

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

**GERÇEK ZAMANLI GPS PPP VE VADASE YÖNTEMLERİNİN**  
**DÜŞEY YÖNLÜ DİNAMİK HAREKETLERİN İZLENMESİNDE**  
**KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

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

**GEBZE**  
**2023**

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

**GERÇEK ZAMANLI GPS PPP VE VADASE**  
**YÖNTEMLERİNİN DÜŞEY YÖNLÜ**  
**DİNAMİK HAREKETLERİN İZLENMESİNDE**  
**KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

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

**DANIŞMANI**  
**PROF. DR. CEMAL ÖZER YİĞİT**

**GEBZE**

**2023**

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

**INVESTIGATION OF THE USE OF REAL TIME  
GPS PPP AND VADASE METHODS IN  
MONITORING VERTICAL DYNAMIC MOTIONS**

**BARIŞ KARADENİZ**

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

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

**THESIS SUPERVISOR  
PROF. DR. CEMAL ÖZER YİĞİT**

**GEBZE**

**2023**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/01/2023 tarih ve 2023/04 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/01/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Barış KARADENİZ'in tez çalışması Harita Mühendisliği Anabilim Dalında, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT

ÜYE

: Prof. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Günümüzde mühendislik yapılarına etki eden dinamik yüklerin hem yatay hem de düşey yönlü deplasmanların izlenmesinde ve tespitinde GNSS (Global Navigation Satellite System) sensörü yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında yapıların maruz kalmış olduğu dinamik yüklerin, düşey yönlü hareketlerini yakalayabilmek için yüksek frekanslı GNSS tabanlı sensörler kullanılarak kinematik modda RT-PPP (Real Time- Precise Point Positioning) ve RT-VADASE (Real Time- Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) yöntemleriyle çözümler yapılmıştır. Bununla birlikte hem gerçek zamanlı IGS-RT hem de sonradan değerlendirme IGS-Final ürünleri kullanılarak PPP tabanlı çözümler ile RT-PPP, RT-VADASE çözümleri zaman ve frekans alanında karşılaştırılmıştır. Bu dört yöntemi karşılaştırırken bağıl konum belirleme yöntemi referans alınmıştır. Deneylerde, düşey harmonik hareketler üretebilen yassı çelik çubuk üzerinde 100, 90, 80 ve 70 cm konsol boylarında sırasıyla 1.4, 1.6, 1.9 ve 2.4 Hz olacak şekilde harmonik salınımlar üretilmiştir. Tez kapsamında sadece-GPS gözlemleri ile 5 farklı yöntemin çözümleri filtreleme yapılmadan epok farkı ve filtreleme yapıldıktan sonra deplasman zaman serileri ve buna karşılık FFT (Fast Fourier Transform) spektrum sonuçları incelenmiştir. Ayrıca daha detaylı karşılaştırma yapılabilmesi için istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında referans alınan yönteme göre, RT-PPP ve RT-VADASE yöntemlerinin düşey harmonik hareketlerin baskın frekans değerlerinin aynı olduğu ve bu baskın frekanslara karşılık gelen genlik değerlerinde milimetre/milimetre altında farklılıklar elde edilmiştir. Zaman alanında harmonik hareketlerin yakalanması için yapılan değerlendirmede ise milimetre seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar RT-PPP ve RT-VADASE yöntemlerinin yapı sağlığı izlemelerinde yapıda meydana gelen düşey yönlü titreşimlerin genlik ve frekanslarının güvenilir bir şekilde tespit edilebileceğini açıkça göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** GPS, RT-PPP, RT-VADASE, Yapı Sağlığı İzleme (YSİ).

## SUMMARY

Nowadays, GNSS (Global Navigation Satellite System) sensor is widely used in the monitoring and detection of both horizontal and vertical displacements of dynamic loads affecting engineering structures. In this thesis, solutions have been made with RT-PPP (Real Time- Precise Point Positioning) and RT-VADASE (Real Time-Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) methods in kinematic mode by using high-frequency GNSS sensors in order to capture the vertical motions of the dynamic loads that the structures are exposed to. However, using both real-time IGS-RT and post-process IGS-Final products, PPP-based solutions and RT-PPP, RT-VADASE solutions are compared in time and frequency domain. The Relative Positioning (RP) method was taken as reference when comparing these four methods. In the experiments, harmonic oscillations of 1.4, 1.6, 1.9 and 2.4 Hz were produced on a flat steel bar, which can produce vertical harmonic motions, at beam lengths of 100, 90, 80 and 70 cm, respectively. In this thesis, the solutions of 5 different methods with only-GPS observations, epoch difference without filtering, and after filtering, displacement time series and FFT (Fast Fourier Transform) spectrum results were examined. In addition, statistical evaluations were made in order to make a more detailed comparison. When we look at the results, according to the reference method, the dominant frequency values of the vertical harmonic motions of the RT-PPP and RT-VADASE methods are the same, and differences in the amplitude values corresponding to these dominant frequencies are millimeters/sub-millimeters. In the evaluation made for the detection of harmonic motions in the time domain, consistent results were obtained at the millimeter level. The results clearly showed that the amplitude and frequency of vertical vibrations occurring in the structure can be reliably detected in the structural health monitoring of the RT-PPP and RT-VADASE methods.

**Key Words: GPS, RT-PPP, RT-VADASE, Structural Health Monitoring.**

## TEŞEKKÜR

Öncelikle hayatım boyunca her daim yanımda olan ve benden desteklerini esirgemeyen anne ve babama,

Yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Cemal Özer Yiğit'e,

Tez çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Anıl Dindar ve Dr. Mert Bezcioglu'na,

Bu çalışma kapsamında bizlere VADASE algoritma özelliğine sahip GNSS alıcı/anten sensörünü sağlayan Özgür Avcı ve firması Sistem A.Ş.'ye, ve mesai arkadaşlarıma, en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                               | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                                          | v                   |
| SUMMARY                                                                       | vi                  |
| TEŞEKKÜR                                                                      | vii                 |
| İÇİNDEKİLER                                                                   | viii                |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                                                | xii                 |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                               | xxiii               |
| TABLolar DİZİNİ                                                               | xxviii              |
| <br>                                                                          |                     |
| 1. GİRİŞ                                                                      | 1                   |
| 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği                                          | 9                   |
| 2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS) ve<br>KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ | 10                  |
| 2.1. Küresel Konumlama Sistemi (GPS)                                          | 10                  |
| 2.2. Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema<br>(GLONASS)             | 14                  |
| 2.3. Galileo Konumlandırma Sistemi                                            | 18                  |
| 2.4. BeiDou (Compass) Uydu Konumlandırma Sistemi                              | 20                  |
| 2.5. Hint Bölgesel Uydu Konumlandırma Sistemi (IRNSS)                         | 23                  |
| 2.6. Quasi-Zenith Uydu Sistemi (QZSS)                                         | 25                  |
| 2.7. GNSS ile Konum Belirleme Yöntemleri                                      | 27                  |
| 2.8. Mutlak Konum Belirleme Yöntemi                                           | 31                  |
| 2.9. Bağlı Konum Belirleme Yöntemi                                            | 32                  |
| 3. HASSAS NOKTA KONUMLAMA (PPP)                                               | 34                  |
| 3.1. Geleneksel-PPP Tekniğinin Tarihçesi ve Tanımı                            | 34                  |
| 3.2. PPP Tekniğinin Matematiksel Modeli                                       | 35                  |
| 3.2.1. Geleneksel-PPP Modeli                                                  | 35                  |
| 3.2.2. P1-P2-CP Modeli                                                        | 40                  |
| 3.3. Geleneksel-PPP Tekniğinde Hata Kaynakları                                | 41                  |
| 3.3.1. Uydu Kaynaklı Hatalar                                                  | 41                  |
| 3.3.1.1. Uydu Yörünge Hataları                                                | 41                  |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1.2. Uydu Saat Hataları                                    | 44 |
| 3.3.1.3. Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları                  | 45 |
| 3.3.1.4. Uydu Anteni Faz Dönmesi (Phase Wind Up)               | 46 |
| 3.3.1.5. Rölativite (Görelilik) Etkisi                         | 48 |
| 3.3.1.6. Yeryuvarı Dönme Parametreleri (Sagnac Etkisi)         | 50 |
| 3.3.2. Alıcı Hata Kaynakları                                   | 51 |
| 3.3.2.1. Alıcı Saat Hataları                                   | 51 |
| 3.3.2.2. Alıcı Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları                 | 52 |
| 3.3.2.3. Sinyal Yansıma Hatası (Multipath)                     | 53 |
| 3.3.3. Jeodinamik Hareketlerden Kaynaklı Hatalar               | 54 |
| 3.3.3.1. Katı Yeryuvarı Gelgiti (Solid Earth Tides)            | 54 |
| 3.3.3.2. Okyanus Yükleme (Ocean Loading)                       | 55 |
| 3.3.3.3. Kutup Gezinmesi                                       | 56 |
| 3.3.4. Atmosferik Modelleme                                    | 56 |
| 3.3.4.1. Atmosferik Yükleme                                    | 56 |
| 3.3.4.2. İyonosferik Yükleme                                   | 58 |
| 3.3.4.3. Troposferik Yükleme                                   | 61 |
| 3.4. Sonradan Değerlendirme (Post-Process)-PPP                 | 64 |
| 3.5. GNSS-PPP Tekniği İçin Geliştirilen Yazılımlar             | 65 |
| 3.5.1. Bilimsel, Ticari ve Açık Kaynak Kodlu PPP Yazılımları   | 65 |
| 3.5.2. İnternet (Web) Tabanlı Online PPP Servisleri            | 67 |
| 4. GERÇEK ZAMANLI (REAL-TIME)-PPP                              | 69 |
| 4.1. Durum Uzay Modeli (SSR) ile PPP                           | 71 |
| 4.2. Gerçek Zamanlı-PPP Tekniğinin Matematiksel Modeli         | 72 |
| 4.3. Gerçek Zamanlı Veri İletimi için Uluslararası Standartlar | 74 |
| 4.4. Gerçek Zamanlı Veri İletim Bileşenleri                    | 75 |
| 4.4.1. Veri İletim Linkleri                                    | 75 |
| 4.4.2. Veri İletim Protokolleri                                | 76 |
| 4.4.3. Veri Formatları                                         | 77 |
| 4.5. Gerçek Zamanlı Yayınlanan Uydu Yörünge ve Saat Ürünleri   | 77 |
| 4.5.1. IGS Gerçek Zamanlı Servis (RTS) Projesi                 | 78 |
| 4.5.1.1. IGS RTS Ürünleri                                      | 79 |
| 4.5.2. JAXA Gerçek Zamanlı MADOCA Ürünleri                     | 79 |

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.3. CNES Gerçek Zamanlı Ürünleri                   | 80  |
| 5. GPS-VADASE YAKLAŞIMI                               | 82  |
| 5.1. GPS-VADASE Yaklaşımının Tanımı                   | 82  |
| 5.2. GPS-VADASE Yaklaşımının Matematiksel Modeli      | 82  |
| 6. YAPI SAĞLIĞI İZLEMELERİ                            | 84  |
| 6.1. Yapı Sağlığı İzlemesinin Tanımı ve Gelişimi      | 84  |
| 6.2. Yapı Sağlığı İzlemelerinde Kullanılan Sensörler  | 85  |
| 6.2.1. GNSS Alıcısı                                   | 85  |
| 6.2.2. İvmeölçer (Accelerometers)                     | 86  |
| 6.2.3. Eğim Sensörü (İnklinometre)                    | 87  |
| 6.2.4. Total Station ve Hassas Nivo                   | 88  |
| 6.2.5. Yersel Lazer Tarayıcı                          | 89  |
| 6.2.6. Holografik Görüntüleme Sensörü                 | 89  |
| 7. UYGULAMA                                           | 92  |
| 7.1. Deney Tasarımı ve Tanımı                         | 92  |
| 7.1.1. Düşey Sönümlü Harmonik Hareket Testleri        | 94  |
| 7.2. GPS Verilerinin Toplanması ve Parametre Ayarları | 96  |
| 7.3. GPS Verilerinin Prosesi                          | 97  |
| 7.3.1. Kinematik Bağlı GPS                            | 97  |
| 7.3.2. Kinematik GPS-PPP                              | 97  |
| 7.3.3. Gerçek Zamanlı GPS-PPP                         | 100 |
| 7.3.4. Gerçek Zamanlı GPS-VADASE                      | 102 |
| 7.4. Deney Sonuçları                                  | 104 |
| 7.4.1. Epok Farkı Sonuçları (Filtrelenmemiş)          | 108 |
| 7.4.1.1. Konsol Boyu 100 cm olan Çubuk Deneyi         | 108 |
| 7.4.1.2. Konsol Boyu 90 cm olan Çubuk Deneyi          | 113 |
| 7.4.1.3. Konsol Boyu 80 cm olan Çubuk Deneyi          | 117 |
| 7.4.1.4. Konsol Boyu 70 cm olan Çubuk Deneyi          | 122 |
| 7.4.2. Deplasman Sonuçları (Filtrelenmiş)             | 126 |
| 7.4.2.1. Konsol Boyu 100 cm olan Çubuk Deneyi         | 126 |
| 7.4.2.2. Konsol Boyu 90 cm olan Çubuk Deneyi          | 131 |
| 7.4.2.3. Konsol Boyu 80 cm olan Çubuk Deneyi          | 135 |
| 7.4.2.4. Konsol Boyu 70 cm olan Çubuk Deneyi          | 140 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 8. SONUÇ ve ÖNERİLER | 145 |
| KAYNAKLAR            | 149 |
| ÖZGEÇMİŞ             | 166 |
| EKLER                | 167 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler ve</u><br><u>Kisaltmalar</u> | <u>Açıklamalar</u>                                       |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| $L1, L2, L5$                             | : Taşıyıcı Sinyal                                        |
| $f_{01}, f_{02}$                         | : $L1$ ve $L2$ taşıyıcı sinyalin başlangıç frekansı      |
| $\Delta f_{L1}, \Delta f_{L2}$           | : $L1$ ve $L2$ taşıyıcı sinyalin artış miktarı           |
| $t^s$                                    | : Sinyalin uydudan çıkış anı                             |
| $t^R$                                    | : Sinyalin alıcıya ulaştığı an                           |
| $\Delta t$                               | : Sinyalin seyahat süresi                                |
| $r_R^s$                                  | : Uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafe             |
| $X^s, Y^s, Z^s$                          | : Uydu koordinatları                                     |
| $X^R, Y^R, Z^R$                          | : Alıcı anten koordinatları                              |
| $\delta^s$                               | : Uydu saat hatası                                       |
| $\delta^R$                               | : Alıcı saat hatası                                      |
| $\Delta \varepsilon_R^s$                 | : Atmosferik etkiler                                     |
| $\rho_R^s$                               | : Uydu ile alıcı arasındaki gerçek uzunluk (m)           |
| $c$                                      | : Boşluktaki ışık hızı (m/s)                             |
| $I_R^s$                                  | : İyonosferik düzeltme                                   |
| $T_R^s$                                  | : Troposferik düzeltme                                   |
| $\Delta m_R^s$                           | : Multipath etkisi                                       |
| $\Delta a_R^s$                           | : Atmosferik düzeltme                                    |
| $\Delta p_R^s$                           | : Kutup gezinmesinden kaynaklı düzeltme                  |
| $\Delta o_R^s$                           | : Okyanus yüklemesinden kaynaklı düzeltme                |
| $\Delta s_R^s$                           | : Katı yeryuvarı gelgitinden kaynaklı düzeltme           |
| $\Delta \varepsilon_p$                   | : Kod gözlemlerinde modellenmeyen hataların düzeltilmesi |
| $\Phi^s$                                 | : Uydudan yayınlanan faz                                 |
| $\Phi^R$                                 | : Alıcı osilatöründe üretilen faz                        |
| $\lambda$                                | : Taşıyıcı sinyal dalga boyu                             |
| $N(t_0)$                                 | : Taşıyıcı faz başlangıç belirsizliği                    |
| $\Phi_R^s$                               | : Taşıyıcı dalga fazı                                    |

|                               |                                                                  |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $\Delta w^s$                  | : Uydu anteni faz dönmesi düzeltmesi                             |
| $\Delta pcv^{s,R}$            | : Uydu ve alıcı anteni faz merkezi kayıklığı düzeltmesi          |
| $\Delta \varepsilon_\Phi$     | : Faz gözlemlerinde modellenmeyen hataların düzeltmesi           |
| $P_{Li}^G$                    | : GPS gözlemleri için kod ölçüsü                                 |
| $\Phi_{Li}^G$                 | : GPS gözlemleri için faz ölçüsü                                 |
| $\rho^G$                      | : GPS gözlemleri için uydu-alıcı arasındaki geometrik uzaklık    |
| $T_r^G$                       | : GPS gözlemleri için alıcı saat hatası                          |
| $T_s^G$                       | : GPS gözlemleri için uydu saat hatası                           |
| $b_r^G$                       | : GPS gözlemleri için alıcı donanım kod gecikmesi                |
| $b_s^G$                       | : GPS gözlemleri için uydu donanım kod gecikmesi                 |
| $B_r^G$                       | : GPS gözlemleri için alıcı donanım faz gecikmesi                |
| $B_s^G$                       | : GPS gözlemleri için uydu donanım faz gecikmesi                 |
| $d_{orb}^G$                   | : GPS gözlemleri için uydu yörünge hatası                        |
| $d_{trop}^G$                  | : GPS gözlemleri için troposferik gecikme                        |
| $d_{ion/P,\Phi_{Li}}^G$       | : GPS gözlemleri için iyonosferik gecikme                        |
| $\lambda_{Li}$                | : $Li$ taşıyıcı sinyalin dalga boyu                              |
| $N_{Li}^G$                    | : GPS gözlemleri için tam sayı faz belirsizliği                  |
| $d_{mult/P_{Li}}^G$           | : GPS gözlemleri için kod ölçüsündeki multipath etkisi           |
| $d_{mult/\Phi_{Li}}^G$        | : GPS gözlemleri için faz ölçüsündeki multipath etkisi           |
| $\varepsilon_{P,\Phi_{Li}}^G$ | : GPS gözlemleri için kod ve faz ölçü gürültüsü                  |
| $P_{IF}^G$                    | : GPS gözlemleri için İyonosfer-bağımsız kod gözlem kombinasyonu |
| $\Phi_{IF}^G$                 | : GPS gözlemleri için İyonosfer-bağımsız faz gözlem kombinasyonu |
| $f_{G_{Li}}$                  | : GPS uydusundan yayınlanan $Li$ taşıyıcı sinyalin frekansı      |
| $N_{IF}^G$                    | : İyonosferden bağımsız tam sayı faz belirsizliği                |
| $\varepsilon_{P_{IF}}^G$      | : Kod gözlem kombinasyonlarına ait modellenmeyen hatalar         |
| $\varepsilon_{\Phi_{IF}}^G$   | : Faz gözlem kombinasyonlarına ait modellenmeyen hatalar         |
| $d\overline{T_G}$             | : Alıcı saat hatası ve donanım gecikmesine bağlı toplam          |
| $\overline{N_{IF}^G}$         | : Tam sayı ve alıcı donanım gecikmesine bağlı toplam             |
| $b_{r_{avg}}^R$               | : GLONASS'a ait kod gözlemleri için ortalama donanım gecikmesi   |
| $B_{r_{avg}}^R$               | : GLONASS'a ait faz gözlemleri için ortalama donanım gecikmesi   |

|                                |                                                              |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $\delta b_r^R$                 | : GLONASS'a ait kod gözlemleri için frekanslar arası hatalar |
| $\delta B_r^R$                 | : GLONASS'a ait faz gözlemleri için frekanslar arası hatalar |
| $d\overline{T}_R$              | : GLONASS'a ait alıcı saat hatası toplamı                    |
| $\overline{N}_{IF}^R$          | : GLONASS'a ait belirsizlikler toplamı                       |
| $P_{IF,Li}$                    | : İyonosfer bağımsız kod-faz kombinasyonu                    |
| $\varepsilon_{P_{IF,Li}}$      | : Yüksek derecedeki modellenemeyen hatalar                   |
| $e_r$                          | : Yarıçap boyunca                                            |
| $e_c$                          | : Teğet boyunca                                              |
| $e_a$                          | : Yörünge düzlemine dik                                      |
| $d\vec{r}$                     | : Uydu konum hatası vektörü                                  |
| $a_0$                          | : Saat hatası (bias)                                         |
| $a_1$                          | : Saat kayması (drift)                                       |
| $a_2$                          | : Frekans kayması (drift)                                    |
| $t_T$                          | : Uydudan sinyalin çıktığı an (epok)                         |
| $t_{0e}$                       | : Referans zamanı                                            |
| $\Delta t_r$                   | : Rölativistik etkilerden dolayı getirilen düzeltme          |
| $\Delta\Phi$                   | : Faz dönmesi düzeltmesi                                     |
| $\hat{r}$                      | : Uydu-alıcı arasındaki birim vektör                         |
| $\vec{D}, \vec{D}'$            | : Uydu ve alıcının dipol vektörleri                          |
| $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}$    | : Uydu koordinatları birim vektörleri                        |
| $\hat{a}', \hat{b}', \hat{c}'$ | : GNSS alıcı koordinatları birim vektörleri                  |
| $\Delta t_r$                   | : Görelilik düzeltmesi                                       |
| $\mu$                          | : Dünyanın yerçekimi sabiti                                  |
| $a$                            | : Büyük yarı eksen                                           |
| $e$                            | : Uydu yörünge eksantrisitesi                                |
| $E$                            | : Eksantrik anomali                                          |
| $\vec{r}_s$                    | : Uydu anlık konum vektörü                                   |
| $\vec{v}_s$                    | : Uydu anlık hız vektörü                                     |
| $\Delta t_p$                   | : Yerçekimi gecikme hatası                                   |
| $G$                            | : Yerçekimi sabiti                                           |
| $M$                            | : Dünyanın kütlesi                                           |

|                      |                                                                                       |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $r^s$                | : Uydunun jeosantrik mesafesi                                                         |
| $r_r$                | : Alıcının jeosantrik mesafesi                                                        |
| $\delta\rho_s$       | : Sagnac düzeltmesi                                                                   |
| $\Omega_e$           | : Dünyanın açısal dönme hızı                                                          |
| $A_e$                | : Sinyalin yarıçap vektörü tarafından süpürülen toplam alanı                          |
| $t_e$                | : Efemeris için referans zamanı                                                       |
| $\Omega_0$           | : Uydunun $t_e$ zamanındaki yükselen düğüm noktasındaki boylamı                       |
| $\Omega$             | : Sağa yükseliş hızı                                                                  |
| $\vec{\rho}_0$       | : Uydu ile alıcı arasındaki birim vektör                                              |
| $\vec{a}$            | : ARP ve elektriksel anten faz merkezi arasındaki birim vektör                        |
| $\alpha$             | : Azimut                                                                              |
| $z$                  | : Yükseklik                                                                           |
| $f$                  | : Frekans                                                                             |
| $\Delta\vec{r}$      | : Katı yeryuvarı gelgitinden dolayı yer değiştirme vektörü                            |
| $GM$                 | : Dünya'nın yerçekimi parametreleri                                                   |
| $GM_j$               | : Ay ve Güneş'in yerçekimi parametreleri                                              |
| $r$                  | : İstasyon merkezli durum vektörü                                                     |
| $\hat{R}_j$          | : Ay ve Güneş'in yer merkezli durum vektörü                                           |
| $\hat{r}$            | : İstasyon yer merkezli birim durum vektörü                                           |
| $l_2$                | : Nominal 2.derece Love sayısı                                                        |
| $h_2$                | : Nominal 2.derece Shida sayısı                                                       |
| $\varphi$            | : Nokta enlemi                                                                        |
| $\lambda$            | : Nokta boylamı                                                                       |
| $\theta_g$           | : Greenwich yıldız zamanı                                                             |
| $\Delta\vec{r}_{ol}$ | : Okyanus yüklemesinden dolayı yer değiştirme vektörü                                 |
| $j$                  | : Gelgit dalga ( $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m, M_{sa}$ ) temsili |
| $F_j, u_j$           | : Ay düğüm noktasının boylamına dayalı                                                |
| $w_j, X_j$           | : $t = 0^h$ zamanındaki $j$ gelgiti için açısal hız ve astronomik argüman             |
| $A_{cj}, \Phi_{cj}$  | : $j$ gelgit dalgası bileşeni için noktaya özgü genlik ve faz katsayıları             |
| $x_p, y_p$           | : Kutup hareketi parametreleri                                                        |
| $\Delta_{iono}$      | : İyonosferik gecikme hatası                                                          |

|                                      |                                                                     |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $TEC$                                | : Sinyal yolu boyunca toplam elektron yoğunluğu                     |
| $VTEC$                               | : Düşey Toplam Elektron Yoğunluğu                                   |
| $X'$                                 | : İyonosfer geçiş noktasındaki başucu açısı                         |
| $\beta'$                             | : İyonosfer geçiş noktasının yükseklik açısı                        |
| $X$                                  | : GNSS alıcısının başucu açısı                                      |
| $\rho_{IF}$                          | : İyonosfer-bağımsız kod gözlem denklemi                            |
| $\Phi_{IF}$                          | : İyonosfer-bağımsız taşıyıcı faz gözlem denklemi                   |
| $\rho_{Li}$                          | : $Li$ sinyaline ait kod ölçüsü                                     |
| $\Phi_{Li}$                          | : $Li$ sinyaline ait taşıyıcı faz ölçüsü                            |
| $N_{IF}$                             | : İyonosfer-bağımsız tamsayı faz belirsizliği                       |
| $\lambda_{IF}$                       | : İyonosfer-bağımsız taşıyıcı dalga boyu                            |
| $T_z$                                | : Troposferik zenit gecikmesi                                       |
| $m(E)$                               | : İzdüşüm fonksiyonu                                                |
| $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\Phi$ | : Kod ve faz ölçü gürültüsü                                         |
| $\Delta I_g$                         | : İyonosfer grup gecikmesi                                          |
| $\theta'_m$                          | : İyonosfer altı noktanın manyetik enleminin tümleyeni              |
| $\theta_m$                           | : GNSS istasyonunun manyetik enleminin tümleyeni                    |
| $R_E$                                | : Dünya'nın yarıçapı                                                |
| $h_m$                                | : İyonosfer geçirgen/ince katmanın dünya yüzeyinden olan yüksekliği |
| $\beta$                              | : GNSS istasyonunun yükseklik açısı                                 |
| $n$                                  | : Kırılma İndisi                                                    |
| $d_s$                                | : Troposferik sinyal yolu                                           |
| $x, y$                               | : Troposferin sınırları                                             |
| $E$                                  | : GNSS sinyalinin yükseklik açısı                                   |
| $T_z(E)$                             | : Troposferik düzeltme                                              |
| $T_z^h$                              | : Kuru zenit yolu gecikmesi                                         |
| $T_z^w$                              | : Islak zenit yolu gecikmesi                                        |
| $m_h(E)$                             | : İzdüşüm fonksiyonun kuru kısmı                                    |
| $m_w(E)$                             | : İzdüşüm fonksiyonun ıslak kısmı                                   |
| $P$                                  | : Basınç                                                            |
| $T$                                  | : Sıcaklık                                                          |

|                                                  |                                                            |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $T_Z^h(E)$                                       | : Kuru zenit gecikmesi                                     |
| $T_Z^w(E)$                                       | : Islak zenit gecikmesi                                    |
| $e$                                              | : Su buharı basıncı                                        |
| $T_Z$                                            | : Toplam troposferik gecikme                               |
| $z$                                              | : Zenit açısı                                              |
| $B$                                              | : Uydu kesme açısı                                         |
| $\Delta r$                                       | : Deniz seviyesinden yükseklik                             |
| $\delta t_r$                                     | : Alıcı saat hatası                                        |
| $\delta t^s$                                     | : Uydu saat hatası                                         |
| $T_r^s$                                          | : Troposferik gecikme                                      |
| $I_r^s$                                          | : İyonosferik gecikme                                      |
| $N_r^s$                                          | : Tamsayı taşıyıcı faz belirsizliği                        |
| $m_r^s$                                          | : Kod gözlemlerine ait çok yolluluk ve gürültü             |
| $\varepsilon_r^s$                                | : Faz gözlemlerine ait çok yolluluk ve gürültü             |
| $\delta_r$                                       | : Radyal yönde düzeltme                                    |
| $\delta_a$                                       | : Boyuna yönünde düzeltme                                  |
| $\delta_c$                                       | : Çapraz yönde düzeltme                                    |
| $t_0$                                            | : Referans epok                                            |
| $t$                                              | : Mevcut epok                                              |
| $\delta \dot{r}, \delta \dot{a}, \delta \dot{c}$ | : $t_0$ epogunda radyal boyuna ve çapraz yönlerdeki hızlar |
| $e_r$                                            | : Radyal yönde birim vektör                                |
| $e_a$                                            | : Boyuna yönde birim vektör                                |
| $e_c$                                            | : Çapraz yönde birim vektör                                |
| $r$                                              | : Uydu yayın konum vektörü                                 |
| $\dot{r}$                                        | : Uydu yayın hız vektörü                                   |
| $X_{prec}^s(t)$                                  | : Hassas uydu konumu                                       |
| $X_{brdc}^s(t)$                                  | : Yayın uydu konumu                                        |
| $\delta C$                                       | : $t$ zamanındaki saat düzeltmesi                          |
| $\delta dT_{prec}^s(t)$                          | : Düzeltilmiş hassas saat ofseti                           |
| $dT_{brdc}^s(t)$                                 | : Yayın saat ofseti                                        |
| $\Delta \phi_r^s$                                | : Taşıyıcı faz gözlemi                                     |

|                            |                                                                           |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha, \beta$            | : İyonosferden bağımsız kombinasyonun standart katsayıları                |
| $e_r^s$                    | : Birim vektör                                                            |
| $\Delta \xi_r$             | : Ardışık iki epok arasındaki 3 boyutlu yer değiştirme                    |
| $\Delta \delta t_r$        | : Alıcı saat hatası                                                       |
| $\Delta \delta t^s$        | : Uydu saat hatası                                                        |
| $\Delta p_r^s$             | : Uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafe                              |
| $[\Delta \rho_r^s]_{OR}$   | : Uydu ve dünyanın hareketinden kaynaklı geometrik değişim                |
| $[\Delta \rho_r^s]_{Etol}$ | : Katı dünya gelgiti ve okyanus yüklemesinden kaynaklı geometrik değişimi |
| $TZD_{SB}$                 | : Saastamoinen modeline göre Troposferik Zenith Gecikmesi                 |
| $\Delta m_r^s$             | : Epoklar arası tekli farkların çok yolluluk etkisi                       |
| $\Delta \varepsilon_r^s$   | : Epoklar arası tekli farkların gürültüsü                                 |
| AB                         | : Avrupa Birliği                                                          |
| ANTEX                      | : Antenna Exchange Format                                                 |
| ARP                        | : Anten Referans Noktası                                                  |
| BDS                        | : BeiDou Satellite Navigation System                                      |
| BOC                        | : Binary Offset Carrier                                                   |
| C/A                        | : Coarsel/Acquition                                                       |
| CDMA                       | : Code-Division Multiple Access                                           |
| CNES                       | : Centre national d'études spatiales                                      |
| CODE                       | : Center for Orbit Determination in Europe                                |
| CORS                       | : Continuously Operating Reference Stations                               |
| CS                         | : Commercial Service                                                      |
| CTP                        | : Conventional Terrestrial Pole                                           |
| DGNSS                      | : Diferansiyel GNSS                                                       |
| DLR                        | : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt                               |
| ECEF                       | : Earth-centered Earth-fixed                                              |
| ECMWF                      | : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts                      |
| EDGE                       | : Enhanced Data rates for GSM Evolution                                   |
| ESA                        | : European Space Agency                                                   |
| EU                         | : European Union                                                          |

|         |                                                              |
|---------|--------------------------------------------------------------|
| FDMA    | : Frequency-Division Multiple Access                         |
| FFT     | : Fast Fourier Transform                                     |
| FKP     | : Flächen Korrektur Parameter                                |
| FOC     | : Full Operational Capability                                |
| FTP     | : File Transfer Protocol                                     |
| GBAR    | : Geometry Based Ambiguity Resolution                        |
| GEO     | : Geostationary Earth Orbit                                  |
| GFAR    | : Geometry Free Ambiguity Resolution                         |
| GFZ     | : Geo Forschungs Zentrum                                     |
| GGFC    | : Global Geophysical Fluid Centre                            |
| GIOVE-A | : Galileo In-Orbit Validation Element-A                      |
| GLONASS | : Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema            |
| GNSS    | : Global Navigation Satellite System                         |
| GOP     | : Geodetic Observatory Pecny                                 |
| GPRS    | : General Packet Radio Service                               |
| GPS     | : Global Positioning System                                  |
| GSM     | : Global System for Mobile communication                     |
| GZK     | : Gerçek Zamanlı Kinematik                                   |
| HTTP    | : Hyper-Text Transfer Protocol                               |
| HVS     | : Holographic Visual Sensor                                  |
| IERS    | : International Earth Rotation and Reference Systems Service |
| IF      | : Ionosphere-Free                                            |
| IFB     | : Inter-Frequency Bias                                       |
| IGS     | : International GNSS Service                                 |
| IMU     | : Inertial Measurement Unit                                  |
| IOV     | : In-Orbit Validation                                        |
| IP      | : Internet Protocol                                          |
| IPP     | : Ionosphere Pierce Point                                    |
| IRNSS   | : Indian Regional Navigation Satellite System                |
| ISB     | : Inter-System Bias                                          |
| ISRO    | : Indian Space Research Organisation                         |

|            |                                                                      |
|------------|----------------------------------------------------------------------|
| JAXA       | : Japan Aerospace Exploration Agency                                 |
| JPL        | : Jet Propulsion Laboratory                                          |
| Klasik-RTK | : Single-baseline Real-Time Kinematic                                |
| LAMBDA     | : Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment                   |
| LDM        | : Leica Geosystems Displacement Measurement                          |
| LOO        | : Leave-One-Out                                                      |
| LVDT       | : Linear Variable Differential Transformer                           |
| LVM        | : Leica Geosystems Velocity Measurement                              |
| MAC        | : Master Auxiliary Concept                                           |
| MADOCA     | : MultiGNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis |
| MEO        | : Medium Earth Orbit                                                 |
| MBOC       | : Multi Binary Offset Carrier                                        |
| MIT        | : Massachusetts Institute of Technology                              |
| MW         | : Melbourne-Wübbena                                                  |
| NAVIC      | : Navigation Indian Constellation                                    |
| NAVSAT     | : Navy Navigation Satellite System                                   |
| NAVSTAR    | : Navigation Satellite Timing and Ranging                            |
| NGS        | : National Geodetic Survey                                           |
| NMEA       | : National Marine Electronics Association                            |
| N-RTK      | : Network-Real Time Kinematic                                        |
| NTRIP      | : Networked Transport of RTCM via Internet Protocol                  |
| OS         | : Open Service                                                       |
| OSR        | : Observation Space Representation                                   |
| P          | : Precise                                                            |
| PCO        | : Phase Center Offset                                                |
| PCV        | : Phase Center Variation                                             |
| PP         | : Post-Process                                                       |
| PPP        | : Precise Point Positioning                                          |
| PPP-AR     | : Precise Point Positioning-Ambiguity Resolutions                    |
| PPS        | : Precise Positioning Service                                        |
| PRN        | : Pseudo Random Noise                                                |

|         |                                                                      |
|---------|----------------------------------------------------------------------|
| PRS     | : Public Regulated Service                                           |
| PWC     | : Piece Wise Constant                                                |
| QPSK    | : Quadrature Phase-Shift Keying                                      |
| QZO     | : Quasi-Zenith Orbit                                                 |
| QZSS    | : Quasi-Zenith Satellite System                                      |
| RHCP    | : Right Hand Circularly Polarized                                    |
| RINEX   | : Receiver INdependent EXchange                                      |
| RP      | : Relative Positioning                                               |
| RT      | : Real-Time                                                          |
| RTCM    | : The Radio Technical Commission for Maritime Services               |
| RTK     | : Real-Time Kinematic                                                |
| RTS     | : Real-Time Service                                                  |
| RTWG    | : Real Time Working Group                                            |
| SAR     | : Search and Rescue                                                  |
| SC-104  | : Special Committee-104                                              |
| SEY     | : Sonlu Elemanlar Yöntemi                                            |
| SHM     | : Structural Health Monitoring                                       |
| SIO     | : Scripps Institution of Oceanography                                |
| SOL     | : Safety of Life                                                     |
| SPP     | : Single Point Positioning                                           |
| SSCB    | : Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği                             |
| SSR     | : State Space Representation                                         |
| SSM     | : State Space Model                                                  |
| STEC    | : Slant Total Electron Content                                       |
| TRANSIT | : Time Ranging and Sequential                                        |
| TUM     | : Technical University of Munich                                     |
| UHF     | : Ultra-High Frequency                                               |
| UPD     | : User Datagram Protocol                                             |
| URP     | : Ultra-Rapid Predicted                                              |
| USNO    | : United States Naval Observatory                                    |
| VADASE  | : Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-Alone Engine |
| VHF     | : Very High Frequency                                                |

|      |   |                                 |
|------|---|---------------------------------|
| VRS  | : | Virtual Reference Station       |
| VTEC | : | Vertical Total Electron Content |
| YSİ  | : | Yapı Sağlığı İzleme             |
| ZHD  | : | Zenith Hydrostatic Delay        |
| ZWD  | : | Zenith Wet Delay                |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                                                                             | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: GPS Uydu Takımyıldızı                                                                                                                          | 13                  |
| 2.2: GLONASS Uydu Takımyıldızı.                                                                                                                     | 18                  |
| 2.3: BeiDou Uydu Takımyıldız.                                                                                                                       | 24                  |
| 2.4: NavIC Uydu Sisteminin Yer Küre Üzerindeki İzdüşümü.                                                                                            | 27                  |
| 2.5: Quazi-Zenit Yörüngeli Uydunun Yer Küre Üzerindeki İzdüşümü.                                                                                    | 28                  |
| 2.6: Uydu Tabanlı Konum Belirleme Yöntemleri                                                                                                        | 34                  |
| 3.1: Uydu Yörünge Hatasının şematik gösterimi.                                                                                                      | 45                  |
| 3.2: Uydu Anteni Faz Merkezi ve Ağırlık Merkezi şematik gösterimi.                                                                                  | 48                  |
| 3.3: Uydudan Yayınlanan Sinyalin Saat Yönünde Polarizasyonu.                                                                                        | 49                  |
| 3.4: Uydu Anteni Faz Dönmesi Modeli.                                                                                                                | 49                  |
| 3.5: Sagnac Etkisi.                                                                                                                                 | 53                  |
| 3.6: Anten Faz Merkezi Kayıklığı.                                                                                                                   | 54                  |
| 3.7: Sinyal Yansıma Hatası (Multipath).                                                                                                             | 55                  |
| 3.8: Katı Yeryuvarı Gelgiti.                                                                                                                        | 56                  |
| 3.9: Yer Kürenin Atmosferik Tabakaları.                                                                                                             | 59                  |
| 3.10: GNSS Sinyalinin İyonosfer Gecikme Geometrisi.                                                                                                 | 61                  |
| 4.1: RINEX, RTCM ve NMEA veri formatları gösterim şeması.                                                                                           | 76                  |
| 4.2: MADOCA ürünlerinin üretim ve iletim şeması                                                                                                     | 82                  |
| 6.1: Deneylerde kullanılan GNSS Alıcıları.                                                                                                          | 88                  |
| 6.2: İnklinometre ölçüm seti ve çalışma prensibi.                                                                                                   | 89                  |
| 6.3: Robotik Total Station ve Hassas Nivo.                                                                                                          | 90                  |
| 6.4: Yersel Lazer Tarayıcısı ve YLT kullanılarak belirlenen yapının modeli                                                                          | 91                  |
| 6.5: Holografik görüntüleme sensörü (HVS): (a) sensörün ana bileşenleri ve (b) holografı kullanılarak belirlenen bir yapının geometrik morfolojisi. | 92                  |
| 7.1: Sönümlü düşey harmonik hareketlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği                                                                          | 95                  |
| 7.2: Çelik Çubuk Modelin Geometrisi.                                                                                                                | 97                  |
| 7.3: RT-PPP yönteminin şematik görünümü.                                                                                                            | 102                 |

|       |                                                                                                                                            |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.4:  | RT-V yönteminin şematik görünümü.                                                                                                          | 105 |
| 7.5:  | IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V çözümlerinden elde edilen düşey deplasman hareketleri.                                                   | 107 |
| 7.6:  | Konsol boyu 100 cm olan Filtrelenmemiş/Filtrelenmiş GPS tabanlı çözümler.                                                                  | 108 |
| 7.7:  | Konsol boyu 90 cm olan Filtrelenmemiş/Filtrelenmiş GPS tabanlı çözümler.                                                                   | 108 |
| 7.8:  | Konsol boyu 80 cm olan Filtrelenmemiş/Filtrelenmiş GPS tabanlı çözümler.                                                                   | 109 |
| 7.9:  | Konsol boyu 70 cm olan Filtrelenmemiş/Filtrelenmiş GPS tabanlı çözümler.                                                                   | 109 |
| 7.10: | 1. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 111 |
| 7.11: | 2. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 112 |
| 7.12: | 3. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 113 |
| 7.13: | 4. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 114 |
| 7.14: | Konsol boyu 100 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmesi.                                                        | 114 |
| 7.15: | 5. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 115 |
| 7.16: | 6. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 116 |

|       |                                                                                                                                             |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.17: | 7. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.  | 117 |
| 7.18: | 8. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.  | 118 |
| 7.19: | Konsol boyu 90 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmesi.                                                          | 119 |
| 7.20: | 9. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.  | 120 |
| 7.21: | 10. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 121 |
| 7.22: | 11. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 122 |
| 7.23: | 12. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 123 |
| 7.24: | Konsol boyu 80 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmesi.                                                          | 123 |
| 7.25: | 13. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 124 |
| 7.26: | 14. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 125 |
| 7.27: | 15. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 126 |

|       |                                                                                                                                             |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.28: | 16. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı. | 127 |
| 7.29: | Konsol boyu 70 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmesi.                                                          | 127 |
| 7.30: | 1. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 129 |
| 7.31: | 2. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 130 |
| 7.32: | 3. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 131 |
| 7.33: | 4. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 132 |
| 7.34: | 5. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 134 |
| 7.35: | 6. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 134 |
| 7.36: | 7. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 135 |
| 7.37: | 8. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 136 |
| 7.38: | 9. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                     | 138 |
| 7.39: | 10. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                    | 139 |
| 7.40: | 11. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                    | 140 |
| 7.41: | 12. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                    | 140 |
| 7.42: | 13. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                    | 142 |
| 7.43: | 14. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.                                    | 143 |

|       |                                                                                                             |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.44: | 15. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş<br>deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları. | 144 |
| 7.45: | 16. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş<br>deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları. | 145 |



## TABLOR DİZİNİ

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                                         | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: GPS Takımyıldızına ait genel özellikler.                                                   | 12                  |
| 2.2: GPS uydularının güncel uydu takımyıldızı ve bu uydulara ait temel bilgiler.                | 16                  |
| 2.3: GLONASS uydu takımyıldızının genel özellikleri.                                            | 17                  |
| 2.4: GLONASS uydularının güncel uydu takımyıldızı ve bu uydulara ait temel bilgiler.            | 19                  |
| 2.5: Galileo uydularının güncel uydu takımyıldızı ve uydulara ait temel bilgiler.               | 21                  |
| 2.6: BeiDou uydularının güncel uydu takımyıldızı ve uydulara ait temel bilgiler.                | 23                  |
| 2.7: BeiDou uydularına ait sinyal ve özellikleri.                                               | 25                  |
| 2.8: IRNSS uydularının güncel uydu takımyıldızı ve uydulara ait temel bilgiler.                 | 26                  |
| 2.9: QZSS uydularının güncel uydu takımyıldızı ve uydulara ait temel bilgiler.                  | 28                  |
| 3.1: IGS'in farklı analiz merkezleri.                                                           | 44                  |
| 3.2: $B$ ve $\delta R$ Parametrelerine ait Düzeltme Değerleri.                                  | 66                  |
| 3.3: Bilimsel, Ticari ve Açık Kaynak Kodlu PPP Yazılımları                                      | 68                  |
| 3.4: İnternet (Web) tabanlı online PPP veri değerlendirme servisleri.                           | 69                  |
| 7.1: Çelik çubuğun, konsol boyuna bağlı deney setleri ve doğal frekansları.                     | 96                  |
| 7.2: Bağlı Konum Belirleme yönteminde yapılan proses seçenekleri.                               | 100                 |
| 7.3: PP-PPP ve N-RT-PPP yönteminde yapılan proses seçenekleri.                                  | 101                 |
| 7.4: RT-PPP yönteminde yapılan proses seçenekleri.                                              | 103                 |
| 7.5: Konsol boyu 100 cm için Filtreleme sonrası çözümlerden elde edilen istatistiksel değerler. | 133                 |
| 7.6: Konsol boyu 90 cm için Filtreleme sonrası çözümlerden elde edilen istatistiksel değerler.  | 137                 |
| 7.7: Konsol boyu 80 cm için Filtreleme sonrası çözümlerden elde edilen istatistiksel değerler.  | 141                 |

7.8: Konsol boyu 70 cm için Filtreleme sonrası çözümlerden elde edilen istatistiksel değerler. 146



# 1. GİRİŞ

İnsanoğlunun yaradılışından beri günümüze kadar konaklama, barınma, ulaşım gibi temel ihtiyaçları için yeryüzünde köprü, viyadük, kule, yüksek katlı bina ve tarihi yapı (camiler, kervansaraylar, kaleler, çeşmeler, hanlar, kütüphaneler vb.) vb. birçok mühendislik yapısı inşa etmişlerdir. Bu yapılara, yeryüzünde meydana gelen hızlı ve kısa süreli depremler, yavaş ve uzun süreli epirojenik ve orojenik hareketler, kütle hareketleri (heyelanlar), rüzgâr yükü, ani yükler ve hareketli yükler gibi birçok dinamik yükün etkisinde kalması sonucu yapılarda yatay ve düşey yönlü yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Yapıdaki yer değiştirmelerin, geoteknik ya da jeodezik sensörler kullanılarak izlenip meydana gelen değişimleri tespit ederek birtakım analizler yapıldıktan sonra yapıya ilişkin önlemler alınması için Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri kurulmuştur.

