10km)	0.000
	Doppler Frekansı (Hz)	10.000
Ölçü Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s))	Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s2)	10.0 / 10.0
	Taşıyıcı Faz (cycle)	0.0001
	Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)	0.001
	Zenith Troposferik Gecikme (m)	0.0001

Çalışmanın yedinci ve son uygulamasında ise PPP-AR tekniğinin dinamik davranışları tespit edebilme yeteneği değerlendirilmiştir. PPP-AR çözümleri için Net_Diff v1.14 yazılımı kullanılmıştır [Zhang et al., 2020]. PPP-AR çözümlerini elde etmek için kullanılan Net_Diff yazılımının işlem parametreleri Tablo 6.5'te görülmektedir. İlgili tabloda ifade edilen PDOP kısaltması uydu geometrisinin hesaplanan yatay ve düşey koordinatlara etkisini; CDP kod, faz ve dopler gürültü

eşiğini; VMF1 Viyana İzdüşüm Fonksiyonu 1'i (Vienna Mapping Function 1); CNMC kod gürültüsü ve multipath düzeltmesini; GPT2w Küresel İzdüşüm Fonksiyonu 2 ıslak bileşen düzeltmesini (Global Pressure and Temperature 2 wet); MW Melbourne-Wübbena fonksiyonunu ve GF geometri-bağımsız (geometry free) değişkenlerini ifade etmektedir.

Tablo 6.5: Net_Diff yazılımı ile PPP-AR çözümü elde etmek için belirlenen işlem parametreleri.

Seçenek	PPP-AR
Örneklem Aralığı	0.05 s/20 Hz
PDOP Eşiği	20
Görelilik Etkisi	Corrected (Kouba, 2009)
Gözlemler	Pseudorange + Carrier phase
Troposferik Düzeltme	Zenith: GPT2w [Boehm et al., 2015]; Mapping Function: VMF1 [Boehm et al., 2015]
Kombinasyon	P1-P2
Frekans	L1-L2
Uydu ve Alıcı Faz Merkezi Ofseti ve Değişimi	Corrected by IGS ANTEX antenna corrections [Kouba, 2009]
Parametre Dengeleme Yöntemi	Kalman Filter
Başlangıç Faz Belirsizliği	Continuous (long baseline dual-loose combination)
Kısmi AR	Data-driven
Min. Ratio	2
CDP Gürültüsü	0.3/0.03/0.003 m (elevation dependent)
Faz Sıçraması Tespiti	GF+MW
Yumuşatma Parametresi	CNMC
Çözüm	Forward Kalman Filter

Çalışma kapsamında elde edilen tüm GNSS tabanlı çözümler, eşitlik 6.1'de görüldüğü gibi Sağa, Yukarı ve h yerel toposentrik Kartezyen koordinat sisteminde elde edilmiştir. Elde edilen bu koordinat bileşenleri ise sarsma tablasının koordinat sistemine dönüştürülmesi amacıyla eşitlik 6.2'de görüldüğü gibi 2 boyutlu benzerlik dönüşümüne sokulmuştur. Benzerlik dönüşümünün dönüklük açısı (ε), Kuzey bileşende hareket görülmeyecek şekilde her bir deney için ayrı ayrı seçilmiştir.

$$\begin{bmatrix} e_t \\ n_t \\ u_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -sin(\lambda_0) & cos(\lambda_0) & 0 \\ -sin(\phi_0)\,cos(\lambda_0) & -sin(\phi_0)\,sin(\lambda_0) & cos(\phi_0) \\ cos(\phi_0)\,cos(\lambda_0) & cos(\phi_0)\,sin(\lambda_0) & sin(\phi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t - X_0 \\ Y_t - Y_0 \\ Z_t - Z_0 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Eşitlik 5.1'de, X_0, Y_0, Z_0 noktanın hesaplanan jeosentrik kartezyen koordinatlarını, φ_0, λ_0 noktanın X_0, Y_0, Z_0 jeosentrik kartezyen koordinatları kullanılarak hesaplanan coğrafi koordinatlarını, X_t, Y_t, Z_t, t zamanındaki jeosentrik

kartezyen koordinatlarını, e_t, n_t, u_t ise noktanın toposentrik kartezyen koordinatlarını göstermektedir.

$$x^{bar} = N^{gps}.cos(\varepsilon) - E^{gps}.sin(\varepsilon) \tag{6.2}$$
$$y^{bar} = N^{gps}.sin(\varepsilon) + E^{gps}.cos(\varepsilon)$$

N^{gps} ve E^{gps} sırasıyla noktanın Kuzey ve Doğu bileşenlerini ifade ederken ε ve (x^{bar}, y^{bar}) ise sırasıyla dönüklük açısını ve sarsma tablası düzlemi koordinatlarını ifade etmektedir [Yigit, 2016].

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümü, çalışma kapsamında Bölüm 6.1.1 ve 6.1.2'de detayları verilen sarsma tablası testleri ile üretilen harmonik salınım ve deprem simülasyonları verilerinin farklı algoritmalar ile işlenmesi, elde edilen sonuçların ise referans Linear Variable Differential Transformer (LVDT) ve rölatif konum belirleme verileri (RP) ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını içermektedir. Tez çalışması kapsamında farklı algoritmaların incelenmesi amacıyla yedi farklı uygulama tasarlanmış, tasarlanan her bir uygulama alt başlıklar halinde verilmiştir.

Tez çalışmasının ilk uygulamasında çift-frekanslı (DF) GPS gözlemlerine dayalı ikinci-nesil SBAS destekli Hassas Nokta Konumlama (PPP) tekniğinin yapı sağlığı izlemeleri ve GPS-sismolojisi uygulamalarında kullanılabilirliği test edilmiş ve yöntemin performansı, başka gerçek-zamanlı ürünlere dayalı elde edilen PPP tekniği, RP ve LVDT sensöründen elde edilen sonuçlar referans alınarak karşılaştırılmıştır.

İkinci uygulamada ise tek-frekanslı (SF) GPS gözlemlerine dayalı ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği değerlendirilmiş ve yöntemin performansı başka gerçek-zamanlı ürünlere dayalı elde edilen PPP tekniği ile SF-RP ve LVDT sensöründen elde edilen sonuçlar referans alınarak karşılaştırılmıştır.

Üçüncü uygulamada SF-GPS varyometrik yaklaşımının (VA) yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme kabiliyetine Galileo uydu takımının katkısı incelenmiş, sonuçlar SF-RP ve LVDT sensörleri ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının dördüncü uygulamasında DF GPS gözlemlerine dayalı ve anlık olarak elde edilen gerçek-zamanlı VADASE (Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine) ve Gerçek-Zamanlı (RT) PPP tekniklerinin yapı sağlığı izlemeleri ve GPS-sismolojisi uygulamalarında kullanılabilirliği test edilmiş ve yöntemlerin performansı rölatif konum belirleme ve LVDT sensöründen elde edilen sonuçlar referans alınarak karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının beşinci uygulaması ise farklı IGC01 akışından elde edilen düzeltmeler ile gerçekleştirilen farklı RT-PPP çözümlerinin yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğinin değerlendirilmesini içermektedir. RT-PPP yaklaşımlarının performansı RP ve LVDT sensöründen elde edilen sonuçlar referans alınarak karşılaştırılmıştır.

Altıncı çalışmada GPS ve GPS/Glonass/Galileo/BeiDou gözlemlerine dayalı DF-VADASE yaklaşımının çeşitli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneği değerlendirilmiş ve sonuçlar LVDT, RP ve PPP tekniği ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının yedinci ve son uygulamasında ise geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerini yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme kabiliyeti değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda 10° uydu kesme açısı altında toplanan GPS/GLONASS gözlemleri PPP ve PPP-AR teknikleri ile değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar LVDT sensörü ve RP tekniği ile karşılaştırılmıştır.

7.1. Erken Tehlike Uyarısı ve Dinamik Hareketlerin Algılanması Uygulamalarında İkinci-Nesil SBAS Destekli Gerçek-Zamanlı GPS-PPP Tekniğinin Performansı

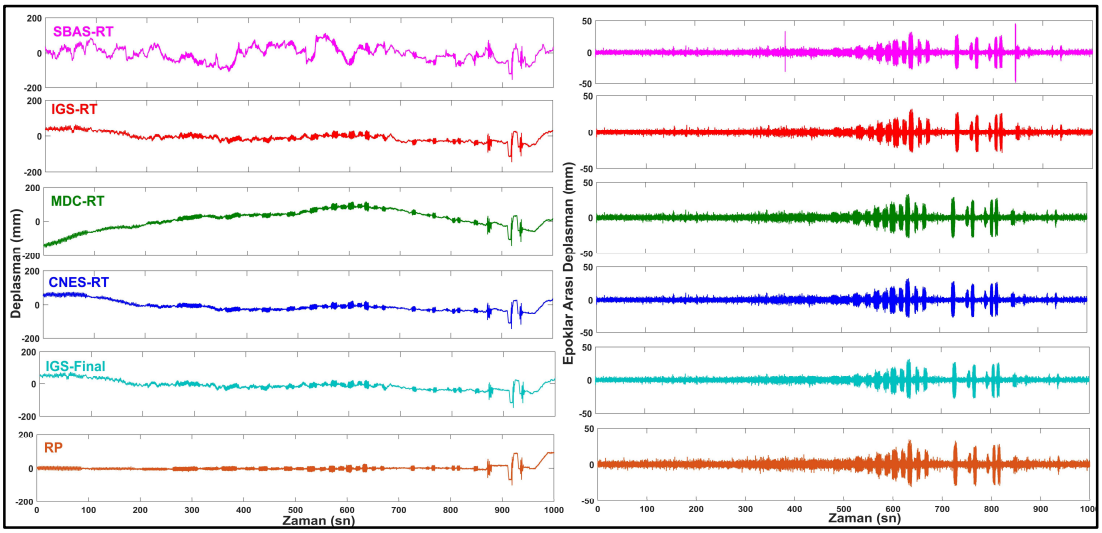
Tez çalışmasının bu bölümü, sarsma tablası ile üretilen harmonik salınım ve deprem simülasyonları verilerinin çift-frekanslı GPS uydu gözlemlerine dayalı elde edilen ikinci-nesil SBAS detekli PPP tekniği ile değerlendirilmesini, yöntemin yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğinin incelenmesini ve ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin LVDT, RP ve IGS-Final hassas yörünge ve saat ürünlerine dayalı elde edilen PPP verileri ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını içermektedir. Gerçek-zamanlı konum belirlemeye olanak sağlayan ikinci-nesil SBAS sisteminin performansı, Uluslararası GNSS Servisi (IGS), Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA/MDC) ve Centre National d'études Spatiales (CNES) gerçek-zamanlı ürünlerine dayalı PPP tekniği ile de ayrıca karşılaştırılmıştır. Yüksek zamansal çözünürlüklü ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin yapı sağlığı izlemeleri ve GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performansını incelemek amacıyla bölüm 6.1.1'de detaylarıyla açıklanan deneyler gerçekleştirilmiş, harmonik salınım testlerinde tasarlanan durumlardan sekiz tanesi incelenmek amacıyla seçilmiştir. Bölüm 6.2'de açıklanan deprem simülasyonlarından ise Kobe ve Düzce depremleri, ilgili yöntemin güçlü yer sarsıntılarının neden olduğu dalga hareketlerini tespit etmedeki performansının test edilmesi amacıyla seçilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde elde edilen GNSS tabanlı çözümlerin elde edilme şekli Bölüm 6.3'te açıklanmıştır. Tezin bu bölümünde incelenen harmonik salınım hareketlerinin genlik ve frekans değerleri Tablo 7.1'de ifade edilmiştir.

Tablo 7.1: Çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği.

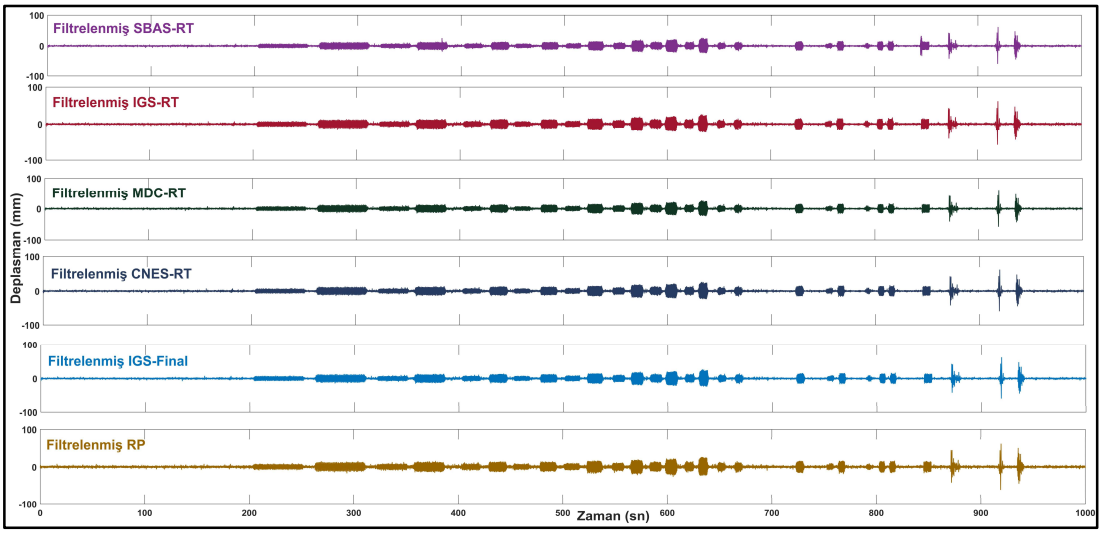
Durum No	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Frekans (Hz)	0.3	0.6	0.9	1.0	1.5	2.0	5.0	6.0
Genlik (mm)	10	10	10	10	10	10	5	5

Şekil 7.1 tez çalışmasının bu bölümünde tartışılan tüm GPS tabanlı yöntemlerden elde edilen deplasman (sol) ve epoklar arası deplasman (sağ) zaman serilerini göstermektedir. Tüm GPS tabanlı çözümlerin epoklar arası deplasman değerleri, ardışık epoklardaki deplasman farklarından belirlenmiştir. Tüm yaklaşımlardan elde edilen epoklar arası deplasman değerleri açıkça tutarlıdır ve tüm GPS tabanlı yaklaşımlar benzer gürültü seviyesine sahiptir. Bununla birlikte RP'den türetilen deplasman zaman serisi beklendiği gibi oldukça tutarlı, ancak IGS, MDC, CNES ve IGS-Final'e dayalı deplasman zaman serileri uzun vadeli dalgalanmalar ve eğilimler sergilemektedir. Ayrıca, SBAS destekli PPP'den türetilen deplasman zaman serileri, uzun vadeli dalgalanmalara ve trendlere (eğilimlere) ek olarak kısa vadeli dalgalanmalar da içermektedir. Bunun nedeni, SBAS ürünlerinin yalnızca belirli bir bölgeden yapılan gözlemlere dayalı olarak üretilmesi, diğer RT ürünlerinin ise diğer analiz merkezi verilerinin birleştirilmesiyle küresel ölçekte üretilmesidir. İkinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinden elde edilen deplasman zaman serisinin frekans ve zaman alanındaki bu kısa vadeli dalgalanmaların etkisi daha sonra ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

Zaman ve frekans alanındaki deplasmanlarım davranışı 20-250 s gibi kısa bir süre içinde inceleniyorsa uzun ve kısa vadeli dalgalanmalar önemsizdir. Bu nedenle çalışmada incelenen PPP çözümlerinden türetilen deplasman bileşenlerine 0.20 Hz kesme frekansına sahip beşinci dereceden yüksek geçirgenli Butterworth filtresi uygulanmıştır. GPS gözlemlerinde meydana gelen neredeyse tüm sistematik hataları ortadan kaldırıldığı için RP tekniğinde yüksek geçirgenli filtre gerekli olmasa da PPP tabanlı yöntemlerle karşılaştırmayı adil kılmak için aynı filtreleme işlemi RP tekniğine de uygulanmıştır. Filtrelenmiş RP ve RT-PPP yöntemlerinden türetilen zaman serileri Şekil 7.2'de ifade edilmiştir. İlgili şekil, yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra RT-PPP yöntemlerinden türetilen deplasman serilerindeki düşük frekanslı dalgalanmalarının ve trend bileşenlerinin kaybolduğunu göstermektedir. SBAS destekli PPP tekniğinin filtrelenmiş deplasman zaman serisi, RP sonuçlarıyla güçlü bir şekilde tutarlıdır.



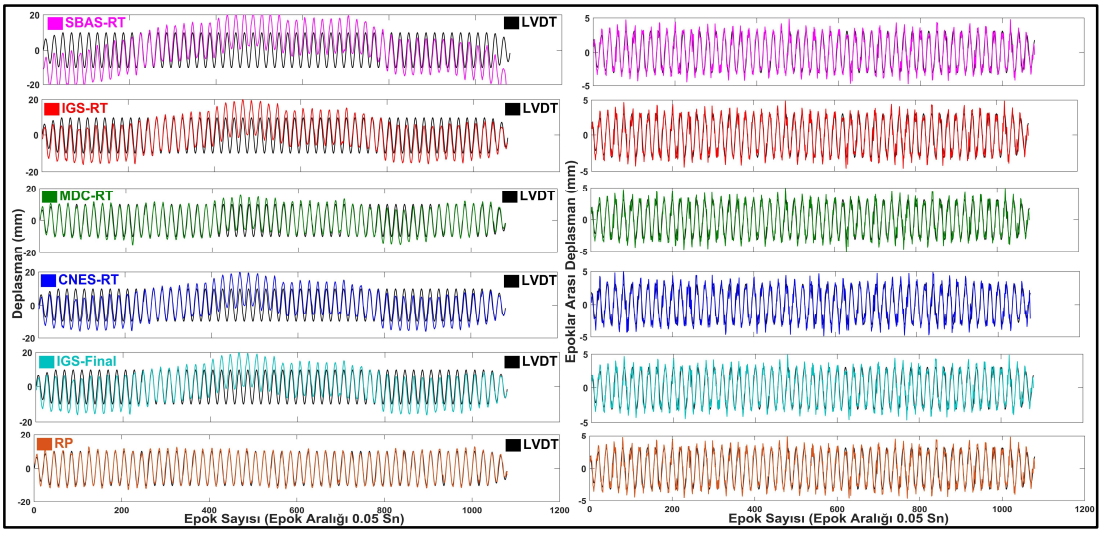
Şekil 7.1: Tüm GPS tabanlı yöntemlerden türetilen deplasman (sol) ve epoklar arası deplasman zaman serileri (sağ).



Şekil 7.2: Tüm GPS tabanlı yöntemlerden türetilen filtrelenmiş deplasman zaman serileri.

İkinci-nesil SBAS destekli PPP yönteminin harmonik salınımları yakalama performansını göstermek ve referans sensörlerle karşılaştırmak için temsili örnek olarak 1.0 Hz frekansa sahip olan dördüncü durum seçilmiş ve sonuçlar çizdirilmiştir. Şekil 7.3, deplasman ve epoklar arası deplasman bileşenleri açısından çalışmanın bu bölümünde tartışılan tüm GPS tabanlı yaklaşımların LVDT ile uyumluluğunu göstermektedir. Tüm GNSS tabanlı yöntemlerden elde edilen epoklar arası deplasman zaman serileri LVDT ile tutarlıdır. Öte yandan RP tekniği LVDT ile oldukça tutarlı ve bununla birlikte diğer GPS tabanlı yöntemlerden elde edilen deplasman zaman serilerinde kısa vadeli dalgalanmalar vardır. Bu kısa vadeli

dalgalanmalar MDC-RT tekniğinde biraz daha az olmakla birlikte, diğer PPP yöntemlerinin zaman serileri benzerdir.

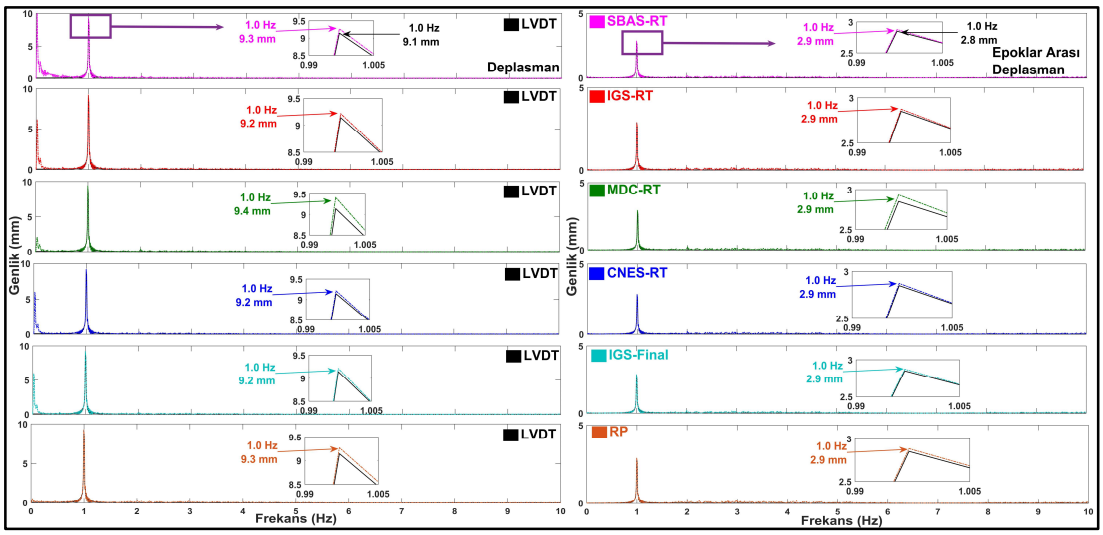


Şekil 7.3: Dördüncü durum için tüm GPS tabanlı yöntemlerden türetilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serileri.

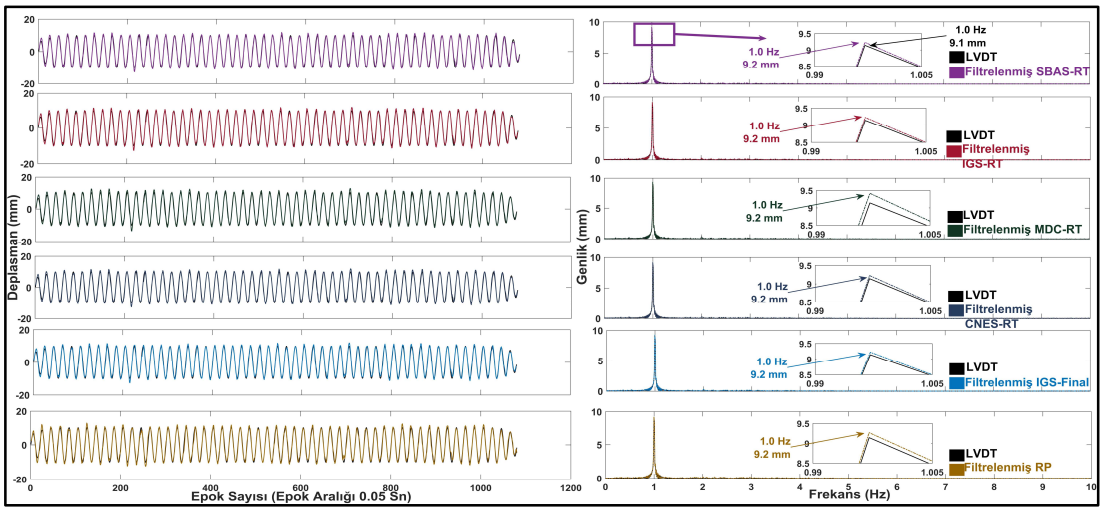
Şekil 7.3'te ifade edilen temsili durumun deplasman ve epoklar arası deplasman alanındaki Fast Fourier transform (FFT) spektrumları analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 7.4'te görselleştirilmiştir. Tüm yaklaşımların baskın salınım frekansını başarıyla belirleyebildiği açıkça görülmektedir. GPS tabanlı tüm yöntemlerden, epoklar arası deplasman alanında elde edilen genlik değerleri LVDT'den 0.1 mm ile biraz farklılık gösterirken, deplasman alanında LVDT'den olan farklar IGS-RT, IGS-Final, SBAS-RT ve CNES-RT için 0.1 mm, RP için 0.2 mm, MDC-RT içinse 0.3 mm'dir. Bu sonuçlar, SBAS destekli PPP tekniğinin frekans alanında diğer RT-PPP tekniklerine çok benzer bir şekilde çalıştığını ve SBAS tekniği ile herhangi bir filtreleme işlemine gerek kalmadan bir mühendislik yapısının doğal frekans değerlerinin anında gerçek-zamanlı olarak tespit edilebileceğini açıkça göstermektedir.

Daha önce bahsedildiği gibi, PPP yaklaşımlarından türetilen zaman serilerinde düşük bileşenli frekansları ortadan kaldırmak için yüksek geçirgenli filtre uygulanmıştır. SBAS destekli PPP tekniğinin filtreleme sonrası performansını göstermek ve hızlı risk değerlendirmeleri için yöntemin etkinliğini derinlemesine değerlendirmek için, seçilen temsili durumun filtrelenmiş deplasman zaman serileri (solda) ve FFT spektrum analizleri (sağda) Şekil 7.5'te gösterilmiştir. Filtreleme

sonrasında tüm yöntemlerin LVDT ile güçlü bir uyum içinde olduğu ve GPS tabanlı yöntemlerden elde edilen baskın frekansın değişmediği ve ayrıca genlik değerinin tüm yöntemler için LVDT den 0.1 mm ile farklı olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle, filtrelenmiş deplasman zaman serisinin LVDT ile olan güçlü tutarlılığı filtreleme işleminin başarısını açıkça vurgulamaktadır.



Şekil 7.4: Dördüncü durum için tüm GPS tabanlı yöntemlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman FFT spektrumları.



Şekil 7.5: Dördüncü durum için GPS tabanlı yöntemlerden elde edilen filtrelenmiş deplasman zaman serileri (sol) ve FFT spektrumları (sağ).

İkinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin frekans alanındaki performansını daha fazla incelemek ve etkinliğini ortaya çıkarmak için çalışmada tartışılan yöntemlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman değerleri Tablo 7.1'de ayrıntıları verilen tüm durumlar için FFT ile analiz edilmiştir. GPS tabanlı

yöntemlerin FFT spektrumlarından elde edilen genlik değerleri ile referans LVDT sensöründen elde edilen genlik değerleri arasındaki farklar hesaplanmış ve bu değerler Tablo 7.2'de ifade edilmiştir. Parantez içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları ifade ederken, diğerleri filtrelenmiş sonuçları göstermektedir. Tüm sensörlerden elde edilen baskın frekans değerleri aynı olduğu için bu değerler tabloda ifade edilmemiştir. Tablo 7.2, epoklar arası deplasman zaman serilerinden elde edilen genlik farklarının tüm yöntemler için benzer farklarla LVDT'den farklı olduğunu ve bu farkların 0.0 mm ile 1.2 mm arasında değiştiğini göstermektedir. Deplasman zaman serilerinden elde edilen farklılıklar dikkate alındığında, filtreleme sonrası yöntemlerin LVDT'den farklarının hemen hemen aynı olduğu ve yöntemlerden benzer genlik değerlerinin elde edildiği açıkça görülmektedir. Frekans alanı sonuçları, SBAS destekli PPP tekniğinin frekans alanındaki diğer RT-PPP yaklaşımlarına benzer şekilde çalıştığını ve yapı sağlığı izlemeleri uygulamalarında güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini açıkça vurgulamaktadır.

Tablo 7.2: Çalışmada tartışılan yöntemlerden elde edilen genlik değerlerinin LVDT'den olan farkları.

	Deplasman						**Epoklar Arası Deplasman**					
	LVDT-SBAS	**LVDT-IGS RT**	**LVDT-MDC RT**	**LVDT-CNES RT**	**LVDT-IGS Final**	**LVDT-RP**	**LVDT-SBAS**	**LVDT-IGS RT**	**LVDT-MDC RT**	**LVDT-CNES RT**	**LVDT-IGS Final**	**LVDT-RP**
	Gen. (mm)	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**	**Gen. (mm)**
Durum 1	0.0 (-0.1)	0.0 (-0.1)	0.1 (-0.1)	0.0 (-0.1)	0.0 (-0.1)	0.0 (-0.1)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Durum 2	-0.1 (0.2)	0.2 (0.2)	0.2 (0.2)	0.2 (0.2)	0.2 (0.2)	0.3 (0.3)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Durum 3	0.3 (0.2)	0.2 (0.2)	0.2 (0.2)	0.2 (0.2)	0.2 (0.2)	0.3 (0.3)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Durum 4	0.2 (0.1)	0.1 (0.1)	0.3 (0.3)	0.1 (0.3)	0.1 (0.1)	0.2 (0.2)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Durum 5	0.0 (-0.9)	-0.2 (-0.2)	-0.2 (-0.2)	-0.2 (-0.2)	-0.2 (-0.2)	0.2 (0.2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Durum 6	-0.8 (0.9)	-0.9 (-0.8)	-0.8 (-0.8)	-0.9 (-0.8)	-0.9 (-0.9)	-0.7 (-0.7)	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.4
Durum 7	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Durum 8	-0.2 (-0.2)	-0.2 (-0.2)	-0.2 (-0.2)	-0.2 (-0.2)	-0.2 (-0.2)	-0.2 (-0.2)	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3

Frekans alanındaki analize ek olarak, ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin harmonik hareketleri algılama kabiliyetini daha ayrıntılı tartışmak, performansını farklı gerçek-zamanlı ürünlere dayalı PPP çözümleriyle karşılaştırılmalı olarak incelemek ve referans LVDT ve RP sensörlerine dayalı doğruluğunu derinlemesine incelemek için zaman alanında da analizler gerçekleştirilmiştir. Zaman alanındaki analizler için çalışmada tasarlanan tüm harmonik salınım deneylerinde elde deplasman ve epoklar arası deplasman alanında GPS tabanlı çözümlerden elde edilen zaman serileri ile LVDT sensöründen elde edilen değerler arasındaki farklar hesaplanmıştır. Epoklar arası deplasman için bu farkların Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri Tablo 7.3'te özetlenirken,

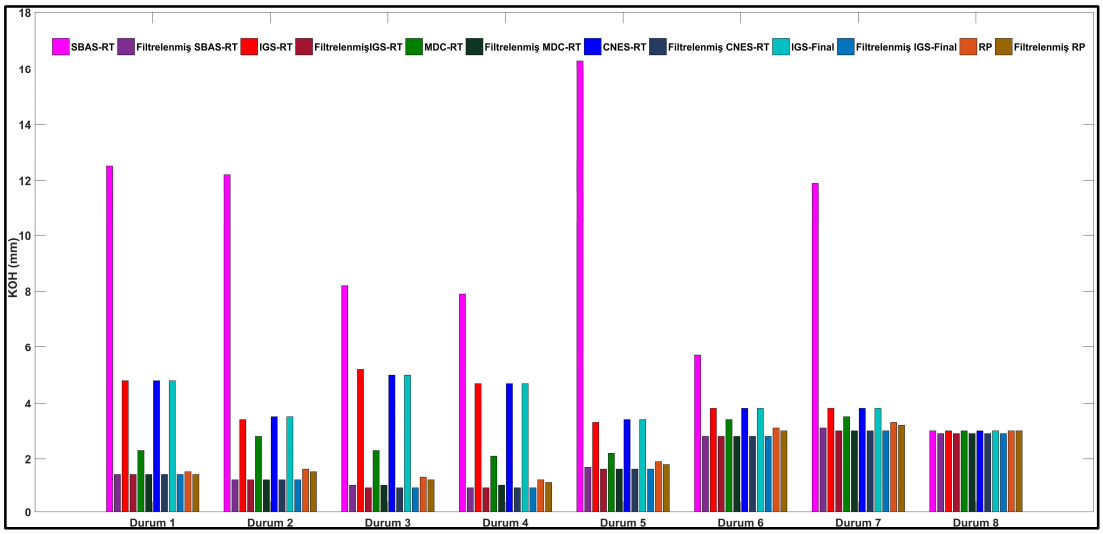
deplasman alanındaki filtrelenmemiş ve filtrelenmiş GPS tabanlı çözümlerin LVDT ile farklılıklarının KOH değerleri Şekil 7.6'da görselleştirilmiştir. Tablo 7.3'ten görülebileceği gibi, tüm yöntemler ilk 6 durum için, epoklar arası deplasman alanında LVDT ile iyi bir uyum göstermiş ve GPS tabanlı yöntemler tüm durumlar için benzer performans göstermiştir. Salınım frekansları 2.0 Hz, 5.0 Hz ve 6.0 Hz olan 6., 7. ve 8. durumlardan elde edilen KOH değerleri diğer durumlara göre yaklaşık iki/dört kat daha yüksektir. Bu farkların GNSS alıcı donanımından kaynaklanan kaçınılmaz gürültü bileşenlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak SBAS-RT yönteminden elde edilen maksimum KOH değerinin 4.5 mm olduğu göz önüne alındığında, yöntemin 6.0 Hz'e kadar olan dinamik epoklar arası deplasman farklarını tespit etme yeteneği açıktır.

Tablo 7.3: Epoklar arası deplasman alanında GPS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri.

	Epoklar Arası Deplasman					
	SBAS-RT	**IGS-RT**	**MDC-RT**	**CNES-RT**	**IGS-Final**	**RP**
	KOH (mm)	**KOH (mm)**	**KOH (mm)**	**KOH (mm)**	**KOH (mm)**	**KOH (mm)**
Durum 1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8
Durum 2	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0
Durum 3	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0
Durum 4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9
Durum 5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
Durum 6	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0
Durum 7	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.6
Durum 8	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.7

Daha önce bahsedildiği gibi, deplasman alanındaki filtrelenmiş ve filtrelenmemiş sonuçlar için hesaplanan KOH değerleri Şekil 7.6'da gösterilmektedir. Filtrelenmemiş sonuçlara bakıldığında beklendiği gibi RP tekniği en küçük KOH değerlerine sahipken, MDC-RT yaklaşımı diğer RT tabanlı ürünlere kıyasla kısmen daha iyi performans göstermektedir. IGS-RT, CNES-RT ve IGS-Final çözümleri birbiriyle tutarlıyken, SBAS destekli PPP tekniği, deplasman sonuçları için diğer yaklaşımlardan daha yüksek KOH değerine sahiptir. Bu, daha önce açıklandığı gibi SBAS yörünge ve saat düzeltmeleri ile ilgilidir. Ancak yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra tüm PPP tabanlı yöntemlerden elde edilen KOH değerlerinin hemen hemen aynı olduğu ve RP tekniği ile benzer KOH değerlerine sahip oldukları açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin filtrelemeden sonra oldukça iyi performans gösterdiğini açıkça

vurgulamaktadır. Sonuç olarak, harmonik salınım testleri insan yapımı mühendislik yapılarının doğal frekanslarını tahmin etmek için SBAS destekli PPP tekniğinin kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, zaman ve frekans alanı bulguları, yapı sağlığı izleme sistemlerinin tek bir GNSS alıcısı kullanılarak gerçek-zamanlı olarak çalıştırılması durumunda SBAS destekli PPP yönteminin güvenilir bir yaklaşım olduğunu açıkça göstermektedir.

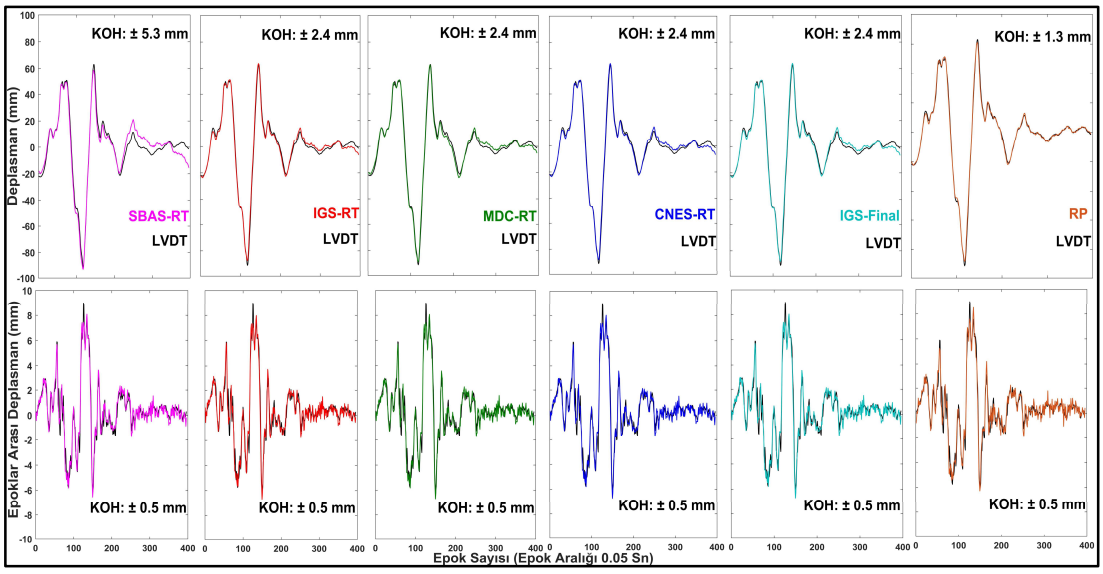


Şekil 7.6: Filtrelenmiş ve filtrelenmemiş sonuçlar için deplasman alanında GPS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri.

7.1.1. 1995 Kobe ve 1999 Düzce Deprem Simülasyon Testleri Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümde GPS-sismolojisi uygulamaları için yüksek zamansal çözünürlüklü ikinci-nesil SBAS destekli PPP yönteminin performansı araştırılmaktadır. Şekil 7.7, Düzce depremi için tüm yöntemlerden elde edilen deplasman (üst) ve epoklar arası deplasman (alt) zaman serilerini ve her iki zaman alanı için tartışılan tüm yöntemler ve LVDT sensörü arasındaki farkların KOH değerlerini göstermektedir. Ayrıca Şekil 7.8, bu çalışmada tartışılan tüm sensörlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serilerinin FFT spektrumu sonuçlarını ifade etmektedir. Beş farklı RT-PPP tekniğinden türetilen epoklar arası deplasman dalga formlarının LVDT ve RP ile karşılaştırıldığında büyük ölçüde tutarlı olduğu ve tüm GPS tabanlı yaklaşımlar ile LVDT sensörü arasındaki farkların KOH değerlerinin 0.5 mm olduğu görülmektedir. Ayrıca deplasman alanındaki sonuçlara bakıldığında, RP tekniğinin diğer yöntemlere göre biraz daha iyi

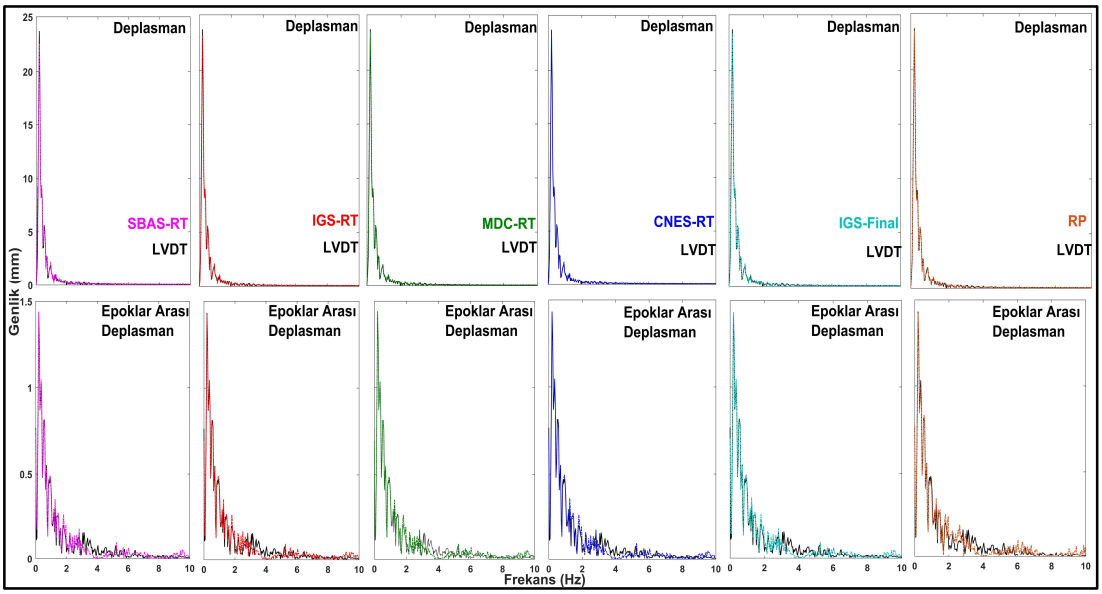
performans gösterdiği ve IGS-RT, MDC-RT, CNES-RT ve IGS-Final'den türetilen dalga formlarının birbirine benzer performans gösterdiği açıkça görülmektedir. SBAS destekli PPP tekniğinden türetilen dalga formu, ilk 200 epok boyunca LVDT'yi tutarlı bir şekilde takip ederken buradan itibaren meydana gelen ayrışma, ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinden elde edilen KOH değerinin diğer yöntemlere göre daha yüksek olmasına neden olmuştur. Ancak, Şekil 7.8'de ifade edilen FFT spektrumu dikkate alındığında, SBAS destekli PPP tekniğinin deprem kaynaklı sismik dalgaları başarılı bir şekilde tespit edebildiği açıkça görülmektedir.



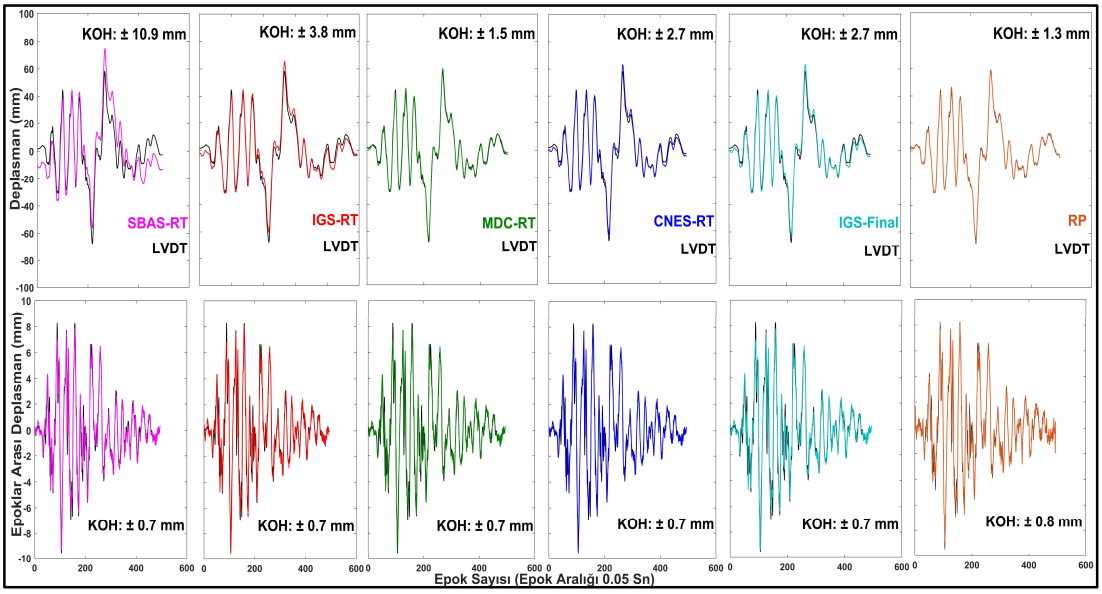
Şekil 7.7: Düzce depremi için tüm yöntemlerden elde edilen deplasman (üst) ve epoklar arası deplasman (alt) zaman serileri ve her iki zaman alanı için tartışılan tüm yöntemler ve LVDT sensörü arasındaki KOH değerleri

Ek olarak, Şekil 7.9 deprem başlangıcında harmonik salınım karakterini gösteren Kobe depremi için tüm GPS tabanlı yöntemlerden ve LVDT'den elde edilen deplasman (üst) ve epoklar arası deplasman (alt) zaman serilerini ve aralarındaki farkların KOH değerlerini ifade etmektedir. Şekil 7.10 ise tüm sensörlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serilerinin FFT spektrumu analizlerini içermektedir. KOH değerleri incelendiğinde epoklar arası deplasman alanında tüm yöntemlerin benzer olduğu, deplasman alanında ise RP ve MDC-RT PPP çözümlerinin üstünlüğünün dikkat çekici olduğu görülmektedir. Ayrıca IGS-Final ve CNES-RT yöntemleri deplasman alanında benzer KOH değerlerine sahipken, IGS-RT bu iki yönteme göre biraz daha büyük KOH değerine sahiptir. Ancak, SBAS-RT ve LVDT arasındaki farkların KOH değeri zaman serilerindeki

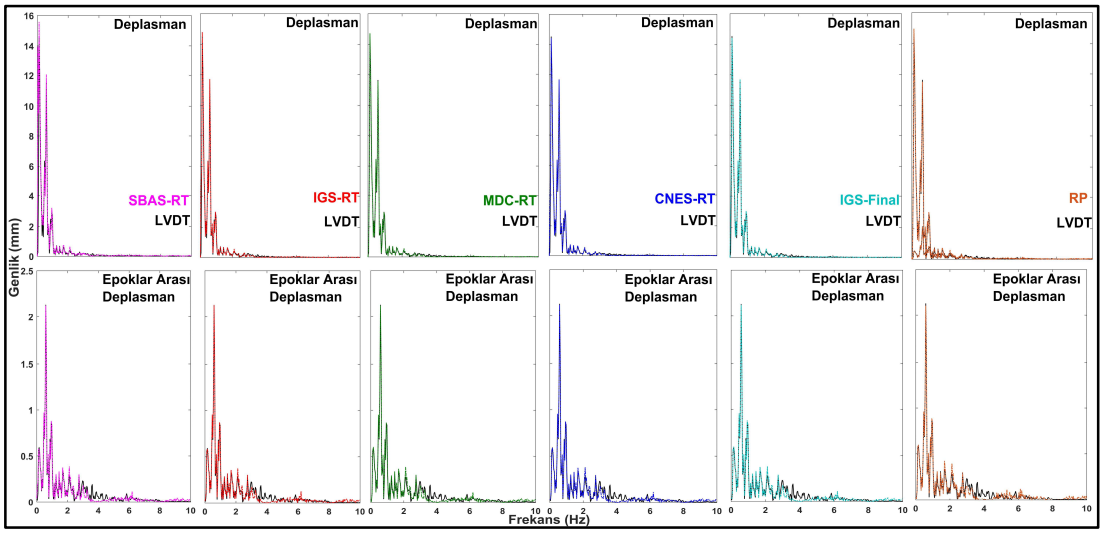
sapmalar nedeniyle 10.9 mm iken, Şekil 7.10'da ifade edilen FFT analizleri dikkate alındığında, SBAS destekli PPP tekniğinin deprem dalga şekillerini başarılı bir şekilde yakaladığı açıktır. Genel olarak, sarsma tablası kullanılarak oluşturulan 1995 Kobe ve 1999 Düzce deprem simülasyonlarının sonuçları, SBAS destekli PPP tekniği ile türetilen deplasmanların, bir depremin neden olduğu dalga hareketleri hakkında hızlı, kullanışlı ve doğru bilgi sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 7.8: Düzce depremi için çalışmada tartışılan tüm sensörlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları.