Günümüzde hala daha gelişimini sürdürmekte ve YSİ çalışmalarında bir trend olan, jeodezik nitelikli yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS alıcıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek frekanslı GNSS alıcılarıyla, sismoloji [1]-[3] alanında kosmik yer değiştirmelere dayanarak hızlı tehlike değerlendirme [4] ve deprem erken uyarı sistemi [5]-[7], YSİ alanında ise meydana gelen dinamik davranışların tespitinde ve yer değiştirmelerin izlenmesinde ayrıca birçok alanda Bağlı Konumlama (Relative Positioning, RP) ve Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) teknikleri kullanılarak çalışmalar yapılmıştır [8]-[12]. Uydu sistemlerinin tam kapasite çalışır hale gelmesi ile birlikte, 21. Yüzyılın ilk başlarında yapılarda meydana gelen dinamik davranışları izlemek için GNSS alıcıları kullanılarak, RP tekniği uygulanıp çözümler gerçekleştirilmiştir. RP tekniği ile yapılan çalışmalarda, biri sabit diğeri gezici olacak şekilde en az iki GNSS alıcısıyla eş zamanlı gözlemler yapılmaktadır. RP tekniğinin gerçek zamanlı şartlar altında gerçek zamanlı kinematik (Real Time Kinematic, RTK) veya sonradan değerlendirme (Post-process, PP) kinematik ölçü teknikleri uygulanarak yüksek katlı binalar [13]-[20], köprü tabliye genişliğine bağlı olarak uzun açıklıklı köprüler [21]-[29], orta açıklıklı köprüler [30], [31] ve kısa açıklıklı köprüler [32]-[34] gibi mühendislik yapılarında meydana gelen dinamik hareketleri yakalamak için birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bağlı kinematik GNSS yönteminin YSİ'deki performansı, doğruluk açısından da test edilmiştir [35]-[38]. YSİ'de dinamik hareketlerin, yapıda oluşturduğu etkiyi

tespit etmek için kullanılan RP tekniği ile santimetre hatta milimetre seviyesinde doğrulukla yer değiştirmeleri tespit edilebileceği açıkça görülmüştür [39]-[43]. RP tekniği ile yapılan çalışmalarda yöntemin temel prensibi gereği en az bir tane koordinatı bilinen sabit noktada GNSS alıcısı kurularak, koordinatı belirlenecek noktada bulunan GNSS alıcısıyla beraber eş zamanlı gözlem yapılması gerekmektedir. Zaman içerisinde kullanılan donanım, veri işleme kapasitesi, geliştirilen farklı algoritma ve düzeltme modelleri, RP yönteminde farklı bir kilometre taşı oluşturmuştur. Günümüzde birçok devlet kamu ve kuruluşları, ticari firmalar, özellikle de harita mühendisliği disiplini faaliyetlerinin etkin bir şekilde gerçekleştiği kurumlar, yeryüzünde koordinatı bilinen herhangi bir sabit noktaya ihtiyaç duymadan, sürekli gözlem yapan sabit GNSS istasyonları (Continuously Operating Reference Stations, CORS) olarak da adlandırılan Ağ-RTK (Network-Real Time Kinematic) tekniğiyle bir noktanın konumu, tek bir GNSS alıcısıyla yüksek doğrulukta ve anlık olarak belirlenebilmektedir [44]-[46]. Günümüzde, köprülerde oluşan dinamik yer değiştirmeleri ve titreşim frekanslarını ivmeölçer referans alınarak, Ağ-RTK tekniğiyle milimetre seviyesinde doğru ve güvenilir şekilde sonuçlar verdiği ve YSİ uygulamalarında bu yöntemin kullanılmasının yeterli olacağı ortaya atılmıştır [11]. Buna ilaveten yapılarda meydana gelen farklı dinamik hareketlerin yatay yönlü sarsma tablasında simülasyonu üretilmiş ve sonuçlar doğrusal yer değiştirmeyi hassas bir şekilde ölçen LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensör referans alınarak, Ağ-RTK yöntemiyle baskın frekans ve genlik değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına bakıldığında Ağ-RTK tekniğinin YSİ uygulamalarında kullanılabilirliği açıkça gösterilmiştir [47]. Yeryüzünde meydana gelebilecek şiddetli deprem, heyelan, tsunami gibi doğal olaylar sonucunda yüzey hareketlerinin oluşması, aynı bölgede koordinatı bilinen ve referans olarak alınan, sabit noktanın bu yüzey hareketlerinden etkilenmesi, sabit nokta şartını sağlayamayacak duruma gelmektedir. Bu durum, insan eliyle yapılmış mühendislik yapılarının, oluşan yüzey hareketlerine vermiş olduğu tepkiyi değerlendirmek için RP yöntemiyle yapılan çözümleri sınırlandırmaktadır [48]. Ayrıca Ağ-RTK tekniğinde de GNSS alt yapısına bağımlılık, referans istasyonlar ile gezici alıcı arasında çift yönlü veri iletişiminin (GSM, GPRS vb.) sağlanamaması gibi durumlarda yapıda meydana gelen dinamik titreşimlerin yakalanması açısından bu tekniği kısıtlamaktadır. Bununla birlikte, koordinatı bilinen referans noktaya ait ham ölçü veya düzeltme bilgilerine ihtiyaç duymadan, herhangi bir GNSS alt yapısı gerektirmeden, tek bir GNSS alıcısıyla nokta konumunu yüksek

doğrulukta hesaplayabilen Hassas Nokta Konumlama tekniği, RP yöntemine güçlü bir alternatif oluşturmaktadır [49], [50]. PPP tekniğiyle bir noktanın konumu belirlenirken katı yeryuvarı gelgiti, okyanus yüklemesi, uydu yörünge ve saat bilgisi gibi dış parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca PPP yönteminin temel prensibinde faz başlangıç belirsizliği bilinmeyen olarak alınmaktadır. Bu durum RP yöntemine göre kıyaslandığında PPP tekniğiyle yapılan çözümlerde santimetre seviyesinde duyarlılığa ulaşmak için ölçü süresinin uzamasına yol açmaktadır. PPP tekniğindeki tam sayı faz belirsizliği çözümünden kaynaklı yakınsama süresi için birtakım yöntem ve modeller geliştirilmiştir [51]-[55]. PPP tekniğiyle, dinamik yükler etkisi altında kalan mühendislik yapılarında oluşan yer değiştirme hareketlerini ve salınım frekanslarını yakalayabilmek için birçok çalışma yapılmıştır. GNSS sismolojisi alanında depremlerin meydana getirdiği yüzey hareketlerinin, GPS alıcıları vasıtasıyla, PPP tekniği kullanılarak tespit edilebileceği gösterilmiştir [3]. Sismoloji alanında gerçekleştirilen bir çalışmada İtalya'nın merkezin de Nisan 2009'da 6.3 büyüklüğünde meydana gelen depremde 1 Hz ve 10 Hz'lik GPS alıcıları ile başarılı bir şekilde kayıt yapılmıştır. Ayrıca aktif fayın üzerine veya yakınına yerleştirilmiş kuvvetli hareket ivmeölçerleri tarafından da gözlemler toplanmıştır. Yüksek frekanslı (10 Hz) GPS gözlem verileri Kinematik-PPP yöntemi ile değerlendirilmiş ve sonuçlar ivmeölçer ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında Kinematik-PPP ile elde edilen çözümlerin yaklaşık 1 santimetre doğruluğunda güvenilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak orta veya çok şiddetli depremlerin yakın alanlarında 2,5 Hz'den (yani 5 veya 10 Hz) büyük GPS örnekleme aralığına sahip alıcıların gerekli olduğu sonucuna varılmıştır [56]. Benzer bir çalışma 3 farklı büyüklükte ( $M_w=9.0$ , 6.3 ve 4.3) meydana gelen depremlerin 1 Hz'lik GPS gözlem kayıtları kullanılarak PPP yöntemi ile çözümleri yapılmıştır. Bunun yanı sıra yatay yönlü harmonik hareket üretme kapasitesine sahip mekanik bir cihazın üzerine entegre edilmiş 1 Hz'lik GPS alıcı anteni ile gözlemler yapılmış ve PPP yöntemiyle çözümler değerlendirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında PPP yöntemi ile santimetre altında yatay yönlü harmonik hareketler sonucu, depremle ilgili dinamik kısa vadeli koordinat değişimlerini ölçme ve GPS uydu gözlemlerini kullanarak hem güçlü hem de zayıf sismik sinyalleri tespit etme yeteneği kanıtlanmıştır [57]. Bununla birlikte çok şiddetli depremlerden kaynaklı yeryüzünde meydana gelen yer değiştirme bilgisinin kalitesini arttırmak için yüksek frekanslı GNSS alıcıları kullanılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda Wuhan Üniversitesi tarafından sarsma masası üzerine 50 Hz örnekleme aralığına sahip GNSS alıcı anteni

ve 200 Hz örnekleme aralığında üç boyutlu ivmeleri toplayabilen IMU (Inertial Measurement Unit) sensörü entegre edilerek birtakım deneyler gerçekleştirilmiştir. Sismik dalgaların tespiti için yapılan deneylerde PPP çözümü ile elde edilen sonuçlar, IMU sensöründen toplanan ölçümlere göre kıyaslandığında yatayda 2 ila 4 mm arasında, düşeyde cm altında doğrulukla belirlenmiştir [58]. Depremlerin meydana gelmesi sonucu hem yatay hem de düşey yönde dinamik yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Bunun için yatay ve düşey salınımlar yapılarak depremlerin simülasyonunu gerçekleştiren bir sarsma tablası ile GNSS alıcı anteni entegre edilerek 1 Hz ve 50 Hz’lik GNSS gözlem verileri toplanarak 1999 İzmit ( $M_w=7.4$ ), 2008 Wenchuan ( $M_w=7.9$ ) depremi ve 2011’de meydana gelen Tohoku-Oki ( $M_w=9.0$ ) depremleri simülasyonu yapılarak RP ve PPP yöntemleri ile çözümler yapılmıştır. Ayrıca çözümler 200 Hz örnekleme aralığına sahip ivmeölçer referans alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuçların 1 cm altında doğrulukla başarılı bir şekilde tespit edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca yüksek örnekleme aralığına sahip GNSS’in P-, S-, Love ve Rayleigh dalgaları dâhil olmak üzere çoğu sismik dalga türünü alma yeteneğine sahip olduğu ortaya atılmıştır [59]. Sismik fazları kaydetme performansını sınırlayan ana faktör, yaygın olarak kullanılan 1 Hz örnekleme aralığıdır. Çünkü GNSS alıcı donanımına bağlı gürültü, bazı zayıf sismik fazların tanınmasını zorlaştırır. Böylece sismik dalgaların yayılma hızları ve yolu, yüksek frekanslı GNSS’in özellikleri, sismik fazların konumsal izleri ve sismografların dahil edilmesinin, yüksek frekanslı GNSS zaman serilerinden sismik fazları almaya yardımcı olmada faydalı olduğu sonucuna varılmıştır [59]. Küresel uydu sistemlerindeki gelişmeler ile birlikte çoklu-GNSS (GPS ve BeiDou) gözlemlerini toplayan 50 Hz’lik GNSS alıcısı, yaklaşık 3 cm genlik ve 4.5 Hz’lik frekansa sahip GNSS antenin periyodik hareketini sağlamak üzere tasarlanmış ve yatay düzlemde hareket eden bir cihaz ile deneyler gerçekleştirilmiştir. RTK, PPP ve doğrudan faz gözlem proses yöntemleri ile çözümler uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında dinamik yer değiştirmelerin doğruluğu milimetre düzeyinde birbiri ile tutarlı ve güvenilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda üretilen harmonik salınımlarda FFT spektrumuna bakıldığında üç farklı yöntemin çözümünden elde edilen frekans değerlerinin aynı olduğu, ortalama genlik değerlerinde 1.1 mm ila 3.4 mm arasında değişiklikler meydana gelmiştir [60]. Bir diğer çalışma ise bir platform üzerinde 50 Hz’lik GNSS alıcıları ile bir takım statik ve dinamik deneyler yapılmıştır. Çoklu-GNSS sistemlerinin her biri ve birleşik takımı yıldız için yüksek frekanslı konum çözümleri, kısa baz uzunluğuna sahip RP

veya PPP kullanılarak hesaplanmış ve IMU ölçümleriyle kıyaslanmıştır. Tek bir GNSS sistemi durumunda, deneysel sonuçlar GPS'in en iyi doğrulukta olduğunu ve onu sırasıyla GLONASS, BeiDou takip etmiştir. Kombine edilmiş çoklu-GNSS, tek başına herhangi bir GNSS sisteminden yüksek frekanslı konum belirleme çözümlerini önemli ölçüde iyileştirmiştir; bu, özellikle, statik veya yarı statik hareketlerde herhangi bir platforma yönelik uygulamalar için en uygun olduğu belirtilmiştir. Statik veya dinamik deneylerden elde edilen veriler, yüksek frekanslı çoklu GNSS'in sismik dönme hareketlerini hassas bir şekilde tespit etme potansiyelini göstermiştir [61]. GNSS sismolojisinin yanı sıra YSI uygulamalarında da hem tasarlanan model hem de gerçek obje üzerinde kinematik-PPP yönteminin yatay ve düşey yönlü dinamik hareketleri yakalayabilme performansını inceleyen birçok çalışma yapılmıştır [12], [33], [62]-[68]. Bu çalışmalardan biri, tasarlanan esnek çelik çubuk üzerine monte edilmiş GNSS alıcısı ile yatay yönlü dinamik hareketleri kinematik-PPP yöntemiyle yakalayabilme performansını test etmekte [62]. Yine buna benzer bir çalışma düşey yönlü yassı çelik çubuk üzerinde bulunan GNSS sensör ile düşey harmonik salınımların hem zaman hem de frekans alanında performansını incelemektedir [12]. Her iki çalışmada RP yöntemi referans alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yüksek frekanslı kinematik-PPP yönteminin yatay ve düşey yönlü yer değiştirmeleri başarılı bir şekilde yakalayabildiğini ortaya koymuştur. Uydu sistemlerinde ve konum belirleme algoritmalarındaki gelişmeler neticesinde hassas nokta konumlama tekniğine ilgi giderek artmıştır. Ayrıca önceden yapılan bilimsel çalışmalarda sonradan değerlendirme yapılarak PPP tekniğinin performansı incelenirken, ilerleyen zamanlarda gerçek zamanlı olarak PPP tekniğinin değerlendirilmesi fikri ortaya çıkmıştır. Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS), Amerika Birleşik Devletleri'nde kurulan ve 1994 yılından beri uydu yörünge ve saat düzeltmeleri gibi GNSS veri ürünlerini kullanıcıya açık erişim sağlayan bir kuruluştur [69], [70]. IGS farklı gecikme periyodlarına göre yörünge ve saat düzeltmeleri için 3 farklı veri tipi sunar; IGS-Final, IGS-Rapid ve IGS-Ultra-Rapid. IGS-Final ürünleri için 12-18 gün, IGS-Rapid ürünleri için ise 17-41 saatlik gecikme ile üretilir [71]. Bu iki veri tipinde üretilen ürünler bilimsel çalışmalarda sonradan değerlendirme modunda kullanılmaktadır. Öte yandan gerçek zamanlı çözümlerde IGS Ultra-Rapid ürünlerin yalnızca kestirilen ürünü kullanılırken, hassasiyeti IGS Ultra-Rapid (kestirilen) üründen daha yüksek olan ayrıca gecikme zamanı 3 ila 9 saat arasında IGS-Ultra-Rapid (hesaplanan) ürünleri yakın gerçek zamanlı çözümlerde kullanılmaktadır

[71], [72]. Bu bağlamda gerçek zamanlı (Real-Time, RT) uygulamalarda kullanılan IGS URP (Ultra-Rapid Predicted) ürünlerin uydu yörünge doğruluğu  $\sim 5$  santimetre (cm), uydu saatinde ise  $\sim 3$  nanosaniye (ns) bir doğruluk sağlanmaktadır [71], [72]. Gerçek zamanlı yapılacak çalışmalarda URP ürünü mevcut olduğundan, hassas ürünlerin elde edilmesi için gecikme süresinin uzun olması kullanılan bu ürünü kısıtlamaktadır. RT ürünlerin kullanıcılara ulaşması için 2001 yılında Gerçek Zamanlı Çalışma Grubu (Real Time Working Group, RTWG) kurulmuş ve bir sonraki yıl içinde IGS çalıştayında Gerçek Zamanlı Servis (Real-Time Service, RTS) tasarımı kabul edilmiştir [73]. 2007 yılına gelindiği zaman IGS, gerçek zamanlı ürünleri oluşturmak, verileri toplamak ve arşivlemek, ayrıca gerçek zamanlı ürünleri yayınlama ve geliştirmek için IGS Gerçek zamanlı Pilot projesine katılım çağrısını duyurmuştur [74], [75]. Nisan 2013'te IGS'in kurmuş olduğu RTS aracılığıyla farklı analiz merkezlerinin katkısıyla, kullanıcıya gerçek zamanlı yayın efemerisi ve saat düzeltme veri akışını sağlamaya başlamıştır [76]. RTS, GNSS uydu yörüngesine ait yayın efemerisi ve saat düzeltmelerini NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) [77] aracılığıyla RTCM/SSR (The Radio Technical Commission for Maritime Services/State Space Representation) [78] veri formatı biçimine göre kullanıcıya sunmaktadır [74], [76]. Ayrıca yayınlanan gerçek zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerin doğruluğu sırasıyla 5 cm ve 0.3 ns'dir [79]. IGS RTS'nin abonelik sistemi ücretsiz ve gerçek zamanlı ürünlerin anlık sunulması RT-PPP yönteminin bilimsel çalışmalarda kullanımına olanak sağlamıştır. Yapılan birçok bilimsel çalışmada RT-PPP yönteminin performansı ve kullanılan gerçek zamanlı ürünlerin doğruluğu test edilmiştir [79]-[83]. Ayrıca RT-PPP tekniği, doğal olaylar sonucu meydana gelen deprem ve tsunami gibi doğal felaketlerin, erken uyarı sistemlerinde en önemli yapı taşı olduğu çalışmalarda belirtilmiştir [84]-[86]. Mühendislik yapılarından biri olan Severn asma köprüsünde meydana gelen dinamik hareketlerin izlenilmesi ve tespit edilmesi için 10 Hz ve 20 Hz örnekleme aralığında veri toplayan GNSS alıcıları ile birlikte RT-PPP tekniği uygulanmıştır [63]. Sonuçlar RT-PPP' nin RP tekniği ile benzer sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca RT-PPP tekniği köprü gibi daha birçok mühendislik yapılarının deformasyonlarının izlenmesinde RP yaklaşımına güçlü bir alternatif olduğu belirtilmiştir [87]. Benzer çalışmalar yer kabuğu hareketlerinden kaynaklı oluşan ko-sismik yer değiştirmelerin tespit edilmesi için, gerçek zamanlı GNSS sismolojisinde de uygulanmıştır [88]-[91]. RT-PPP tekniği ile yapılan çalışmalarda meydana gelen internet kesintileri, RTS düzeltme

ürünlerinin anlık olarak gecikmesi gibi olumsuz durumlar bu tekniğin dezavantajıdır. Bununla birlikte gerçek zamanlı uygulamalarda oluşacak olumsuzlukların üstesinden gelmek için Colosima ve diğerleri (2011) tarafından ortaya atılan VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) yaklaşımı önerilmiştir. VADASE yaklaşımı hiçbir internet bağlantısı gerektirmeden tek bir GNSS alıcısıyla taşıyıcı faz gözlemlerinin toplanması ve anlık olarak yayınlanan GNSS yayın efemerisi bilgilerinin alınmasına dayanmaktadır [93]. Bu algoritma ham GNSS faz gözlemleri kullanılarak ardışık epoklar arasındaki yer değiştirmeleri belirleyebilmektedir [92], [94]. Colosimo ve diğerleri (2011) VADASE yönteminin depremde meydana gelen yer dalga formu ve ko-sismik yer değiştirmelerini tespit etmek için 1 Hz ve 5 Hz'lik GPS verileri ile incelemişler ve depremden kaynaklı meydana gelen yer değiştirmeleri başarıyla yakalamışlardır. Benzer çalışma Japonya'da meydana gelen deprem sırasında toplanan GPS verilerinin sonradan değerlendirme VADASE tekniği, RP ve PPP tekniği ile değerlendirilip karşılaştırılmıştır [95]. VADASE yöntemi ile cm seviyesinde deplasmanlar yakalanmıştır. GNSS-VADASE yaklaşımı ile birçok çalışmada kinematik modda hem gerçek zamanlı hem de sonradan simülasyonu yapılmış dinamik hareketlerin meydana getirdiği yer dalga formlarını, ko-sismik deplasmanları ve oluşan deformasyonları yakalama performansı test edilmiştir [93], [96], [97]. Sonuçlar diğer yöntemlerle kıyaslandığında (RP and PPP) cm seviyesinde doğruluğa ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu yaklaşımın zamanla geliştirilip yeni bir yaklaşım olarak VADASE-LOO (VADASE Leave-One-Out), ko-sismik deformasyonları cm doğruluğunda belirlemiştir [94]. Öte yandan VADASE yaklaşımının farklı GNSS uydu kombinasyonlarının çözüme sunacağı katkısının araştırılması için çalışmalar yapılmıştır. Geng ve diğerleri (2016) 2015 yılında gerçekleşen Nepal depreminde meydana gelen sismik dalgaları yüksek frekanslı Multi GNSS gözlemleri ile incelemiş ve GPS+BDS çözümünün, sadece-GPS çözümüne göre daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir [96]. Benzer çalışma Tesolin ve diğerleri (2019) tarafından kinematik modda GPS+Galileo uydu kombinasyonlarının tek uydu sistemli çözümlerden elde edilen sonuçlara göre daha iyi olduğunu ortaya koymuştur [98]. Bununla birlikte mühendislik yapılarda meydana gelen yatay ve düşey yönlü dinamik hareketlerin yakalanmasında yüksek frekanslı Multi-GNSS (GPS/Galileo/GLONASS/BeiDou) ve sadece-GPS gözlemlerine dayalı RT-VADASE tekniği ile çözümler gerçekleştirilmiştir [99], [100], [101]. Sonuçlara bakıldığında

yatay yönlü deplasmanların milimetre/milimetre altında, düşey yönlü deplasmanların ise 1 cm altında başarılı bir şekilde yakalanabileceği sonucuna varılmıştır. Gerçek zamanlı yapı sağlığı izleme ve hızlı tehlike değerlendirme çalışmaları için de simülasyonu yapılan 1995 Kobe depremi ve yatay yönlü harmonik salınımların tek frekanslı GPS/Galileo RT-VADASE tekniği ile çözümleri hem zaman hem de frekans alanında değerlendirilmiştir [102]. Tek frekanslı GPS/Galileo uydu gözlemleri ile yapılan RT-VADASE çözümünde simülasyonu yapılmış Kobe depremini başarılı bir şekilde yakalayabildiği ve yatay yönlü üretilen harmonik salınımları milimetre altında deplasman değerleri ile tespit edildiği gözlemlenmiştir [102]. Ayrıca düşük frekanslı dinamik hareketleri akıllı cep telefonu yardımıyla tespit edilmesi için Fortunato ve diğerleri (2019) 1 Hz aralığında veri toplayan Android tabanlı akıllı cep telefonu ile veriler toplayarak VADASE yöntemiyle değerlendirmiştir. Bu yöntem ile dinamik hareketlerin tespit edilmesinde, düşük titreşimli hareketlerin yakalanabileceği gösterilmiştir [103].

Günümüze kadar yapılmış çalışmalarda düşey yönlü dinamik hareketlerin izlenmesinde GNSS tekniği olarak RP, RTK ve Kinematik-PPP yöntemleri kullanılmıştır. Buna ilaveten RT-PPP ve VADASE yöntemi ile düşük örnekleme aralığında veri toplanıp sonradan değerlendirme yapılarak yöntemlerin düşey yönlü hareketleri tespit edilmesi incelenmiştir. Bu çalışma ile yüksek frekanslı (20 Hz) GNSS sensörler kullanılarak gerçek zamanlı RT-PPP yöntemi ve yer değiştirme hızlarını doğrudan hesaplayabilen RT-VADASE yöntemi bir arada değerlendirilmiş ve düşey yönlü yapısal titreşimlerin anında gerçek zamanlı izlenebilirliği araştırılmıştır. Ayrıca RT-VADASE yönteminin düşey yönlü hareketlerin tespitinde performansının GNSS sensörlerinde kullanılabilirliğine ilişkin sonuçlar yer bulmuş olup yapı sağlığı izlemelerinde bu yöntemin güçlü ve zayıf yönleri belirtilmiştir. Bu yöntem ile deprem, rüzgâr gibi doğal olaylar sonucu mühendislik yapılarında meydana gelen dinamik yüklerden dolayı düşey yönlü deplasmanları anında yakalayabilmek için hızlı tehlike değerlendirme ve erken uyarı sistemlerinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla RP yöntemi karşılaştırma kriteri olarak seçilmiş ve çalışmada RT-PPP ve RT-VADASE yöntemleri ilk defa ve birlikte yöntemlerin performansı hem zaman hem de frekans alanında değerlendirilmiştir.

## 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İÇeriği

Bu tez çalışması ile birlikte hedeflenen, köprüler, yüksek katlı binalar, viyadükler, kuleler vb. mühendislik yapılarında meydana gelen deprem, rüzgâr ve trafik yükü gibi dinamik yüklerin etkisinde kalan yapılarda meydana gelen düşey titreşimleri, yüksek frekanslı RT-PPP ve RT-VADASE yöntemleriyle yakalayabilme kabiliyetini test etmektir. Ayrıca başka bir amacımız mühendislik yapılarında meydana gelen doğal titreşimlerin tespiti için birçok çalışmada yaygın olarak kullanılan bağıl konum belirleme yöntemine, bu iki yöntemin güçlü bir alternatif olup olmayacağını araştırmaktır. Bu bağlamda hem gerçek zamanlı (Real-Time) hem de sonradan değerlendirme (Post-Process) rnleri kullanılarak sırasıyla RT-PPP, N (Near)-RT-PPP, PP-PPP yöntemleri ve RT-VADASE yöntemi zaman ve frekans alanında karşılaştırılmıştır. Dört yöntemi karşılaştırırken RP yöntemi referans alınarak değerlendirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda düşey yönlü salınım yapabilen ve üzerinde farklı sensörler kurulabilen elik yassı simülasyon çubuk ile deneyler gerçekleştirilip, gerçek zamanlı şartlar altında çift frekanslı GPS gözlemleri toplanarak dinamik hareketlerin yüksek frekanslı kinematik verilerden gerçek zamanlı olarak elde edilebileceği araştırılmıştır.

## **2. KÜRESEL NAVİGASTON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS) ve KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ**

Günümüzde uydu tabanlı konum belirleme sistemlerinin artması ile beraber GNSS tabanlı yöntemlerin geliştirilmesi ve farklı alanlarda kullanımı yaygın bir şekilde artış göstermeye başlamıştır. Mevcudiyette küresel olarak tam kapasite çalışan 4 farklı uydu sistemi bulunmaktadır. Bu sistemler küresel çapta yeryüzüne sinyal yayarken, bölgesel olarak gelişimini sürdüren sistemlerde kendi çizmiş olduğu sınırlar içerisinde yeryüzünde bulunan GNSS alıcılarına sinyal göndermektedir. Uydu tabanlı sistemler, hala daha gelişimini sürdürmeye devam etmekte ve gün geçtikçe uzayda bulunan uydu sayısı artmaktadır. Bu bölümde günümüze kadar küresel veya bölgesel uydu tabanlı konum belirleme sistemlerinin gelişimine ve mevcut durumlarına değinilecektir.

### **2.1. Küresel Konumlama Sistemi (GPS)**

İkinci dünya savaşından sonra süper güç haline gelen Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği (SSCB) kısacası Sovyetler Birliği, 4 Ekim 1957’ de ilk defa uzaya fırlatılan ve adı Sputnik-1 olan ilk yapay uydudan sonra uzay yarışına girmişlerdir. Sovyetler Birliği hız kesmeden 1 ay sonra Sputnik-2 uydusunu da uzaya fırlattıktan sonra ABD, bu uydulara karşı 31 Ocak 1958’de Explorer-1 uydusu ile karşılık vermiştir. Sputnik uyduları ve kâşif anlamına gelen Explorer-1 uydusu ile başlayarak günümüze kadar uydu sistemlerinde büyük gelişmeler yaşanmıştır [104], [105].

İlk uydu navigasyon sistemi olan TRANSIT (Time Ranging And Sequential) sistemin birinci uydusu 18 Nisan 1960 yılında ABD Deniz Kuvvetleri tarafından askeri amaçlı fırlatılmıştır. Ayrıca NAVSAT (Navy Navigation Satellite System) olarak da bilinen TRANSIT sistem 5 uydudan oluşmakta olup sonraları sivil kullanıma açılmıştır. Bu sistemin navigasyon amaçlı gerçek zamanlı konum belirlemeyi sağlayamıyor olması ve konum doğruluğunun oldukça düşük olması hem askeri hem de sivil amaçlı çalışmalarda büyük bir dezavantajdı. Konum doğruluğunun doğru bir şekilde verilebilmesi için uzayda hassas uydu saatlerine gereksinim duyulmaktaydı.

Bu bağlamda ABD Deniz Kuvvetleri 1967 yılında uzayda yüksek hassasiyette saat ölçümü için Timation uydusunu fırlatmıştır [104], [105].

1970'li yıllara gelindiğinde TRANSIT sistemdeki olumsuz koşullar neticesinde bu sistemin geliştirilmiş versiyonu olan NAVSTAR/GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System), ABD Savunma Bakanlığı tarafından planlanmıştır. GPS uydu sistemi, 1978 yılında Blok-1 olarak isimlendirilen ilk GPS uydusunun atılmasıyla başlayarak 1994 yılında 24 uydu ile tam çalışır hale getirilmiştir [104], [105]. O yıllarda GPS uydu takımyıldızını yeni nesil GPS uyduları olarak bilinen Blok II ve çeşitli navigasyon iyileştirmeleri sağlayan Blok IIA uyduları oluşturmaktaydı. Ancak günümüzde bu uyduların hiçbiri uydu takımyıldızında bulunmamaktadır. Uydu sistem ve özelliklerindeki gelişmeler ile birlikte uydular arası bağlantı sağlayabilen ve otonom navigasyon kabiliyetine sahip 3. nesil GPS uydusu olan Blok IIR, 1997 yılında uzaya fırlatılmaya başlamıştır [105]. Günümüzde hala daha kullanılan bu uydular kendi kendine düzeltmelerini yapmaktadır. Aynı uydu serisinin değişiklikler yapılarak geliştirilen Blok IIR-M uyduları 2005 yılında uzayda yerini almıştır. Bu uydular askeri olarak M, ve sivil amaçlı L2C kodu yayınlayacak şekilde sisteme yerleştirilmiştir. Blok II uydularının en son serisi olan ve 3. sivil taşıyıcı sinyal yayınlayan Blok IIF uyduları 2010 ve 2016 yılları arasında toplam 12 tane olmakla birlikte uzayda GPS uydu takımyıldızında hala daha görevini sürdürmektedir [105]. 2018 yılına gelindiğinde hizmet dışı olup, ömrü biten eski uyduların yerini alan Blok III uydu lansmanı günümüzde hala daha uzaya fırlatılmaya devam etmektedir. Bu uydular yeni sinyaller içeren ve daha yüksek güç seviyelerinde yayın yapan üçüncü nesil GPS uydularıdır. Ayrıca 4. sivil sinyal olarak adlandırılan L1C kodu, L1 taşıyıcı sinyal üzerinden yayınlanmaktadır. Bununla birlikte Blok III uydu serinin ikincisi olan Blok IIIF uyduları 2026-2034 yılları arasında uzaya fırlatılması planlanmaktadır. Günümüze kadar GPS uydu takımyıldızına ait genel özellikler Tablo 2.1'de gösterilmiştir [105]. GPS uyduları Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 6 yörünge düzlemine yerleştirilmiş ve yörüngelerin birbirine uzaklığı 60°'dir. Sistem ekvator ile arasında 55° eğim ile 6 farklı yörünge düzleminde, yerden yüksekliği yaklaşık 20,200 km ve yörünge periyodu yaklaşık 11 saat 58 dakika olan mevcut 31 uydu takımyıldızından oluşmaktadır. [106]. GPS uyduları sinyal modernizasyonundan önce, L1 ve L2 olarak adlandırılan ve  $f_0=10.23$  MHz ana frekanstan üretilen taşıyıcı sinyaller yayınlamaktaydı. Bu taşıyıcı sinyaller üzerine C/A (Coarse/Acquisition),

Tablo 2.1: GPS Takımyıldızına ait genel özellikler.

| GPS Takımyıldızları     | ESKİ UYDULAR                                                                      |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     | MODERNİZE UYDULAR                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Uyduların Şekilleri     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Uydu Tipleri            | <b>BLOK I</b>                                                                     | <b>BLOK II</b>                                                                    | <b>BLOK IIA</b>                                                                    | <b>BLOK IIR</b>                                                                     | <b>BLOK IIR-M</b>                                                                   | <b>BLOK IIF</b>                                                                     | <b>BLOK III</b>                                                                     | <b>BLOK III-F</b>                                                                   |
| Fırlatılma Tarihleri    | 1978-1985                                                                         | 1989-1990                                                                         | 1990-1997                                                                          | 1997-2004                                                                           | 2005-2009                                                                           | 2010-2016                                                                           | 2018-Devam Ediyor                                                                   | 2026-2034 (Tahmini)                                                                 |
| Fırlatılan Uydu Sayısı  | 11                                                                                | 9                                                                                 | 19                                                                                 | 13                                                                                  | 8                                                                                   | 12                                                                                  | 5                                                                                   | 0                                                                                   |
| Operasyonel Uydu Sayısı | 0                                                                                 | 0                                                                                 | 0                                                                                  | 7                                                                                   | 7                                                                                   | 12                                                                                  | 4                                                                                   | 0                                                                                   |
| Yörünge Yükseklikleri   | ~20200 km                                                                         | ~20200 km                                                                         | ~20200 km                                                                          | ~20200 km                                                                           | ~20200 km                                                                           | ~20200 km                                                                           | ~20200 km                                                                           | ~20200 km                                                                           |
| Yörünge Eğimleri        | 63.0°                                                                             | 55°                                                                               | 55°                                                                                | 55°                                                                                 | 55°                                                                                 | 55°                                                                                 | 55°                                                                                 | 55°                                                                                 |
| Uydu Saati              | Rubidyum ve sezyum                                                                | Rubidyum ve sezyum                                                                | Rubidyum ve sezyum                                                                 | Rubidyum                                                                            | Rubidyum                                                                            | Rubidyum ve sezyum                                                                  | Rubidyum                                                                            | Rubidyum                                                                            |
| Taşıyıcı Frekans        | L1 ve L2                                                                          | L1 ve L2                                                                          | L1 ve L2                                                                           | L1 ve L2                                                                            | L1 ve L2 (L2C)                                                                      | L1, L2 (L2C) ve L5                                                                  | L1 (L1C), L2 (L2C) ve L5                                                            | L1 (L1C), L2 (L2C) ve L5                                                            |
| Ömrü                    | 5 yıl                                                                             | 7.5 yıl                                                                           | 7.5 yıl                                                                            | 10 yıl                                                                              | 10 yıl                                                                              | 12 yıl                                                                              | 15 yıl                                                                              | 15 yıl                                                                              |



Tablo 2.2: GPS uydularının güncel uydu takımı yıldızı ve bu uydulara ait temel bilgiler.

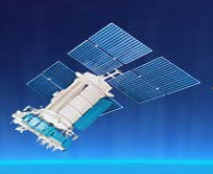
| PRN | SVN | Uydu       | Fırlatılma Tarihi | Yörünge | Taşıyıcı Sinyaller | Saat |
|-----|-----|------------|-------------------|---------|--------------------|------|
| 13  | 43  | GPS 2R-2   | 1997/07/23        | MEO     | L1C/A              | RB   |
| 20  | 51  | GPS 2R-4   | 2000/05/11        | MEO     | L1C/A              | RB   |
| 22  | 41  | GPS 2R-6   | 2000/11/10        | MEO     | L1C/A              | RB   |
| 16  | 56  | GPS 2R-8   | 2003/01/29        | MEO     | L1C/A              | RB   |
| 21  | 45  | GPS 2R-9   | 2003/03/31        | MEO     | L1C/A              | RB   |
| 19  | 59  | GPS 2R-11  | 2004/03/20        | MEO     | L1C/A              | RB   |
| 2   | 61  | GPS 2R-13  | 2004/11/06        | MEO     | L1C/A              | RB   |
| 17  | 53  | GPS 2R-14M | 2005/09/26        | MEO     | L1C/A, L2C         | RB   |
| 31  | 52  | GPS 2R-15M | 2006/09/25        | MEO     | L1C/A, L2C         | RB   |
| 12  | 58  | GPS 2R-16M | 2006/11/17        | MEO     | L1C/A, L2C         | RB   |
| 15  | 55  | GPS 2R-17M | 2007/10/17        | MEO     | L1C/A, L2C         | RB   |
| 29  | 57  | GPS 2R-18M | 2007/12/20        | MEO     | L1C/A, L2C         | RB   |
| 7   | 48  | GPS 2R-19M | 2008/03/15        | MEO     | L1C/A, L2C         | RB   |
| 5   | 50  | GPS 2R-21M | 2009/08/17        | MEO     | L1C/A, L2C         | RB   |
| 25  | 62  | GPS 2F-1   | 2010/05/28        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 1   | 63  | GPS 2F-2   | 2011/07/16        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 24  | 65  | GPS 2F-3   | 2012/10/04        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | CS   |
| 27  | 66  | GPS 2F-4   | 2013/05/15        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 30  | 64  | GPS 2F-5   | 2014/02/21        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 6   | 67  | GPS 2F-6   | 2014/05/17        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 9   | 68  | GPS 2F-7   | 2014/08/02        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 3   | 69  | GPS 2F-8   | 2014/10/29        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 26  | 71  | GPS 2F-9   | 2015/03/25        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 8   | 72  | GPS 2F-10  | 2015/07/15        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | CS   |
| 10  | 73  | GPS 2F-11  | 2015/10/31        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 32  | 70  | GPS 2F-12  | 2016/02/05        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 4   | 74  | GPS 3-1    | 2018/12/23        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 18  | 75  | GPS 3-2    | 2019/08/22        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 23  | 76  | GPS 3-3    | 2020/06/30        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 14  | 77  | GPS 3-4    | 2020/11/5         | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |
| 11  | 78  | GPS 3-5    | 2021/06/17        | MEO     | L1C/A, L2C, L5     | RB   |

## 2.2. Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)

Sovyetler Birliği tarafından 1976’ da gelişimi başlatılmış ve GPS uydu sistemine eş değer ikinci küresel konum belirleme sistemi olan GLONASS, 1982 yılında COSMOS adı verilen ilk GLONASS uydusu olarak uzaya fırlatılmıştır. Sistemin temel çıkış amacı askeri olmakla birlikte ilerleyen yıllarda GPS uydu sisteminde olduğu gibi sivil kullanıma açılmıştır. GLONASS uydu sistemi Ocak 1996’da 24 uydulla beraber tam kapasiteli çalışır hale getirilmiştir. Sovyetler Birliğinin çöküşüyle beraber ülkede

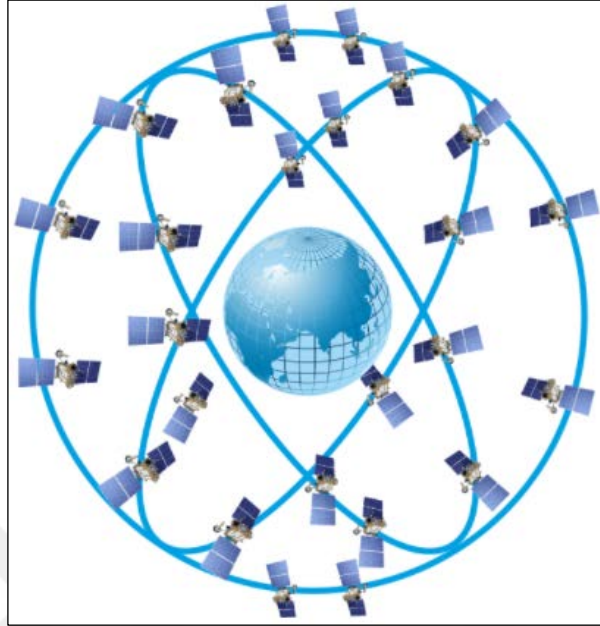
yaşanan siyasi değişim, ekonomik kriz ve GLONASS sisteminde ilk nesil uyduların kısa ömürlü olmasından dolayı GLONASS uydu sayısının azalmasına sebep olmuştur. Bundan dolayı 2001 yılına kadar bölgesel anlamda sadece Rusya sınırları içerisinde 7 uydu ile işlevine devam etmekteydi. Rusya hükümeti GLONASS uydu sistemini tekrar tam operasyonel yeteneğe (Full Operational Capability, FOC) ulaştırmak ve modernizasyonu sağlamak için 2002 yılında “2002-2011 Küresel Navigasyon Sistemi” programını onaylayarak uzay çalışmalarına ayrılan bütçeyi arttırmıştır. Bu yıldan sonra yeni nesil GLONASS-M uydularının uzaya fırlatılması, uydu ömrünün uzun olması, sistemin performansını ve kullanılabilirliğini arttırmıştır.

Tablo 2.3: GLONASS uydu takımıyıldızının genel özellikleri.

| GLONASS Takımıyıldızları | Birinci Nesil                                                                      | İkinci Nesil                                                                       | Üçüncü Nesil                                                                        | Dördüncü Nesil                                                                       |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Uyduların Şekilleri      |  |  |  |  |
| Uydu Tipleri             | GLONASS                                                                            | GLONASS-M                                                                          | GLONASS-K                                                                           | GLONASS-K2                                                                           |
| Fırlatılma Tarihleri     | 1982-2005                                                                          | 2003-2016                                                                          | 2011-2018                                                                           | 2017-Devam Ediyor                                                                    |
| Fırlatılan Uydu Sayısı   | 82                                                                                 | 44                                                                                 | 2                                                                                   | -                                                                                    |
| Operasyonel Uydu Sayısı  | 0                                                                                  | 20+3 (bakımda)                                                                     | 1+1 (uçuş testi)                                                                    | -                                                                                    |
| Yörünge Yükseklikleri    | ~19100 km                                                                          | ~19100 km                                                                          | ~19100 km                                                                           | ~19100 km                                                                            |
| Yörünge Eğimleri         | 64.8°                                                                              | 64.8°                                                                              | 64.8°                                                                               | 64.8°                                                                                |
| Uydu Saati               | Sezyum                                                                             | Sezyum                                                                             | Sezyum                                                                              | Sezyum                                                                               |
| Taşıyıcı Frekans         | L1 ve L2 (FDMA)                                                                    | L1, L2 ve L3 (+2014)                                                               | L1, L2 ve L3                                                                        | L1, L2 ve L3                                                                         |
| Ömrü                     | 3.5 yıl                                                                            | 7 yıl                                                                              | 10 yıl                                                                              | 10 yıl                                                                               |

2011 yılına gelindiğinde sistemin 24 uyduyla beraber tam kapasite çalışır hale gelmesinden sonra GPS sistemi ile eş zamanlı kullanılmaya başlanmıştır. Rusya devleti küresel olarak sürekli kullanım, güncel GNSS sistemleriyle senkronize yüksek hassasiyette konum doğruluğuna ulaşma, uzay yarışında sürekli performans göstermek

için üçüncü nesil GLONASS-K uydularını ilerleyen yıllarda uzaya fırlatmaya başlamıştır.



şekil 2.2: GLONASS Uydu Takımıyıldızı.

Günümüzde güncel olarak GLONASS yörünge takımıyıldızında 25 uydu bulunmaktadır. Bu uyduların 22 tanesi tam kapasite çalışmakta olup 2 tanesi bakımda ve geri kalan 1 tanesi de uçuş testleri aşamasındadır. Günümüze kadar GLONASS uydu takımıyıldızına ait genel zellikler Tablo 2.3'te gösterilmiştir [108]. GLONASS uyduları şekil 2.2'de görüldüğü gibi 3 yörünge düzlemine yerleştirilmiş ve yörüngelerin birbirine uzaklığı  $110^\circ$ 'dir. Sistem, ekvator ile arasında  $64.8^\circ$  eğim ile 3 dairesel yörüngede dönen, yerden yüksekliği yaklaşık 19,100 km ve yörünge periyodu yaklaşık 11 saat 15 dakika 44 saniye olan 24 uydu takımıyıldızından oluşmaktadır. Ayrıca günümüzde güncel olarak bulunan GLONASS uyduları Tablo 2.4'te verilmiştir [108]. GLONASS, GPS uydu sistemi gibi tek yönlü ölçü sistemi olup her iki sistemin elektromanyetik tayfta sinyal yapısı benzerdir. Uydular L bandında L1 ve L2 olarak 2 taşıyıcı sinyal kullanır. GPS uydularının aksine her bir uydudan çıkan sinyalin frekansı farklıdır. L1 taşıyıcı sinyalin 1602,5625 MHz'den başlayarak 1615,5 MHz'e kadar 0.5625 MHz adımlarla değişirken L2 bandı için 1246,4375 MHz'den başlayarak 1256,5 MHz'e kadar 0.4375 MHz artışla değişmektedir [108].

Tablo 2.4: GLONASS uydularının güncel uydu takımıydızı ve bu uydulara ait temel bilgiler.

| PRN | SVN | Uydu              | Fırlatılma Tarihi | Yörünge | Taşıyıcı Sinyaller | Saat |
|-----|-----|-------------------|-------------------|---------|--------------------|------|
|     | 719 | GLONASS-M (2432)  | 2007/10/26        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 720 | GLONASS-M (2433)  | 2007/10/26        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 721 | GLONASS-M (2434)  | 2007/12/25        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 723 | GLONASS-M (2436)  | 2007/12/25        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 730 | GLONASS-M (2456)  | 2009/12/14        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 733 | GLONASS-M (2457)  | 2009/12/14        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 732 | GLONASS-M (2460)  | 2010/03/01        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 735 | GLONASS-M (2461)  | 2010/03/01        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 736 | GLONASS-M (2464)  | 2010/09/02        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 743 | GLONASS-M (2475)  | 2011/11/04        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 744 | GLONASS-M (2476)  | 2011/11/04        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 745 | GLONASS-M (2477)  | 2011/11/04        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 747 | GLONASS-M (2485)  | 2013/04/26        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 754 | GLONASS-M (2491)  | 2014/03/23        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 755 | GLONASS-M+(2500)  | 2014/06/14        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 702 | GLONASS-K1 (2501) | 2014/11/30        | MEO     | G1C, G2C, L3       | Cs   |
|     | 751 | GLONASS-M+(2514)  | 2016/02/06        | MEO     | G1C, G2C, L3       | Cs   |
|     | 753 | GLONASS SM (2516) | 2016/05/29        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 752 | GLONASS-M (2522)  | 2017/09/22        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 756 | GLONASS-M (2527)  | 2018/06/16        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 757 | GLONASS-M (2529)  | 2018/11/03        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 758 | GLONASS-M (2534)  | 2019/05/27        | MEO     | G1C, G2C           | Cs   |
|     | 759 | GLONASS-M (2544)  | 2019/12/11        | MEO     |                    | Cs   |
|     | 760 | GLONASS-M (2545)  | 2020/03/16        | MEO     |                    | Cs   |
|     | 705 | GLONASS-K1 (2547) | 2020/10/25        | MEO     |                    | Cs   |

Her bir uydu için taşıyıcı frekansların değerleri,

$$f_{L1} = (f_{01} + (k - 1)\Delta f_{L1}) \quad (2.1)$$

$$f_{L2} = f_{02} + (k - 1)\Delta f_{L2} \quad (2.2)$$

formülleri ile elde edilir. Eşiklik 2.1 ve 2.2 de gösterilen  $f_{01}$  ve  $f_{02}$  değerleri taşıyıcı sinyallerin başlangıç frekansı olup sırasıyla 1602.0 MHz ve 1246.0 MHz dir. Aynı şekilde eşitliklerde  $\Delta f_{L1}$  ve  $\Delta f_{L2}$  sembolleri ile gösterilen taşıyıcı sinyallerin artış miktarları olup sırasıyla 0.5625 MHz ve 0.4375 MHz değerlere sahiptir. Son olarak  $k$  ile ifade edilen katsayı ise 1 ila 24 arasında değişken değer almaktadır. Frekans bölmeli çoklu erişim (Frequency Division Multiple Access, FDMA) olarak adlandırılan bu teknikte uyduların tek uydu modülasyonu ile ayırt edilmesine gerek duyulmadığından uydular aynı kodu kullanmaktadır [108].

Üçüncü nesil uydu olan ve 2011 yılında GLONASS-K1 test uydusu uzaya fırlatılmaya başlamasıyla beraber GPS uydu sinyallerinde olduğu gibi CDMA sinyal yapısına ve 12002.25 MHz frekans değerine sahip L3 sinyali kullanılmaya başlamıştır. Bundan sonraki süreçte uzaya fırlatılacak olan tüm uydularda CDMA yapısına sahip L3 sinyalleri kullanılmıştır. Ayrıca dördüncü nesil uydu olan GLONASS-K2 uydularında L1 ve L2 taşıyıcı sinyalleri hem FDMA hem de CDMA yapısına sahip olup L3 sinyalini de kullanılması planlanmaktadır [108].

### 2.3. Galileo Konumlandırma Sistemi

GPS ve GLONASS' a alternatif bir sistem olarak üretilen ve çıkış amacı diğer iki küresel uydu navigasyon sistemi gibi askeri olmayıp tamamen sivil amaçlı olan Galileo, küresel anlamda üçüncü uydu navigasyon sistemidir. 2003 yılına gelindiğinde Galileo uydu sisteminin, Avrupa Birliği (European Union, EU) ve Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency, ESA) tarafından diğer küresel uydu sistemleri ile uyumlu çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu uydu sisteminin tam kapasite çalışır hale gelmesi için üç aşamadan oluşan bir program planlanmıştır. İlk aşamada Galileo uydularının taşıyıcı sinyal ve atomik saat gibi konum belirleme de temel işlevleri olan elemanların, testinin yapılması için GIOVE-A (Galileo Yörüngede Doğrulama Bileşeni) olarak adlandırılan ve 2005 yılının sonlarına doğru Kazakistan'da bulunan Baykonur Uzay üstünden fırlatılmıştır [109]. Aynı amaçlar için ikinci uydu olan GIOVE-B uydusu 2008 yılında uzaya fırlatılmış ve her iki uydunun da test aşamasını tamamladıktan sonra 2012 yılında görevine son verilmiştir [109]. Galileo sisteminin ikinci aşaması olan yörüngede doğrulanması için ilk operasyonel özelliğine sahip 4 adet yörünge içi doğrulama (In-Orbit Validation, IOV) uyduları çiftler halinde (IOV-

1, IOV-2), (IOV-3, IOV-4) sırasıyla 2011 ve 2013'te uzaya fırlatılmıştır. 2013 yılında operasyonel özelliğe sahip sadece bu uydulardan yayınlanan sinyaller ile konum belirleme tespiti çalışmaları yapılmıştır. Bu uydular günümüzde tam kabiliyete sahip Galileo uydu takımı yıldızının bir parçası olarak görevine devam etmektedir. Galileo uydu konum belirleme sisteminin tamamlanması ve tam operasyonel kabiliyete ulaştırılması için 2014 yılında FOC uyduları fırlatılmaya başlamıştır [110]. Mart 2022 tarihi itibarıyla 28 adet Galileo uydusu bulunmaktadır.

Tablo 2.5: Galileo uydularının güncel uydu takımı yıldızı ve uydulara ait temel bilgiler.

| PRN | SVN  | Uydu               | Fırlatılma Tarihi | Yörünge | Taşıyıcı Sinyaller | Saat       |
|-----|------|--------------------|-------------------|---------|--------------------|------------|
| E11 | E101 | IOV-1, Galileo PFM | 21/10/2011        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | PHM        |
| E12 | E102 | IOV-2, Galileo FM2 | 21/10/2011        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS       |
| E19 | E103 | IOV-3, Galileo FM3 | 21/10/2012        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | PHM        |
| E20 | E104 | IOV-4, Galileo FM4 | 21/10/2012        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS       |
| E18 | E201 | FOC-1              | 22/08/2014        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E14 | E202 | FOC-2              | 22/08/2014        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E26 | E203 | FOC-3              | 27/03/2015        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E22 | E204 | FOC-4              | 27/03/2015        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E24 | E205 | FOC-5              | 11/09/2015        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E30 | E206 | FOC-6              | 11/09/2015        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E08 | E208 | FOC-8              | 17/12/2015        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E09 | E209 | FOC-9              | 17/12/2015        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E01 | E210 | FOC-10             | 24/05/2016        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E02 | E211 | FOC-11             | 24/05/2016        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E07 | E207 | FOC-7              | 17/11/2016        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E03 | E212 | FOC-12             | 17/11/2016        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E04 | E213 | FOC-13             | 17/11/2016        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E05 | E214 | FOC-14             | 17/11/2016        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E21 | E215 | FOC-15             | 12/12/2017        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E25 | E216 | FOC-16             | 12/12/2017        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E27 | E217 | FOC-17             | 12/12/2017        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E31 | E218 | FOC-18             | 12/12/2017        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E36 | E219 | FOC-19             | 25/07/2018        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E13 | E220 | FOC-20             | 25/07/2018        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E15 | E221 | FOC-21             | 25/07/2018        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E33 | E222 | FOC-22             | 25/07/2018        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E34 | E223 | FOC-23             | 05/12/2021        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |
| E10 | E224 | FOC-24             | 05/12/2021        | MEO     | E1, E5a, E5b, E6   | RAFS & PHM |

Bu uyduların 4 tanesi hizmet dışında bırakılmış, 2 tanesi test aşamasında olup 22 tanesi işlevini sürdürmektedir. Galileo uydularına ait bilgiler Tablo 2.5'te verilmiştir [109]. Galileo uyduları, yükselme düğüm noktaları arasında  $120^\circ$  eş aralıklarla 3 farklı yörünge düzleminde (A, B, C) oluşmaktadır. Her yörünge düzleminde 8 ana uydu ve 2 tane yedek uydu olmak üzere 10 tane uydu bulunmaktadır. Her düzlemdeki ana uydular  $45^\circ$  açısal mesafe ile yerleştirilmiştir. Ana uydular işlevini yitirdiği zaman yedek uydular devreye girmektedir. Yörünge yüksekliği yaklaşık 23,222 km ve yörünge periyodu 14 saat 4 dakika 42 saniye olan 3 farklı yörünge, Orta Uzaklıklılı Yörünge (Medium Earth Orbit, MEO) olarak ifade edilmektedir. Her yörünge düzlemi, ekvator ile  $56^\circ$  eğim açısı yapmaktadır [110].

Galileo uyduları, küresel ölçekte uydu ile GNSS alıcısı arasında navigasyon amaçlı, L bandının altında 3 farklı frekansta (E1, E5 ve E6) hizmet sağlamaktadır. Bu bantlardan E5, kendi içerisinde E5a ve E5b sinyalleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Ayrıca Galileo uydu sistem kullanıcıları, Sınırsız Ulaşım (OS: Open Service), Ticari Kullanım (Commercial Service, CS), Kamu Kullanımı (Public Regulated Service, PRS), Güvenlik ve Acil Durum Kullanımı (Safety of Life, SOL), Arama -Kurtarma (Search And Rescue, SAR) kullanım hizmetleri sunmaktadır [111].

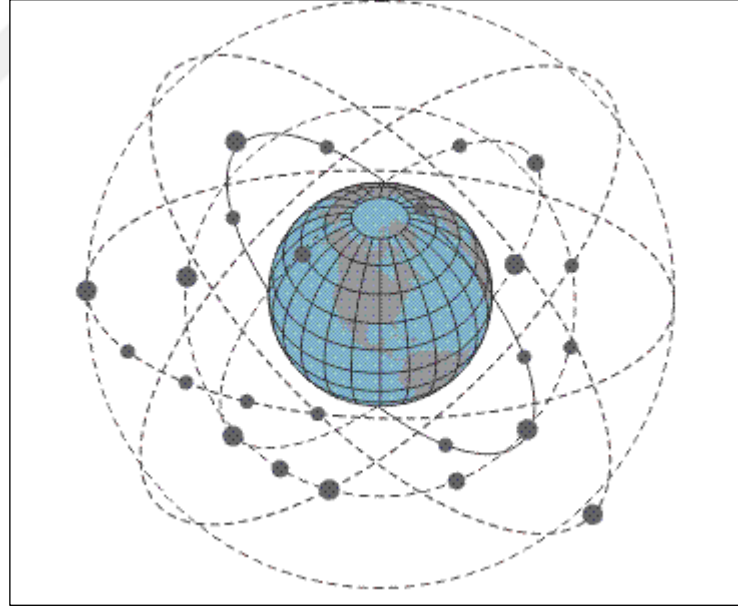
## **2.4. BeiDou (Compass) Uydu Konumlandırma Sistemi**

Çince “‘Büyük Ayı Takım Yıldızı’” anlamına gelen BeiDou, ABD’nin GPS ve Rusya’nın GLONASS uydu konum belirleme sistemlerinden sonra bağımsız, konumlama, navigasyon ve zamanlama hizmetleri sağlayan üçüncü uydu konum belirleme sistemi olmuştur [112]-[114]. BeiDou Navigasyon uydu sistemi (BDS), diğer iki küresel navigasyon uydu sistemlerinde de olduğu gibi ulusal güvenlik ve askeri amaçlar için tesis edilmiştir. Çin Halk Cumhuriyeti, 1980’lerde başka ülkelerin GNSS sistemlerinden bağımsız, kendi uydu tabanlı navigasyon sistemini kurmak için karar vermiş ve sistemi üç aşamada planlamıştır. İlk aşaması olan deneysel konumlama sistemi BeiDou-1’in ilk uydusu BeiDou-1A, Ekim 2000’de uzaya fırlatılmıştır. Aynı yıl içerisinde ikincisi olan BeiDou-1B ve deneysel sistemi tamamlayacak son uydu olan BeiDou-1C uydusu 2003 yılında uzaya fırlatılarak ilk aşama başarıyla gerçekleşmiştir. Şekil 2.3’te gösterilen yaklaşık Asya-Pasifik bölgesini içerisine alan

Tablo 2.6: BeiDou uydularının güncel uydu takımı yıldızı ve uydulara ait temel bilgiler.

| PRN | SVN  | Uydu                | Fırlatılma Tarihi | Yörünge | Taşıyıcı Sinyaller | Saat |
|-----|------|---------------------|-------------------|---------|--------------------|------|
| C06 | C005 | BEIDOU-IGSO1        | 31/07/2010        | IGSO    | B1, B2, B3         | RB   |
| C04 | C006 | BEIDOU-G4           | 31/07/2010        | GEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C07 | C007 | BEIDOU-IGSO2        | 17/12/2010        | IGSO    | B1, B2, B3         | RB   |
| C08 | C008 | BEIDOU-IGSO3        | 09/04/2011        | IGSO    | B1, B2, B3         | RB   |
| C09 | C009 | BEIDOU-IGSO4        | 26/07/2011        | IGSO    | B1, B2, B3         | RB   |
| C10 | C010 | BEIDOU-IGSO5        | 12/01/2012        | IGSO    | B1, B2, B3         | RB   |
| C05 | C011 | BEIDOU-G5           | 24/02/2012        | GEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C11 | C012 | BEIDOU-M3           | 29/04/2012        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C12 | C013 | BEIDOU-M4           | 29/04/2012        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C14 | C015 | BEIDOU-M6           | 18/09/2012        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C02 | C016 | BEIDOU-G6           | 25/10/2012        | GEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C31 | C101 | BEIDOU I1-S (Deney) | 30/03/2015        | IGSO    | B1, B2, B3         | RB   |
| C57 | C102 | BEIDOU M1-S (Deney) | 25/07/2015        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C58 | C103 | BEIDOU M2-S (Deney) | 25/07/2015        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C18 | C104 | BEIDOU I2-S (Deney) | 30/09/2015        | IGSO    | B1, B2, B3         | HMAC |
| C03 | C018 | BEIDOU-G7           | 12/06/2016        | GEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C13 | C017 | BEIDOU-IGSO6        | 11/10/2016        | IGSO    | B1, B2, B3         | RB   |
| C19 | C201 | BEIDOU-3M1          | 11/05/2017        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C20 | C203 | BEIDOU-3M2          | 11/05/2017        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C27 | C203 | BEIDOU-3M7          | 11/01/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C28 | C204 | BEIDOU-3M8          | 11/01/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C21 | C206 | BEIDOU-3M3          | 12/02/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C22 | C205 | BEIDOU-3M4          | 12/02/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C29 | C207 | BEIDOU-3M9          | 29/03/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C30 | C208 | BEIDOU-3M10         | 29/03/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C16 | C019 | BEIDOU-IGSO7        | 09/07/2018        | IGSO    | B1, B2, B3         | RB   |
| C23 | C209 | BEIDOU-3M5          | 29/07/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C24 | C210 | BEIDOU-3M6          | 29/07/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C26 | C211 | BEIDOU-3M11         | 24/08/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C25 | C212 | BEIDOU-3M12         | 24/08/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C32 | C213 | BEIDOU-3M13         | 19/09/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C33 | C214 | BEIDOU-3M14         | 19/09/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C35 | C215 | BEIDOU-3M15         | 15/10/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C34 | C216 | BEIDOU-3M16         | 15/10/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C59 | C217 | BEIDOU-3G1          | 11/01/2018        | GEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C36 | C218 | BEIDOU-3M17         | 18/11/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C37 | C219 | BEIDOU-3M18         | 18/11/2018        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C38 | C220 | BEIDOU-3 IGSO-1     | 20/04/2019        | IGSO    | B1, B2, B3         | HMAC |
| C01 | C020 | BEIDOU-G8           | 17/05/2019        | GEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C39 | C221 | BEIDOU-3 IGSO-2     | 24/06/2019        | IGSO    | B1, B2, B3         | HMAC |
| C45 | C223 | BEIDOU-3M23         | 23/09/2019        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C46 | C222 | BEIDOU-3M24         | 23/09/2019        | MEO     | B1, B2, B3         | RB   |
| C40 | C224 | BEIDOU-3 IGSO-3     | 05/11/2019        | IGSO    | B1, B2, B3         | HMAC |
| C43 | C226 | BEIDOU-3M21         | 23/11/2019        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C44 | C225 | BEIDOU-3M22         | 23/11/2019        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C41 | C227 | BEIDOU-3M19         | 16/12/2019        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C42 | C228 | BEIDOU-3M20         | 16/12/2019        | MEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C60 | C229 | BEIDOU-3G2          | 09/03/2020        | GEO     | B1, B2, B3         | HMAC |
| C61 | C230 | BEIDOU-3G3 (Test)   | 23/06/2020        | GEO     | B1, B2, B3         | HMAC |

bölgesel bir uydu konum belirleme sisteminin kurulması için ikinci aşama olan BeiDou-2'ye geçiş yapılmıştır. Bu aşamada, ilk uydusu 2007 yılında Orta Dünya Yörüngesine fırlatılmıştır. 2012 yılına gelindiğinde operasyonel hale gelen bu sistemde toplam 14 uydu uzaya fırlatılmıştır. Bu uydular 3 farklı yörüngede konuşlandırılmış olup uzayda; 4 orta dünya yörüngeli, 5 eğimli yer eş-zamanlı (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO), 5 yer-sabit yörüngeli (Geostationary Earth Orbit, GEO) uydulardan oluşmaktadır. En son aşama olan BeiDou-3'e 2020 yılında geçilmesi planlanmıştır. Küresel ölçekte uydu tabanlı konumlama sistemini kurmak için planlanan en son aşamada; orta dünya yörüngesinde 27, yer-sabit yörüngede 5 ve eğimli yer eş-zamanlı yörüngede 3 olmak üzere toplam 35 uydudan oluşacaktır [112]. Günümüze gelindiğinde BDS'nin uydu takımı yıldızı Tablo 2.6'da verilmiştir. Mevcut BDS uydu takımı yıldızında 49 tane uydu bulunmaktadır. Bu uydulardan 4 tanesi BeiDou-3 aşaması testleri için, 1 tanesi test aşamasında olup 44 tanesi işlevini sürdürmektedir [115].



Şekil 2.3: BeiDou uydu takımı yıldızı.

BeiDou uydu navigasyon sistemi Şekil 2.3' te gösterilen 3 eğimli yer eş zamanlı yörünge düzlemi ve 3 orta yer yörünge düzlemi olarak toplamda 6 yörünge düzlemine konuşlandırılmış MEO, GEO ve IGSO izleyen uydular bulunmaktadır. Yükselme düğüm açıları  $120^\circ$  olan MEO ve IGSO düzlemlerinin yörünge eğiklik açıları  $55^\circ$  dir. Yörüngelerde dönen uyduların arasında eşit faz aralıkları bulunmaktadır. Orta

dünya yörüngesinde bulunan uyduların yükseklikleri yaklaşık 21,525 km olup, yörüngedeki bir periyodunu 12 saat 52 dakikada tamamlarlar [114]. Eğimli eş zamanlı yörünge ve yer eş zamanlı yörünge düzlemlerinde bulunan uyduların yükseklikleri yaklaşık 35,786 km olup, IGSO düzleminde bir uydu, yörüngedeki bir turunu 23 saat 52 dakikada tamamlamaktadır [114]. BeiDou uyduları L bandında, sistemin ilk harfi B ile adlandırılan B1, B2 ve B3 alt bantta 3 farklı frekansta sinyal yayınlar. BDS-2 ve BDS-3 kapsamındaki uydulara ait sinyallerin özellikleri Tablo 2.7’de detaylı bir şekilde verilmiştir [115].

Tablo 2.7: BeiDou uydu sinyallerine ait genel özellikler.

| Sistem | Bant | Taşıyıcı Frekans (MHz) | Bant Genişliği (MHz) | Modülasyon Tipi | Servis Tipi             |
|--------|------|------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|
| BDS-2  | B1   | 1561.098               | 4.092                | QPSK            | Açık (I) ve Yetkili (Q) |
|        | B2   | 1207.140               | 24                   | QPSK            | Açık (I) ve Yetkili (Q) |
|        | B3   | 1268.520               | 24                   | QPSK            | Yetkili                 |
| BDS-3  | B1   | 1575.42                | 1559-1610            | MBOC/BOC        | Açık (C) ve Yetkili (A) |
|        | B2   | 1191.795               | 1164-1219            | QPSK            | Açık (a ve b)           |
|        | B3   | 1268.520               | 1164-1219            | QPSK            | Yetkili                 |

BDS sisteminde uydulardan yayınlanan sinyaller CDMA tekniği kullanılarak ayırt edilmektedir. Yayınlanan taşıyıcı sinyalin fazını, Kuadratur (4 Fazlı) faz kaydırmalı anahtarlama (Quadrature Phase-Shift Keying, QPSK), ikili ofset taşıyıcı (Binary Offset Carrier, BOC) ve çoklu ikili ofset taşıyıcı (Multi-Binary Offset Carrier, MBOC) teknikleri ile modüle edilerek alıcıya ulaşmaktadır. BDS sisteminde her uydudan gelen sinyal kullanıcıya açık olmamakla birlikte sınırlıdır. Kullanıcıya açık olmayan bu sinyaller, yetkililer tarafından, askeri amaçlar için özellikle Çin ve Pakistan ordusuna açıktır [115].

## 2.5. Hint Bölgesel Uydu Konumlandırma Sistemi (IRNSS)

Hindistan hükümeti tarafından 2006 yılında Hint Bölgesel Uydu Konumlandırma Sisteminin (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS) kurulması için yetki verip Hindistan Uzay Araştırmaları Örgütü (Indian Space Research Organisation, ISRO) tarafından 2013 yılında ilk uydusunun uzaya fırlatılmasıyla başlayan en genç bölgesel uydu konumlandırma sistemidir. IRNSS

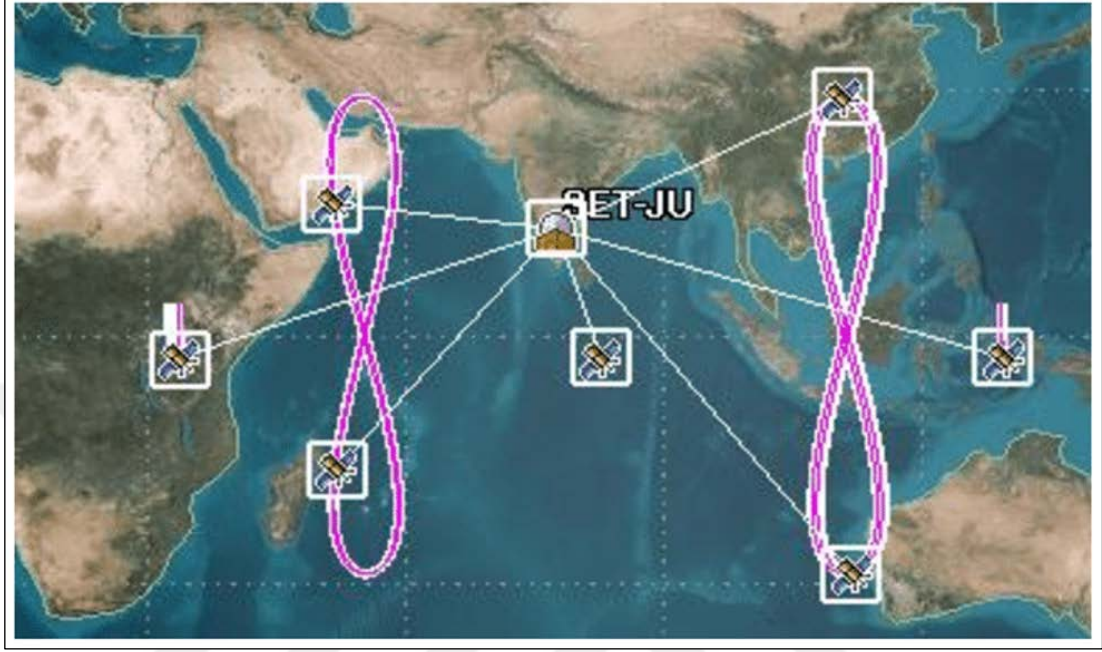
olarak adlandırılan uydu takımyıldızı 7. uydusu uzaya fırlatıldığı esnada sistemin adı NavIC (Hint Uydu Takımı ile Navigasyon) olarak adlandırılmaya başlamıştır. Bu sistemin asıl amacı Hindistan ve çevresi üzerinde konum, navigasyon ve zaman bilgisi hizmetini sağlamak için bağımsız bir sistem kurmaktır. NavIC uydu takımyıldızı için toplam 9 uydu uzaya fırlatılmıştır. Bu uydulardan 8. olan IRNSS-1H uydusu yörüngeye oturtulamamasından dolayı fırlatılması başarısız olmuştur. Ayrıca IRNSS-1A uydusunun atomik saatlerinin arızalanmasından dolayı Nisan 2022 itibarıyla bu sistem operasyonel olarak toplamda 7 uydu takımyıldızından oluşmaktadır. NavIC sistemine ait uyduların genel özellikleri Tablo 2.8’de verilmiştir. Bu uyduların 4 tanesi eğimli yer-eş zamanlı yörüngede, 3 tanesi ise yer-sabit yörünge izleyerek görevini yapmaktadır [116].

Tablo 2.8: IRNSS uydularının güncel uydu takımyıldızı ve uydulara ait temel bilgiler.

| PRN | SVN  | Uydu     | Fırlatılma Tarihi | Yörünge | Taşıyıcı Sinyaller | Saat |
|-----|------|----------|-------------------|---------|--------------------|------|
| I01 | I001 | IRNSS-1A | 01/07/2013        | IGSO    | L5, S              | RB   |
| I02 | I002 | IRNSS-1B | 04/04/2014        | IGSO    | L5, S              | RB   |
| I03 | I003 | IRNSS-1C | 15/10/2014        | GEO     | L5, S              | RB   |
| I04 | I004 | IRNSS-1D | 28/03/2015        | IGSO    | L5, S              | RB   |
| I05 | I005 | IRNSS-1E | 20/01/2016        | IGSO    | L5, S              | RB   |
| I06 | I006 | IRNSS-1F | 10/03/2016        | GEO     | L5, S              | RB   |
| I07 | I007 | IRNSS-1G | 28/04/2016        | GEO     | L5, S              | RB   |
|     | I008 | IRNSS-1H | 21/08/2017        |         | L5, S              | RB   |
|     | I009 | IRNSS-1I | 12/04/2018        | IGSO    | L5, S              | RB   |

Eğimli yer-eş zamanlı yörüngede bulunan uyduların aynı yörüngede iki uydu arasında  $180^\circ$  fark bulunmaktadır. Bu yörüngedeki uyduların dünya üzerinde izlerine bakıldığında “8” çizecek şekilde hareket ederler. Yer-sabit yörüngede bulunan diğer 3 uydu ise Hindistan bölgesi içerisinde belirlenen boylamlar üzerinde kuzey-güney yönlü hareket ederler. NavIC uydularının yer küre üzerinde yapmış olduğu izdüşüm hareketleri Şekil 2.4’te gösterilmiştir. Şekilde, 6 uydunun gösterildiği fakat diğer uydu olan IRNSS-1D uydusunun ise IRNSS-1E uydusunun hareket ettiği düzlemde  $180^\circ$  fark ile dönmektedir. Uydular, ekvatora aynı zamanda geldiğinde gerçekleşecek hassasiyet kaybını önleme için de aralarında faz farklı bulunacak şekilde yörünge düzlemine oturturulmuştur [116]. NavIC uyduları, diğer küresel uydularda bulunan L1 ve L2 taşıyıcı frekansların aksine L5 ve S bant frekanslı taşıyıcı sinyaller

yayınlanmaktadır. Bu bantların kullanılmasındaki amaç bant doluluk oranının az olmasıdır. L5 bandı diğer küresel GNSS sistemlerinde bulunmasından dolayı bu frekans bandında birlikte çalışabilirliğini sağlayabilmektedir.



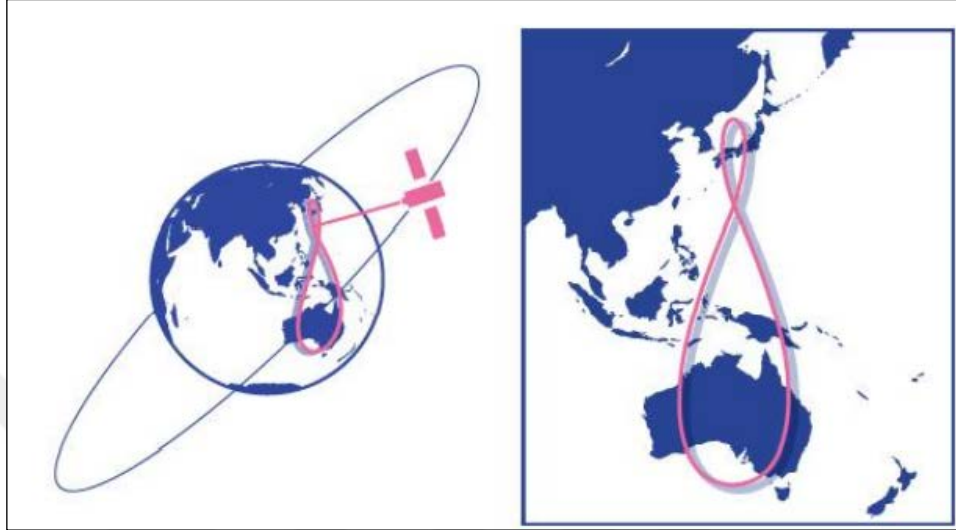
Şekil 2.4: NavIC uydu sisteminin yer küre üzerindeki izdüşümü.

Ayrıca çift frekanslı GNSS alıcıları konum doğruluğunu arttırmasından dolayı ikinci bir taşıyıcı sinyal olan S bant seçilmiştir. Bu bant seçilmesinde bant doluluk oranının düşük olması L bandına göre iyonosferik etkiden az etkilenmesi önemli kriter olmuştur. NavIC uydularının yayınlamış olduğu L5 taşıyıcı sinyal, 1176.45 MHz merkezi frekanslı 24MHz bant genişliğine sahiptir. İkinci bir sinyal olan S taşıyıcı sinyal 2492.028 MHz merkezi frekansa sahip 16.5 MHz genişliğinde sinyal yayınlamaktadır [116].

## 2.6. Quasi-Zenith Uydu Sistemi (QZSS)

GPS kullanımı esnasında çevresel faktörlerden kaynaklı meydana gelen olumsuzlukları iyileştirmek ve diğer uydu konumlama sistemlerinden bağımsız alternatif uydu konum belirleme sistemini oluşturmak için Japonya tarafından QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) olarak isimlendirilen bölgesel navigasyon sistemi geliştirilmiştir. Japonya, GPS'i yoğun olarak kullanan bir ülke olup yüksek katlı

yapılaşmalara sahip kentsel bölgelerde uydudan gelen sinyalin çevresel faktörlerden dolayı engellenmesi veya yansıması (multipath) ve uydu görüş açısının yüksek olmasından dolayı görünür uydu sayısının az olması bu sistemin geliştirilmesinde en büyük role sahiptir. QZSS uydu takımıyıldızı, Japonya üzerinde uydu görünürlük açıcı



Şekil 2.5: Quasi-Zenit yörüngeli uydunun yer küre üzerindeki izdüşümü.

Tablo 2.9: QZSS uydularının güncel uydu takımıyıldızı ve uydulara ait temel bilgiler.

| PRN | SVN | Uydu  | Fırlatılma Tarihi | Yörünge | Taşıyıcı Sinyaller  | Saat |
|-----|-----|-------|-------------------|---------|---------------------|------|
| 193 | 001 | QZS01 | 11/09/2010        | QZO     | L1C/A, L1C, L2C, L5 | RB   |
| 183 |     |       |                   |         | L1S                 |      |
| 193 |     |       |                   |         | L6                  |      |
| 194 | 002 | QZS02 | 01/06/2017        | QZO     | L1C/A, L1C, L2C, L5 | RB   |
| 184 |     |       |                   |         | L1S                 |      |
| 184 |     |       |                   |         | L5S                 |      |
| 194 |     |       |                   |         | L6                  |      |
| 199 | 003 | QZS03 | 19/08/2017        | GEO     | L1C/A, L1C, L2C, L5 | RB   |
| 189 |     |       |                   |         | L1S                 |      |
| 189 |     |       |                   |         | L5S                 |      |
| 137 |     |       |                   |         | L1Sb                |      |
| 199 |     |       |                   |         | L6                  |      |
| -   |     |       |                   |         | Sr/Sf               |      |
| 195 | 004 | QZS04 | 09/10/2017        | QZO     | L1C/A, L1C, L2C, L5 | RB   |
| 185 |     |       |                   |         | L1S                 |      |
| 185 |     |       |                   |         | L5S                 |      |
| 195 |     |       |                   |         | L6                  |      |
| 196 | 005 | QZSIR | 26/10/2021        | QZO     | L1C/A, L1C, L2C, L5 | RB   |
| 186 |     |       |                   |         | L1S                 |      |
| 186 |     |       |                   |         | L5S                 |      |
| 196 |     |       |                   |         | L6                  |      |

60° ve üzerinde en az bir adet quasi-zenith uydusu bulunacak şekilde planlanmıştır. QZSS, Nisan 2022 tarihi itibarıyla 4 Quasi-Zenith yörüngeli (QZO) ve 1 yer-sabit yörüngeli uydu ile toplam 5 uydudan oluşmaktadır. Yer-sabit yörüngeli uydu, yer küre ile eş zamanlı dairesel bir yörünge izleyerek yaklaşık bir periyodunu 24 saatte tamamlamakta olup ekvatorundan itibaren yaklaşık 36,000 km yüksekliktedir. Quasi-Zenith yörüngeli uydular, yer-sabit yörüngeli uyduda olduğu gibi yer küre ile eş zamanlı bir periyodunu yaklaşık 23 saat 56 dakikada eliptik yörünge izleyerek tamamlar. Bu uydular Japonya üzerinde uzun süre kalacak ve uydu görünürlük açıları yüksek olacak şekilde planlandığı için izdüşümlerine bakıldığında Şekil 2.5’ te görüldüğü gibi “8” şeklinde bir yol izlemektedir [117]. Bölgesel konumlama sistemi olan QZSS, ilk uydusu “Michibiki-1” olarak da adlandırılan QZSS01, 2010 yılında fırlatılmıştır. Günümüze kadar QZSS uydu takımyıldızında mevcut olan tüm uydular Tablo 2.9’da ayrıntılı bir şekilde özetlenmiştir [117]. QZSS uyduları, GPS ile aynı frekansa sahip L1C/A, L2C ve L5 konumlandırma sinyallerini yayınlar ve GPS ile senkronize edilmiş saatler kullanılmaktadır. Bundan dolayı QZSS ve GPS navigasyon sistemleri tek bir uydu takımyıldızı gibi birleşmiş şekilde düşünülebilir. Bu durum görünür uydu sayısını arttırmakla birlikte konum belirleme hassasiyeti ve sürekliliğini de arttırmaktadır [117].

## 2.7. GNSS ile Konum Belirleme Yöntemleri

Uydu teknolojisine dayalı GNSS sistemlerinde yeryüzünde bir noktanın üç boyutlu konumunun belirlenmesinin temeli, uzay geriden kestirme yöntemine dayanır. Uzay geriden kestirme, uydu tabanlı sistemlerde düşünüldüğünde yeryüzünde GNSS alıcısı kurulmuş konumu bilinmeyen herhangi bir noktanın, konumu bilinen GNSS uydularına yapılan gözlem ve hesapları içerir. GNSS uyduları dünya etrafında yaklaşık elips yörüngesi ile kepler yasalarına göre hareket ederler. Fakat uydular elips yörüngesinde hareket ederken sapmalar meydana gelmektedir. Uydular, dünyanın 0° ile 90° enlemleri arasındaki gravite alanının çekim etkisindeki düzensizlikler, dünyadan 300 bin kat daha fazla kütleye sahip olan güneşin kütle çekim etkisi ve ayın dünyadan 80 kat daha az kütleye sahip olmasına rağmen dünyaya yakın olmasından dolayı ayın çekim etkisi gibi faktörler bu sapmalara neden olmaktadır [118]. Bu nedenlerden dolayı uydular yer izleme istasyonları vasıtasıyla sürekli izlenir ve

hesaplanan uydu yörünge (efemeris) bilgileri navigasyon mesajı içerisinde elektromanyetik spektrumun mikrodalga kısmında bulunan frekansı 2 ila 4 GHz olan S bandında her bir uyduya iletilir. Uydular, uydu efemeris bilgileri, uydu saat düzeltmeleri ve diğer parametreleri oluşturan navigasyon mesajını, sivil kullanıcılar için amaçlanan C/A kod ve hassas kod olarak adlandırılan P kod, L bandında iki farklı frekansa sahip L1 ve L2 taşıyıcı frekanslar üzerine modüle edilerek sürekli olarak yayımlanır. Yeryüzünde bulunan GNSS alıcıları yayınlanan sinyali alır ve uydu-alıcı arasındaki mesafe hesaplanır. Bu mesafe, GNSS alıcılarında kod (Pseudorange) ve faz gözlemleri ile belirlenmektedir. Kod gözlemleri, düşük doğrulukta gerçek zamanlı navigasyon bilgisine ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılırken deformasyonların izlenmesi, erken uyarı sistemleri ve kinematik GNSS destekli fotogrametrik çalışmalar gibi yüksek doğruluk da konum bilgisi gerektiren uygulamalarda ve bilimsel çalışmalarda faz ölçüleri kullanılmaktadır [119], [120]. GPS alıcılarının uydulara kısa sürede kilitlenmesini sağlayan ve sivil kod olarak adlandırılan C/A ve hassas kod olarak adlandırılan P kod olmak üzere iki farklı PRN (Pseudo Random Noise) kodu ile gözlem yapılmaktadır. 10.23 MHz olan temel frekansın 154 ve 120 tam katları şeklinde elde edilmiş L1 ve L2 taşıyıcı frekanslar ile faz gözlemleri gerçekleştirilmektedir [121].

Tüm kullanıcıya açık olan sivil C/A kodun dalga boyu yaklaşık 300 metre olup iki dalga boyu arasındaki zaman farkı 1 MHz'dir. Ayrıca L1 taşıyıcı faz üzerine modüle edilmiş ve çözünürlüğü 3 metredir. Her iki uydu taşıyıcı faz (L1 ve L2) üzerine modüle edilmiş P kod, dalga boyu 30 metre olup çözünürlüğü 30 cm'dir [120], [122]. Uydu ile alıcı arasındaki pseudorange, GNSS uydularından yayınlanan sinyalin uydudan çıkış anı  $t^S$ 'den alıcıya ulaştığı  $t^R$  anındaki geçen zaman farkı  $\Delta t$ 'nin kestirimi, GNSS alıcıları içerisinde bulunan osilatörün eş zamanlı ürettiği aynı sinyal ile karşılaştırılarak hesaplanır.

Uydudan yayınlanan radyo sinyalleri elektromanyetik dalga olduklarından uzayda 300 000 km/s (tam değeri 299 792 458 m/s) olan ışık hızıyla hareket etmektedir. Uydudan gelen sinyalin seyahat süresi yani  $\Delta t$  boşluktaki ışık hızıyla çarpılarak uydu-alıcı arasındaki pseudorange bulunur. Teorikte pseudorange aşağıdaki denklemde verilmiş ve

$$r_R^S = c. (t^R - t^S) = c. \Delta t \quad (2.3)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Uydu ile alıcı arasındaki bu mesafe aslında sinyalin uydudan çıktığı an ile alıcı antenin sinyali aldığı andaki toposentrik uzunluktur. Buna göre (2.3) eşitliğindeki  $r_R^S$  uzunluğu,

$$r_R^S = \sqrt{(X^S - X^R)^2 + (Y^S - Y^R)^2 + (Z^S - Z^R)^2} \quad (2.4)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Birimi metre cinsinde hesaplanan  $r_R^S$  Eşitlik 2.4'te gösterilmiş olup burada,  $(X^S, Y^S, Z^S)$  uydu koordinatlarını,  $(X^R, Y^R, Z^R)$  ise alıcı antenin koordinatlarını temsil etmektedir. Ancak bu denklem teorik olarak geçerli olup gerçekte sinyal uydudan alıcıya ulaşınca kadar uydu ve alıcı saatlerinin GPS zamanı ile senkronizasyonundan kaynaklı uydu ve alıcı saatinde sapmalar (bias) oluşmaktadır. Uydu saat hatası  $\delta^S$ , kontrol istasyonlarında uydu saatlerinin sürekli izlenilerek uydu saat düzeltmelerini navigasyon mesajı ile iletilmesi ve hassas atomik saatlerin kullanılmasından dolayı bu hata hesaplanabilmektedir. Alıcı saat hatası  $\delta^R$  ise anlık hataları belirsiz olup bilinmeyen olarak alınır. Ayrıca GNSS alıcısının anlık konumunun hesaplanması sırasında düzeltilmesi gerekmektedir [123], [124]. Bununla birlikte uydu sinyalleri, atmosferden geçerken ve yeryüzünde bazı etkilere maruz kalmaktadır. Yukarıda belirtilen durumlar göz önüne alındığında gözlemlenen pseudorange uzunluğu Eşitlik 2.5'te gösterilmiştir.

$$\rho_R^S = c((t^R + \delta^R) - (t^S + \delta^S)) + \Delta\epsilon_R^S \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'te ifade edilen  $\Delta\epsilon_R^S$ , sinyal uydudan alıcıya ulaşırken atmosferde iyonosferik, troposferik etkilere ve yeryüzünde objelerden yansıyarak GNSS alıcı antenine gelirken multipath etkisine ve sinyal gürültüsü gibi gerçek geometrik uzunluğu etkileyecek modellenen ve modellenemeyen hataları temsil etmektedir. Böylece, GNSS sistemlerine dayalı yapılan ölçümlerde kod gözlemlerine etkiyen hatalar eklenip Eşitlik 2.5 yeniden düzenlenirse,

$$\rho_R^S = r_R^S + c(\delta^R - \delta^S) + T_R^S + I_R^S + \Delta m_R^S + \Delta a_R^S + \Delta p_R^S + \Delta o_R^S + \Delta s_R^S + \Delta\epsilon_p \quad (2.6)$$

Kod gözlemleri ile elde edilen gerçek geometrik uzunluğun denklemi eşitlik 2.6' da gösterilmiştir [50]. Bu eşitlikte,  $I_R^S$  sinyal atmosferden geçerken uğramış olduğu

iyonosferik gecikmeden dolayı getirilen düzeltmeyi,  $T_R^S$  sinyal atmosferden geçerken uğramış olduğu troposferik gecikmeden dolayı getirilen düzeltmeyi,  $\Delta m_R^S$  yeryüzünde objelerden yansıyarak alıcıya ulaşan sinyalin multipath etkisini,  $\Delta a_R^S$  atmosferik yükleme etkisinden dolayı getirilen düzeltmeyi,  $\Delta p_R^S$  kutup gezinmesinden dolayı getirilen düzeltmeyi,  $\Delta o_R^S$  okyanus yüklemesinden kaynaklı getirilen düzeltmeyi,  $\Delta s_R^S$  katı yer gelgiti etkisinden kaynaklı getirilen düzeltmeyi,  $\Delta \varepsilon_p$  kod gözlemlerinde modellenmeyen ve sistematik olmayan diğer hatalardan dolayı getirilen düzeltme olarak ifade edilmektedir. GNSS ölçümlerinde daha çok kullanılan faz gözlemleri, taşıyıcı dalga modüle edilmemiş L1 ve L2 taşıyıcı faz frekansları ile yapılmaktadır. L1 ve L2 taşıyıcı frekanslar, sinüzoidal dalgalar şeklinde dalga boyları sırasıyla 19.03 cm ve 24.42 cm olup P ve C/A kodlarına göre daha kısadır [125]. Bu nedenle faz gözlemleri ile yapılan ölçüler kod gözlemlerine göre yapılan ölçülerden daha duyarlıdır. Taşıyıcı dalga faz gözlemi, GNSS uydularının osilatörlerinde sürekli olarak üretilen sinyalin herhangi bir  $t^S$  anında yayınlanan  $\Phi^S$  fazın, GNSS alıcısına ulaştığı  $t^R$  anında alıcı osilatöründe aynı özellikte üretilen sinyalin fazı  $\Phi^R$  arasındaki fark olarak tanımlanabilir. Ayrıca benzer referans sinyalin fazı arasındaki fark olarak tanımlanabilir [120]. Uydu-alıcı arasındaki uzaklık, faz gözlemleri ile hesaplandığında teoride taşıyıcı dalga fazının tam döngüsünün toplamıyla GNSS alıcısı içerisinde kısmi döngünün toplamının,  $\lambda$  dalga boyuyla çarpımıdır. Alıcı uydudan gelen sinyalin çıkış anını bilmediği için ilk sinyalin uydu ile alıcı arasındaki tam dalga sayısı bilinemez. Sadece tam dalga kesirli kısmı çok doğru bir şekilde ölçülebilmektedir [121]. Bu durum başlangıç tam sayı faz belirsizliği olarak tanımlanmakta ve  $N$  ile ifade edilmektedir. GNSS alıcılarında gözlemlenen faz ölçülerinde, her bir uydudan gelen taşıyıcı dalga birbirinin benzer olduğu için alıcı, içerisinde taşıyıcı dalga hangi bölümünü kaydettiğini bilemez. Bununla birlikte GNSS alıcı içerisinde yalnızca uydu sinyali ile alıcı sinyal arasındaki faz farkını ölçer [120]. Taşıyıcı dalga faz ölçülerinde bilinmeyen olarak alınan taşıyıcı dalga faz başlangıcı belirsizliği, uydulardan gelen sinyallerin sürekli olduğu yani hiçbir sinyal kesikliği (loss of lock) veya faz kayıklığı (cycle slip) olmadığı durumda  $N$  sabit olacaktır [120], [126]. Taşıyıcı dalga faz gözlemi;

$$\begin{aligned} \Phi_R^S = & r_R^S + c(\delta^R - \delta^S) + \lambda N(t_0) + T_R^S - I_R^S + \Delta m_R^S + \Delta a_R^S + \Delta p_R^S + \Delta o_R^S \\ & + \Delta s_R^S + \Delta w^S + \Delta pcv^{S,R} + \Delta \varepsilon_\Phi \end{aligned} \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte,  $\Phi_R^S$  taşıyıcı dalga fazını,  $r_R^S$  uydu-alıcı arasındaki geometrik uzaklığı,  $\lambda$  taşıyıcı faza ait dalga boyunu,  $N(t_0)$  taşıyıcı faz başlangıç belirsizliğini,  $T_R^S$  troposferik gecikmeyi,  $I_R^S$  iyonosferik gecikmeyi,  $\Delta m_R^S$  multipath hatasını,  $\Delta a_R^S$  atmosferik düzeltmeyi,  $\Delta p_R^S$  kutup gezinmesinden kaynaklı düzeltmeyi,  $\Delta o_R^S$  okyanus yüklemesinden kaynaklı düzeltmeyi,  $\Delta s_R^S$  katı yeryuvarı gelgitinden kaynaklı düzeltmeyi,  $\Delta w^S$  uydu anteni faz dönme düzeltmesini,  $\Delta pcv^{S,R}$  uydu ve alıcı anteni faz merkezi kayıklığı düzeltmesini,  $\Delta \varepsilon_\phi$  faz gözlemlerinde modellenmeyen ve sistematik olmayan diğer hatalardan dolayı getirilen düzeltme olarak ifade edilmektedir.

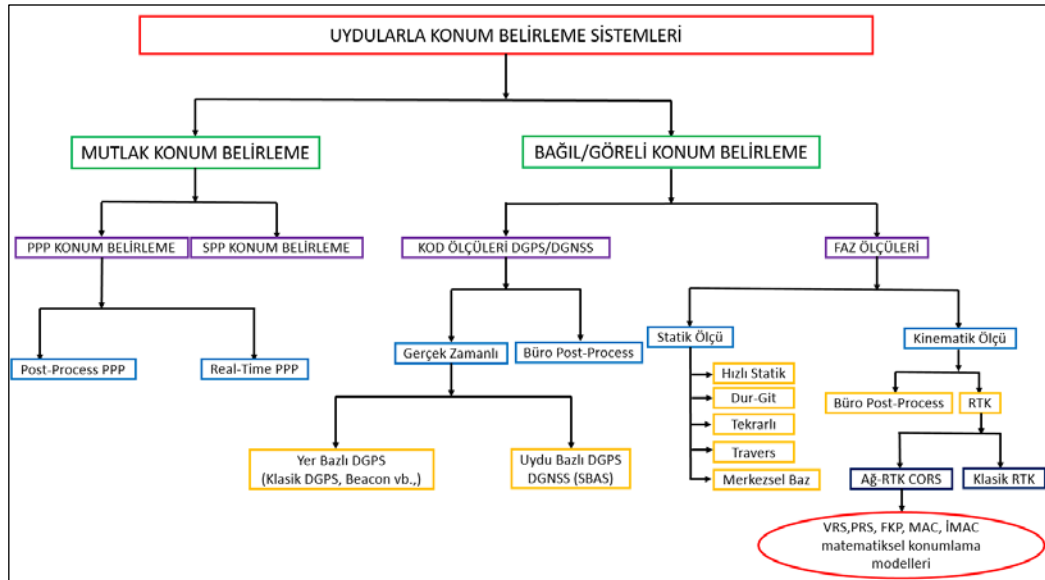
## 2.8. Mutlak Konum Belirleme Yöntemi

Mutlak konum belirleme yöntemi, tek bir alıcı ile en az dört GNSS uydusuna yapılan gözlemler sonucu uydu-alıcı arasındaki mesafenin hesaplanarak uzay geriden kestirme temeline dayanmaktadır. Alıcı noktanın koordinatları hesaplanırken kullanılan kod veya faz gözlemlerine göre iki sınıfa ayrılmaktadır. Birincisi nokta konumunu, uydudan gelen yayın efemerisi ile pseudo-kod gözlemlerini kullanarak hesaplanır ve bu yöntem Tek Nokta Konumlandırma (Single Point Positioning, SPP) denir. Yayın efemerislerinden elde edilen uydu yörünge ve saat düzeltmelerine bağlı olarak metre seviyesinde gerçek zamanlı nokta konumu hesaplanabilmektedir. Bu yöntemin hassas olmamasından dolayı genellikle yüksek konum doğruluğu gerektirmeyen navigasyon uygulamalarında kullanılmaktadır. Diğer yöntem ise tek bir alıcı ile çift frekanslı iyonosferden bağımsız kod ve faz gözlemlerini kullanarak nokta konumu hesaplanmaktadır. Bu yöntem Hassas Nokta Konumlandırma olarak adlandırılmaktadır. Yöntemin doğruluğu kullanılan yüksek doğruluklu uydu yörünge ve saat ürünlerine bağlıdır. IGS, GNSS kullanıcılarına uydu yörünge ve saat ürünlerini sağlamaktadır. IGS belirli bir periyod aralığından sonra yayınlamış olduğu bu ürünler ile PPP tekniği kullanılarak çözüm yapıldığından dolayı yöntemin adı sonradan değerlendirme (post-process)-PPP olarak adlandırılmaktadır. Eğer bu ürünleri IGS, gerçek zamanlı olarak GNSS kullanıcılarına sağlıyorsa PPP ile yapılan çözüm gerçek zamanlı (Real-Time)-PPP olarak isimlendirilmektedir. Günümüzde, yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi, erken uyarı sistemi, GNSS sismolojisi, yapı sağlığı izleme,

yersel veya hava fotogrametrisinde yer kontrol noktalarının belirlenmesi gibi birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmaktadır.