Şekil 7.9: Kobe depremi için tüm yöntemlerden elde edilen deplasman (üst) ve epoklar arası deplasman (alt) zaman serileri ve her iki zaman alanı için tartışılan tüm yöntemler ve LVDT sensörü arasındaki KOH değerleri



Şekil 7.10: Kobe depremi için çalışmada tartışılan tüm sensörlerden elde edilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları.

7.2. Yapısal Deplasmanların ve Güçlü Yer Hareketlerinin Tespitinde Tek-Frekanslı Hassas Nokta Konumlama (SF-PPP) Tekniğinin İncelenmesi

Tez çalışmasının bu bölümü, sarsma tablası ile üretilen harmonik salınım ve deprem simülasyonları verilerinin tek-frekanslı GPS uydu gözlemlerine dayalı olarak elde edilen ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme kabiliyetinin değerlendirilmesi ve yöntemin LVDT, rölatif konum belirleme ve IGS-Final hassas yörünge ve saat ürünlerine dayalı elde edilen PPP verileri ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını içermektedir. Gerçek-zamanlı konum belirlemeye olanak sağlayan ikinci-nesil SBAS sisteminin performansı, IGS ve MADOCA gerçek-zamanlı ürünlerine dayalı PPP tekniği ile de ayrıca karşılaştırılmıştır Erken uyarı ve yapı sağlığı izleme sistemlerinin işletme maliyetlerini düşürmesinde oldukça etkin bir rol oynayan tek-frekanslı gözlemlere dayalı ikinci-nesil SBAS destekli PPP tekniğinin yapı sağlığı izlemeleri ve GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performansını incelemek amacıyla Bölüm 6.1.1'de detaylarıyla açıklanan deneyler gerçekleştirilmiş, harmonik salınım testlerinde tasarlanan durumlardan on yedisi incelenmek amacıyla seçilmiştir. Bölüm 6.2'de açıklanan deprem simülasyonlarından ise Düzce depremi, ilgili yöntemin güçlü yer sarsıntılarının neden olduğu dalga hareketlerini tespit etmedeki performansının test edilmesi amacıyla değerlendirilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde elde edilen GNSS tabanlı çözümlerin elde edilme şekli ise Bölüm 6.3'te açıklanmıştır. Tezin bu

bölümünde incelenen harmonik salınım hareketlerinin genlik ve frekans değerleri Tablo 7.4'te ifade edilmiştir.

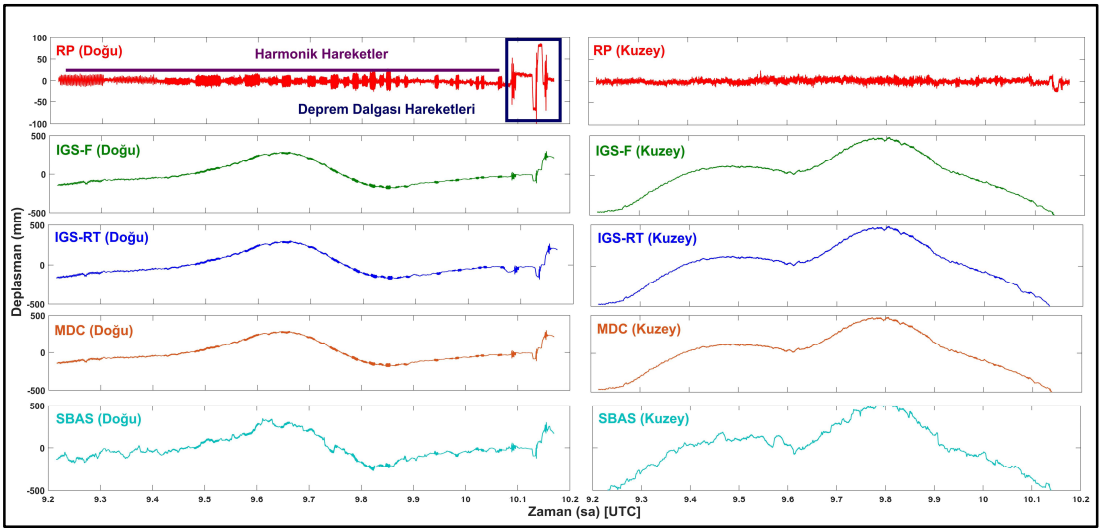
Tablo 7.4: Çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği.

			Salınım Genliği	
			5 mm	**10 mm**
Salınım Frekansı	**0.1 Hz**		Durum 1	Durum 2
	0.3 Hz		Durum 3	Durum 4
	0.6 Hz		Durum 5	Durum 6
	0.9 Hz		Durum 7	Durum 8
	1.0 Hz		Durum 9	Durum 10
	1.5 Hz		Durum 11	Durum 12
	2.0 Hz		Durum 13	Durum 14
	3.0 Hz		Durum 15	Durum 16
Bindirmeli Hareket	**0.8 Hz** **3.4 Hz** **7.6 Hz**	**10 mm** **5 mm** **1 mm**	Durum 17	

Şekil 7.11 harmonik salınımlar için ilgili yöntemlerinden ve Düzce deprem simülasyonundan türetilen Kuzey ve Doğu bileşenlerinin deplasman zaman serilerini göstermektedir. Yukarıdan aşağıya zaman serileri, SF-RP, IGS-Final tabanlı SF-PPP, IGS-RT tabanlı SF-PPP, MDC tabanlı SF-PPP ve ikinci-Nesil SBAS destekli SF-PPP sonuçlarını ifade etmektedir. SF-RP'den türetilen deplasmanlar çok tutarlı olmakla birlikte, SF-PPP yöntemlerinden türetilen deplasmanlar, her iki bileşen için uzun ve kısa vadede bazı düşük frekanslı dalgalanmalara ve trendlere sahiptir. IGS-Final, IGS-RT ve MDC tabanlı çözümlerin uzun vadeli zaman serileri oldukça benzerken, SBAS tabanlı çözümlerde kısa vadeli dalgalanmalar dikkat çekicidir. Bu durum bir önceki uygulamada da açıklandığı gibi SBAS sisteminin yörünge ve saat düzeltmeleri ile ilgilidir. Yapı sağlığı izlemeleri ve erken uyarı sistemi çalışmalarının 1 dakika veya daha kısa kısa vadeli dinamik hareketlere odaklandığı göz önüne alındığında, uzun veya kısa vadeli trendler ve düşük frekanslı dalgalanmalar aslında dinamik deplasmanları izleme çalışmaları için bir sorun teşkil etmemektedir. Bu kısa ve uzun vadeli dalgalanmalar, bir önceki bölümde de açıklandığı gibi çeşitli filtreleme yöntemleri ile başarılı bir şekilde ortadan kaldırılabilir.

Şekil 7.11'de görülen kısa ve uzun vadeli dalgalanmaları ortadan kaldırmak için, tüm GPS tabanlı yöntemlerin zaman serileri beşinci dereceden yüksek geçirgenli Butterworth filtresi kullanılarak filtrelenmiştir. İlk 2 durum için farklı,

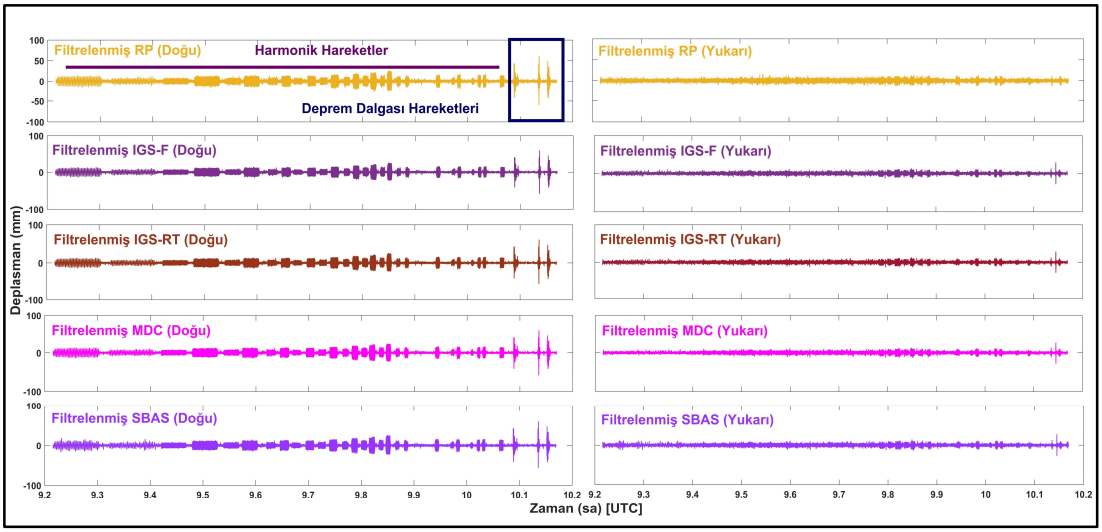
sonraki 15 durum içinse farklı kesme frekansları uygulanmıştır. İki farklı kesme frekansı seçilmesinin nedeni; tüm zaman serisi FFT ile analiz edildiğinde 0.1 Hz ile 0.3 Hz arasındaki istenmeyen baskın frekansların tespit edilmesidir. Bu nedenle, Durum 1 ve Durum 2 için filtrenin kesme frekansı 0.08 Hz iken, diğer tüm durumlar için kesme frekansı 0.20 Hz seçilmiştir. Şekil 7.11'de de görülebileceği gibi, SF-RP'nin oldukça tutarlı bir zaman serisine sahip olması nedeniyle yüksek geçigrenli filtre gereksizdir, ancak karşılaştırmayı eşit koşullar altında gerçekleştirmek için aynı filtreler bu yönteme de uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm filtrelenmiş GPS tabanlı çözümlerin zaman serileri Şekil 7.12'de görülebilir. Şekil, tüm SF-PPP çözümlerinden türetilen deplasman zaman serilerindeki uzun ve kısa vadeli dalgalanmaların, yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra ortadan kalktığını ifade etmektedir. Özellikle, SBAS tabanlı zaman serilerinin bu çalışmada tartışılan tüm yöntemlerle uyumlu olduğu ve SF-PPP yöntemlerinin SF-RP sonuçlarıyla güçlü bir şekilde tutarlı olduğu açıkça görülmektedir.



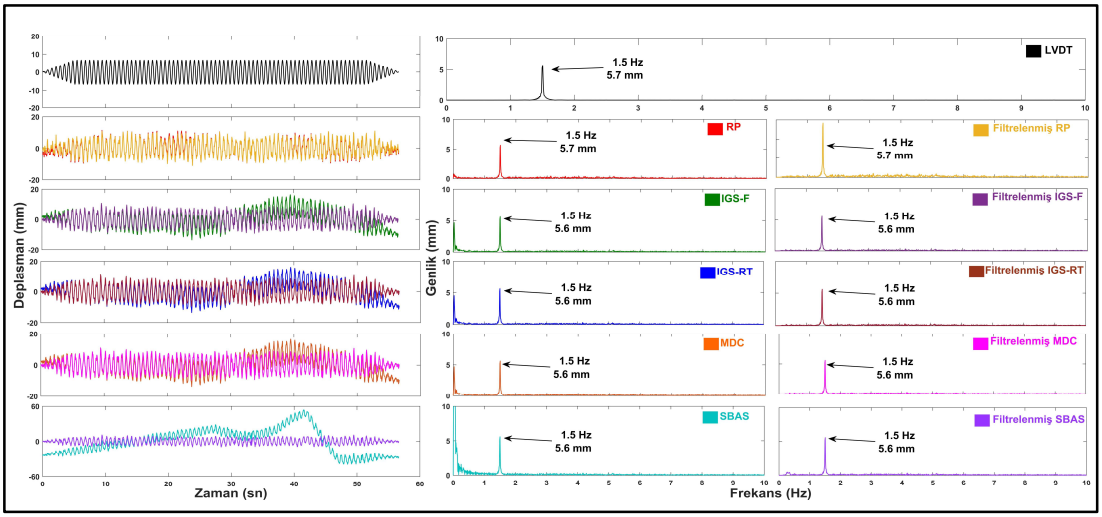
Şekil 7.11: SF-RP- (kırmızı), IGS Final tabanlı SF-PPP- (yeşil), IGS-RT tabanlı SF-PPP- (lacivert), MDC tabanlı SF-PPP- (turuncu) ve İkinci-Nesil destekli SF-PPP- (gökyüzü- mavisi)-den elde edilen deplasmanlar.

Harmonik salınımları tespit edilmesinde farklı sonradan-değerlendirme (PP) gerçek-zamanlı ürünlerine dayalı RT SF-PPP'nin performansını değerlendirmek ve bunu referans LVDT sensörüyle karşılaştırmak için temsili bir örnek olarak durum 11 seçilmiştir. Tüm GPS tabanlı çözümler ve LVDT için 11. durum, LVDT'yi, filtrelenmiş ve filtrelenmemiş SF-RP'yi ve SF-PPP'den türetilen deplasman ve bunlara karşılık gelen FFT spektrumlarını gösteren Şekil 7.13'te ifade edilmektedir.

SF-PPP tabanlı çözümlerin zaman serilerindeki düşük frekans dalgalanmalarının filtre uygulandıktan sonra ortadan kalktığı görülmektedir. SBAS tabanlı SF-PPP'nin filtrelenmemiş ve filtrelenmiş zaman serileri göz önüne alındığında, uygulanan filtreleme tekniğinin başarısı oldukça açıktır. Şekil 7.13'te hem IGS-Final'e dayalı SF-PPP hem de RT SF-PPP'den türetilen deplasmanların LVDT ve SF-RP'den türetilen deplasmanlarla iyi bir uyum gösterdiği görülebilir. Tüm GPS tabanlı çözümler için, tepe frekansı ve tepe frekansına karşılık gelen genlik değerleri filtreleme işleminden önce ve sonra aynı kalmış, bununla birlikte SF-PPP tabanlı çözümlerin FFT spektrumundaki düşük frekans bileşenleri filtreleme işleminden sonra elemine edilmiştir.

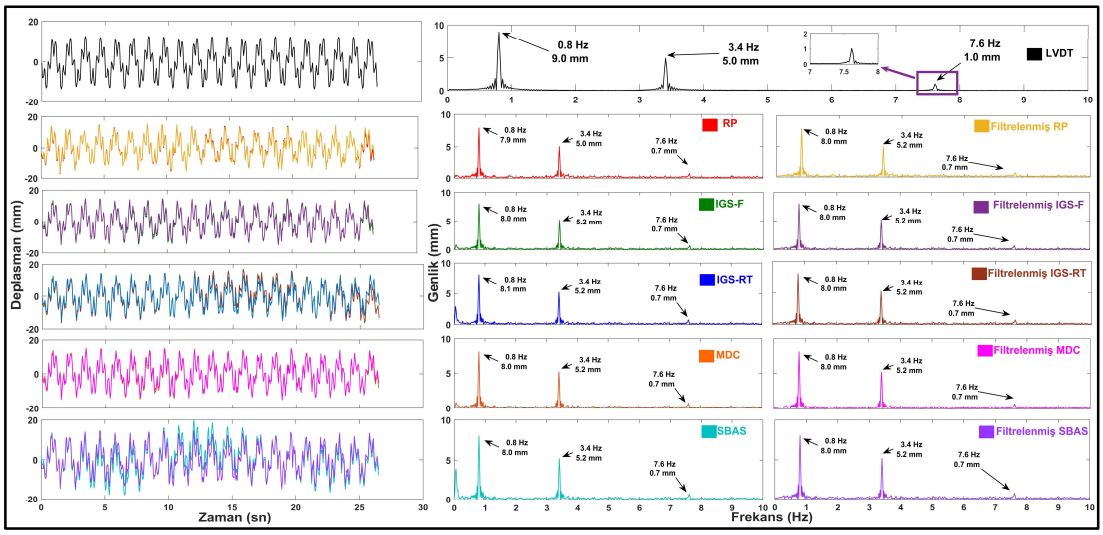


Şekil 7.12: Filtrelenmiş SF-RP ve SF-PPP den türetilen deplasmanlar.



Şekil 7.13: Durum 11 için deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ).

Yapı sağlığı izleme çalışmalarında yüksek örneklem aralığına sahip gerçek-zamanlı ve tek-frekanslı PPP tekniğinin kapasitesini ve performansını daha fazla incelemek amacıyla, bindirmeli hareketi içeren durum 17, Şekil 7.14'te ifade edilmektedir. Durum 17, Tablo 7.4'te de belirtildiği gibi üç farklı frekans ve genlik değerine sahip olan bindirmeli hareket salınımını içermektedir. Şekil 7.14, Şekil 7.13'e benzer şekilde LVDT, filtrelenmiş/filtrelenmemiş SF-RP ve SF-PPP'den türetilen deplasman zaman serilerini ve karşılık gelen FFT spektrumu analizlerini içermektedir. Şekil 7.14'teki zaman serisi, tüm yöntemlerin LVDT ve RP ile iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Filtreleme işleminden sonra zaman serilerinde ve FFT spektrumunda düşük frekans dalgalanmaları ortadan kalkmış ve filtreleme işleminden sonra frekans ve genlik değerlerinde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. Tüm GPS tabanlı çözümler, tepe frekansına karşılık gelen genlikleri yakalamada benzer şekilde performans göstermiştir ve LVDT'den elde edilen genlik değerlerinde küçük farklılıklar vardır. Durum 11 ve 17 için gerçekleştirilen analizler göz önüne alındığında sonuçlar, tek-frekanslı alıcılar ve gerçek-zamanlı ürünler kullanıldığında yapıların doğal frekansını yakalamak için PPP tekniğinin potansiyelini göstermektedir.



Şekil 7.14: Durum 17 için deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ).

Tablo 7.5, frekans alanı için tüm durumlardan elde edilen tepe frekansını ve karşılık gelen genliğini özetlemektedir. Köşeli parantez ([]) içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları tanımlarken, diğer değerler filtrelenmemiş sonuçları temsil etmektedir. Buna ek olarak Şekil 7.15, çalışmada tartışılan tüm yöntemler için tepe

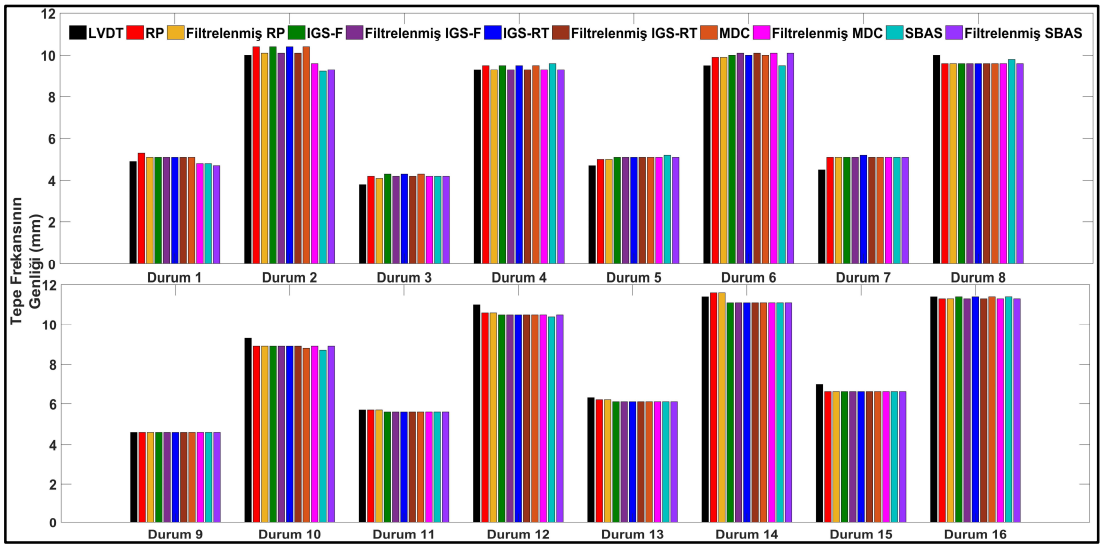
frekansına karşılık gelen genlik değerlerinden elde edilen bar grafiğini tanımlamaktadır. Tablodan da görülebileceği gibi, tüm durumlar için ilgili sensörlerden elde edilen salınım frekansları iyi bir uyum içindedir. Tüm durumlarda, GPS tabanlı çözümlerde tepe frekanslarına karşılık gelen genlik değerlerini elde etmede filtrelenmiş ve filtrelenmemiş çözümlerin performansı oldukça benzerdir. Ancak, LVDT'den elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında oldukça küçük farklılıklar vardır. LVDT ile IGS-Final tabanlı SF-PPP sonuçlarından elde edilen genlik değerlerinin farklılıkları 0.0 mm ile 1.0 mm arasında değişirken, SF-RP'nin LVDT'den olan farkları 0.0 mm ile 1.1 mm arasında değişmektedir. Bu durum, mega depremler sırasında sabit noktanın güvensizliğinden dolayı rölatif konum belirleme yöntemi kullanılamaması durumunda, yapıların doğal frekansını elde etmek için PPP tekniğinin çok güçlü bir alternatif olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca Tablo 7.5 ve Şekil 7.15'ten, hem IGS-RT ürünlerine hem MDC ürünlerine hem de ikinci nesil SBAS ürünlerine dayalı çözümler için LVDT'den farkların 0.0 mm ile 1.0 mm arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlar, gerçek-zamanlı ürünler kullanıldığında yapıların doğal frekansının da belirlenebileceğini açıkça belirtmiştir.

Tablo 7.5: Tüm durumlar için yer değiştirmelerin tepe frekansı ve genliği (Köşeli parantez içindeki genlik değerleri filtrelenmiş sonuçları temsil ederken, diğer değerler filtrelenmemiş sonuçları gösterir).

	LVDT		RP		IGS-Final		IGS Real-Time		MADOCA		SBAS	
	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)
Durum 1	0.1	4.9	0.1	5.3 [5.1]	0.1	5.1 [5.1]	0.1	5.1 [5.1]	0.1	5.1 [4.8]	0.1	4.8 [4.7]
Durum 2	0.1	10.0	0.1	10.4 [10.1]	0.1	10.4 [10.1]	0.1	10.4 [10.1]	0.1	10.4 [9.6]	0.1	9.2 [9.3]
Durum 3	0.3	3.8	0.3	4.2 [4.1]	0.3	4.3 [4.2]	0.3	4.3 [4.2]	0.3	4.3 [4.2]	0.3	4.2 [4.2]
Durum 4	0.3	9.3	0.3	9.5 [9.3]	0.3	9.5 [9.3]	0.3	9.5 [9.3]	0.3	9.5 [9.3]	0.3	9.6 [9.3]
Durum 5	0.6	4.7	0.6	5.0 [5.0]	0.6	5.1 [5.1]	0.6	5.1 [5.1]	0.6	5.1 [5.1]	0.6	5.2 [5.1]
Durum 6	0.6	9.5	0.6	9.9 [9.9]	0.6	10.0 [10.1]	0.6	10.0 [10.1]	0.6	10.0 [10.1]	0.6	9.5 [10.1]
Durum 7	0.9	4.5	0.9	5.1 [5.1]	0.9	5.1 [5.1]	0.9	5.2 [5.1]	0.9	5.1 [5.1]	0.9	5.1 [5.1]
Durum 8	0.9	10.0	0.9	9.6 [9.6]	0.9	9.6 [9.6]	0.9	9.6 [9.6]	0.9	9.6 [9.6]	0.9	9.8 [9.6]
Durum 9	1.0	4.6	1.0	4.6 [4.6]	1.0	4.6 [4.6]	1.0	4.6 [4.6]	1.0	4.6 [4.6]	1.0	4.6 [4.6]
Durum 10	1.0	9.3	1.0	8.9 [8.9]	1.0	8.9 [8.9]	1.0	8.9 [8.9]	1.0	8.8 [8.9]	1.0	8.7 [8.9]
Durum 11	1.5	5.7	1.5	5.7 [5.7]	1.5	5.6 [5.6]	1.5	5.6 [5.6]	1.5	5.6 [5.6]	1.5	5.6 [5.6]
Durum 12	1.5	11.0	1.5	10.6 [10.6]	1.5	10.5 [10.5]	1.5	10.5 [10.5]	1.5	10.5 10.5]	1.5	10.4 [10.5]
Durum 13	2.0	6.3	2.0	6.2 [6.2]	2.0	6.1 [6.1]	2.0	6.1 [6.1]	2.0	6.1 [6.1]	2.0	6.1 [6.1]
Durum 14	2.0	11.4	2.0	11.6 [11.6]	2.0	11.1 [11.1]	2.0	11.1 [11.1]	2.0	11.1 [11.1]	2.0	11.1 [11.1]
Durum 15	3.0	7.0	3.0	6.6 [6.6]	3.0	6.6 [6.6]	3.0	6.6 [6.6]	3.0	6.6 [6.6]	3.0	6.6 [6.6]
Durum 16	3.0	11.4	3.0	11.3 [11.3]	3.0	11.4 [11.3]	3.0	11.4 [11.3]	3.0	11.4 [11.3]	3.0	11.4 [11.3]
Durum 17	0.8 3.4 7.6	9.0 5.0 1.0	0.8 3.4 7.6	7.9 [7.9] 5.0 [5.0] 0.7 [0.7]	0.8 3.4 7.6	8.0 [8.0] 5.2 [5.2] 0.7 [0.7]	0.8 3.4 7.6	8.1 [8.0] 5.2 [5.2] 0.7 [0.7]	0.8 3.4 7.6	8.0 [8.0] 5.2 [5.2] 0.7 [0.7]	0.8 3.4 7.6	8.0 [8.0] 5.2 [5.2] 0.7 [0.7]

GPS tabanlı çözümlerin dinamik deplasmanları yakalama kabiliyetini daha fazla incelemek ve referans sensör olan LVDT ile karşılaştırmak amacıyla her bir durum için çalışmada tartışılan GPS tabanlı yöntemler ile LVDT'den olan farkların

KOH değeri hesaplanmış ve bu sonuçlar Tablo 7.6'da verilmiştir. Tablo 7.5'e benzer şekilde, köşeli parantez içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları, diğerleri ise filtrelenmemiş değerleri temsil etmektedir. Tabloda gösterildiği gibi, maksimum ve KOH değerleri özellikle ikinci-Nesil SBAS destekli SF-PPP için filtrelemeden sonra önemli ölçüde azalmıştır. Filtreleme sonrası maksimum değerlerde, IGS-Final tabanlı SF-PPP için %3 ile %70 arasında, IGS-RT tabanlı SF-PPP için %11 ile %70 arasında, MDC tabanlı SF-PPP için %5 ile %70 arasında bir iyileşme sağlanırken, ikinci-nesil SBAS destekli SF-PPP tekniği için %33 ile %83 arasında iyileşme görülmektedir.

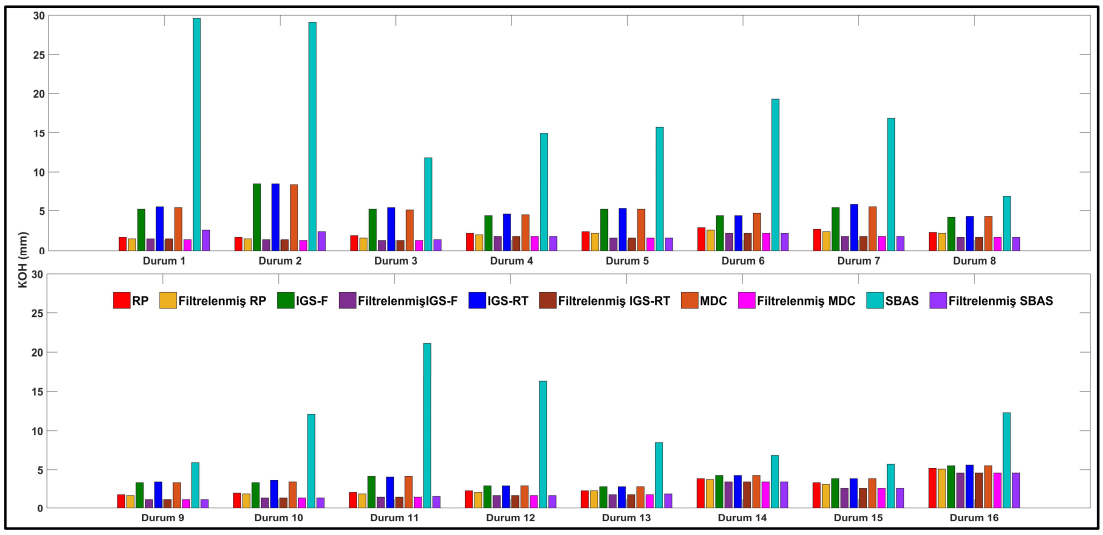


Şekil 7.15: Deplasman değerlerinden elde edilen tepe frekansına karşılık gelen genlik değerleri

Tablo 7.6: Tüm durumlar için maksimum ve KOH değerleri (Köşeli parantez içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları temsil ederken, diğer değerler filtrelenmemiş sonuçları gösterir).

	RP		IGS Final		IGS Real-Time		MADOCA		SBAS	
	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)
Durum 1	10.4 [9.6]	1.7 [1.5]	14.6 [7.9]	5.2 [1.5]	15.0 [7.8]	5.5 [1.5]	15.0 [7.6]	5.4 [1.4]	75.9 [13.0]	29.6 [2.6]
Durum 2	8,7 [7.8]	1.7 [1.5]	23.9 [7.1]	8.5 [1.4]	22.9 [7.0]	8.5 [1.4]	24.2 [7.0]	8.4 [1.3]	67.5 [12.1]	29.1 [2.4]
Durum 3	8.6 [9.2]	1.9 [1.6]	14.3 [8.4]	5.2 [1.3]	14.0 [8.4]	5.4 [1.3]	14.2 [8.4]	5.1 [1.3]	27.0 [8.4]	11.8 [1.4]
Durum 4	9.2 [8.5]	2.2 [2.0]	15.2 [7.7]	4.4 [1.8]	15.4 [7.7]	4.6 [1.8]	15.1 [7.7]	4.5 [1.8]	40.2 [7.8]	14.9 [1.8]
Durum 5	11.1 [10.0]	2.4 [2.2]	14.3 [7.6]	5.2 [1.6]	14.1 [7.5]	5.3 [1.6]	14.1 [7.6]	5.2 [1.6]	41.2 [7.1]	15.8 [1.6]
Durum 6	13.3 [11.0]	2.9 [2.6]	12.9 [8.2]	4.4 [2.2]	13.2 [8.1]	4.4 [2.2]	13.8 [8.1]	4.7 [2.2]	49.6 [8.1]	19.3 [2.2]
Durum 7	13.8 [12.0]	2.7 [2.4]	16.0 [9.8]	5.4 [1.8]	17.6 [9.8]	5.8 [1.8]	16.2 [9.8]	5.5 [1.8]	40.7 [9.7]	16.9 [1.8]
Durum 8	7.6 [8.3]	2.3 [2.2]	12.2 [6.6]	4.2 [1.7]	12.4 [6.6]	4.3 [1.7]	12.3 [6.7]	4.3 [1.7]	18.5 [6.6]	6.8 [1.7]
Durum 9	7.4 [7.7]	1.9 [1.8]	11.5 [5.8]	3.4 [1.3]	11.4 [5.8]	3.5 [1.3]	11.2 [5.8]	3.4 [1.3]	15.6 [5.8]	5.9 [1.3]
Durum 10	8.3 [8.6]	2.1 [2.0]	10.7 [8.2]	3.4 [1.5]	10.5 [8.3]	3.7 [1.5]	10.7 [8.2]	3.5 [1.5]	45.3 [8.3]	12.1 [1.5]
Durum 11	7.7 [7.7]	2.2 [2.0]	12.6 [9.7]	4.2 [1.6]	12.1 [9.6]	4.1 [1.6]	12.5 [9.6]	4.2 [1.6]	50.3 [9.7]	21.2 [1.7]
Durum 12	9.1 [10.3]	2.4 [2.2]	10.9 [9.4]	3.0 [1.8]	10.6 [9.4]	3.0 [1.8]	11.0 [9.3]	3.0 [1.8]	37.6 [11.0]	16.3 [1.8]
Durum 13	10.2 [10.1]	2.4 [2.4]	11.5 [8.8]	2.9 [1.9]	11.6 [8.9]	2.9 [1.9]	11.5 [8.9]	2.9 [1.9]	21.3 [8.4]	8.4 [2.0]
Durum 14	12.5 [11.7]	3.9 [3.8]	13.1 [11.3]	4.3 [3.5]	13.1 [11.2]	4.3 [3.5]	13.2 [11.3]	4.3 [3.5]	17.8 [10.9]	6.8 [3.5]
Durum 15	10.8 [10.2]	3.4 [3.2]	12.6 [8.5]	3.9 [2.7]	12.6 [8.5]	3.9 [2.7]	12.6 [8.5]	3.9 [2.7]	17.0 [8.6]	5.7 [2.7]
Durum 16	16.6 [16.3]	5.2 [5.1]	17.7 [14.0]	5.5 [4.6]	17.7 [14.0]	5.6 [4.6]	17.6 [14.0]	5.5 [4.6]	29.7 [13.9]	12.3 [4.6]
Durum 17	9.9 [9.1]	2.7 [2.7]	8.1 [8.4]	2.6 [2.5]	11.8 [8.3]	3.4 [2.5]	8.0 [8.4]	2.6 [2.5]	13.0 [8.6]	4.0 [2.6]

Tablo 7.6’daki KOH değerlerinin görselleştirilmiş hali Şekil 7.16'da ifade edilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, filtrelenmemiş ham sonuçlar dikkate alındığında SF-RP, tüm olaylar için 1.7 mm ile 5.2 mm arasında değişen en küçük KOH değerlerine sahiptir. Buna ek olarak ikinci-Nesil SBAS destekli SF-PPP'den elde edilen ham çözümlerin LVDT'den olan farklarının KOH değerleri tüm durumlar için en yüksek KOH değerlerine sahiptir. Ancak filtrelemeden sonra bu durumun büyük ölçüde iyileştiği açıkça görülmektedir. Tüm deneylerde filtreleme işleminden sonra %35 ile %91 arasında değişen, ortalama olarak ise %77 oranında bir iyileşme sağlandığı oldukça açık bir şekilde ifade edilmektedir. Bu çalışmada incelenen diğer RT ürünlere dayalı SF-PPP tabanlı çözümlerde IGS-RT tabanlı SF-PPP için %52, MDC tabanlı RT-PPP içinse ortalama %51 oranında iyileşme sağlanmıştır. IGS-Final tabanlı SF-PPP için ortalama iyileşme değeri ise %50’dir. Bu bulgular, yüksek geçirgenli bir filtre uygulandıktan sonra PP RT SF-PPP'nin kısa vadeli dinamik deplasmanları algılama performansının SF-RP yöntemine benzer olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca bu sonuçlar, filtreleme tekniğinin SF-PPP'den elde edilen deplasman doğruluğunu iyileştirdiğini ve SF-PPP'nin kısa vadeli dinamik davranış izleme çalışmaları için güçlü bir potansiyele sahip olduğunu ifade etmektedir.

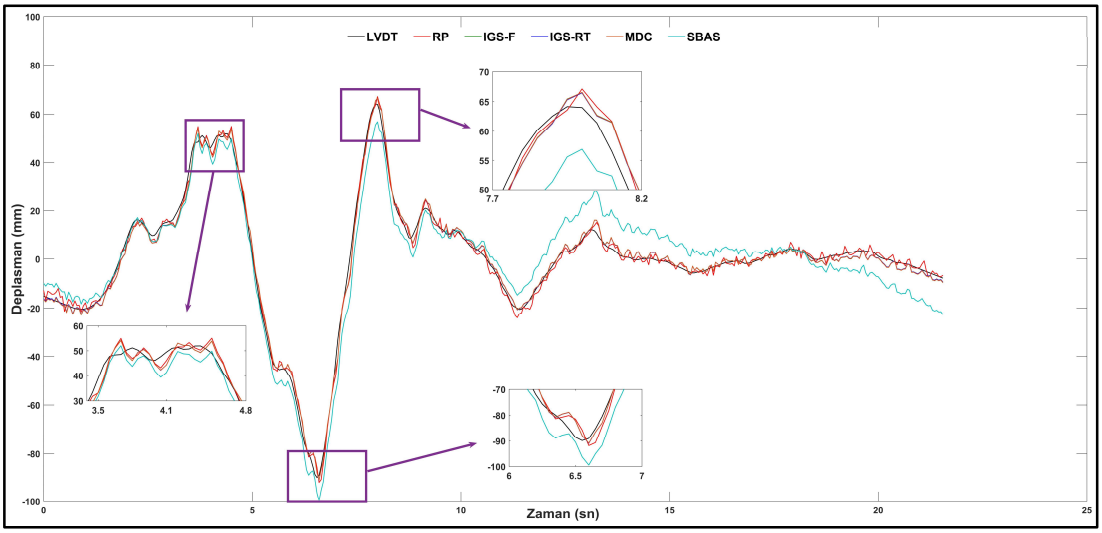


Şekil 7.16: Tüm durumlar için KOH değerleri.

7.2.1. Deprem Simülasyon Testi

Bölüm 7.2'de açıklandığı gibi, harmonik salınımlara ek olarak SF-PPP'nin sismik dalgaları algılama yeteneği de ayrıca değerlendirilmiştir. Şekil 7.17, tez

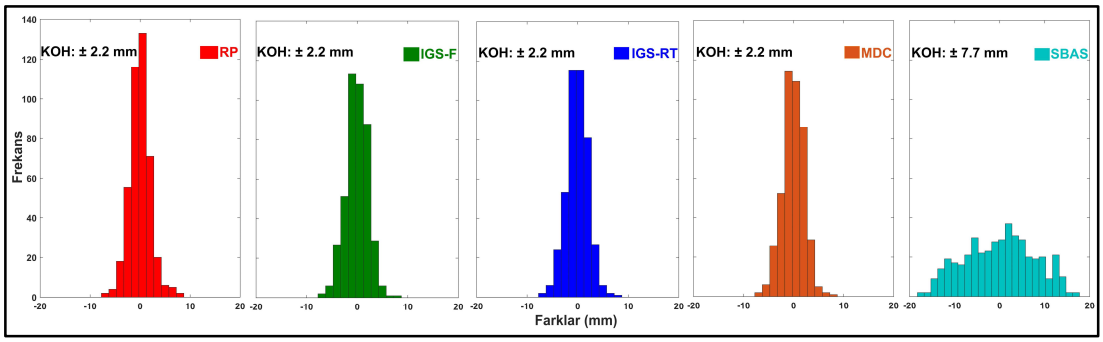
çalışmasının bu uygulamasında ele alınan 5 farklı GPS tabanlı çözümden ve referans LVDT sensöründen elde edilen Düzce depreminin simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serilerini göstermektedir. SF-RP, SF-PPP çözümleri ve LVDT'den elde edilen dalga formu ile büyük ölçüde tutarlı olduğu fazlasıyla açıktır. Buna ek olarak, yer hareketinin başlamasından yaklaşık 10 saniye sonra SBAS destekli SF-PPP çözümlerinde küçük tutarsızlıklar fark edilmiştir. LVDT ile SBAS destekli SF-PPP arasındaki maksimum farkın 1.7 cm olduğu düşünüldüğünde bu tutarsızlıkların önemsiz olduğu açıktır. Ayrıca LVDT ile SF-RP arasındaki maksimum fark 8.4 mm iken, SBAS destekli SF-PPP dışındaki tüm yöntemlerin maksimum farkı 7.9 mm'dir. Yöntemlerin zaman serilerindeki hareketleri göz önüne alındığında, IGS ve MDC tabanlı gerçek-zamanlı ürünlerin oldukça başarılı performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 7.17: Düzce depremi simülasyonunda farklı ürünlere dayalı SF-PPP, SF-RP ve LVDT kaynaklı yer değiştirmelerin karşılaştırılması.

Gerçek-zamanlı farklı yörünge ve saat ürünlerine dayalı SF-PPP ve SF-RP çözümlerinin dinamik yer hareketlerini algılama performansını daha fazla incelemek için, LVDT ile bu çalışmada tartışılan GPS tabanlı beş çözüm arasındaki farkların histogramı sunulmuştur. Şekil 7.18, ikinci-Nesil SBAS destekli SF-PPP dışındaki tüm yöntemlerin Gauss hata dağılımına uyduğu ve hataların -10 mm ile +10 mm arasında değiştiğini ifade etmektedir. LVDT ile GPS tabanlı yöntemlerin arasındaki farkların KOH değerleri göz önüne alındığında SBAS destekli SF-PPP'nin 7.7 mm ile diğer ürünlerden biraz daha yüksek KOH değerine sahip olduğu açıktır. Bununla birlikte SF-RP, IGS-Final tabanlı SF-PPP, IGS-RT ve MDC tabanlı SF-PPP, 2.2 mm

ile aynı KOH değerlerine sahiptir. Bu sonuçlar, ikinci-nesil SBAS sisteminin diğer PP RT ürünleri arasında küçük farklar ile kısmen daha başarısız sonuç verdiğini ifade etse de bu sonuçların kabul edilebilir olduğu açıktır. Düzce deprem simülasyonu testi sonuçları, SF-PPP tekniğinin kuvvetli yer hareketlerini algılamada SF-RP'ye benzer bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yapı sağlığı izlemeleri ve erken uyarı sistemlerinin gerçek-zamanlı izlenmesi ihtiyacı göz önüne alındığında, bu uygulamalar için IGS, MDC ve ikinci-nesil SBAS ürünlerinin performansının oldukça güvenilir olduğu açıktır. Ayrıca maliyet kısıtlamaları nedeniyle, çift-frekanslı alıcılar yerine tek-frekanslı alıcılardan oluşan izleme sistemlerinin kuvvetli yer hareketlerini yakalamada başarılı olduğu ve çok faydalı sonuçlar sağladığı net olarak ortaya konulmuştur.



Şekil 7.18: Düzce deprem simülasyonu için LVDT ile SF-RP (kırmızı), IGS-Final tabanlı SF-PPP (yeşil), IGS-RT tabanlı SF-PPP (lacivert), MDC tabanlı SF-PPP (turuncu) ve SBAS tabanlı SF-PPP (gök mavisi) yöntemleri arasındaki farkların histogramları.

7.3. Gerçek-zamanlı Yapı Sağlığı İzlemeleri ve Hızlı Yapı Riski Değerlendirilmesi Çalışmalarında Tek-Frekanslı GPS/Galileo Varyometrik Yaklaşımın Performansı

Tez çalışmasının bu bölümü, sarsma tablası ile üretilen harmonik salınım ve deprem simülasyonları verilerinin GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonlarına dayalı çözülen SF-Varyometrik yaklaşım (VA) tekniği ile değerlendirilmesi ve yöntemin LVDT ve SF-RP verileri ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını içermektedir. Yüksek zamansal çözünürlüklü SF-VA tekniğinin yapı sağlığı izlemeleri ve GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performansını incelemek amacıyla Bölüm 6.1.1'de detaylarıyla açıklanan deneyler gerçekleştirilmiş, harmonik salınım testlerinde tasarlanan durumlardan yedi tanesi incelenmek amacıyla

seçilmiştir. Bölüm 6.2'de açıklanan deprem simülasyonlarından ise Kobe depremi, ilgili yöntemin güçlü yer sarsıntılarının neden olduğu dalga hareketlerini tespit etmedeki performansının test edilmesi amacıyla ayrıca incelenmiştir. SF-VA tekniğinin çözümlerinin elde edilme şekli Bölüm 6.3'te açıklanırken, SF-RP çözümlerinin nasıl elde edildiği ise yine aynı bölümde ifade edilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde incelenen harmonik salınım hareketlerinin sahip olduğu genlik ve frekans değerleri Tablo 7.7'de ifade edilmiştir.

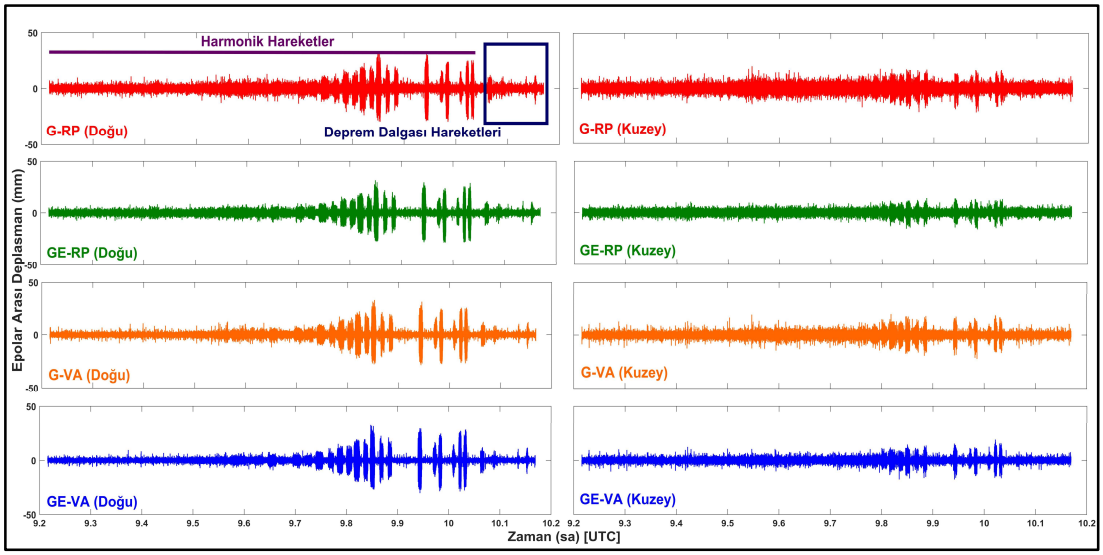
Tablo 7.7: Bu çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği.

		Salınım Genliği	
		5 mm	**10 mm**
Salınım Frekansı	**0.3 Hz**	-	Durum 1
	0.6 Hz	-	Durum 2
	0.9 Hz	-	Durum 3
	1.0 Hz	-	Durum 4
	1.5 Hz	Durum 5	-
	2.0 Hz	Durum 6	-
	3.0 Hz	Durum 7	-

7.3.1. Gerçek-Zamanlı Uygulamalar için Epoklar Arası Deplasman Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümü, gerçek-zamanlı uygulamalar için SF-VA tekniğinden elde edilen epoklar arası deplasman sonuçlarının değerlendirilmesini içermektedir. Şekil 7.19, çalışma kapsamında üretilen harmonik salınım durumlarının epoklar arası deplasman zaman serilerini ve deprem simülasyon deneylerini içermektedir. RP tekniğinden elde edilen epoklar arası deplasman değerleri, ardışık dönemlerdeki epokların deplasman farklarından elde edilmiştir. RP ve VA yöntemleri ile elde edilen epoklar arası deplasmanların oldukça tutarlı olduğu ve dinamik hareketlerin iki yöntemle de başarılı bir şekilde yakalanabildiği görülmektedir. Ancak GPS (G) ve GPS/Galileo (GE) uydu kombinasyonları için VA çözümlerinin Kuzey ve Doğu bileşenlerinde, RP çözümlerden daha az gürültü bulunmaktadır. Bunun nedeni referans ve gezici alıcıların gürültüsünün RP tekniğinin doğası gereği elde edilen çözümünün gürültü seviyesini arttırmasıdır [Paziewski et al., 2018]. Buna ek olarak RP ve VA yöntemleri için GPS/Galileo çözümleri, GPS çözümlerinden daha az gürültülüdür. Bu durum, Galileo uydusunun

her iki teknikden de elde edilen çözümlere dahil edilmesi durumunda sonuçları iyileştirdiğini açıkça ifade etmektedir.