## 2.9. Bağıl Konum Belirleme Yöntemi

Bağıl konum belirleme, koordinatı bilinen sabit bir referans istasyonuna göre sabit veya gezici alıcıların konumlarının belirlenmesidir. Bu yöntem ile konum belirlemede koordinatı bilinen sabit noktada bir tane ve konumu hesaplanacak noktada bir tane olmak üzere en az iki GNSS alıcısıyla eş zamanlı kod ve faz gözlemleri yapılmalıdır. Bu yöntem kendi içerisinde sonradan değerlendirme ve gerçek zamanlı olarak iki gruba ayrılmaktadır. Konum belirleme hassasiyeti Mutlak konum belirleme yönteminden daha iyi olmasına rağmen zaman, maliyet ve işgücü gibi kriterler ele alındığında bu yöntem zamanla geliştirilmiştir. Uydu tabanlı konum belirleme yöntemleri, tercih edilen ölçüm modu (statik ya da kinematik), kullanılan faz veya kod ölçüsü, sabit alıcı/alıcılar alt yapısı, kullanılan ekipman ve donanımlar, ölçü sonrası veya gerçek zamanlı çalışma vb. durumlar neticesinde Şekil 2.6'daki gibi sınıflandırılmıştır. Bu tezin amaçlarından birisi de PP-PPP ve RT-PPP yöntemleri kullanılarak yapılarda meydana gelen dinamik karakteristikleri yakalayabilmeyi test



Şekil 2.6: Uydu tabanlı konum belirleme yöntemleri.

etmek olduğu için mutlak konum belirleme yönteminin özel bir hali olan PPP yöntemine ait matematiksel modeller ve bu modelde giderilmesi gereken hatalar diğerk bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



### **3. HASSAS NOKTA KONUMLAMA (PPP)**

#### **3.1. Geleneksel-PPP Tekniğinin Tarihçesi ve Tanımı**

PPP kavramı ilk olarak 1976 yılında Anderle tarafından Transit uydu sistemine, birden fazla sabit yer istasyonundan Doppler ölçümü yapılarak kutup hareketlerinin izlenmesi için hassas uydu yörünge (efemeris) çözümleri sabit (fixed) alınıp istasyon noktalarının konumları belirlenmiştir [50], [127]. GNSS sistemlerinin ve bu sistemlere dayalı gözlem yapan çift frekanslı GNSS alıcılarının geliştirildiği 90'lı yılların sonunda Zumberge ve arkadaşları tarafından PPP tekniğinin temeli atılmıştır. Bu yöntem ile koordinatı bilinen herhangi bir noktada eş zamanlı gözlem yapılmaksızın tek bir GNSS alıcısıyla hassas uydu yörünge ve saat düzeltme bilgileri, katı yeryuvarı gelgiti ve diğer modellenen sistematik hatalar, yardımcı ürünler kullanılarak bir noktanın konumu belirlenebilmektedir [49], [50]. Zumberge ve diğerleri yapmış oldukları bilimsel çalışmayı 3 açıdan ele alarak PPP tekniğini modellemişlerdir. Bu modellemede (1) Fark alınmamış (undifference) çift frekanslı taşıyıcı faz ve kod gözlemleri kullanılarak, (2) hassas uydu yörünge ve saat ürünleri ayrıca (3) katı yer yuvarı gelgiti, okyanus yüklemesi, uydu anteni faz merkezi kayıklığı, alıcı ve uydu anteni faz dönmesi gibi hassas hata kalibrasyon modelleri gerektirir. Çift frekanslı alıcılarının kullanılmaya başlaması ile iyonosferden kaynaklı hatalar modellenerek PPP tekniğindeki ham faz ve kod gözlemleri yerine iyonosferden-bağımsız (ionosphere-free) faz ve kod gözlemleri kullanılarak modelleme yapılmıştır [128]. Mutlak konum belirlemenin özel bir hali olan PPP tekniğinin, temel matematiksel modeli üzerine Kouba ve Héroux ile Gao ve Shen çalışmalar yaparak yöntemin bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılmasına öncül olmuşlardır. Günümüzde yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi, küresel veya bölgesel ölçekte deformasyon ölçmeleri, yersel veya hava fotogrametrisinde yer kontrol noktalarının koordinatlarının belirlenmesinde, yüksek katlı bina, köprü, viyadük, kule gibi birçok mühendislik yapısının yatay ve düşey yönlü dinamik hareketlerinin incelenmesi için PPP tekniği yaygın olarak kullanılmakta ve hala daha geliştirilmeye devam etmektedir.

## 3.2. PPP Tekniğinin Matematiksel Modeli

PPP tekniğinde, çift frekanslı tek GNSS alıcısının, taşıyıcı faz ve kod gözlemleri ile harici olarak uydu yörünge ve saat bilgisi gibi ürünleri kullanarak ölçüm sonrası için iki temel matematiksel model geliştirilmiştir. İlk model Geleneksel-PPP olarak adlandırılmakta olup Kouba ve Héroux tarafından geliştirilmiş ayrıca ilerleyen yıllarda Kouba tarafından yenilenmiştir. Diğer taraftan Geleneksel-PPP’de görülen yakınsama süresi ve buna neden olan durumları çözebilmek için Gao ve Shen tarafından geliştirilen P1-P2-CP modelidir.

### 3.2.1. Geleneksel-PPP Modeli

Geleneksel-PPP modeli, çift frekanslı iyonosferden bağımsız L1 ve L2 kod gözlemleri ile taşıyıcı faz gözlemleri arasındaki lineer kombinasyonları kullanır. İyonosferden bağımsız lineer kod-kod ve faz-faz gözlem kombinasyonları, GNSS sinyalleri üzerinde birinci dereceden iyonosferik etkiyi ortadan kaldırmak için kullanılan yaygın bir yapıdır [50]. Buna göre L1 ve L2 taşıyıcı sinyaller üzerinde ham kod ve taşıyıcı faz gözlemleri bir GNSS alıcısı ve bir GPS uydusu için aşağıdaki denklemler ile tanımlanır:

$$P_{Li}^G = \rho^G + cdT_r^G - cdT_s^G + (b_r^G - b_s^G) + d_{orb}^G + d_{ion/P_{Li}}^G + d_{trop}^G + d_{mult/P_{Li}}^G + \varepsilon_{P_{Li}}^G \quad (3.1)$$

$$\Phi_{Li}^G = \rho^G + cdT_r^G - cdT_s^G + (B_r^G - B_s^G) + d_{orb}^G + \lambda_{Li} N_{Li}^G - d_{ion/\Phi_{Li}}^G + d_{mult/\Phi_{Li}}^G + d_{trop}^G + \varepsilon_{\Phi_{Li}}^G \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.1 ve 3.2’de GPS gözlemleri için belirtilen,  $P_{Li}^G$   $Li$  taşıyıcı sinyalin kod (pseudorange) ölçüsünü,  $\Phi_{Li}^G$   $Li$  taşıyıcı sinyalin faz ölçüsünü,  $\rho^G$  uydu-alıcı arasındaki geometrik uzaklığı,  $c$  ışık hızını,  $T_r^G$  alıcı saat hatasını,  $T_s^G$  uydu saat hatasını,  $b_r^G$  Alıcı donanım kod gecikmesini,  $b_s^G$  uydu donanım kod gecikmesini,  $B_r^G$  alıcı donanım faz gecikmesini,  $B_s^G$  uydu donanım faz gecikmesini,  $d_{orb}^G$  uydu yörünge hatasını,  $d_{trop}^G$  troposferik gecikmeyi,  $d_{ion/P, \Phi_{Li}}^G$   $Li$  taşıyıcı sinyalin iyonosferik gecikmesini,  $\lambda_{Li}$   $Li$

taşıyıcı sinyalin dalga boyunu,  $N_{Li}^G$   $Li$  taşıyıcı sinyalin tam sayı faz belirsizliğini,  $d_{mult/P_{Li}}^G$   $Li$  taşıyıcı sinyalin kod ölçüsündeki multipath etkisini,  $d_{mult/\Phi_{Li}}^G$   $Li$  taşıyıcı sinyalin faz ölçüsündeki multipath etkisini,  $\varepsilon_{P,\Phi_{Li}}^G$   $Li$  taşıyıcı sinyalin sırasıyla kod ve faz ölçü gürültüsünü ifade etmektedir. Yukarıdaki Eşitlik 3.1 ve 3.2’de bulunan uydu yörünge ve saat hataları, IGS analiz merkezlerinin üretmiş olduğu uydu yörünge ve saat düzeltme bilgileri yardımıyla giderilmektedir. Ayrıca IGS hassas saat düzeltme ürünleri içerisinde kod donanım hatalarını içermektedir. Böylece uydu kodu donanım hatası  $b_s^G$ , uydu saat hatalarına birleşerek ortadan kaldırılırken uydu faz donanım hatası  $B_s^G$ , IGS ürünleri içerisinde bulunmadığından dolayı PPP modelinde belirsizlik parametrelerinde toplanıp birlikte tahmin edilir. Alıcı saat hataları, yüksek korelasyonlarından dolayı alıcı kod donanım hatası  $b_r^G$  ile birlikte tahmin edilmektedir [50]. Alıcı taşıyıcı faz donanım hatası  $b_r^G$  ise  $b_s^G$  gibi uyduya bağımlıdır ve zaman içinde sabittir, bu nedenle belirsizlik parametreleri ile gruplandırılmıştır [129]-[131].

İyonosferden kaynaklı gecikmenin giderilmesi için de çift frekanslı iyonosferden bağımsız kod ve taşıyıcı faz gözlemlerinin lineer kombinasyonları kullanılarak ihmal edilmektedir. Bu durumda denklemler;

$$P_{IF}^G = \frac{f_{G_{L1}}^2 P_{L1}^G - f_{G_{L2}}^2 P_{L1}^G}{f_{G_{L1}}^2 - f_{G_{L2}}^2} = \rho^G + (cdT_r^G + b_r^G) + d_{trop}^G + \varepsilon_{P_{IF}}^G \quad (3.3)$$

$$\Phi_{IF}^G = \frac{f_{G_{L1}}^2 \Phi_{L1}^G - f_{G_{L2}}^2 \Phi_{L1}^G}{f_{G_{L1}}^2 - f_{G_{L2}}^2} = \rho^G + (cdT_r^G + b_r^G) + (N_{IF}^G + B_r^G - b_r^G) + d_{trop}^G + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^G \quad (3.4)$$

Eşitliklerde,  $P_{IF}^G$  iyonosfer-bağımsız kod (pseudorange) gözlem kombinasyonunu,  $\Phi_{IF}^G$  iyonosfer-bağımsız faz gözlem kombinasyonunu,  $f_{G_{Li}}$  GPS’den yayınlanan  $Li$  taşıyıcı sinyalin frekansını,  $N_{IF}^G$  tam sayı faz belirsizliğini,  $\varepsilon_{P_{IF}}^G$  Kod gözlem kombinasyonlarına ait çok yolluluk (multipath), gürültü (noise) ve diğer artık hataları,  $\varepsilon_{\Phi_{IF}}^G$  faz gözlem kombinasyonlarına ait çok yolluluk (multipath), gürültü (noise) ve diğer artık hatalar olarak ifade edilmektedir. Eşitlik 3.3 ve 3.4’te, uydu donanım gecikmeleri, hassas uydu saatlerinde yer alır ve hassas ürünler uygulanırken kaldırılır [129]. Aynı şekilde, Eşitlik 3.4’te belirsizlik terimi, donanım hata terimini içerdiği için bir tamsayı değildir ve  $B_r^G - b_r^G$  teriminin kalibre edilmemiş faz gecikmesini ifade

ettiğini görürüz [53]. Bu eşitliklerde bulunan donanım gecikmelerinin birleştirilmesi sonucu denklemler basit şekilde yazılırsa;

$$P_{IF}^G = \rho^G + cd\overline{T_G} + d_{trop}^G + \varepsilon_{P_{IF}}^G \quad (3.5)$$

$$\Phi_{IF}^G = \rho^G + cd\overline{T_G} + \overline{N_{IF}^G} + d_{trop}^G + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^G \quad (3.6)$$

Eşitliklerde,  $d\overline{T_G}$  alıcı saat hatası ve alıcı donanım gecikmesine bağlı toplamlar iken  $\overline{N_{IF}^G}$  tam sayı ve alıcı donanım gecikmesine bağlı toplamlar olup yeniden düzenlenmiştir.

$$cd\overline{T_G} = cdT_r^G + b_r^G \quad (3.7)$$

$$\overline{N_{IF}^G} = N_{IF}^G + B_r^G - b_r^G \quad (3.8)$$

Denklem 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8, CDMA sinyalleri sağlayan BDS ve Galileo gibi diğer GNSS sistemleri için de geçerlidir.

Yukarıda belirtilen GNSS uydusu sistemlerinden farklı olarak GLONASS, FDMA sinyalleri sağlamaktadır. Bundan dolayı her GLONASS uydusunun farklı frekanslarda sinyaller yayınlamasına neden olmaktadır. Sonuçta farklı frekanslara sahip GLONASS uydularına gözlem yapan GNSS alıcısı için alıcı donanım gecikmelerinde farklılık bulunmaktadır [132]-[134]. GLONASS gözlemlerini, Eşitlik 3.1 ve 3.2'ye göre GLONASS hassas uydusu yörünge ve saatlerini uygulayarak, bir alıcı ile bir GLONASS uydusu (R) arasındaki iyonosferden bağımsız gözlem fonksiyonları şu şekilde yazılabilir:

$$P_{IF}^R = \rho^R + cdT_r^R + b_r^R + d_{trop}^R + \varepsilon_{P_{IF}}^R \quad (3.9)$$

$$\Phi_{IF}^R = \rho^R + cdT_r^R + B_r^R + N_{IF}^R + d_{trop}^R + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^R \quad (3.10)$$

Eşitliklerde bulunan R, GLONASS gözlemlerini temsil etmekte olup GPS gözlemleri için yukarıda verilen denklemlerdeki her terimin anlamı buradaki denklemler içinde benzerdir. Donanım gecikme hatası, ortalama bir terim ve frekansa bağlı hatalar toplamı olarak yazılabilir:

$$b_r^R = b_{r_{avg}}^R + \delta b_r^R \quad (3.11)$$

$$B_r^R = B_{r_{avg}}^R + \delta B_r^R \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $b_{r_{avg}}^R$ ,  $B_{r_{avg}}^R$  sırasıyla kod ve faz gözlemleri için ortalama donanım gecikmesini temsil etmektedir. Uyduya bağlı hata terimleri  $\delta b_r^R$  ve  $\delta B_r^R$  frekanslar arası hatalar olarak adlandırılır. Eşitlik 3.9 ve 3.10'da bulunan terimleri yeniden düzenlersek;

$$cd\overline{T_R} = cdT_r^R + b_{r_{avg}}^R \quad (3.13)$$

$$\overline{N_{IF}^R} = N_{IF}^R + B_{r_{avg}}^R - b_{r_{avg}}^R + \delta B_r^R \quad (3.14)$$

burada bulunan  $d\overline{T_G}$  alıcı saat hatası iken  $\overline{N_{IF}^R}$  belirsizlikler toplamıdır. GPS gözlemlerinde Eşitlik 3.7 ve 3.8'deki gibi ortalama kod donanım gecikmesi saat parametresi içerisinde birleştirilir ve ortalama kod ve faz donanım gecikmesi arasındaki fark belirsizlik parametresi içerisinde gruplandırılır. Eşitlik 3.13 ve 3.14'yi Eşitlik 3.9 ve 10'da yerine koyarsak GLONASS gözlemleri;

$$P_{IF}^R = \rho^R + cd\overline{T_R} + \delta b_r^R + d_{trop}^R + \varepsilon_{P_{IF}}^R \quad (3.15)$$

$$\Phi_{IF}^R = \rho^R + cd\overline{T_R} + \overline{N_{IF}^R} + d_{trop}^R + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^R \quad (3.16)$$

Faz IFB (Inter-Frequency Bias) terimi, donanım gecikmesi ve belirsizlik terimi ile birleştirilir. Yukarıdaki eşitliklerde uyduya bağlı olan ve diğer parametrelerle gruplandırılmayan kod IFB terimi,  $\delta b_r^R$ 'yi içerir. Teorik olarak, GLONASS kod IFB, PPP proseslerinde frekansa bağlı bilinmeyenler olarak ayarlanır. Fakat bu durum bilinmeyen sayısını artıracak ve doğruluk, kod gözlemlerinin hassasiyetine bağlı olacaktır. GNSS veri proseslerinde faz gözlemlerine kıyasla kod gözlemlerine çok küçük ağırlık verildiğinden  $\delta b_r^R$  ihmal edilebilir ve artık hatalarda etkisi görülebilir. Bu durumda GLONASS gözlemleri için Geleneksel-PPP modeli;

$$P_{IF}^R = \rho^R + cd\overline{T_R} + d_{trop}^R + \varepsilon_{P_{IF}}^R \quad (3.17)$$

$$\Phi_{IF}^R = \rho^R + cd\overline{T_R} + \overline{N_{IF}^R} + d_{trop}^R + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^R \quad (3.18)$$

Günümüzde çoklu (Multi)-GNSS uydularına gözlem yapan alıcılar PPP çözümlerinde MGEX projesi kapsamında Multi-GNSS hassas uydu yörünge ve saat düzeltme ürünlerini kullanabilmektedir. Bu durumda aşağıdaki denklemlerde örnek olarak belirtilen GPS/GLONASS PPP matematiksel modeli diğer sistemler ve Multi GNSS-PPP içinde geçerlidir. Geleneksel GPS/GLONASS PPP modeli, birleştirilmiş GPS/GLONASS PPP için iyonosferden bağımsız (IF) kod ve faz gözlemlerine ek olarak sistemler arası zaman farkı parametresinin tahminini gerektirir.

$$\begin{aligned} P_{IF}^G &= \rho^G + cd\overline{T_G} + d_{trop}^G + \varepsilon_{P_{IF}}^G \\ \Phi_{IF}^G &= \rho^G + cd\overline{T_G} + \overline{N_{IF}^G} + d_{trop}^G + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^G \\ P_{IF}^R &= \rho^R + cd\overline{T_G} + ISB + d_{trop}^R + \varepsilon_{P_{IF}}^R \\ \Phi_{IF}^R &= \rho^R + cd\overline{T_G} + ISB + \overline{N_{IF}^R} + d_{trop}^R + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^R \end{aligned} \quad (3.19)$$

Yukarıdaki eşitliklerde sistemler arası hata (Inter-System Bias, ISB) aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$ISB = cd\overline{T_R} - cd\overline{T_G} = cdT_r^R - cdT_r^G + b_{r_{avg}}^R - b_r^G \quad (3.20)$$

Bu model GPS/GLONASS-PPP'de uygulanmıştır ve tek sistem çözümünden daha doğru ve daha güvenilir olduğu kanıtlanmıştır [131]. ISB parametresinin modellenmesi günlük sabit olarak, parça bazında sabit (Piece Wise Constant, PWC) veya epok bazında değişken olarak farklı şekilde olabilir. Hassas veri analizi için, epok bazında ISB tahmin edilmelidir. Ancak bu durum, bilinmeyen sayısını arttıracak ve çözümün duyarlılığını azaltacaktır. Dach ve diğerleri (2010), farklı alıcılarla donatılmış istasyonlar için ikili farklar alınarak ISB parametresinin modellenmesi üzerine detaylı analizler yapmışlardır. Farklı ISB modellerini uygulayarak koordinat farklılıklarının en kötü durumda 2 mm'den az olduğunu göstermişler [130]. Mevcut PPP doğruluğu göz önüne alındığında, sonuçlarından, çoklu GNSS PPP için günlük

sabit ISB modelinin yeterli olduğu sonucuna varabiliriz [131]. Eşitlik 2.25'teki denklemler fark alınmamış iyonosferden bağımsız çoklu GNSS PPP modelini temsil etmektedir. Bu modellerde bilinmeyen parametre olarak üç konum bileşeni, bir alıcı saat hatası, bir sistemler arası zaman farkı parametresi, zenit ıslak troposferik gecikme ve tam sayı belirsizlik parametresidir.

İyonosfer-bağımsız Geleneksel-PPP modelin birkaç dezavantajı bulunmaktadır. Modelde iyonosfer bağımsız kombinasyonlar birinci dereceden olduğu için yüksek dereceli iyonosferik etkileri ortadan kaldırılamamaktadır. Yüksek derecedeki etkiler çok küçük olmasına rağmen iyonosfer tabakasından geçen sinyalin elektron yoğunluğunun zamana bağlı olarak alıcı-uydu arasındaki mesafenin cm mertebesinde hatalı olarak hesaplanmasına neden olmaktadır. İkinci bir durum ise kod ve faz gözlem kombinasyonların gürültü seviyesi, ham kod ve taşıyıcı faz gözlemlerinden daha fazla olmaktadır. Ayrıca faz gözlemlerinde bilinmeyen olarak alınan tam sayı faz belirsizliği L1 ve L2 taşıyıcı faz gözlem kombinasyonunda yalnız kısmi olarak çözümlenir. Bu durum PPP çözümünde yakınsama süresinin uzun olmasına neden olmaktadır [51].

### 3.2.2. P1-P2-CP Modeli

P1-P2-CP modeli, Geleneksel-PPP yöntemindeki dezavantajların iyileştirilmesi için Gao ve Shen tarafından geliştirilmiş bir tekniktir. Geleneksel-PPP'de meydana gelen yakınsama süresinin gürültü seviyesindeki artış, artık hataların modellenememesi, bilinmeyen sayısının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum için Gao ve Shen çalışmalarında statik PPP çözümlerinde yakınsama süresinin 30 dakikanın üzerinde olduğunu, nedenin yukarıda belirttiğimiz parametrelerden kaynaklı olduğunu düşünerek hem bilinmeyen sayısını hem de gürültü seviyesi ve artık hataların azaltılması için P1-P2-CP modeli geliştirmişlerdir.

Geleneksel-PPP modelinde olduğu gibi iyonosferden bağımsız L1 ve L2 taşıyıcı sinyaller arasında kod-kod ve faz-faz kombinasyonları yapılırken, P1-P2-CP modelinde tek bir çatı altında yani kod ve faz gözlemlerini birleştirilerek yeni bir gözlem kombinasyonu oluşturulur. Buna göre P1-P2-CP gözlem modeli:

$$P_{IF,Li} = 0.5(P(Li) + \Phi(Li)) \quad (3.21)$$

$$= \rho + c(dT_r - dT_s) + d_{orb} + d_{trop} + 0.5\lambda_{Li}N_{Li} + d_{mult/P_{IF,Li}} + 0.5\varepsilon_{P_{IF,Li}}$$

Bu eşitlikte belirtilen,  $P_{IF,Li}$   $Li$  taşıyıcı sinyalin iyonosfer bağımsız kod-faz kombinasyonunu,  $\varepsilon_{P_{IF,Li}}$  yüksek derecedeki modellenemeyen iyonosferik etkiler, çok yolluluk, gürültü ve diğer artık hatalar olarak temsil edilmektedir. Diğer parametreler yukarıda tanımlanan GPS ve GLONASS gözlemlerindeki yapılan açıklamalara benzerdir. Hassas uydu yörünge ve saat düzeltmeleri uygulandıktan sonra iyonosferden bağımsız kod-faz gözlem kombinasyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_{IF,Li} = \rho + cdT_r + d_{trop} + 0.5\lambda_{Li}N_{Li} + 0.5\varepsilon'_{P_{IF,Li}} \quad (3.22)$$

Bu eşitlikte;  $P_{IF,Li}$   $Li$  taşıyıcı sinyalin düzeltme uygulanmış iyonosfer bağımsız kod-faz kombinasyonunu,  $\varepsilon'_{P_{IF,Li}}$  Hassas yörünge ve saat verilerinin artık hataları, yüksek derecedeki modellenemeyen iyonosferik etkiler, çok yolluluk, gürültü ve diğer artık hatalar toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu modelde kod-faz kombinasyonları diğer yönteme göre gürültü seviyesini azaltmıştır. Ayrıca L1 ve L2 taşıyıcı sinyallerin tam sayı belirsizliğini ayrı ayrı kestirip, sabit (fixed) çözüm başarılı bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu durumda PPP çözümünde gerekli yakınsama süresini kısaltmıştır [51].

### 3.3. Geleneksel-PPP Tekniğinde Hata Kaynakları

#### 3.3.1. Uydu Kaynaklı Hatalar

##### 3.3.1.1. Uydu Yörünge Hataları

GNSS sistemlerinin temel prensibi, uydu ile alıcı arasındaki mesafenin hesaplanması ve her bir uydunun efemeris bilgisi yardımıyla alıcı noktanın konumu belirlenebilmektedir. PPP tekniğinde uydu yörünge hatası nokta konumunu belirlemede en önemli hata kaynağıdır. Uyduların uzayda izledikleri yörünge, yeryüzünde bir noktanın konum bileşenlerinin, konum doğruluğunu hesaplamada etkisi vardır. Uydular genellikle yeryüzündeki izdüşümlerinin kuzey-güney yönlü olması ve uydu tasarımlarından dolayı bir noktanın, doğu bileşeninin kuzey bileşenine göre konum duyarlılığı düşüktür. Ayrıca GNSS alıcısının ufuk düzlemi boyunca ufuk

çizgisinde iken uydudan yayınlanan sinyallerin alınmamasından dolayı noktanın yükseklik bileşenin konum doğruluğu düşüktür [136]. Uydudan yayınlanan taşıyıcı sinyaller üzerine modüle edilen navigasyon mesajı içerisinde uydu konum bilgisi için 2 farklı veri seti bulunmaktadır. Birincisi almanak verisi olarak adlandırılıp navigasyon mesajının bir bölümünü içeren yayın efemerisinden düşük doğruluğa sahiptir. GNSS almanakları yardımı ile uydu konumu, kilometre mertebesinde doğrulukla hesaplanabilmektedir [137], [138]. Ayrıca GNSS almanakları, alıcıların kısa sürede uydulara kilitlenmesini sağlamaktadır [139]. İkinci veri seti olan yayın (broadcast) efemerisinde ise kontrol merkezi tarafından hesaplanıp uyduya yüklenerek sonrasında yayınlanan taşıyıcı sinyaller ile kullanıcıya erişen kepler parametre bilgilerini içermektedir. Bu bilgiler ile uydu yörüngeleri modellenmekte ve yaklaşık  $\pm 1$  metre doğrulukta uydu konumu hesaplanmaktadır. Yayın efemerisi sayesinde gerçek zamanlı navigasyon uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır.

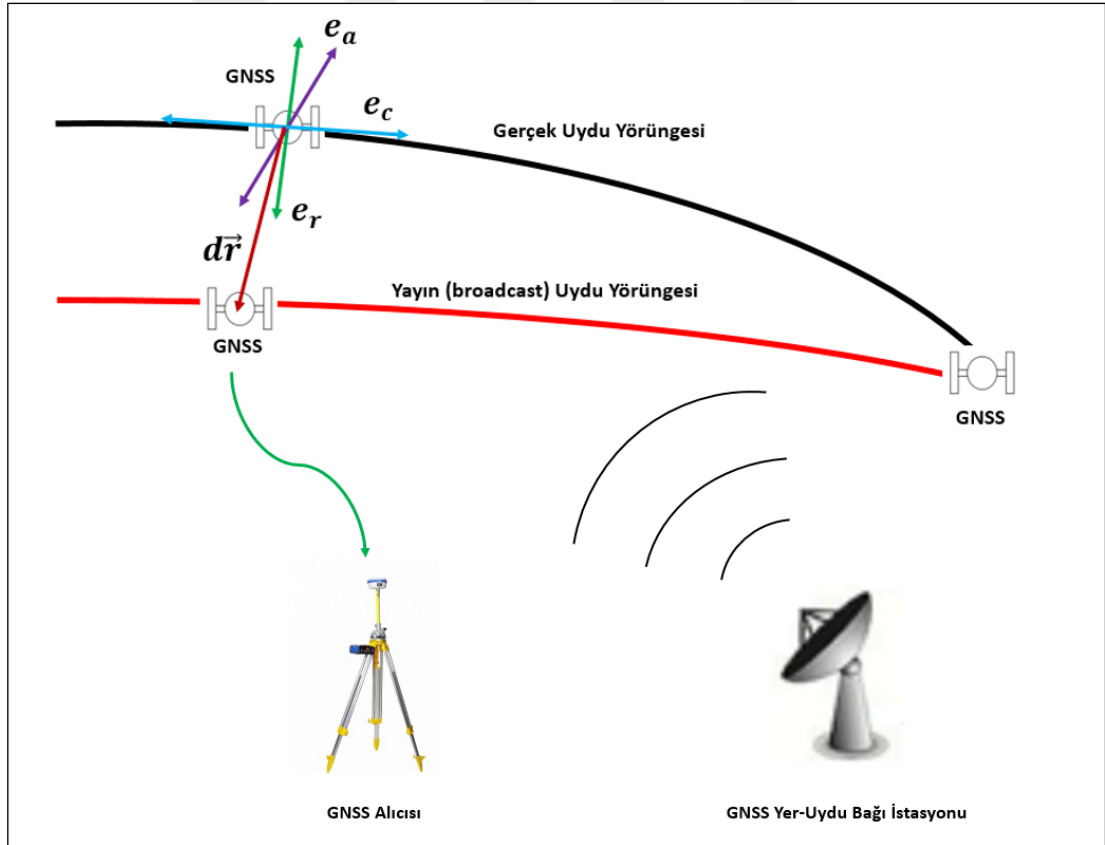
Tablo 3.1. IGS'in farklı analiz merkezleri.

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

Uydudan yayınlanan efemeris kütüğü içerisinde bulunmayıp birçok noktada uydudan gözlem yaparak Hassas Konum Belirleme (Precise Positioning Service, PPS) servisleri tarafından belirlenen ve üçüncü veri seti olan hassas efemeris bilgisi ile uyduların konumu cm seviyesinde belirlenebilmektedir. IGS'in (International GNSS Service)

Tablo 3.1’de verilmiş olan farklı analiz merkezlerinin üretmiş olduğu hassas efemeris dosyalarına, ölçü yapıldıktan sonra yaklaşık 13 ila 17 gün süre içerisinde internet üzerinden kullanıcıya ücretsiz sunulmaktadır. IGS, bu analiz merkezlerin elde ettiği bağımsız kestirimler ile 4 farklı veri tipinde (Ultra-Rapid (Kestirilen), Ultra-Rapid (Hesaplanan), Rapid ve Final) uydu yörünge bilgisi dosyası sunar. Her bir dosya içerisinde bulunan bilgilerin güncelleme zamanları, veri örnekleme aralığı ve verilerin doğruluğu farklıdır.

GNSS uydularının yörünge hataları Şekil 3.1’de gösterildiği gibi yarıçap boyunca ( $e_r$ ), teğet boyunca ( $e_c$ ) ve yörünge düzlemine dik ( $e_a$ ) olarak 3 kısımda incelenebilir. Bu hatalar uyduya etki eden çekim kuvvetleri tarafından oluşmaktadır. Yörünge hatası uydu ile alıcı arasındaki uzunluğa; yarıçap boyunca, yörüngeye teğet boyunca ve yörünge düzlemine dik etkilerin toplamı uydu konum hatası ( $d\vec{r}$ ) vektörü olarak görülmektedir. PPP tekniğinde nokta konumu belirlenirken en önemli unsurlardan biri olan bu hata modellenenmektedir.



Şekil 3.1: Uydu Yörünge Hatasının şematik gösterimi.

### 3.3.1.2.Uydu Saat Hataları

Tüm GNSS uyduları yayınladığı sinyallerin zamanını kontrol etmek için yüksek duyarlılıklı rubidyum ve sezyum atomik standartlardaki saatleri kullanırlar. Çok yüksek duyarlılıklı saat olmalarına rağmen uydu saati ile GPS zamanı arasında mikro saniye seviyesinde küçük sapmalar oluşmaktadır. Bu fark uydu saat hatasını oluşturup Eşitlik 3.1’de gösterilmektedir. Ne kadar GPS zamanı ile küçük bir farka sahip olsa da uydu ile alıcı arasındaki mesafe, yayınlanan sinyalin hızına ( $3 \times 10^8$  m/sn) bağlı olarak metreler seviyesinde bir hata ile belirlenebilmektedir. Bu hata nokta konum duyarlılığını metre hatta kilometre seviyesinde belirlenmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı saat hatalarını hesaplamak için GNSS uydu sistemlerinin Ana Kontrol Merkezi tarafından izlenerek saat düzeltmelerini navigasyon mesajı ile uydulara gönderilir [123]. Yayınlanan düzeltmeler alıcı tarafından alınarak aşağıda belirtilen Eşitlik 3.1’deki ikinci dereceden polinom ile modellenir.

$$\delta t^u = a_0 + a_1(t_T - t_{0e}) + a_2(t_T - t_{0e})^2 + \Delta t_r \quad (3.23)$$

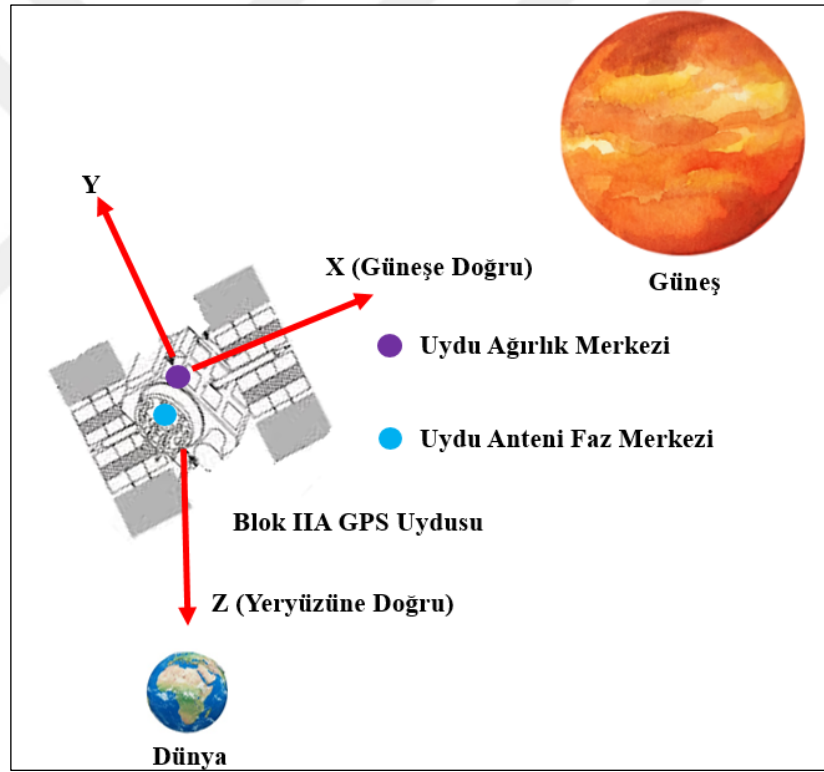
Eşitlik 3.23’te belirtilen uydu saat hatası denkleminde,  $a_0$  saat hatası (bias),  $a_1$  saat kayması (drift),  $a_2$  frekans kayması (drift),  $t_T$  uydudan sinyalin çıktığı an (epok),  $t_{0e}$  referans zamanı,  $\Delta t_r$  rölativistik etkilerden dolayı getirilen düzeltmeyi ifade edilmektedir. Denkleminde belirtilen  $a_0$ ,  $a_1$  ve  $a_2$  polinom katsayıları navigasyon kütüğünden,  $t_{0e}$  almanak kütüğünden alınır. Uydu saat hatalarının hassas bir şekilde belirlenmesi PPP tekniği için oldukça önemlidir. PPP tekniğinde nokta konumunun yüksek hassasiyette belirlenebilmesi için uydu yörünge ve saat düzeltme bilgilerinin hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir [140]. Eğer bu bilgilere erişilemediği durumda çözüm, uydudan yayınlanan yayın efemeris bilgisi kullanılarak yapılmaktadır. Bu durum PPP tekniği ile nokta konum duyarlılığını düşürmektedir [141]. Bundan dolayı uydu saatlerinin sürekli izlenerek hassas bir şekilde uydu saat düzeltmelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bağlı konum belirlemede bu hata tekli ve ikili farklar alınarak elimine edilirken, PPP tekniğinde ise IGS’in farklı analiz merkezlerinden alınan veri setleri ile beraber uydu saat hatalarını hassas bir şekilde hesaplamakta ve kullanıcıya internet ortamında ücretsiz sunmaktadır. IGS, 1994 yılından beri uydu yörünge ve saat düzeltmeleri, iyonosferik düzeltme, troposferik

düzeltilme gibi GNSS veri ürünlerini kullanıcıya sunar [69], [70], [142]. IGS farklı gecikme periyotlarına göre yörünge ve saat düzeltmeleri için 3 farklı veri tipi sunar; IGS-Final, IGS-Rapid ve IGS-Ultra-Rapid. IGS-Final ürünleri için 13-17 gün, IGS-Rapid ürünleri için ise 17-41 saatlik gecikme ile üretilir [72], [143]. Bu iki veri tipinde üretilen ürünler bilimsel çalışmalarda sonradan değerlendirme modunda kullanılmaktadır. Öte yandan gerçek zamanlı çözümlerde IGS Ultra-Rapid ürünlerin yalnızca kestirilen ürünü kullanılırken, hassasiyeti IGS Ultra-Rapid (Kestirilen) üründen daha yüksek olan ayrıca gecikme zamanı 3 ila 9 saat arasında IGS-Ultra-Rapid (Hesaplanan) ürünleri yakın gerçek zamanlı çözümlerde kullanılmaktadır [72], [143]. Bu bağlamda gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılan IGS URP (Kestirilen) ürünlerin uydu yörünge doğruluğu  $\sim 5$  santimetre (cm), uydu saatinde ise  $\sim 3$  nanosaniye (ns) bir doğruluk vermektedir [72], [143]. Gerçek zamanlı yapılacak çalışmalarda URP ürünü mevcut olduğundan, hassas ürünlerin elde edilmesi için gecikme süresinin uzun olması kullanılan bu ürünü de kısıtlamaktadır.

### **3.3.1.3. Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları**

GNSS uydularında Şekil 3.2’de gösterilen Blok IIA GPS uydusu gibi 2 ana merkez bulunmaktadır. Uyduya etki eden çekim kuvvetlerinden dolayı uydu yörüngelerinde meydana gelen sapmalar ve uydu saatlerinin GPS zamanı arasındaki farkların hesaplanırken, IGS’in hassas uydu yörünge ve saat düzeltme ürün dosyaları uydu ağırlık merkezine (Center of mass) göre belirlenmektedir. Diğer taraftan GNSS alıcısının konumunun belirlenmesi için uydudan yayınlanan uydu navigasyon mesajı, taşıyıcı sinyaller üzerine modüle edilmiş kod gözlemleri ve taşıyıcı sinyallerin modüle edilmemiş faz gözlemleri ikinci ana merkez olan uydu anteni faz merkezine (center of phase) göre hesaplanmaktadır [144]. Bu hata uydu kaynaklı hataların en önemli unsurlarından biri olup PPP tekniğinde hem uydu hem de alıcı için anten faz merkezi düzeltmeleri dikkate alınmalıdır. Bu düzeltme içerisinde faz merkezi kayıklığı (Phase Center Offset, PCO) ve faz merkezi değişimi (Phase Center Variation, PCV) bulunmaktadır. Faz merkezi kayıklığı, ortalama uydu faz merkezi ile kütle merkezi arasındaki fark iken faz merkezi değişimi ise giden sinyalin yönünün fonksiyonel bir değişimidir. GNSS uydularının anten faz merkezi kayıklıklarına ilişkin düzeltmeler, ANTEX (anten değişim formatı, antenna exchange format) dosyaları biçiminde

IGS'den elde edilebilir. Bu format çoklu uydu sistemleri, her uyduya ait çoklu frekansları ve faz merkezi değişimlerine bağlı azimut değerlerini elde etmek için tasarlanmıştır. Mayıs 2022 itibari ile igs14\_2196.atx dosyası, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou küresel konum belirleme sistemlerinin yanı sıra QZSS ve IRNSS bölgesel konum belirleme sistemleri için, 2196 GPS haftasına kadar PCO ve PCV değerlerini içermektedir. Elde edilen uydu anteni faz merkezi kayıklığı değerleri Şekil 3.2'de gösterilen ve merkezi uydu ağırlık merkezi olan uydu sabit koordinat sistemine göre verilmektedir. Bu koordinat sisteminin Z eksenini yeryüzüne göre, Y eksenini uydular da bulunan ve güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmeye yarayan güneş panelleri eksenine doğrultusunda ve X eksenini ise sağ el kuralına göre güneşe doğru olarak tanımlanmaktadır [50], [145].

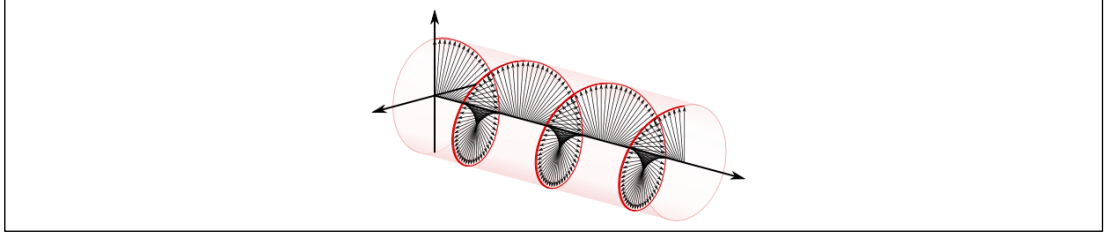


Şekil 3.2: Uydu anteni faz merkezi ve ağırlık merkezi şematik gösterimi.

#### 3.3.1.4. Uydu Anteni Faz Dönmesi (Phase Wind Up)

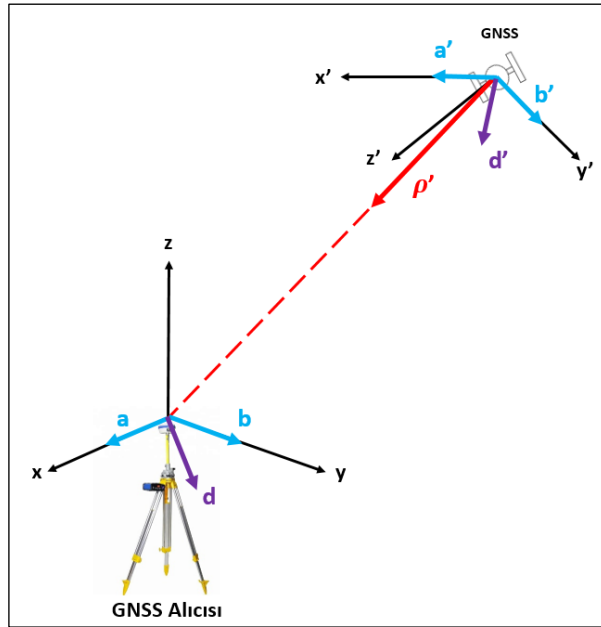
GNSS sinyalleri, elektromanyetik doğası gereği Şekil 3.3'te görüldüğü gibi saat yönünde dairesel sağ polarizasyonlu (Right Hand Circularly Polarized, RHCP) şekilde yayınlanmaktadır. Bundan dolayı uydudan çıkan taşıyıcı faz gözlemlerinin uydu-alıcı

geometrisine bağı olarak birbirlerine doğru yönlenmiş olmaları gerekmektedir. Uydu veya alıcının kendi düşey eksenini etrafında döndürülmesi sonucu taşıyıcı dalga fazının dönmesine neden olup faz dönme etkisi (phase wind-up) olarak adlandırılmaktadır [146], [147].



Şekil 3.3: Uydudan yayınlanan sinyalin saat yönünde polarizasyonu.

Uydulara gerekli olan elektrik enerjisini sağlayan güneş panelleri, güneşe yönlendirilirken uydu küçük hareketler yapmaktadır. Aynı durum güneş panelleri karanlıkta kalıp güneşe doğru yönlendirildiğinde uydunun yapmış olduğu hareket daha fazla olmaktadır. Bu durum faz dönmesine neden olup faz ölçülerine düzeltme getirilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.4: Uydu anteni faz dönmesi modeli.

Bağıl konum belirlemede bu hata 100 km'lik baz uzunluğunda ihmal edilse de 4000 km'lik bir baz uzunluğunda noktanın konumu 4 cm'lik bir hata ile belirlenmektedir

[72]. PPP için bu hata taşıyıcı dalgaının yarısına kadar ulaşabileceğinden nokta konumu dm mertebesinde hesaplanmaktadır [51], [143]. Uydu anteni faz dönmesi Şekil 3.4'te belirtildiği ve aşağıdaki eşitlikte (3.24) gösterildiği gibi modellenmektedir [72], [146]:

$$\Delta\Phi = \text{sign}(\zeta) \arccos\left(\frac{\vec{D} \cdot \vec{D}'}{\|\vec{D}\| \cdot \|\vec{D}'\|}\right) \quad (3.24)$$

Bu eşitlikte;

$$\zeta = \hat{r} \cdot (\vec{D} \cdot \vec{D}') \quad (3.25)$$

Ayrıca  $\Delta\Phi$  faz dönmesi düzeltmesini,  $\hat{r}$  uydu-alıcı arasındaki birim vektörü,  $\vec{D}, \vec{D}'$  uydu ve alıcının dipol vektörlerini temsil etmektedir. Uydu koordinatı birim vektörleri  $(\hat{a}, \hat{b}, \hat{c})$  ve GNSS alıcı koordinatı birim vektörleri  $(\hat{a}', \hat{b}', \hat{c}')$  olmak üzere,

$$\vec{D} = \hat{a} - \hat{r}(\hat{r} \cdot \hat{a}) - \hat{r} \times \hat{b} \quad (3.26)$$

$$\vec{D}' = \hat{a}' - \hat{r}(\hat{r} \cdot \hat{a}') - \hat{r} \times \hat{b}' \quad (3.27)$$

IGS ve onun analiz merkezleri tarafından, faz dönmesi etkisi PPP tekniğinde kullanılan hassas uydu yörünge ve saat düzeltmeleri de dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Aksi durumda nokta konumu dm mertebesinde hata ile belirlenebilmektedir.

### 3.3.1.5. Rölativite (Görelilik) Etkisi

Albert Einstein tarafından ortaya atılan görelilik kuramı, özel (madde ve enerji ilişkisi) görelilik ve genel (uzay ve zaman ilişkisi) görelilik olarak iki teoriden oluşmaktadır. Bu kuram uydu tabanlı gözlemlerde GNSS uydularından yayınlanan sinyallerin alıcı tarafından kod ve taşıyıcı faz ölçülerinin değerlendirilmesinde ve uydu saatlerinde önemli bir faktördür [148], [149]. Görelilik etkisinin ortaya çıkmasında hem yer çekimi kuvveti hem de uydu saati ve alıcı saatinin hızlarının farklılıkları neden olmaktadır. Uydu ile alıcı farklı eylemsiz sistemler olmasından dolayı saatler arasında senkronizasyon (eşzamanlılık) olmamaktadır. Bundan dolayı PPP tekniğinde

kullanılan hassas uydu saat düzeltme verisi için rölativite etkisinin dikkate alınması gerekmektedir [150]. GNSS uydularında bulunan atomik saatler hem özel (uydunun görelî hızı) görelilik hem de genel (dünyanın yerçekimi alanı) görelilik etkilerinden etkilenir. Bu nedenle oluşan her iki etkiyi giderebilmek için 10.23 MHz olarak seçilen uydu saatlerinin temel frekansı, uydu fırlatılmadan önce -0,00457 Hz'lik sabit bir sapma ile ayarlanmıştır. Bununla birlikte, GNSS uydu yörüngelerinin eksantrikliği nedeniyle, uydu saatleri periyodik farklılıklar gösterir. GNSS uydularının mesafesi ve hızı değıştikçe değışen yerçekimi ve hareket frekansı kaymalarını ele almak için ek bir periyodik düzeltmenin dikkate alınması gerekir. Bu ek periyodik düzeltme özel görelilik teorisine göre sabit bir hızda hareket eden uydu saati, görelî hareketin zaman genişlemesi etkisinden dolayı GNSS alıcındaki saatten daha yavaş görünür [151]. Bu etki aşğıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\Delta t_r = \frac{2}{c} \sqrt{\mu a} e \sin E = - \frac{2 \vec{r}_s \cdot \vec{v}_s}{c} \quad (3.28)$$

Eşitlik 3.28'de gösterilen;  $\Delta t_r$  görelilik düzeltmesi,  $\mu$  dünyanın yerçekimi sabiti,  $a$  büyük yarı eksen,  $e$  uydu yörünge eksantrisitesi,  $E$  eksantrik anomalisi,  $\vec{r}_s$  uydu anlık konum vektörü,  $\vec{v}_s$  uydu anlık hız vektörü,  $c$  ışık hızı olarak ifade edilmektedir. Diferansiyel konum belirlemede bu düzeltme genellikle alıcı yazılımı tarafından yapılmaktadır. Ancak, PPP tekniğini ile konum belirlemede, gerçek zamanlı çalışmalarda kullanılan yayın efemerisi için birinci eşitlik, sonradan değerlendirme için hassas saat verisi kullanıldığından ikinci eşitlikteki görelilik etkisi dikkate alınarak, düzeltme uygulanmalıdır [140].

Genel görelilik teoremine göre ise kütle, içinde bulunduğu uzayın bükülmesine neden olur ve iki nokta arasında hareket eden serbest (üzerine hiçbir kuvvet etki etmeyen) cisimler, aradaki en kısa yolu takip eder. Kütle çekimin teorisi olan genel görelilik, GNSS uydularında bulunan atomik saatlerin, yerçekimindeki farklılıklardan dolayı, GNSS alıcılarında bulunan saatlerden daha hızlı çalışıyor gibi görünür. Yani GNSS uydusundan yayınlanan sinyal, Dünya'nın yerçekimi alanından geçerken, genel görelilik zaman genişlemesi (time dilation) nedeniyle küçük bir gecikmeye sahiptir [152]. Bu gecikmeye karşılık gelen düzeltme şu şekilde verilir [153], [154]:

$$\Delta t_p = \frac{2GM}{c^2} \ln \left( \frac{r^s + r_r + \rho_r^s}{r^s + r_r - \rho_r^s} \right) \quad (3.29)$$

Eşitlik 3.29’da gösterilen;  $\Delta t_p$  yerçekimi gecikme hatası,  $G$  yerçekimi sabiti,  $M$  Dünya’nın kütlesi,  $r^s$  uydunun jeosantrik mesafesi,  $r_r$  alıcının jeosantrik mesafesi,  $\rho_r^s$  uyu ile alıcı arasındaki mesafe,  $c$  ışık hızı olarak temsil edilmektedir. Bu gecikmeden kaynaklı hata 12.7 mm ile 18.7 mm arasında değişmekte olup bu etki diferansiyel konum belirlemede kaldırılabilirken, PPP yöntemi ile nokta konumlandırma dikkate alınmalıdır [155].

### 3.3.1.6. Yeryuvarı Dönme Parametreleri (Sagnac Etkisi)

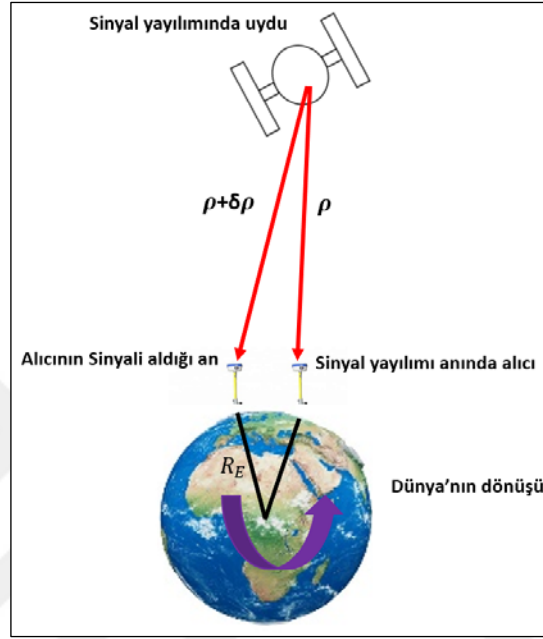
Dünya kendi eksenini etrafında yaklaşık 1670 km/h hızla dönmektedir. Bu dönüş hızı, ekvator bölgelerinde maksimum iken kutuplara doğru azalmakta ve 0 km/h olmaktadır. Bundan dolayı uydudan yayınlanan sinyal Şekil 3.5’te gösterildiği gibi alıcıya ulaştığı anda GNSS alıcısı yaklaşık 460 m/s hız ile hareket etmektedir. Dünyanın hareketinden kaynaklı bu hataya Sagnac etkisi adı verilmektedir. Bu etki uyu konumlarını hesaplama sırasında dikkate alınmakta ve bu etkinin düzeltilmemesi durumunda konum duyarlılığını yaklaşık 30 m etkilemektedir [124], [137], [156]. Sagnac etkisi aşağıdaki şekilde ifade edilirse;

$$\delta \rho_s = + \frac{2\Omega_e \cdot A_e}{c^2} \quad (3.30)$$

Eşitlik 3.30’da gösterilen;  $\delta \rho_s$  sagnac düzeltmesi,  $\Omega_e$  Dünyanın açısal dönme hızı (WGS-84,  $7.2921151467 \times 10^{-5}$  rad/s),  $A_e$  uydudan alıcıya gelen sinyalin dünyanın merkezinden ışık ışınına yarıçap vektörü tarafından süpürülen toplam alan,  $c$  ışık hızı olarak temsil edilir. Yeryuvarı dönme parametresi olarak da adlandırılan sagnac etkisi ister yayın efemerisi ister hassas efemeris verisi kullanılmış olsun bu etki mutlaka dikkate alınmalıdır. PPP tekniğinde uyu koordinatlarını hesaplamak için yayın efemerisleri kullanıldığında Sagnac etkileri, yükselen uyu düğüm noktasının düzeltilmiş boylamının hesaplanması sırasında aşağıdaki gibi basitçe kaldırılabilir [155]:

$$\Omega = \Omega_0 + (\Omega - \Omega_e)(t - t_e) - \Omega_e(t_e + \Delta t) \quad (3.31)$$

Eşitlik 3.31’de belirtilen;  $t_e$  efemeris için referans zamanı,  $\Omega_0$  uydunun  $t_e$  zamanındaki yükselen düğüm noktasındaki boylamı,  $\Omega$  sağa yükseliş hızı,  $\Delta t$  sinyal yayılma süresi olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.5: Sagnac Etkisi.

### 3.3.2. Alıcı Hata Kaynakları

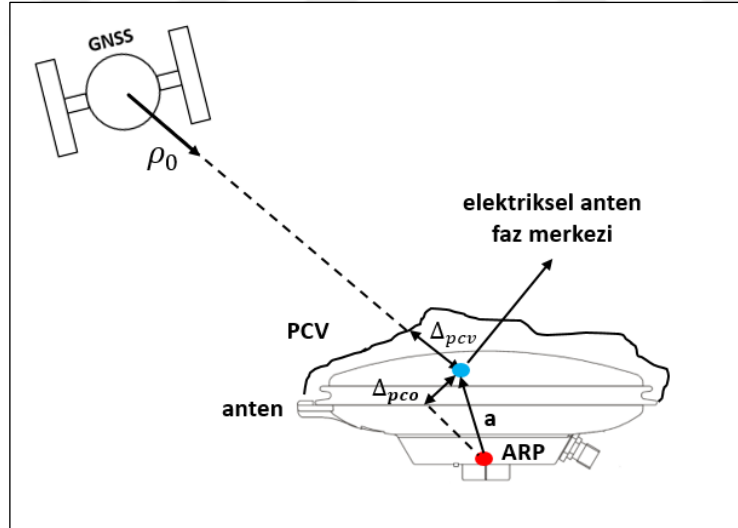
#### 3.3.2.1. Alıcı Saat Hataları

GNSS alıcılarında bulunan Quartz saatler, uydularda kullanılan atomik saatlere göre daha düşük duyarlıktadır. Çoğu GNSS alıcılarının içerisinde bulunan kuarts kristal osilatör atomik saatlere göre daha düşük maliyetlidir [125]. Düşük maliyetli olmasına rağmen alıcı saatleri, sıcaklık değişiminden etkilenir ve atomik saatler kadar süreklilik sağlayamamaktadır. Bu yüzden uydu tabanlı konum belirlemenin temeli olan uydu ile alıcı arasındaki sinyalin seyahat süresinin hatalı ölçülmesine neden olmaktadır. Bu hatadan dolayı uydu zamanına göre sapmalar (drift) karşılaştırılması gerekir [157]. PPP tekniğinde uydular arasındaki saat hataları giderilirken, alıcı saat

hataları konum bileşenleri ile bilinmeyen parametre olarak alınıp ek uydu gözlemleri yapılarak hesaplanmaktadır [72].

### 3.3.2.2. Alıcı Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları

Uydulardan yayınlanan taşıyıcı sinyaller, GNSS alıcı antenleri tarafından her doğrultuda alınmaktadır. Doğrultuya bağlı olarak alınan bu sinyaller alıcı anten içerisinde faz merkezi konumunda değişiklik göstermektedir. Bir antenin faz merkezi, GPS uydu sinyalinin yönlendirildiği elektrik noktası ile ilgilidir. Alıcı içerisindeki bu duruma alıcı anteni faz merkezi değişimi (Phase Center Variations, PCV) denilmektedir. Bu değişim alıcı antenin geometrik merkezi ile aynı olmayıp, uydu sinyalinin yüksekliğine, azimutuna, yoğunluğuna bağlıdır [123]. Ayrıca L1 ve L2 taşıyıcı sinyaller için farklıdır. Anten faz merkezi değişiminden kaynaklı bu hata farklı model antenler için farklılık göstermekle birlikte dikkate alınmaması durumunda bir noktanın yatay bileşeninde birkaç santimetreye varan hatalar meydana getirir iken düşey bileşeninde 10 cm'ye kadar çıkmaktadır [157].



Şekil 3.6: Anten Faz Merkezi Kayıklığı.

Anten faz merkezi kayıklığı, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi elektriksel anten faz merkezi ile anten referans noktası (ARP) arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. PCO değerleri, her GNSS anten modeli için farklı olduğundan üretici firmalar, her taşıyıcı sinyal frekansı için ayrı ayrı bu değerleri sağlamaktadır [137]. PCO değeri,

uydu ile alıcı arasındaki birim vektör ( $\vec{\rho}_0$ ) ile ARP ve elektriksel anten faz merkezi arasındaki birim vektörün ( $\vec{a}$ ) skaler çarpımı olarak tanımlanmaktadır.

$$\Delta_{pco} = \vec{a} \cdot \vec{\rho}_0 \quad (3.32)$$

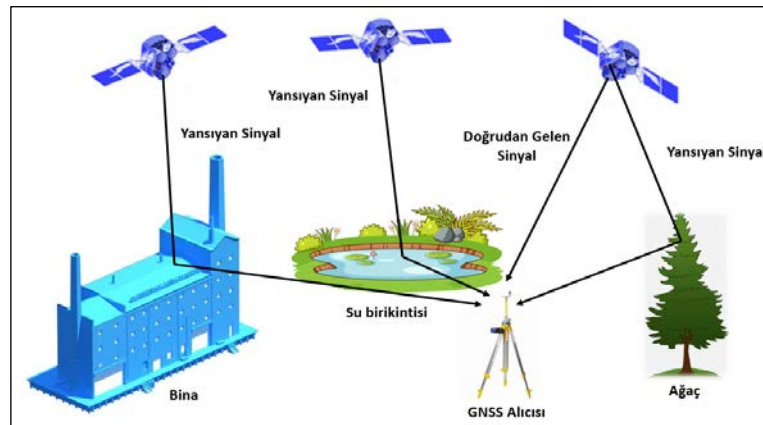
Ayrıca anten faz merkezi değişimleri dikkate alındığında toplam düzeltme;

$$\Delta_{pco} + \Delta_{pcv} = \vec{a} \cdot \vec{\rho}_0 + \Delta_{pcv}(\alpha, z, f) \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.33'te belirtilen  $\alpha$  azimutu,  $z$  yükseklik ve  $f$  taşıyıcı sinyalin frekansını temsil etmektedir. Son zamanlarda farklı GNSS alıcı ve anten modellerinin artışı ile mutlak konum belirlemenin özel bir hali olan PPP tekniğinde faz merkezi değişimlerinin hesaba katılması elde edilecek doğruluk açısından gereklidir. Bu doğrultuda hem gerçek zamanlı hem de sonradan değerlendirme PPP uygulamalarında, IGS tarafından güncel olarak igs14\_2196.atx dosyası içerisinde alıcı PCV değerleri kullanılmaktadır.

### 3.3.2.3. Sinyal Yansıma Hatası (Multipath)

Uydudan yayınlanan sinyal, yeryüzünde çevreden birçok nesneden yansyarak veya doğrudan alıcı antene gelmektedir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi binalar, ağaçlar, göl, baraj gibi sabit objeler; araba, tren ve uçak gibi hareketli nesnelerin yüzeylerinden yansyarak birçok yoldan alıcı antene ulaşan bu sinyaller, sinyal yansıma (multipath) hatasına neden olmaktadır [158].



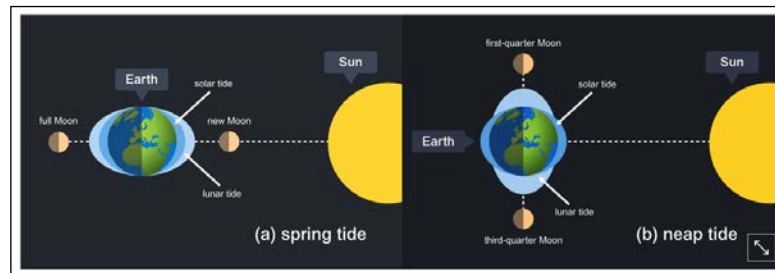
Şekil 3.7: Sinyal Yansıma Hatası (Multipath).

Sinyal yansıma hatası, konum belirlemede hata kaynağı olup, etkisinin azaltılması için ölçüm yapılacak yerin ideal yani açık gökyüzü ortamında seçilmesi gerekir. Ancak bu durum GNSS kullanıcıları için çoğunlukla pek mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı konum belirleme veya navigasyon amaçlı çalışmalarda bu etkinin azaltılması için choke ring anten tipli GNSS alıcıları kullanılmaktadır [123]. Ayrıca alıcıların kendi içerisinde bulundukları yazılımlar veya kullanıcıların uydu yükseklik açılarını  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  arasında seçmesi, bu hatanın azalmasına neden olacaktır.

### 3.3.3. Jeodinamik Hareketlerden Kaynaklı Hatalar

#### 3.3.3.1. Katı Yeryuvarı Gelgiti (Solid Earth Tides)

Güneş ve Ay olmak üzere dış cisimler tarafından üretilen yerçekimi kuvvetleri nedeniyle, yerkabuğu hareket eder ve daha sonra istasyon alıcısının koordinat değişikliklerine, yani katı yeryuvarı gelgitine neden olur. Ay ve Güneş'in göreceli konumlarındaki değişimler sonucu Dünya üzerinde meydana getirdikleri kütle çekim kuvvetindeki farklılıklardan dolayı yeryüzünde yatay ve düşey yönlü yer değiştirmeler oluşturmaktadır. Bu değişimler katı yeryuvarı gelgiti ile tanımlanmaktadır. Gelgitin neden olduğu yer değiştirmeler, enlem değerine bağlı olarak sabit ve periyodik kısım olarak ifade edilip düzeltme değeri yatay doğrultuda 5 cm iken düşey bileşende 30 cm'ye kadar ulaşmaktadır [50], [72]. Şekil 3.8'de katı yeryuvarı gelgiti gösterilmiştir. Gelgitin oluşmasında güneşin etkisi, güneş ile ay aynı düzlem üzerinde olması durumunda yani yeni ay ve dolunay denilen evrelerde gelgit olayı yüksek iken, Ay Güneşe göre  $90^{\circ}$  farklı tarafta ise yani ilk çeyreğinde ya da 3. çeyreğinde ise daha düşüktür. Tam tersi ay etkisi için geçerlidir [159].



Şekil 3.8: Katı Yeryuvarı Gelgiti.

Katı yeryuvarı gelgitinden dolayı meydana gelen sabit ve periyodik yer değiştirme düzeltmeleri Uluslararası Günlük Hareket Servisi'nin (IERS) sunmuş olduğu belgeye dayalı olarak, 2. derece gelgit nedeniyle yer değiştirme için basitleştirilmiş model şu şekildedir:

$$\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ [3l_2(\hat{R}_j \cdot \hat{r})] \hat{R}_j + \left[ 3 \left( \frac{h_2}{2} - l_2 \right) (\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \hat{r} \right\} + [-0.025m \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\theta_g + \lambda)] \cdot \hat{r} \quad (3.34)$$

Eşitlikte,  $\Delta \vec{r}$  kartezyen koordinat sisteminde katı yeryuvarı gelgitinden dolayı yer değiştirme vektörü,  $GM$  Dünya'nın yerçekimi parametreleri,  $GM_j$  Ay (j:2) ve Güneş'in (j:3) yerçekimi parametreleri,  $r$  istasyon merkezli durum vektörü,  $\hat{R}_j$  Ay (j:2) ve Güneş'in (j:3) yer merkezli durum vektörü,  $\hat{r}$  istasyon yer merkezli birim durum vektörü,  $l_2$  nominal 2.derece Love sayısı (0.609),  $h_2$  nominal 2.derece Shida sayısı (0.085),  $\varphi$  nokta enlemi,  $\lambda$  nokta boylamı,  $\theta_g$  Greenwich yıldız zamanını temsil eder. PPP tekniğinde nokta konumlandırmada dikkate alınmalıdır. Bu etkinin dikkate alınmaması durumunda santimetre seviyesinde sistematik hatalar ortaya çıkmaktadır. Bağıl konum belirlemede, 100 km'den küçük baz bileşenlerinde bu etki sabit ve gezici noktalarda benzer kabul edildiğinden giderilmektedir [72].

### 3.3.3.2. Okyanus Yüklemesi (Ocean Loading)

Yeryüzünde okyanuslarda meydana gelen gelgitler nedeniyle deniz suyu dağılırken okyanus tabanında ve okyanusa kıyısı olan bölgelerde yer kabuğu hareketi meydana gelmektedir. Bu durum okyanus tabanında ve kıyı bölgelerinde deformasyona neden olur ve bu olaya okyanus yüklemesi denir. Katı yeryuvarı gelgiti etkisinden daha küçük olan bu etki yüksek duyarlılık isteyen kinematik yöntemle konum belirlemede dikkate alınmalıdır. Ayrıca okyanusa kıyısı olan yaklaşık 1000 km ve daha yakın bölgelerde kısa süreli statik ölçülerde dikkate alınmalıdır [50].

IERS'in sunmuş olduğu belgeye göre, okyanus yüklemesi için bir model şu şekilde tanımlanmaktadır [154]:

$$\Delta \vec{r}_{ol} = \sum_j F_j A_{cj} \cos(w_j t + X_j + u_j - \Phi_{cj}) \quad (3.35)$$

Eşitlikte,  $\Delta \vec{r}_{ol}$  okyanus yüklemesinden dolayı yer değiştirme vektörünü,  $j$  11 gelgit dalgasının ( $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m, M_{sa}$ ) temsili,  $F_j$ ,  $u_j$  Ay düğüm noktasının boylamına dayalı,  $w_j$ ,  $X_j$   $t = 0^h$  zamanındaki  $j$  gelgit dalgası bileşeni için açısal hız ve astronomik argümanı,  $A_{cj}$ ,  $\Phi_{cj}$   $j$  gelgit dalgası bileşeni için noktaya özgü genlik ve faz katsayılarını temsil eder.

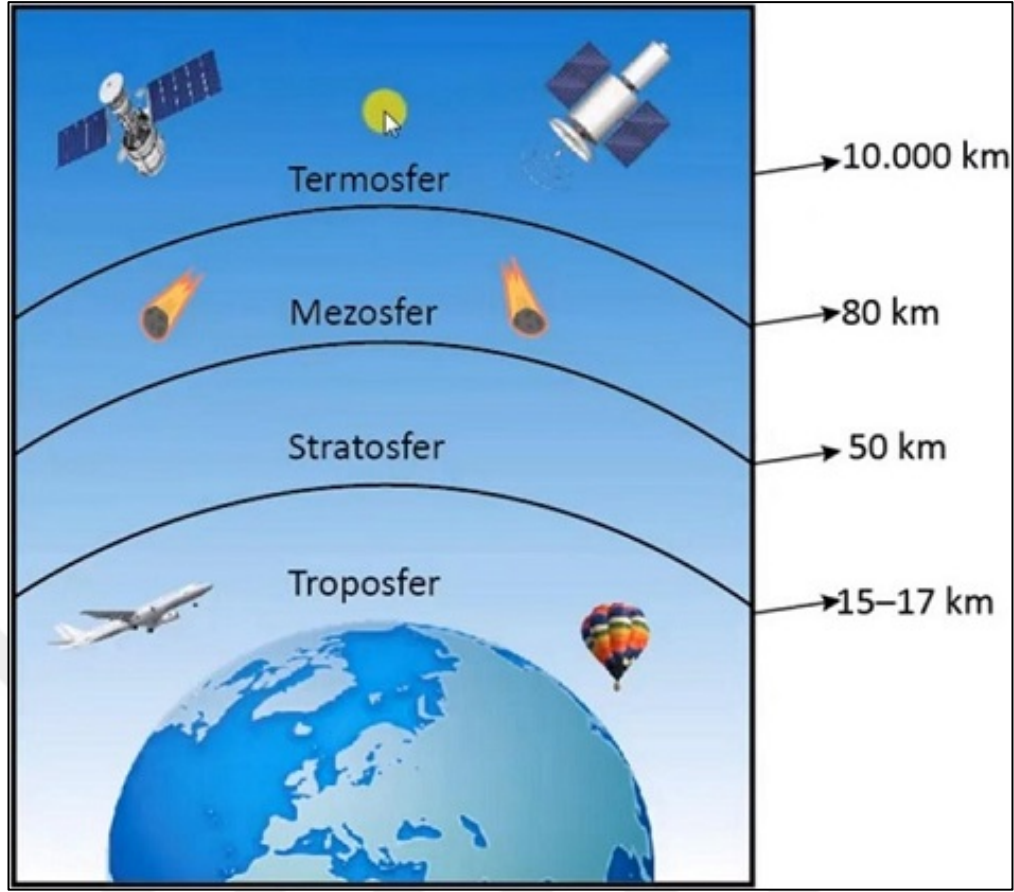
### 3.3.3.3. Kutup Gezinmesi

Dünyanın kitlesel dağılımının düzensizliği, elastik yapısı, atmosferik etkiler (mevsimsel ve meteorolojik değişimler), dünyanın dinamik davranışı, vb. etkiler sonucu dünyanın dönme ekseninin ya da anlık kutbun yer değiştirmesine kutup gezinmesi denilmektedir. Kutup gezinmesi periyodik deformasyonlara neden olmakta ve istasyon nokta koordinatlarında küçüğe olsa değişime neden olmaktadır [147]. Oluşan bu hareket üst üste bildirilmiş serbest presesyon (Chandler Periyodu) hareketi ve mevsimsel değişimlerin neden olduğu yıllık hareketten meydana gelmektedir. Kutup hareketinin nokta konumu değişimleri için 1900-1905 yılları arasındaki kutup hareketlerin ortalaması alınarak başlangıç kabul edilip, konvansiyonel yersel kutup (Conventional Terrestrial Pole, CTP) sisteminde kutup hareketi parametreleri ( $x_p$ ,  $y_p$ ) her yıl IERS tarafından belirlenerek yayınlanmaktadır [72], [147].

### 3.3.4. Atmosferik Modelleme

#### 3.3.4.1. Atmosferik Yükleme

Dünya atmosferinin yüksekliklerine göre 6 farklı katman bulunmaktadır. Şekil 3.9'da görülen dünyanın 4 atmosferik katmanın yanı sıra İyonosfer ve Ekzosfer katmanı da bulunmaktadır [156]. Bu tabakalara sahip olan atmosferden, GNSS uydularına ait yayınlanan sinyaller GNSS alıcısına ulaşmaya kadar farklı etkilere maruz kalmaktadır.



Şekil 3.9: Yer Kürenin Atmosferik Tabakaları.

Atmosferik katmanların oluşturduğu yer ve zaman değişiminden dolayı atmosferik yükleme meydana gelmektedir. Yükleme sonucundan yeryüzünde coğrafi enleme göre değişen yatay (3 mm) ve düşey (20 mm) yönlü yer değiştirmelere yol açmaktadır [140], [161]. Atmosferik yükleme sonucu meydana gelen bu değişimler için farklı atmosferik yükleme yer değiştirme modelleri bulunmaktadır. Bunlardan biri olan ve S1-S2 atmosferik basınç yüklemesi olarak adlandırılmaktadır. Bu etkiye, günlük S1, yarı günlük S2 ve daha yüksek harmoniklerde yüzey basıncı salınımları üreten atmosferin günlük ısınması neden olur. Mevcut model, Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) tarafından operasyonel küresel yüzey basıncı alanlarından türetilmiştir. Bu model S1 ve S2 RP03 [158] olarak adlandırılır ve IERS 2010 sözleşmelerine dayanır. Küresel Jeofizik Akışkan Merkezi (Global Geophysical Fluid Centre, GGFC) web sitesi altında Farrell'in (1972) yüzey yüklemesini kullanarak Ray ve Ponte'den (2003) türetilen S1 ve S2'yi sağlamak için etkili bir çevrimiçi hesaplayıcı mevcuttur [160].

### 3.3.4.2. İyonosferik Yükleme

GNSS sinyalleri Dünya'nın atmosferinden geçerken çeşitli hatalar ile karşı karşıya gelir; bu hatalardan dolayı nokta konum doğruluğu etkilenmektedir. Atmosferik katmanlardan biri olan, özellikle nokta konumunu önemli derecede etkileyen İyonosfer (Termosfer, Mezosfer ve Ekzosferin kısımları) katmanı yeryüzünden yaklaşık 60 ila 1000 km arasında bulunmaktadır. Bu katman, güneş ışınları ile plazma (iyonize olmuş gaz) halinde olan serbest elektronlar ve katyonları (pozitif yüklü iyonlar) içeren atmosferin iyonize edilmiş gaz kısmını içermektedir [121], [163]. İyonosferin oluşturduğu bu gazlardan dolayı uydulardan yayınlanan radyo dalgaları, ortamın elektriksel özellikleri, serbest elektronlar katyon parçacıklarından etkilenmektedir. Bu etkiler zaman, coğrafi konum, güneş ışınımı, dünyanın magnetik alanı ve yerkağı hareketlerine bağılı olarak değışmektedir. İyonosferin konumuna göre değışen kırılma indisi, uydu sinyalleri için taşıyıcı frekansların fonksiyonudur [163].

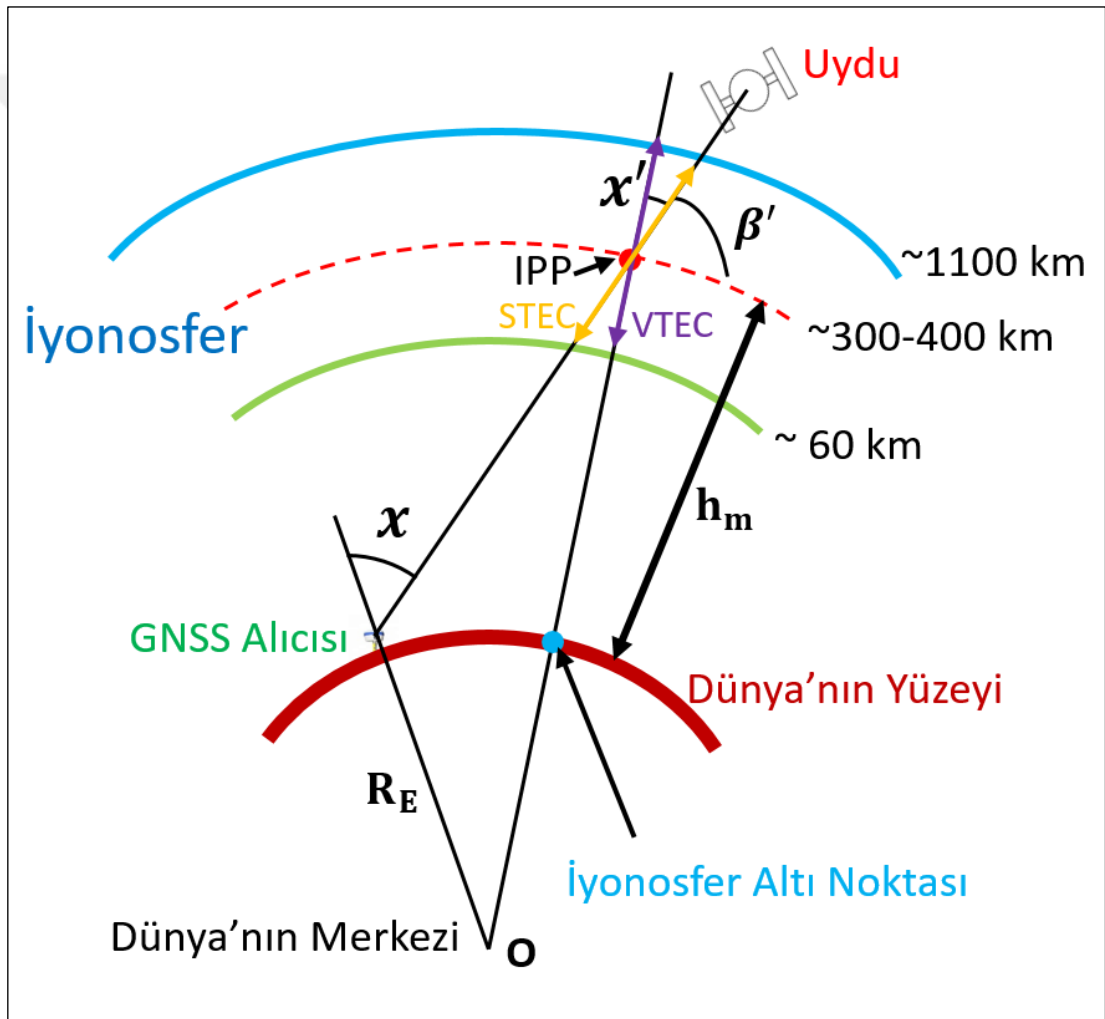
Uydulardan yeryüzünde bulunan GNSS alıcılarına gönderilen ve 2 ila 4 GHz arasında frekansa sahip radyo sinyalleri iyonosferden geçmektedir. İyonosferin yapısı gereğı 30 MHz ve altındaki frekanslara sahip sinyalleri yansıtırken, 50 MHz ve üzeri frekanslardaki sinyaller serbest elektron yoğunluğuna bağılı olarak zayıflama ve gecikmeye uğrar. Bu etki, radyo sinyalinin iyonosfer ortamı içerisinde kırılmasına sebep olur. Güneş ışınımı ile iyonosferde bulunan atom ve moleküller, elektron ve iyonlara ayrılır. Böylece güneş ışınımına bağılı olarak serbest elektron miktarı da değışmektedir. Bu durum gündüzleri güneş ışınlarının enerji kaybına en az uğradığı yerel saate göre yaklaşık 14.00'da serbest elektron miktarı en fazladır. Bu miktar güneşin konumuna bağılı olarak zamanla değışmektedir. Geceleri bu olayın tersi olan elektron ve iyonlar birleşir ve serbest elektron yoğunluğu azalır. İyonosferden geçen radyo sinyalleri zamana bağılı (günlük ve mevsimsel değışimler) olarak 1 ila 20 metre arasında gecikmeye maruz kalmaktadır [160], [161].

Uydu tabanlı konum belirleme yöntemlerinde uydudan yayınlanan GNSS sinyalleri üzerinde iyonosferde bulunan serbest elektronlar, kod ölçülerini geciktirici, taşıyıcı faz ölçülerini hızlandırıcı etki göstermektedir. Bu etki uydu ile alıcı arasında hesaplanan mesafede 3 ila 15 m arasında değışime sebep olur. Bağılı konum belirlemede bu hata ikili farklar alınarak minimize edilirken hassas konum belirleme çalışmalarında ve PPP tekniğinde bu hatanın modellenmesi gerekmektedir [162].

Uydu ile alıcı arasında hesaplanan geometrik mesafe, iyonosferik gecikmeden dolayı gerçek geometrik mesafeyi yansıtmamaktadır. Bu durumda iyonosfer gecikme hatası aşağıdaki Eşitlik 3.36'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta_{iono} = \pm \frac{A}{f^2} TEC \quad (3.36)$$

Bu eşitlikte;  $A$  sabit bir değer olup  $40.28 \text{ (m}^3/\text{s}^2\text{)}$ ,  $f$  frekans,  $TEC$  uydu ve alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca toplam elektron yoğunluğu olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.10: GNSS Sinyalinin İyonosfer Gecikme Geometrisi.

GNSS sinyalinin Şekil 3.10'da gösterildiği gibi iyonosfer tabakasından geçerken uğramış olduğu iyonosferik gecikme geometrisi gösterilmiştir. Şekilde belirtilen Düşey Toplam Elektron Yoğunluğu (Vertical Total Electron Content, VTEC),  $1 \text{ m}^2$ 'lik

düşey alandaki toplam elektron yoğunluğunu belirtmekte olup Eşitlik 3.37’de görüldüğü gibi modellenmiştir. Bu denklemde bulunan  $X'$ , iyonosfer geçiş noktasındaki (Ionosphere Pierce Point, IIP) başucu açısını temsil etmektedir [123].

$$\Delta_{iono} = \pm \frac{1}{\cos X'} \frac{40.3}{f^2} VTEC \quad (3.37)$$

Şekil üzerinde gösterilen uydu görüş hattı boyunca yani yatay toplam elektron yoğunluğu, (Slant Total Electron Content, STEC) genellikle eşdeğer bir VTEC' e dönüştürülür, bu da farklı veri kümeleri arasında uygun karşılaştırmaya ve iyonosferin konumsal haritalanmasına olanak sağlar [167]. Ayrıca şekilde,  $\beta'$  İyonosfer geçiş noktasının yükseklik açısı ve  $X$  ise GNSS alıcısının başucu açısını temsil etmektedir [125].

İyonosfer ortamının saçıcı olduğundan, çift frekanslı GNSS sinyalleri, fark alınmamış iyonosfer-bağımsız (ionosphere-free) sinyal kombinasyonları ile modellenebilmektedir. Birinci dereceden Taylor seri açılımında iyonosferik gecikmeden kaynaklı hata, hem kod ( $\rho_{IF}$ ) hem de taşıyıcı faz ( $\Phi_{IF}$ ) gözlemleri için iyonosfer-bağımsız doğrusal (lineer) kombinasyon ( $IF$ ) kullanılarak çift frekanslı GNSS alıcılar ile giderilmektedir. Bu kombinasyona ait çift frekanslı kod ve taşıyıcı faz gözlem denklemleri sırasıyla Eşitlik 3.40 ve Eşitlik 3.41’de oluşturulmuştur.

$$\rho_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \rho_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \rho_{L2} = 2.546 \rho_{L1} - 1.546 \rho_{L2} \quad (3.38)$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \Phi_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \Phi_{L2} = 2.546 \Phi_{L1} - 1.546 \Phi_{L2} \quad (3.39)$$

$$\rho_{IF} = r + c(\delta^R - \delta^S) + T_z \cdot m(E) + \varepsilon_\rho \quad (3.40)$$

$$\Phi_{IF} = r + c(\delta^R - \delta^S) + T_z \cdot m(E) + \lambda_{IF} \cdot N_{IF} + \varepsilon_\Phi \quad (3.41)$$

Eşitlik 3.40 ve 3.41’de gösterilen;  $\rho_{IF}$  iyonosfer-bağımsız kod gözlem denklemi,  $\Phi_{IF}$  iyonosfer-bağımsız taşıyıcı faz gözlem denklemi,  $\rho_{Li}$   $Li$  sinyaline ait kod ölçüsü,  $\Phi_{Li}$   $Li$  sinyaline ait taşıyıcı faz ölçüsü,  $N_{IF}$  iyonosfer-bağımsız tamsayı faz belirsizliği,  $\lambda_{IF}$

iyonosfer-bağımsız taşıyıcı dalga boyu,  $T_z$  troposferik zenit gecikmesi,  $m(E)$  izdüşüm fonksiyonu (Mapping Function),  $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\Phi$  çok yolluluk etkisi dahil olmakla birlikte sırasıyla kod ve faz ölçü gürültüsü olarak temsil edilmektedir. Yukarıda birinci dereceden Taylor seri açılımı verilen ionosfer-bağımsız kombinasyon, ionosferden geçen sinyalin uğramış olduğu kırılmayı tamamen yansıtmamaktadır. Bu durumda daha yüksek dereceli Taylor seri açılımı dikkate alınarak birkaç cm hatta milimetre seviyesinde ionosferik grup gecikmesi modellenenbilir [168]. İkinci dereceden ionosfer grup gecikmesi [168];

$$\Delta I_g = 2.61 \cdot 10^{-18} \cdot \lambda_i^3 \cdot \left(\frac{R_E}{r_m}\right)^3 \cdot (\sin \theta'_m \cdot \cos X \cdot \cos \beta - 2 \cos \theta'_m \cdot \sin \beta) \cdot TEC \quad (3.42)$$

$$\theta'_m = \theta_m - \frac{h_m}{R_E \sin \beta} \cos X \cdot \cos \beta \quad (3.43)$$

$$\Delta I_p = -\frac{1}{2} \Delta I_g \quad (3.44)$$

Yukarıda verilen bu 3 eşitlikte,  $\theta'_m$  ionosfer altı noktanın manyetik enleminin tümleyeni,  $\theta_m$  GNSS istasyonunun manyetik enleminin tümleyeni,  $R_E$  Dünya'nın yarıçapı (~6370 km),  $h_m$  ionosfer geçirgen/ince katmanın dünya yüzeyinden olan yüksekliği (~400km),  $r_m=R_E+h_m$ ,  $\beta$  GNSS istasyonunun yükseklik açısı,  $\lambda_i$  GNSS sinyalinin dalga boyu olarak temsil edilir.

### 3.3.4.3. Troposferik Yükleme

Dünya atmosferinin en alt kısmında bulunan ve yeryüzünden yaklaşık 50 km yüksekliğe kadar uzanan troposfer, gazların en yoğun bulunduğu ve GNSS sinyallerini sıcaklık, basınç ve su buharı miktarına bağlı olarak önemli derecede etkileyen ayrıca tüm hava olaylarının gerçekleştiği katmandır. Bu kısım kuru gazlar ve su buharını içerdiği için uydudan yayınlanan GNSS sinyalleri, troposferin kuru ve ıslak bileşenlerinden dolayı troposferik gecikmeye maruz kalmaktadır. İyonosferden farklı olarak 15 GHz'in altındaki radyo sinyallerinin troposfer ortamında yayılma

karakteristiği göstermemesi; bu ortamın kırılma indisinin uydudan yayınlanan sinyallerin frekansına bağlı olmadığını göstermektedir [125]. GNSS sinyallerinin yayılma hızı bu katmanda, uzay boşluğundakinden daha düşük olması uydu ile alıcı arasında hesaplanan mesafenin, uydu yükseklik açısına bağlı olarak yani troposferik gecikmenin zenitteki değeri (başucu doğrultusu  $90^\circ$ ) için yaklaşık 2.5 m, yükseklik açısının  $0^\circ$  olduğu durumda ise yaklaşık 25 m daha uzundur. Bundan dolayı Uydu tabanlı ölçme çalışmalarında yükseklik açısının  $15^\circ$ 'nin altında alınmaması önerilmektedir [169]. Troposferik gecikme iyonosferdeki gibi çift frekanslı gözlemlerin kombinasyonu ile giderilemez, bunun için hatanın modellenmesi gerekir [121].

Yukarıda da belirtildiği gibi troposferik gecikmenin neden oluşu iki bileşen bulunmaktadır. Bu bileşenlerin birincisi, Hidrostatik Zenit Gecikmesi olarak da adlandırılan kuru (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) bileşen olup troposferik gecikmenin %90'ını oluşturmakta ve yaklaşık 2 m gecikmeye neden olmaktadır. Bu bileşen meteorolojik ölçümlerden türetilen matematiksel modeller kullanılarak yüksek doğrulukta belirlenebilir [123]. Diğer bileşen ise troposferde bulunan su buharının yoğunluğuna bağlı olarak GPS sinyalini etkileyen ve Islak Zenit Gecikmesi (Zenith Wet Delay, ZWD) olarak da adlandırılan ıslak bileşen troposferik gecikmenin %10'unu oluşturmakta ve yaklaşık 10 cm gecikmeye neden olmaktadır [121]. Troposferin içinde bulunan su buharının düzensizliğinden dolayı ıslak gecikmenin modellenmesi zor olmakla birlikte, kuru gecikmeye büyük çoğunlukla sıcaklık ve yüzey basıncına bağlı değiştiğinden daha kolay modellenmektedir [121], [170].

Troposferik gecikme Eşitlik 3.45'te görüldüğü gibi troposferik sinyal yolu ile ortam kırılma indisinin integraline eşdeğerdir [123]:

$$N^{Trop} = 10^6(n - 1) \quad (3.45)$$

$$T_z = 10^{-6} \int_x^y N^{Trop} d_s \quad (3.46)$$

Eşitlik 3.45 ve 3.46'da gösterilen;  $n$  kırılma indisi,  $T_z$  troposferik gecikme,  $d_s$  troposferik sinyal yolu,  $x, y$  troposferin sınırları olarak temsil edilir. Uydudan troposfere gelen sinyalin zenit açısı doğrultusunda olmadığı durumda yükseklik açısının ( $E$ ) bir fonksiyonu olarak troposferik gecikme izdüşüm fonksiyonu ile ilişkili

olarak troposferik düzeltme ( $T_Z(E)$ ) Eşitlik 3.47'deki gibi hesaplanmaktadır [121], [123], [171], [172].

$$T_Z(E) = T_Z^h \cdot m_h(E) + T_Z^w \cdot m_w(E) \quad (3.47)$$

Bu eşitlikte;  $T_Z(E)$  troposferik düzeltme,  $T_Z^h$  kuru zenit yolu gecikmesi,  $T_Z^w$  ıslak zenit yolu gecikmesi,  $m_h(E)$  izdüşüm fonksiyonun (mapping function) kuru kısmı,  $m_w(E)$  izdüşüm fonksiyonun (mapping function) ıslak kısmını temsil eder. Hopfield (1969), troposferik gecikme bileşenlerini ayrı ayrı denklemler ile ifade etmiştir. Buna göre kuru troposferik gecikmeyi, milibar cinsinden toplam basınç ve Kelvin cinsinden sıcaklığın bir fonksiyonu, ıslak gecikmeyi ise milibar cinsinden su buharının ve Kelvin cinsinden sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Eşitlik 3.48 ve 3.49'da gösterilen bu bileşenlerde, rastgele gelen GNSS sinyalinin zenit açısı dikkate alınarak yükseklik açısının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır [123].

$$T_Z^h(E) = \frac{10^{-6}}{5} \frac{77.64}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} \frac{P}{T} [40136 + 148.72(T - 273.16)] \quad (3.48)$$

$$T_Z^w(E) = \frac{10^{-6}}{5} \frac{(-12.96T + 3.718 \cdot 10^5)}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}} \frac{e}{T^2} 11000 \quad (3.49)$$

Bu eşitliklerde;  $T_Z^h(E)$  kuru zenit gecikmesi,  $E$  GNSS sinyali yükseklik açısı,  $P$  basınç (mbar),  $T$  sıcaklık (Kelvin),  $T_Z^w(E)$  ıslak Zenit gecikmesi,  $e$  su buharı basıncı (mbar) olarak temsil edilmektedir. Saastamoinen (1973), toplam troposferik gecikmeyi metre cinsinden Eşitlik 3.50'de modellemiştir. Bu eşitlikte toplam troposferik gecikme, basınç, sıcaklık, su buharı ve uydu kesme açısı cinsinden ifade edilen bir fonksiyondur.

$$T_Z = \frac{0.002277}{\cos(z)} \left[ P + \left( \frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2(z) \right] \quad (3.50)$$

Eşitlikte,  $T_Z$  toplam troposferik gecikmeyi,  $z$  zenit açısını temsil eder. Toplam troposferik gecikme modeli GNSS alıcı istasyonların deniz seviyesinden yüksekliği ve uydu kesme açısına göre Eşitlik 3.51'de düzenlenmiştir. Denklemden belirtilen  $B$  ve  $\delta R$  parametreleri Tablo 3.2' de verilmiştir [123].

$$T_z = \frac{0.002277}{\cos(z)} \left[ P + \left( \frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2(z) \right] + \delta R \quad (3.51)$$

Tablo 3.2:  $B$  ve  $\delta R$  Parametrelerine ait Düzeltme Değerleri.

| Zenit<br>Açısı | GNSS İstasyonlarının Deniz Seviyesinden Yüksekliği (km) |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | 0                                                       | 0.5   | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 3.0   | 4.0   | 5.0   |
|                | $\delta R$                                              |       |       |       |       |       |       |       |
| 60°00'         | 0.003                                                   | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 66°00'         | 0.006                                                   | 0.006 | 0.005 | 0.005 | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.002 |
| 70°00'         | 0.012                                                   | 0.011 | 0.010 | 0.009 | 0.008 | 0.006 | 0.005 | 0.004 |
| 73°00'         | 0.020                                                   | 0.018 | 0.017 | 0.015 | 0.013 | 0.011 | 0.009 | 0.007 |
| 75°00'         | 0.031                                                   | 0.028 | 0.025 | 0.023 | 0.021 | 0.017 | 0.014 | 0.011 |
| 76°00'         | 0.039                                                   | 0.035 | 0.032 | 0.029 | 0.026 | 0.021 | 0.017 | 0.014 |
| 77°00'         | 0.050                                                   | 0.045 | 0.041 | 0.037 | 0.033 | 0.027 | 0.022 | 0.018 |
| 78°00'         | 0.065                                                   | 0.059 | 0.054 | 0.049 | 0.044 | 0.036 | 0.030 | 0.024 |
| 78°30'         | 0.075                                                   | 0.068 | 0.062 | 0.056 | 0.051 | 0.042 | 0.024 | 0.028 |
| 79°00'         | 0.087                                                   | 0.079 | 0.072 | 0.065 | 0.059 | 0.049 | 0.040 | 0.033 |
| 79°30'         | 0.102                                                   | 0.093 | 0.085 | 0.077 | 0.070 | 0.058 | 0.047 | 0.039 |
| 79°45'         | 0.111                                                   | 0.101 | 0.092 | 0.083 | 0.076 | 0.063 | 0.052 | 0.043 |
| 80°00'         | 0.121                                                   | 0.110 | 0.100 | 0.091 | 0.083 | 0.068 | 0.056 | 0.047 |
| $B$ (mb)       | 1.156                                                   | 1.079 | 1.006 | 0.938 | 0.874 | 0.757 | 0.654 | 0.563 |

### 3.4. Sonradan Değerlendirme (Post-Process)-PPP

Uydu tabanlı konum belirleme sistemlerinde GPS uydularının tam operasyonel çalışmasından beri yaklaşık 25 yıldır tüm diferansiyel GNSS (DGNSS) yönteminin merkezinde, eş zamanlı uydulara gözlem yapan en az iki GNSS alıcısı kavramı yer almaktadır. Bağlı koordinatlar en az iki alıcı arasındaki baz çözümü gerçekleştirilerek belirlenmektedir. Alıcılardan biri, koordinatları bilinen referans/sabit istasyon olarak kabul edilir. İkinci alıcı gezici (statik veya kinematik) olup koordinatı bilinmemedir.