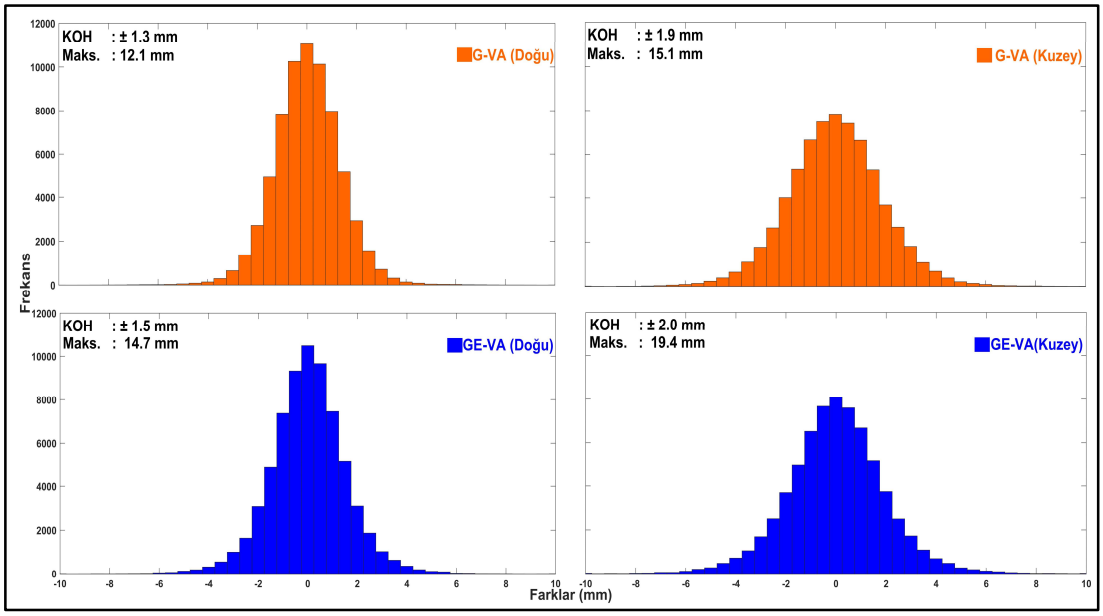
Şekil 7.19: RP ve VA tekniklerinden elde edilen epoklar arası deplasman değerleri.

RP ve VA yöntemleri arasındaki farklar Doğu ve Kuzey bileşenleri için hesaplanmış, bu farklardan elde edilen histogramlar Şekil 7.20'de belirtilmiştir. Bu farklar, her bir uydu kombinasyonu için kendi arasında alınmıştır. G çözümleri için RP ve VA teknikleri arasındaki farkların KOH değerleri Doğu ve Kuzey bileşen için sırasıyla 1.3 mm ve 1.9 mm'dir. GE uydu kombinasyonu için RP ve VA yaklaşımları arasındaki farkların KOH değerleri ise Doğu ve Kuzey bileşeni için sırasıyla 1.5 mm ve .0 mm değerine sahiptir. Şekilden görüldüğü gibi G ve GE uydu kombinasyonları için RP ve VA arasındaki farklar Doğu bileşende Kuzey bileşene göre biraz daha küçüktür. Ancak bu sonuçlar, iki yöntemin iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir.

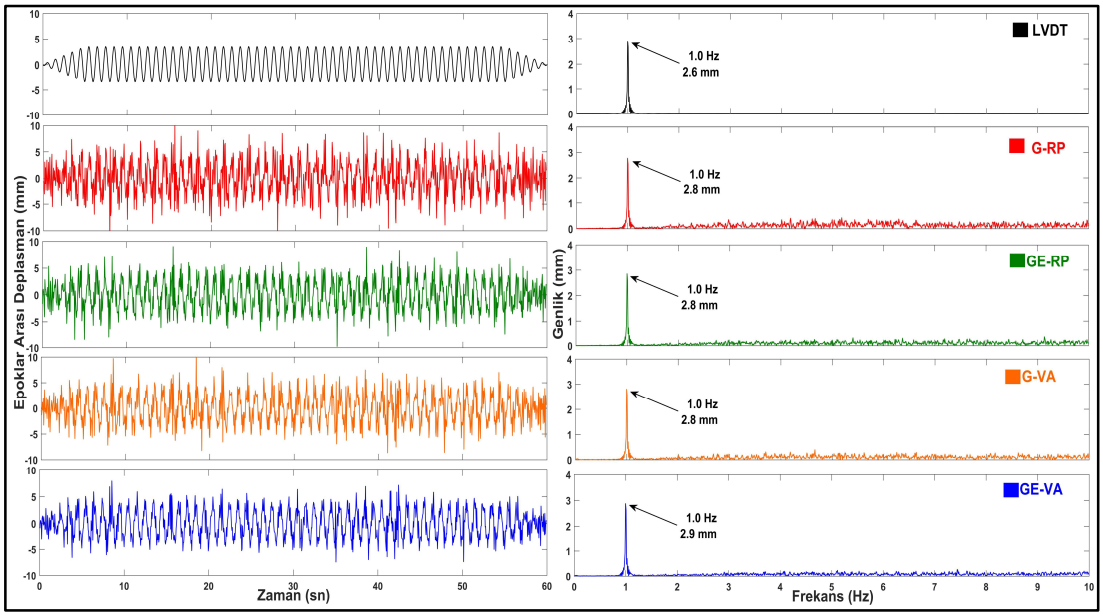
Daha önce belirtildiği gibi GNSS ve LVDT'nin örneklem aralıkları sırasıyla 20 Hz ve 100 Hz'dir. Bu nedenle, LVDT verileri karşılaştırmanın sağlıklı kılınması amacıyla 20 Hz'e ölçeklenmiştir. Şekil 7.21, durum 4 için epoklar arası deplasman zaman serisini ve bu serinin FFT spekturumunu göstermektedir.

SF-VA yaklaşımının harmonik salınımları elde etme performansını daha da derinlemesine incelemek amnacıyla Tablo 7.7'de listelenen her durum için üç farklı sensörün epoklar arası deplasman zaman serilerinin FFT spektrumu sonuçları elde edilmiştir. Tablo 7.8, her bir durumun tepe frekansını ve bu frekansa karşılık gelen

genlik bilgilerini özetlemektedir. Tablodan görüldüğü gibi, üç yöntemden elde edilen tepe frekansı ve genlik değerleri iyi bir uyum içindedir.



Şekil 7.20: RP ve VA teknikleri arasındaki farkların histogramı.



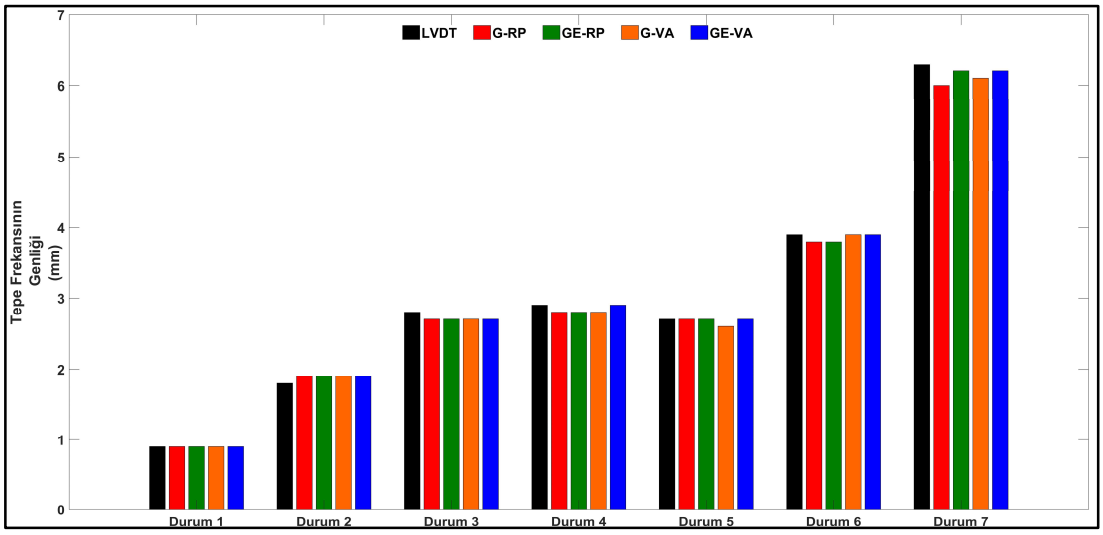
Şekil 7.21: Durum 4 için LVDT, RP ve VA çözümlerinin epoklar arası deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ).

Tablo 7.8'de ifade edilen genlik değerlerinin görselleştirilmiş hali şekil 7.22'de ifade edilmiştir. RP, VA ve LVDT arasındaki salınım frekansının genliğindeki farklılıklar oldukça küçüktür. Tablo 7.8'de de belirtildiği gibi, LVDT ve RP

arasındaki tepe frekansına karşılık gelen genlik değerindeki farklılıklar 0.0 mm ile 0.3 mm arasındayken, LVDT ve VA için bu farklar 0.0 mm ile 0.2 mm arasındadır.

Tablo 7.8: Tüm durumlar için tepe frekansı ve genlik değerleri.

	LVDT		G-RP		GE-RP		G-VA		GE-VA	
	Frek. (Hz)	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**
Durum 1	0.3	0.9	0.3	0.9	0.3	0.9	0.3	0.9	0.3	0.9
Durum 2	0.6	1.8	0.6	1.9	0.6	1.9	0.6	1.9	0.6	1.9
Durum 3	0.9	2.8	0.9	2.7	0.9	2.7	0.9	2.7	0.9	2.7
Durum 4	1.0	2.9	1.0	2.8	1.0	2.8	1.0	2.8	1.0	2.9
Durum 5	1.5	2.7	1.5	2.7	1.5	2.7	1.5	2.6	1.5	2.7
Durum 6	2.0	3.9	2.0	3.8	2.0	3.8	2.0	3.9	2.0	3.9
Durum 7	3.0	6.3	3.0	6.0	3.0	6.2	3.0	6.1	3.0	6.2



Şekil 7.22: Tüm durumlar için tepe frekansına karşılık gelen genlik değerleri.

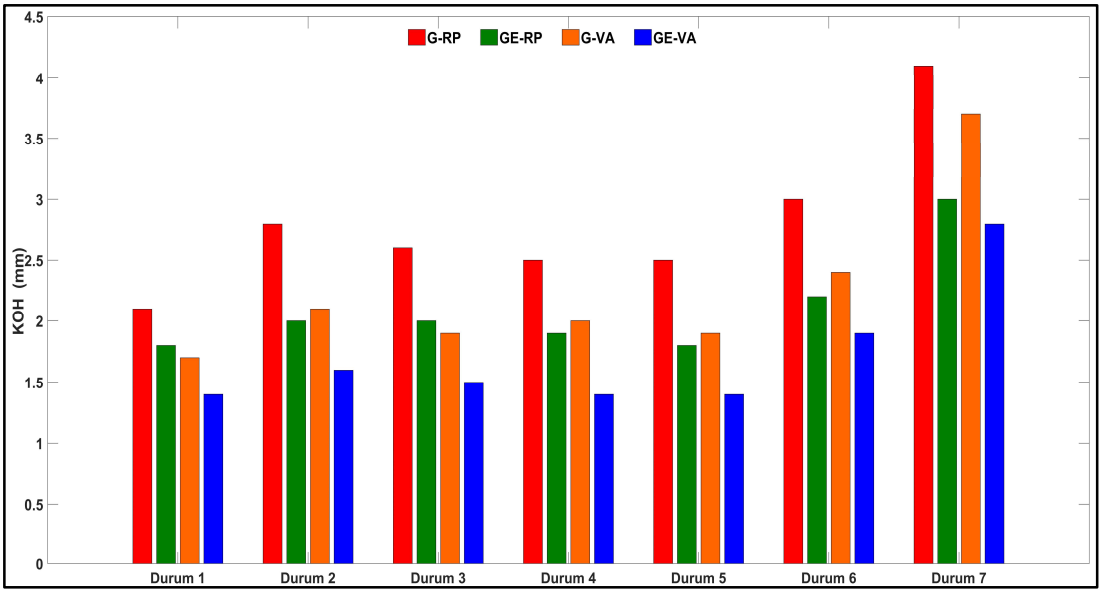
VA tekniğinin performansını daha detaylı incelemek ve ilgili sensörler ile karşılaştırmak amacıyla VA ve RP yöntemleri için LVDT sensörü ile olan farklar hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 7.9'da verilmiştir. Maksimum ve KOH değerleri, G ve GE uydu kombinasyonları için VA tekniğinin RP yönteminden daha iyi sonuç verdiğini ve LVDT verileriyle daha tutarlı olduğunu ifade etmektedir. Hem VA hem de RP için, GE çözümlerinin sonuçları %14 ile %30 arasında iyileştirdiği açıkça görülmektedir.

Tablo 7.9'daki KOH değerlerinin grafik gösterimi ise Şekil 7.23'te ifade edilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, GE uydu kombinasyonları için VA, 1.4

mm ile 2.8 mm arasında değişen ve tüm durumlar için en küçük KOH değerlerine sahipken, RP tekniğinden elde edilen KOH değerleri 1.8 mm ila 3.0 mm aralığındadır. Bu sonuçlar, epoklar arası dinamik hareketi yakalama konusunda GE-VA yönteminin RP'ye olan üstünlüğüne işaret etmektedir.

Tablo 7.9: Tüm durumlar için LVDT ile RP ve VA teknikleri arasındaki farkların maksimum ve KOH değerleri.

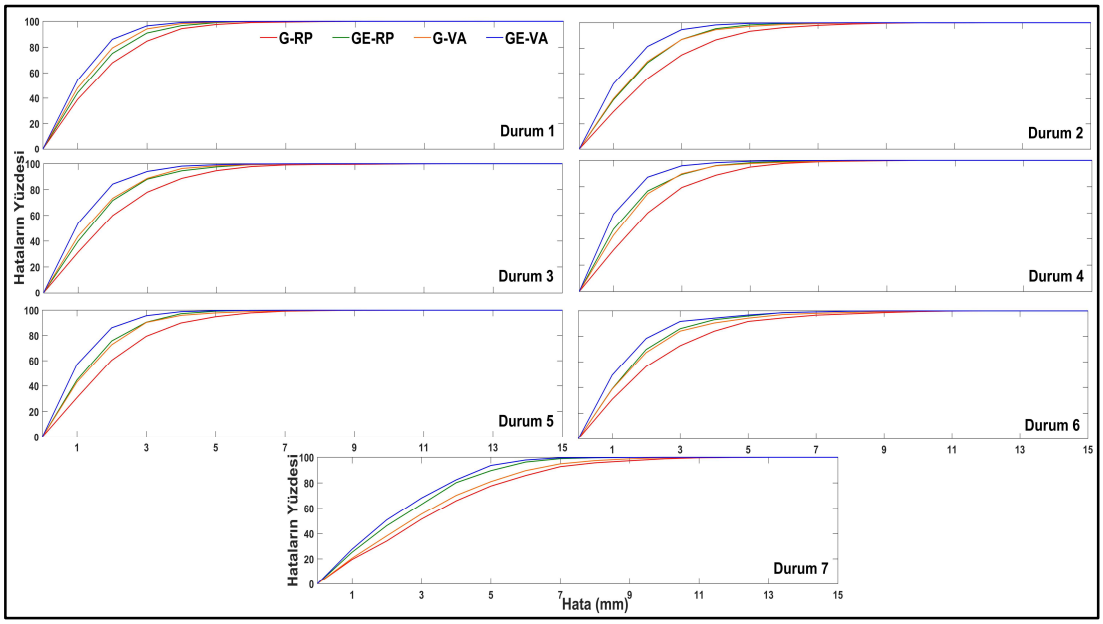
	G-RP		GE-RP		G-VA		GE-VA	
	Maks. (mm)	**KOH (mm)**	**Maks. (mm)**	**KOH (mm)**	**Maks. (mm)**	**KOH (mm)**	**Maks. (mm)**	**KOH (mm)**
Durum 1	12.1	2.1	8.9	1.8	12.6	1.7	7.8	1.4
Durum 2	11.3	2.8	9.3	2.0	10.5	2.1	7.7	1.6
Durum 3	11.2	2.6	8.9	2.0	10.7	1.9	7.3	1.5
Durum 4	10.0	2.5	7.4	1.9	9.5	2.0	7.7	1.4
Durum 5	9.0	2.5	6.2	1.8	10.9	1.9	7.0	1.4
Durum 6	11.6	3.0	8.7	2.2	10.6	2.4	8.8	1.9
Durum 7	12.1	4.1	9.9	3.0	10.6	3.7	9.6	2.8



Şekil 7.23: Tüm durumlar için KOH değerleri.

VA yaklaşımının daha detaylı analizi için Şekil 7.24, G ve GE uydu kombinasyonları için tüm durumların hata yüzdesini temsil etmektedir. Tüm durumlarda VA sonuçları RP sonuçlarından biraz daha iyidir ve bu durum VA yaklaşımının dinamik epoklar arası deplasman hareketlerini yakalama konusundaki etkinliğini göstermektedir. Ayrıca yedinci durumda G-RP için hataların %66'sı 4

mm'nin altındayken bu oran G-VA için %70.3'tür. G ve E uydu sistemleri ile gerçekleştirilen çözümlerde GE kombinasyonlarının çözümleri iyileştirdiği oldukça açıktır. Bu sonuçlar, dinamik hareketleri yakalamada çoklu-GNSS VA'nın etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 7.24: Tüm durumlar için KOH değerleri.

7.3.2. Hızlı Risk Değerlendirmesi için Deplasman Alanı Sonuçları

RT-PPP tekniğinin bağımsız tek bir GNSS alıcısı kullanarak gerçek-zamanlı deplasman bilgisi elde etmek için başka bir seçenek olduğunu vurgulamak gereklidir. Ancak, RT-PPP yöntemi IGS-RTS (Real-Time Services) veya diğer benzer hizmetler tarafından sağlanan gerçek-zamanlı yörünge ve saat ürünlerini gerektirmektedir. Buna ek olarak RT-PPP tekniği konum bilgisi çözümlerini gerçekleştirmek için gerçek-zamanlı ürünlere ve dolayısıyla, internet gibi altyapılara ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle VA yaklaşımı, GNSS alıcısı tarafından toplanan yayın yörünge ve saat bilgilerine dayandığı için RT-PPP tekniğine oldukça güçlü bir alternatiftir. Başka bir ifade ile, VA tekniği gerçek-zamanlı deplasman tahmini yapmak için herhangi bir harici üründen veya internetten bağımsızdır.

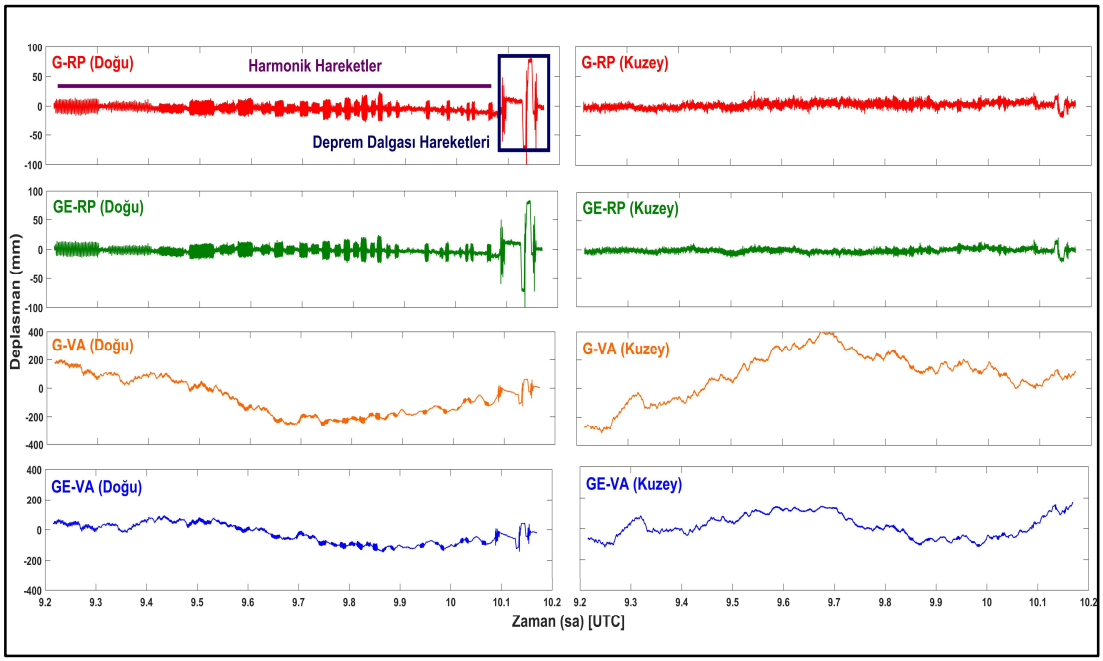
VA yönteminin epoklar arası deplasman alanındaki gerçek-zamanlı performansına ek olarak, yapı sağlığı izleme çalışmaları için gerekli olan deplasman alanındaki performansının da araştırılması gerekmektedir. Bu nedenle tez

çalışmasının bu bölümü, epoklar arası deplasman değerlerinin entegrasyonu yoluyla elde edilen ve VA yaklaşımından türetilen deplasman tahminlerinin kullanılabilirliğini ve etkinliğini değerlendirmeye ayrılmıştır.

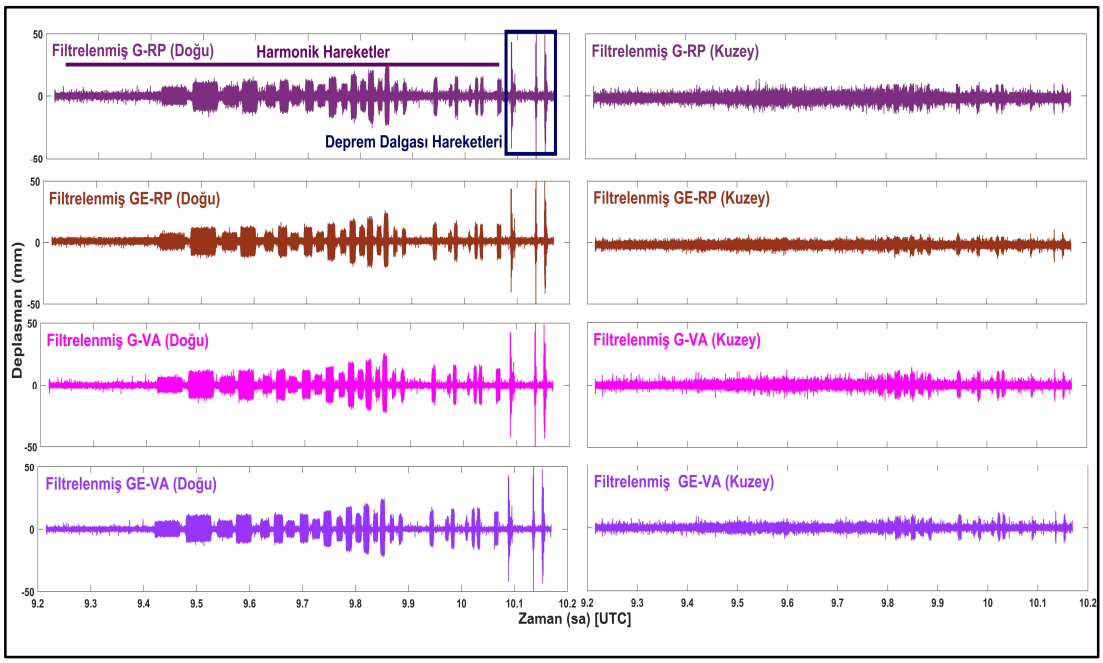
Tez çalışmasının bu bölümünde incelenecek olan VA tabanlı deplasman bilgileri, epoklar arası deplasman bilgilerinin entegrasyonu ile elde edilmiştir. Şekil 7.25, deprem ve tüm harmonik salınım durumları dahil olmak üzere RP ve VA çözümlerinden elde edilen deplasman zaman serilerini göstermektedir. VA yaklaşımından türetilen zaman serisi, bazı düşük frekanslı dalgalanmalara ve eğilimlere sahipken, RP tekniğinden türetilen yer değiştirmeler oldukça tutarlıdır. VA yönteminden türetilen deplasman zaman serilerindeki uzun ve kısa dönemli bu düşük frekanslı dalgalanmalar, yayın yörüngesi ve saat hatalarından kaynaklanmaktadır [Fratarcangeli et al., 2018]. Bu çalışmanın kısa vadeli (1 dakika civarında ve daha az) dinamik hareketlere odaklanmaktadır ve bu nedenle uzun veya kısa vadeli düşük frekanslı dalgalanmalar, dinamik deplasman izleme çalışmaları için bir sorun değildir. Söz konusu bu hareketler, doğru dinamik deplasman bilgisini elde etmek için yüksek geçirgenli filtreleme yöntemleriyle başarıyla elemine edilebilir.

Filtreleme tekniği, ilgilenilen frekans ile ortadan kaldırılmak istenen dalgalanmaların frekansı çakışmadıkça dinamik hareketi ortaya çıkarmak için oldukça uygun bir tekniktir. Butterworth, Chebyshev gibi filtreleme tekniklerinden herhangi biri Geng et al., Shu et al., ve Fratarcangeli et al. tarafından önerildiği gibi, VA'dan türetilen deplasman zaman serilerindeki kısa ve uzun vadeli dalgalanmaları kaldırmak için kullanılabilir [Geng et al., 2016, Shu et al., 2018a, Fratarcangeli et al. 2018].

Bu çalışmada, VA tekniğinden türetilen deplasman değerlerindeki düşük frekanslı bileşenler, kesme frekansı 0.20 Hz olan beşinci dereceden bir Butterworth yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elemine edilmiştir. RP için söz konusu bu filtreleme işlemş gereksiz olsa da karşılaştırmayı uyumlu ve daha adil bir hale getirmek için aynı filtreleme işlemi RP tekniğinden elde edilen deplasman değerlerini de uygulanmıştır. Filtrelenmiş RP ve VA yöntemlerinden elde edilen zaman serileri Şekil 7.26'da ifade edilmiştir. Şekil, yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra VA tekniğinden elde edilen deplasman zaman serilerindeki düşük frekanslı dalgalanmalarının ortadan kalktığını açık bir şekilde göstermekte ve VA tabanlı filtrelenmiş deplasman zaman serilerinin RP tekniğinden elde edilen sonuçlarla güçlü bir şekilde tutarlı olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 7.25: VA ve RP'den türetilmiş deplasmanlar.



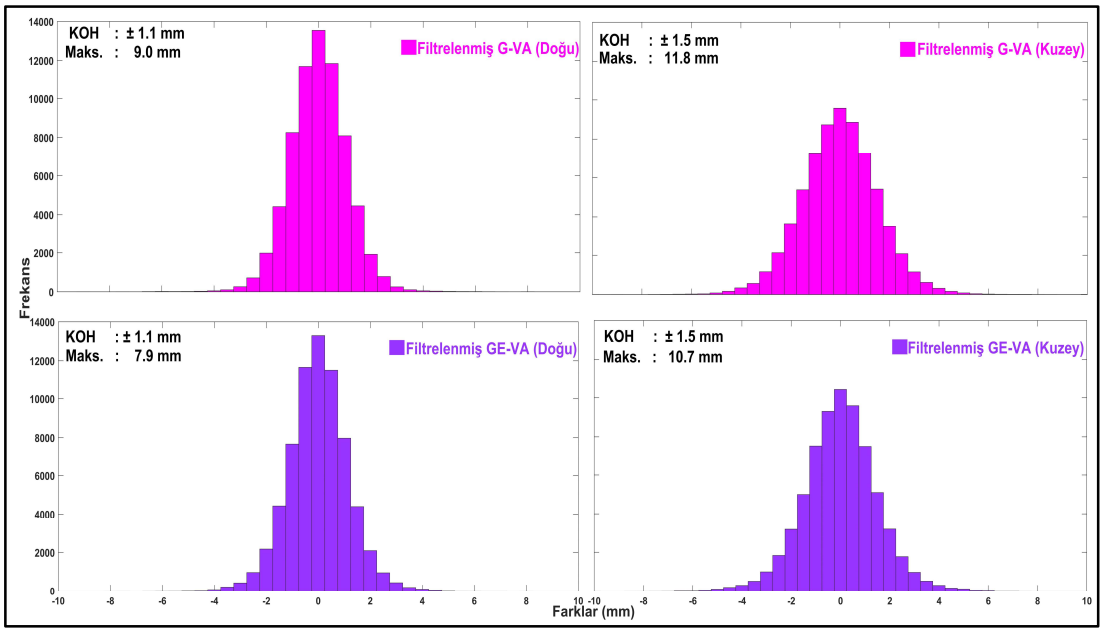
Şekil 7.26: VA ve RP'den türetilmiş ve filtrelenmiş deplasmanlar.

RP ve VA yöntemlerinden elde edilen deplasman değerlerinin farkları hesaplanmış ve histogramları Şekil 7.27'de ifade edilmiştir. Hem G hem de GE uydu kombinasyonları için filtrelenmiş RP ve VA arasındaki deplasman farklarının KOH değeri Doğu ve Kuzey bileşeni için sırasıyla 1.1 mm ve 1.5 mm'dir. Şekilden de görüldüğü gibi, epoklar arası deplasman sonuçlarına benzer şekilde, Doğu

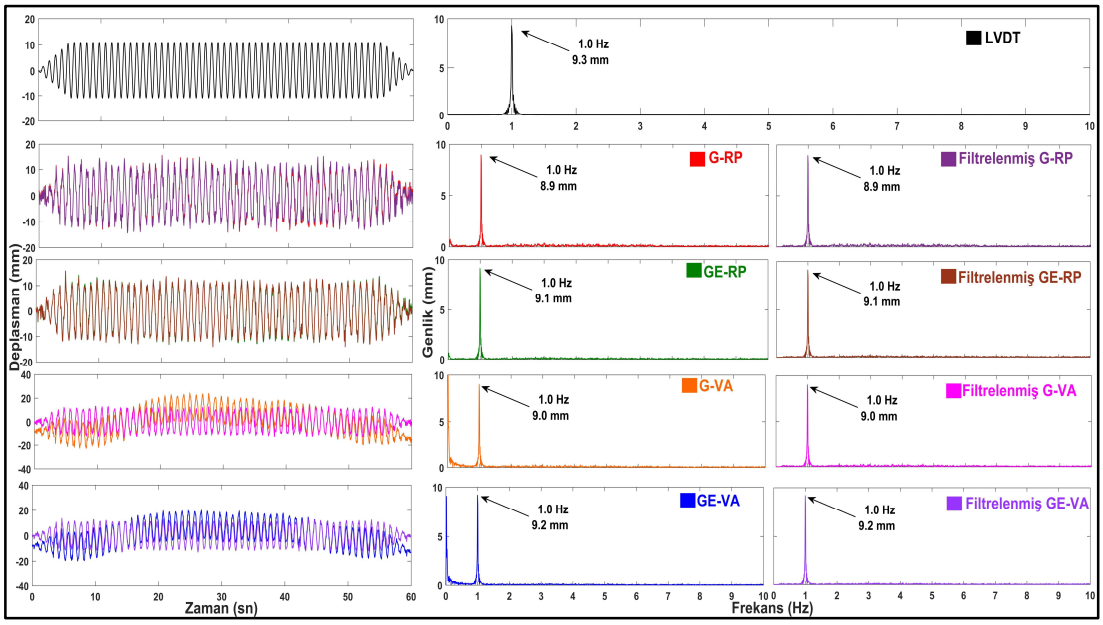
bileşenindeki deplasman farkları Kuzey bileşeninden biraz daha küçüktür. Bu durum büyük olasılıkla Doğu ve Kuzey bileşenlerinin sahip olduğu farklı gürültü seviyeleriyle ilgilidir. Bu sonuçlar, iki farklı algoritma sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğunu ortaya koymaktadır.

VA yaklaşımının harmonik salınımları yakalama alanındaki performansını göstermek ve etkinliğini test etmek için temsili bir örnek olarak durum 4 seçilmiş, zaman serileri ve FFT spektrumları ise Şekil 7.28'de çizilmiştir. İlgili şekil, LVDT, filtrelenmiş/filtrelenmemiş RP ve VA tekniklerinden türetilen deplasman ve bu deplasmanlara ait FFT spektrumlarını içermektedir. Filtre uygulandıktan sonra VA zaman serisinin düşük frekanslı dalgalanmalarının ortadan kalktığı açıkça görülmektedir. RP ve VA yöntemleri için tepe frekansına karşılık gelen genlik değerinin yüksek geçirgenli filtre uygulamadan önce ve sonra aynı kaldığını vurgulamak önemlidir. Bunula birlikte tam da istenildiği gibi VA yaklaşımı için FFT spektrumundaki düşük frekanslı bileşenler elemine edilmiştir.

Tablo 7.10, deplasman alanındaki her bir durum için tepe frekansını ve buna karşılık gelen genlik değerlerini özetlemektedir. Köşeli parantez ([]) içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları tanımlarken, diğer değerler filtrelenmemiş sonuçları temsil etmektedir. Tablodan görülebileceği gibi, tüm durumlar için LVDT, RP ve VA sensörlerinden elde edilen salınım frekansları iyi bir uyum içindedir, ancak buna karşılık gelen genlik değerlerinde küçük farklılıklar mevcuttur.



Şekil 7.27: Filtrelenmiş RP ve VA arasındaki deplasman farklarının histogramları.



Şekil 7.28: Durum 4 için deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ).

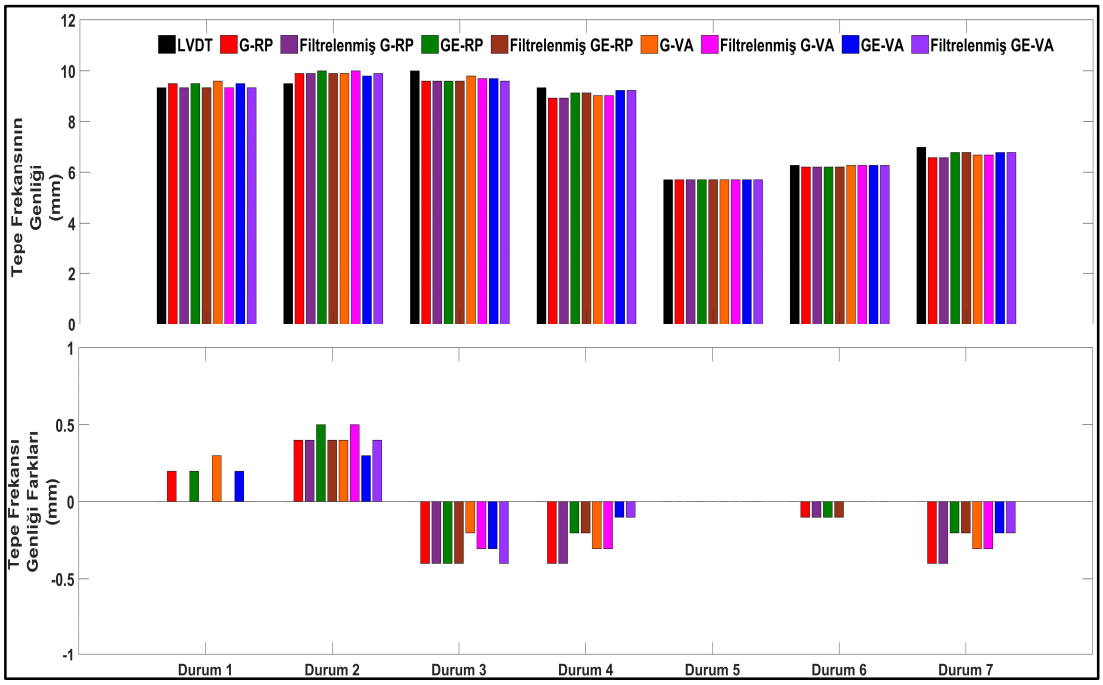
Şekil 7.29, deplasman zaman serilerine ait tepe frekansının genliği ve LVDT ile filtrelenmiş/filtrelenmemiş RP ve SF-VA yöntemleri arasındaki farkları sırasıyla açıklamaktadır. LVDT ve filtrelenmemiş VA arasındaki salınım frekansının genliğindeki farklar 0.0 mm ile 0.4 mm arasında iken, filtrelenmiş sonuçlar için 0.0 mm ile 0.5 mm arasında değişmektedir. Bu sonuç, bir mühendislik yapısının doğal frekansı ve genliğinin yüksek geçirgenli bir filtre uygulanmadan yakalanabileceğini ifade etmektedir. Ayrıca G ve GE uydu kombinasyonları göz özününe alındığında, RP ve VA tekniklerinden elde edilen frekans ve genlik değerleri arasında önemli bir fark yoktur.

Tablo 7.10: Tüm durumlar için deplasman değerlerinin tepe frekansı ve genliği

	LVDT		**G-RP**		**GE-RP**		**G-VA**		**GE-VA**	
	Frek. (Hz)	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**
Durum 1	0.3	9.3	0.3	9.5 [9.3]	0.3	9.5 [9.3]	0.3	9.6 [9.3]	0.3	9.5 [9.3]
Durum 2	0.6	9.5	0.6	9.9 [9.9]	0.6	10.0 [9.9]	0.6	9.9 [10.0]	0.6	9.8 [9.9]
Durum 3	0.9	10.0	0.9	9.6 [9.6]	0.9	9.6 [9.6]	0.9	9.8 [9.7]	0.9	9.7 [9.6]
Durum 4	1.0	9.3	1.0	8.9 [8.9]	1.0	9.1 [9.1]	1.0	9.0 [9.0]	1.0	9.2 [9.2]
Durum 5	1.5	5.7	1.5	5.7 [5.7]	1.5	5.7 [5.7]	1.5	5.7 [5.7]	1.5	5.7 [5.7]
Durum 6	2.0	6.3	2.0	6.2 [6.2]	2.0	6.2 [6.2]	2.0	6.3 [6.3]	2.0	6.3 [6.3]
Durum 7	3.0	7.0	3.0	6.6 [6.6]	3.0	6.8 [6.8]	3.0	6.7 [6.7]	3.0	6.8 [6.8]

VA, RP ve LVDT sensörlerinden elde edilen deplasman değerleri arasındaki farklar her bir durum için hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 7.11'de verilmiştir. Köşeli parantez içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları temsil ederken, diğer değerler filtrelenmemiş sonuçları göstermektedir. Tabloda gösterildiği gibi, özellikle VA yaklaşımı için filtreleme işleminden sonra maksimum ve KOH değerleri önemli ölçüde azalmıştır. Filtreleme sonrası KOH değerlerinde %6 ile %88 arasında bir iyileşme gözlenmiştir.

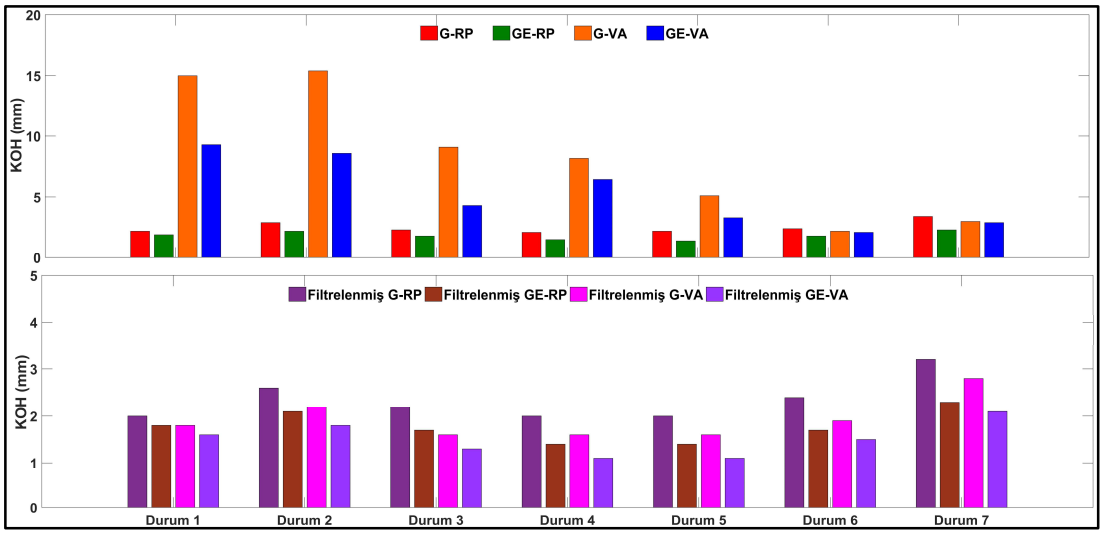
Tablo 7.11'de ifade edilen filtrelenmiş ve filtrelenmemiş sonuçların KOH değerlerinin grafik gösterimi ise Şekil 7.30'da sunulmuştur. Şekilde gösterildiği gibi, filtrelenmiş GE-VA sonuçları, tüm durumlar için 1.1 mm ile 2.1 mm arasında değişen en küçük KOH değerlerine sahipken, GE-RP'nin KOH değeri 1.4 mm ila 2.3 mm aralığında değişmektedir. G-RP ile karşılaştırıldığında, filtrelenmiş G-VA'nın KOH değerleri tüm durumlar için daha küçüktür. Bu durum G-VA ve GE-VA çözümlerinin yüksek geçirgenli bir filtre uygulandıktan sonra benzer olduğunu ve kısa vadeli dinamik yer değiştirmeleri yakalamak için RP tekniğine kıyasla daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar ayrıca Galileo uydularının dahil edilmesinin RP ve VA yöntemlerinden elde edilen deplasman doğruluğunu geliştirdiğini ifade etmektedir.



Şekil 7.29: Tepe frekansına deplasman genliği ve LVDT ile filtrelenmemiş/filtrelenmemiş sonuçlar arasındaki farklar.

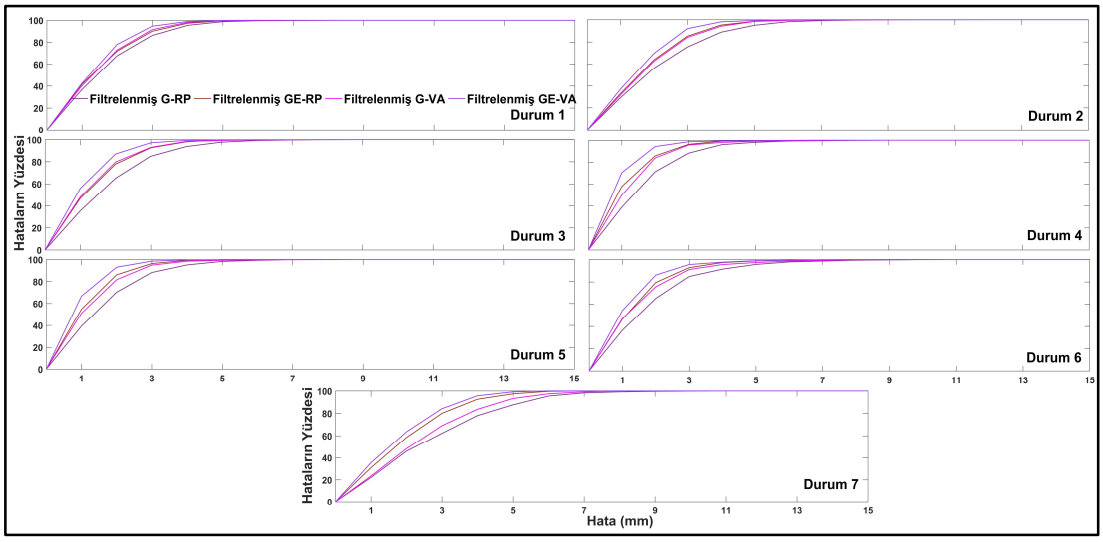
Tablo 7.11: Tüm durumlar için maksimum ve KOH değerleri.

	G-RP		GE-RP		G-VA		GE-VA	
	Maks. (mm)	**KOH (mm)**	**Maks. (mm)**	**KOH (mm)**	**Maks. (mm)**	**KOH (mm)**	**Maks. (mm)**	**KOH (mm)**
Durum 1	9.2 [8.5]	2.2 [2.0]	8.0 [7.6]	1.9 [1.8]	38.6 [8.6]	15.0 [1.8]	23.1 [5.5]	9.3 [1.6]
Durum 2	13.3 [11.0]	2.9 [2.6]	8.4 [7.7]	2.2 [2.1]	37.9 [9.4]	15.4 [2.2]	22.0 [6.2]	8.6 [1.8]
Durum 3	7.6 [8.3]	2.3 [2.2]	7.0 [7.1]	1.8 [1.7]	25.4 [7.3]	9.1 [1.6]	12.4 [7.2]	4.3 [1.3]
Durum 4	8.3 [8.6]	2.1 [2.0]	6.5 [7.2]	1.5 [1.4]	18.5 [7.7]	8.2 [1.6]	14.7 [6.1]	6.5 [1.1]
Durum 5	7.7 [7.7]	2.2 [2.0]	5.2 [4.9]	1.4 [1.4]	13.9 [8.3]	5.1 [1.6]	7.9 [5.1]	3.3 [1.1]
Durum 6	10.2 [10.1]	2.4 [2.4]	7.8 [8.2]	1.8 [1.7]	9.3 [8.1]	2.2 [1.9]	7.3 [7.2]	2.1 [1.5]
Durum 7	10.9 [10.2]	3.4 [3.2]	6.8 [6.6]	2.3 [2.3]	8.9 [7.9]	3.0 [2.8]	8.2 [5.8]	2.9 [2.1]



Şekil 7.30: Tüm durumlar için RP, VA ve LVDT arasındaki deplasman farklarının KOH değerleri.