Son yıllarda Hassas Nokta konumlama yönteminin doğruluğunun geliştirilmesine yönelik çalışmalar ile birlikte birçok bilimsel çalışmada yaygın bir şekilde kullanılmasına neden olmuştur. Tekniğin temel prensibi tek bir alıcı kullanarak santimetre hatta milimetre doğruluğunda nokta konumunu hesaplama özelliğine

sahiptir. Bu yüzden DGNSS yöntemine göre avantajlıdır. Ayrıca PPP yöntemi iki nokta (sabit-alıcı) arasındaki korelasyon ve baz uzunluğu sınırlamasından bağımsızdır.

PPP tekniği ile yapılan ilk çalışmalarda, toplanan GNSS gözlemleri ile gerekli ürünler (uydu yörünge ve saat, okyanus yüklemesi, troposferik gecikme parametreleri) kullanılarak büro işlemleri diğer adıyla sonradan değerlendirme yapılarak nokta konumu hesaplanmıştır. İlerleyen zamanlarda gerçek zamanlı ürünlerin anlık yayınlanması ile sonradan değerlendirme PPP yönteminin yanı sıra RT-PPP yöntemi de kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde post-process PPP tekniği, RT-PPP yöntemine göre daha hassas olup kullanılan ürünlere bağlı olarak konum belirleme doğruluğu milimetre seviyesine ulaşmıştır. PPP ölçümleri sonrası Online-PPP hizmeti sunan PPP servisleri ile nokta konumu kısa süre içerisinde hesaplanabilmektedir.

### **3.5. GNSS-PPP Tekniği İçin Geliştirilen Yazılımlar**

#### **3.5.1. Bilimsel, Ticari ve Açık Kaynak Kodlu PPP Yazılımları**

PPP tekniğinin zaman, maliyet ve işgücü açısından değerlendirildiğinde diğer konum belirleme yöntemlerine göre avantajlı olması ve konum duyarlılığının istenilen düzeye ulaşması birçok uygulamada kullanılmasına olanak sağlamıştır. Uygulama alanı geniş bir yelpaze olan bu tekniğin gerçek zamanlı veya sonradan değerlendirme yapılarak konum bilgisi sağlaması için bilimsel, ticari ve açık kaynaklı birçok yazılım gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.3'te farklı üniversitelerde görev yapan bilim insanlarının, araştırma merkezi gibi kurum veya kuruluşların, ticari işletme olarak şirket veya firmaların yapmış olduğu ve günümüzde farklı uygulamalarda küresel çapta kullanılan yazılımlar verilmiştir.

PPP yazılımları, ilk zamanlarda gerekli hassas udu yörünge ve saat düzeltme ürünlerini ölçüm yaptıktan sonra IGS ve IGS'e bağlı analiz merkezlerinin belirli bir süre zarfında yayınlamasından dolayı ölçme sonrası veri proses ve değerlendirme işlemlerinde kullanılması için geliştirilmiştir. 2013 yılına gelindiğinde IGS, IGS-RTS projesi ile birlikte kullanıcılara gerçek zamanlı yayın efemeris bilgisini sunmaktadır. Ayrıca uydu yörünge ve saat düzeltme bilgisi ile kod ve faz sapma değerleri yayın efemerisinde bulunmaktadır. IGS'in geliştirdiği proje ile PPP yazılım geliştiricileri, gerçek zamanlı PPP değerlendirme yazılımları geliştirmeye başlamışlardır.

IGS gerçek zamanlı SSR ürünlerini başlangıçta sadece GPS veya GPS+ GLONASS için sunarken, 2021 yılı itibariyle tüm küresel uydu konum belirleme sistemleri için desteklemeye başlamıştır. Bunun yanında IGS'in yelpazesi altında bulunan birçok analiz merkezinde (CNES, WHU, GFZ, DLR, CAS, BKG ve GMV gibi) çoklu-GNSS ürünlerini SSR formatında sunmaktadır [173]. Bu ürünlerin anlık olarak yayınlanması kullanıcıların farklı alanlarda anlık konum bilgisine ihtiyaç duyduğu RT-PPP yazılımlara ilginin arttığını da göstermektedir. PPP tekniğinde ürünlerin gerçek zamanlı alınması için gerekli internet servisine ihtiyacın olması ve IGS-RTS ürünlerin Gerçek Zamanlı Servis (RTS) kaynaklı gecikmeleri bu tekniğin başlıca dezavantajlarıdır.

Tablo 3.3: Bilimsel, Ticari ve Açık Kaynak Kodlu PPP Yazılımları.

| Yazılım Paketi         | Organizasyon/Şirket/Şahıs ve Ülke                                           |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Bernese GNSS           | Bern Üniversitesi Astronomi Enstitüsü/İsviçre                               |
| GIPSY-OASIS II         | JPL (Jet Propulsion Laboratory- Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü)/ ABD       |
| RTKLIB                 | Tokyo Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Üniversitesi/Japonya (Tomoji Takasu)   |
| TerraPos               | Terra Tec A.Ş ve Norveç Hidrografi Servisi/Norveç                           |
| GPSTk                  | Uzay ve Jeofizik Laboratuvarı/ABD                                           |
| Net_Diff               | Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Üniversitesi Şangay Astronomik Gözlemevi/Çin |
| PRIDE PPP-AR           | Wuhan Üniversitesi GNSS Araştırma Merkezi/Çin                               |
| WaPPP                  | Lambert Wanninger/Almanya                                                   |
| gLAB                   | Katalonya Teknik Üniversitesi Astronomi ve Geomatik Araştırma Grubu/İspanya |
| BKG Ntrip Client (BNC) | Federal Kartoğrafya ve Jeodezi Ajansı/Almanya                               |
| GrafNav                | NovAtel Limited Şirketi/Kanada                                              |
| PANDA                  | Wuhan Üniversitesi/Çin                                                      |
| EPOS-RT                | Alman Yerbilimler Araştırma Merkezi (GFZ)/Almanya                           |
| RTNet                  | GPS Solutions Limited Şirketi/ABD                                           |
| RETICLE                | Almanya Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR)/Almanya                             |
| RETINA                 | Avrupa Uzay Ajansı (ESA/ESOC)                                               |
| PPP-WIZARD             | Ulusal Uzay Araştırma Merkezi (CNES)/Fransa                                 |
| GNSMART                | Geo++ şirketi/Almanya                                                       |
| STARFIX                | Fugro kamu şirketi/Hollanda                                                 |

### 3.5.2. İnternet (Web) Tabanlı Online PPP Servisleri

Dünya üzerinde küresel veya bölgesel ağlarda kurulan GNSS referans istasyon sayılarının artması ve kullanıcı bu istasyonların kaydetmiş olduğu verilere online ücretsiz erişim sağlaması ile birlikte bilimsel veya ticari yazılımların yanı sıra internet tabanlı online servislerin proses ve değerlendirme için konum bilgisi hizmeti vermeye başlamıştır. Konum belirleme çalışmaları için ücretsiz sunulan GNSS referans istasyonlar kullanılarak, gezici alıcının hassas konum bilgisini sağlayan bağıl konum belirleme prensibine dayalı internet tabanlı yazılımlar geliştirilmiştir [174]. Geliştirilen bu yazılımlar ticari ve bilimsel olarak kullanılan yazılımlar gibi karmaşık ve ekstra tecrübe istemeyen kullanıcı müdahalesi olmayan basit ve rahatça kullanılabilecek servisler olup tek bir sınırlaması verileri yükleme aşamasında internet bağlantısının sağlanması gerekmektedir.

Günümüzde de yaygın olarak kullanımı devam eden PPP tekniği ile birlikte sabit nokta şartının ortadan kalkması kullanıcıların bu tekniğe ilgisini oldukça arttırmıştır. Böylece PPP tekniğinin veri prosesi ve değerlendirilmesi için masaüstü (desktop) birçok yazılım geliştirilmiştir.

Tablo 3.4: İnternet (Web) tabanlı online PPP veri değerlendirme servisleri.

| Konum Belirleme | Servis Adı               | Organizasyon Ülke                                          | Veri Türü | Ölçme Modu       | Yazılım  | Güncel Datum      |
|-----------------|--------------------------|------------------------------------------------------------|-----------|------------------|----------|-------------------|
| PPP             | CSRS-PPP                 | NRCan/Kanada                                               | GNSS      | Statik/Kinematik | NRCanPPP | NAD83 ve ITRF2014 |
|                 | GAPS Report              | New Brunswick Üniversitesi/Kanada                          | GNSS      | Statik/Kinematik | MATLAB   | ITRF2014          |
|                 | APPS                     | NASA-JPL/ABD                                               | GPS       | Statik/Kinematik | GIPSY    | ITRF2014          |
|                 | Magic-GNSS               | GMV/İspanya                                                | GNSS      | Statik/Kinematik | magicPPP | ITRF2014          |
|                 | Trimble Center Point RTX | Trimble/ABD                                                | GNSS      | Statik           | Trimble  | ITRF2014          |
|                 | PPPH Online              | Hacettepe Üniversitesi Geomatik Mühendisliği/Türkiye       | GNSS      | Statik/Kinematik | MATLAB   | ITRF2014          |
|                 | Net_Diff Online          | Şanghay Astronomik Gözlemevi'ndeki GNSS Analiz Merkezi/Çin | GNSS      | Statik/Kinematik | MATLAB   | ITRF2014          |

Bu yazılımların yanı sıra kullanıcıların sadece toplamış olduğu GNSS verilerini yükleyerek basitçe veri prosesi değerlendirme seçenekleri ile online ortamda PPP

tekniğini kullanarak konum bilgisi elde edebilmek için Tablo 3.4’te verilen internet (web) tabanlı online PPP veri değerlendirme servisleri kullanıma sunulmuştur. PPP tekniğinde online servislerin GNSS gözlem verilerini değerlendirirken kullanıcı müdahalesi olmadan yarı otomatik gerçekleştirilen servisler olup bazı kısıtlama ve sınırlı seçenekleri bulunmaktadır. Bu servislerin hizmetinden faydalanılması için üye olunması gerekir. Ayrıca yüklenecek olan GNSS RINEX gözlem verisi, dosya boyutu sınırlı olmakla birlikte farklı RINEX versiyon türünde veri formatları ile sisteme yüklenmelidir. Bunun içinde RINEX versiyon değişimi için ayrıca bir uygulama (CHCData, gfzrx vb.) kullanılmaktadır. Konum belirleme yöntemleri için genel olarak seçilen statik/kinematik mod seçeneği de bu servisler için bulunmaktadır.

GNSS alıcısı anten ve modeline göre de sınırlama getirilen bazı servisler olmakla birlikte birçok servis küçük boyutlu gözlem verilerini çok kısa zamanda değerlendirerek kullanıcılara e-posta ile kendi tanımladığı formatta ölçü değerlendirme ve çözümleri sunmaktadır. Online servislere ilginin giderek artması ve çoklu-GNSS’in gelişimi ile birlikte yeni düzeltme ürünlerini içeren modeller ve geliştirilen algoritmalar bu servisler için güncel olarak kullanılmaktadır [175]-[177].

## 4. GERÇEK ZAMANLI (REAL-TIME)-PPP

Günümüz GNSS teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte, otonom araçlar, hassas tarım, GNSS destekli fotogrametrik çalışmalar, deprem/tsunami erken uyarı sistemleri, yapı sağlığı izleme gibi birçok alanda kullanımı giderek artmaya başlamıştır. GNSS teknolojisinin kullanımında bu artış hem bilimsel hem de akademik olarak dm hatta cm doğruluğunda konum bilgisine ihtiyaç duyulan birçok alanda gerçek zamanlı konum belirleme yöntem ve tekniklerin gelişmesine de öncülük etmiştir. Gerçek zamanlı konum belirleme yöntemlerinden birisi olan Diferansiyel GPS/GNSS tekniğinde sadece kod ölçüleri ile koordinatı bilinen sabit istasyona dayalı olarak gezici alıcının koordinatları metre seviyesinde belirlenmesi hassas konum duyarlılığını gerektiren çalışmalar için uygun değildir [150], [178]. Öte yandan temel prensibi DGNSS ile benzer olan fakat kod gözlemleri yerine çift veya çok frekanslı alıcılarla taşıyıcı faz gözlemleri kullanılarak cm mertebesinde doğrulukla konum bilgisini hesaplayan [179] ve 1990'lı yıllardan beri mühendislik ölçmeleri, yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi ve baraj, köprü, viyadük gibi birçok mühendislik yapısının yapı sağlığı izlemelerinde yaygın olarak kullanılan kısaca gerçek zamanlı kinematik (Real-Time Kinematic, RTK) olarak adlandırılan Klasik-RTK (Single-baseline Real-Time Kinematic) yöntemidir. Yukarıda belirtilen iki yöntemin temel prensibi bağıl konum belirleme olmakla birlikte hassas konum belirleme için sabit istasyonda hesaplanan taşıyıcı faz ölçü düzeltmelerin gezici alıcı/alıcılara gönderilmesi için bir radyo verici ve gönderilen düzeltmeyi alan bir radyo alıcı veri iletim donanımı kullanılmaktadır [180]. Klasik-RTK yönteminde kullanılan taşıyıcı faz gözlemleri, ölçme doğruluğunu artırırken, GPS uydu gözlemlerine ek olarak çoklu-GNSS gözlemleri ile tam sayı faz belirsizliği çözüm süresi (initialization) daha da kısalmıştır [181]. Bu yöntemin doğruluğu için en önemli kriter sabit ve gezici arasındaki baz uzunluğudur. Baz uzunluğu, sistematik yani uydu yörünge ve diğer atmosferik hatalardan kaçınmak için maksimum 10 ila 15 km arasında sınırlanmaktadır [182]. Ayrıca sabit istasyondan alıcı/alıcılara gönderilen düzeltmeler radyo veri iletim mekanizmasıyla sağlandığı için baz uzunluğunu sınırlamakta (<10 km) fakat düzeltmelerin internet aracılığı ile gönderilmesi daha uzun baz uzunluklarında yöntemin kullanılmasına yardımcı olmaktadır.

Klasik-RTK yaklaşımında baz uzunluğuna bağlı olarak hataların modellenmesi ve gözlemlere düzeltmelerin getirilmesini kısıtlamaktadır. Bununla birlikte yeryüzünde sabit bir istasyonun kurulması zorunluluğunu da ortadan kaldıran Ağ-RTK yöntemi geliştirilerek dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ağ-RTK yöntemi, sürekli gözlem yapan referans istasyonlara göre ağ içerisinde koordinatı bilinmeyen gezici alıcı/alıcıların, konumları cm doğruluğunda belirlendiği bir modeldir. Bu ağın içerisinde bulunan tüm referans istasyonlarına ait kaba ölçülerin çıkarılıp, hataların daha iyi modellenerek ağ dengelemesi yapıp alıcıya gönderilecek düzeltmeler farklı matematiksel modeller (VRS, FKP, MAC) kullanılarak kontrol merkezinde hesaplanıp çeşitli veri iletişim (radyo modem, GSM (Global System for Mobile Communications), internet vb.) mekanizmaları ile gezici alıcıya iletilmektedir [179]. Bazı Ağ-RTK sistemlerin de alınan düzeltmeler gezici alıcı içerisinde bulunan farklı matematiksel modeller ile hesaplanabilmektedir. RTK olarak adlandırılan hem Klasik-RTK hem de Ağ-RTK teknikleri ile cm seviyesinde konum bilgisinin elde edilmesi için ya eş zamanlı gözlem yapan sabit GNSS istasyonuna ya da CORS ağlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sabit istasyonlardaki hataların gezici alıcının konumunu etkilemesinden dolayı bölgede meydana gelebilecek şiddetli deprem, heyelan gibi yüzey hareketleri sabit noktanın şartını sağlayamaz hale getirmektedir [48]. Ayrıca CORS temelli GNSS ağlarına ait altyapılarının ve gerekli donanımların maliyetlerinin yüksek olması, internet/GSM veri iletim araçlarının zayıf olduğu sınırlı bölgelerde düzeltmelerin gezici alıcılar tarafından alınamaması yöntemin büyük dezavantajıdır [111].

RTK tekniklerindeki bu kısıtlamalar, bilim insanlarını sabit bir alıcıya ihtiyaç duymadan tek bir alıcı ile bağıl yöntemin sağladığı konum doğruluğuna ulaşabilecek yöntemler geliştirmesini tetiklemiştir. Bu doğrultuda mutlak konum belirleme yönteminin özel bir hali olan PPP tekniğinin, IGS-RT servisinin yörünge ve saat ürünlerini anlık olarak sunması gerçek zamanlı uygulamalar için RTK yöntem yaklaşımlarından farklı SSR modeli kullanılarak RT-PPP tekniğinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır [80], [183], [184].

#### 4.1. Durum Uzay Modeli (SSR) ile RT-PPP

PPP tekniğinde GNSS alıcısı taşıyıcı faz gözlemleri toplamasından dolayı matematiksel modelinde bulunan tam sayı faz belirsizliği için uzun bir gözlem süresi gerekmektedir. Bu doğrultuda RTK yöntemlerinde kullanılan gözlem uzay modeli (Observation Space Representation, OSR) yerine bu ağlardaki gözlemlerden faydalanarak gerçek zamanda kestirilen parametrelerin bir matematiksel modeli olan durum uzay modeli (State Space Representation, SSR) kullanılabileceği fikri ortaya çıkmıştır. Bu modelin PPP tekniğinde kullanılması tamsayı faz belirsizliğini çözerek cm doğruluğunda konum bilgisi sağlanabilir [78], [185]

RTK yönteminde yüksek doğrulukta konum bilgisinin elde edilmesi taşıyıcı fazın çözümüne dayanır. Bunun için uydu-alıcı arasında, geometri tabanlı (Geometry Based Ambiguity Resolution, GBAR) ve geometriden bağımsız (Geometry Free Ambiguity Resolution, GFAR) farklı yöntemler kullanılır. GFAR yönteminde, farklı kod ve taşıyıcı faz sinyallerinin lineer kombinasyonları yapılarak en çok kullanılan Melbourne-Wübbena (MW) modeli ile tamsayı faz belirsizliği çözülmektedir. Diğer taraftan GBAR yöntemin de çok sayıda uyduya gözlemler yapılarak tamsayı faz belirsizliği çözümü kısıtılmakta ve en çok kullanılan, tamsayı en küçük kareler belirsizlik kestirimi (Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment, LAMBDA) modelidir [185], [186].

RT-PPP/PPP-RTK uygulamalarında kullanıcı cm doğruluğunda konum bilgisi elde edebilmesi için gerekli GNSS uydu yörüngesine ait yayın efemerisi ve saat düzeltmelerini NTRIP [77] aracılığıyla RTCM/SSR [78] veri formatı biçimine göre internetten anlık veri akışı ile sağlanır [74], [76]. IGS-RTS ürünlerinin içerisinde, uydu yayın yörünge bilgilerinden türetilen ECEF koordinat sistemindeki uydu koordinatlarına eklenecek radyal, boyuna ve çapraz yörünge düzeltmeleri ve yayın yörünge bilgilerindeki uydu saat hatalarına eklenecek uydu saat düzeltmeleri bulunmaktadır. Bu yörünge ve saat düzeltmelerini, yayın efemerisinden türetilen uydu yörüngelerine ve saatlerine uyguladıktan sonra, PPP için kesin uydu yörüngeleri ve saatleri hesaplanmış olmaktadır. IGS'in ilk SSR ürünleri sadece GPS ve GPS+GLONASS uydu sistemlerini desteklemekte iken, 2021 yılı itibari ile IGS kendi SSR ürünlerinde; GPS, GLONASS, Galileo ve BDS uydu sistemlerini desteklemeye başlamıştır. IGS'e ek olarak BKG, CAS, CNES, DLR, GFZ, GMV ve WHU isimli

IGS Analiz Merkezleri de 2017 yılından beri çoklu-GNSS RT-PPP için SSR formatında gerçek-zamanlı ürünler sunmaktadırlar [176].

## 4.2. Gerçek Zamanlı-PPP Tekniğinin Matematiksel Modeli

GNSS ham kod ve faz gözlem eşitlikleri şu şekilde yazılabilir;

$$P_{r,j}^s = \rho_r^s + c \cdot \delta t_r - c \cdot \delta t^s + T_r^s + I_r^s + m_{r,j}^s + \varepsilon_{r,p}^s \quad (4.1)$$

$$\Phi_{r,j}^s = \rho_r^s + c \cdot \delta t_r - c \cdot \delta t^s + \lambda_j N_{r,j}^s + T_r^s - I_r^s + m_{r,j}^s + \varepsilon_{r,\phi}^s \quad (4.2)$$

Bu denklemlerde alt simge olarak bulunan  $r$  ve  $j$  sırasıyla alıcı ve taşıyıcı frekans numarası iken üst simge olarak  $s$  uyduyu temsil eder;  $P$  ve  $\Phi$  uzunluk biriminde uyduya göre alıcının sırasıyla pseudorange ve taşıyıcı faz ölçümlerini;  $\rho$  alıcı ile uydudaki geometrik mesafesidir;  $c$  boşluktaki ışık hızı,  $\delta t_r$  ve  $\delta t^s$  sırasıyla alıcı ve uydudaki saat düzeltmeleridir;  $T_r^s$  alıcı ile uydudaki yol boyunca troposferik gecikmeyi belirtir.  $I_r^s$  uydudan alıcıya giden yol boyunca iyonosferik gecikmedir;  $\lambda$  taşıyıcı faz dalga boyu;  $N_r^s$  başlangıç faz belirsizliğidir;  $m_r^s$  ve  $\varepsilon_r^s$  sırasıyla kod ve faz gözlemlerinin çok yolluluk ve gürültüsünü temsil eder.

IGS RTS'nin kullanıcıya sunmuş olduğu RTS ürünleri (IGS01/IGC01, IGS02 ve IGS03) sürekli yayın efemeris akışı sağlanarak uydudaki yörünge ve saat düzeltmelerini içermektedir. Böylece Gerçek zamanlı uygulamalar örneğin atmosferik su buharı ölçümü, uzaktan algılama uygulamaları, hidrografik ölçümler, akıllı ulaşım sistemleri, erken uyarı sistemleri, hızlı tehlike değerlendirme ve yapı sağlığı izleme gibi birçok alanda gerçek zamanlı hassas uydudaki yörünge ve saat bilgilerini elde etmek, RT-PPP yönteminin doğruluğu açısından kritik bir öneme sahiptir. SSR formatındaki yörünge düzeltme mesajı içerisinde, radyal ( $\delta_r$ ), boyuna ( $\delta_a$ ) ve çapraz ( $\delta_c$ ) yönlerde yörünge düzeltmelerini ve  $t_0$  epochunda  $\delta_r, \delta_a, \delta_c$  hızlarını içerir.

RTCM-SSR'deki yörünge düzeltmeleri  $t_0$  referans epochundaki mesajdan  $t$  mevcut epocha kadar aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\delta \mathbf{O} = \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_a \\ \delta_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{\dot{r}} \\ \delta_{\dot{a}} \\ \delta_{\dot{c}} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te hesaplanan yörünge düzeltmeleri yörünge koordinat sisteminde olduğundan dolayı yer merkezli yer-sabit koordinat sistemine dönüşüm için radyal ( $e_r$ ), boyuna ( $e_a$ ) ve çapraz ( $e_c$ ) birim vektör  $e$  yönünde hesaplanır.

$$e_a = \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|}, \quad e_c = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|}, \quad e_r = e_a \times e_c \quad (4.4)$$

Denklem 4.4'te  $r$  uydu yayın konum vektörünü temsil ederken,  $\dot{r}$  uydu yayın hız vektörünü belirtmektedir. Düzeltmelerin yer merkezli düzeltmeye dönüşümü aşağıdaki gibidir.

$$\delta X = [e_r \quad e_a \quad e_c] \delta \mathbf{O} \quad (4.5)$$

Dönüşüm yapıldıktan sonra düzeltilmiş hassas yörünge konumu, yayın yörünge bileşenine dönüşümden elde edilen düzeltmelerin eklenmesi ile elde edilir.

$$X_{prec}^s(t) = X_{brdc}^s(t) + \delta X \quad (4.6)$$

$X_{prec}^s(t)$  ve  $X_{brdc}^s(t)$  sırasıyla hassas ve yayın uydu konumunu temsil eder. Mevcut epokta  $t$ , saat düzeltmesi için SSR saat düzeltme mesajı üç polinom katsayısı  $a_0, a_1, a_2$  şeklinde yayınlanır ve matematiksel modeli aşağıdaki gibidir.

$$\delta C = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (4.7)$$

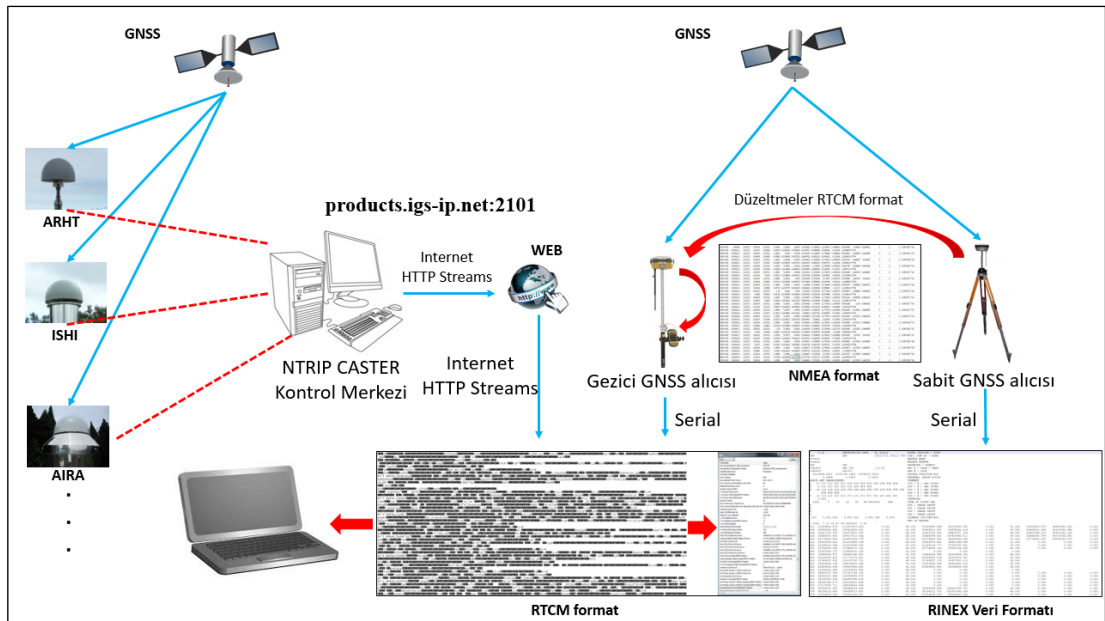
$t$  zamanındaki düzeltilmiş hassas saat ofseti, Denklem 4.7'de hesaplanan  $t$  zamanındaki saat düzeltmesine, aynı epokta yayın efemerisiyle hesaplanan saat ofsetinin eklenmesi ile aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanır.

$$\delta dT_{prec}^s(t) = dT_{brdc}^s(t) + \frac{\delta C}{c} \quad (4.8)$$

Denklem 4.8’de  $dT^s_{prec}(t)$  düzeltilmiş hassas saat ofsetini,  $dT^s_{brdc}(t)$  yayın saat ofsetini temsil eder iken  $c$  ışık hızını belirtir.

### 4.3. Gerçek Zamanlı Veri İletimi için Uluslararası Standartlar

GPS/GNSS’in kullanıma başlaması ile birlikte kullanıcı ölçüm anında nokta konumunu belirlemek için gerçek zamanlı olarak gerekli düzeltme ve ürünlere ihtiyaç duymaktadır. Gerçek zamanlı kinematik olarak Klasik-RTK, Ağ-RTK ve PPP-RTK/RT-PPP yöntemleri ele alındığında tüm yöntemlerde gerçek zamanlı veri iletimi gerekmektedir. Bunların yanı sıra DGNSS tekniği içinde benzer durum geçerlidir. Bunun için farklı alıcılara rağmen ortak tüm GNSS kullanıcıların alıcıdan bağımsız birçok uluslararası standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlardan yaygın olarak ve DGNS ve RTK yöntemlerinde kullanılan standartları sağlayan ayrıca Denizcilik Hizmetleri Radyo Teknik Komisyonunun özel komitesi olan RTCM SC-104 (Special Committee-104, SC-104,) tarafından geliştirilen RTCM veri formatıdır. Bu veri formatı RTK ve DGNSS tekniklerinin yapı taşlarından birisidir. RTCM veri formatının kullanıcılara gerçek zamanlı iletilmesi için internet üzerinden NTRIP isimli internet protokolü geliştirilmiştir.



Şekil 4.1: RINEX, RTCM ve NMEA veri formatları gösterim şeması.

RTCM veri formatı dışında GNSS alıcısının el ünitesi gibi diğer cihazlara veri iletimi için ASCII veri yapısına sahip NMEA (National Marine Electronics Association) veri formatı kullanılmaktadır. Öte yandan gerçek zamanlı veri iletimi için kullanılmayan fakat tüm alıcılar için alıcıdan bağımsız değişim formatı RINEX (Receiver INdependent EXchange) veri formatı bulunmaktadır. Bu format tüm GNSS alıcısı üreten firmaların kendine özgü binary yapısında bulunan veri formatların aksine ASCII yapıda olup tüm GNSS alıcıları için kullanılan ortak bir format olmuştur. GNSS gözlemleri için ilk RINEX veri formatının sürümü RINEX 2.10 ile başlamakla birlikte (RINEX 2.11, RINEX 2.12, RINEX 2.20, RINEX 3.00, RINEX 3.01, RINEX 3.02, RINEX 3.03 RINEX 3.04 ve RINEX 3.05) günümüzde küresel ve bölgesel tüm uydu sistemlerinin sinyallerini destekleyen Mayıs 2022 itibariyle güncel olarak RINEX 4.0 sürümü bulunmaktadır.

#### **4.4. Gerçek Zamanlı Veri İletim Bileşenleri**

Uydu tabanlı konum belirleme sistemlerinde gerçek zamanlı şartlar altında GNSS verilerinin kullanıcılara iletimi üç temel bileşen ile gerçekleşir. İlki her bir firmanın üretmiş olduğu GNSS alıcılarının kendine özgü veri formatları olmasına rağmen uluslararası standart olarak kabul edilen ve gerçek zamanlı veri iletimi için kullanılan RTCM ve NMEA gibi uluslararası standart kabul edilen veri formatlarıdır (data format). İkinci bileşen ise bu veri formatlarındaki GNSS verilerinin bir ağ üzerinden güvenilir bir şekilde veri akışının iletilmesinin kontrol mekanizmasını sağlayan veri iletim protokolleridir (transmission protocol). Son bileşen olarak ilgili formatta GNSS bileşenlerinin tek veya çift yönlü olarak gerçek zamanlı veri iletimini sağlayan veri iletişim linklerinden (data communications link) oluşmaktadır [187], [188].

##### **4.4.1. Veri İletim Linkleri**

GNSS ile gerçek zamanlı konum belirlemede, ilk zamanlar DGNSS ve RTK yöntemlerinde ham kod ve faz gözlemleri ve düzeltmelerin referans istasyon/istasyonlar ve gezici alıcı/alıcılar arasında iletilmesi için veri iletişim linkleri önemli faktördür. Bu veriler önceleri GPS/GNSS alıcısında ek olarak bulunan radyo

modem ve anten ile radyo sinyalleri (Very High Frequency, VHF; Ultra High Frequency, UHF) kullanılarak onlarca kilometreye kablosuz olarak veri aktarımı sağlanmıştır.

Günümüzde iletişim altyapısı alanında yapılan birçok yenilik ve gelişmelerin beraberinde internetin kullanılmasıyla ülkemizde de yaygın olarak kullanılan CORS ağlarında çift yönlü kablosuz iletişim için GSM altyapısı kullanılarak internet üzerinden CORS ağına bağlanılır. GSM hücresel (mobil) ağ kullanmasından dolayı CORS ağında gezici alıcı bir hücrenin yani baz istasyonunun kapsama alanı dışına çıkıp başka bir ağa girmesi durumunda hücreler arası geçiş sağlandığından veri iletişimi kesilmemektedir. Fakat bu sistemin dezavantajı baz istasyonlarının kapsama alanı dışına çıkılması durumunda veri iletişimi kesilmektedir. Bunun dışında GPRS (General Packed Radio Service), EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) gibi farklı özelliklere sahip veri iletişimini sağlayan kablosuz linkler bulunmaktadır.

RT-PPP’de ihtiyaç duyulan düzeltmelerin (uydu yörünge ve saat düzeltmesi vb.) alınması için veri iletişim linki olarak internet protokolü (Internet Protocol, IP) ağları tercih edilmektedir. Düzeltmelerin alınması esnasında ağ ile iletişim kurmak için internet servis sağlayıcı tarafından atanan IP adresine göre iletişim kurulmaktadır.

#### **4.4.2. Veri İletim Protokolleri**

Günümüzde GNSS verilerinin internet tabanlı olarak gerçek zamanlı yayınlanması için 2 standart protokol bulunmaktadır. Bunlardan NTRIP, BKG tarafından GNSS veri akışı için geliştirilmiş Hyper-Text Transfer Protocol (HTTP)’ e dayalı veri iletim protokolüdür. Öte yandan IGS tarafından geliştirilen Real-Time IGS (RTIGS) diğer bir protokoldür. Bu protokoller GNSS verilerinin iletiminde internet üzerinden akışın nasıl sağlanacağını tanımlayan uluslararası standartlardır [150].

NTRIP, Hypertext Transfer Protocol HTTP/1.1’e dayalı olup RTCM SC-104 komitesi tarafından 2004 yılında ilk kez RTCM standardı olarak kabul edilmiş internet protokolüdür. Ayrıca kablosuz internet ile mobil IP (GSM, GPRS, EDGE vb.) ağlarını destekleyen protokoldür. GNSS tabanlı uygulamalarda gerçek zamanlı şartlar altında mobil kullanıcılar için masaüstü veya dizüstü bilgisayar, el ünitesi ile GNSS alıcılarının eş zamanlı kullanımında internet üzerinden veri akışının kontrolünü sağlar [150].

İkinci bir veri iletim protokolü olan RTIGS ise internet üzerinden GNSS veri akışının kullanılmasını sağlamaktadır. Bu protokol IGS'in altında bulunan Gerçek Zamanlı Çalışma Grubu tarafından geliştirilmiş olup verileri bağlantı kurmadan UDP (User Datagram Protocol) /IP'yi kullanarak yollar [150].

#### **4.4.3. Veri Formatları**

GNSS tabanlı konum belirleme çalışmalarında GNSS alıcısı üreten firmalar kendine özgü birçok farklı veri formatları bulunmaktadır. Farklı formatta olan GNSS gözlem verilerinin çözümünün gerçekleşmesi için ortak bir veri formatı olan ve ASCII yapıda bulunan sonradan değerlendirme çalışmalarında RINEX veri formatı kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra gerçek zamanlı veri iletiminde ve ASCII dosya yapısında olan NMEA veri formatı bulunmaktadır. Bu veri formatı ile GNSS alıcısı ile diğer cihazlar arasındaki verilerinin iletiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. NMEA gerçek zamanlı GNSS tabanlı yöntemler için kullanımı sınırlı olmasından dolayı navigasyon amaçlı uygulamalarda genellikle kullanılmaktadır. Diğer taraftan GNSS uygulamaları için gerçek zamanlı DGNSS, RTK ve PPP yöntemlerinin çözümünde binary yapıda olan RTCM veri formatı geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

### **4.5. Gerçek Zamanlı Yayınlanan Uydu Yörünge ve Saat Ürünleri**

PPP tekniği ile yapılan nokta konum belirleme çalışmalarında ilk yıllarda IGS, tam kapasite çalışan GPS'in hassas uydu yörünge ve saat düzeltme bilgilerini ölçüm yapıldıktan belirli bir süre sonra sağlayabilmekteydi. GLONASS'ın 2011 yılında tam kapasite çalışmaya başlamasıyla IGS, GPS ve GLONASS sistemlerine ait uydu yörünge ve saat düzeltme bilgilerini birleştirerek kullanıcıya sunmaya başlamıştır. GNSS teknolojisindeki gelişmelerin beraberinde Multi-GNSS kavramı ile birlikte IGS'e bağlı GNSS istasyonlarında farklı küresel uydu sistemlerinden de veri toplanmaya başlamasıyla 2016 yılında Multi-GNSS Experiment (MGEX) projesini kullanıcılara sunmuştur. Bu proje ile farklı uydu sistemlerine ait birleştirilmiş çoklu-GNSS ürünleri kullanıcıya sunulmuştur.

IGS ve IGS'e bağılı analiz merkezlerinin yayınladığı ürünler ölçüm sonrası değerlendirmede kullanılmaktaydı. Fakat 2013 yılına gelindiğinde IGS-RTS projesini kullanıma sunmasıyla birçok uygulamada RT-PPP tekniğiyle konumlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. IGS'in ilk RT ürünleri sadece GPS ve GPS/GLONASS kombinasyonlarını içerirken 2021 yılına gelindiğinde IGS, günümüzde 4 GNSS uydu sistemine ait SSR ürünlerini sunmaktadır. Öte yandan CNES ve JAXA (Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı) gibi merkezler gerçek zamanlı şartlarda uydu yörünge ve saat düzeltme hizmeti sunmaktadır.

IGS'e ek olarak BKG, CAS, CNES, DLR, GFZ, GMV ve WHU isimli IGS Analiz Merkezleri de 2017 yılından bu yana çoklu-GNSS RT-PPP için SSR formatında gerçek-zamanlı ürünler sunmaktadırlar. IGS ve IGS-Analiz Merkezlerinin dışında, Galileo operasyonlarından sorumlu ana yüklenici olan Spaceopal GmbH şirketi, 2018 yılının Ekim ayında NAVCAST olarak bilinen, dünya çapında yeni bir gerçek-zamanlı düzeltme servisini kullanıma açmıştır. Bu servis, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR) tarafından geliştirilen RETICLE algoritmasına dayalı olarak Galileo+GPS sistemlerini destekleyen gerçek-zamanlı hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerini içermektedir. Ayrıca, Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) 2014 yılında GPS, GLONASS ve QZSS sistemlerini destekleyen MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) isimli gerçek-zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltme hizmetini kullanıma sunmuştur. Görüldüğü üzere, bu tür servislere yenileri eklenmekte olup, bu alan hızlı bir gelişmeye sahne olmaktadır.

#### **4.5.1. IGS Gerçek Zamanlı Servis (RTS) Projesi**

IGS, Amerika Birleşik Devletleri'nde kurulan ve 1994 yılından beri uydu yörünge ve saat düzeltmeleri gibi GNSS veri ürünlerini kullanıcıya açık erişim sağlayan bir kuruluştur [69], [70], [142]. RT ürünlerin kullanıcılara ulaşması için 2001 yılında RTWG kurulmuş ve bir sonraki yıl içinde IGS çalıştayında RTS tasarımı kabul edilmiştir [73]. RTWG'nin yönü 2002 baharında Ottawa'da düzenlenen "Towards Real Time" adlı IGS çalıştayında, bir prototip gerçek zamanlı hizmet tasarımı benimsendi. 2007 yılına gelindiği zaman IGS, gerçek zamanlı ürünleri oluşturmak, veriler toplamak ve arşivlemek ayrıca gerçek zamanlı ürünleri yayınlama ve

geliştirmek için IGS Gerçek zamanlı Pilot projesine katılım çağrısını duyurmuştur [74], [75]. Nisan 2013'te IGS'in kurmuş olduğu RTS aracılığıyla farklı analiz merkezlerinin katkısıyla, kullanıcıya gerçek zamanlı yayın efemerisi ve saat düzeltme veri akışlarını sağlamaya başlamıştır [76].

#### **4.5.1.1. IGS RTS Ürünleri**

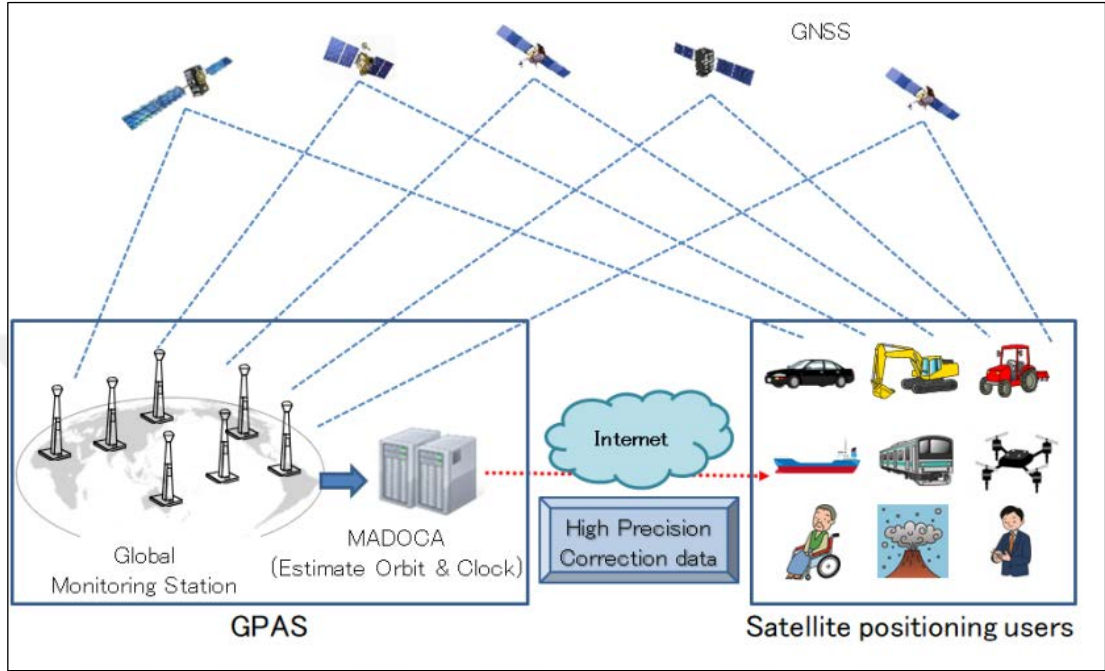
IGS, gerçek zamanlı şartlar altında, IGS-RTS ürünlerini sağlamaya başlamasıyla beraber RT-PPP tekniği birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. RTS, GNSS uydu yörüngesine ait yayın efemerisi ve saat düzeltmelerini NTRIP [77] aracılığıyla RTCM/SSR [78] veri formatı biçimine göre kullanıcıya sunmaktadır [74], [75]. Ayrıca yayınlanan gerçek zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerin doğruluğu sırasıyla 5 cm ve 9 cm'dir [79]. IGS RT servisinin abonelik sistemi ücretsiz ve gerçek zamanlı ürünlerin anlık sunulması RT-PPP yönteminin bilimsel çalışmalarda kullanımına olanak sağlamıştır.

IGS ilk RTS ürünlerini yayınlarken GPS ve GLONASS uydu sistemlerini desteklemekteydi. Günümüzde uydu sistemlerindeki artış ve gelişmeler paralelinde IGS diğer uydu sistemlerine (Galileo ve BeiDou) ait RTS ürünlerini de yayınlamaya başlamıştır. Buna ilaveten IGS'e bağlı birçok analiz merkezinde çoklu-GNSS RTS ürünlerini yayınlamaktadır.

#### **4.5.2. JAXA Gerçek Zamanlı MADOCA Ürünleri**

Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA), MADOCA adlı hassas GNSS yörünge ve saat tahmin sistemini geliştirmiştir. MADOCA ürünleri kullanılarak, PPP tekniği ile hassas bir şekilde kullanıcı konumu hesaplanabilir [189]. Ayrıca JAXA, iki farklı tipte ürün olarak küçük gecikme ile "Gerçek Zamanlı MADOCA ürünü" ve daha yüksek hassasiyetle "Çevrimdışı MADOCA ürünü" sağlar. MADOCA ürünlerinde GPS, GLONASS ve QZSS uydu sistemlerini destekler iken Galileo ve BeiDou şu anda yapım aşamasındadır. Sabit GNSS istasyonlarından toplanan ölçümler kontrol merkezi tarafından MADOCA yazılımı ile yapılan analiz sonucu üretilen uydu yörünge ve saat düzeltme ürünleri Şekil 4.2' de görüldüğü gibi gerçek zamanlı olarak RTCM SSR

formatında internet üzerinden kullanıcılara ücretsiz sunulmaktadır. Hassas uydu yörünge ve saat düzeltme ürünleri için ise 3 farklı veri tipi (Final, Rapid ve Ultra-Rapid) bulunmaktadır. Bu veri tipleri zamana göre farklı aralıklarda yayınlanmakta olup konum doğruluğunu etkilemektedir [189].



Şekil 4.2: MADOCA ürünlerinin üretim ve iletim şeması.

#### 4.5.3. CNES Gerçek Zamanlı Ürünleri

IGS-RTS'e benzer rolde Ulusal Uzay Araştırmaları Merkezi (CNES) tarafından rutin olarak GPS ve GLONASS'a ait uydu yörünge ve saat düzeltme ürünleri sağlanmaktadır. CNES çözümlerinin özelliği, fark alınmamış belirsizlik çözümü olarak adlandırılan teknik uygulanmaktadır [190], [191]. Böylece IGS-RTS için saatlerin gerçek kalitesini iyileştirir. Bu saat ürünlerinin kullanılması kullanıcı alıcısında belirsizlik çözümünün sağlanmasına izin vererek, yatayda 1 cm hassas nokta konumlandırma doğruluğu elde edilmektedir. Gerçek zamanlı olarak oluşturulan uydu yörünge ve saatler UTC (Coordinated Universal Time)'ye göre gece yarısından birkaç dakika sonra sp3, clk ve bia dosyaları olarak CNES arşivinde mevcuttur [190]. Mevcut ürünler sonradan değerlendirme PPP yazılımlarında fakat gerçek zamanlı koşullarda test etmek isteyen kullanıcılar için fayda sağlamaktadır. Bu çözümler, günümüzde

deprem, tsunami gibi doğal olayların meydana geldiği yerlerde kullanım fonksiyonu açısından çok büyük insan kitlesini etkileyen yapıların, GNSS sensörü entegre yapı sağlığı izleme sistemlerinde yapıda meydana gelen tepkimelerin ölçülmesi, değerlendirilmesi ve yorumlanması için hızlı tehlike değerlendirme uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Ayrıca hem kod hem de taşıyıcı faz GNSS gözlemlerine, geniş ve dar bant kombinasyonlarında doğrudan belirsizlik çözümü sağlayan bia uzantılı dosyalar içerisinde gözlemlere eklenecek hatalar bulunmaktadır. Böylece PPP-AR (Precise Point Positioning-Ambiguity Resolutions) yazılımlarında belirsizlik çözümü için bia dosyaları CNES arşivinde bulunmaktadır. Gerçek zamanlı ürünlerin yanında CNES sonradan değerlendirme prosesleri için de hassas uydu yörünge ve saat düzeltme ürünlerini de sağlamaktadır [190].