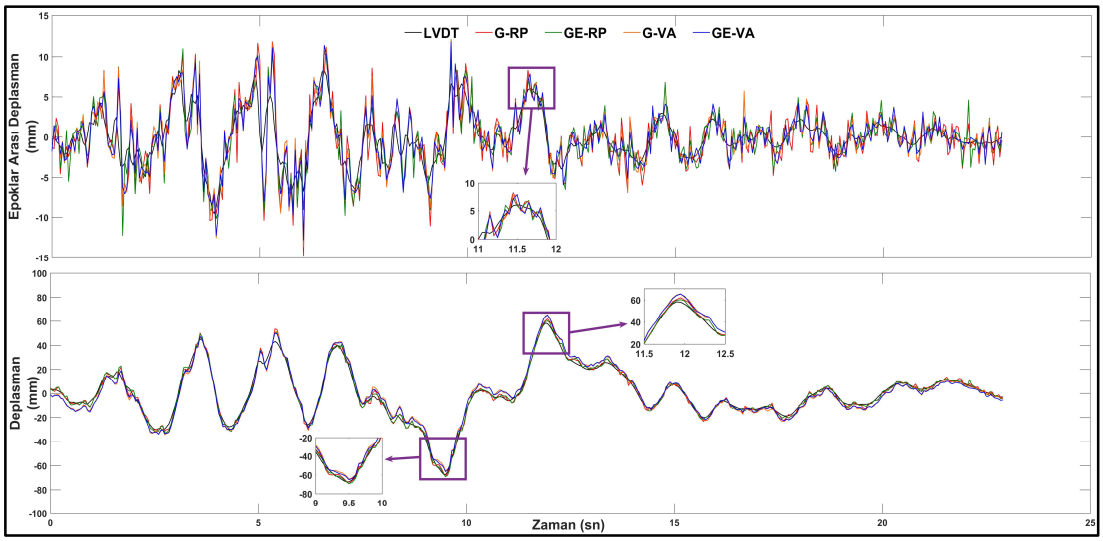
Tüm durumlar için filtrelenmiş deplasman hatalarının yüzde dağılımı Şekil 7.31'de gösterilmektedir. Epoklar arası deplasman sonuçlarına benzer şekilde, G-VA ve GE-VA çözümlerinin performansı, tüm durumlar için G-RP ve GE-RP'den biraz daha iyidir. Özellikle GE-VA için LVDT'den olan farkların neredeyse hepsi 5 mm'nin altındadır. G-VA çözümleri için, durum 1'den durum 6'ya kadar olan hataların yaklaşık olarak %95'i 5 mm'nin altındayken, durum 7 için hataların %80'i 5 mm'nin altındadır. Filtrelenen sonuçlar, dinamik deplasmanları yakalamada SF-VA tekniğinin verimliliğini açıkça ifade etmektedir. Deplasman alanı sonuçları, VA yaklaşımının yalnızca gerçek-zamanlı izleme tekniği için değil, aynı zamanda da bir doğal afet sonrası bir yapının durumu ve koşullarını değerlendirmek için gerekli olan hızlı risk değerlendirmesi için de yararlı ve güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7.31: Tüm durumlar için RP, VA ve LVDT arasındaki deplasman farkı hatalarının yüzde dağılımı.

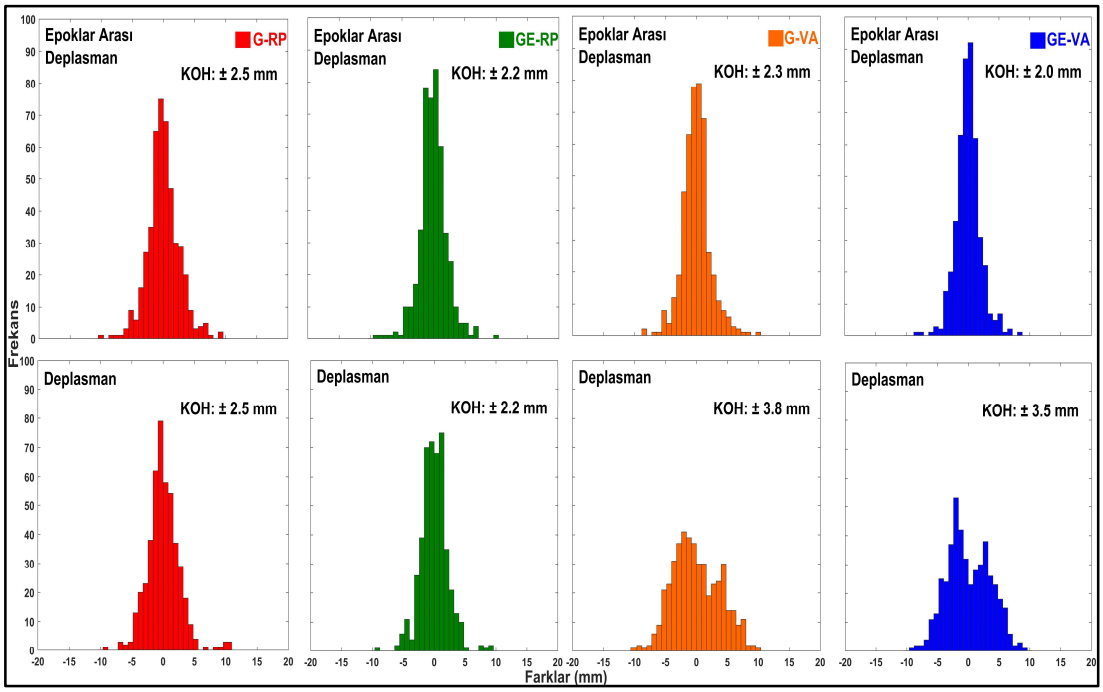
7.3.3. Deprem Simülasyon Testi

VA yaklaşımının sismik dalga formlarını algılayabilme performansı tez çalışmasının bu kapsamında değerlendirilecektir. Kobe depreminin simüle edilmesinin neden olduğu epoklar arası deplasman (üst) ve deplasman (alt) zaman serileri, tartışılan üç yöntem arasındaki karşılaştırmaları temsil eden Şekil 7.32'de ifade edilmektedir. VA, RP ve LVDT sensörlerinden türetilen deplasman ve epoklar arası deplasman zaman serilerinin iyi bir uyum içinde olduğu açıkça belirlidir.



Şekil 7.32: Kobe depremi simülasyonundan elde edilen RP, VA ve LVDT sensörlerine ait epoklar arası deplasman ve deplasman zaman serilerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.33, LVDT, VA ve RP sensörlerinden elde edilen epoklar arası deplasman ve deplasman farklarının histogramını göstermektedir. GNSS tabanlı çözümlerin LVDT sensöründen olan farklarının ± 10 mm aralığında olduğu görülmektedir. Epoklar arası deplasman farkları için G-VA ve GE-VA çözümlerinin KOH değeri sırasıyla 2.3 mm ve 2.0 mm iken, G-RP ve GE-RP'nin KOH değerleri sırasıyla 2.5 mm ve 2.2 mm'dir. Epoklar arası deplasman sonuçları, G ve GE-VA tekniklerinin kısa vadeli dinamik deplasmanları G- ve GE-RP yöntemlerinden biraz daha doğru bir şekilde yakaladığını göstermektedir. Deplasman için G-VA ve GE-VA yöntemlerinin sahip olduğu KOH değeri sırasıyla 3.8 mm ve 3.5 mm iken, G-RP ve GE-RP'nin KOH değeri sırasıyla 2.5 mm ve 2.2 mm'dir. Deplasman alanı sonuçları, G-RP ve GE-RP'nin, karşılık gelen G-VA ve GE-VA yöntemlerinden daha doğru bir şekilde deplasman bilgilerini tespit etme yeteneğine sahip olduğunu ifade etmektedir. Bunun nedeni, deplasman alanında VA yönteminin sahip olduğu kaçınılmaz trend ve düşük frekanslardaki dalgalanmalardır. Bununla birlikte, RP tekniğinin mega depremler sırasında sabit nokta gereksinimini karşılamadığı göz önüne alındığında, yayın efemerisine ve bağımsız bir GNSS alıcısına dayanan SF-VA yönteminden türetilmiş deplasman bilgilerinin, sismik dalga formunun hızlı tahmini için anlık, faydalı ve doğru bilgiler sağladığı açıktır.



Şekil 7.33: Kobe deprem simülasyonu için LVDT ile RP ve VA sensörleri arasındaki epoklar arası deplasman ve deplasman farklarının histogramları.

7.4. Yüksek Zamansal Çözünürlüklü (20 Hz) GPS Gözlemlerine Dayalı Dinamik Deplasmanların İzlenmesinde Gerçek-Zamanlı Varyometrik Yaklaşım ve Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin Değerlendirilmesi

Tez çalışmasının bu bölümü, sarsma tablası ile üretilen harmonik salınım, deprem simülasyonları ve adım fonksiyonu verilerinin GPS uydu kombinasyonuna bağlı olarak gerçek-zamanlı olarak elde edilen VADASE ve RT-PPP yaklaşımları ile değerlendirilmesi ve ilgili yöntemlerin LVDT ve Rölatif konum belirleme verileri ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını içermektedir. 20 Hz örneklem aralığına sahip gerçek-zamanlı VADASE ve RT-PPP tekniklerinin yapı sağlığı izlemeleri ve GPS-sismolojisi uygulamalarındaki performansını incelemek amacıyla Bölüm 6.1.2'de detaylarıyla açıklanan deneyler gerçekleştirilmiş, harmonik salınım testlerinde tasarlanan durumlardan on beş tanesi incelenmek amacıyla seçilmiştir. Bölüm 6.2'de açıklanan deprem simülasyonları ise, ilgili yöntemlerin güçlü yer sarsıntılarının neden olduğu dalga hareketlerini tespit etmedeki performansının test edilmesi amacıyla incelenmiştir. VADASE ve RT-PPP tekniklerinin elde edilme şekli Bölüm 6.3'te açıklanırken, RP çözümlerinin nasıl elde edildiği ise yine aynı bölümde açıklanmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde incelenen harmonik salınım hareketlerinin sahip olduğu genlik ve frekans değerleri tablo 7.12'de ifade edilmiştir.

Tablo 7.12: Harmonik salınım deneylerinde üretilen frekanslar ve genlikler.

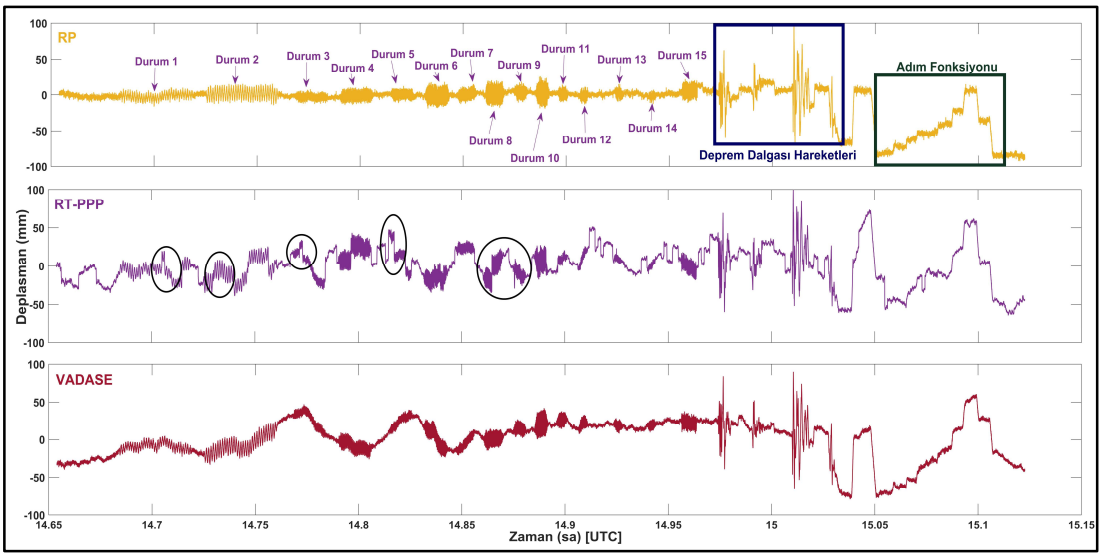
	Salınım Frekansı	**Salınım Genliği**
Durum 1	0.25 Hz	5 mm
Durum 2	0.25 Hz	10 mm
Durum 3	0.60 Hz	5 mm
Durum 4	0.60 Hz	10 mm
Durum 5	1.50 Hz	5 mm
Durum 6	1.50 Hz	10 mm
Durum 7	2.00 Hz	5 mm
Durum 8	2.00 Hz	10 mm
Durum 9	3.50 Hz	5 mm
Durum 10	3.50 Hz	10 mm
Durum 11	5.00 Hz	5 mm
Durum 12	6.00 Hz	5 mm
Durum 13	7.00 Hz	5 mm
Durum 14	8.00 Hz	5 mm
Durum 15	0.80 Hz	10 mm
	3.40 Hz	5 mm
	7.60 Hz	1 mm

Şekil 7.34, sarsma tablası kullanılarak oluşturulan tüm dinamik hareketleri içeren ve tez çalışmasının bu uygulamasında tartışılacak olan üç yaklaşımdan elde edilen deplasman zaman serilerini göstermektedir. Yukarıdan aşağıya zaman serileri RP, RT-PPP ve VADASE'yi ifade etmektedir. RP'den türetilen deplasmanların çok tutarlı olduğu, bununla birlikte RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların uzun vadeli dalgalanmalar gösterdiği açıkça görülmektedir. Buna ek olarak, RT-PPP'den türetilen deplasmanlar VADASE'den türetilenlere göre daha fazla dalgalanmaya sahiptir. Bu tür dalgalanmalar, dalgalanma frekansları tespit edilmek istenen ilgili sinyal frekansları ile örtüşmediği sürece kısa vadeli dinamik deplasmanların tespit edilmesi çalışmalarında önemli değildir. Bunlar yüksek geçirgenli bir filtre uygulanarak kolayca filtrelenebilir. Dalgalanmalara ek olarak, RT-PPP'den türetilen zaman serileri Şekil 7.34'te siyah renkli elipslerle belirtilen bazı ani sıçramalar içermektedir. Bu tür ani sıçramalar, uygun bir algoritma ile tespit edilebilir ve ortadan kaldırılabilir. Ancak bu çalışmada varlıklarını göstermek için zaman serilerinde olduğu gibi bırakılmıştır.

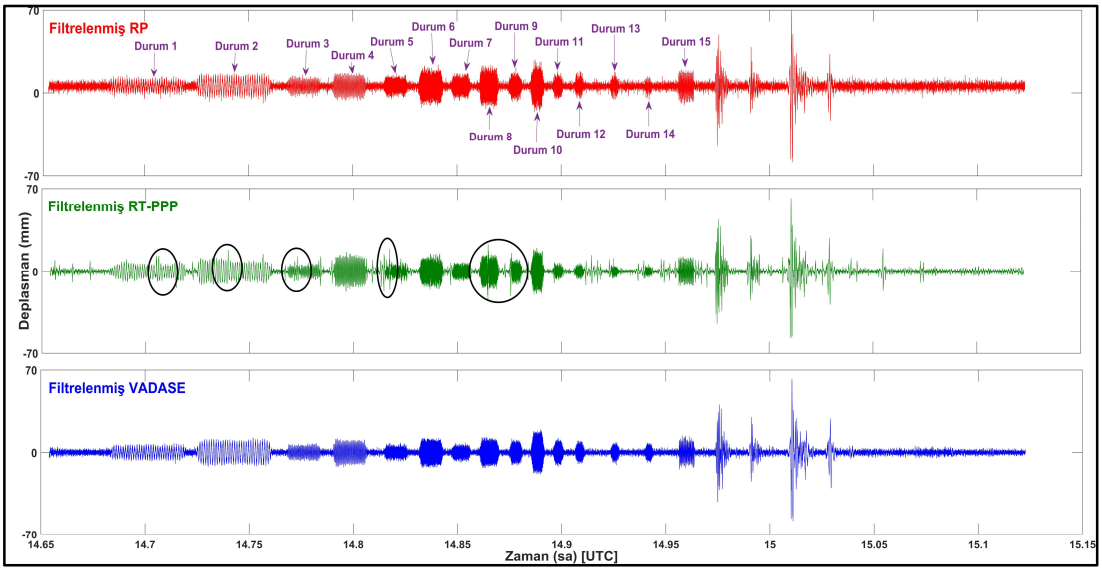
Daha önce de bahsedildiği gibi RT-PPP ve VADASE'den türetilen zaman serileri ilgilenilen bir sinyal olmayan düşük frekanslı bileşenler içermektedir. Yapı sağlığı izlemeleri çalışmalarında 20–250 sn. gibi kısa bir süreli yer değiştirmeler ile çalışılması durumunda uzun vadeli dalgalanma önemli değildir. Deplasman zaman serilerinde istenmeyen düşük frekanslı bileşenleri elemine etmek için yüksek geçirgenli bir filtre kullanılabilir [Yiğit, 2016]. Uzun süreli dalgalanmaları filtrelemek için bu çalışmada kesme frekansı 0.20 Hz olan 5. dereceden yüksek geçirgenli Butterworth filtresi kullanılmıştır. Karşılaştırmaların tutarlılığı için, RP tabanlı deplasman bileşenlerine de aynı filtre uygulanmıştır. Şekil 7.35, tüm yaklaşımların filtrelenmiş zaman serilerini göstermektedir. Şekil 7.35'ten RP ve VADASE'den türetilen deplasmanların çok tutarlı olduğu, oysa RT-PPP'den türetilen ham deplasmanların zaman serilerindeki ani sıçramalardan dolayı siyah elipslerle işaretlenmiş bazı ani sıçramalara sahip olduğu açıktır.

Çoklu frekans ve genlik değerlerini içeren ve üst üste bindirilmiş bir hareket olan Durum 15, harmonik salınımları yakalamada tüm GPS tabanlı yöntemlerin performansını göstermek ve karşılaştırmak için temsili bir örnek olarak seçilmiştir. Bu durumun sonuçları, LVDT-, RP-, RT-PPP- ve VADASE'den türetilen deplasman zaman serilerini ve bunların FFT spektrumlarını içeren şekil 7.36'da gösterilmektedir. Şekil hem filtrelenmemiş hem de filtrelenmiş zaman serileri için

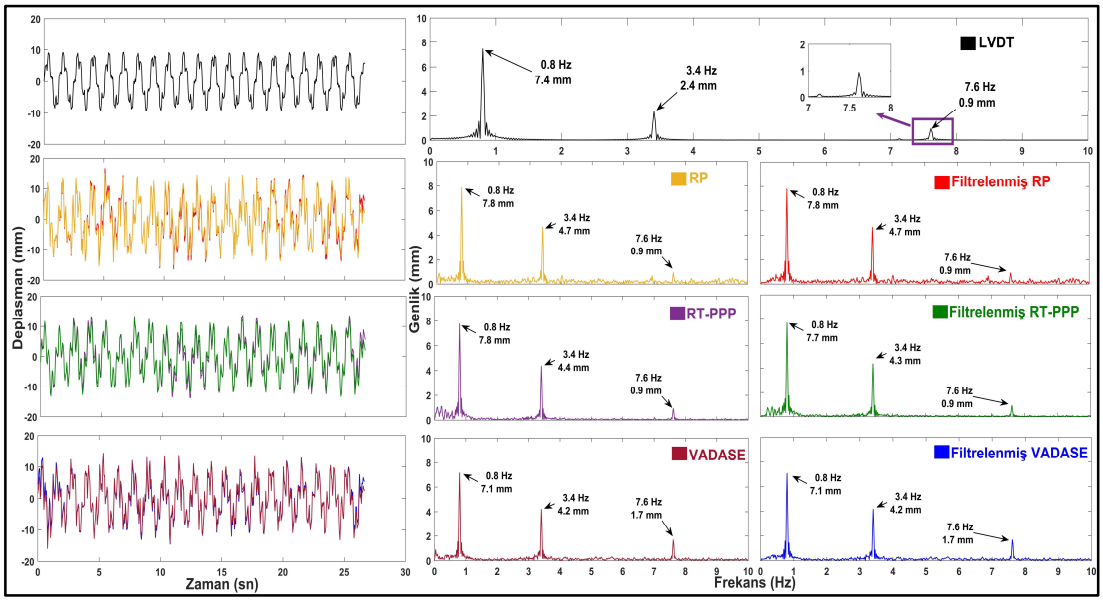
RT-PPP ve VADASE tarafından türetilen deplasmanların, LVDT ve RP tarafından türetilenlerle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, referans LVDT sensörünün ve filtrelenmemiş/filtrelenmiş GPS tabanlı zaman serilerinin FFT spektrumlarından tespit edilen tepe frekans değerlerinin aynı olduğu ve buna karşılık gelen genliklerde küçük farklılıklar olduğu açıkça ifade edilmektedir. Filtrelemeden sonra RP ve VADASE tekniklerinde üç baskın frekansın tümü için karşılık gelen genlik değerleri değişmezken, RT-PPP ile elde edilen ikinci baskın frekans için genlik yaklaşık olarak 0.1 mm değişmiştir.



Şekil 7.34: Çalışmada tasarlanan tüm deneyler için RP- (üst panel), RT-PPP- (üstten ikinci panel) ve VADASE- (üstten üçüncü panel) den elde edilen deplasmanlar.



Şekil 7.35: Tüm GPS tabanlı yaklaşımların filtrelenmiş deplasman zaman serileri.



Şekil 7.36: Durum 15 için deplasman zaman serisi (sol) ve FFT spektrumu (sağ).

Tablo 7.12'de belirtilen her durum için deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları RT-PPP ve VADASE yöntemlerinin performansını daha fazla araştırmak amacıyla değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 7.13'te sunulmuştur. Köşeli parantez içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları gösterirken, diğer değerler filtrelenmemiş sonuçları ifade etmektedir. Hem filtrelenmiş hem de filtrelenmemiş iki RT tabanlı çözüm kümesinden elde edilen salınım frekansları, tabloda gösterildiği gibi LVDT ve RP ile iyi bir uyum göstermektedir. Bununla birlikte, karşılık gelen genliklerde küçük farklılıklar vardır. LVDT ve RT-PPP çözümleri arasındaki salınım frekansı genliği farkları 0.0 mm ile 4.4 mm arasında değişirken, RP ile RT-PPP arasındaki salınım frekansı farkının genliği 0.0 mm ile 3.3 mm arasındadır. LVDT ile VADASE yönteminin farkları 0.1 mm ile 5.2 mm arasında, RP ile olan farkları ise 0.1 mm ile 2.5 mm arasında değişmektedir. Bu farklılığın ana nedeni, yöntemlerin sahip olduğu ölçü hatalarına ek olarak kullanılan farklı alıcı ve anten türleridir. Tablo 7.13'te VADASE'den elde edilen genlik değerlerinin, 0.25 Hz ile 2.0 Hz frekans arasındaki durumlar için RT-PPP ve RP yöntemlerine kıyasla LVDT değerlerine daha yakın olduğu görülmektedir. 3.5 Hz ve daha yüksek-frekansa sahip salınımlarda ise RT-PPP ve RP yöntemleri LVDT'ye daha yakın değerler vermiştir. Düşük frekans senaryolarında RT-PP ve VADASE için RT tabanlı çözümlerden elde edilen genlik değerlerinin filtrelendikten sonra 0.9 mm'ye kadar değiştiği, yüksek zamansal çözünürlüklü yaklaşımlardan elde edilen genlik değerlerinde ise filtreleme işlemi öncesi ve sonrası küçük farklılıklar olduğunu belirtmekte fayda vardır.

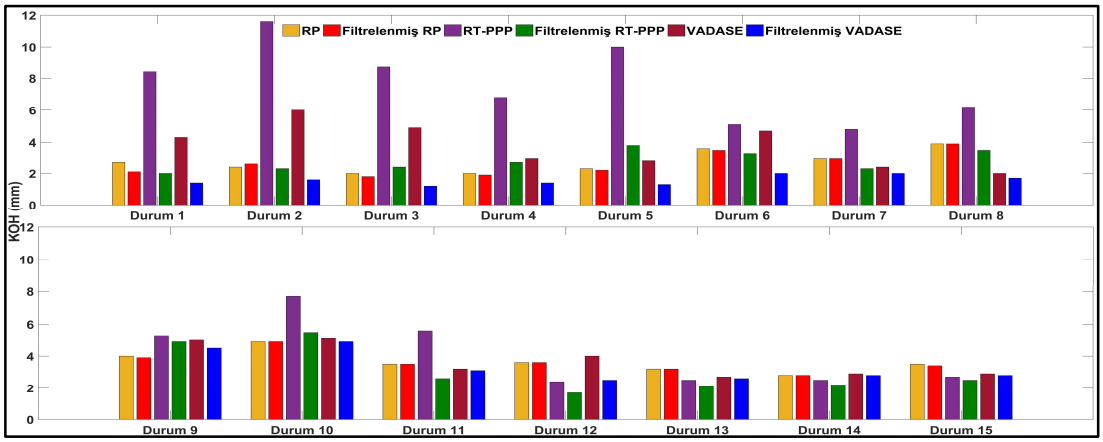
Frekans alanı karşılaştırmalarına ek olarak, söz konusu yöntemlerin performansını daha fazla araştırmak ve karşılaştırmak için GPS tabanlı yaklaşımlar ve referans LVDT sensörü arasındaki deplasman farklılıklarının KOH değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan KOH değerleri ise Şekil 7.37'de sunulmuştur. Filtrelenmiş ve filtrelenmemiş RP çözümleri arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Filtrelenmemiş RT-PPP çözümleri için düşük frekanslı durumlarda, özellikle 11.6 mm'ye kadar ulaşan durum 1'den durum 5'e kadar yüksek KOH değerleri göze çarpmaktadır. Ancak frekansın hareketleri arttıkça KOH değerleri azalmaktadır. Bu, düşük frekanslı durumların yüksek-frekanslı durumlara göre daha uzun zaman alması ve yüksek-dereceden iyonosfer, troposfer ve multipath gibi hata modelleme yeteneklerinin sınırlamaları nedeniyle artık hatalardan kaynaklanan uzun vadeli dalgalanmalardan daha fazla etkilenmesi ile açıklanabilir. Filtrelenmiş RT-PPP çözümlerinin KOH değerleri LVDT ile iyi bir uyum göstermektedir. Filtreleme işleminden sonra KOH değerleri %7 ile %80 arasında azalmıştır. Filtrelenmemiş VADASE yaklaşımının sahip olduğu KOH değerleri hem düşük hem de yüksek-frekanslı durumlar için filtrelenmemiş RT-PPP ile benzer davranış gösterse de filtrelenmemiş VADASE yaklaşımı, filtrelenmemiş RT-PPP tekniğinden biraz daha iyi performans göstermektedir. Filtrelenmiş RT-PPP'ye benzer şekilde, filtrelenmiş VADASE tekniği ile LVDT arasındaki farkların KOH değerleri %3 ile %75 arasında iyileşmiştir.

Tablo 7.13: Harmonik salınım deneylerinde elde edilen frekanslar ve genlikler.

,	LVDT		RP		RT-PPP		VADASE	
	Frek. (Hz)	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**
Durum 1	0.25	4.7	0.25	4.7 [3.8]	0.25	6.3 [5.7]	0.25	4.8 [4.3]
Durum 2	0.25	9.4	0.25	8.4 [6.8]	0.25	8.8 [7.9]	0.25	9.2 [8.3]
Durum 3	0.60	4.2	0.60	4.2 [4.2]	0.60	4.1 [4.4]	0.60	4.3 [4.4]
Durum 4	0.60	8.3	0.60	7.2 [7.2]	0.60	10.5 [10.3]	0.60	7.6 [7.7]
Durum 5	1.50	4.2	1.50	5.4 [5.4]	1.50	3.0 [4.5]	1.50	4.3 [4.3]
Durum 6	1.50	8.4	1.50	11.2 [11.2]	1.50	9.7 [9.7]	1.50	9.1 [9.1]
Durum 7	2.00	3.8	2.00	6.1 [6.1]	2.00	5.2 [5.1]	2.00	4.4 [4.4]
Durum 8	2.00	7.6	2.00	10.8 [10.8]	2.00	10.2 [10.1]	2.00	8.6 [8.6]
Durum 9	3.50	3.2	3.50	5.7 [5.7]	3.50	5.4 [5.4]	3.50	6.0 [6.0]
Durum 10	3.50	6.4	3.50	10.7 [10.7]	3.50	10.8 [10.8]	3.50	11.6 [11.6]
Durum 11	5.00	3.4	5.00	5.1 [5.1]	5.00	4.9 [4.9]	5.00	6.7 [6.7]
Durum 12	6.00	2.9	6.00	3.8 [3.8]	6.00	3.4 [3.4]	6.00	5.3 [5.3]
Durum 13	7.00	2.8	7.00	3.2 [3.2]	7.00	2.8 [2.8]	7.00	4.9 [4.8]
Durum 14	8.00	2.4	8.00	1.9 [1.9]	8.00	2.2 [2.2]	8.00	4.4 [4.4]
Durum 15	0.80 3.40 7.60	7.4 2.4 0.9	0.80 3.40 7.60	7.8 [7.9] 4.7 [4.7] 0.9 [0.9]	0.80 3.40 7.60	7.8 [7.7] 4.4 [4.3] 0.9 [0.9]	0.80 3.40 7.60	7.1 [7.1] 4.2 [4.2] 1.7 [1.7]

Filtrelenmiş sonuçlara odaklanıldığında ise RT-PPP ve VADASE yöntemlerinden elde edilen KOH değerlerinin 3,4,5 ve 9 numaralı durumlar hariç tüm durumlarda RP yönteminden biraz daha iyi olduğu görülebilir. Ayrıca ilk 10 durumda VADASE tekniği RT-PPP yönteminden daha düşük KOH değerlerine sahiptir. Bu duruma ek olarak RT-PPP tekniği durum 11 ve 15 arasında diğer yöntemlere göre biraz daha iyi bir performans göstermiştir. Bu çalışmada VADASE yönteminden elde edilen KOH değerleri 3.5 Hz'den düşük frekanslarda RT-PPP'den biraz daha küçük, 5 Hz'den yüksek-frekanslarda ise RT-PPP tekniğinden biraz daha büyüktür. Yöntemler arasındaki KOH farklarının küçük olduğu göz önüne alındığında, VADASE yaklaşımının 3.5 Hz'e kadar olan salınımları RT-PPP'den daha iyi yakaladığı veya RT-PPP'nin 5 Hz üzerindeki salınımları VADASE'den daha iyi yakaladığı anlamına gelmemektedir. Bu nedenle, bu bulguları doğrulamak ve netleştirmek için daha fazla araştırma ve yeni deneyler yapılması gerekmektedir.

Genel olarak, harmonik salınım deneyleri, mega/büyük depremler nedeniyle referans GNSS istasyon verilerine erişilemediğinde veya RP için güvenilmez olduğunda mühendislik yapılarının doğal frekanslarını belirlemek için RT-PPP ve VADASE yaklaşımlarının kullanılabileceğini açıkça ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca zaman ve frekans alanındaki sonuçlar, yapı sağlığı izleme sistemlerinin bağımsız bir GNSS alıcısı ile çalıştırıldığında RT-PPP ve VADASE yaklaşımlarının güvenilir yöntemler olduğunu vurgulamaktadır. Ancak VADASE tekniğinin internetten ve GNSS sinyalleri dışında bir kaynaktan alınması gereken harici ürünlerden bağımsız olması nedeniyle gerçek-zamanlı izlemede RT-PPP'ye göre VADASE'nin daha etkili ve sürekli bir yöntem olduğu açıktır.



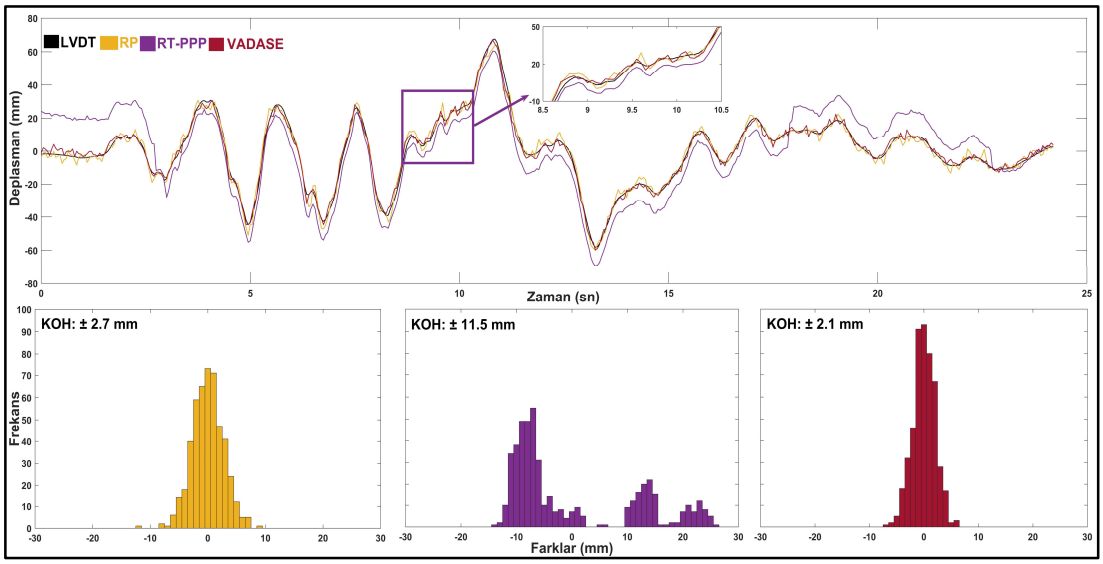
Şekil 7.37: GPS-tabanlı teknikler ve LVDT arasındaki deplasman farklarının KOH değerleri.

7.4.1. Erken Uyarı Sistemleri ve Deprem İzleme Uygulamalarında RT-PPP ve VADASE Yaklaşımlarının Performansı

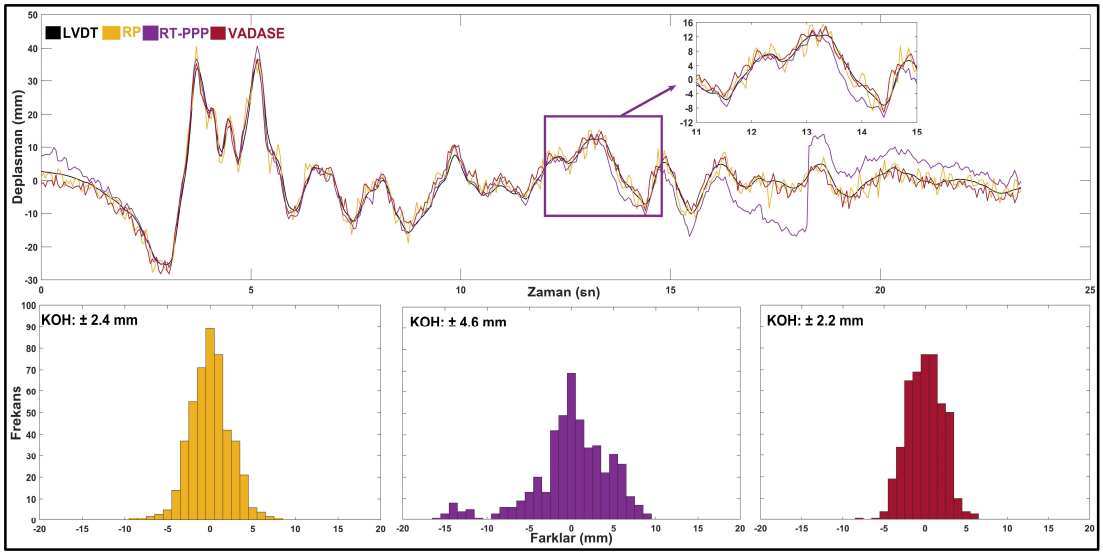
Tez çalışmasının bu bölümünde erken uyarı sistemleri için deprem kaynaklı yer dalgası hareketlerini tespit edilmesine yüksek zamansal çözünürlüklü ve gerçek-zamanlı kinematik RT-PPP ve VADASE yaklaşımlarının performansı değerlendirilmektedir. Yer dalgası hareketlerinin izlenmesinde RT-PPP ve VADASE yaklaşımlarının etkinliklerini değerlendirmek için M_w 6.9 Kobe depremi, M_w 6.9 Loma Prieta depremi, M_w 6.9 El Centro depremi ve M_w 7.2 Düzce depremi sarsma tablasında oluşturulmuştur. LVDT verileri, sismik dalga biçimlerini tespit etmede RT tabanlı tekniklerin performansını doğrulamak için bağımsız bir referans olarak kullanılmıştır. Şekil 7.38, Kobe depremi sırasında kaydedilen verilerin simüle edilmesinin neden olduğu deplasman zaman serilerinin yanı sıra LVDT ve GPS tabanlı çözümler arasındaki fark histogramlarını ifade etmektedir. RP ve VADASE'den türetilen zaman serileri, LVDT ile iyi bir uyum gösterirken, RT-PPP tabanlı yer değiştirmelerde cm düzeyinde küçük farklılıklar vardır. Ayrıca RP ile LVDT arasındaki farkların maksimum değeri 11.8 mm iken bu farklar VADASE için 7.1 mm ve RT-PPP için 26.0 mm'dir. Elde edilen farkların histogram değerlerine bakıldığında RP ve VADASE'nin histogramlarının Gauss hata dağılımına uygun olduğu ve KOH değerlerinin sırasıyla 2.7 mm ve 2.1 mm olduğu görülmektedir. Öte yandan, RT-PPP tekniğinden elde edilen histogram Gauss hata dağılımını takip etmemektedir ve zaman serilerindeki ani yükselmeler nedeniyle KOH değeri 11.5 mm'dir.

Şekil 7.39, Loma Prieta deprem kaydı simüle ederek oluşturulan deplasman zaman serilerinin yanı sıra LVDT ve GPS tabanlı çözümler arasındaki farkların histogramlarını göstermektedir. RP ve VADASE'den türetilen zaman serileri referans LVDT sensörüyle büyük ölçüde tutarlıyken, RT-PPP'den türetilen deplasmanlar ilk 14 saniye boyunca LVDT ile iyi bir uyum içindedir. Ancak 14. saniyeden sonra dalga formları LVDT sensöründen hafifçe ayrılmış ve 18. saniyeden sonra bir sıçrama meydana gelmiştir. Bu ani sıçrama sonucunda RT-PPP ve LVDT sensörlerinden elde edilen dalga formları arasındaki maksimum fark 15.7 mm olurken, KOH değeri ise 4.6 mm'dir. Bu sonuçlar RT-PPP tekniğinin büyük ölçüde gerçek-zamanlı yörünge düzeltmelerine bağımlı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bu ani sıçramalar kolayca tespit edilebilir ve uygun şekilde ortadan

kaldırılabilir. Ancak burada RT-PPP yönteminin dezavantajlarını vurgulamak için gösterilmektedir. Ayrıca Loma Prieta deprem testinde VADASE yaklaşımı RP yönteminden biraz daha iyi performans göstermiştir. LVDT sonuçlarından farkların maksimum ve KOH değerleri RP için sırasıyla 9.2 mm ve 2.4 mm iken bu değerler VADASE için 7.9 mm ve 2.2 mm'dir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, VADASE yaklaşımının erken uyarı sistemleri için çok güçlü bir teknik olabileceği açıktır.

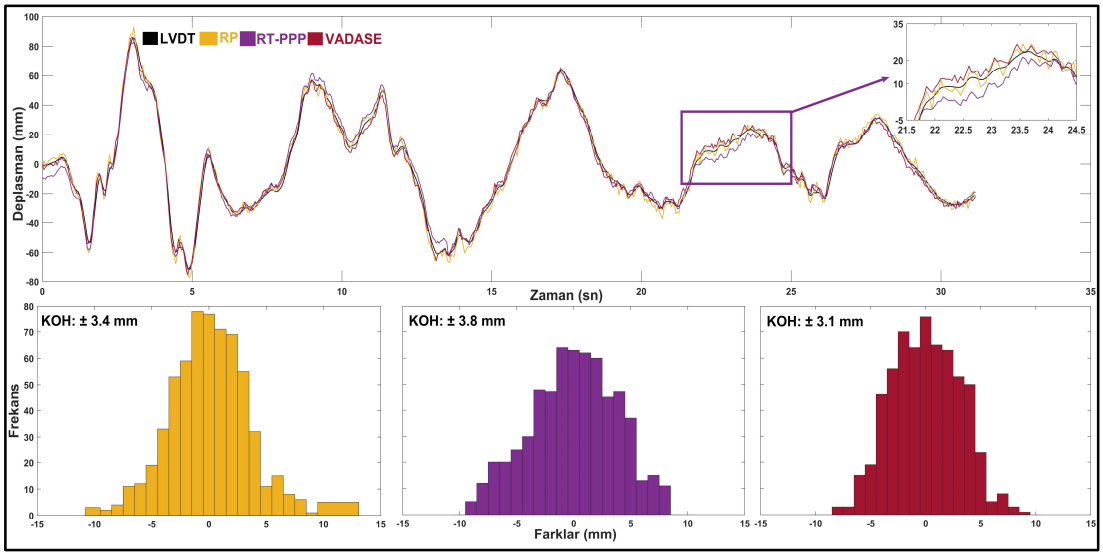


Şekil 7.38: Kobe deprem simülasyonunda LVDT, RP, RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması (üst) ve GPS-tabanlı deplasmanlar ile LVDT arasındaki farkların histogramları (alt).



Şekil 7.39: Loma Prieta deprem simülasyonunda LVDT, RP, RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması (üst) ve GPS-tabanlı deplasmanlar ile LVDT arasındaki farkların histogramları (alt).

Şekil 7.40, LVDT ve GPS tabanlı çözümler arasındaki farkların histogramlarını ve KOH değerleri ile birlikte El Centro depreminin seçilen kaydını simüle ederek oluşturulan zaman serisini göstermektedir. RP, RT-PPP, VADASE ve LVDT'den tahmin edilen dalga formları göz önüne alındığında, dinamik yer hareketlerini tespit etmede söz konusu sensör ve yöntemlerin önemli ölçüde karşılaştırılabilir olduğunu açıktır. RP ve LVDT arasındaki deplasman dalga formu farkları, RT tabanlı çözümler ve LVDT arasındaki farklardan biraz daha fazladır. RP ve LVDT arasındaki deplasman farklarının maksimum değeri 13.1 mm iken, RT-PPP/VADASE ve LVDT arasındaki farklar -10 mm ile +10 mm arasındadır. VADASE yaklaşımı ise diğer iki yöntemden biraz daha iyi performans göstermiştir. Loma Prieta deprem simülasyonunun aksine, El-Centro deprem simülasyonu sonuçları, RT-PPP tekniğinin simüle edilmiş sismik zemin dalga formlarını hassas bir şekilde yakalayabildiğini göstermektedir.

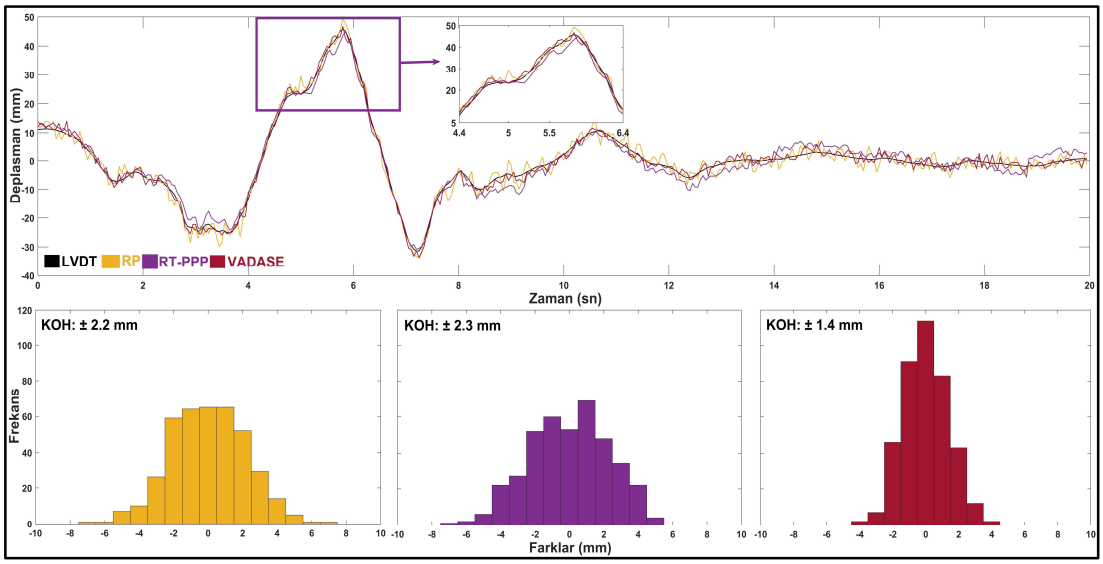


Şekil 7.40: El Centro deprem simülasyonunda LVDT, RP, RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması (üst) ve GPS-tabanlı deplasmanlar ile LVDT arasındaki farkların histogramları (alt).

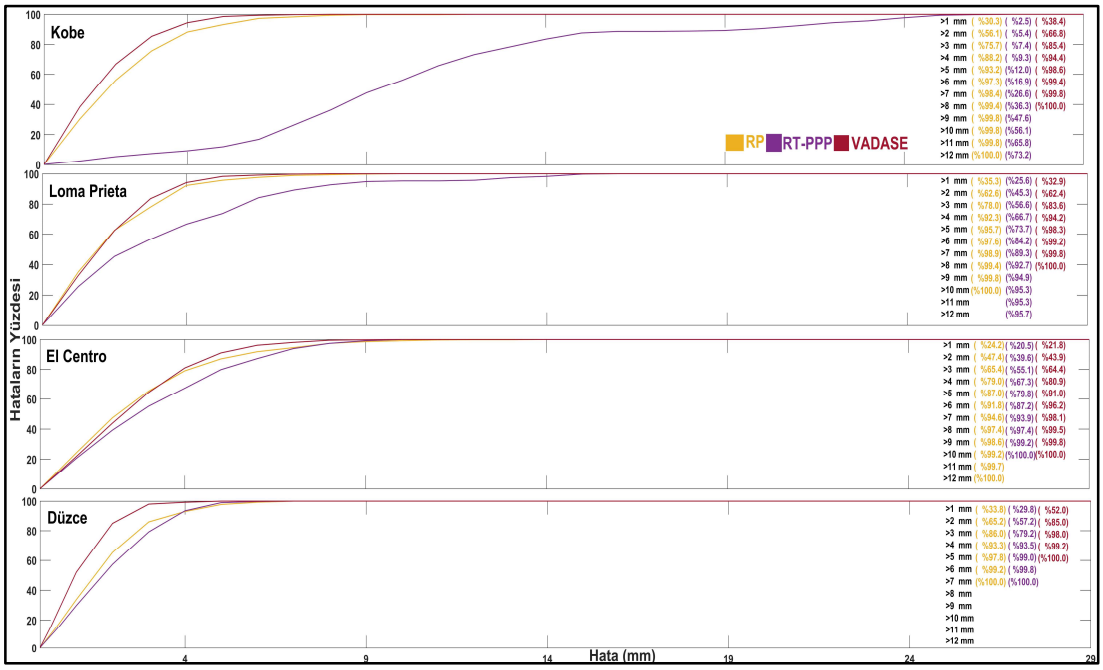
Şekil 7.41, sarsma tablası kullanılarak Düzce depreminin simülasyonu sırasında bu çalışmada tartışılan yaklaşımlardan elde edilen dalga formlarını ve GPS tabanlı çözümler ile LVDT arasındaki farkların histogramlarını içermektedir. RT tabanlı çözümlerin LVDT ve RP ile oldukça tutarlı olduğu açıkça görülebilir. Ayrıca, tüm GPS tabanlı çözümler mm düzeyinde LVDT'den farklıdır ve yöntemlerin histoglarmları Gauss hata dağılımını takip etmektedir. Bu deprem testinde VADASE

yaklaşımının diğer yöntemlerden biraz daha iyi performans gösterdiği açıktır. Düzce depremi deneyinde RT-PPP tekniği El Centro depremi testine benzer bir şekilde RP ve VADASE yöntemleri kadar iyi bir performans göstermiştir. Sonuçlar, bu iki RT tabanlı tekniğin erken uyarı sistemlerinde ve sismik dalga formlarını tespit etmede başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Şekil 7.42, tez çalışmasının bu uygulaması sırasında simule edilen tüm depremler için GPS-tabanlı yöntemler ile LVDT arasındaki hata dağılımlarının yüzdesini göstermektedir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi VADASE yaklaşımı tüm deprem deneyleri için diğer yaklaşımlara göre biraz daha etkilidir. VADASE ve LVDT arasındaki farklar Kobe ve Loma Prieto depremleri için 8 mm, El Centro için 10 mm ve Düzce depremi için 5 mm'nin altındadır. Bu bulgular, VADASE tekniğinin sismik dalgaları tespit etmek için çok güçlü bir araç olabileceğini açıkça öe sürmektedir. RT-PPP tekniği ise tüm deprem testlerinde diğer yöntemlerden biraz daha yüksek hata değelerine sahip gibi görünmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi Kobe deprem simülasyonu sırasında IGC01 akışından elde edilen gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerinin kalitesi nedeniyle RT-PPP tekniği ile LVDT arasındaki farklar 26 mm'ye kadar ulaşmıştır. Ancak product.igs-ip.net:2101 akışından elde edilen IGC01 düzeltmelerinin kalitesinin artmasıyla birlikte El Centro ve Düzce depremlerinde RT-PPP yöntemi VADASE ve RP yaklaşımları ile benzer sonuçlar vermiştir.