## 5. GPS-VADASE YAKLAŞIMI

### 5.1. GPS-VADASE Yaklaşımının Tanımı

Dinamik yüklerin etkisi sonucu oluşan hareketler, hiçbir internet servis bilgisine veya hassas yörünge/saat düzeltme bilgisine gerek duymadan tek bir GNSS alıcısı kullanılarak VADASE yaklaşımı ile gerçek zamanlı olarak Varyometrik yaklaşım ile izlenebilmektedir [92]. Varyometrik yaklaşım, ardışık iki epok arasındaki faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız zamanlar arası tekli farkına dayanmaktadır.

### 5.2. GPS-VADASE Yaklaşımının Matematiksel Modeli

Colosima ve diğerleri (2011) tarafından, deprem, rüzgâr yükü gibi dinamik yükler etkisi sonucu oluşan hareketlerin gerçek zamanlı izlemede kullanılan VADASE yaklaşımı, hiçbir internet bağlantısı gerektirmeden tek bir GNSS alıcısının taşıyıcı faz gözlemlerini toplayarak ve anlık olarak yayınlanan GNSS yayın efemerisi bilgilerinin alınması ile birlikte ardışık epoklar arasındaki yer değiştirmeleri belirleyebilmektedir. Varyometrik yaklaşımın matematiksel fonksiyonu, ardışık iki epok arasındaki iyonosferden bağımsız zamanlar arası tekli farkın gözlem denklemi ile aşağıdaki gibi gösterilir [92].

$$\alpha[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L2} = (e_r^s \cdot \Delta\xi_r + c\Delta\delta t_r) + ([\Delta\rho_r^s]_{OR} - c\Delta\delta t^s + TZD_{SB} + [\Delta\rho_r^s]_{Etol} + \Delta p_r^s) + \Delta m_r^s + \Delta\varepsilon_r^s \quad (4.9)$$

Alt simge (r) alıcıyı, üst simge (s) uyduyu temsil eder. Alt simge olarak yazılan  $L1, L2$  sırasıyla  $L1$  taşıyıcı frekansı ve  $L2$  taşıyıcı frekansı belirtir.  $\Delta\phi_r^s$  Uyduya göre alıcının taşıyıcı faz gözlemi iken  $\lambda$  taşıyıcı faz dalga boyudur; Denklem 4.9'da basit halde gösterilen  $\alpha = (f_{L1}^2 / (f_{L1}^2 - f_{L2}^2))$  ve  $\beta = (-f_{L2}^2 / (f_{L1}^2 - f_{L2}^2))$  iyonosferden bağımsız kombinasyonun standart katsayılarıdır;  $e_r^s$  uydudan alıcıya giden birim vektörü,  $\Delta\xi_r$  ardışık iki epok arasındaki 3 boyutlu yer değiştirme yani hız bileşenini temsil eder ve bu iki vektör arasındaki  $\cdot$  simgesi  $e_r^s$  ve  $\Delta\xi_r$  vektörleri arasındaki skaler çarpımı temsil eder.  $c$  boşluktaki ışık hızıdır.  $\Delta\delta t_r$  ve  $\Delta\delta t^s$  sırasıyla

alıcı ve uydu saati hatasıdır.  $\Delta p_r^s$  metre biriminde uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafedir.  $[\Delta \rho_r^s]_{OR}$  uydunun yapmış olduğu yörünge hareketi ve dünyanın hareketinden kaynaklı oluşan geometrik değişimi,  $[\Delta \rho_r^s]_{EtOI}$  katı dünya gelgitinin ve okyanus yüklemesinden kaynaklı geometrik değişimi temsil eder.  $TZD_{SB}$ , Saastamoinen modeline göre Troposferik Zenith Gecikmesini ifade eder.  $\Delta m_r^s$  ve  $\Delta \varepsilon_r^s$  uydu ile alıcı arasında sırasıyla epoklar arası tekli farkların çok yolluluk ve gürültüyü ifade eder [92].

VADASE yaklaşımının gerçek zamanlı epoklar arası farkları alınarak sürekli gözlem yapıldığı varsayılarak 3 boyutlu konum bileşenlerine ait hızlarını vermesi, dinamik hareketlerin izlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Hesaplanan hız bileşenlerinin ayrı ayrı integrali alındığında deplasmanları vermektedir. Böylece bu yaklaşım yeryüzünde meydana gelen dinamik hareketlerin izlenmesinde ve tespitinde meydana gelen yer değiştirmeleri yakalamaktadır.

## 6. YAPI SAĞLIĞI İZLEMELERİ

### 6.1. Yapı Sağlığı İzlemesinin Tanımı ve Gelişimi

Halihazırda bulunan insan eli ile yapılmış veya yapılmakta olan mühendislik yapıların mevcut durumunun ve meydana gelen dinamik yükler etkisindeki performansının ölçülmesi, tespit edilmesi ve değerlendirilmesi, yapı güvenliğinin sağlanması, oluşacak hasarların ya da deformasyonların tespiti ve müdahalesi, geliştirilen farklı yapı teknik ve malzemelerin etkisinin incelenmesi ve bakım-onarım gibi çalışmaların incelenmesi Yapı Sağlığı İzleme olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde yapılan birçok mühendislik yapısı, YSİ sayesinde akıllı yapılar haline gelmiştir. Yapılarda bulunan YSİ sistemleri ile birlikte, acil durumlar (deprem, rüzgâr, tsunami, trafik kazası, yangın vb.) esnasında gerçek zamanlı olarak insan faktörünün olmadığı otomatize bir şekilde önlemlerin alınması, yaşanacak tehlikelerin ve can kayıplarının önüne geçmektedir. Yapılar, insan vücuduna benzer şekilde zamanla sağlığı bozulmaktadır. Nasıl ki insanlar hasta olduklarında ilgili doktorlara gerekli kontrolleri yaptırarak, teşhis ve sonrasında tedavi yöntemiyle iyileşme sağlıyorsa yapılarda da doktorun yerini YSİ sistemleri almaktadır. Benzer durum yapılarda birtakım sensörler yardımıyla toplanan veriler ile birlikte teşhis yani değerlendirmeler yapılarak uygun tedavi yöntemi iyileştirme, bakım, onarım veya yıkım çalışmaları uygulanmaktadır. Günümüzde milyonlarca yapı bulunmasına rağmen tüm bu yapıların izlenmesi çok zordur. Fakat daha çok umumi hizmetler için kullanılan veya toplumun büyük çoğunluğunun kullanımına sunulan yapıların (alışveriş merkezleri, hastaneler, uzun mesafeli köprüler, büyük barajlar, kuleler, gökdelenler veya uzun katlı binalar vb.) YSİ sistemleri kurularak izlenmesi yapının hasar görmesinden kaynaklı oluşacak jeopolitik, ekonomik, çevresel etkilerin dışında, can ve mal kayıplarının önden kestirimi yapılarak güvenilir bir zemin sağlayacaktır.

Günümüze kadar hem geoteknik hem de jeodezik sensörler kullanılarak yapı sağlığı izleme çalışmalarında dinamik yüklerin meydana getirmiş olduğu tepkilerin incelenmesi ve değerlendirilmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, önceleri veriler toplandıktan sonra değerlendirilirken yaklaşık son 10 yıldır gerçek zamanlı olarak değerlendirilmeye başlamıştır. YSİ sistemlerinde günümüzde hala daha birçok teknolojik gelişme ve uygulama yöntemleri devam

etmekte olup bu tez çalışması kapsamında RT-PPP ve RT-VADASE yöntemleri ile beraber jeodezik sensör olan GNSS alıcıları ile düşey dinamik hareketleri yakalayabilme kabiliyetleri incelenmiştir.

## **6.2. Yapı Sağlığı İzlemelerinde Kullanılan Sensörler**

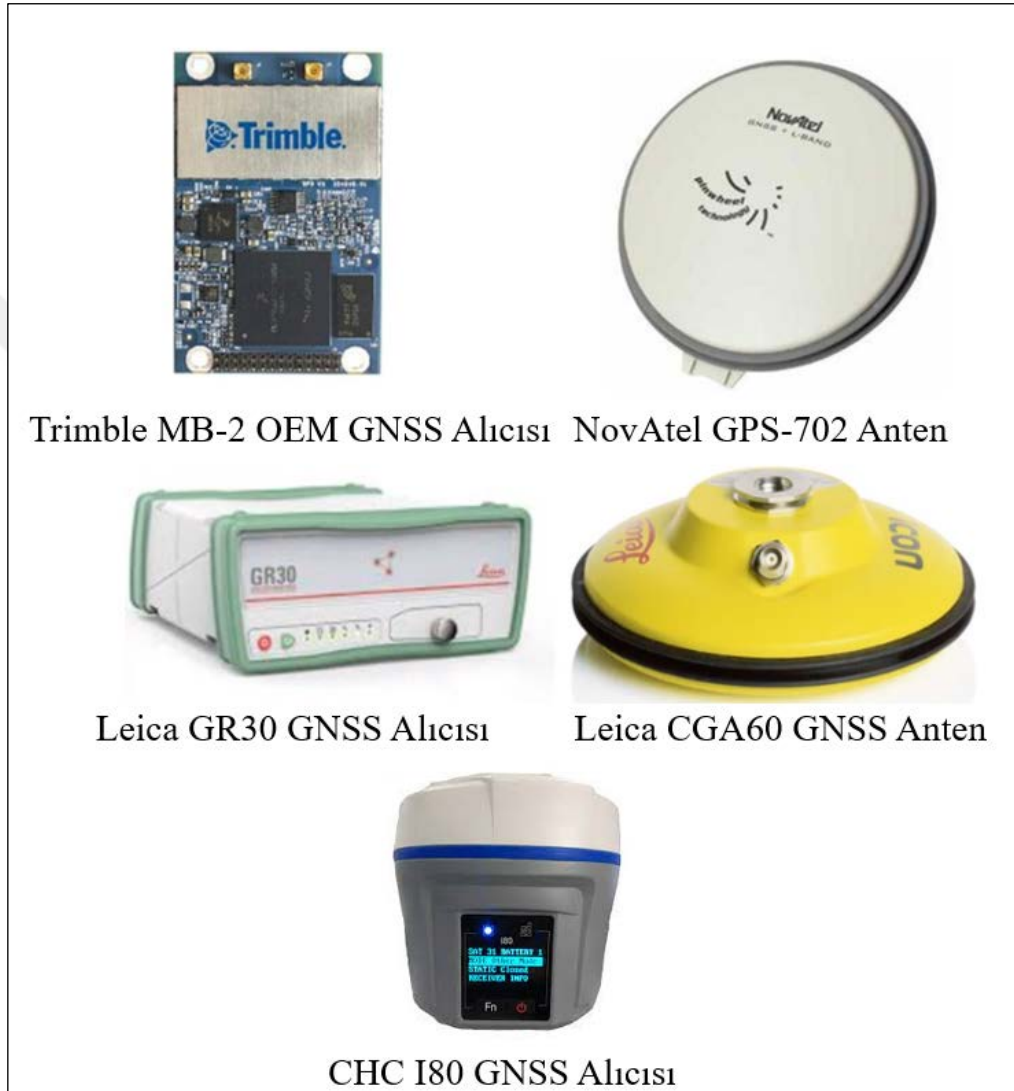
Yapı sağlığı izlemelerinde mühendislik anlamında inşaat ve deprem mühendislerinin kullanmış olduğu ve literatürde geoteknik sensörler olarak da isimlendirilen ivmeölçer, eğim sensörü ve gerilim sensörü gibi sensörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan uydu tabanlı veya yersel ölçüm yöntemleri ve teknolojilerini kullanarak YSİ sistemleri kurulmaktadır. Bu ölçme yöntemlerinde kullanılan sensörler genel anlamda jeodezik sensör olarak isimlendirilmektedir. Ayrıca bu sensörlerin bazıları ki bunlar GNSS alıcısı, Total Station, Hassas Nivo, Yersel Lazer Tarayıcı ve Holografik Görüntüleme Sensörü gibi sensörlerdir.

### **6.2.1. GNSS Alıcısı**

Yeryüzünde herhangi bir zaman diliminde, her türlü hava şartları altında, tanımlı bir koordinat sisteminde, yüksek doğrulukta 3 boyutlu konum, hız ve zaman bilgisi sunan sistemler bütünüdür [120]. GNSS alıcılarının kullanılmaya başlamasıyla klasik jeodezik ölçme teknikleri ile yapılan çalışmaların yerini almaya başlamıştır. Günümüzde birçok uygulama alanında yer bulan GNSS alıcıları özellikle mühendislik yapılarının statik ve dinamik durumlarını doğrudan ölçülmesinde en etkili araçlardandır. Bugüne kadar GNSS alıcıları, yapıların maruz kaldığı dinamik yükler altında, yapısal titreşimlerin izlenilmesi ve doğal frekansların belirlenmesi için farklı sensörlere entegre edilerek yapı sağlığı izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmıştır. GNSS alıcılarının üretildiği ilk zamanlarda zamansal çözünürlüğünün ve depolama kapasitesinin düşük olduğu dönemlerde yapılara etkiyen dinamik yüklerin tespit edilmesinde zayıf kalmıştır. Çünkü yapının dinamik karakteristiğini incelemek için örnekleme aralığının Nyquist kriterine uyulması gerekmektedir. Bu durumda yapıların doğal frekanslarının belirlenmesinde yüksek frekanslı GNSS alıcılarının kullanılması gerekmiştir. Uydu sistemleri ve alıcılarındaki gelişmeler ile birlikte yüksek örneklem aralığına sahip GNSS alıcıları üretilmeye başlanması ile

zamana bağılı yüksek zamansal çözünürlükte yapısal titreşimler yani yatay ve düşey deplasman zaman serilerinin elde edilmesi mümkün hale gelmiştir [192].

Bu tez çalışması kapsamında düşey dinamik hareketlerin izlenilmesinde Şekil 6.1’de, RT-PPP yöntemi için Trimble MB-2 OEM, RT-VADASE yöntemi için Leica GR30, IGS-RT, IGS-F ve RP yöntemleri için CHC I80 GNSS alıcıları kullanılmıştır.



Şekil 6.1: Deneylerde kullanılan GNSS Alıcıları

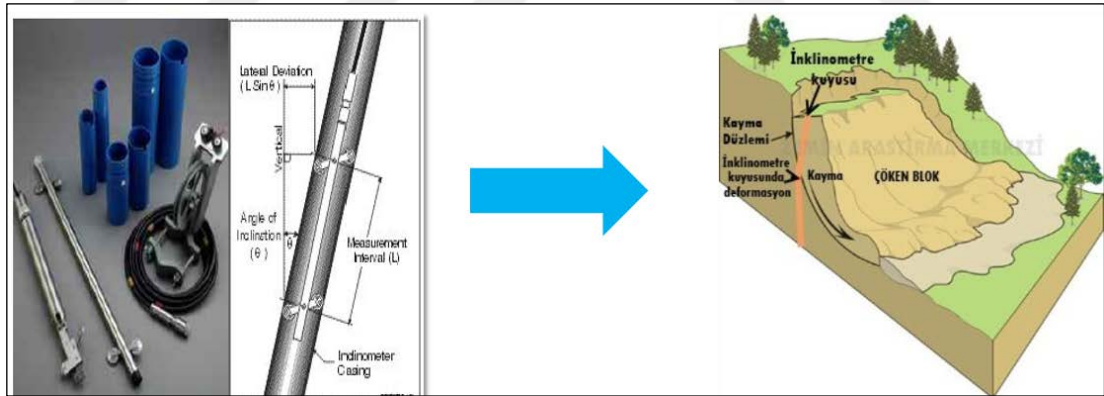
### 6.2.2. İvmeölçer (Accelerometers)

Günümüzde birçok alanda yaygın bir kullanıma sahip olan ivme sensörleri, ivme kuvvetlerini ölçebilen elektromanyetik cihazlardır. Yapı sağlığı izleme uygulamalarında entegre bir sensör olmakla birlikte kendi ölçüm aralığında ölçmüş

olduğu ivme şiddetini analog bilgi olarak bağlı sistemlere aktarabilmektedir. Bu sensörler mühendislik yapılarında meydana gelen dinamik hareketlerin ivmelenme değişimlerini doğrudan ölçebilmektedir. Fakat ivme değerlerinden bağıl deplasman değerlerine geçişte çift katlı integral alınır ve integral sabitlerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden yapılarda meydana gelen statik ve yarı-statik yer değiştirmeler, bağıl olarak hız ve deplasmana ilişkin integral sabitleri bilinmediği için çıkarılamaz [23], [193]. Bu nedenle, yapı sağlığı izleme çalışmalarında her birinin tamamlayıcı özelliklerinden en iyi şekilde yararlanmak için ivmeölçer sensörün GNSS ile entegre edilmesi önerilmiştir [16].

### 6.2.3. Eğim Sensörü (İnclinometre)

İnclinometre, konumlandırıldığı yüzeydeki eğimi, yönünü ve büyüklüğünü eş zamanlı ölçen iki eksenli, yüksek duyarlılıkta bir sensördür. Sensör, elektro-optik bir prensibe göre çalışmaktadır. Yatay bir yüzey olan sıvı yüzeyi ile eğime sahip olan yüzey arasındaki açının ölçülmesine dayanmaktadır.



Şekil 6.2: İnclinometre ölçüm seti ve çalışma prensibi

Bu elektro-optik açı ölçme sistemi tarafından ölçülen açı, uygulanan yöntemle göre dijital veya analog çıkış sinyaline dönüştürülmektedir [194]. Şekil 6.2’de İnclinometre ve çalışma prensibi gösterilmiştir. İnclinometreler zemin hareketlerinin ve yapısal deformasyonların ölçülmesinde, şev ve heyelan hareketlerinin izlenilmesinde, barajlarda gövde dolgusu, temel ve şevlerin incelenmesinde, yeraltındaki yatay deformasyonların ölçülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 6.2.4. Total Station ve Hassas Nivo

Mühendislik yapılarında meydana gelen yapı hareketlerinin izlenilmesinde klasik jeodezik ölçme yöntemleri ve aletleri ile birçok uygulama çalışması yapılmıştır. Jeodezik ölçme aletlerinden birisi ve temel prensibi gereği doğrultu ve faz farkı ölçümü yapan Total Station ile deformasyon ölçmelerinde açı ve kenar ölçmeleri hesaplanmaktadır. Günümüze kadar ilk olarak elektronik teodolitlerin gelişmesiyle birlikte Total Station ortaya çıkmış ve daha sonra yeni nesil robotik ölçümlere izin veren otomatikleştirilmiş Robotik Total Station (RTS) ile geniş bir kullanım alanı bulmuştur [195]. RTS kullanılan programın özelliklerine göre belirlenen örnekleme aralıklarında kendisini hedef noktaya yönlendirebilir, ölçüm yapabilir ve kayıt yapabilir. Günümüzde RTS'ler programlanarak 5-10 Hz örnekleme aralığı ile gözlemleme ve hareketli reflektörleri izleme düzeyine ulaşılmıştır. Bu avantajlarından dolayı birçok ölçme ve diğer mühendislik projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [196]-[199].

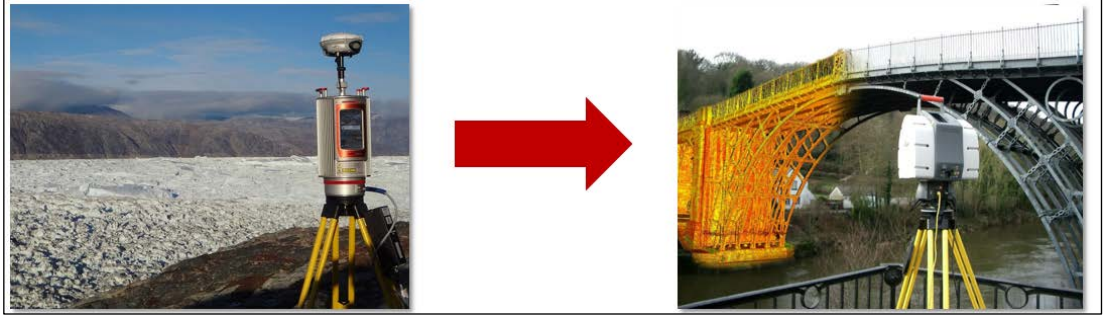


Şekil 6.4: Robotik Total Station ve Hassas Nivo.

Yeryüzünde veya mühendislik yapılarında meydana gelen düşey yönlü deformasyonları klasik jeodezik ölçme aletlerinden biri olan ve kullanımı basit hassas otomatik dijital nivolar ile yüksek hassasiyetle belirlenebilmektedir. Şekil 6.3'te Robotik Total Station ve hassas nivo gösterilmiştir.

### 6.2.5. Yersel Lazer Tarayıcı

Bir yersel lazer tarayıcı, yatay ve düşey ekseninde lazer ışığını gönderen bir mekanizmaya sahiptir. Tarayıcının elektronik ünitesinden çıkan ışın, cihazın gövdesindeki hızla dönen optik (aynaya benzer) üniteye çarpar ve bu yüzeyden yansarak yatay ile bir açı yapacak şekilde cihazdan çıkar. Tarayıcı, cihaz veri aldıkça düşey eksen etrafında çok küçük açılarla dönerek taramaya devam eder [200]. Taranacak obje ya da alanın deformasyon kontrolü sadece ayırık noktalar olmaksızın yersel lazer tarayıcılarla sıklıkla analiz edilebilir. Şekil 6.4'te gösterildiği gibi köprü gibi birçok büyük mühendislik yapıların 3B modellerinin üretilmesi ve meydana gelen deformasyonların tespitinde yersel lazer tarama teknikleri kullanılmaktadır.

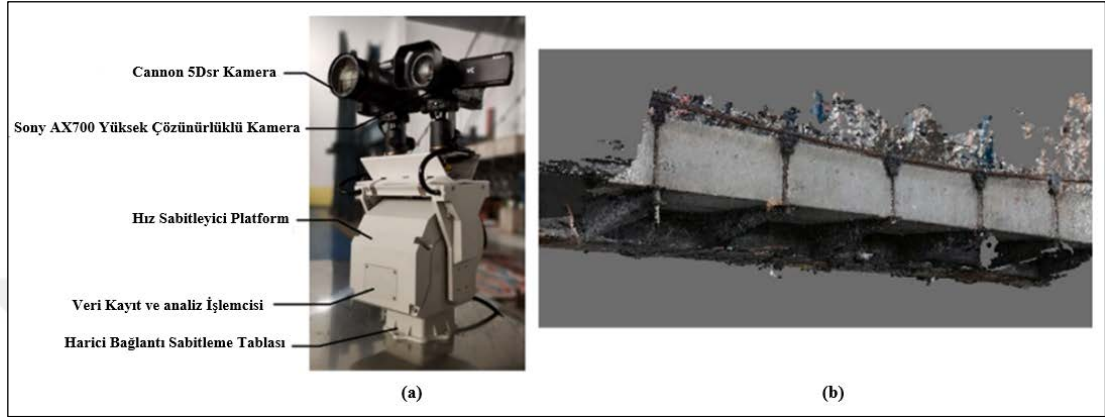


Şekil 6.4: Yersel Lazer Tarayıcısı ve YLT kullanılarak belirlenen yapının modeli.

### 6.2.6. Holografik Görüntüleme Sensörü

Holografik görüntüleme sensörü (Holographic Visual Sensor, HVS), test edilen nesne uzayının yüzeyinde yoğun ve sürekli piksel düzeyinde/piksel altı düzeyinde sanal ölçüm noktaları düzenleyerek, yapısal geometrinin ve deformasyonun gerçek fiziksel özelliklerinin bütün olarak toplanmasına olanak tanır. HVS, bilgisayar görme teknolojisine dayalı tam alan, temassız deplasman ve titreşim ölçümü için yapılır. Sensör ve algoritmalar, mühendislik yapılarının tam alan geometrisini izlemede uygulanabilir. Modern panoramik görüş sensör teknolojisi, örüntü tanıma ve bilgisayar teknolojisine dayanan HVS, Şekil 6.5'te gösterilen aktif bir görsel sensörün uzaktan kumanda hız sabitleyicisi bir platform, çevresel takip elemanı, sinyal iletim ve iletişim biriminden oluşur [201]. Ölçülecek yapının aktif gözlemi ve ölçümü, ön uçta aktif bir

görüş sensörü ile gerçekleştirilir. Çevresel izleme üniteleri, aktif görüş sensöründen bağımsız sıcaklık ve nem sensörlerini ifade eder. Bu birimler, ölçülecek mevcut yapının çevresel faaliyetlerle ilgili bilgilerini toplamak için kullanılır. Yapısal deformasyon geometrisi ve fiziksel özellikleri Şekil 6.5'te görüldüğü gibi bütün olarak elde edilebilir [201].



Şekil 6.5: Holografik görüntüleme sensörü (HVS): (a) sensörün ana bileşenleri ve (b) holografı kullanılarak belirlenen bir yapının geometrik morfolojisi.

Teorik olarak, ölçülen yapının yüzeyindeki tüm pikseller, kendi değişmez özelliklerine sahip oldukları için hedef olmadan izlenebilir. Günümüzde ilk kez YSİ uygulamalarında hem laboratuvar hem de gerçek obje (köprü) üzerinde kullanılan HVS, tam alan deplasman ölçümü ve modal parametre tanımlama yönteminin doğru, hassas ve aynı anda birden fazla koşulda uygulanabileceğini göstermiştir [201]. Ayrıca HVS tarafından belirlenen tam alan yer değiştirmeleri, doğal frekanslar ve modal şekillerin, geleneksel temas tipi sensörler (ivmeölçer, komparatör) tarafından üretilen sonuçlarla oldukça iyi eşleştiği de gösterilmiştir [201]. Bununla birlikte YSİ sistemlerinin çoğu yer değiştirme sensörleri, ivmeölçerler ve/veya gerinim sensörleri ile donatılmıştır. Bu yöntemler kabul edilebilir doğruluk sağlar ve tam otomasyona ulaşmayı mümkün kılar. Bu yöntemler, sensörlerin ve veri toplama sistemlerinin hantal, zaman alıcı ve pahalı kurulumu nedeniyle esas olarak maliyetlidir. Geleneksel modsal parametre tanımlama yönteminin bir başka sınırlaması, elde edilen modun konumsal çözünürlüğünün, konuşlandırılan toplam sensör sayısına bağlı olmasıdır. Bu, hasar yerinin yanlış belirlenmesine ve yapısal performans ve güvenlik durumunun zamanında doğru bir şekilde değerlendirilmemesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, gizli veya eksik olan yapısal performans bilgilerini kurtarmak ve sınırlı sayıda

sensör nedeniyle gözlem noktalarındaki ayırık veri yanıtlarının sınırlandırmasının üstesinden gelmek için, dinamik yanıt, farklı görsel sensör kombinasyonları kullanılarak yeterli konumsal çözünürlükle önerilen HVS aracılığıyla izlenebilir [201].

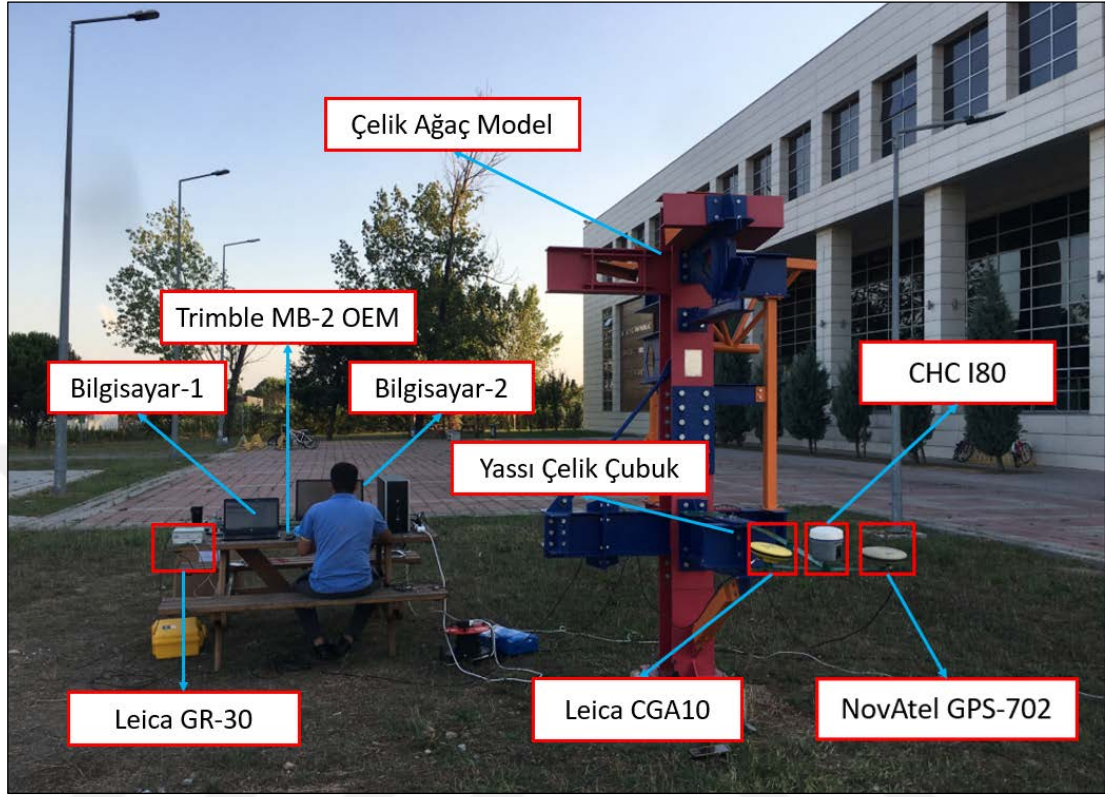


## 7. UYGULAMA

### 7.1. Deney Tasarımı ve Tanımı

Günümüzde mühendislik yapılarının yer kabuğu hareketi, rüzgâr yükü, ani yükler ve hareketli yükler gibi dinamik yüklerin etkisinde kalması sonucu yapıda meydana gelen düşey titreşimlerin tespit edilmesi ve yer değiştirme hızlarının belirlenmesi için düşey yönlü salınım yapabilen ve üzerinde farklı sensörler kurulabilen çelik yassı simülasyon çubuğu ile birtakım deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çelik çubuk binalarda, köprülerde, viyadüklerde, stadyumlarda vb. yapılarda bir tarafı ankastre mesnet şeklinde sabitlenmiş, diğer tarafı serbest halde bulunan konsolları temsil etmektedir. Şekil 7.1’de tüm deneyler boyunca genel deney tasarımı gösterilmiştir. Deneylerde yüksek frekanslı RT-PPP yönteminin düşey yönlü salınımları yakalaması amacıyla 20 Hz örneklem aralığında sadece-GPS uydu gözlemlerini toplayan Trimble MB-2 OEM alıcısı kullanılmıştır. Bununla birlikte anlık düşey yönlü hızların ve yer değiştirmelerin belirlenmesinde, içerisinde VADASE algoritması özelliğine sahip 20 Hz örneklem aralığında Leica GR30 alıcısı ile veriler toplanmıştır. Ayrıca düşey yönlü hareketlerin tespit edilmesinde referans olarak alınan bağıl konum belirleme yöntemi için bir gezici ve bir sabit olmak üzere 20 Hz örneklem aralığına sahip CHC I80 alıcıları ile gözlemler yapılmıştır. Deneyler 27 Kasım 2021 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü önünde yapılmıştır. Mühendislik yapılarında meydana gelen düşey yönlü dinamik hareketlerin simülasyonu için uç kısmına üç GNSS sensör monte edilebilen düşey yönlü çelik yassı simülasyon çubuğu, çelik ağaç model üzerine bir ucu ankastre mesnet şeklinde sabitlenmiştir. Bu modele bir ucunun sabitlenmesindeki sebep köprü gibi mühendislik yapılarında meydana gelen düşey yönlü hareketlerin tespit edilmesi esnasında köprü üzerinde GNSS sinyallerine engel ve yansımaya neden olacak üst yapıya bağlı elemanların simülasyonu için kullanılmıştır. Ayrıca referans olarak alınacak bağıl konum belirleme yöntemi için sabit GNSS alıcısı CHC I80, deney düzeneğinin yaklaşık 75 m uzağına kurulmuştur. Referans alınan bağıl konum belirleme yönteminin doğruluğu gezici ve sabit alıcı arasındaki baz uzunluğuna bağlıdır. Baz uzunluğunun yakın olması GNSS alıcısındaki sistematik hataların (bias) çoğunu

ortadan kaldırarak hassas doğrulukta gezici alıcının kesin koordinatları belirlenmiştir. Şekil 7.1’ de deney esnasında modelin yapısı ve deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 7.1: Sönümlü düşey harmonik hareketlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği.

Deney boyunca çelik çubuğun serbest kısmında sağ, sol ve orta kısmına üç GNSS alıcı/anten yerleştirilmiştir. Şekil 7.1’ de bu bölümler belirtilmiştir. Çelik çubuğun sol kısmında hız ve yer değiştirme motoru olan VADASE yaklaşım özelliğine sahip 20 Hz örnekleme aralığında veri toplayan Leica GR30 GNSS alıcısına ait Leica CGA60 GNSS anteni bulunmaktadır. Bu yaklaşımdan elde edilen hız doğrulukları yatayda 0.003m/s, düşeyde 0.005m/s’dir. Aynı çubuğun sağ kısmında ise RT-PPP yöntemini gerçekleştirmek için 20 Hz örnekleme aralığında sadece-GPS uydularından veri toplayan Trimble MB-2 OEM alıcısına ait NovAtel GPS-702 anteni konumlandırılmıştır. Bu alıcının konum doğruluğu yatay bileşende  $\pm 8$  mm, düşey bileşende  $\pm 16$  mm’dir. Ayrıca çelik çubuğun ortasına bağlı konum belirleme yönteminde gezici olarak kullanılan ve 20 Hz örnekleme aralığında veri toplayan CHC I80 alıcısı monte edilmiştir. CHC I80 alıcısının, konum doğruluğu yatay bileşende  $\pm 8$  mm  $\pm 1$ ppm, düşey bileşende  $\pm 15$  mm  $\pm 1$ ppm’dir. Deney açık hava şartları altında yapılmıştır. Fakat çelik çubuğun serbest kısmında bulunan GNSS sensörlerinin, çelik

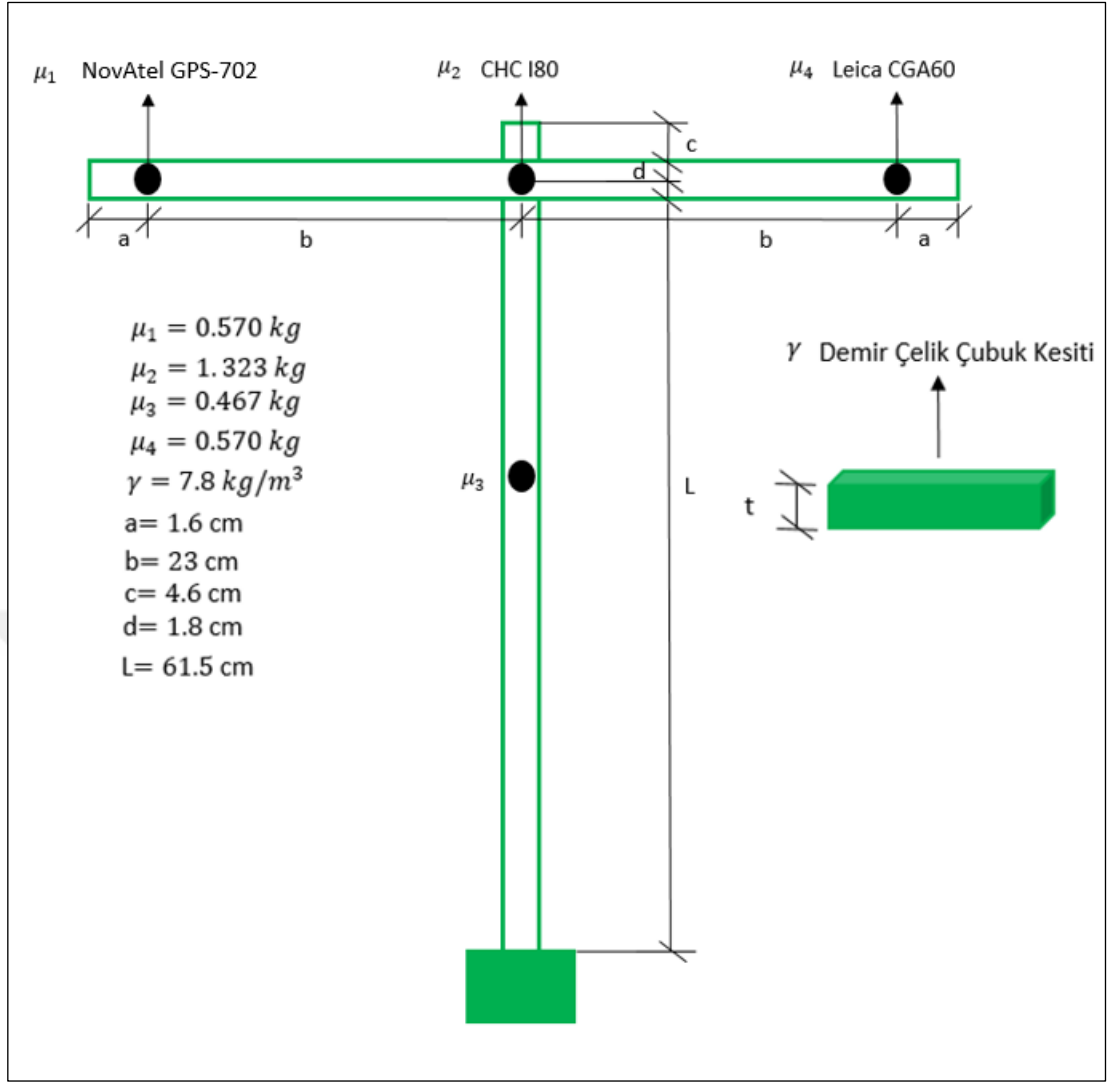
ağaç modelden kaynaklı multipath ve sinyal engelleme etkisi yapacağı görülmektedir. Bunun yanı sıra deney çevresinde bulunan İnşaat Mühendisliği Bölüm binasının da multipath ve sinyal engelleme etkisi oluşturmaktadır.

### 7.1.1. Düşey Sönümlü Harmonik Hareket Testleri

Yüksek Frekanslı RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin mühendislik yapılarında meydana gelen düşey yönlü dinamik hareketleri yakalayabilme kabiliyetlerini tespit edebilmek ve performanslarını değerlendirmek amacıyla RP yöntemi referans alınarak Tablo 7.1’de verilen konsol boyu ve buna karşılık gelen salınım frekansları 1.4 Hz ile 2.4 Hz arasında değişen toplam 16 deney durumu değerlendirilmiştir. Deney öncesinde GNSS’den bağımsız, istenilen frekans ve genlikte düşey hareket üretebilen bir sensör bulunmadığı için deney sonrasında RP yöntemi ile bulunan frekans değerleri baz alınarak tabloya yazılmıştır. Çelik çubuğun temel doğal frekansı her bir konsol uzunluğuna bağlı olarak farklıdır. Çünkü salınım frekansı, modelin geometrisine (uzunluk, genişlik, kalınlık, Young modülü) bağlı olarak değişmektedir [202]. Bununla birlikte her türlü yapı sisteminin tasarımı ve analizi için kullanılan SAP 2000 programında düşey harmonik salınımlar üreten çubuk modellenerek her bir konsol boyuna bağlı olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) uygulanarak bulunan temel doğal frekans değerleri Tablo 7.1’de gösterilmiştir. Temel doğal frekanslar hesaplanırken, Şekil 7.2’de tasarımı gösterilen yassı çelik çubuğun yatay düzlemde x ve y yönünde uzunluk değerleri, demir çeliğin öz kütlesi, çelik çubuk üzerinde GNSS sensörlerinin monte edilmesine yarayan dış tek ağızlı vidaların ağırlıkları ve bunlar üzerinde bulunan GNSS alıcı veya antenlerin ağırlıkları ölçülerek dikkate alınmıştır.

Tablo 7.1: Çelik çubuğun, konsol boyuna bağlı deney setleri ve doğal frekansları.

| RP Yöntemi Sonucu<br>Frekans Değerleri |        | Konsol Boyu (cm) |           |            |             | Temel Doğal<br>Frekans (Hz) |
|----------------------------------------|--------|------------------|-----------|------------|-------------|-----------------------------|
|                                        |        | 100 cm           | 90 cm     | 80 cm      | 70 cm       |                             |
| Salınım<br>Frekansı                    | 1.4 Hz | Durum 1-4        | -         | -          | -           | 1.3 Hz                      |
|                                        | 1.6 Hz | -                | Durum 5-8 | -          | -           | 1.6 Hz                      |
|                                        | 1.9 Hz | -                | -         | Durum 9-12 |             | 1.9 Hz                      |
|                                        | 2.4 Hz | -                | -         | -          | Durum 13-16 | 2.4 Hz                      |



Şekil 7.2: Çelik Çubuk Modelin Geometrisi.

Deneylerde düşey harmonik salınımlar herhangi bir mekanik bir sistem dâhilinde üretilmediği için her bir konsol boyunda rastgele farklı genlikte deneyler üretilmiştir. Mühendislik yapılarında deprem, rüzgâr, volkanik patlama ve heyelan gibi doğal olayların meydana gelmesi sonucu yapılarda oluşan titreşim ve yer değiştirmeler göz önüne alınarak harmonik salınımlar üretilmiştir. Deneylerde kullanılan GNSS alıcılarının örnekleme frekansı 20 Hz olduğundan Nyquist kriterinden dolayı örnekleme frekansının yarısına yani 10 Hz'e kadar harmonik salınımlar tespit edilebilir. Deneylerde frekans alanında 0-10 Hz arasındaki frekans ve bu frekanslara karşılık gelen genlik değerleri görülebilmektedir. Bununla birlikte günümüz mühendislik yapılarında gözlemlenen frekans değerleri 0.2 ila 2.5 Hz arasında olması ve meydana gelen yaklaşık 5 ila 20 mm arasındaki deplasman

hareketlerini GNSS alıcıları rahatlıkla yakalayabileceği göz önüne alınarak deney esnasında farklı konsol boyunda düşey deplasman hareketleri meydana getirilmeye çalışılmıştır.

## 7.2. GPS Verilerinin Toplanması ve Parametre Ayarları

Bu tez çalışması kapsamında 3 farklı tipte GNSS alıcı kullanılarak toplam 4 tane GNSS alıcısı ile 20 Hz (0.05 s) örneklem aralığında, 10° yükseklik açısıyla gözlemler yapılmıştır. Deneylerde harmonik salınım testlerinde RP yöntemi referans olarak alındığı için gezici ve sabit alıcı arasındaki baz uzunluğuna bağlı olarak konum duyarlılığı değişmektedir. Bu nedenle baz uzunluğunun kısa mesafede olması uydudan alıcıya gelen sinyallere etkiyen hataların daha iyi elimine edilmesine neden olmaktadır. Böylece RP yöntemi ile elde edilen konum bilgisi daha hassas elde edilmektedir. Ayrıca literatürde RP yöntemi ile mühendislik yapılarına ait çalışmalarda baz uzunluğunun yanı sıra gezici ve sabit alıcı arasında yükseklik farkının fazla olmasından dolayı meydana gelen troposferik etkinin konum doğruluğuna anlamlı bir etkisi olduğu da gözlemlenmiştir. Bu tez kapsamında RP yöntemi referans alınırken hem baz uzunluğu hem de yükseklik farkının çok küçük olduğu alanda deneyler yapılmıştır.

Düşey harmonik salınım deneyleri, 27.11.2021 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsü içerisinde İnşaat Mühendisliği bölümünde gerçekleştirilmiş ve yaklaşık 150 dakika sürmüştür. Bu sürenin fazla olması tez kapsamında RT-PPP yönteminin çözümünde hassasiyetin yüksek olması için PPP yönteminin doğası gereği yakınsama süresi ve tamsayı faz belirsizliği çözümünden dolayı deney başlamadan önce ve deneyler esnasında konsol boylarının değiştirilmesinden sonraki zamanlarda yaklaşık 25-30 dakika hareket üretilmeden bekletilmiştir. Deney esnasında, alıcının sadece-GPS gözlemlerinin toplanmasına izin veren Trimble MB-2 OEM alıcı anteni dışında diğer 3 GNSS alıcı/anteni ile de sadece-GPS uydu gözlemleri yapılmıştır. RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin düşey dinamik hareketleri yakalayabilme kabiliyetlerini farklı frekans ve genlikte performansını test etmek için çelik çubuğun konsol boylarını 100, 90, 80 ve 70 cm ayarlayarak 4 farklı frekansta düşey harmonik salınımlar üretilmiştir.

## 7.3. GPS Verilerinin Prosesi

### 7.3.1. Kinematik Bağlı GPS

Mühendislik yapılarında meydana gelen deformasyonları tespit etmek ve izlemek için bağlı konum belirleme yöntemlerinden biri olan sonradan değerlendirme (Post Process, PP) kinematik yöntem birçok bilimsel çalışmada kullanılmıştır. Günümüze kadar ki çalışmaların birçoğunda yapıda meydana gelen dinamik hareketlerden kaynaklı yer değiştirmeler ve yapının doğal frekansını tespit etmek için, gözlem yapan en az bir sabit GNSS alıcısına dayalı bağlı kinematik yöntem ile değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışmada RT-PPP ve RT-V tekniklerinin performanslarının ve doğruluklarının karşılaştırılması için bağlı konum belirlemenin bir hali olan PP-Kinematik tekniği referans olarak seçilmiştir. Sabit istasyon olarak deney tasarımıdan yaklaşık 75 metre uzaklıkta açık gökyüzü altında kurulan CHC I80 alıcından toplanan veriler ile gezici olarak deneyde tasarlanmış çelik çubuğun ortasında bulunan CHC I80 alıcında toplanan veriler, referans seçilen yöntem ile değerlendirilmiştir. PP-Kinematik yöntemin prosesi için açık kaynaklı bir yazılım paketi olan RTKLIB demo5\_34a yazılımının rtkpost uygulama modülü kullanılmıştır. Proses işlemi esnasında seçilen tüm parametreler Tablo 7.2’de verilmiştir.

PP-Kinematik çözümde kullanılan RTKLIB yazılımı hem gerçek zamanlı hem de sonradan değerlendirme için GNSS ile çeşitli konumlandırma modlarını destekler. Bu yüzden deney esnasında yapılan RT-PPP yöntemi için RTKLIB yazılım paketi tercih edilmiş olup, PP-Kinematik yönteminin prosesi de bu yazılımda yapılmıştır.