Şekil 7.41: Düzce deprem simülasyonunda LVDT, RP, RT-PPP ve VADASE'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması (üst) ve GPS-tabanlı deplasmanlar ile LVDT arasındaki farkların histogramları (alt).



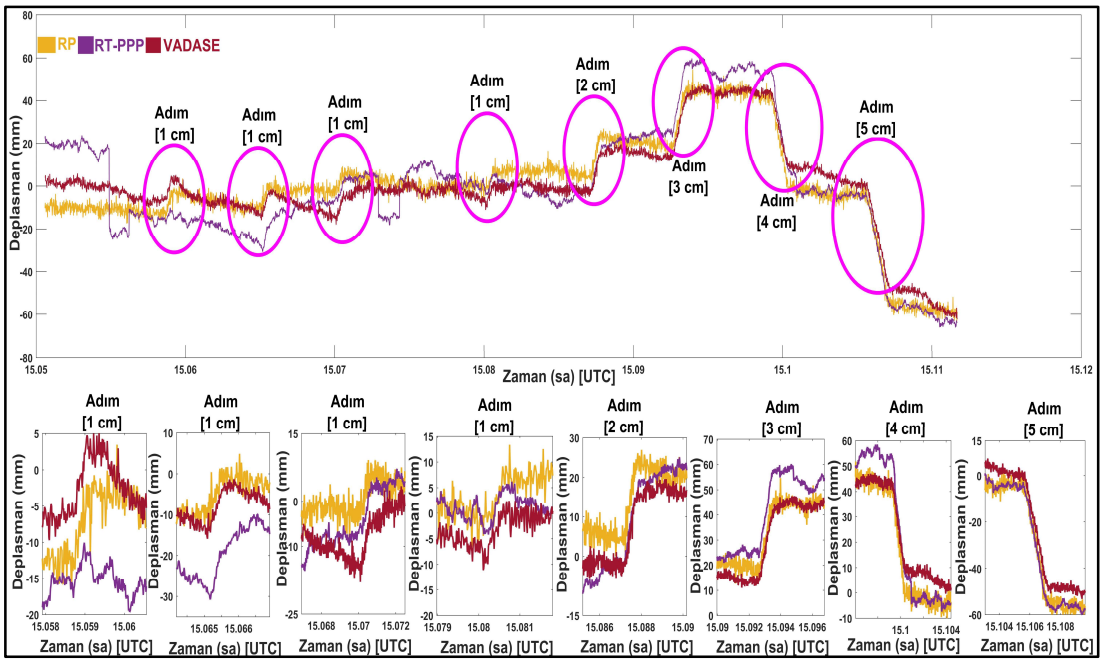
Şekil 7.42: Tüm deprem simülasyonları için GPS-tabanlı çözümlerden elde edilen deplasmanların LVDT'den olan farklarının yüzde dağılımı.

7.4.2. Statik veya Yarı-Statik Deplasmanların ve Deformasyonların İzlenmesinde RT-PPP ve VADASE Yaklaşımlarının Performansı

RT-PPP ve VADASE yönteminin yarı-statik veya kalıcı deformasyonların tespit etme kabiliyetini araştırmak için sarsma tablası üzerinde adım hareketi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında Şekil 7.43'te gösterildiği gibi 1 cm'lik deplasman dört kez, 2-5 cm arasındaki deplasmanlar ise bir kez üretilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, RT-PPP sonuçları uzun vadeli dalgalanmalarla sahiptir. Bununla birlikte, RP tekniği deplasmanları daha doğru bir şekilde takip etmiş ve VADASE'den türetilen deplasmanlar büyük ölçüde RP ile iyi bir uyum sergilemiştir.

İki gerçek-zamanlı yönteminin kabiliyetini daha fazla değerlendirmek ve karşılaştırmak amacıyla, her adım hareketi için kalıcı (statik deformasyon) deplasman değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 7.14'te özetlenmiştir. Kalıcı deplasman değerleri, adım hareketi oluşturmadan önce ve sonraki ardışık 200 epoğun (10 sn.) ortalamalarının farkı alınarak tahmin edilmiştir. Tahmini deplasmanların standart sapmalarını elde etmek için hata yayılımı uygulanmıştır. Beklendiği gibi, RP tekniği tüm deplasman değerlerini neredeyse doğru bir şekilde belirlemiştir. Tüm deneyler için gerçek değer ve RP'den türetilen deplasmanlar arasındaki maksimum fark 0.3 cm'dir. Ancak, gerçek değer ve RT-PPP'den türetilen deplasmanlar

arasındaki fark 0.2 cm ile 1.6 cm arasında değişmektedir. Gerçek değer ve VADASE'den türetilen deplasman arasındaki farklar 1.3 cm'den azdır. VADASE için ortalama fark 0.58 cm iken, RT-PPP yöntemi için bu değer 0.93 cm'dir. Genel olarak, bu sonuçlar RT-PPP ve VADASE'nin gerçek-zamanlı ko-sismik deplasmanları tespit etmek ve deprem mekanizmalarını hızla değerlendirmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Buna ek olarak bu sonuçlar, gerçek-zamanlı olarak yarı-statik/kalıcı deplasmanları yakalama açısından VADASE yönteminin RT-PPP tekniğinden biraz daha iyi olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 7.43: Adım fonksiyonu deneylerinde RP–, RT-PPP- ve VADASE-den türetilen deplasmanların karşılaştırılması.

Tablo 7.14: Tüm yöntemlerden elde edilen tahmini kalıcı deplasmanlar ve standart sapmaları.

Üretilen Hareket (cm)	**Tespit Edilen Hareket (cm)**		
	RP	**RT-PPP**	**VADASE**
1.0	1.0 ±0.3 cm	0.4 ±0.5 cm	0.9 ±0.3 cm
1.0	1.1 ±0.3 cm	1.2 ±0.4 cm	0.7 ±0.2 cm
1.0	0.9 ±0.3 cm	1.5 ±0.7 cm	1.7 ±0.4 cm
1.0	1.0 ±0.4 cm	0.0 ±0.3 cm	0.9 ±0.3 cm
2.0	1.8 ±0.3 cm	3.6 ±0.4 cm	2.8 ±0.3 cm
3.0	2.9 ±0.3 cm	3.6 ±0.4 cm	4.3 ±0.2 cm
4.0	4.3 ±0.3 cm	5.4 ±0.3 cm	2.7 ±0.3 cm
5.0	4.9 ±0.3 cm	5.7 ±0.3 cm	5.0 ±0.3 cm

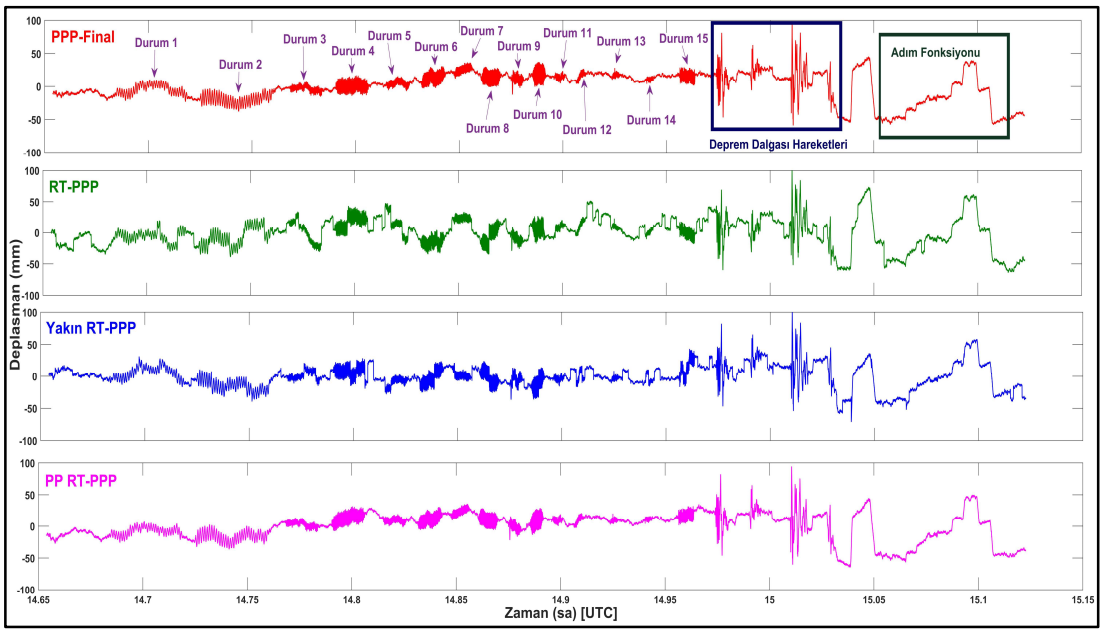
7.5. Yatay Yönlü Dinamik Davranışların Belirlenmesinde Farklı IGS Ürünlerine Dayalı RT-PPP Tekniğinin Karşılaştırmalı Bir Analizi

Tez çalışmasının bu bölümü farklı RT-PPP yaklaşımlarının yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğinin değerlendirilmesini içermektedir. Tablo 7.12'de frekans ve genlik değerleri ifade edilen harmonik salınımların oluşturulduğu deneyler sırasında http://products.igs-ip.net:2101/ akışı üzerinden IGC01 gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmeleri ile RT-PPP çözümleri yapılmış ve bu akıştan gelen düzeltmeler kaydedilmiştir. Yakın RT-PPP tekniğinin dinamik hareket algılama kapasitesini araştırmak için, deney sırasında kaydedilen State Space Representation (SSR) düzeltmeleri kullanılarak deneyden hemen sonra Yakın RT-PPP çözümü gerçekleştirilmiştir. Son gözlemden bir gün sonra standart formatta kullanıcıya sunulan IGC01 yörünge ve saat düzeltmeleri ile sonradan-değerlendirme (PP) RT-PPP çözümleri de ayrıca gerçekleştirilmiştir. Böylece olay sırasında, olaydan hemen sonra ve de olay meydana geldikten bir gün sonra konum belirlemeye olanak sağlayan IGC01 yörünge ve saat düzeltmelerinin yatay yönlü dinamik hareketleri tespit edebilme performansı test edilmiştir. Ayrıca deprem/tsunami erken uyarı sistemleri ve hızlı risk değerlendirme uygulamaları açısından RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPPP yaklaşımlarının performansını değerlendirmek için Kobe, El-Centro, Loma Prieta ve Düzce depremleri sarsma tablası kullanılarak oluşturulmuştur. Bu iki deneye ek olarak, sarsma tablası kullanılarak adım fonksiyonu deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Deney, gerçek-zamanlı olarak tek bir GPS alıcısı ile konum elde etmeye olanak sağlayan yaklaşımların, statik veya yarı-statik deplasmanları ne kadar kesin olarak belirleyebileceği sorusunu yanıtlamıştır.

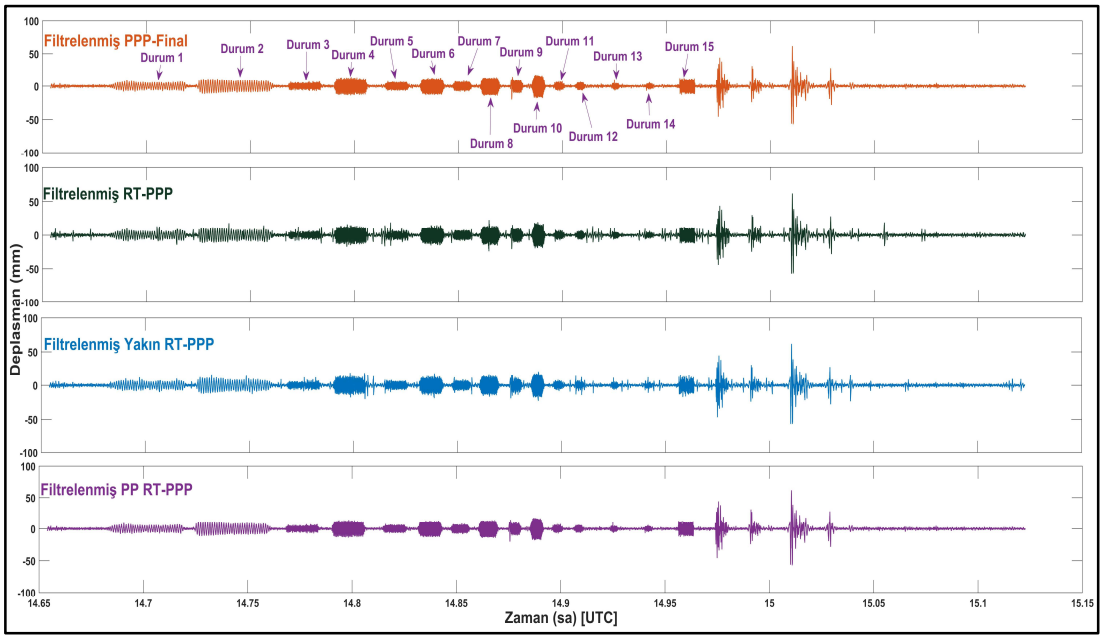
Şekil 7.44 harmonik salınımlar, sismik dalga simülasyonları ve adım fonksiyonu olmak üzere üç tür dinamik hareket için yukarıda bahsedilen yöntemlerden elde edilen deplasman zaman serilerini göstermektedir. Zaman serileri yukarıdan aşağıya PPP-Final, RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'ye karşılık gelmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi PPP-Final ve PP RT-PPP'den türetilen deplasmanlar benzerdir ve birbirleriyle oldukça tutarlıdır. Ancak, RT-PPP ve Yakın RT-PPP yaklaşımlarından elde edilen deplasmanlar uzun vadeli dalgalanmalar içermektedir. Önceki uygulamalarda da bahsedildiği gibi bu önemli değildir çünkü bu tez çalışmasının başlıca hedefi kısa vadeli dinamik deplasmanlara odaklanmaktır.

Buna ek olarak her iki yöntem de uzun vadeli dalgalanmalara ek olarak kısa süreli dalgalanmalar ve ani sıçramalar da içermektedir. Uygulamanın ilerleyen bölümlerinde şekil 7.44'te görülen kısa vadeli dalgalanmaların veya ani sıçramaların RT-PPP ve Yakın RT-PPP tekniklerinin yatay yönlü dinamik hareketleri izleme performansı üzerindeki etkisi hem frekans hem de zaman alanlarında incelenecektir.

Daha önce belirtildiği gibi, RT-PPP ve Yakın RT-PPP'den türetilen zaman serileri düşük frekanslı bileşenler içermektedir. Tez çalışmasının önceki uygulamalarında da üzerinde durulduğu gibi kısa süreli dinamik davranışların irdelenmesinde uzun vadeli dalgalanmalar önemsizdir. Bu uygulamada uzun süreli dalgalanmaları ortadan kaldırmak için 0.20 Hz kesme frekansına sahip 5. dereceden yüksek geçirgenli Butterwoth filtre uygulanmıştır. Aynı filtre, frekans ve zaman alanı karşılaştırmalarını daha güvenilir hale getirmek için PPP-Final ve PP RT-PPP yaklaşımlarından elde edilen deplasman bileşenlerine de uygulanmıştır. Şekil 7.45 bu uygulamada bahsedilen tüm tekniklerin filtrelenmiş zaman serilerini göstermektedir. PPP-Final ve PP RT-PPP'den türetilen deplasman değerlerinin birbirleriyle oldukça tutarlı ve karşılaştırılabilir olduğu açıktır, ancak SSR ürünleri kullanılarak elde edilen RT-PPP ve Yakın RT-PPP'den türetilen deplasmanlar filtrelenmemiş zaman serilerinde görülen kaymalardan dolayı ani sıçramalara sahiptir.



Şekil 7.44: PPP-Final, RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'den türetilen deplasman zaman serileri.

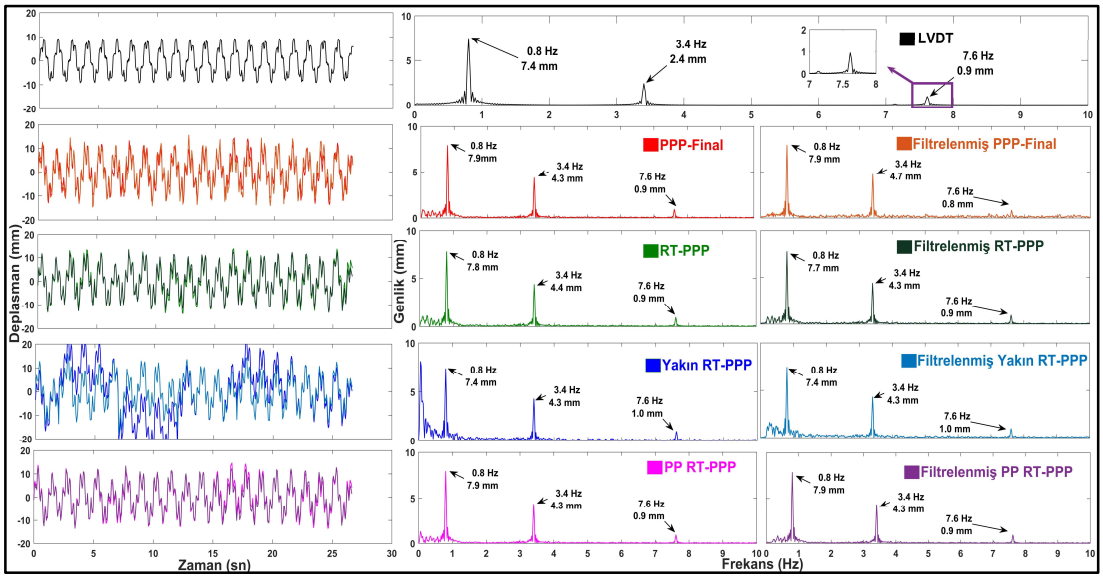


Şekil 7.45: PPP-Final, RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'den türetilen filtrelenmiş deplasman zaman serileri.

Üç farklı frekans ve genlik değerine sahip olan Durum 15, yatay yönlü dinamik harmonik hareketlerin tespitinde tez çalışmanının bu bölümünde tartışılan tüm PPP tabanlı yaklaşımların etkinliğini göstermek ve değerlendirmek için örnek bir durum olarak seçilmiştir. LVDT, PPP-Final, RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'den türetilen deplasman zaman serilerinin yanı sıra söz konusu bu durumdan elde edilen FFT spektrumu analizleri hem filtrelenmiş hem de filtrelenmemiş sonuçlar için şekil 7.46'da ifade edilmektedir Şekil, ham ve filtrelenmiş zaman serileri için RT-PPP ve PP RT-PPP'den tahmin edilen deplasmanların LVDT ve PPP-Final'den türetilenlere uyuştuğunu göstermektedir. Bununla birlikte Filtresiz Yakın RT-PPP zaman serisinin kısa dönemli dalgalanmalar içerdiği ve filtreleme sonrası bu dalgalanmaların giderildiği açıkça görülmektedir. Aynı SSR ve yayın efemeris ürünlerine dayalı olarak elde edilen RT-PPP ve Yakın RT-PPP arasındaki bu farkların, RTKLIB programının farklı iki modülü olan RTKNAVI ve RTKPOST yazılımlarının kullandığı algoritmalar ile açıklanabilir. Ek olarak, referans LVDT ve PPP tabanlı filtrelenmemiş ve filtrelenmiş zaman serilerinin FFT analizleri, baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerindeki küçük farklılıklara rağmen gözlemlenen tepe frekans değerlerinin aynı olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Filtreleme sonrasında RT-PPP tekniği ile elde edilen ikinci tepe frekansına karşılık gelen genlik değeri 0.1 mm, PPP-Final tekniği ile elde edilen ikinci tepe frekansına karşılık gelen genlik değeri

ise 0.4 mm değişmiştir. Ancak, üç baskın frekansın tümü için karşılık gelen genlik değerleri, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'de değişmemiştir. Tüm PPP tabanlı tekniklerden elde edilen 2. ve 3. baskın frekanslar için karşılık gelen genlik değerleri oldukça benzer olsa da Yakın RT-PPP yaklaşımıyla tespit edilen 1. tepe frekansına karşılık gelen genlik değeri, diğer yöntemlerden 0.4 mm değeri ile biraz farklıdır. Tüm PPP tekniklerinin benzer performans göseterdiği ve RT-PPP tekniğinden elde edilen genlik değerlerinin LVDT'ye göre 0.4 mm ile 2.0 mm arasında değiştiği düşünüldüğünde, RT-PPP tekniğinin gerçek-zamanlı yapı sağlığı izleme uygulamaları için oldukça umut verici olduğu açıktır.

Yüksek zamansal çözünürlüklü ve IGC01 tabanlı RT-PPP yaklaşımlarının frekans alanındaki etkinliğini daha fazla incelemek amacıyla tez çalışmasının bu uygulamasında tartışılan her bir durum için ilgili yaklaşımlardan elde edilen deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 7.15'te ifade edilmiştir. Köşeli parantez içindeki değerler filtrelenmiş sonuçları açıklarken diğer değerler ise filtrelenmemiş sonuçları belirtmektedir. Tabloda belirtildiği gibi filtrelenmiş ve filtrelenmemiş sonuçlar için RT tabanlı çözümlerin üç yaklaşımından elde edilen salınım frekansları LVDT ve PPP-Final ile iyi bir uyum göstermektedir. Öte yandan, karşılık gelen genlik değerlerinde ise biraz farklılık vardır. PPP-Final ve RT-PPP çözümleri arasındaki tepe frekans değerine karşılık gelen genlik farklılıkları 0.0 mm ile 0.5 mm arasında değişirken, LVDT ve RT-PPP arasındaki farklar 0.0 mm ile 4.4 mm arasında değişmektedir. Yakın RT-PPP tekniği ile LVDT arasındaki farklar 0.0 mm ile 4.6 mm arasında iken, PPP-Final yaklaşımı ile olan farklar 0.0 mm ile 0.5 mm arasındadır. Ek olarak, PPP-Final ve PP RT-PPP yöntemlerinin filtrelenmiş ve filtrelenmemiş deplasman zaman serilerinin FFT spektrumu sonuçlarından elde edilen genlik değerlerinin ayırt edilemez olduğu açıktır. Ayrıca, filtreleme işeminden sonra PPP tabanlı çözümlerden elde edilen genlik değerlerinde düşük frekanslı durumlar için 0.9 mm'ye kadar farklılık görülürken, yüksek-frekanslı senaryolarda yöntemlerden elde edilen genlik değerlerinde sadece küçük değişiklikler olmuştur. Bunun nedeni, düşük frekanslı titreşimlerde gözlemlenen doğal GNSS gürültüsüdür. Bu sonuçlar, kullanıcıya en az 14 gün sonra sunulan final ürünler yerine, son gözlemden bir gün sonra kullanıcıya sunulan kombine IGC01 ürünleri kullanılarak mühendislik yapılarının doğal frekanslarının final ürünlerin sağlayacağı kadar hassas bir şekilde belirlenebileceğini göstermektedir.



Şekil 7.46: Durum 15 için LVDT, filtrelenmemiş ve filtrelenmiş RT-PPP tabanlı yaklaşımlardan elde edilen deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

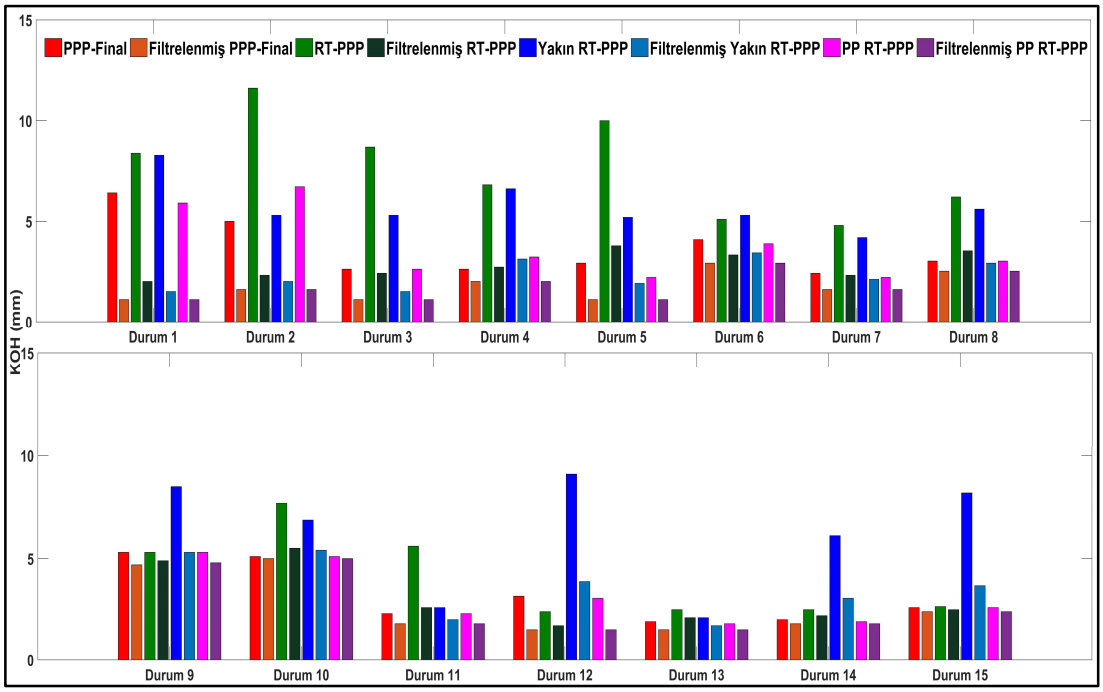
Tek GNSS alıcısı kullanarak dinamik hareketlerin gerçek-zamanlı şartlar altında algılanmasını sağlayan yaklaşımların performansını daha fazla incelemek ve değerlendirmek için, PPP tabanlı yöntemler ile referans LVDT sensörü arasındaki farklarının KOH değerleri hesaplanmıştır. Şekil 7.47, hesaplanan KOH değerlerinin bar grafiğini göstermektedir. Filtrelenmiş ve filtrelenmemiş PPP-Final ve PP RT-PPP çözümleri arasında önemli bir fark olmadığı açıktır. RT-PPP çözümleri için özellikle birinci ile beşinci durumlar arasındaki düşük frekans senaryolarında yüksek KOH değerleri öne çıkmakta ve RT-PPP'nin KOH değerleri 11.6 mm'ye ulaşmaktadır. Ancak salınım frekansı arttıkça KOH değerleri azalmaktadır. Bu durum şekil 7.44'te özellikle ilk durumdan sekizinci duruma kadar gözlemlenen ani sıçramalarla açıklanabilir. Filtrelenmiş RT-PPP çözümlerinden elde edilen KOH değerleri ise PPP-Final ile iyi bir uyum içindedir. Filtreleme işleminin ardından RT-PPP'den elde edilen KOH değerleri %7 ile %80 arasında azalmıştır. Bununla birlikte, bazı durumlarda Yakın RT-PPP, RT-PPP'ye benzer şekilde performans gösterirken, bazı durumlarda ise RT-PPP'den farklıdır. Bunun nedeni daha önce de belirtildiği gibi RTKPOST ve RTKNAVI modülleri arasındaki farklardan olabilir. Yakın RT-PPP tekniği ile elde edilen ham deplasman değerlerinin LVDT'den farklarının KOH değeri 9.1 mm'ye kadar ulaşırken, yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra KOH değerleri 5.4 mm seviyelerine düşmüştür. KOH değerlerinde %19 ile %81 arasında bir iyileşme olurken, maksimum hata değerlerinde %70'e varan bir iyileşme

olmuştur. Bu bulgular, Yakın RT-PPP yaklaşımını kullanarak dinamik hareketlerin tespitinde yüksek geçirgenli filtrenin önemini bir kez daga vurgulamaktadır. Ayrıca, zaman alanı analizi sonuçları, PP RT-PPP yaklaşımının RT-PPP tekniğine benzer şekilde performans gösterdiğini göstermektedir. LVDT ile iki yöntemin farklılıklarından elde edilen KOH değerlerindeki farklılıklar 0.0 mm ile 1.7 mm arasında değişmiştir. Her iki yönteme de uygulanan yüksek geçirgenli filtreleme sonrasında KOH değerleri benzer şekilde %1.5 ile %80 arasında azalmıştır.

Harmonik salınım testleri sonuçları referans GNSS istasyon verilerinin mega depremler nedeniyle rölatif konum belirleme yöntemi için güvenilir olmaması durumunda ve gerçek-zamanlı izleme amaçlanması doğrultusunda mühendislik yapılarının doğal frekanslarını tespit etmek için RT-PPP tabanlı yöntemlerin kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca bulgular, Yakın RT-PPP tekniğinin sahada meydana gelen bir olaydan hemen sonra kullanılması durumunda, bu yöntemle insan yapımı yapıların doğal frekans ve genliğinin başarılı bir şekilde belirlenebileceğini açıkça göstermiştir. Son gözlemden bir gün sonra kullanıcıya sunulan kombine IGC01 ürünleri kullanılarak PPP çözümü yapılırsa, elde edilen sonuçların dinamik hareketlerin yakalanması açısından Final ürünlere neredeyse eşit olabileceği de açıktır. Zaman ve frekans alanındaki sonuçlar, yapı sağlığı izleme sistemlerinin tek bir GNSS alıcısı kullanılarak gerçek-zamanlı modda çalıştırıldığında RT-PPP tekniğinin çok etkili bir yaklaşım olduğunu açıkça ortaya çıkarmıştır.

Tablo 7.15: Harmonik salınım deneylerinde tüm yaklaşımlardan elde edilen frekanslar ve genlikler.

	LVDT		**PPP-Final**		**RT-PPP**		**Near RT-PPP**		**PP RT-PPP**	
	Frek. (Hz)	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**	**Frek. (Hz)**	**Gen. (mm)**
Durum 1	0.25	4.7	0.25	5.8 [5.2]	0.25	6.3 [5.7]	0.25	6.1 [5.5]	0.25	5.8 [5.2]
Durum 2	0.25	9.4	0.25	9.1 [8.2]	0.25	8.8 [7.9]	0.25	9.0 [8.1]	0.25	9.1 [8.2]
Durum 3	0.60	4.2	0.60	4.3 [4.3]	0.60	4.1 [4.4]	0.60	4.4 [4.3]	0.60	4.3 [4.3]
Durum 4	0.60	8.3	0.60	10.1 [10.1]	0.60	10.5 [10.3]	0.60	10.6 [10.5]	0.60	10.1 [10.1]
Durum 5	1.50	4.2	1.50	4.7 [4.6]	1.50	3.0 [4.5]	1.50	4.6 [4.6]	1.50	4.6 [4.6]
Durum 6	1.50	8.4	1.50	9.8 [9.8]	1.50	9.7 [9.7]	1.50	9.8 [9.9]	1.50	9.8 [9.8]
Durum 7	2.00	3.8	2.00	5.0 [5.0]	2.00	5.2 [5.1]	2.00	5.0 [5.0]	2.00	5.0 [5.0]
Durum 8	2.00	7.6	2.00	10.1 [10.1]	2.00	10.2 [10.1]	2.00	10.1 [10.1]	2.00	10.1 [10.1]
Durum 9	3.50	3.2	3.50	5.4 [5.4]	3.50	5.4 [5.4]	3.50	5.4 [5.4]	3.50	5.4 [5.4]
Durum 10	3.50	6.4	3.50	11.0 [11.0]	3.50	10.8 [10.8]	3.50	11.0 [11.0]	3.50	11.0 [11.0]
Durum 11	5.00	3.4	5.00	5.0 [5.0]	5.00	4.9 [4.9]	5.00	5.0 [5.0]	5.00	5.0 [5.0]
Durum 12	6.00	2.9	6.00	3.4 [3.4]	6.00	3.4 [3.4]	6.00	3.2 [3.3]	6.00	3.4 [3.4]
Durum 13	7.00	2.8	7.00	2.8 [2.8]	7.00	2.8 [2.8]	7.00	2.7 [2.7]	7.00	2.8 [2.8]
Durum 14	8.00	2.4	8.00	2.2 [2.2]	8.00	2.2 [2.2]	8.00	2.2 [2.2]	8.00	2.2 [2.2]
Durum 15	0.80 3.40 7.60	7.4 2.4 0.9	0.80 3.40 7.60	7.9 [7.9] 4.3 [4.7] 0.9 [0.8]	0.80 3.40 7.60	7.8 [7.7] 4.4 [4.3] 0.9 [0.9]	0.80 3.40 7.60	7.4 [7.4] 4.3 [4.3] 1.0 [1.0]	0.80 3.40 7.60	7.9 [7.9] 4.3 [4.3] 0.9 [0.9]



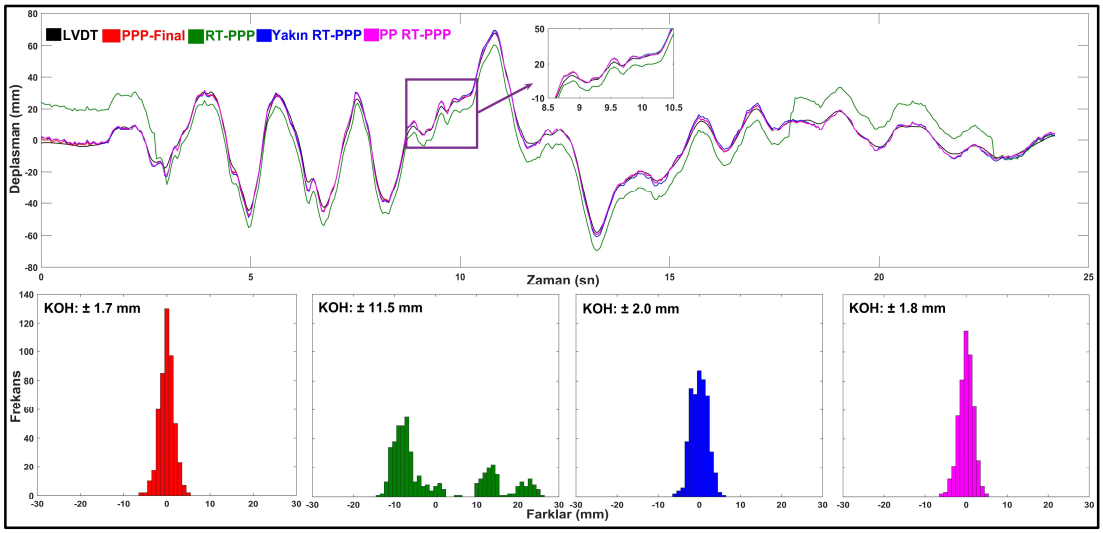
Şekil 7.47: Tüm durumlardan elde edilen LVDT ve PPP tabanlı yaklaşımlar arasındaki farkların KOH değerleri.

7.5.1. Erken Uyarı Sistemleri ve Deprem İzleme Uygulamalarında Farklı RT-PPP Yaklaşımlarının Performansı

Yüksek zamansal çözünürlüklü kinematik IGC01 tabanlı RT-PPP ve IGS-Final tabanlı PPP-Final yöntemlerinin potansiyel erken uyarı sistemleri için kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu dinamik hareketlerin tespit edilmesindeki performansı, tez çalışmasının bu bölümünde değerlendirilmektedir. Yer dalgası hareketlerinin izlenmesinde ilgili yaklaşımlarının etkinliklerini değerlendirmek için M_w 6.9 Kobe depremi, M_w 6.9 Loma Prieta depremi, M_w 6.9 El Centro depremi ve M_w 7.2 Düzce depremi sarsma tablasında oluşturulmuştur. LVDT verileri, sismik dalga biçimlerini tespit etmede RT tabanlı tekniklerin performansını doğrulamak için bağımsız bir referans olarak kullanılmıştır.

Kobe depreminden seçilen bir kaydın simüle edilmesinin neden olduğu zaman serileri ve ayrıca, LVDT ve PPP tabanlı çözümler arasındaki farkların histogramları Şekil 7.48'de gösterilmektedir. PPP-Final, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP zaman serileri LVDT ile iyi bir uyum göstermekte ancak RT-PPP tabanlı yer değiştirmeler cm seviyesinde biraz farklılık içermektedir. Ayrıca, PPP-Final ve LVDT arasındaki maksimum fark 5.8 mm iken bu fark Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP için 6.4 mm'dir. Elde edilen farkların histogramları dikkate alındığında, PPP-Final, Yakın RT-PPP ve

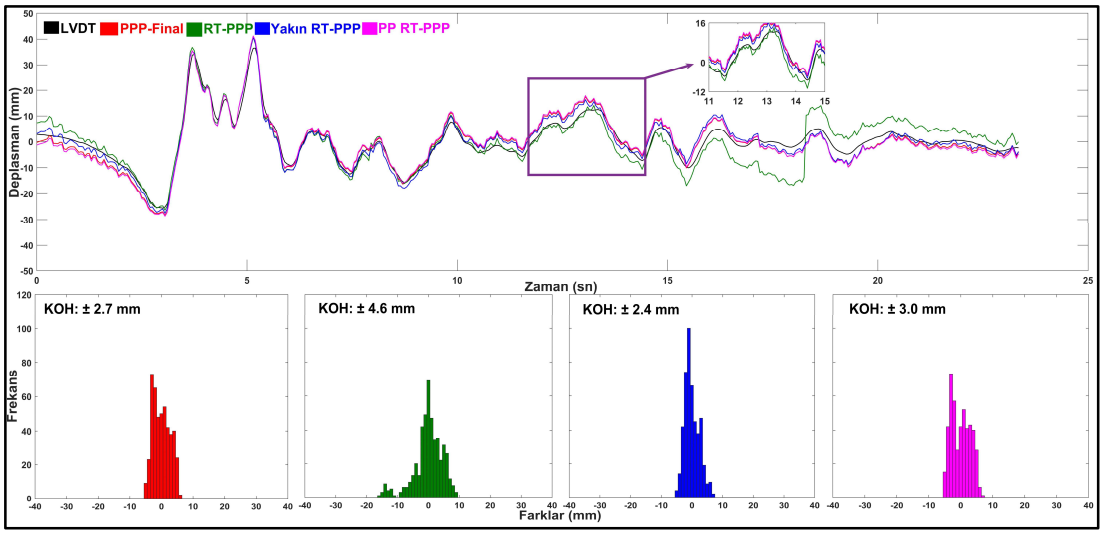
PP RT-PPP yöntemlerinin sırasıyla 1.7 mm, 2.0 mm ve 1.8 mm KOH değerleriyle Gauss hata dağılımına uyduğu görülmektedir. LVDT ve RT-PPP yaklaşımı arasındaki farklardan elde edilen histogram ise Gauss hata dağılımını izlememekte ve KOH değeri 11.5 mm'dir. RT-PPP gözlemleri sırasında akıştan gelen düşük kaliteli gerçek-zamanlı düzeltmeler RT-PPP zaman serilerinin LVDT'den farkını açıklamaktadır. Bununla birlikte, RT-PPP dalga biçiminin büyük ölçüde LVDT dalga biçimiyle karşılaştırılabilir olduğu şekilden görülebilir ve bu sonuç, RT-PPP yaklaşımın erken uyarı sistemleri ve GNSS-sismolojisi uygulamaları için önemli bir potansiyele sahip olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 7.48: Kobe depremi simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serileri (üst) ve LVDT ile PPP-tabanlı yöntemler arasındaki farkların histogramları ve KOH değerleri (alt).

Loma Prieta deprem kaydını simüle ederek oluşturulan deplasman zaman serilerinin yanı sıra LVDT ve PPP tabanlı çözümler arasındaki farkların histogramları Şekil 7.49'da gösterilmektedir. Kobe deprem deneyine benzer şekilde PPP-Final, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP yaklaşımlarından elde edilen dalga formları referans LVDT sensörüyle büyük ölçüde karşılaştırılabilirken, buna ek olarak RT-PPP'den türetilen deplasmanlar yaklaşık olarak 14 saniye boyunca LVDT ile iyi bir uyum içindedir. Ancak RT-PPP tekniğinden tahmin edilen dalga formları, gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerinden kaynaklandığı varsayılan bir nedenle 14. saniyeden sonra LVDT sensöründen ayrışmıştır. Bu ayrışma nedeniyle RT-PPP ve LVDT sensörlerinden elde edilen dalga formları arasındaki maksimum fark 15.7 mm iken KOH değeri 4.6 mm'dir. Bu bulgular, RT-PPP yaklaşımının

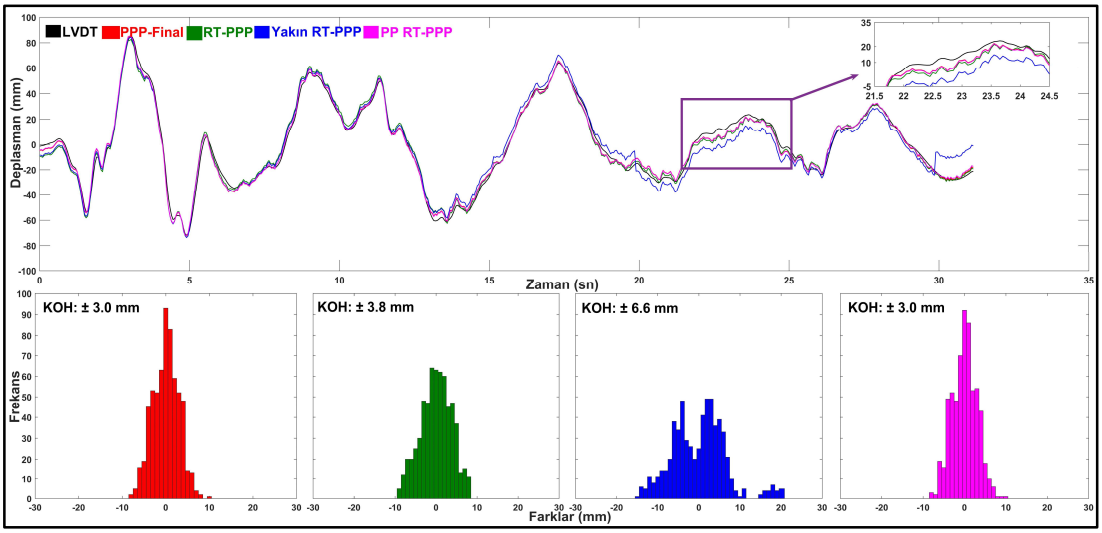
büyük ölçüde gerçek-zamanlı akış düzeltmelerinin kalitesine bağlı olduğunu kesin olarak ortaya koymuştur. Ayrıca, Yakın RT-PPP yöntemi Loma Prieta deprem simülasyonu deneyinde diğer PPP tabanlı tekniklerden biraz daha iyi performans göstermiştir. LVDT'den olan farkların maksimum ve KOH değerleri PPP-Final için sırasıyla 6.3 mm ve 2.7 mm iken Yakın RT-PPP için 6.9 mm ve 2.4 mm'dir. Daha önce belirtildiği gibi, RT-PPP ve Yakın RT-PPP için aynı SSR ve yayın efemerisi bilgileri kullanılmıştır. Bu çözümlerin teoride aynı sonuçları vermiş olması gerekliliğine rağmen, önceki bölümlerde detaylandırıldığı gibi RTKPOST ve RTKNAVI modüllerindeki farklılıklar nedeniyle farklı performans göstermiş olabilir. Bu bulgular göz önüne alındığında, Yakın RT-PPP yaklaşımının hızlı risk değerlendirmesi için çok güçlü bir araç olabileceği açıktır.



Şekil 7.49: Loma Prieta depremi simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serileri (üst) ve LVDT ile PPP-tabanlı yöntemler arasındaki farkların histogramları ve KOH değerleri (alt).

Şekil 7.50, El Centro depreminin seçilen kaydının simüle edilmesinden elde edilen deplasman zaman serilerinin yanı sıra LVDT ve PPP tabanlı çözümler arasındaki farklardan türetilen histogramlar ve KOH değerlerini göstermektedir. Yakın RT-PPP ve LVDT'den elde edilen deplasmanlar arasındaki farklar diğer PPP tabanlı yaklaşımlar ve LVDT arasındaki farklardan biraz daha büyük olsa da PPP-Final, RT-PPP, PP RT-PPP ve LVDT'den tahmin edilen deplasman değerleri ile açıkça tutarlıdır. Yakın RT-PPP ile LVDT arasındaki maksimum deplasman farkı 20.8 mm iken, diğer PPP yaklaşımları ile LVDT arasındaki fark -10 mm ila +10 mm arasında değişmektedir. KOH değerleri göz önüne alındığında PP RT-PPP ve PPP-

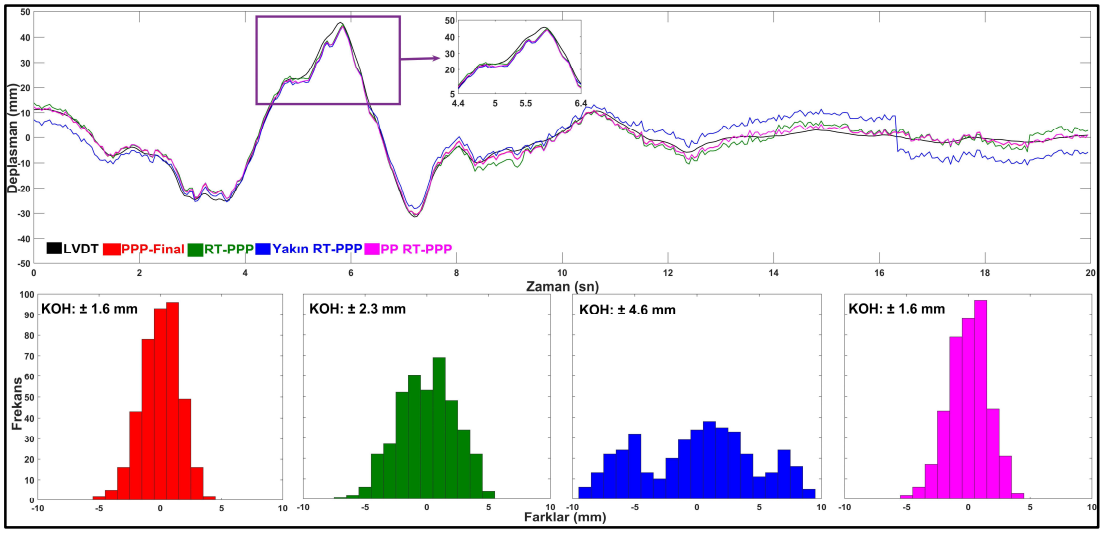
Final yöntemleri, tartışılan diğer iki yöntemden biraz daha iyi performans göstermiştir. Bu sonuçlar kombine IGC01 gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerinden daha az gürültü içerdiğini ifade etmektedir. Ayrıca elde edilen bulgular, RT-PPP yaklaşımının herhangi bir kesinti olmaması ve akış üzerinden yüksek kaliteli gerçek-zamanlı düzeltmeler elde edilmesi koşuluyla, kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu sismik dalga formlarını tespit etmek için güvenilir bir yöntem olabileceğini öne sürmektedir.



Şekil 7.50: El Centro depremi simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serileri (üst) ve LVDT ile PPP-tabanlı yöntemler arasındaki farkların histogramları ve KOH değerleri (alt).

Şekil 7.51, Düzce deprem simülasyonu sırasında bu çalışmada tartışılan yöntemlerden elde edilen dalga formlarının yanı sıra LVDT ve PPP tabanlı çözümler arasındaki farkların histogramlarını ifade etmektedir. RT-PPP ve PP RT-PPP dalga formlarının LVDT ve PPP-Final dalga formları ile karşılaştırılabilir olduğu açıktır. Tüm PPP tabanlı çözümler, LVDT'den mm düzeyinde farklılık göstermekte ve ayrıca Yakın RT-PPP dışındaki tüm PPP tabanlı yöntemler Gauss hata dağılımını takip etmektedir. Yakın RT-PPP tekniğinden elde edilen zaman serileri, deprem simülasyonunun yaklaşık ilk 10 saniyesinde LVDT'yi takip etmesine rağmen, RTKPOST yazılımının Broadcast+SSR algoritmasından kaynaklandığı düşünülen bir nedenle zaman serisinden ayrılmıştır. Ayrıca, bu deprem testinde PP RT-PPP ve RT-PPP yaklaşımlarının Yakın RT-PPP'den biraz daha iyi performans gösterdiği açıktır. Sonuçlar, RT-PPP tekniklerinin erken uyarı sistemlerinde ve kuvvetli yer hareketlerinden kaynaklanan sismik dalga formlarının tespitinde başarıyla

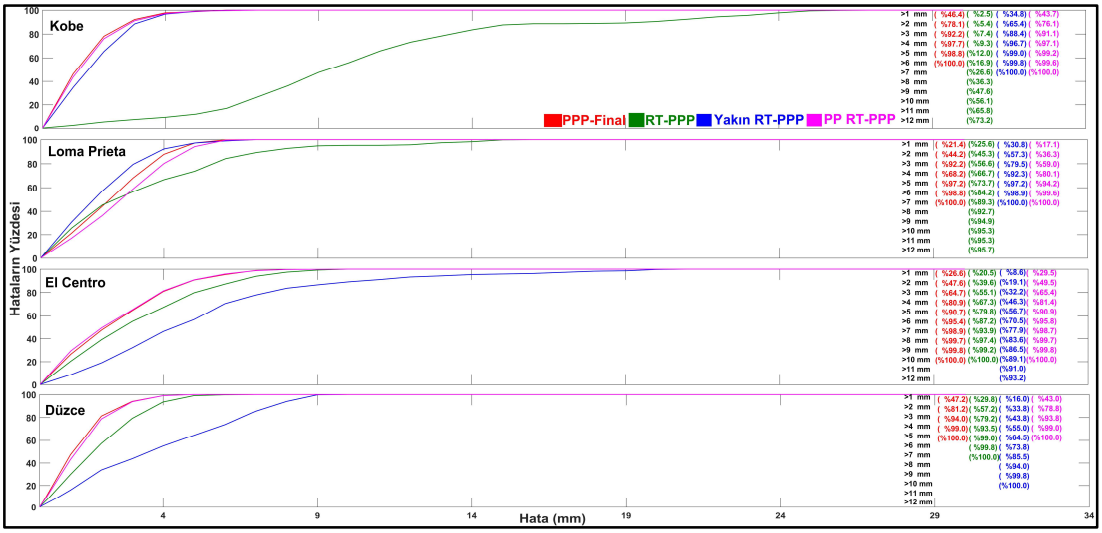
kullanılabileceğini ve kombine IGC01 ürünleri ile gerçekleştirilen PPP çözümlerinin deprem tespitinde IGS-Final ürünleri kadar hassas olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.51: Düzce depremi simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serileri (üst) ve LVDT ile PPP-tabanlı yöntemler arasındaki farkların histogramları ve KOH değerleri (alt).

Şekil 7.52, tartışılan 4 farklı PPP yaklaşımı için LVDT'den olan fark dağılımlarının yüzdesini göstermektedir. Tüm deprem deneylerinde PP RT-PPP ve PPP-Final yaklaşımlarının diğer yaklaşımlardan biraz daha etkili olduğu açıktır. PPP-Final ve PP RT-PPP benzer hata dağılımına sahiptir ve bu iki yöntem ile LVDT arasındaki farklar Kobe, Loma Prieta ve Düzce depremleri için sırasıyla 6 mm, 7 mm ve 5 mm, El Centro depremi içinse 10 mm'nin altındadır. Bu sonuçlar, kombine IGC01 ürünlerinin sismik dalgaları algılama açısından IGS-Final yörünge ve saat ürünlerine oldukça benzer olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Tüm deprem deneylerinde, RT-PPP yaklaşımının, PPP-Final ve PP RT-PPP yöntemlerinden daha yüksek hata değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, Kobe deprem simülasyonu sırasında IGC01 akışından sağlanan gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerinin kalitesi ile ilgili olarak, RT-PPP yaklaşımı ile LVDT arasındaki farklar 26 mm'ye kadar ulaşmıştır. Ancak, akıştan sağlanan düzeltmelerin kalitesi arttıkça Loma Prieta, El Centro ve Düzce depremlerinde RT-PPP tekniği PPP-Final ve PP RT-PPP yöntemleriyle karşılaştırılabilir sonuçlar vermiştir. Ek olarak, Kobe ve Loma Prieta depremlerinde Yakın RT-PPP ile LVDT arasındaki farklar 7 mm'nin altındayken, Düzce deprem testindeki farklar 10 mm'nin altındadır.

El Centro deprem simülasyonu sırasında LVDT'den farklılıklar 20.8 mm'ye kadar çıkmış olsa da hataların yaklaşık %93'ü 12 mm'nin altındadır.



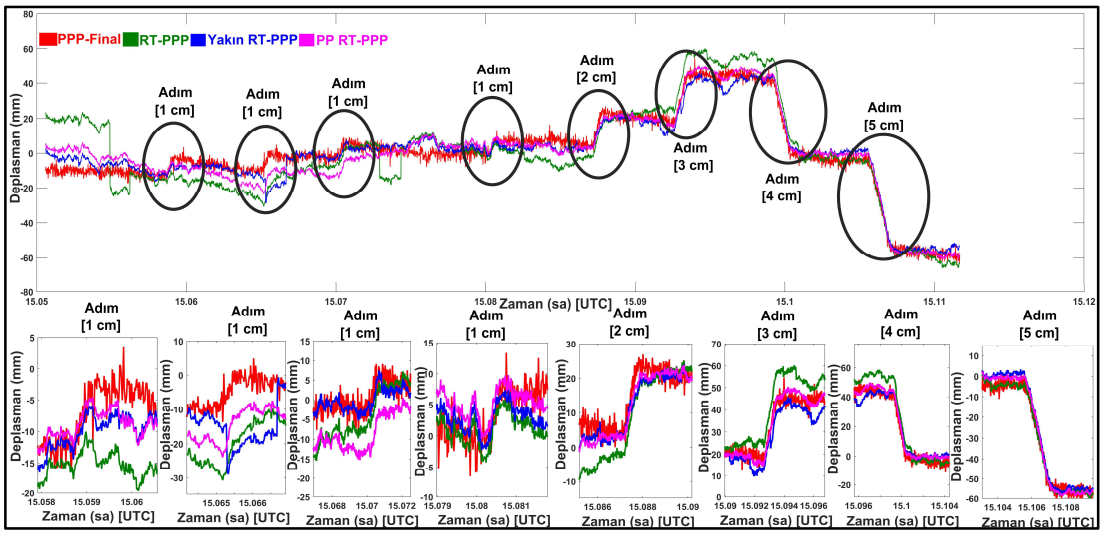
Şekil 7.52: Tüm deprem simülasyonları için PPP tabanlı yaklaşımlarından elde edilen deplasmanların LVDT'den olan farklarının yüzde dağılımı.

Bu sonuçlar, bir ölçü sahasındaki GNSS alıcısında meydana gelen bir sorun sebebiyle RT-PPP çözümüne ulaşmanın mümkün olmadığı ve akıştan gelen düzeltmelerin kaydedildiği durumlarda, Yakın RT-PPP yaklaşımının hızlı risk değerlendirmeleri açısından oldukça güvenilir bir yöntem olduğunu açıkça vurgulamaktadır. Dört deprem deneyinin sonuçları, RT-PPP yaklaşımının dezavantajlarını açıkça göstermektedir ve El Centro ve Düzce deprem simülasyon deneylerinin sonuçları dikkate alındığında, RT-PPP tekniğinin mega depremler sırasında meydana gelebilecek can kayıplarını önleme yeteneğine sahip deprem/tsunmai erken uyarı sistemleri için umut vaat ettiği açıktır.

7.5.2. Statik veya Yarı-Statik Deplasmanların ve Deformasyonların İzlenmesinde Farklı RT-PPP Yaklaşımlarının Performansı

Tez çalışmasının bu bölümü PPP tabanlı yaklaşımların yarı statik veya statik deplasmanları algılama yeteneğini sunmaktadır. Bu amaçla, sarsma tablası kullanılarak dört adet 1 cm ve bir adet 2 cm, 3 cm, 4 cm ve 5 cm'lik deplasmanlar oluşturulmuştur. Dört yaklaşım tarafından tespit edilen 1 cm ila 5 cm arasındaki adımların karşılaştırması Şekil 7.53'te gösterilmektedir. RT-PPP zaman serileri, gerçek-zamanlı SSR düzeltmeleri nedeniyle açık bir şekilde uzun vadeli

dalgalanmalar ve ani sıçramalar içermektedir. Ancak, PPP-Final zaman serisi deplasmanları daha doğru bir şekilde takip etmiştir. Ek olarak, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'den türetilen deplasmanlar PPP-Final ile büyük ölçüde tutarlıdır.



Şekil 7.53: Adım fonksiyonu deneylerinde PPP-Final, RT-PPP, Yakın RT-PPP ve PP RT-PPP'den türetilen kalıcı deplasmanların karşılaştırılması.

Yarı statik veya statik deformasyonların saptanmasında tez çalışmasının bu bölümünde tartışılan PPP tabanlı yöntemlerin etkinliğini daha fazla araştırmak amacıyla tüm adım fonksiyonu testleri için ilgili tekniklerden yakalanan deplasman değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 7.16'da rapor edilmiştir. Gerçek değerler ve PPP-Final tekniğinden elde edilen değer arasındaki maksimum fark tüm deneylerde 0.6 cm'dir. Ayrıca, RT-PPP yaklaşımı ile belirlenen deplasmanlar gerçek değerden cm düzeyinde ayrışmaktadır. 1 cm'lik adım fonksiyonlarında gerçek değerler ile farklar 0.6 cm ve 1.0 cm arasında olmasına rağmen, ikinci adım deneyinde RT-PPP yaklaşımı 0.2 cm'lik bir farkla deplasman değerini etkin bir şekilde tahmin etmiştir. Sarsma tablasında üretilen hareket ile RT-PPP tarafından tespit edilen deplasmanlar arasındaki farklar beşinci, altıncı, yedinci ve sekizinci durumlarda ise sırasıyla 1.6 cm, 0.6 cm, 1.4 cm ve 0.7 cm'dir. Bu sonuçlar, gerçek-zamanlı düzeltmelerin kalitesinin RT-PPP yöntemi üzerinde bir etkisi olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, PP RT-PPP yaklaşımının, PPP-Final tekniğine benzer şekilde statik veya yarı statik deplasmanları yakaladığı açıktır. PP RT-PPP, ikinci ve üçüncü adım fonksyionlarında 0.2 cm fark ile deplasman değerlerini doğru bir şekilde tahmin ederken, birinci ve dördüncü deneylerde sırasıyla 0.6 cm ve 0.5 cm'lik farklar vardır.

Ayrıca diğer dört durum için bu farklar sırasıyla 0.4 cm, 0.3 cm, 0.1 cm ve 0.3 cm'dir. Yakın RT-PPP yöntemi birinci ve dördüncü durumlar için gerçek deplasman değerinden 0.4 mm farklılık gösterirken, ikinci ve üçüncü adım fonksiyonu hareketinde için 0.1 cm fark ile gerçek değeri belirlemiştir. Diğer dört durumdaki farklar sırasıyla 0.2 cm, 0.1 cm, 0.3 cm ve 0.1 cm'dir. Bu sonuçlar, bir GNSS istasyonun/bir yapının statik veya yarı statik deplasmanların, bir olay meydana geldikten hemen sonra Yakın RT-PPP yaklaşımıyla kısmen güvenilir bir şekilde belirlenebileceğini ortaya koymuştur. Adım fonksiyonu testlerinin bulguları, RT-PPP yaklaşımlarının statik veya yarı statik yer değiştirmeleri ±2 cm hassasiyetle belirleyebildiğini açıkça göstermiştir.

Tablo 7.16: Tüm yöntemlerden elde edilen tahmini kalıcı deplasmanlar ve standart sapmaları.

Üretilen Hareket	**Tespit Edilen Hareket (cm)**			
	PPP-Final	**RT-PPP**	**Yakın RT-PPP**	**PP RT-PPP**
1.0 cm	0.7 ±0.3 cm	0.4 ±0.5 cm	0.6 ±0.3 cm	0.4 ±0.3 cm
1.0 cm	1.2 ±0.2 cm	1.2 ±0.4 cm	0.9 ±0.7 cm	1.0 ±0.2 cm
1.0 cm	1.1 ±0.2 cm	1.5 ±0.7 cm	0.9 ±0.2 cm	1.2 ±0.3 cm
1.0 cm	0.4 ±0.2 cm	0.0 ±0.3 cm	0.6 ±0.2 cm	0.5 ±0.2 cm
2.0 cm	2.4 ±0.2 cm	3.6 ±0.4 cm	2.2 ±0.2 cm	2.4 ±0.2 cm
3.0 cm	3.2 ±0.3 cm	3.6 ±0.4 cm	2.9 ±0.4 cm	3.3 ±0.2 cm
4.0 cm	4.1 ±0.3 cm	5.4 ±0.3 cm	3.7 ±0.3 cm	4.1 ±0.3 cm
5.0 cm	5.1 ±0.2 cm	5.7 ±0.3 cm	5.1 ±0.2 cm	5.3±0.2 cm

7.6. Gerçek-Zamanlı VADASE Yaklaşımının Dinamik Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi ve Bu Yönteme Çoklu-GNSS Gözlemlerinin Katkısı

Tez çalışmasının bu bölümü, sarsma tablası ile üretilen harmonik salınım ve deprem simülasyonları verilerinin GPS ve GPS/Glonass/Galileo/BeiDou uydu kombinasyonlarına dayalı çözülen DF-VA tekniği ile değerlendirilmesi ve yöntemin LVDT, RP ve PPP teknikleri ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını içermektedir. Yüksek zamansal çözünürlüklü DF-VA tekniğinin yapı sağlığı izlemeleri ve GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performansını incelemek amacıyla Bölüm 6.1.2'de detaylarıyla açıklanan deneyler gerçekleştirilmiş, harmonik salınım testlerinde tasarlanan durumlardan beş tanesi incelenmek amacıyla

seçilmiştir. Bölüm 6.2'de açıklanan deprem simülasyonlarından ise Kobe depremi, ilgili yöntemin güçlü yer sarsıntılarının neden olduğu dalga hareketlerini tespit etmedeki performansının test edilmesi amacıyla seçilmiştir. Burada gözlemlerin iki ayrı zaman diliminde toplandığını belirtmekte fayda vardır. Yaklaşık olarak bir saat süren ilk zaman diliminde söz konusu alıcılar sadece-GPS gözlemleri toplarken, ikinci zaman diliminde GPS/Glonass/Galileo/BeiDou uydu kombinasyonları ile gözlem toplanmıştır. Deneylerin iki farklı zaman diliminde gerçekleştirilmesinin sebebi tek bir Leica GR30 alıcısı kullanılmasından dolayıdır. Fakat uydu kombinasyonu farklılığının olabildiğince az olması için ikinci deney, birinci deney sona erdikten 30 dakika sonra gerçekleştirilmiş, deneylerde geleneksel-PPP tekniğindeki başlangıç faz belirsizliğinin yakınsaması için alıcılar açık bir konumda yaklaşık olarak 30 dakika hareketsiz olarak bekletilmiştir. VA tekniğinin çözümlerinin elde edilme şekli Bölüm 6.3'te açıklanırken, diğer referans tekniklerin nasıl elde edildiği ise yine aynı bölümde açıklanmıştır. Tezin bu bölümünde incelenen harmonik salınım hareketlerinin genlik ve frekansı Tablo 7.17'de ifade edilmiştir.

VADASE yaklaşımının performansını incelemek için tasarlanan iki deney setinde de LVDT verileri referans olarak kullanılmıştır. VADASE yaklaşımının yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS gözlemlerini işlemek için yaygın olarak kullanılan rölatif konum belirleme ve PPP tekniklerine bir alternatif olup olamayacağını test etmek için de rölatif konum belirleme ve PPP çözümleri VADASE tekniği ile ayrıca karşılaştırılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, LVDT verileri 100 Hz örneklem aralığına sahip olduğundan karşılaştırmayı adil kılmak için ham LVDT verileri 20 Hz örneklem aralığına düşürülmüştür. VADASE ve PPP tekniklerinden elde edilen deplasman bileşenleri yöntemlerin doğası gereği uzun süreli ve düşük frekanslı dalgalanmalar içermektedir. Öte yandan, 20-250 sn gibi kısa bir süre içinde dinamik yer değiştirmeye odaklanılıyorsa, uzun vadeli ve düşük frekanslı dalgalanma önemsizdir. Bununla birlikte, tek bir GNSS alıcından elde edilen deplasman zaman serilerindeki düşük frekanslı dalgalanmaları ortadan kaldırmak için yüksek geçirgenli bir filtre kullanılabilir [Yigit, 2016]. Bu çalışma kapsamında uzun süreli dalgalanmaları ve düşük frekanslı bileşenleri elemine etmek için kesme frekansı 0.20 Hz olan 5. dereceden yüksek geçirgenli Butterworth filtresi kullanılmıştır. Aynı filtre, frekans ve zaman alanı karşılaştırmalarını daha güvenilir

ve adil kılmak için, gerekli olmamasına rağmen rölatif konum belirleme tekniğine de uygulanmıştır.

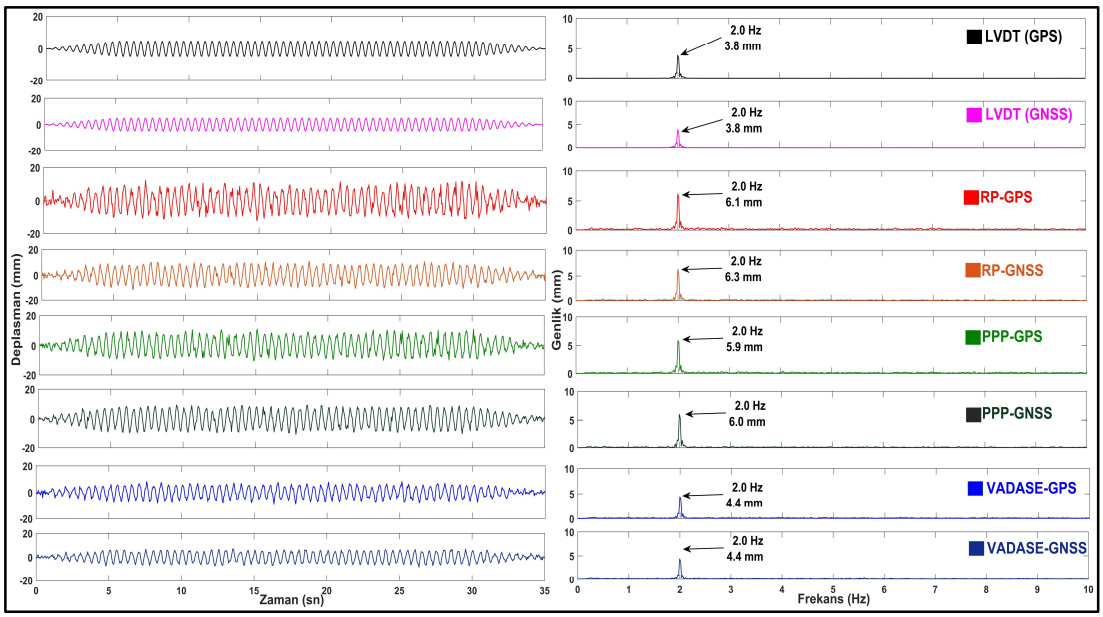
Tablo 7.17: Bu çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği.

		Salınım Genliği
		5 mm
Salınım Frekansları	**0.25 Hz**	Durum 1
	0.60 Hz	Durum 2
	1.50 Hz	Durum 3
	2.00 Hz	Durum 4
	3.50 Hz	Durum 5

Deneylerden 2.0 Hz frekans ve 5 mm genliğe sahip olan 4. durum, VADASE yaklaşımının harmonik salınımları yakalamadaki etkinliğini incelemek için örnek olarak seçilmiş ve LVDT, rölatif yöntem, PPP ve VADASE yaklaşımlarından GPS ve çoklu-GNSS kombinasyonlarına dayalı olarak elde edilen zaman serileri ve zaman serilerinden elde edilen FFT spektruları Şekil 7.54'te ifade edilmiştir. İlgili şekilden görüleceği üzere, zaman serileri birbirleri ile oldukça tutarlı ve tüm yöntemlerden elde edilen salınım frekansları eşittir. Ek olarak, donanım kaynaklı gürültüler ilgili şekilden de net olarak fark edilebilmektedir. Rölatif-GPS ve PPP-GPS zaman serilerinde harmonik salınımların tepe noktalarındaki farklılıklar ve VADASE-GPS sonuçlarının LVDT ile oldukça benzer zaman serisi üretmesi bunu açıkça göstermektedir. Buna karşılık, baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde küçük farklar olduğu göze çarpmaktadır. VADASE ve LVDT arasındaki farklar her iki uydu kombinasyonu için de 0.6 mm iken, bu farklar rölatif yöntem dikkate alındığında GPS için 1.7 mm, çoklu-GNSS içinse 1.9 mm'dir. VADASE ve PPP arasındaki farklar ise her iki uydu kombinasyonu için sırasıyla 1.5 mm ve 1.6 mm'dir. VADASE yönteminden elde edilen genlik değerlerinin LVDT ile elde edilenlere daha yakın olmasının sebebi donanım kaynaklı gürültü ile açıklanmaktadır. Daha önce de açıklandığı üzere rölatif yöntem ve PPP için CHC I80, VADASE yöntemi için ise Leica GR30 GNSS alıcısı kullanılmıştır. Bu alıcıların sahip olduğu gürültü değerleri bu farkların oluşmasına sebep olabilmektedir.

Tablo 7.17'de belirtilen her bir durum için çalışma kapsamında tartışılan yaklaşımlardan elde edilen zaman serilerinin FFT spektrumu analizleri Tablo 7.18'de

özetlenmiştir. Tüm GNSS-tabanlı yöntemlerin her iki uydu kombinasyonunda da salınım frekansını başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir. Bununla birlikte, baskın frekansa karşılık gelen genliklerde mm düzeyinde farklılıklar bulunmaktadır. VADASE yaklaşımı ile elde edilen genlik değerleri ile referans LVDT sensöründen elde edilen farklılıklar GPS gözlemleri için 0.4 mm ile 2.7 mm arasında değişirken, çoklu-GNSS gözlemleri için bu farklar 0.6 mm ile 2.8 mm'dir. Her iki uydu kombinasyonu için VADASE ile rölatif yöntem arasındaki farklar 1.9 mm'nin altında kalırken, VADASE ile PPP tekniği arasındaki farklar ise 1.6 mm değerinin altında kalmıştır. Bu sonuçlar, VADASE tekniği kullanarak mühendislik yapılarının doğal frekanslarının belirlenebileceğini açık bir şekilde göstermektedir.



Şekil 7.54: Örnek durum zaman serileri (sol) ve FFT spektrumları (sağ).

Tablo 7.18: Tüm durumlar için FFT spektrumu değerleri.

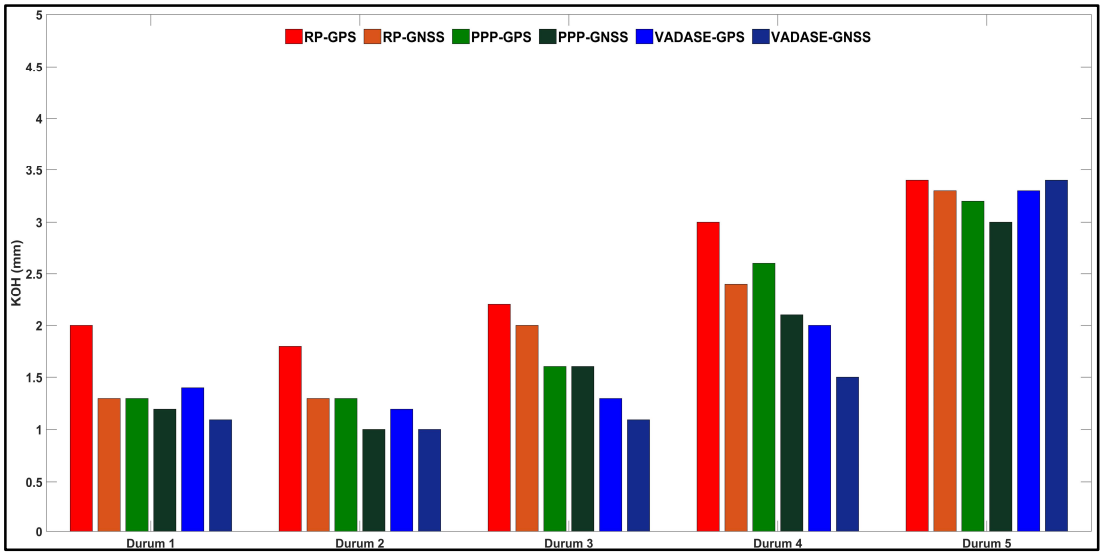
	LVDT (G)		LVDT (GNSS)		RP-GPS		RP-GNSS		PPP-GPS		PPP-GNSS		VADASE-GPS		VADASE-GNSS	
	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)
Durum 1	0.25	4.7	0.25	4.3	0.25	4.2	0.25	4.0	0.25	4.0	0.25	3.6	0.25	4.3	0.25	3.7
Durum 2	0.60	4.2	0.60	4.1	0.60	4.2	0.60	4.2	0.60	4.3	0.60	4.1	0.60	4.4	0.60	4.1
Durum 3	1.50	4.2	1.50	4.2	1.50	5.4	1.50	6.0	1.50	5.4	1.50	5.7	1.50	4.3	1.50	4.7
Durum 4	2.00	3.8	2.00	3.8	2.00	6.1	2.00	6.3	2.00	5.9	2.00	6.0	2.00	4.4	2.00	4.4
Durum 5	3.50	3.2	3.50	3.2	3.50	5.8	3.50	5.7	3.50	5.8	3.50	5.5	3.50	5.9	3.50	6.0

Frekans alanındaki karşılaştırmalara ek olarak VADASE yönteminin zaman alanındaki performansını incelemek için, GNSS-tabanlı yöntemlerden elde edilen zaman serilerinin referans LVDT sensörü ile olan farklarının KOH değerleri

hesaplanmış ve elde edilen KOH değerlerinin görselleştirmesi Şekil 7.55'te ifade edilmiştir. Şekil incelendiğinde, çoklu-GNSS gözlemlerinin tüm tartışılan yöntemlere etkisi açıkça görülmektedir. Sarsma tablası ile üretilen tüm durumlarda, VADASE-GPS ile LVDT arasındaki maksimum farklar 12.4 mm'ye kadar ulaşırken, çoklu-GNSS gözlemleri ile gerçekleştirilen VADASE gözlemlerinde maksimum hata değeri 9.3 mm'dir. Bununla birlikte, çoklu-GNSS gözlemleri ile elde edilen VADASE çözümlerinin KOH değerleri ile VADASE-GPS çözümlerinin KOH değerleri karşılaştırıldığında %25'e varan iyileşme söz konusudur. Bu iyileşme değerleri rölatif yöntem için yaklaşık olarak %35'e, PPP tekniği içinse %25'e kadar uzanmaktadır. Ayrıca zaman alanı analizi sonuçları, VADASE yaklaşımının rölatif yöntem ve PPP tekniklerinden daha üstün bir performans gösterdiğini açıkça vurgulamaktadır. Bunun sebebi, daha önce de bahsedildiği gibi alıcı donanımı kaynaklı gürültüler ile ifade edilmektedir. Tüm deneylerden elde edilen KOH değerlerinin çubuk grafikleri incelendiğinde açıkça görülmektedir ki rölatif yöntem ve VADASE yaklaşımları sırasıyla en yüksek ve en düşük KOH değerlerini verirken, PPP tekniği bu yöntemlerin ortasında sonuç üretmiştir. Bunun nedeni, rölatif yöntemin çözümünde yöntemin doğası gereği kullanılan iki adet CHC I80 GNSS alıcısının gürültüsü sonucu etkilerken, PPP tekniğinde bir adet CHC I80 GNSS alıcısının gürültüsü sonucu etkilemektedir. VADASE yaklaşımının hem rölatif çözümden hem de PPP çözümünden iyi olmasının temel nedeni Leica GR30 alıcısının CHC I80 alıcısından daha az gürültü olması ve yöntemin doğası gereğidir. Zaman alanındaki sonuçlar, yüksek gürültülü GNSS alıcıları ile harmonik salınımların belirlenmesi çalışmalarında tek GNSS alıcısı ile deplasman bilgisi elde etmeye olanak sağlayan VADASE yönteminin etkinliğini açıkça göstermektedir. Ayrıca, harmonik salınım deneyleri mega/büyük depremler nedeniyle referans GNSS istasyonu verilerinin erişilemez veya kullanılamaz olması durumunda, mühendislik yapılarının doğal frekanslarını ve deplasmanlarını belirlemek için VADASE yaklaşımının güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, olası erken uyarı sistemlerinde kullanılma potansiyeli olan VADASE yaklaşımının şiddetli yer sarsıntıları kaynaklı sismik dalgaları tespit edebilme yeteneği de değerlendirilmiştir. Yöntemin performansının incelenmesi için sarsma tablası üzerinde 6.9 Mw Kobe depremi üretilmiştir. LVDT verileri, harmonik salınım deneylerine benzer bir şekilde sismik dalga formlarının

tespit edilmesinde VADASE yaklaşımının etkinliğini doğrulamak için referans olarak kullanılmıştır.

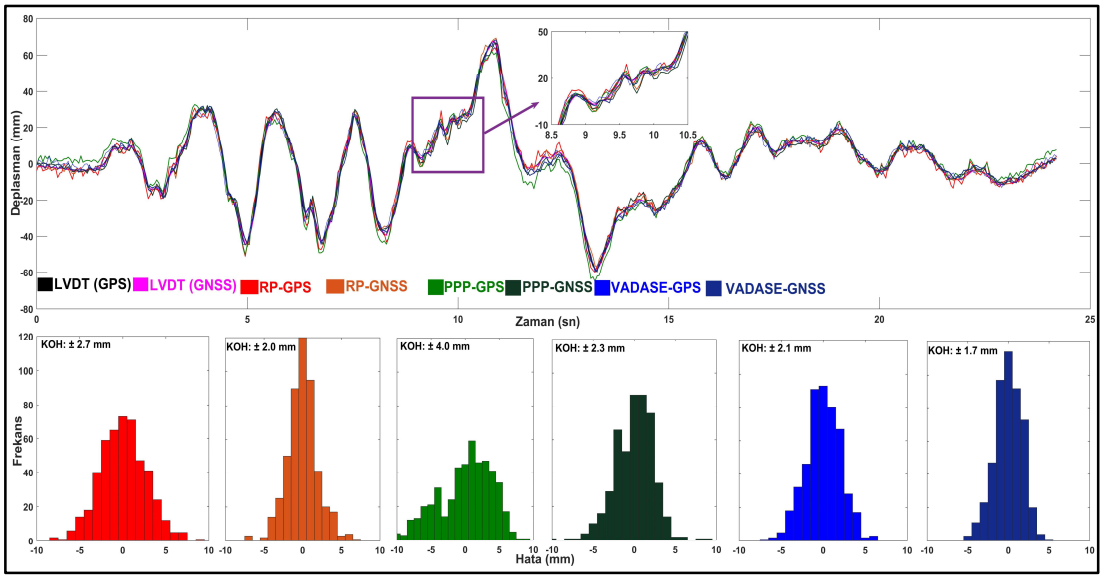


Şekil 7.55: Tüm durumlar için GNSS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri.

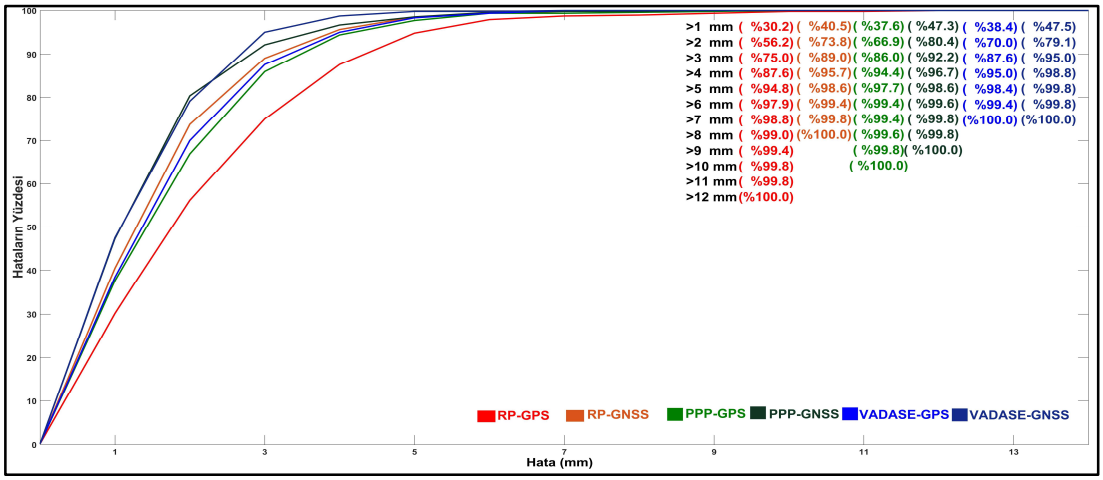
Şekil 7.56, Kobe depreminden seçilen bir kaydın simülasyonu ile GNSS-tabanlı yöntemlerden elde edilen deplasman zaman serilerinin yanı sıra, LVDT ve çalışma kapsamında tartışılan yöntemler arasındaki farkların histogramlarını içermektedir. Her iki uydu kombinasyonu ile elde edilen yöntemlerin LVDT ile iyi bir uyum sergilediği açıkça görülmektedir. Elde edilen farkların histogramlarına bakıldığında, rölatif yöntem ve VADASE yaklaşımlarının histogramlarının Gauss hata dağılımına uygun olduğu ve KOH değerlerinin GPS ve çoklu-GNSS için sırasıyla 2.7 mm, 2.0 mm, 2.1 mm ve 1.7 mm olduğu ifade edilmektedir. Bu sonuçlar çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açıkça göstermektedir. PPP-GPS tekniğinin histogramı Gauss hata dağılımından biraz uzaklaşsa da tespit edilen dalga formu dikkate alındığında yöntemin başarılı olduğu ve VADASE sonuçlarına benzer bir şekilde çoklu-GNSS gözlemlerinin PPP sonuçlarını iyileştirdiği açıktır.

LVDT ve çalışma kapsamında tartışılan üç yöntemden elde edilen Kobe depremi dalga formları arasındaki hataların yüzdesel dağılımı, her iki uydu kombinasyonu için, Şekil 7.57'de görselleştirilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, VADASE yaklaşımı diğer yöntemlerden biraz daha etkilidir. Rölatif-GPS ve rölatif-GNSS için LVDT'den olan farklar sırasıyla 12 mm ve 8 mm'nin altında kalırken, bu değerler PPP-GPS ve PPP-GNSS için 10 mm ve 9 mm'dir. VADASE

yaklaşımında ise her iki uydu kombinasyonunun LVDT'den olan farkları 7 mm'nin altında kalmıştır. Bu sonuçlar rölatif ve PPP yöntemlerine çoklu-GNSS'in katkısını açıkça vurgularken, VADASE yönteminin depremler sırasında zeminde oluşan sismik dalga formlarını gerçek-zamanlı olarak başarılı bir şekilde yakalayabileceğini net bir ileri sürmektedir. Kobe depremi simülasyonu deneyi sonuçları, depremler sırasında meydana gelebilecek can kayıplarını önlemeyi amaçlayan deprem/tsunami erken uyarı sistemlerinde, gerçek-zamanlı tek bir GNSS alıcısı ile izleme gerçekleştirme olanağı sağlayan VADASE yaklaşımının güvenli bir şekilde kullanılabileceğini açıkça işaret etmiştir.



Şekil 7.56: Kobe depremi simülasyondan elde edilen zaman serileri (üst) ve LVDT ile GNSS sensörleri arasındaki hataların histogram ve KOH değerleri (alt).



Şekil 7.57: Kobe depremi için LVDT ile GNSS sensörleri arasındaki hataların yüzdesel dağılımı.

7.7. Yapı Sağlığı İzlemeleri Uygulamalarında Yüksek Zamansal Çözünürlüklü GNSS-PPP ve PPP-AR Tekniklerinin Performansının İncelenmesi

Tez çalışmasının bu bölümü, sarsma tablası ile üretilen harmonik salınım ve deprem simülasyonları verilerinin GPS/GLONASS uydu kombinasyonlarına dayalı elde edilen geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile değerlendirilmesi ve yöntemlerin LVDT ve rölatif konum belirleme verileri ile karşılaştırılmasının analiz ve yorumlarını içermektedir. Yüksek zamansal çözünürlüklü geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin performansını yapı sağlığı izlemeleri ve GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performansını incelemek amacıyla Bölüm 6.1.1'de detaylarıyla açıklanan deneyler gerçekleştirilmiş, harmonik salınım testlerinde tasarlanan durumlardan sekiz tanesi incelenmek amacıyla seçilmiştir. Bölüm 6.2'de açıklanan deprem simülasyonlarından ise Kobe depremi, ilgili yöntemin güçlü yer sarsıntılarının neden olduğu dalga hareketlerini tespit etmedeki performansının test edilmesi amacıyla seçilmiştir. Geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin elde edilme şekli Bölüm 6.3'te açıklanırken, RP çözümlerinin nasıl elde edildiği ise yine aynı bölümde açıklanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde incelenen harmonik salınım hareketlerinin sahip olduğu genlik ve frekans değerleri tablo 7.19'da ifade edilmiştir.

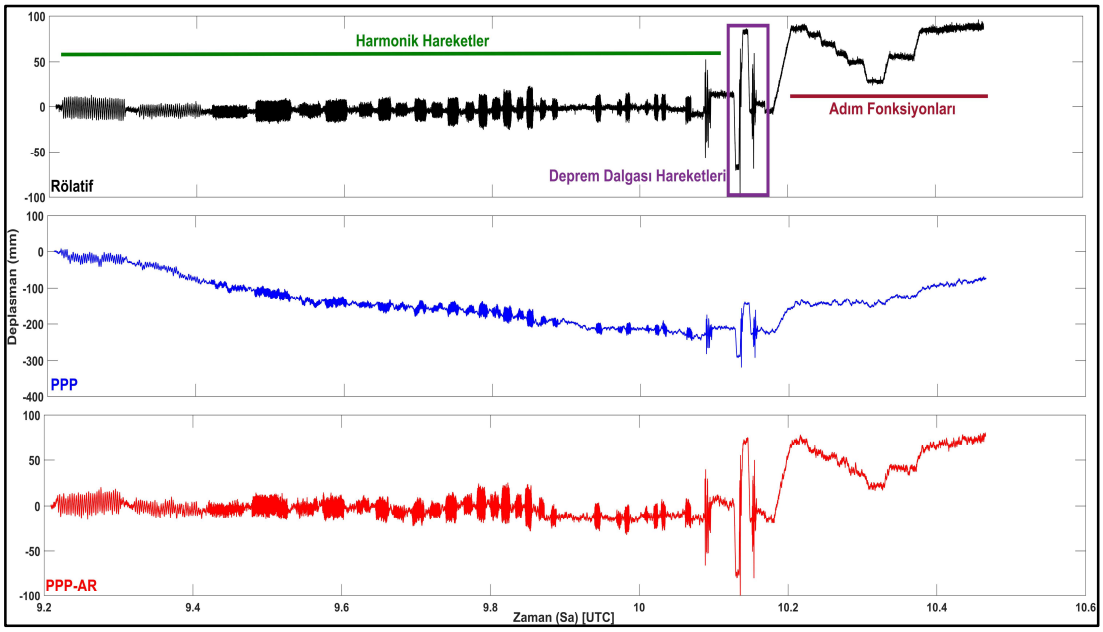
Tablo 7.19: Bu çalışma için seçilen her bir durumun salınım frekansı ve genliği.

		Salınım Genliği	
		5 mm	10 mm
Salınım Frekansı	0.1 Hz	Durum 1	-
	0.3 Hz	Durum 2	-
	0.6 Hz	Durum 3	-
	0.9 Hz	Durum 4	-
	1.0 Hz	Durum 5	-
	1.5 Hz	-	Durum 6
	2.0 Hz	-	Durum 7
	3.0 Hz	-	Durum 8

7.7.1. Sonuçlar ve Tartışma

Tez çalışmasının bu bölümünde çeşitli frekans ve genlik kombinasyonlarındaki harmonik hareketlerin, gerçek bir deprem simülasyonunun ve adım fonksiyonu

deneylerinin sonuçları yer almaktadır. Tüm deneyler için, LVDT verileri ve rölatif konum belirleme çözümleri, yüksek zamansal çözünürlüklü geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin performansını değerlendirmek için referans olarak kabul edilmektedir.

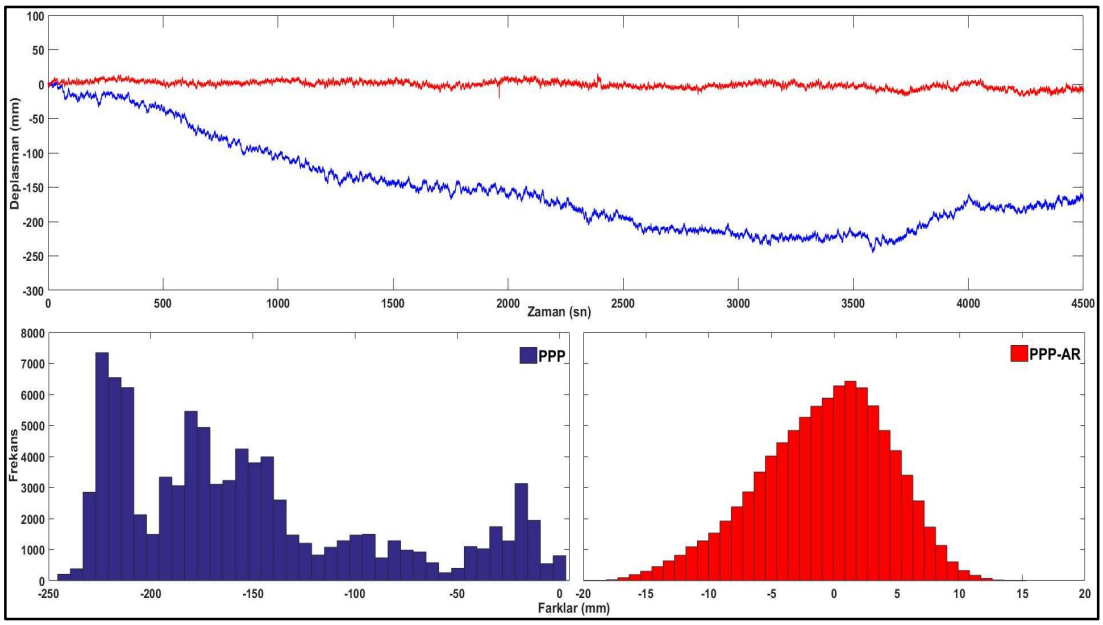


Şekil 7.58: Rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde edilen deplasmanlar.

Şekil 7.58 ardışık üç hareket türü için ilgili yöntemlerden türetilen deplasman zaman serilerini göstermektedir. Yukarıdan aşağıya zaman serileri, rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP-AR'ı ifade etmektedir. PPP-AR ve rölatif konum belirleme tekniklerinde türetilen deplasmanların çok tutarlı olduğu, buna karşılık geleneksel-PPP'den türetilen deplasmanların ek düşük frekanslı ve uzun dönemli dalgalanma gösterdiği görülebilir. Gleneksel-PPP tekniği ile karşılaştırıldığında, özellikle uzun bir süre için PPP-AR'dan türetilen deplasmanlar genellikle daha tutarlıdır ve rölatif konum belirleme tekniğinden türetilen deplasmanları daha iyi takip etmektedir.

Geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin uzun süreli konumlandırma performansını daha fazla incelemek için ilgili yöntemlerin rölatif konum belirleme tekniği ile olan farkları alınmış ve Şekil 7.59, bu iki yöntem ile rölatif konum belirleme yöntemi arasındaki farkların zaman serilerini ve histogramlarını içermektedir. PPP-AR sonuçlarının daha tutarlı olduğu, farklılıklarının -1.0 cm ile

1.0 cm arasında değiştiği ve Gauss hata dağılımını takip ettiği görülebilir. Öte yandan, PPP farkları 0 cm ila 25 cm arasında değiştiği ve Gauss hata dağılımını takip etmemektedir.



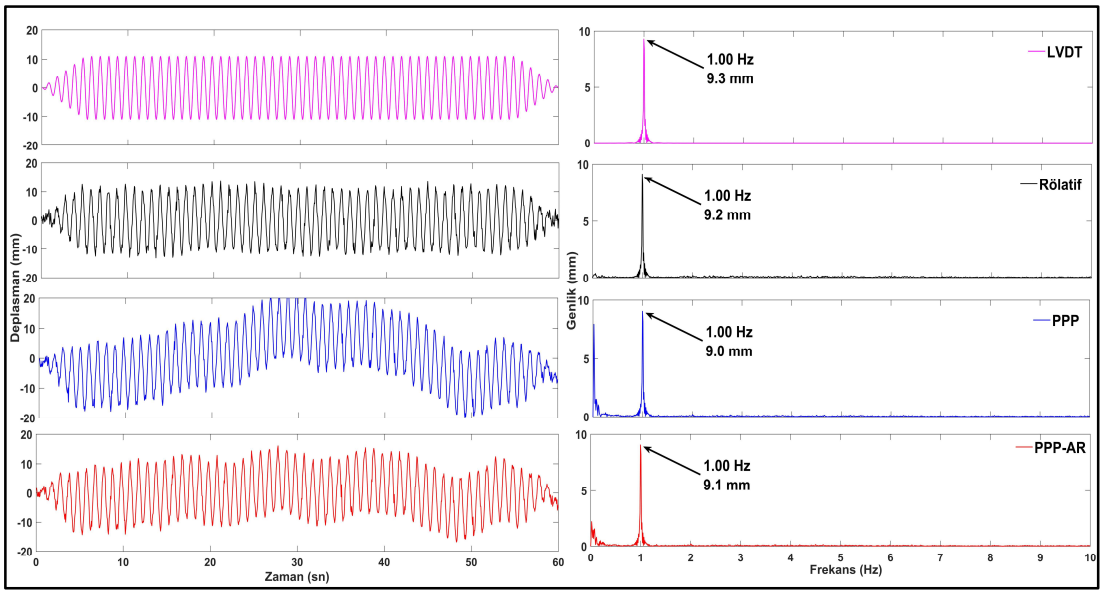
Şekil 7.59: Rölatif konum belirleme ile geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniğinden elde edilen deplasman farklarının zaman serileri ve histogramları.

7.7.2. Harmonik Salınım Testi Sonuçları

Tez çalışmasının bu uygulamasında seçilen tüm harmonik salınım hareketleri yüksek geçirgenli filtreleme tekniği ile filtrelenmiştir. Şekil 7.65, söz konusu yöntemleri karşılaştırmak için seçilen temsili bir durmun LVDT, rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP-AR sensörlerinden türetilen deplasman zaman serilerini ve FFT spektrumlarını göstermektedir. Şekil 7.60'tan geleneksel-PPP ve PPP-AR'dan türetilen deplasmanların, LVDT ve rölatif konum belirlemeden elde edilen deplasmanlar ile iyi bir uyum gösterdiği görülebilir. Bununla birlikte geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden türetilen deplasman zaman serileri, deney sırasında verilen frekans dışında bazı düşük frekanslı bileşenlerine de sahiptir. Ayrıca, bu durum için tüm yöntemlerden elde edilen salınım frekansları aynı olmakla birlikte buna karşılık karşılık gelen genliklerde küçük farklılıklar vardır. Geleneksel-PPP ve PPP-AR sonuçlarında görülen farklılıkar ve düşük frekanslı bileşen, multipath, taşıyıcı fazın rastgele gürültüsü ve yüksek dereceli iyonosferik hatalara

bağlanabilir. Ayrıca şekilden görülebileceği gibi Geleneksel-PPP tekniği PPP-AR'dan daha gürültülüdür.

Yüksek zamansal çözünürlüklü geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin performansını daha fazla incelemek için, FFT'den elde edilen her bir durumun tepe frekansı ve karşılık gelen genlik değerleri Tablo 7.19'da özetlenmiştir. Ayrıca Şekil 7.61, ilgili tüm sensörlerden FFT analizi sonucu elde edilen elde edilen tepe frekansının genlik değerlerini ve GNSS tabanlı yöntemler ile LVDT arasındaki farkları göstermektedir. Tablodan da görülebileceği gibi, LVDT, rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP-AR sensörlerinden belirlenen salınım frekansları tüm olaylar için mükemmel bir şekilde eşleşmektedir. Bununla birlikte, karşılık gelen genliklerde küçük farklılıklar vardır. LVDT ve PPP-AR arasındaki salınım frekansının genliğindeki farklılıklar 0.0 mm ile 0.5 mm, LVDT ve geleneksel-PPP arasındaki farklılıklar ise 0.1 mm ile 0.9 mm arasında değişmektedir. Tablo 7.20'de gösterildiği gibi, rölatif konum belirleme ile PPP-AR arasındaki salınım frekansının genliğindeki farklılıklar 0.1 mm ile 0.2 mm arasında değişirken, rölatif konum belirleme tekniği ile geleneksel-PPP arasındakiler 0.0 mm ila 0.6 mm arasında değişmektedir. Tüm yöntemler arasındaki salınım frekansının genliğindeki farklılıklar, yüksek salınım frekanslarında küçüktür; diğer yandan, düşük salınım frekanslarında farklar biraz daha büyüktür. Bu farklılıklar temel olarak doğal GNSS gürültüsünden kaynaklanmaktadır.

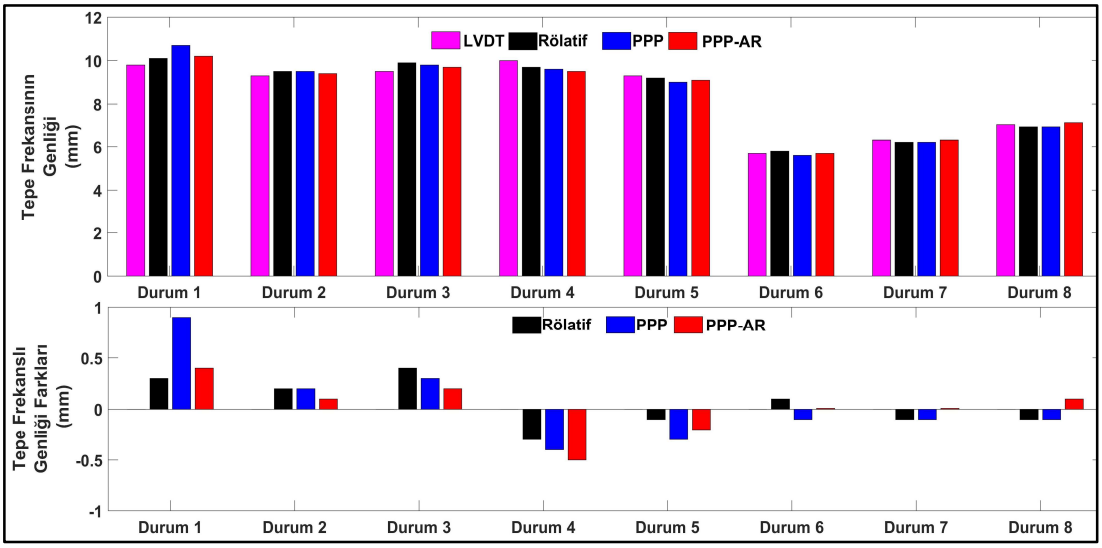


Şekil 7.60: Durum 5 için LVDT, rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde edilen deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

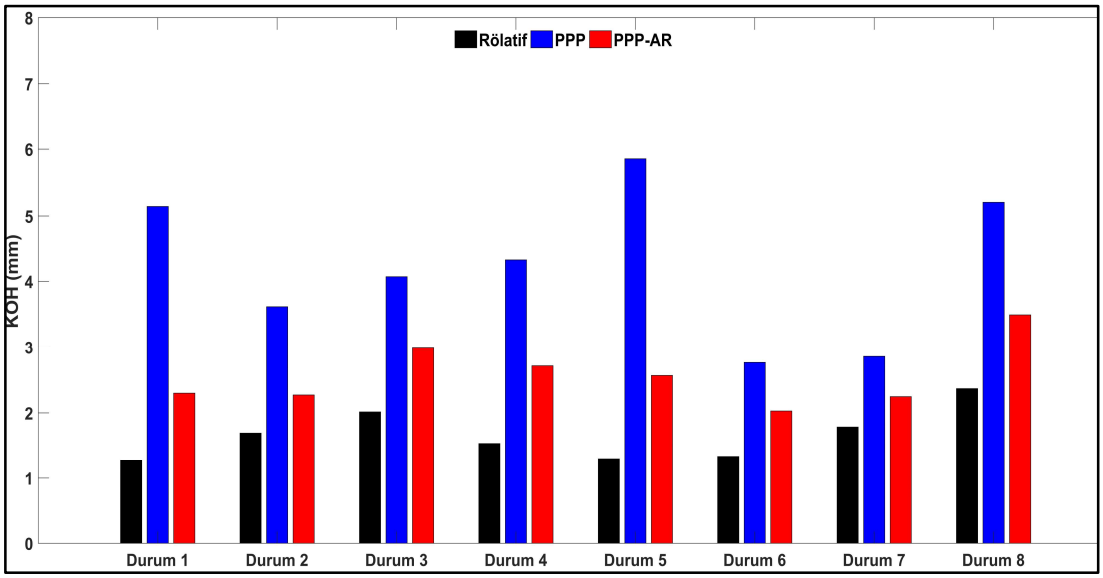
Geleneksel-PPP, PPP-AR ve rölatif konum belirleme tekniklerinin dinamik deplasmanları belirleyebilme doğruluğunu daha fazla değerlendirmek ve karşılaştırmak için, üç yöntemden elde edilen deplasmanlar ile LVDT verileri arasındaki farklar hesaplanmış ve her bir durumun KOH değerleri elde edilmiştir. Tüm durumlar için rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP AR çözümlerinin KOH değerleri Şekil 7.62'de görülebilir. Şekilde gösterildiği gibi, rölatif konum belirleme tekniği tüm durumlar için 1.2 mm ile 2.4 mm arasında değişen en küçük KOH değerlerine sahiptir. Gleneksel-PPP ile karşılaştırıldığında, PPP-AR'ın KOH değerleri tüm durumlar için daha küçüktür. PPP-AR tekniğinden elde edilen KOH değerleri 2.2 mm ila 3.5 mm arasında değişirken, geleneksel-PPP tekniğinden elde edilenler 2.9 mm ila 5.9 mm aralığındadır. Bu sonuçlar, PPP-AR yönteminin, doğru dinamik deplasmanları elde etme açısından geleneksel-PPP yöntemine göre daha üstün olduğunu göstermektedir.

Tablo 7.20: Tüm durumlar için tepe frekansı ve genliği (parantez içinde).

	LVDT	RP	PPP	PPP-AR
	Frekans (Hz) [Genlik (mm)]			
Durum 1	0.10 (9.8)	0.10 (10.1)	0.10 (10.7)	0.10 (10.2)
Durum 2	0.30 (9.3)	0.30 (9.5)	0.30 (9.5)	0.30 (9.4)
Durum 3	0.60 (9.5)	0.60 (9.9)	0.60 (9.8)	0.60 (9.7)
Durum 4	0.90 (10.0)	0.90 (9.7)	0.90 (9.6)	0.90 (9.5)
Durum 5	1.00 (9.3)	1.00 (9.2)	1.00 (9.0)	1.00 (9.1)
Durum 6	1.50 (5.7)	1.50 (5.8)	1.50 (5.6)	1.50 (5.7)
Durum 7	2.00 (6.3)	2.00 (6.2)	2.00 (6.2)	2.00 (6.3)
Durum 8	3.01 (7.0)	3.01 (6.9)	3.01 (6.9)	3.01 (7.1)



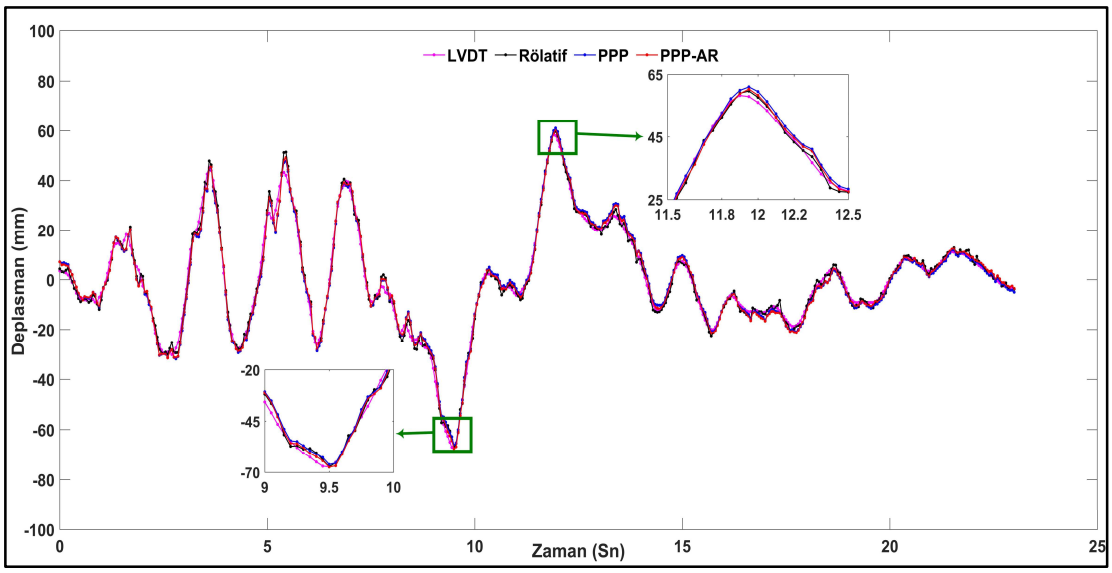
Şekil 7.61: LVDT ve GNSS çözümleri için FFT spektrumlarından elde edilen tepe frekanslarının genliği ve LVDT ile GNSS tabanlı yöntemler arasındaki farklılıklar.



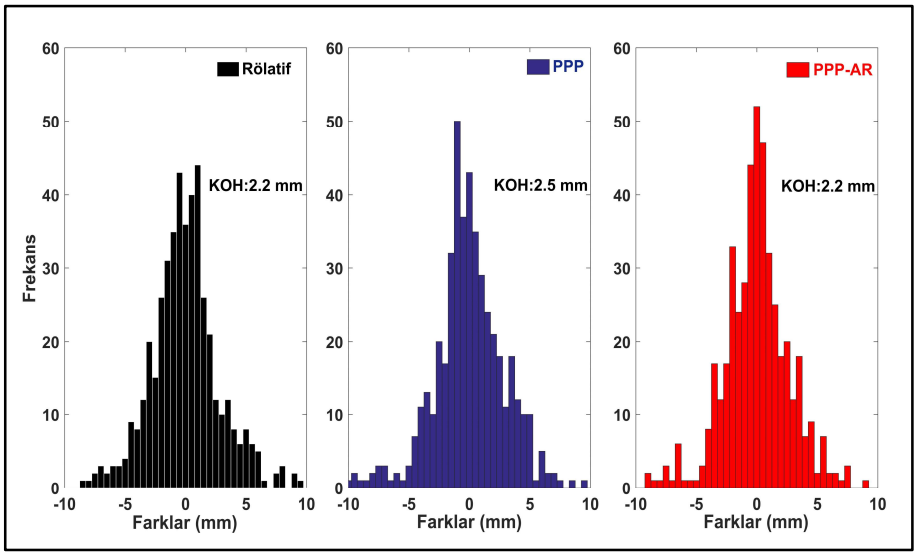
Şekil 7.62: Tüm durumlar için LVDT ve GNSS tabanlı yöntemlerin farkları arasındaki KOH değerleri.

7.7.3. Kobe Deprem Simülasyonu Testi Sonuçları

Şekil 7.63, Kobe depreminin seçilmiş bir kaydının simülasyonunun neden olduğu deplasman zaman serisini ve tartışılan dört yöntemin karşılaştırmalarını göstermektedir. Geleneksel-PPP, PPP-AR, rölatif konum belirleme ve LVDT'den tahmin edilen deplasman dalga biçimlerinin, dinamik yer hareketini yakalama açısından büyük ölçüde tutarlı olduğu görülebilir.



Şekil 7.63: Kobe deprem simülasyonunda geleneksel-PPP, PPP-AR, rölatif konum belirleme ve LVDT'den türetilen deplasmanların karşılaştırılması.



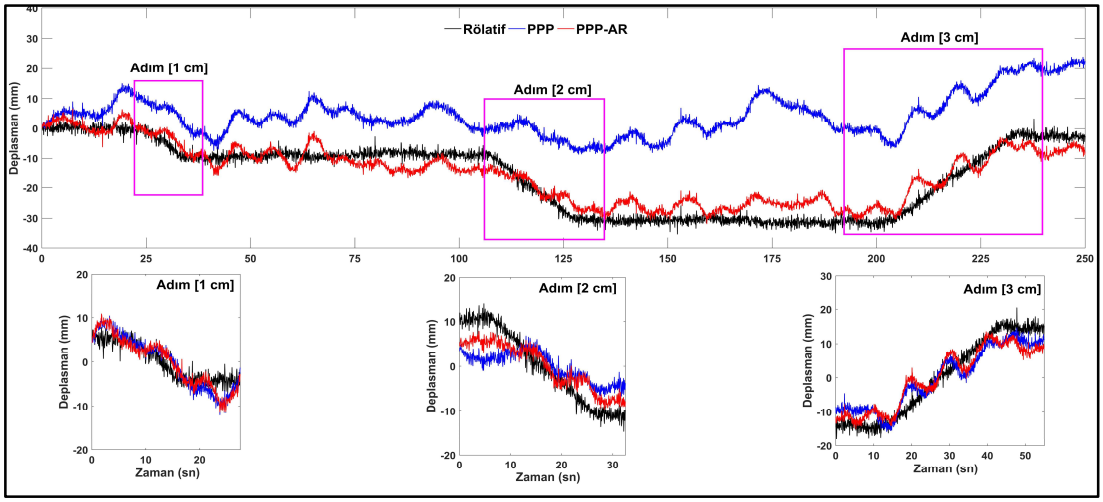
Şekil 7.64: Kobe deprem simülasyonu için LVDT ve GNSS tabanlı yöntemler arasındaki deplasman farklarının histogramları.

Buna ek olarak ilgili PPP yöntemlerinin ve rölatif konum belirlemenin dinamik hareketleri tespit edebilme performansını daha fazla araştırmak için, LVDT ile her bir GNSS tabanlı yöntemlerden elde edilen deplasman farklarının histogramları Şekil 7.64'de gösterilmektedir. GNSS tabanlı yöntemler ile LVDT arasındaki farklar ±10 cm arasında olmakla beraber, hesaplanan KOH değerleri dikkate alındığında PPP-AR ve rölatif konum belirleme teknikleri, geleneksel-PPP tekniğine kıyasla daha iyi sonuç vermiştir. Bu beklenen bir durum olmakla beraber PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü de net bir şekilde ifade etmektedir.

7.7.4. Adım Fonksiyou Testi Sonuçları

Şekil 7.65, sarsma tablası tarafından 1 ila 3 cm arasında oluşturulan adımların bir karşılaştırmasını göstermektedir. Karşılaştırma tez çalışmasının bu bölümünde tartışılan rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerini içermektedir. Doğruluk değerlendirmesi için bir referans olmak üzere rölatif konum belirleme tekniği seçilmiştir. Şekil 7.65'ten de görülebileceği gibi PPP-AR sonuçları, geleneksel-PPP sonuçlarından daha doğru bir şekilde rölatif konum belirleme tekniğini takip etmektedir. PPP-AR ve rölatif konum belirleme arasındaki maksimum fark ise yaklaşık 1.2 cm'dir, geleneksel-PPP tekniği için bu değer yaklaşık 4.7 cm'dir. Bu sonuçlar, PPP-AR yönteminin yarı statik veya statik deplasmanların tahmin edilmesi açısından geleneksel-PPP tekniğine kıyasla daha doğru olduğunu ve yarı

statik veya statik deplasmanları tespit etmede PPP-AR yönteminin üstünlüğünü göstermektedir.



Şekil 7.65: Adım fonksiyon testlerinde rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP AR tekniklerinden türetilen deplasmanların karşılaştırılması.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yüksek zamansal çözünürlüklü kinematik GNSS tekniğinde tek alıcı kullanılarak uygulanması mümkün olan farklı algoritmaların yapı sağlığı izlemelerinde ve GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performansının detaylı bir araştırması yapılmıştır. Çalışma ile, yatay yönlü dinamik salınım özelliği taşıyan mühendislik yapılarında ve deprem/tsunami gibi doğal afetler için kurulacak erken uyarı sistemlerinde, GNSS tabanlı farklı algoritmaların kullanılabilirliğinin test edilmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışması sonucunda, incelenen algoritmaların etkinlikleri detaylı bir şekilde ortaya çıkarılmıştır. Tez çalışmasının şu ana kadar yapılan çalışmalardan bir diğer ayrıcalığı ise, tek-frekanslı (SF) ikinci-nesil SBAS, SF-VA, VADASE, RT-PPP, geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin yapı sağlığı izlemeleri ve GNSS-sismolojisi çalışmaları açısından uygulanabilirliğinin incelenmesidir. Tek-frekanslı ve tek GNSS alıcılı deprem/doğal afet erken uyarı ve yapı sağlığı izleme sistemlerinin kurulum ve operasyon maliyetlerini ciddi anlamda düşüreceği açıktır. Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar, özellikle deprem/doğal afet erken uyarı sistemleri tesis etmek isteyen uygulayıcılar için büyük önem arz etmektedir. Böylece, daha ucuz bir sistem tasarımı yapılarak ülke kaynakları daha etkili bir şekilde kullanılacaktır.

Tez çalışmasının ilk uygulamasında Avustralya/Pasifik bölgesinde henüz test aşamasında olan ve herhangi bir internet bağlantısı gerektirmeden anlık olarak gerçek-zamanlı olarak PPP çözümü elde etmeye olanak sağlayan ikinci-nesil SBAS sisteminin dinamik hareketleri tespit etme yeteneği literatürde ilk kez test edilmiş ve incelenmiştir. Bu özelliği ile tez çalışması aynı zamanda sistemin performansını yapı sağlığı izlemeleri ve GPS-sismoloji uygulamaları açısından inceleyen öncü bir çalışmadır. Çalışma kapsamında 0.3 Hz ile 6.0 Hz frekans ve 5 mm ile 10 mm arasında genlik değerlerine sahip olan harmonik salınımlar ile 1995 Kobe ve 1999 Düzce depremleri tek eksenli sarsma tablası kullanılarak simüle edilmiştir. Her iki deney setinde de ikinci-nesil SBAS sisteminin performansı, çeşitli gerçek-zamanlı ve IGS-Final ürünlere dayalı geleneksel-PPP, rölatif konum belirleme ve LVDT sensörleri ile karşılaştırmalı olarak hem zaman hem de frekans alanında değerlendirilmiştir. Frekans alanındaki bulgular, ikinci-nesil SBAS sistemi kullanılarak mühendislik yapılarının doğal frekanslarının başarılı bir şekilde

belirlenebildiğini ve deprem kaynaklı sismik dalga formlarının tespit edilebildiğini net bir şekilde ortaya çıkarmıştır. Zaman alanı analizlerinde ise, ikinci-nesil SBAS sisteminin yörünge ve saat düzeltmelerinin belirli bir bölgede yer alan sınırlı sayıdaki analiz merkezlerinden gerçekleştirilen gözlemlerle üretilmesi ve çalışma alanının test bölgesinin dışında olmasından dolayı bu yöntem ile karşılaştırılan başka gerçek-zamanlı ürünlere dayalı geleneksel-PPP tekniklerinden biraz daha yüksek karasel ortalama hata değeri verdiği sonucuna varılmıştır. Ancak, SBAS destekli PPP yaklaşımından elde edilen deplasman bileşenlerine yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra LVDT ile oldukça iyi bir uyum sergilemiştir. İkinci-nesil SBAS sisteminin dinamik hareketleri algılama kabiliyetinin değerlendirildiği bu öncü çalışmanın sonuçları, henüz emekleme aşamasında olan bu sistem ile dinamik hareketlerin başarılı bir şekilde algılanabileceğini ve gelecekte sistemin doğruluğunda meydana gelebilecek bir artışla gerçek-zamanlı olarak dinamik hareketlerin izlenebileceğini açıkça ortaya koymuştur.

Tez çalışmasının ikinci uygulamasında ölçüm maliyetlerini önemli ölçüde azaltan SF-PPP ve gerçek-zamanlı şartlar altında sonradan değerlendirmeye olanak sağlayan RT ürünlerinin performansı incelenmiştir. Çalışma, IGS-Final tabanlı SF-PPP, IGS-RT tabanlı SF-PPP, MDC tabanlı SF-PPP ve ikinci-nesil SBAS destekli SF-PPP çözümlerini içermektedir. Çalışmada, mühendislik yapılarının doğal davranışını temsil eden 17 harmonik salınım deneyi ve Düzce depremi sarsma tablası kullanılarak simüle edilmiştir. Bu PPP tabanlı yöntemler, zaman ve frekans alanında LVDT sensörü ve SF-RP tekniği ile karşılaştırılmıştır. Frekans alanındaki harmonik salınım deneylerinin sonuçları, yüksek zamansal çözünürlüklü SF-PPP'nin SF-RP ile karşılaştırılabilir olduğunu ve LVDT ile iyi bir uyuma sahip olduğunu göstermektedir. Farklı RT ürünlerine dayalı SF-PPP sonuçlarının, Final ürünlere dayalı SF-PPP çözümlerine benzer çıktılar verdiği dikkat çekicidir. Frekans alanındaki bu analizler yapıların doğal frekanslarının tek-frekanslı bir alıcı ve gerçek-zamanlı ürünler kullanılarak güvenilir bir şekilde belirlenebileceğini göstermektedir. Ayrıca, tüm SF-PPP tabanlı çözümlerde saptanan tepe frekansına karşılık gelen genlik değerleri göz önüne alındığında 1 mm'den büyük bir hatanın olmadığı gözlemlenmiştir. Zaman alanı analizlerinde ise tek-frekanslı ve gerçek-zamanlı ürünlerin kullanılması nedeniyle SF-PPP sonuçlarının filtreleme gerektirdiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, tüm GNSS tabanlı yöntemlerin zaman serileri, uzun ve kısa vadeli dalgalanmaları ortadan kaldırmak için beşinci dereceden yüksek

geçirgenli bir Butterworth filtresi uygulanarak filtrelenmiştir. Filtreleme işleminden sonra KOH ve maksimum hata değerlerinde yüksek oranda iyileşme elde edilmiştir. Filtreleme işleminden sonra tüm deneylerde, tüm SF-PPP teknikleri için 4.6 mm'den yüksek KOH ve 14 mm'den büyük hata değeri tespit edilmemiştir. Ek olarak, Düzce deprem simülasyonu deneyi, SF-PPP yönteminin, mega deprem nedeniyle güçlü zemin dalga formularını yakalamak için etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Deprem simülasyon deneyinde, ikinci-nesil SBAS destekli PPP dışındaki tüm çözümlerin benzer çıktılar verdiği açıktır. Tez çalışmasının ikinci uygulamasında elde edilen bulgular, yapı sağlığı izleme uygulamalarında SF-PPP yönteminin rölatif konum belirleme yöntemi kadar verimli olduğunu göstermektedir. Çalışmada ayrıca gerçek-zamanlı yörünge ve saat ürünlerine dayalı PPP çözümlerinin yapıların doğal frekanslarını belirlemede nihai ürünler kadar başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu çalışma, SF-PPP tekniğinden elde edilen deplasman bilgisinin, yüksek geçirgenli filtre uygulanması durumunda doğru ve güvenilir deplasman bilgisi sağlayabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar yapı sağlığı izleme ve erken uyarı sistemlerinin tek-frekanslı alıcılarla oluşturulması durumunda, SF-PPP tekniğinin güvenilir olduğunu ve gerçek-zamanlı ürünlerle gerçekleştirilen PPP çözümlerinin umut verici sonuçlar üreteceği anlamına gelmektedir.

Çalışmanın üçüncü uygulamasında, SF-VA yaklaşımının inşaat mühendisliği yapılarında gözlemlenen dinamik deplasman ve epoklar arası deplasman tepkilerini ve bir depremin neden olduğu dalga formlarını algılayabilme yeteneğini test etmek için çeşitli harmonik salınım deneyleri ve Kobe depreminin bir simülasyonu gerçekleştirilmiştir. SF-VA tekniğinin dinamik deplasmanları belirleme alanındaki performansı, LVDT ve RP sensörleri ile karşılaştırılarak zaman ve frekans alanlarında değerlendirilmiştir. Epoklar arası deplasman sonuçları, yüksek zamansal çözünürlüklü SF-VA tekniğinin RP yönteminden biraz daha iyi olduğunu göstermiştir. Harmonik salınım deneyleri, SF-VA yönteminden türetilen deplasman değerlerinin baskın tepe frekanslarının, LVDT ve RP sensörleri ile elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu açıkça ifade etmiştir. SF-VA tekniği ile elde edilen epoklar arası deplasman zaman serisi herhangi bir filtre gerektirmediğinden, gerçek-zamanlı yapı sağlığı izleme çalışmaları için çok uygun bir yöntemdir. SF-VA yaklaşımı tarafından tahmin edilen deplasman değerleri referans LVDT ve RP sensörleri ile karşılaştırılmıştır. SF-VA yaklaşımından türetilen deplasman değerleri yayın yörünge ve saat hatalarına bağımlı olması nedeniyle düşük frekanslı

dalgalanmalara ve eğilimlere sahiptir [Fratarcangeli et al., 2018]. Bu nedenle, SF-VADASE'den türetilen deplasman değerlerindeki düşük frekanslı bileşenler, kesme frekansı 0.20 Hz olan beşinci dereceden bir Butterworth yüksek geçirgenli filtre uygulanarak filtrelenmiştir. Harmonik salınım deneyleri, RP ve SF-VA tekniklerinden türetilen salınım frekanslarının, LVDT tarafından elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. GNSS tabanlı iki yöntemle elde edilen salınım frekanslarının genlikleri, LVDT ile elde edilenlerden biraz farklıdır. Ancak, bu farklılıklar SF-VA için 0.5 mm değerini hem filtrelenmiş hem de filtrelenmemiş değerler için aşmamıştır. Deplasman farkları alınarak hesaplanan KOH değerleri, filtrelenmiş SF-VA'nin dinamik deplasmanları yakalamada RP tekniği ile tutarlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Uygulama kapsamında incelenen tüm durumlarda GPS/Galileo uydu kombinasyonu VA ve RP için sadece-GPS uydu sistemine dayalı çözümlere göre biraz daha doğru deplasman tahmini sağlamıştır. Harmonik hareket deney sonuçları, SF-VA yönteminin gerçek-zamanlı izleme ve hızlı yapı riski değerlendirme amaçları doğrultusunda yapı sağlığı izleme uygulamaları için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Kobe deprem simülasyonu deneyi, SF-VA tekniğinin Colosimo et al. ve Shu et al. tarafından halihazırda kanıtlandığı gibi, bir deprem nedeniyle oluşan dalga formlarının deplasman ve epoklar arası deplasmanlarının tespitinde etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir [Colosimo et al., 2011; Shu et al., 2018a, 2018b, 2020]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, SF-VA tekniğinin yapı sağlığı izleme uygulamalarında RP yöntemi kadar verimli olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bu çalışma, SF-VA yaklaşımının yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra doğru ve güvenilir deplasman bilgisi sağlayabildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar SF-VA yaklaşımının GNSS gözlemlerini başka bir veri işleme yöntemiyle değerlendirmeye gerek kalmadan hızlı risk değerlendirmesi ve mühendislik yapılarının durumunu değerlendirmek için hızlı ve güvenilir bir şekilde kullanılabileceği anlamına gelmektedir. SF-VA tekniği bağımsız bir tek-frekanslı GNSS alıcısına dayandığından, RP yöntemine göre dinamik deplasmanları izlemek için daha az maliyetlidir. Bu nedenle, bir SF-VA yaklaşımı algoritmasının gömülü olduğu bağımsız bir tek-frekanslı GNSS alıcısı, mühendislik yapılarının erken uyarı ve hızlı risk değerlendirmesini gerçekleştirmek için güçlü ve tamamlayıcı bir araç olacaktır.

Tez çalışmasının dördüncü uygulamasında kısa süreli dinamik hareketleri,

sismik dalga formlarını ve kalıcı deplasmanları tespit etmek için bağımsız bir GPS alıcısı kullanarak dinamik hareketlerin gerçek-zamanlı olarak izlenmesini sağlayan VADASE yaklaşımı ve RTS ürünlerine dayalı ve anlık olarak elde edilen RT-PPP yönteminin performansını sunmaktadır. RT-PPP ve VADASE tekniklerinin validasyonu, LVDT sensörü ve RP yönteminin sonuçları ile karşılaştırılarak sağlanmıştır. Frekans alanındaki harmonik salınım deneylerinin analizi, 8.0 Hz'e kadar olan frekansların RT-PPP ve VADASE yaklaşımlarıyla başarılı bir şekilde tespit edilebileceğini ortaya koymuş, ancak RT tabanlı tekniklerle elde edilen baskın frekansa karşılık gelen genlik değerleri mm düzeyinde biraz farklılık olduğunu göstermiştir. Ayrıca zaman alanındaki bulgular, VADASE yaklaşımının RT-PPP tekniğinden biraz daha iyi performans gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Buna ek olarak yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra RT-PPP ve VADASE yaklaşımlarının performansı birbirleriyle iyi bir uyum içindedir. Harmonik salınım deneyleri, yapı sağlığı izleme sistemlerinin RT-PPP veya VADASE yaklaşımlarıyla çalıştırılabileceğini ve bu yöntemlerle mühendislik yapılarının doğal frekanslarının ve dinamik deplasmanların tahmin edilebileceğini göstermiştir. Harmonik salınım deneylerine ek olarak, 1995 Mw 6.9 Kobe, 1989 M_w 6.9 Loma Prieta, 1940 M_w 6.9 El Centro ve M_w 7.2 Düzce depremleri, kuvvetli yer hareketlerinden kaynaklanan sismik dalga formlarını tespit etmede RT-PPP ve VADASE yaklaşımlarının performansını incelemek için sarsma tablası kullanılarak simüle edilmiştir. RT-PPP yöntemi Kobe ve Lome Prieta deprem deneylerinde diğer yöntemlere göre kısmen daha yüksek hata değerlerine sahipken, El-Centro ve Düzce deprem simülasyonlarında ise RP ve VADASE yöntemlerine biraz daha yakın sonuçlar üretmiştir. Tez çalışmasının bu kısmında eldilen bulgular, VADASE yönteminin RT-PPP yöntemine göre daha güvenilir ve daha doğru olduğunu göstermektedir. Bu üstünlüğün sebebi, RT-PPP yönteminin RTS uydu yörünge ve saat ürünlerine ve aynı zamanda internete olan bağımlılığı yöntemin sürekliliğini ve doğruluğunu etkiliyorken, VADASE yönteminin bunlara bağlı olmayıp sadece GNSS sinyallerinden gelen yayın efemerislerine bağlı olduğu gerçeğidir. Deprem simülasyon deneyleri, deprem/tsunami erken uyarı sistemlerinin bu iki yaklaşımla da çalıştırılabileceğini ortaya koymuştur. Adım hareketi deneyleri ise VADASE'nin kalıcı deplasmanları RT-PPP yönteminden biraz daha iyi tespit edebildiğini göstermiştir. RT-PPP tekniği, internet üzerinden gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltme akışlarına bağlı olduğundan, gecikme ve internet kesintileri meydana

gelebilir. Buna karşılık VADASE yaklaşımı, GNSS alıcısının hızını ve deplasmanını elde etmek için yayın efemerisini kullanır. Dolayısıyla bu, VADASE yaklaşımının gerçek-zamanlı uygulamalar için sürekli çözümler sağlayabileceğini göstermektedir.

Tez çalışmasının beşinci uygulamasında kısa vadeli yatay yönlü dinamik hareketleri, sismik dalga formlarınıve statik veya yarı statik deplasmanları gerçek-zamanlı, yakın gerçek-zamanlı ve sonradan-değerlendirme gerçek-zamanlı olarak tespit etmeye olanak sağlayan IGC01 tabanlı RT-PPP yönteminin performansı değerlendirilmiştir. Tasarlanan deneylerde, IGC01 ürünlerinden gerçek-zamanlı, yakın gerçek-zamanlı ve sonradan-değerlendirme gerçek-zamanlı olarak elde edilen dinamik hareketler, PPP-Final ve GPS'den bağımsız bir sensör olan LVDT kullanılarak doğrulanmıştır. Harmonik salınım deneylerinin frekans alanı analizi 8.0 Hz'e kadar olan frekansların RT-PPP teknikleri kullanılarak güvenilir bir şekilde belirlenebileceğini göstermiştir. Gerçek-zamanlı yaklaşımlarla belirlenen baskın frekansa karşılık gelen genlik değerleri mm düzeyinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Zaman alanındaki sonuçlar ise sonradan-değerlendirme RT-PPP tekniğinin diğer RT-PPP yaklaşımlarından biraz daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuç, RT-PPP tekniği internet bağlantısına ve gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerinin kalitesine dayanmakta olduğu için büyük oranda RT-PPP ve Yakın RT-PPP tekniklerinin zaman serilerinde görülen ani sıçramalardan kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, kombine IGC01 yörünge ve saat ürünlerinin kısa vadeli dinamik davranışları elde etmedeki doğruluğunun, gerçek-zamanlı IGC01 akışının doğruluğundan daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yüksek geçirgenli filtre uygulandıktan sonra, tüm RT-PPP tekniklerinin performansı LVDT ve PPP-Final ile iyi bir uyum içindedir. Harmonik salınım deneyleri, yapı sağlığı izleme sistemlerinin RT-PPP yaklaşımı ile çalıştırılabileceğini ve mühendislik yapılarının doğal frekanslarının bu yöntemle belirlenebileceğini açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca sahada meydana gelen bir olaydan hemen sonra yapı sağlığı izleme çalışmalarında Yakın RT-PPP yaklaşımının kullanılabilirliği bu çalışmada ortaya konulmuştur. Bu bulguya ek olarak, son gözlemden bir gün sonra kullanıcıya sunulan IGC01 ürünleri ile IGS-Final ürünleri için 14 gün beklemeye gerek kalmadan mühendislik yapılarının doğal frekanslarının belirlenebildiği açıkça kanıtlanmıştır. IGC01 tabanlı RT-PPP tekniklerinin kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu sismik dalga biçimlerini tespit etme etkinliği, dört farklı deprem simülasyonu ile test edilmiştir. Bu deneylerde, sonradan-değerlendirme RT-PPP yöntemi diğer

RT-PPP yaklaşımlarından önemli ölçüde daha iyi performans göstermiş ve sonuçlar RT-PPP yaklaşımının internete bağımlı bir yöntem olduğunu kanıtlamıştır. Ancak, RT-PPP ve Yakın RT-PPP yöntemi ile elde edilen dalga formları dikkate alındığında, bu iki yaklaşımın GNSS-sismoloji uygulamaları için umut vaat ettiği açıktır. Deprem simülasyon deneyleri, RT-PPP yaklaşımının deprem/tsunami erken uyarı sistemlerini çalıştırmak için kullanılabileceğini açıkça göstermiştir. Statik veya yarı statik deformasyonlarının gerçek-zamanlı izlenmesini ve tespitini amaçlayan adım fonksiyonu testleri, RT-PPP tekniklerinin kalıcı deplasmanları ±2 cm hassasiyetle tahmin edebildiğini ise açıkça göstermiştir. Çalışmanın sonuçları yüksek zamansal çözünürlüklü PPP yaklaşımını kullanılarak sismik dalga formlarının tespit edilebileceğini ve insan yapımı mega mühendislik yapılarının doğal frekanslarının sahada bir olay meydana geldiği anda, meydana geldikten hemen sonra veya meydana geldikten bir gün sonra yüksek hassasiyetle belirlenebileceğini göstermektedir.

Çalışmanın altıncı uygulaması bir GNSS alıcısı ile herhangi bir internet bağlantısı gerektirmeden dinamik hareketlerin gerçek-zamanlı olarak izlenmesini sağlayan VADASE yaklaşımının kısa süreli dinamik hareketleri ve sismik dalga formlarını tespit etme performansını ve çoklu-GNSS gözlemlerinin yönteme olan katkısını sunmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, 5 mm genlik değerine ve 0.25 Hz ile 3.5 Hz arasında salınım frekansına sahip 5 adet harmonik salınım deneyi ve M_w 6.9 büyüklüğündeki 1995 Kobe depreminin simülasyonu tek eksenli bir sarsma tablasında üretilmiştir. Tasarlanan deney setlerinde VADASE tekniği ile gerçek-zamanlı olarak elde edilen elde edilen dinamik hareketlerin doğrulanması rölatif konum belirleme, PPP ve GNSS-bağımsız LVDT sensörü ile sağlanmıştır. Frekans alanındaki harmonik salınım deneylerinin analizi, 3.5 Hz'e kadar olan frekansların, GPS ve çoklu-GNSS gözlemleri kullanılarak VADASE yaklaşımıyla başarılı bir şekilde tespit edilebileceğini ortaya koymuştur. Ancak, tespit edilen baskın frekansa karşılık gelen genlik değerleri mm düzeyinde farklılıklar vardır. Bu farklılıkların 2.8 mm'nin altında kaldığı düşünülürse tekniğin başarısı oldukça açıktır. VADASE tekniğinin harmonik salınımları algılama etkinliğini daha da detaylı incelemek için, frekans alanında gerçekleştirilen analizlere ek olarak zaman alanında da birtakım analizler gerçekleştirilmiştir. Bu alandaki bulgular, VADASE yaklaşımının rölatif yöntem ve PPP tekniklerinden biraz daha iyi performans gösterdiğini ve yaklaşıma çoklu-GNSS gözlemlerinin zaman alanındaki katkısını açıkça vurgulamıştır.

VADASE tekniğinin dinamik deplasmanların tespitinde rölatif yöntem ve PPP tekniğinden kısmen daha iyi performans göstermesi ve referans LVDT sensörüne daha yakın sonuçlar vermesinin nedenlerinden biri de VADASE için ayrı, rölatif yöntem ve PPP tekniği için ayrı alıcı ve anten donanımı kullanılmasıdır. Kullanılan iki farklı alıcı ve antenin sahip olduğu donanım kaynaklı gürültü seviyelerinin farklı olması, dinamik deplasmanların tespitini etkilemektedir. Harmonik salınım deneylerinin sonuçları, yapı sağlığı izleme sistemlerinin VADASE yaklaşımı ile işletilebileceğini ve bu yöntemle mühendislik yapılarının doğal frekanslarının belirlenebileceğini açıkça göstermiştir. VADASE yaklaşımının kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu sismik dalga formlarını tespit etme performansı M_w 6.9 büyüklüğüne sahip 1995 Kobe depremi simülasyonu ile incelenmiştir. Bu deneyde, VADASE yaklaşımı harmonik salınım testlerine benzer bir şekilde rölatif yöntem ve PPP tekniğinden biraz daha iyi performans gösterirken, çoklu-GNSS gözlemlerinin VADASE yaklaşımına olan katkısı doğrulanmıştır. Deprem simülasyon deneyi, deprem/tsunami erken uyarı sistemlerinin VADASE yaklaşımı ile işletilebileceğini ortaya koymuştur. Genel olarak bu çalışmanın sonuçları, gerçek-zamanlı izleme gerektiren ve meydana gelebilecek can kayıplarını önlemeyi amaçlayan erken uyarı ve/veya yapı sağlığı izleme sistemlerinde VADASE yaklaşımının rahatlıkla kullanılabileceğini göstermiştir.

Tez çalışmasının yedinci uygulamasında geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin kısa süreli dinamik davranışları belirleyebilme kabiliyeti incelenmiş ve bu amaç doğrultusunda sırasıyla harmonik salınım deneyleri, Kobe depremi simülasyonu ve adım fonksiyonu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde LVDT sensörü ve rölatif konum belirleme tekniği referans olarak ele alınmıştır. Harmonik salınım deneyleri, rölatif konum belirleme, geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinden türetilen salınım frekanslarının LVDT tarafından elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Tüm GNSS tabanlı yöntemlerle elde edilen salınım frekanslarının genlikleri, LVDT ile elde edilenlerden biraz farklıdır. Ancak bu farklılıklar, rölatif konum belirleme ve PPP-AR için 0.5 mm'yi, geleneksel-PPP içinse 0.9 mm'yi geçmemektedir. LVDT ve GNSS tabanlı yöntemler arasında hesaplanan farkların KOH değerleri ise dinamik hareketleri yakalamada yüksek zamansal çözünürlüklü PPP-AR yönteminin geleneksel-PPP tekniğinden daha doğru olduğunu ortaya koymuştur. Kobe deprem deneyi, geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin deprem dalgası hareketini tespit etmede

etkili olduğunu, buna karşın PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP yönteminden biraz daha iyi olduğunu göstermiştir. Harmonik salınım deneyine benzer şekilde, adım hareket deneyleri hem uzun hem de kısa periyotlarda kalıcı deformasyonların tespit edilmesinde PPP-AR yönteminin geleneksel-PPP yönteminden daha doğru olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemleri, mühendislik yapılarının doğal frekanslarını belirlemek için oldukça güçlü yöntemlerdir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm testlerin sonuçları, yapı sağlığı izleme çalışmalarında geleneksel-PPP ve de PPP-AR tekniklerinin rölatif konum belirleme yöntemleri kadar verimli olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında iki farklı deney veri seti kullanılarak farklı GNSS algoritmaların yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme kabiliyeti test edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen algoritmalar sırasıyla, tek- ve/veya çift-frekanslı ikinci-nesil SBAS, MADOCA, CNES ve IGS destekli RT-PPP, tek- ve çift-frekanslı Varyometrik Yaklaşım (VADASE), geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerdir. İncelenen algoritmalar göz önüne alındığında herhangi bir internet bağlantısına ihtiyaç duymadan dinamik hareketlerin elde edilmesine olanak sağlayan VADASE tekniği ön plana çıkmaktadır. Ayrıca RT-PPP tekniğinin de dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği oldukça umut vaadedicidir. Bunun yanı sıra, farklı ürünlere dayalı gerçekleştirilen sonradan-değerlendirme RT-PPP tekniği sonuçları göz önüne alındığında ilgili ürünler ile IGS-Final ürünler kadar hassas sonuç alındığı açıktır. Elde edilen bulgular, tez kapsamında önerilen ve hepsi gerçek-zamanlı olan tekniklerin performansını değerlendirmeye olanak sağlamış, gerçek-zamanlı ve tek GNSS alıcısı ile dinamik davranışların belirlenmesinde ilgili tekniklerin oldukça önemli ve etkili yöntemler olduğunu desteklemiştir. Tez kapsamında hedeflenen tüm amaçlara ulaşıldığı, önerilen yaklaşım ve algoritmaların gerçek-zamanlı izleme sistemlerinde etkili bir yöntem oldukları açıkça belirtilmiştir. Ancak sahip olunan imkanlar nedeniyle, gerçekleştirilen testlerde tüm algoritmaların bir arada değerlendirilmesi mümkün olmamıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan algoritmaların bir arada, aynı test senaryoları ve aynı uydu geometrisi ile değerlendirilmesinin bu alanda çalışan bilim adamı ve uygulayıcılara daha da destekleyici sonuçlar sağlayacağı açıktır. Çalışma kapsamında incelenen algoritmaların katkıları, avantaj ve dezavantajları göz önüne alındıgında yüksek yapıların ve deprem karakteristiklerinin analizlerinin yapılması ve değerlendirilmesinde igili tüm yöntemlerin mümkünse destekleyici GNSS harici

geoteknik sensörler ile eş zamanlı olarak kullanılması da göz ardı edilememelidir. Ülkemizin bulunduğu coğrafi konum sebebi ile gerçek-zamanlı izlemeler oldukça önemli olmakla beraber, bir doğal afet sonrası hasar verici yüklere maruz kalan yapıların durumunun değerlendirmesi de bu çalışmada önerilen algoritmalar ile kolaylıkla gerçek-zamanlı veya durum sonrası değerlendirilebilecektir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan algoritmların sürekli izleme sistemlerine entegrasyonu sonucunda gerçek bir yapının doğal frekansını ya da gerçek bir depremi tespit edebilme yetenekleri gelecek çalışmalarla ortaya çıkarılabilir. Ayrıca, köprü ve yüksek yapıların izlenmesi veya deprem erken uyarı sistemleri ile tez çalışması kapsamında tartışılan algoritmaların performansı ve de yapıların yükler altındaki davranışlarının karşılaştırılması gerçek-zamanlı olarak yapılabilir ve böylelikle gelecekte daha güvenilir ve ekonomik tasarımlar gerçekleştirilebilir. Mühendislik yapıları üzerine veya gerekli noktalara kurulacak bir tehlike uyarı sistemlerinin maliyeti, yapının inşası ve ileride deprem gibi bir doğal afetden dolayı yapıda kontrolsüzlükten oluşabilecek zararların maliyeti ve can kayıplarının ciddiyeti göz önüne alındığında çok az miktarda olacaktır. Bu sebeple, mühendislik yapılarında gerçek-zamanlı izleme sistemlerinin kurulması, yapı sağlığının değerlendirilmesi ve deprem erken uyarı sistemlerinin kurulması ve buna ilişkin yönetmeliklerin hazırlanması topluma her açıdan büyük yararlar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Alçay S., (2019), "Gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (rt-ppp) yönteminin konum belirleme performansının doğruluk ve hassasiyet bakımından incelenmesi", Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 121-133.

Avallone A., Marzario M., Cirella A., Piatanesi A., Rovelli, A., Di Alessandro C., D'Anastasio E., D'Agostino N., Giuliani R., Mattone M., (2011), "Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: the case of the Mw6.3 L'Aquila. (central Italy) event" Journal of Geophysıcal Research, 116, B02305.

Barrios J., Caro J., Calle J.D., Carbonell E., Pericacho J.G., Fernández G., Esteban V.M., Fernández M.A., Bravo F., Torres B., Calabrese A., Diaz A., Rodríguez I., Laínez M.D., Romay M.M., Jackson R., Reddan P.E., Bunce D., Soddu C., (2018), "Update on Australia and New Zealand DFMC SBAS and PPP System Results". In proceedings of ION GNSS+ 2018, pp. 1038-1067, Miami, Florida, ABD, 24-28 September.

Bauersima I., (1983), "NAVSTAR/global positioning system GPS (i). In Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald", vol. 7., Druckerei der Universitat Bern.

Benedetti E., Branzanti M., Biagi L., Colosimo G., Mazzoni A., Crespi M., (2014), "Global Navigation Satellite Systems seismology for the 2012 Mw 6.1 Emilia earthquake: Exploiting the VADASE algorithm", Seismological Research Letters, 85 (3), 649–656.

Beutler G., Rothacher M., Springer T., Kouba J., Neilan R.E., (1998), "The International GPS Service (IGS): an interdisciplinary service in support of earth sciences". 32nd COSPAR Scientfic Assembly, Nagoya, Japan, July 12 to 19.

Bezcioglu M., Yigit C.O., Bodur M.N., (2019a), "Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği", AKÜ FEMÜBİD, 19(1), 162-169.

Bezcioglu M., Yigit C.O., El-Mowafy A., (2019b), "Kinematic PPP-AR in Antarctic: Comparing Methods for Precise Positioning", Sea Technology, 60(2), 20-23.

Bilich A., Cassidy J.F., Larson K.M., (2002), "GPS seismology: Application to the 2002 Mw 7.9 Denali Fault Earthquake", Bulletin of the Seismological Society of America 98(2), 593-606.

Bisnath S., Gao Y., (2009), "Precise point positioning", GPS World, 20, 43–50.
Blewitt G., (2007), "Treatize on Geophysics" 3th Edition, Academic Press, Oxford, UK.

Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C., Plag H.-P., Stein S., Okal, E., (2009), "GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems",

Journal of Geodesy, 83, 335-343.

Blewitt G., Heflin M.B., Hurst K.J., Jefferson D.C., Webb F.H., Zumberge J.F., (1993), "Absolute far-field displacements from the 28 June 1992 Landers earthquake sequence", Nature, 361, 340-342.

Blewitt G., Heflin M.B., Webb F.H., (1992), "Global coordinates with centimeter accuracy in the International Terrestrial Reference Frame using GPS", Geophysical Research Letters 19(9), 853-856.

Bock Y., Agnew D.C., Fang P., Genrich J.F., Hager B.H., Herring T.A., Hudnut K.W., Wing R.W., Larsen S., Minster J., Stark K., Wdowinsky S., Wyatt F.K., (1993), "Detection of crustal deformation from the Landers earthquake sequence using continuous geodetic measurements", Nature, 361, 337-340.

Boehm J., Moeller G., Schindelegger M., Gregory P., Weber R., (2015), "Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)." GPS Solution, 19(3):433–441.

Bossler, J.D., Goad, C.C., Bender, P.L., (1980), "Using the Global Positioning System (GPS) for geodetic positioning", Bulletin Géodésique, 54 (4), 553–563.

Branzanti M., Colosimo G., Mazzoni A., (2017), "Variometric approach for real-time GNSS navigation: First demonstration of Kin-VADASE capabilities", Advances in Space Research, 59 (11), 2750-2763.

Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., Tarczyński, L., (2008), "The stuttgart TV tower displacement of the top caused by the effects of sun and wind", Engineering Structures, 30 (10), 2771–2781.

Brownjohn J.M., (2007), "Structural health monitoring of civil infrastructure", Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365, 589–622.

Cai C., (2009), "Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurement, Master Thesis, University of Calgary.

Cai C., Liu Z., Luo X., (2013), "Single-frequency Ionosphere-free Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations", The Journal of Navigation, 66 (03), 417-434.

Caissy M., Agrotis L., (2011), "Real-Time Working Group and Real-Time Pilot Project", Int GNSS Serv Tech Rep, 183–190.

Caissy M., Agrotis, L., Weber, G., Hernandez-Pajares M., Hugentobler U., (2012), "The International Gnss Real-Time Service", GPS World, 23(6), 52–58.

Capilla R.M., Berné J.L., Martín A., Rodrigo R., (2016), "Simulation case study of deformations and landslides using real-time GNSS precise point positioning technique", Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7(6), 1856-1873.

Chan W.S., Xu Y.L., Ding X.L., Xiong Y.L., Dai W.J., (2006), "Assessment of Dynamic Measurement Accuracy of GPS in Three Directions", Journal of Surveying Engineering, 132 (3),108–117.

Chang F.-K., (2003), "Structural Health Monitoring 2003: From Diagnostics & Prognostics to Structural Health Management", In Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA, 15-17 September, pp. 499–506.

Chen K., Ge M., Li X., Babeyko A., Ramatschi M., Bradke M., (2015), "Retrieving real-time precise co-seismic displacements with a standalone single-frequency GPS receiver", Advances in Space Research, 56 (4), 634–647.

Chen L., Zhao Q., Hu Z., Jiang X., Geng C., Ge M., Shi C., (2018), "Gnss Global Real Time Augmentation Positioning: Real-Time Precise Satellite Clock Estimation, Prototype System Construction And Performance Analysis", Advances in Space Research, 61, 367–384.

Chen, H-Y., Tung H., Hsu Y-J., Lee, H., (2019), "Evaluation of single frequency receivers for studying crustal deformation at the longitudinal Valley fault, eastern Taiwan", Survey Review, 52 (374), 454-462.

Choi K., Bilich A., Larson K.M., Axelrad P., (2004), "Modified sidereal filtering: Implications for high-rate GPS positioning", Geophysical research letters, 31(22), 1-4.

Choy S., Kuckartz J., Dempster A.G., Rizos C., Higgins M., (2017), "GNSS satellite-based augmentation systems for Australia", GPS Solutions, 21, 835–848.

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

Cogdell K., Reddan P., (2018), "Australia/New Zealand DFMC SBAS and Navigation Message Authentication". In proceedings of ION GNSS+, pp. 1068-1083, Miami, Florida, ABD, 24-28 September.

Collins P., (2008), "Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities", In: Proceedings of ION NTM-2008, pp 720–732, Institute of Navigation, San Diego, ABD, January.

Colosimo G., (2012), "Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine", PhD Thesis, Sapienza Universita Di Roma.

Colosimo G., Crespi M., Mazzoni A., (2011), "Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration", Journal of Geophysical Research Atmospheres, 116 (11), B11302.

Cosser E., Roberts G. W., Meng X., Dodson A.H., (2003), "The Comparison of Single Frequency and Dual Frequency GPS for Bridge Deflection and Vibration Monitoring", In: Proc of the Deformation Measurements and Analysis, 11th

International Symposium on Deformation Measurements, International Federation of Surveyors (FIG), Santorini, Greece, May.

Counselman, C.C., Shapiro, I.I., (1979), “Miniature interferometer terminals for earth surveying”, Bulletin Géodésique, 53 (2), 139–163.

Çelebi, M., (2000), “GPS in dynamic monitoring of long-period structures”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20 (5-8), 477–483.

Danchik R.J., (1998), “An Overview of Transit Development”, John Hopkins Technical Digest, 19(1), 18-26.

de Bakker P.F., Tiberius C.C.J.M., (2016), “Innovation: guidance for road and track—real-time single frequency precise point positioning for cars and trains”, GPS World Staff, 27(1), 66–72.

Dong D., Bock Y., (1989), “Global Positioning System network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California”, Journal of Geophysical Research, 94(B4), 3949-3966.

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C., (2008), “The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems”, Journal of Geodesy, 83(3), 191-198.

Dow J.M., Neilan R.E., Weber R., Gendt G., (2007) “Galileo and the IGS: taking advantage of multiple GNSS constellations”, Advances in Space Research, 39(10), 1545-1551.

El-Diasty M., Elsobeiey M., (2015), “Precise Point Positioning Technique With IGS Real Time Service (RTS) For Maritime Applications”, Positioning, 6, 71–80.

El-Mowafy A., Cheung N., Rubinov E., (2019a), “First results of using the second generation SBAS in Australian urban and suburban road environments”, Journal of Spatial Science, 65(1), 99-121.

El-Mowafy A., Deo M., Kubo N., (2016), “Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections”, GPS Solution, 21(3), 937-947.

El-Mowafy A., Deo M., Kubo N., (2017), “Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections”, GPS Solutions, 21(3), 937-947.

Elsobeiey M., Al-Harbi S., (2016), “Performance Of Real-Time Precise Point Positioning Using IGS Real-Time Service”, GPS Solution, 20, 565–571.

Erdoğan H., Akpınar B., Gülal E., Ata E., (2007), “Monitoring the dynamic behaviors of the Bosporus Bridge by GPS during Eurasia Marathon”, Nonlinear Processes in Geophysics, 14 (4), 513-523.

Farah A., (2017), “Variation of Static-PPP Positioning Accuracy Using GPS-Single Frequency Observations (Aswan, Egypt)”, Artificial Satellites, 52(2), 19-26.

Farrar C.R., Worden K., (2006), “An introduction to structural health monitoring” Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering, 365, 303–315.

Fortunato M., Ravanelli M., Mazzoni A., (2019), “Real-Time Geophysical Applications with Android GNSS Raw Measurements”, Remote Sensing, 11 (18), 2113.

Fratarcangeli F., Savastano G., D’Achille M.C., Mazzoni A., Crespi M., Riguzzi F., Devoti R., Pietrantonio, G., (2018), “VADASE Reliability and Accuracy of Real-Time Displacement Estimation: Application to the Central Italy 2016 Earthquakes”. Remote Sensing, 10 (8), 1201.

Gao Y., Shen X., (2002), “A new method for carrier phase based precise point positioning”, Navigation 49 (2), 109–116.

Ge L., (1999), “GPS Seismometer and its Signal Extraction”, 12th International Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institute of Navigation, Nashville.

Ge L., Han S., Rizos C., Ishikawa Y., Hoshiba M., Yoshida Y., Izawa M., Hashimoto N., Himory S., (2000), “GPS seismometers with up to 20 Hz sampling rate”, Earth Planets Space, 52, 881-884.

Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J., (2008), “Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) wih daily observations”, Journal of Geodesy, 82(7), 389–399.

Geng J., Meng X., Dodson A., Teferle F., (2010), “Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison”, Journal of Geodesy, 84(9), 569–581.

Geng, T., Xie X., Fang R., Su X., Zhao Q., Liu G., Li H., Shi C., Liu J., (2016), “Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw 7.8 Nepal earthquake”, Geophysical Research Letters, 43, 161-167.

Genrich J.F., Bock Y., (2006), “Instantaneous geodetic positioning with 10–50 Hz GPS measurements: noise characteristics and implications for monitoring networks”, Journal of Geophysıcal Research, 111, B03403.

Guier W. H., Weiffenbach G.C., (1998), “Genesis of satellite navigation”, John Hopkins Technical Digest, 18(2), 178-181.

Guo B, Zhang X, Ren X, Li X., (2015), “High-precision coseismic dis-placement estimation with a single-frequency GPS receiver”, Geophysical Journal International., 202(1), 612–623.

Hadas T, Bosy J., (2015), “IGS RTS Precise Orbits And Clocks Verification And Quality Degradation Over Time”, GPS Solutions, 19(1), 93–105.

Hadas T., Bosy J., (2015), “IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time”, GPS Solution, 19, 93–105.

Harvey B., (2007), “The rebirth of the russian space program, First Edition, Springer.

Hefty J., Gerha´tova´ L., (2012), “Potential of precise point positioning using 1 Hz GPS data for detection of seismicrelated displacements”, Acta Geodynamica et Geomaterialia, 9 (3), 303–313.

Heroux P., Ga Y., Kouba J., Lahaye F., Mireault Y., Collins P., Macleod K., Tetreault P., Chen K., (2004), “Products and Applications for Precise Point Positioning Moving Towards Real-Time”, Proc. of the ITM of the ION GNSS, Long Beach, CA, Sept 21-24, 1832 – 1843.

Hirahara K., Nakano T., Hoso Y., Matsuo S., Obana K., (1994), “An experiment for GPS strain seismometer”, Japanese Symposium on GPS, Tokyo, Japan, 15–16 December, pp. 67–75.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., (2008), "GNSS–Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo & more", 5th Edition, Springer Wien New York.

Huang, S.Q., Wang, J-X., (2015), “New data processing strategy for single frequency GPS deformation monitoring”, Survey Review, 47(344), 379-385.

Hung H.K., Rau R.J., Benedetti E., Branzanti M., Mazzoni A., Colosimo G., Crespi M., (2017), “GPS Seismology for a moderate magnitude earthquake: Lessons learned from the analysis of the 31 October 2013 ML 6.4 Ruisui (Taiwan) earthquake”, Annals of Geophysics, 60 (5), 0553.

Ibáñez D., Rovira-García A., Sanz J., Juan JM., Gonzalez-Casado G., Jimenez-Baños D., López-Echazarreta C., Lapin I., (2018), “The GNSS Laboratory Tool Suite (gLAB) updates: SBAS, DGNSS and Global Monitoring System”, 9th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (NAVITEC 2018), Noordwijk, The Netherlands. December 5-7.

Ji C., Larson K.M., Tan Y., Hudnut K.W., Choi K.H., (2004), “Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1-Hz GPS, strong motion, and teleseismic data” Geophysical Research Letters, 31, L17608.

Jo H., Sim S.H., Tatkowski A., Spencer Jr B.F., Nelson M.E., (2013), “Feasibility of displacement monitoring using low-cost GPS receivers”, Structural Control and Health Monitoring., 20(9), 1240-1254.

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

Kaloop M.R., Yigit C.O., Dindar A.A., Elshawary M., Hu J.W., (2020a), “Evaluation of the high-rate GNSS-PPP method for vertical structural motion”, Survey Review,

52 (371), 159-171

Kaloop M.R., Yigit C.O., Hu J.W., (2018), “Analysis of the Dynamic Behavior of Structures Using the High-Rate GNSS-PPP Method Combined with a Wavelet-Neural Model: Numerical Simulation and Experimental Tests”, Advances in Space Research, 61 (6), 1512-1524.

Kaloop R.M., Yigit C.O., El-Mowafy A., Dindar A.A., Bezcioglu M., Hu J.W., (2020b), “Hybrid Wavelet and Principal Component Analyses Approach for Extracting Dynamic Motion Characteristics from Displacement Series Derived from Multipath-affected High-rate GNSS Observations”, Remote Sensing, 12 (1), 79.

Kato T., Terada Y., Kinoshita M., Kakimoto H., Isshiki H., Matsuishi M., Yokoyama A., Tanno T., (2000), “Real-time observation of tsunami by RTK-GPS”, Earth, Planets and Space, 52 (10), 841–845.

Katsigianni G, Loyer S, Perosanz, F., (2019a), “PPP and PPP-AR kinematic post-processed performance of GPS-only, Galileo-only and multiGNSS”, Remote Sensing, 11 (21), 2477.

Katsigianni G., Perosanz F., Loyer S, Gupta M., (2019b), “Galileo millimeter-level kinematic precise point positioning with ambiguity resolution”, Earth, Planets and Space, 71, 76.

Khaki M., El-Mowafy A., (2020), "Characterising kinematic positioning errors when using satellite based augmentation system", Artificial Satellites, 55 (1), 1-19.

Kijewski-Correa T., Kilpatrick J., Kareem A., Kwon D-K., Bashor R., Kochly M., Young BS., Abdelrazaq A., Galsworthy J., Isyumov N., Morrish D., Sinn R.C., (2006), “Validating wind-induced response of tall buildings: synopsis of the chicago full-scale monitoring program”, Journal of Structural Engineering, 132 (10), 1509–1523.

Kouba J., (2009), “A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products”, 1st Edition, Geodetic Survey Division-Natural Resources Canada.

Kouba J., Heroux P., (2001), “Precise point positioning using IGS orbit and clock products”, GPS Solutions, 5 (2), 12-28.

Kouba, J., (2003), “Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS”, Studia Geophysica et Geodaetica, 47 (4), 741–755.

Larson K.M., (1991), “Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurements 1. Precision and Accuracy”, Journal of Geophysical Research 96(B10), 16547-16565.

Larson K.M., Bodin P., Gomberg J., (2003), “Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali Fault earthquake”, Science, 300 (5624), 1421–1424.

Larson K.M., Bodin P., Gomberg J., (2003), “Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali Fault earthquake”, Science, 300 (5624), 1421–1424.

Larson, K.M., (2009), “GPS Seismology”, Journal of Geodesy, 83, 227-233.

Laurichesse D., Mercier F., Berthias J., (2009a), "Real Time GPS Constellation and Clocks Estimation using Zero-difference Integer Ambiguity Fixing", Proceedings of the ION ITM 2009, January 2009, Anaheim, California.

Laurichesse D., Mercier F., Berthias J., Bijac J., (2008), “Real time zero-difference ambiguities blocking and absolute RTK”, In: Proceedings of the ION NTM, Institute of Navigation, pp 747–755, San Diego, ABD, January.

Laurichesse D., Mercier F., Berthias J., Broca P., Cerri L., (2009b), “Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination”, Navigation, Journal of the institute of Navigation, 56(2), 135-149.

Lee H., Lee J-O., Musa T.A., Chen H.Y., (2016), “A novel approach to design measurement models of single-frequency GPS receivers for cost-effective structural monitoring networks”, Survey Review, 49(354), 160-170.

Lee S-W., Yun S.H., Kim D.H., Lee D., Lee Y.J., Schutz, B.E., (2015), “Real-time volcano monitoring using GNSS Single-frequency receivers Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120 (12), 8551–8569.

Li M., Li W., Fang R., Shi C., Zhao Q., (2015), “Real-time high-precision earthquake monitoring using single-frequency GPS receivers”, GPS Solution 19 (1), 27–35.

Li P., Jiang X., Zhang X, Ge M., Schuh H., (2020), “GPS + Galileo + BeiDou precise point positioning with triple-frequency ambiguity resolution”, GPS Solution, 24 (3), 78.

Li X., Ge L., Ambikairajah E., Rizos C., Tamura Y., Yoshida A., (2006), “Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system”, GPS Solution ,10 (4), 233–247.

Li X., Ge M., Zhang H., Nischan T., Wickert J., (2013b), “The GFZ real-time GNSS precise positioning service system and its adaption for COMPASS”, Advances in Space Research”, 51(6), 1008–1018.

Li X., Ge M., Zhang H., Wickert J., 2013a. “A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning”, Journal of Geodesy, 87 (5), 405–416.

Li X., Ge M., Zhang X., Zhang Y., Guo B., Wang R., Klotz J., Wickert J., (2013), “Real-Time High-Rate Co-Seismic Displacement From Ambiguity-Fixed Precise Point Positioning: Application To Earthquake Early Warning”, Geophysıcal Research Letters, 40(2), 295– 300.

Li X., Guo B., Lu C., Ge M, Wickert J., Schuh H., (2014), “Real-time GNSS seismology using a single receiver”, Geophysical Journal International, 198(1), 72–89.

Li X., Zhang X., Ge M., (2011), “Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution”, Journal of Geodesy, 85 (3), 151–158.

Li X., Zheng K., Li X., Liu G., Ge M., Wickert J., Schuh H., (2019), “Real-time capturing of seismic waveforms using high-rate BDS, GPS and GLONASS observations: the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou earthquake in China”, GPS Solution, 23, 17.

Liu Z.Q., Wang J.X., (2014), “Realization and analysis of real-time precise point positioning based on ssr broadcast ephemeris corrections”, Science of Surveying and Mapping, 39 (1), 15–19.

MacDoran, PF., (1979), “Satellite Emission radio interferometric earth surveying series-GPS geodetic system”, Bulletin Géodésique, 53 (2), 117-118.

Malys S, Jensen P.A., (1990), “Geodetic Point Positioning with GPS Carrier Beat Phase Data from the CASA UNO Experiment”, Geophysical Research Letters, 17(5), 651-654.

Manzini, N., Orcesi A., Thom C., Clément A., Botton S., Ortiz M., Dumoulin J., Mandé F., (2018), “Structural Health Monitoring using a GPS sensor network”, In Proceedings of the 9th European Workshop on Structural Health Monitoring Series (EWSHM), Manchester, UK, 10–13 July, p. 12.

Marreiros J., P., R., (2012), “Kinematic GNSS Precise Point Positioning: Application to marine platforms”, Doctoral Thesis, University of Porto.

Masella E., Gonthier M., Dumaine M., (1997), “The RT-star: features and performance of a low-cost RTK OEM sensor”, Proceedings of ION GPS, 53–59, Kansas City, MO, 16–19 September.

McCarthy D.D., Petit G., (2003), “IERS conventions”, IERS technical note 32. Tech. rep., Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts for Kartographie und Geodasie, pp. 127.

Meng X., Dodson AH., Roberts GW., (2007), “Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers”, Engineering Structures, 29 (11), 3178–3184.

Meo M., Zumpano G., Meng X., Cosser E., Roberts G., Dodson A., (2006), “Measurements of dynamic properties of a medium span suspension bridge by using the wavelet transforms”, Mechanical Systems and Signal Processing, 20 (5), 1112-1133.

Mita A., Takhira S., (2003), “A smart sensor using a mechanical memory for structural health monitoring of a damage-controlled building”, Smart Materials and

Structures, 12, 204.

Montenbruck O., (2003), “Kinematic GPS positioning of LEO satellites using ionosphere-free single frequency measurements”, Aerospace Science and Technology, 7 (5), 396–405.

Montenbruck O., Gill E., (2000), “Satellite orbits: models, methods and applications” Springer.

Mosavi M.R., Azarbad M.R., (2013), “Multipath error mitigation based on wavelet transform in L1 GPS receivers for kinematic applications”, AEU – International Journal of Electronics and Communications, 67 (2013), 875-884.

Moschas F., Avallone A., Saltogianni V., Stiros S.C., (2014), “Strong motion displacement waveforms using 10-Hz precise point positioning GPS: An assessment based on free oscillation experiments”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 43(12),1853–1866.

Moschas F., Stiros S. C., (2011), “Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer”. Engineering Structures, 33 (1), 10–17.

Moschas F., Stiros S. C., (2014), “Three-dimensional dynamic deflections and natural frequencies of a stiff footbridge based on measurements of collocated sensors”, Structural Control and Health Monitoring, 21 (1), 23–42.

Moschas F., Stiros S., 2015. “Dynamic deflections of a stiff footbridge using 100-Hz GNSS and accelerometer data”, Journal of Surveying Engineering, 141 (4), 04015003.

Moss R., Matthews S., (1995), “In-service structural monitoring a state of the art review”, Structural Engineer, 73, 23–31.
Nakamura S., (2000), “GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements”, Journal of Structural Engineering, 126 (12), 1413–1419.

Nickitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S. C., (2006), “Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations, and promises”, Engineering Structures, 28 (10),1471–1482.

Nie Z., Liu F., Gao Y., (2020), “Real-time precise point positioning with a low-cost dual frequency GNSS device”, GPS Solution, 24(1), 9.

Nie Z.X., Gao Y., Wang Z.J., Ji S.Y., Yang Z.H., (2018), “An approach to GPS clock prediction for real-time PPP during outages of RTS stream”, GPS Solution, 22(1), 14–20.

Nie, Z., Liu, F., Gao Y., (2019), “Real-Time Precise Point Positioning With A Low-Cost Dual Frequency GNSS Device”, GPS Solution, 24, 9.

Nie, Z.; Gao, Y., Wang, Z.; Ji, S.; Yang H., (2018), “An Approach To GPS Clock

Prediction For Real-Time PPP During Outages Of RTS Stream", GPS Solution, 22, 14.

Niell A.E., (2006), "Interaction of Atmosphere Modeling and Analysis Strategy", In: Behrend D, K Baver (Eds.) IVS 2006 General Meeting Proceedings, NASA/CP 2006-xxxxxx, in press.

Nikolaidis R.M., Bock Y., de Jonge Paul J., Shearer P., Agnew D.C., Van Domselar M., (2001), "Seismic wave observations with the Global Positioning System", Journal of Geophysical Research, 106, 21897-21916.

Ning T., Johansson J.M., Scherneck H.G., Jarlemark P.O.J., Emardson R., (2009), "High-rate GNSS techniques for the detection of large seismic displacements" Geoscience and Remote Sensing Symposium, V359–V362, Cape Town, South Africa, 12–17 July.

Norrdine A., Kasmi Z., JörgBlankenbach J., (2016), "Step Detection for ZUPT-Aided Inertial Pedestrian Navigation System Using Foot-Mounted Permanent Magnet", IEEE Sensors Journal, 16(17), 6766 – 6773.

O'Brien P.J., Griffin J.M., (2007), "Global Positioning System Systems Engineering Case Study", Technical Report No: 34, Air Force Center for Systems Engineering, USA.

Odolinski R., Teunissen P.J.G., (2017), "Low-cost, high-precision, single-frequency GPS–BDS RTK positioning", GPS Solution, 21(1), 1315–1330.

Ogaja C., Rizos C., Wang J., Brownjohn J., (2001), "Toward the implementation of on-line structural monitoring using RTK-GPS and analysis of results using the wavelet transform", In Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, CA, USA, 19–22 March, pp. 19–22.

Ogaja, C., Li X., Rizos C., (2007), "Advances in structural monitoring with global positioning system technology: 1997–2006", Journal of Applied Geodesy, 1, 171 179.

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

Pan L., Cai C., Santerre R., Zhang X., (2017), ''Performance Evaluation of Single-frequency Precise Point Positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo", Journal of Navigation, 70(3), 465-482.

Pan Y., Geng J., Liu K., Chen X., Fang R., (2020), "Evaluation of rapid phase clock/bias products for PPP ambiguity resolution and its application to the M7.1 2019 Ridgecrest, California earthquake", Advances in Space Research, 65 (11), 2586-2594.

Park HS., Sohn HG., Kim IS., Park JH., (2008), "Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings", The Structural Design of Tall and

Special Buildings, 17 (1), 117–132.

Parkinson B., Stansell T., Beard R., Gromov K., (1995), “A History of Satellite Navigation”, Journal of the Institute of Navigation 41(1), 109-164.

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

Pehlivan H., Aydin Ö., Gülal E., Bilgili, E., (2013), “Determining the behaviour of high-rise structures with geodetic hybrid sensors”, Geomatics, Natural Hazards and Risk, 6 (8), 702-717.

Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P., (1992), “Numerical Recipes in C”, Second Edition, Cambridge university press.

Psimoulis P.A., Pytharouli S., Karambalis D., Stiros, S. C., 2008. “Potential of Global Positioning System (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures”, Journal of Sound and Vibration, 318 (3), 606–623.

Psimoulis P.A., Stiros S. C., (2013), “Measuring deflections of a Shorth-Span railway bridge using a robotic total station”, Journal of Bridge Engineering, 18 (2), 182-185.

Psimoulis P.A., Stiros S.C., (2008), “Experimental assessment of the accuracy of gps and rts for the determination of the parameters of oscillation of major structures”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 23 (5), 389–403.

Remondi B.W., (1985), “Performing centimeter-level surveys in seconds with GPS carrier phase: initial results” Navigation, 32 (4), 386–400.

Rizos C., (2002), “Network RTK research and implementation: A geodetic perspective”, The Journal of Global Positioning Systems, 1, 144–150.

Roberts GW., Meng X., Dodson A., (2004), “Integrating a Global Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges”, Journal of Surveying Engineering, 130 (2), 65–72.

RTCA-MOPS, (2006), “Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment”, rtca document 229-c.

Saastamoinen J., (1972), “Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites”, The use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph Series. 15, 247-251.

Saeki M., Hori M., (2006), “Development of an accurate positioning system using low-cost L1 GPS receivers”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21(4), 258–267.

Schaal R.E., Larocca A., (2009), “Measuring dynamic oscillations of a small span cable-stayed footbridge: Case study using L1 GPS receivers”. Journal of Surveying Engineering, 135(1), 33–37.

Seeber G. (1993), “Satellite Geodesy, Foun-dations, Methods and Applications”, 1th Edition, Walter de Gruyter.

Shen N., Chen L., Liu J., Wang L., Tao T., Wu D., Chen R., (2019), “A Review of Global Navigation Satellite System (GNSS)-Based Dynamic Monitoring Technologies for Structural Health Monitoring”, Remote Sensing, 11(9), 1001.

Shi J., Gao Y., (2014), “A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods”, GPS Solution, 18 (4), 519–528.

Shi J., Gao, Y., (2013), “A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods”, GPS Solutions, 18, 519–528.

Shu Y., Fang R., Geng J., Zhao Q., Liu J., (2018b), “Broadband velocities and displacements from integrated GPS and accelerometer data for high-rate seismogeodesy”. Geophysical Research Letters, 45, 8939– 8948.

Shu Y., Fang R., Li M., Shi C., Li M., Liu J., (2018a), “Very high-rate GPS for measuring dynamic seismic displacements without aliasing: performance evaluation of the variometric approach”, GPS Solution. 22(4), 121.

Shu Y., Shi Y., Xu P., Niu X., Liu J., (2017), “Error analysis of high-rate gnss precise point positioing for seismic wave measurement”, Advances in Space Research, 59, 2691-2713.
Sobreira H., Bougard B., Barrios J., Calle J.D., (2018), “SBAS Australian-NZ Test Bed: Exploring New Services”, Multi GNSS Asia Conference. Melbourne, Australia. 23-25 October.

Sohn H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., Nadler, B.R., Czarnecki, J.J., (2002), “A review of structural health monitoring literature: 1996–2001”, In Proceedings of the Third World Conference on Structural Control, Como, Italy, 7-12 April.

Söderholm S., (2005), “GPS L1 carrier phase double difference solution using low-cost receivers”, Proceedings of the ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, 376–380, 13–16 September, Long Beach, CA.

Sterle O., Stopar B., Pavlovčič Prešeren P., (2015), “Single-frequency precise point positioning: an analytical approach”, Journal of Geodesy, 89, 793-810.

Stewart M., Tsakiri M., (1998), “GLONASS Broadcast Orbit Computation”, GPS Solutions, 2(2), 16-27.

Su K., Jin S., (2020), "Real-Time Seismic Waveforms Estimation of the 2019 MW = 6.4 and Mw = 7.1 California Earthquakes With High-Rate Multi-GNSS Observations," IEEE Access, 8, 85411-85420.

Takahashi N., Ishihara Y., Ochi H., Fukuda T., Tahara J., Maeda Y., Kido M., Ohta Y., Mutoh K., Hashimoto G., Kogure S., Kaneda Y., (2014), "New Buoy Observation System For Tsunami And Crustal Deformation", Marine Geophysical Research, 35, 243–253.

Tamura Y., Matsui M., Pagnini LC., Ishibashi R., Yashida A., (2002), "Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90 (12-15), 1783–1793.

Tang X., Roberts G.W., Li X., Hancock C.M., (2017), "Real-Time Kinematic PPP GPS For Structure Monitoring Applied On The Severn Suspension Bridge, UK", Advances in Space Research, 60(5), 925-937.

Teunissen P., Montenbruck O., (2017), "Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems", First Edition, Springer.

Tsakiri M., Sioulis A., Piniotis G., (2018), "The use of low-cost, single-frequency GNSS receivers in mapping surveys", Survey Review, 5(358), 46-56.

Tu R., Liu J., Lu C., Zhang R., Zhang P., Lu X., (2017), "Cooperating the BDS, GPS, GLONASS and strong-motion observations for real-time deformation monitoring", Geophysical Journal International, 209(3), 1408–1417.

Tu R., Wang R., Ge M., Walter T.R., Ramatschi M., Milkereit C., Bindi D., Dahm T., (2013), "Cost-effective monitoring of ground motion related to earthquakes, landslides or volcanic activities by joint use of a single-frequency GPS and a MEMS accelerometer", Geophysical Research Letters, 40 (15), 3825–3829.
Vollath U., Buecherl A., Landau H., Pagels C., Wagner B., (2000), "Multi-base RTK positioning using virtual reference stations", In Proceedings of ION GPS, Salt Lake City, UT, USA, 19–22 September, pp. 123–131.

Vollath U., Landau H., Chen X., Doucet K., Pagels C., (2002), "Network RTK versus single base RTK–understanding the error characteristics", In Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, OR, USA, 24–27 September, pp. 24–27.

Wang G., Blume F., Meertens C., Ibanez P., Schulze M., (2012), "Performance of high-rate kinematic GPS during strong shaking: observations from shake table tests and the 2010 Chile earthquake", Journal of Geodetic Science, 2 (1), 15–30.

Wang J., Meng X.L., Qin, C.B., Yi, J.H., (2016), "Vibration frequencies extraction of the forth road bridge using high sampling gps data" Shock and Vibration, 2016, 18 pages.

Wang L., Li Z., Ge M., Neitzel F., Wang X., Yuan H., (2019), "Investigation Of The Performance Of Real-Time BDS-Only Precise Point Positioning Using The IGS Real-Time Service", GPS Solution, 23, 66.

Wang L., Li Z., Ge M., Neitzel F., Wang Z., Yuan H., (2018), "Validation And Assessment Of Multi-Gnss Real-Time Precise Point Positioning İn Simulated

Kinematic Mode Using İgs Real-Time Service", Remote Sensing, 10, 337.

Wang M., (2009), "PPP Ambiguity Resolution Method with Narrow-Lane Ambiguity Fractional Bias Eliminated", ENGO 607 seminar, University of Calgary, Canada, 26 June.

Wang M., Gao Y., (2006), "GPS un-differenced ambiguity resolution and validation", in proceeding of ION GPS/GNSS 2006, 26-29 September 2006, Fort Worth, TX.

Wang M., Gao Y., (2007), "An investigation on gps receiver initial phase bias and its determination", in proceeding of ION NTM, San Diego, ABD, 22-24 January.

Wang X., Chai H., Wang C., (2020), "A High-Precision Short-Term Prediction Method With Stable Performance For Satellite Clock Bias", GPS Solution, 24, 105.

Wang Z., Li Z., Wang L., Wang X., Yuan H., (2018), "Assessment of Multiple GNSS Real-Time SSR Products from Different Analysis Centers", ISPRS International Journal of Geo Information, 7(3), 85.

Web 1, (2021), https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 2, (2021), https://www.statista.com/statistics/865241/worldwide-gnss-and-positioning-market-revenue-by-segment/, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 3, (2021), https://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/Timation.html, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 4, (2021), https://igs.org/about/, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 5, (2021), https://www.iag-aig.org/doc/5cc8347ab8415.pdf, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 6, (2021), https://igs.org/network/, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 7, (2021), https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201096516-IGS-Formats, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 8, (2021), https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/Real-time_products.html, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 9, (2021), https://russianspacesystems.ru/wp- content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_eng_v5.1.pdf, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 10, (2021), https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Satellite_Coordinates_Computation, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 11, (2021), https://www.igs.org/products, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 12, (2021), https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp-info.php?locale=en, (Erişim Tarihi: 23/09/2021).

Web 13, (2021), https://www.hpcwire.com/2021/03/19/eqsim-on-leadership-supercomputers-gives-engineers-the-end-to-end-ability-to-assess-infrastructure-risk-from-earthquakes/, (Erişim Tarihi: 24/09/2021).

Web 14, (2021), https://www.unavco.org/highlights/2010/RealTimeGPSWhitePaper2010.pdf, (Erişim Tarihi: 24/09/2021).

Wu J., Wang K., El-Mowafy A., (2020), "Preliminary Performance Analysis of a Prototype DFMC SBAS Service over Australia and Asia-Pacific." Advances In Space Research, 66 (6), 1329-1341.

Xi R., He Q., Meng X., (2020), "Bridge monitoring multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study", Measurement, 168, 108303.

Xu L., Guo JJ., Jiang JJ., (2002), "Time–frequency analysis of a suspension bridge based on GPS", Journal of Sound and Vibration, 254 (1), 105–116.

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

Yi J., Zhang JW., Li QS., (2013a), "Dynamic characteristics and wind-induced responses of a super-tall building during typhoons", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 121, 116–130.

Yi T., Li H., Gu M., (2010a), "Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring", Science China Technological Sciences, 53, 2597–2610.

Yi T., Li H., Gu M., (2010b), "Full-scale measurements of dynamic response of suspension bridge subjected to environmental loads using GPS technology", Science China Technological Sciences, 53, 469–479.

Yi T., Li H., Gu M., (2013b), "Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge", Measurement, 46 (1), 420-432.

Yigit C. O., (2016), "Experimental assessment of post processed kinematic precise point positioning method for structural health monitoring", Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7 (1), 363-380.

Yigit C.O., El-Mowafy A., Bezcioglu M., Dindar A.A., (2020), "Investigating the effects of ultra-rapid, rapid vs. final precise orbit and clock products on high-rate GNSS-PPP for capturing dynamic displacements", Structural Engineering and Mechanics, 73 (4), 427-436.

Yigit C.O., Eralp G., (2017), "Experimental testing of high-rate GNSS precise point

positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures", Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8 (2), 893-904.

Yigit C.O., Li X., Inal C., Ge L., Yetkin M., (2010), "Preliminary evaluation of precise inclination sensor and GPS for monitoring full-scale dynamic response of a tall reinforced concrete building", Journal of Applied Geodesy, 4 (2), 103–113.

Yiğit C.O., (2010), "Yüksek yapıların farklı sensörler ile tam ölçekli izlenmesi ve dinamik parametrelerin belirlenmesi", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi.

Yu J., Meng X., Shao X., Yan B., Yang L., (2014), "Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode GNSS processing", Engineering Structures, 81, 432-443.

Zang J., Xu C., Li X., (2020), "Scaling earthquake magnitude in real time with high-rate GNSS peak ground displacement from variometric approach", (2020), GPS Solution, 24, 101.

Zhang Y., Chen J., Gong X., Chen Q., (2020), "The update of BDS-2 TGD and its impact on positioning." Advances in Space Research, 65(11), 2645-2661.

Zhang Y., Nie Z., Wang Z., Wu H., Xu X., (2021), "Real-Time Coseismic Displacement Retrieval Based on Temporal Point Positioning with IGS RTS Correction Products", Sensors, 21, 334.

Zheng K., Zhang X., Li, X., Li P., Sang J., Ma T., Shuh H., (2019), "Capturing coseismic displacement in real time with mixed single- and dual-frequency receivers: application to the 2018 Mw7.9 Alaska earthquake", GPS Solution, 23, 9.

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, 102, 5005-5017.

ÖZGEÇMİŞ

Mert BEZCİOĞLU 2016 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Harita Mühendisliği bölümünden, 2018 yılında ise Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans programından mezun oldu. Yine aynı yılda, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2017 yılından beri aynı kurumda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A1: Tez Çalışması Kapsamındaki Uluslararası SCI/SCI-E Indekslerinde Taranan Yayın Listesi

Yigit C.O., El-Mowafy A., Dindar A.A., Bezcioglu M., Tiryakioglu I., (2021), "Investigating Performance of High-Rate GNSS-PPP and PPP-AR for Structural Health Monitoring: Dynamic Tests on Shake Table", Journal of Surveying Engineering, 147(1), 05020011:1-14.

Bezcioglu M., Yigit C.O., Mazzoni A., Fortunato M., Dindar A.A., Karadeniz B., (2022), "High-Rate (20 Hz) Single-Frequency GPS/GALILEO Variometric Approach for Real-Time Structural Health Monitoring and Rapid Risk Assessment", Advances in Space Research, 70(5), 1388-1405.

Bezcioglu M., Yigit C.O., Karadeniz B., Dindar A.A., El-Mowafy A., Avci, O., "Evaluation of Real-Time Variometric Approach and Real-Time Precise Point Positioning in monitoring dynamic displacement based on High-rate (20 Hz) GPS Observations", GPS Solutions, Under Review (Second Revision).

Bezcioglu M., Yigit C.O., El-Mowafy A., Wang, K., Dindar A.A., "Usability of High-Rate Single-Frequency Precise Point Positioning (SF-PPP) in the detection of structural displacements and ground motions", Draft Manuscript.

Bezcioglu M., Yigit C.O., El-Mowafy A., Wang, K., Dindar A.A., "The Second Generation SBAS-Aided Real-Time High-Rate GPS PPP for Early Hazard Warning and Dynamic Motion Detection", Draft Manuscript.

Bezcioglu M., Yigit C.O., Dindar A.A., "A Comparative Analysis of RT-PPP Technique Based on Different IGS Products for Determining Dynamic Behaviors in Horizontal Direction", Draft Manuscript.

Ek A2: Tez Çalışması Kapsamındaki TR Dizinde Taranan Yayın Listesi

Bezcioğlu M., Karadeniz B., Yiğit C.Ö., Dindar A.A., Bezir F., Avcı, Ö., (2022), "Gerçek-zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Dinamik Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi", Harita Dergisi, 167, 1-11.

Ek B: Uluslararası SCI/SCI-E Indekslerinde Taranan Diğer Yayınlar Listesi

Bezcioglu M., Yigit C.O., El-Mowafy A., (2019), "Kinematic PPP-AR in Antarctic: Comparing Methods for Precise Positioning", Sea Technology, 60(2), 20-23.

Kaloop R.M., Yigit C.O., El-Mowafy A., Dindar A.A., Bezcioglu M., Hu J.W., (2020), "Hybrid Wavelet and Principal Component Analyses Approach for Extracting Dynamic Motion Characteristics from Displacement Series Derived from

Multipath-affected High-rate GNSS Observations", Remote Sensing, 12(1), 79.

Yigit C.O., El-Mowafy A., Bezcioglu M., Dindar A.A., (2020), "Investigating the effects of ultra-rapid, rapid vs. final precise orbit and clock products on high-rate GNSS-PPP for capturing dynamic displacements", Structural Engineering and Mechanics, 73(4), 427-436.

Kaloop R.M., Yigit C.O., El-Mowafy A., Bezcioglu M., Dindar A.A., Hu J.W., (2020), "Evaluation of multi-GNSS high-rate relative positioning for monitoring dynamic structural movements in the urban environment", Geomatics Natural Hazards and Risk, 11(1), 2239-2262.

Ek C: Uluslararası E-SCI Indeksinde Taranan Diğer Yayınlar Listesi

Pehlivan H., Bezcioglu M., Yılmaz M. (2019), "Performance of Network RTK Correction Techniques (FKP, MAC and VRS) Under Limited Sky View Condition", International Journal of Engineering and Geosciences, 4(3), 106-114.

Ek D: Ulusal TR Dizinde Taranan Diğer Yayınlar Listesi

Bezcioğlu M., Yiğit C.Ö., Bodur M.N. (2019), "Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği", AKÜ FEMÜBİD, 19(1), 162-169.

Karadeniz B., Bezcioğlu M., Bilgen Ö.F., Yiğit, C.Ö. (2021), "GPS/Galileo PPP-AR ve PPP Yöntemlerinin Doğruluklarının Gözlem Süresi ve Uydu Kombinasyonları Açısından İncelenmesi", AKÜ FEMÜBİD, 21(6), 1377-1392.

Karadeniz B., Bezcioğlu M., Yiğit, C.Ö. Dindar A.A., Avcı, Ö., (2022), "Gerçek-Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Düşey Yönlü Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi", AKÜ FEMÜBİD, 21(6), 1377-1392.

Ek E: Uluslararası Sözlü Diğer Tam Metin Bildiri Listesi

Yigit C.O., Dindar A.A., Bezcioglu M., El-Mowafy A. (2018), Evaluation of High-Rate GNSS-PPP for Monitoring Structural Health and Seismogeodesy Applications, 81VI. FIG Congress, 6-11 May 2018, Istanbul, Turkey.

Yigit C.O., Dindar A.A., El-Mowafy A., Bezcioglu M., Gikas V. (2019) Investigating the ability of high-rate GNSS-PPP for determining the vibration modes of engineering structures: small scale model experiment, 4th Joint Symposium on Deformation Monitoring, JISDM 2019, 15-17 May, Athens, Greece.

Bezcioglu M., Karadeniz B., Yigit C.O., Dindar A. A., Tiryakioglu I., Aktug B. (2021) Real-Time Precise Point Positiong (RT-PPP) for Capturing Seismic Waveform and Coseismic Displacement, International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ICEES), 13-15 October 2021, Gebze, Turkey.

Ek F: Ulusal Sözlü Diğer Özet Bildiri Listesi

Karadeniz B., Bezcioğlu M., Yiğit C.O., Dindar A. A., Tiryakioğlu I., Akpınar B., Aktuğ B. (2021) Gerçek-zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) Yöntemi ile Deprem Kaynaklı Yüzey Dalga Hareketlerinin İzlenebilirliğinin İncelenmesi, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2021 Yılı Bilimsel Toplantısı, 25-27 Kasım 2021, Ankara, Türkiye.

Ek G: Yer Aldığı Projeler

114Y581, Türkiye'de Bölgesel Geoit Modelinin İyileştirilmesinde Yöntem Araştırması ve Güncel Uydu Gravite ve Altimetre Verilerinin Katkılarının Belirlenmesi, 1001- Araştırma, Bursiyer.

TAE-2 Antarktika'ya Bilim Üssü Kurulması Projesi, Araştırmacı.

2020-A-102-20 Nolu Gebze Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Bursiyer.

Ek H: Yurt Dışı Deneyimleri

TAE-2 Antarktika'ya Bilim Üssü Kurulması Projesi Kapsamında Bulgarian Antarctic Base "St. Kliment Ohridski", Araştırmacı (22.01.2018-23.05.2018, 2 Ay)

GTU Personel Erasmusu Hareketliliği Kapsamında National Technical University of Athens, School of Rural and Surveying Engineering, Araştırmacı (13.05.2019-09.06.2019, 28 Gün).