### 7.3.2. Kinematik GPS-PPP

Yapılarda, kendiliğinden veya insan faktöründen kaynaklı oluşan dinamik hareketlerin tespitinde ve izlenmesinde sonradan değerlendirme-PPP yönteminin doğruluğu birçok çalışmada ve bu tez kapsamında da incelenmiştir. IGS’e bağlı farklı analiz merkezlerinin ürettiği farklı gecikme periyoduna bağlı uydu yörünge ve saat düzeltme ürünleri için 3 farklı veri tipi sunar (final, rapid ve ultra-rapid ürünler). Bu farklı ürünlerin zamana göre doğruluğu değişmektedir. Ürünler içerisinde doğruluğu

Tablo 7.2: Bağıl Konum Belirleme yönteminde yapılan proses seçenekleri.

|                                      |                                                                        |                        |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Veri Girişi                          | RINEX Gözlem dosyası: Gezici                                           | Rover.21O              |
|                                      | RINEX Gözlem dosyası: Sabit istasyon                                   | Base.21O               |
|                                      | RINEX Navigasyon dosyası                                               | brdm2021331.rnx        |
|                                      | Örnekleme Aralığı (s)                                                  | 0.05                   |
| Girdi Parametreleri                  | Konumlama Modu                                                         | Kinematic              |
|                                      | Frekanslar                                                             | L1+L2/E5b              |
|                                      | Filtre Tipi                                                            | Forward                |
|                                      | Kesme Açısı (°)/SNR Maskesi (dBHz)                                     | 10°/OFF                |
|                                      | Alıcı Dinamikleri/Katı yeryuvarı Gelgit Düzeltmesi                     | OFF/OFF                |
|                                      | İyonosferik/Troposferik Düzeltme                                       | Broadcast/Saastamoinen |
|                                      | Uydu Efemeris/Saat                                                     | Broadcast              |
|                                      | Alıcı-Özerk Bütünlük Takibi (RAIM) Hata Tarama ve Giderme (FDE)        | ×                      |
|                                      | GNSS Tipi                                                              | GPS                    |
| Eşik Değerler                        | Tamsayı Belirsizlik Çözümü (GPS/GLO/BDS)                               | Continuous             |
|                                      | Belirsizliği sabitlemek için min. oran                                 | 3                      |
|                                      | Belirsizliği sabitlemek için min. kitlenme/ kesme açısı (°)            | 0/0                    |
|                                      | Belirsizliği sıfırlamak için kesinti/ Faz sıçraması eşik değeri (m)    | 5/0.050                |
|                                      | Gezici ile sabit arasındaki farkların max. zamanı (s)                  | 30.0                   |
|                                      | GDOP eşiği/Kalman filtresi inovasyon eşiği (m)                         | 30.0/30.0              |
|                                      | # Filtre iterasyon sayısı                                              | 1                      |
|                                      | Sabit/tutma için min. belirsizlik                                      | 4/5                    |
|                                      | Her epokta min. belirsizlik/alıcı tarafından varyans                   | 10/OFF                 |
|                                      | Belirsizlik çözümü için konum varyans eşiği/ Filtre                    | 0.1000/ON              |
|                                      | Belirsizliği tutmak için varyans                                       | 0.1000                 |
| Ölçü Hataları (1-sigma)              | Kod/Taşıyıcı faz hata oranları L1/L2                                   | 300.0/300.0            |
|                                      | Taşıyıcı faz hatası temel terimi a+b/yüksekliğe bağlı terimi sinEI (m) | 0.003/0.003            |
|                                      | Taşıyıcı Faz/baz uzunluğu (m/10km)                                     | 0.000                  |
|                                      | Doppler Frekansı (Hz)                                                  | 1.000                  |
| Proses Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s)) | Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s <sup>2</sup> )                           | 10.0/10.0              |
|                                      | Taşıyıcı Faz Biası (devir)                                             | 0.0001                 |
|                                      | Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)                                     | 0.001                  |
|                                      | Zenit Troposferik Gecikme (m)                                          | 0.0001                 |
|                                      | Uydu Saat Sürekliliği                                                  | 5.00E-12               |

en yüksek olan final, PP-PPP yöntemi için seçilmesi düşünülmüştür. Çalışmada sadece-GPS gözlemleri ile RT-PPP çözümü yapıldığından dolayı PP-PPP yöntemi için IGS'in üretmiş olduğu sadece-GPS gözlemlerine dayalı final ürünleri kullanılmıştır. Aynı şekilde yöntemlerin çözümleri için RTKLIB yazılım paketi seçilmesinden dolayı bu yöntemin çözümünde de aynı yazılım paketinin rtkpost uygulaması ile prosesler yapılmıştır.

Tablo 7.3: PP-PPP ve N-RT-PPP yönteminde yapılan proses seçenekleri.

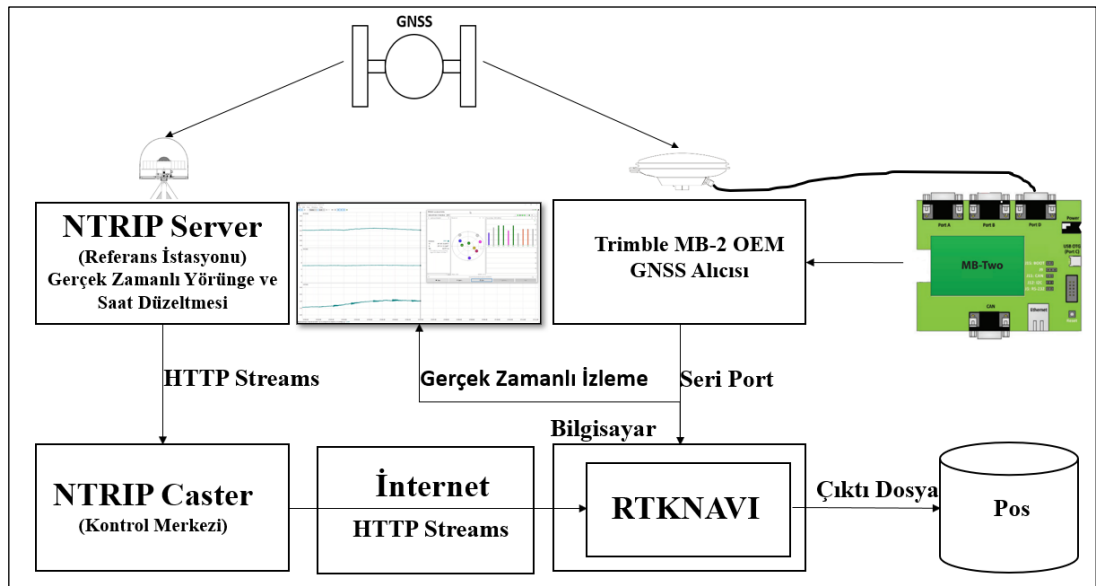
|                                      |                                                                        |                                  |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Veri Girişi                          | RINEX Gözlem dosyası: Gezici                                           | RT-PPP.obs                       |
|                                      | RINEX Navigasyon dosyası                                               | RT-PPP.nav/ brdm2021331.mx*      |
|                                      | RINEX Yörünge dosyası                                                  | igc21856.sp3/ igs21856.sp3*      |
|                                      | RINEX Saat dosyası                                                     | igc21856.clk/ igs21856.clk_30s*  |
|                                      | Örnekleme Aralığı (s)                                                  | 0.05                             |
| Girdi Parametreleri                  | Konumlama Modu                                                         | PPP-Kinematic                    |
|                                      | Frekanslar                                                             | L1+L2/E5b                        |
|                                      | Filtre Tipi                                                            | Forward                          |
|                                      | Kesme Açısı (°)/SNR Maskesi (dBHz)                                     | 10°/OFF                          |
|                                      | Alıcı Dinamikleri/Katı yeryuvarı Gelgit Düzeltmesi                     | OFF/Solid+OTL                    |
|                                      | İyonosferik/Troposferik Düzeltme                                       | Iono-Free LC / Estimate ZTD+Grad |
|                                      | Uydu Efemeris/Saat                                                     | Precise                          |
|                                      | Uydu Anteni Faz Merkezi Düzeltmesi                                     | ✓                                |
|                                      | Alıcı Anteni Faz Merkezi Düzeltmesi                                    | ✓                                |
|                                      | Faz Sıçrama Etkisi Düzeltmesi                                          | ✓                                |
|                                      | Gölgelenen Uyduları Reddet (GPS Block IIA için)                        | ✓                                |
|                                      | Alıcı-Özerk Bütünlük Takibi (RAIM) Hata Tarama ve Giderme (FDE)        | ✓                                |
|                                      | DCB (Diferansiyel Kod Bias) Düzeltmesi                                 | ✓                                |
|                                      | GNSS Tipi                                                              | GPS                              |
| Eşik Değerler                        | Tamsayı Belirsizlik Çözümü (GPS/GLO/BDS)                               | Continuous                       |
|                                      | Belirsizliği sabitlemek için min. oran                                 | 3                                |
|                                      | Belirsizliği sabitlemek için min. kitlenme/ kesme açısı (°)            | 0/0                              |
|                                      | Belirsizliği sıfırlamak için kesinti/ Faz sıçraması eşik değeri (m)    | 5/0.050                          |
|                                      | Gezici ile sabit arasındaki farkların max. zamanı (s)                  | 30.0                             |
|                                      | GDOP eşiği/Kalman filtresi inovasyon eşiği (m)                         | 30.0/30.0                        |
|                                      | # Filtre iterasyon sayısı                                              | 1                                |
|                                      | Sabit/tutma için min. belirsizlik                                      | 4/5                              |
|                                      | Her epokta min. belirsizlik/alıcı tarafından varyans                   | 10/OFF                           |
|                                      | Belirsizlik çözümü için konum varyans eşiği/ Filtre                    | 0.1000/ON                        |
|                                      | Belirsizliği tutmak için varyans                                       | 0.1000                           |
| Ölçü Hataları (1-sigma)              | Kod/Taşıyıcı faz hata oranları L1/L2                                   | 300.0/300.0                      |
|                                      | Taşıyıcı faz hatası temel terimi a+b/yüksekliğe bağlı terimi sinEl (m) | 0.003/0.003                      |
|                                      | Taşıyıcı Faz/baz uzunluğu (m/10km)                                     | 0.000                            |
|                                      | Doppler Frekansı (Hz)                                                  | 1.000                            |
| Proses Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s)) | Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s <sup>2</sup> )                           | 10.0/10.0                        |
|                                      | Taşıyıcı Faz Biası (devir)                                             | 0.0001                           |
|                                      | Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)                                     | 0.001                            |
|                                      | Zenit Troposferik Gecikme (m)                                          | 0.0001                           |
|                                      | Uydu Saat Sürekliliği                                                  | 5.00E-12                         |
| Ek Veri Girişi                       | Uydu Anten Faz Merkezi Kayıklığı Dosyası                               | igs14.atx                        |
|                                      | Alıcı Anten Faz Merkezi Kayıklığı Dosyası                              | igs14.atx                        |
|                                      | DCB (Diferansiyel Kod Bias) Veri Dosyası                               | P1C12102.DCB                     |
|                                      | EOP (Yer Dönme Parametreleri) Veri Dosyası                             | EOP.txt                          |

(Tablo 7.3'te bulunan \* sembolü sadece PP-PPP için kullanılan parametreleri ifade etmektedir.)

Bu yöntemde girilen tüm parametreler Tablo 7.3'te detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Ayrıca yapı sağlığı izleme uygulamalarında hızlı tehlike değerlendirme amaçlı çalışmalarda kullanılan N-RT-PPP yöntemi bu çalışmada da değerlendirilmiştir. Bu yöntem için IGC01 gerçek zamanlı veri akışından üretilen uydu yörünge ve saat düzeltme bilgilerini CDDIS (The Crustal Dynamics Data Information System)'in oluşturmuş olduğu arşivden sağlanmıştır [204]. N-RT-PPP yöntemine ait çözümler, PP-PPP yönteminde olduğu gibi RTKLIB programında yapılmıştır. İki yönteminde RTKLIB programında yapılan parametre ayarları Tablo 7.3'te detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Bu tezin Deney Sonuçları bölümünde PP-PPP yöntemi ve N-RT-PPP yöntemi sırasıyla kullanılan ürünlerden dolayı IGS-F ve IGS-RT olarak adlandırılmıştır.

### 7.3.3. Gerçek Zamanlı GPS-PPP

IGS tarafından başlatılan IGS-RTS hizmeti projesi ile birlikte IGS01/IGC01, IGS02 ve IGS03 RTS ürünleri internet üzerinden NTRIP veri iletim protokolüyle RTCM/SSR veri formatında yayın akışı sağlanarak gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltme bilgileri elde edilebilmektedir. Bu bağlamda kullanıcıya sunulan ücretsiz düzeltme bilgileri ile birlikte RT-PPP uygulamalarına ilgi artmıştır.



Şekil 7.3: RT-PPP yönteminin şematik görünümü.

Tablo 7.4: RT-PPP yönteminde yapılan proses seçenekleri.

|                                      |                                                                        |                                       |                        |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Girdi Akışı                          | Gezici, Tür, Format                                                    |                                       | ✓, Dosya, RTCM3        |
|                                      | Düzeltilme, Tür, Format                                                |                                       | ✓, NTRIP Client, RTCM3 |
|                                      | NTRIP Client (Kullanıcı) seçenekleri                                   | NTRIP Caster (Kontrol Merkezi) adresi | products.igs-ip.net    |
|                                      |                                                                        | Port                                  | 2101                   |
|                                      |                                                                        | Mountpoint                            | IGC01                  |
|                                      |                                                                        | User ID                               | ****                   |
|                                      |                                                                        | Password                              | *****                  |
| Girdi dosya yolu                     |                                                                        | -----\RT-PPP.log                      |                        |
| Girdi Parametreleri                  | Konumlama Modu                                                         |                                       | PPP Kinematic          |
|                                      | Kesme Açısı (°)/SNR Maskesi (dBHz)                                     |                                       | 10°/OFF                |
|                                      | Ham Gözlemleri ağırlıklandırma                                         |                                       | Elevation              |
|                                      | Alıcı Dinamikleri/Katı yeryuvarı Gelgit Düzeltmesi                     |                                       | OFF/Solid+OTL          |
|                                      | İyonosferik Düzeltme                                                   |                                       | Iono-Free LC           |
|                                      | Troposferik Düzeltme                                                   |                                       | Estimate ZTD+Grad      |
|                                      | Uydu Efemeris/Saat                                                     |                                       | Broadcast+SSR Com      |
|                                      | Uydu Anteni Faz Merkezi Düzeltmesi                                     |                                       | ✓                      |
|                                      | Alıcı Anteni Faz Merkezi Düzeltmesi                                    |                                       | ✓                      |
|                                      | Faz Sıçrama Etkisi Düzeltmesi                                          |                                       | ✓                      |
|                                      | Gölgelenen Uyduları Reddet (GPS Block IIA için)                        |                                       | ✓                      |
|                                      | Alıcı-Özerk Bütünlük Takibi (RAIM) Hata Tarama ve Giderme (FDE)        |                                       | ✓                      |
|                                      | DCB (Diferansiyel Kod Bias) Düzeltmesi                                 |                                       | ✓                      |
|                                      | GNSS Tipi                                                              |                                       | GPS                    |
| Eşik Değerler                        | Tamsayı Belirsizlik Çözümü (GPS/GLO/BDS)                               |                                       | Continuous             |
|                                      | Belirsizliği sıfırlamak için kesinti/ Faz sıçraması eşik değeri (m)    |                                       | 5/0.050                |
|                                      | GDOP eşiği/Kalman filtresi inovasyon eşiği (m)                         |                                       | 30.0/30.0              |
|                                      | # Filtre iterasyon sayısı                                              |                                       | 1                      |
|                                      | Sabit/tutma için min. belirsizlik                                      |                                       | 4/5                    |
|                                      | Her epokta min. belirsizlik/alıcı tarafından varyans                   |                                       | 10/OFF                 |
| Ölçü Hataları (1-sigma)              | Kod/Taşıyıcı faz hata oranları L1/L2                                   |                                       | 300.0/300.0            |
|                                      | Taşıyıcı faz hatası temel terimi a+b/yüksekliğe bağlı terimi sinEl (m) |                                       | 0.003/0.003            |
|                                      | Taşıyıcı Faz/baz uzunluğu (m/10km)                                     |                                       | 0.000                  |
|                                      | Doppler Frekansı (Hz)                                                  |                                       | 1.000                  |
| Proses Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s)) | Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s2)                                        |                                       | 10.0/10.0              |
|                                      | Taşıyıcı Faz Biası (devir)                                             |                                       | 0.0001                 |
|                                      | Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)                                     |                                       | 0.001                  |
|                                      | Zenit Troposferik Gecikme (m)                                          |                                       | 0.0001                 |
|                                      | Uydu Saat Sürekliliği                                                  |                                       | 5.00E-12               |
| Ek Veri Girişi                       | Uydu Anten Faz Merkezi Kayıklığı Dosyası                               |                                       | igs14.atx              |
|                                      | Alıcı Anten Faz Merkezi Kayıklığı Dosyası                              |                                       | igs14.atx              |
|                                      | DCB (Diferansiyel Kod Bias) Veri Dosyası                               |                                       | P1C12102.DCB           |
|                                      | EOP (Yer Dönme Parametreleri) Veri Dosyası                             |                                       | EOP.txt                |

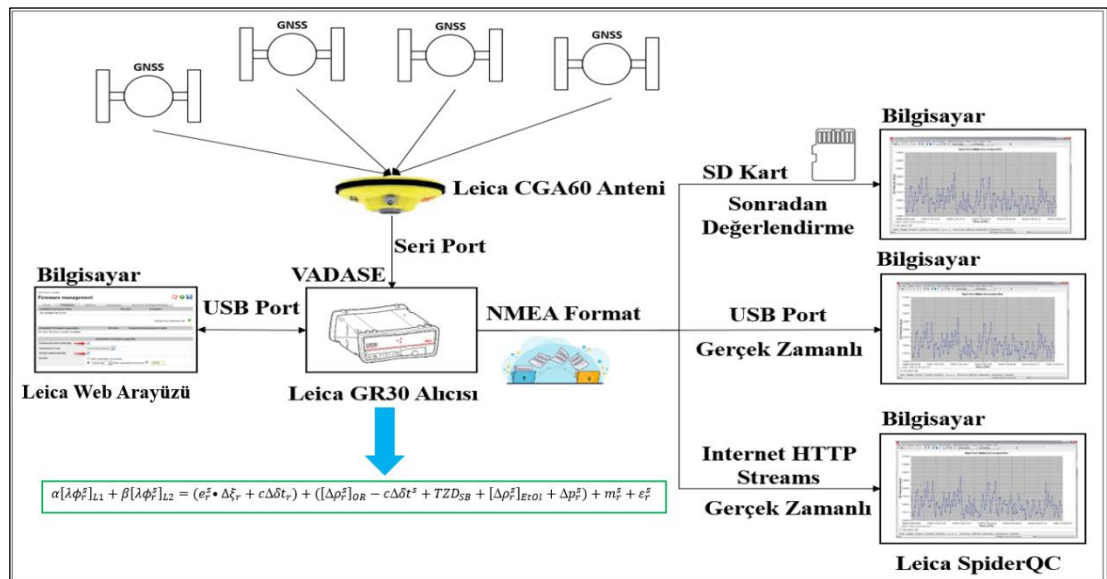
Çalışmamızda da RT-PPP yöntemi kullanarak düşey yönlü üretilen harmonik salınımların tespit edilmesinde ve gerçek zamanlı izlenilmesi için RTKLIB yazılımının rtknavi uygulama modülü ile çözüm yapılmıştır. Deneyler de çelik çubuğun sağ kısmında bulunan NovAtel GPS-702 GNSS anteni ile toplanan sadece-GPS ham gözlem verilerinin Ashcom (Ashtech Communicator) yazılım aracılığıyla anlık olarak kaydedilmiştir. Ashcom, Trimble MB-2 OEM alıcısı ile iletişim kurmak için değerlendirme kitinde sağlanan bir yazılım aracıdır. Ayrıca bu yazılım ile alıcı veri toplayacağı zamanda istenilen parametrelerin girilmesini ve toplanan verilerin anlık kaydedilmesini de sağlamaktadır. Bu uygulamada RTS ürünü olan IGC01 ürünün yayın akışının sağlanmasıyla elde edilen uydu yörünge ve saat düzeltmeleri ve kaydedilen ham gözlem verileri ile birlikte RT-PPP çözümü yapılmıştır. Her epokta elde edilen kesin koordinatlar, çıktı dosyasına kaydedilmektedir. RT-PPP tekniğinin işlem aşamaları Şekil 7.3'te ayrıntılı biçimde gösterilmiştir. Deneyler esnasında anlık olarak elde edilen düzeltmelerin internet servis aracılığıyla sağlandığından deney boyunca internet bağlantısı sürekli kontrol edilmiştir. RT-PPP yöntemi ile deney esnasında yapılan tüm harmonik hareketler izlenilmiştir. Deneylerde anlık uydu yörünge ve saat düzeltmeleri Şekil 7.3'te gösterilen NTRIP Caster için products.igs-ip.net:2101 adresi ile IGC01 yayın akışı sağlanarak elde edilmiştir. Düzeltme olarak IGC01 RTS ürünü kullanıldığı için sadece-GPS gözlemleri ile RT-PPP çözümü yapılmıştır. Rtknavi uygulamasında yapılan RT-PPP çözümüne ait dosya girişi ve ilgili parametreler Tablo 7.4'te verilmiştir.

Rtknavi uygulamasında yapılan RT-PPP çözümünden elde edilen koordinatlar, WGS84 datumunda coğrafi koordinatları sırasıyla enlem, boylam ve elipsoidal yükseklik olarak verilmiştir. Çalışmada düşey yönlü dinamik hareketler inceleneceği için herhangi bir koordinat sistemine dönüşüm yapılmasına gerek duyulmamakta olup elipsoidal yükseklikler kullanılmıştır.

#### **7.3.4. Gerçek Zamanlı GPS-VADASE**

Colosimo ve diğerleri (2011) tarafından, ham GNSS taşıyıcı faz gözlemleri ve bu gözlemlerden elde edilen anlık yayın efemeris bilgilerinin alınmasıyla GNSS alıcısının ardışık iki epok arasındaki yer değiştirme yani hız bilgisini sağlayan VADASE yaklaşımı ortaya atılmıştır. Bu tekniğin en önemli avantajları gerçek

zamanlı olarak alıcının üç konum bileşenine ait hız bilgisini vermesi ve uydu yörünge ve saat düzeltmeleri için internet bağlantısına gerek duymamasıdır. Ayrıca iki epok arasındaki farkın alınması ile tam sayı faz belirsizliğinin tahmin edilmesi ve uzun bir yakınsama süresi gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Deneyde çelik çubuğun sol kısmında bulunan Leica CGA60 GNSS anteni olan ve içerisinde VADASE özelliğine sahip Leica GR30 GNSS alıcısı ile gerçek zamanlı yer değiştirmeler kaydedilmiştir. GNSS alıcısının parametre ayarlarını girmek için alıcıya USB port ile bağlı bilgisayardan internet bağlantısı olmadan bağlı olduğu IP adres ve şifre girilerek alıcı içerisinde Leica RefWorkx yazılımı aracılığıyla oturum açılmıştır. Leica RefWorkx, Leica GR/GM-Serisi GNSS referans istasyonunda ve izleme alıcılarında çalışan yazılım çözümüdür. Hız veya yer değiştirme motoru Leica VADASE'nin RefWorx ürün yazılımı gömülü Leica web arayüzü kullanılarak etkinleştirilebilir ve devre dışı bırakılabilir. Bu yazılım aracılığı ile gerekli parametre ayarları yapılarak etkinleştirme sağlanmıştır. Etkinleştirmeden sonra GNSS antenin tahmini hızları ve yer değiştirmeleri iki yeni Leica tescilli NMEA tipi kullanılarak kaydedilmiştir. Bunlar ‘Leica Geosystems Velocity Measurement – LVM’ ve ‘Leica Geosystems Displacement Measurement – LDM’ mesajı olarak adlandırılan mesajlardır. Buna ek olarak, algılanan her yer değiştirme için, bu süre boyunca bileşen başına başlangıç zamanı, bitiş zamanı ve toplam yer değiştirme miktarı, sistemin olay günlüğü gibi bilgiler mesajlarda rapor edilmiştir.

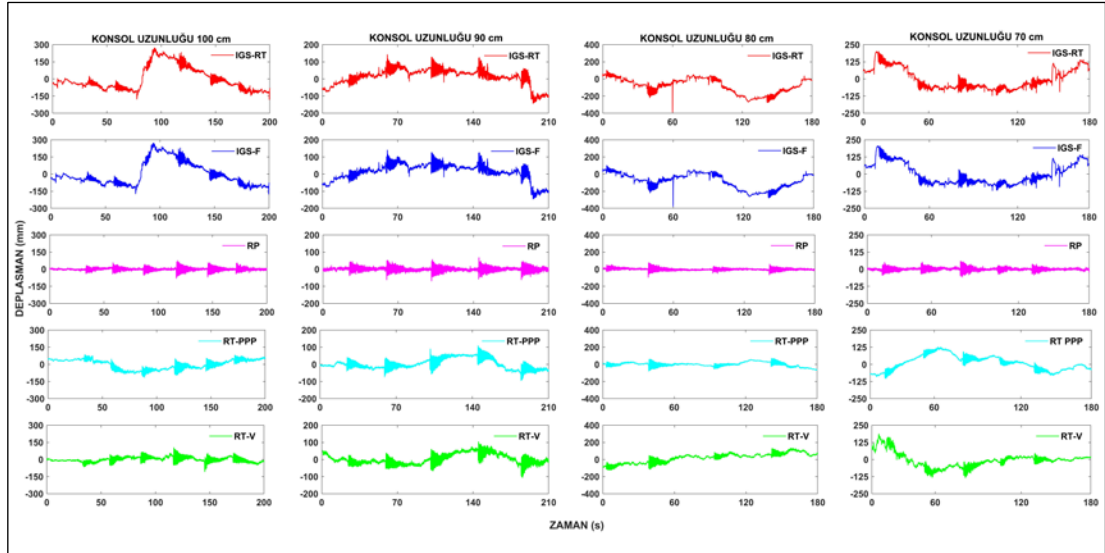


Şekil 7.4: RT-V yönteminin şematik görünümü.

RT-V yönteminde alıcı içerisinde hesaplanan hız ve yer değiştirmeler, standart NMEA formatlı mesajları kullanarak elde edilen bilgiler gerçek zamanlı olarak aktarılabilir veya alıcı da oturup açılabilir ve FTP (File Transfer Protocol) ile yayınlanabilir. Alıcıda açılan oturumda kaydedilen bilgiler sonradan değerlendirme için ayrıca SD kart ile alınabilir. Bu tez kapsamında kaydedilen hız ve yer değiştirme veri setlerini herhangi bir programa ihtiyaç duymadan SD kart ile alarak bilgisayarda bulunan MATLAB programlama dilinde diğer yöntemler ile karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

## 7.4. Deney Sonuçları

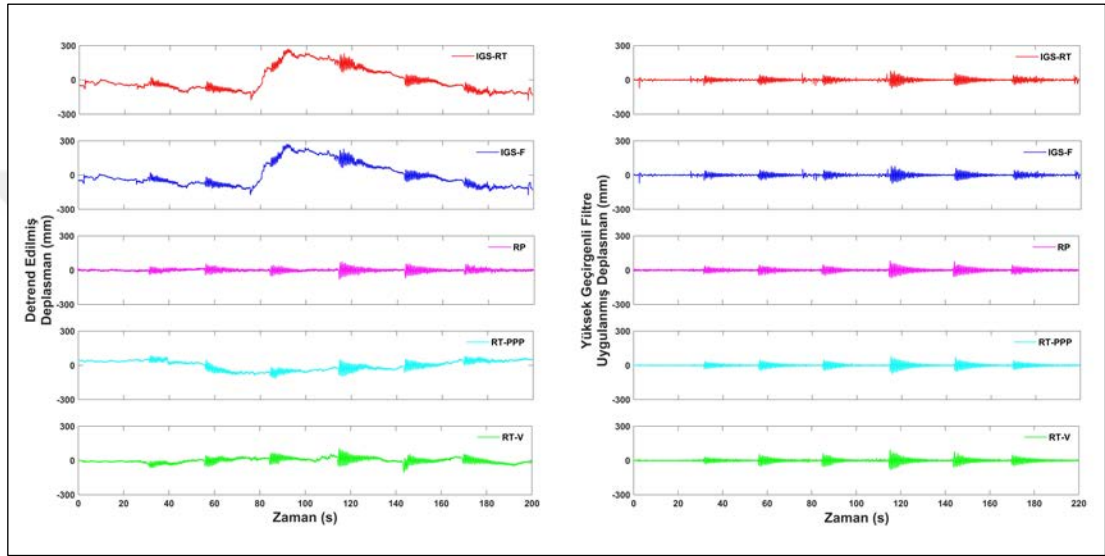
Bu bölümde, üzerinde düşey harmonik salınımlar üreten yassı çelik çubuk üzerine entegre edilmiş farklı alıcı/anten tipinde GNSS sensörler ile toplanan verilerin RT-PPP, RT-VADASE (V), N-RT-PPP (IGS-RT) ve PP-PPP (IGS-F) yöntemlerinin değerlendirilmesi ve sonuçların, birçok çalışmada referans olarak alınan RP yöntemi ile hem zaman hem de frekans alanında karşılaştırılması ve yorumlanmasını içermektedir. Ayrıca harmonik hareketler üreten çelik çubuk yapısını, sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek çubuğun konsol boyuna göre yer değiştirme dağılımını ve frekans değerleri matematiksel olarak, SAP2000 v23.3.1 programında hesaplanmıştır. RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin, mühendislik yapılarında gerçekleşen düşey yönlü deplasmanların yapı sağlığı izleme uygulamalarında performanslarını incelemek amacıyla 7.1.1’de açıklanan düşey harmonik salınım testleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 4 farklı konsol boyuna sahip çelik çubuk üzerinde her bir durum için ayrıca 4 tane toplamda 16 tane durum, sadece-GPS gözlem verileri ile ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca çalışmada IGS-RTS ve IGS-Final uydu yörünge ve saat düzeltme ürünleri kullanılarak kinematik-PPP yöntemi ile çözümler elde edilmiştir. Gerçek zamanlı şartlar altında IGS-RTS ürünü ile sonradan değerlendirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan IGS-Final ürününün harmonik salınımları yakalayabilme kabiliyetleri ve sonuçların anlamlı olup olmadığı incelenmiştir. Deneylerde tüm düşey harmonik salınım testleri Şekil 7.5’te gösterilmiştir. Her farklı konsol boylarına sahip durumlar ayrı ayrı zaman serisinde gösterilmiştir. Bunun sebebi gerçek zamanlı yöntemler ile değerlendirme yapıldığı için yassı çelik çubuğun konsol boyunun o anda



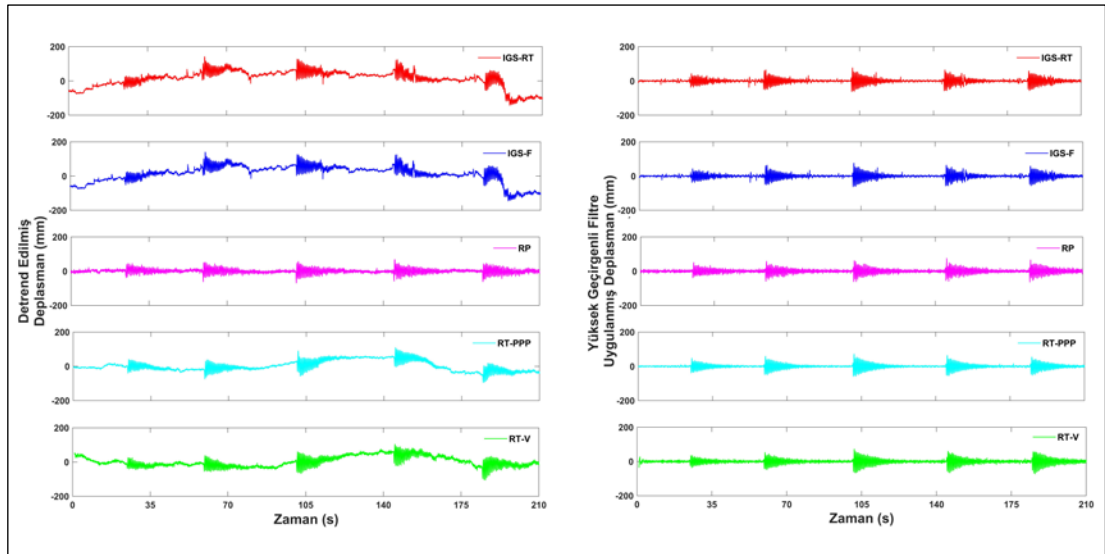
Şekil 7.5: IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V çözümlerinden elde edilen düşey deplasman hareketleri.

değiştirilmesinden dolayı her bir konsol boyuna bağlı zaman serisi şeklinde verilmiştir. Şekilde pembe rengi 20 Hz örnekleme aralığında, yöntemlerin karşılaştırılmasında referans olarak alınan RP çözümden elde edilen düşey deplasman hareketlerini, mavi renk IGS-Final ürünlerini kullanarak PP-PPP çözümünden elde edilen düşey deplasman bilgisini, kırmızı renk gerçek zamanlı koşullarda üretilen RTS ürünleri ile N-RT-PPP çözümünden elde edilen deplasman bilgisini, turkuaz rengi RT-PPP çözümünden elde edilen düşey deplasman bilgisini ve son olarak yeşil renk RT-VADASE çözümünden elde edilen düşey deplasman bilgisini göstermektedir. RP çözümünden elde edilen zaman serisinin dalgalanmaların çok küçük miktarda fakat yaklaşık düzgün ve tutarlı olduğu açıkça görülmektedir. RT-PPP, PP-PPP ve N-RT-PPP çözümlerinden elde edilen zaman serilerinde farklı konsol boylarında tüm durumlar için düşey deplasman bileşeninde dalgalanmalar gözükmemektedir. Bu davranışın PPP yöntemine dayalı çözümlerde, PPP'nin doğası gereği yakınsama süresinden ve faz belirsizliği çözümünden kaynaklanmaktadır [203]. Benzer dalgalanma RT-V çözümünden elde edilen zaman serilerinde de gözlemlenmiştir. RT-V yönteminde deplasmanları bulmak için hız bileşenlerinin integrali alınarak zamanla biriken yer değiştirmelerin olası yanlış modellemelerden kaynaklı hataların birikmesi sonucu deplasman bileşeninde dalgalanmalar ortaya çıkmaktadır [95]. Ayrıca tüm yöntemlerde kullanılan GNSS alıcılarının gürültüleri bu dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu tez çalışmasının asıl amacı kısa süreli (15-25s) dinamik hareketlerin RT-PPP ve RT-V yaklaşımı ile tespit edilmesine odaklı olduğu için yakınsamadan

kaynaklı uzun süreli dalgalanmaların ve deplasmanlardaki kaymalar önemli bir sorun teşkil etmemektedir. Düşey harmonik salınım testlerinden elde edilen deney setlerinde görülen kısa ve uzun süreli dalgalanmaların ortadan kaldırabilmesi ve beyaz gürültünün giderilebilmesi için farklı filtreleme teknikleri kullanılabilir. Bunun için çalışmada yapılan deneylere ve kullanılan tüm yöntemlere ait zaman alanında, kesme frekansı 0.5 Hz olan beşinci dereceden Butterworth yüksek geçiş filtresi uygulanarak filtrelenmiştir [12], [63].

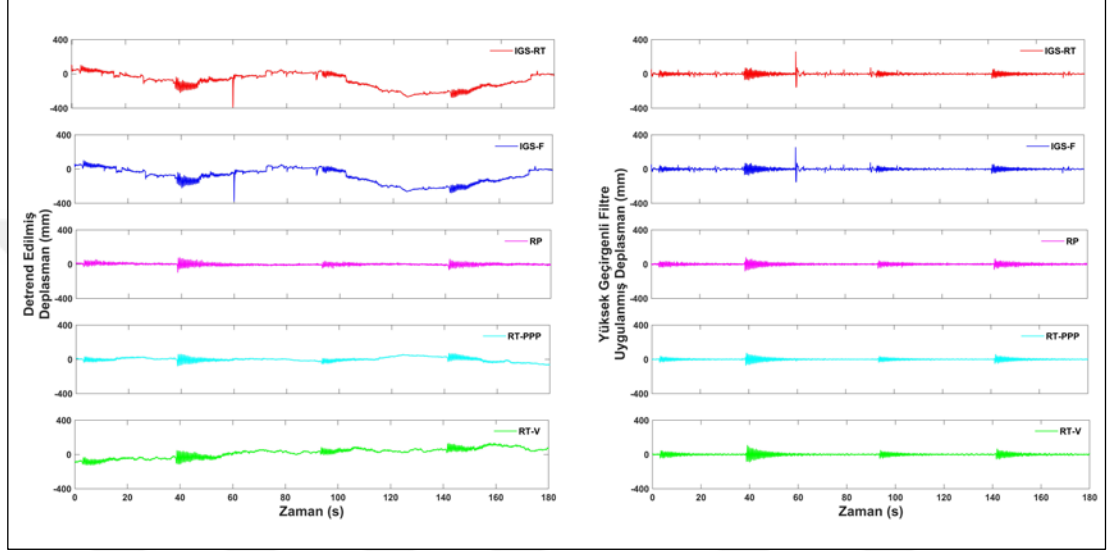


Şekil 7.6: Konsol boyu 100 cm olan Filtrelenmemiş/Filtrelenmiş GPS tabanlı çözümler.

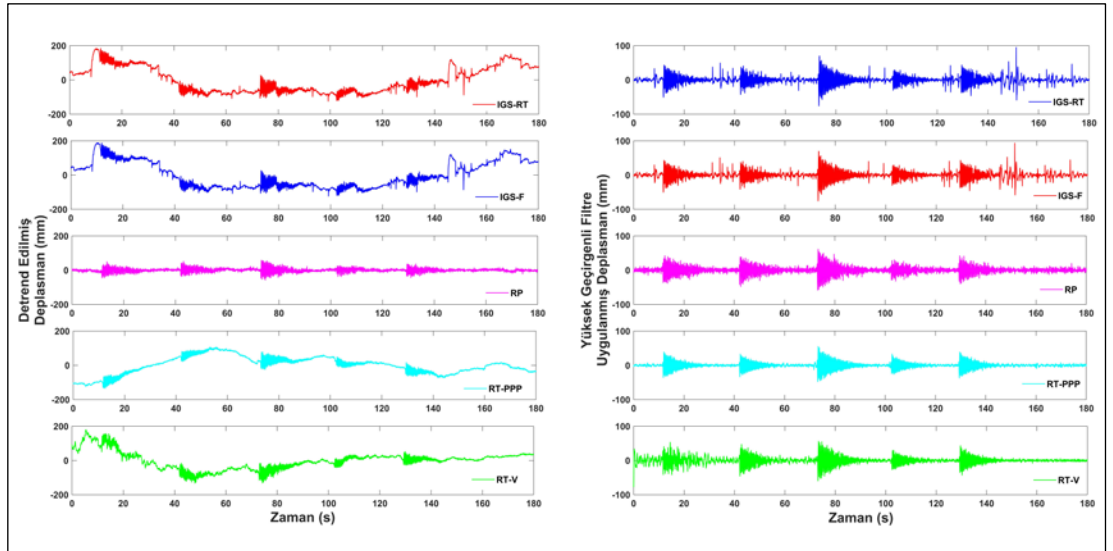


Şekil 7.7: Konsol boyu 90 cm olan Filtrelenmemiş/Filtrelenmiş GPS tabanlı çözümler.

Deneysel esnasında RT-PPP yöntemi ile çözüm yapılırken bazı epoklarda veri kaybı yaşanmıştır. Bunun sebebi alıcı antenin istenilen aralıkta veri toplayamaması durumundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca veri kaybını önlemek için interpolasyon yöntemine başvurulmuştur. Epok kayıpları, deneylerde eğrisel harmonik hareketler yapıldığı için interpolasyon türlerinden en iyi doğruluğu veren spline interpolasyon yöntemi ile MATLAB programlama dilinde giderilmiştir.



Şekil 7.8: Konsol boyu 80 cm olan Filtrelenmemiş/Filtrelenmiş GPS tabanlı çözümler.



Şekil 7.9: Konsol boyu 70 cm olan Filtrelenmemiş/Filtrelenmiş GPS tabanlı çözümler.

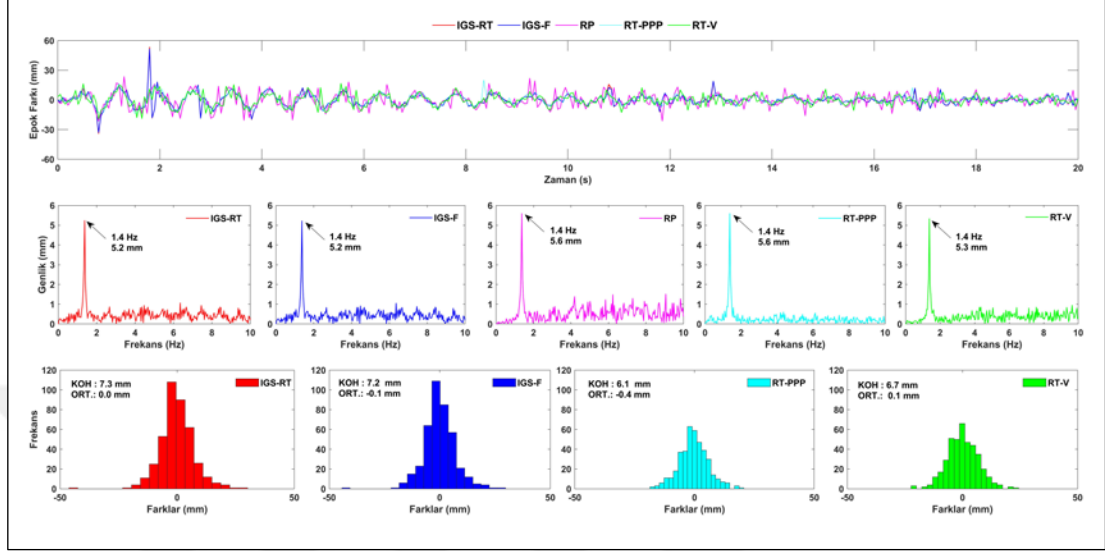
Aynı durum IGS-RT ve IGS-F yöntemin de uygulanmıştır. Çünkü RT-PPP yönteminde kullanılan ham gözlem verileri IGS-RT ve IGS-F yönteminde de kullanılmıştır. Şekil 7.6 ve Şekil 7.9 arasında 4 farklı konsol boylarına bağlı olarak filtrelenmemiş ve filtrelenmiş durumlar aynı şekil içerisinde gösterilmiştir. Farklı konsol boylarındaki tüm durumlar için filtrelemeden sonra düşey yönlü dalgalanmaların ortadan kalktığı şekillerde açıkça görülmüştür.

#### **7.4.1. Epok Farkı Sonuçları (Filtrelenmemiş)**

##### **7.4.1.1 Konsol Boyu 100 cm olan Çubuk Deneyi**

Çalışma kapsamında, ilk olarak konsol boyu 100 cm olan yassı çelik çubuğun düşey harmonik salınım deneylerinde tüm yöntemlerin çözümleri değerlendirilmiştir. Tezin bu kısmında düşey sönümlü harmonik hareketlerin gerçek zamanlı şartlar altında filtreleme uygulamadan RT-V yönteminin direkt olarak epok farklarının hesaplamasından dolayı diğer yöntemlerinde epok farkları alınarak deplasman zaman serileri ve zaman serisindeki baskın frekans ve genlik değerleri Fast Fourier Transform (FFT) ile elde edilerek her durum için analiz edilecektir. Tek bir GNSS alıcısına dayalı IGS-RT, IGS-F, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinden elde edilen düşey deplasmanlar, RP referans alınarak farkları incelenecektir. Şekil 7.10, 7.11, 7.12 ve 7.13'te sırasıyla ilk 4 durum için şekillerin üst kısmında RP, IGS-RT, IGS-F, RT-PPP ve RT-V çözümlerinden elde edilen epok farkları zaman serisini, orta kısmında FFT spektrumlarını ve alt kısımda ise RP yönteminden olan farklarını içeren istatistiksel olasılık dağılım grafiği verilmiştir. Deneylerde çelik çubuğun konsol boylarının aynı kalmasından dolayı beklenen baskın frekans sonuçları yaklaşık aynı değere sahip olması beklenmektedir. Fakat her durum için genliklerde farklılıklar bulunabilir. Bunun sebebi çelik çubuğa uygulanan kuvvet herhangi bir ölçüm cihazından uygulanmadığı ayrıca rastgele insan eli ile uygulanan kuvvet olduğu için her durumda farklı genlik değerleri ile karşılaşılması mümkündür. Konsol boyu 100 cm olan çelik çubuğun, düşey sönümlü harmonik salınımına ait Durum 1 için Şekil 7.10'un üst kısmında filtreleme yapılmaksızın epok farkı zaman serisi gösterilmiştir. Bu zaman serisinde PP-PPP temelli çözümlerde bazı zaman aralıklarında epok farklarında meydana gelen sıçramalar görülmektedir. Bu durum PPP yönteminin doğası gereği

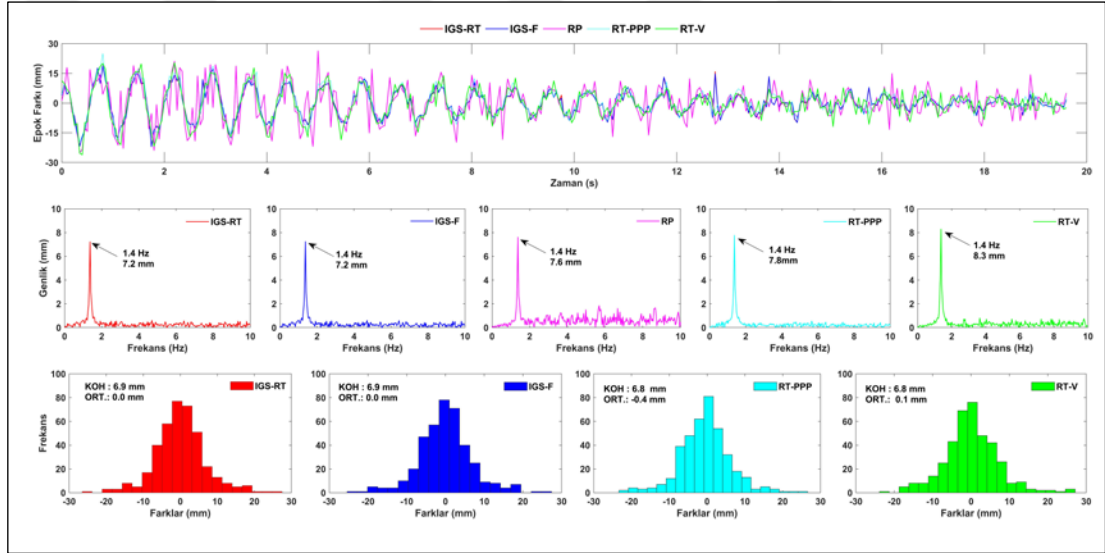
kısa süreli dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Zaman serisinde 5 yönteme ait çözümlerde epok farkları birbiri ile tutarlı olduğu fakat yöntemlerde küçük epok farkı sıçraması gözükmemektedir.



Şekil 7.10: 1. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Küçük sıçramalar en fazla RP yöntemine ait çözümlerde oluşmaktadır. Bunun sebebi yöntem gereği kullanılan iki GNSS alıcısının sinyal gürültülerinin toplamı, diğer yöntemlerde kullanılan tek alıcı sinyal gürültüsünden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şeklin orta kısmında ise epok farkı zaman serisine ait frekans alanında FFT spektrumları yer almaktadır. Durum 1 için tüm yöntemlere ait çözümlerden düşey harmonik salınımın baskın frekans değerleri aynı olup, 1.4 Hz olarak bulunmuştur. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise 5.2 ila 5.6 mm arasında değişmektedir. Mühendislik yapılarına ilişkin GNSS tabanlı ölçüm tekniklerine dayalı birçok çalışmada RP yöntemi referans alınarak farklı yöntemler karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında da RP yöntemi referans alındığında diğer yöntemlere ait genlik değerleri kıyaslandığında milimetre altında birbiri ile tutarlı sonuçlar ortaya koyulmuştur. Genlik değerlerindeki bu fark, her yöntem için kullanılan GNSS alıcı/anten tipinden kaynaklı gürültülerden ve yöntemlerde kullanılan parametrelerden kaynaklanmaktadır. Şeklin alt kısmında ise RP çözümüne göre diğer yöntemlerin olasılık dağılım grafikleri gösterilmiştir. Referans alınan yönteme göre diğer 4 yöntemin Karesel Ortalama Hataları (KOH) milimetre seviyesinde olup yaklaşık 6-7 mm arasında değişim göstermektedir. Bu farklılıkların oluşmasında,

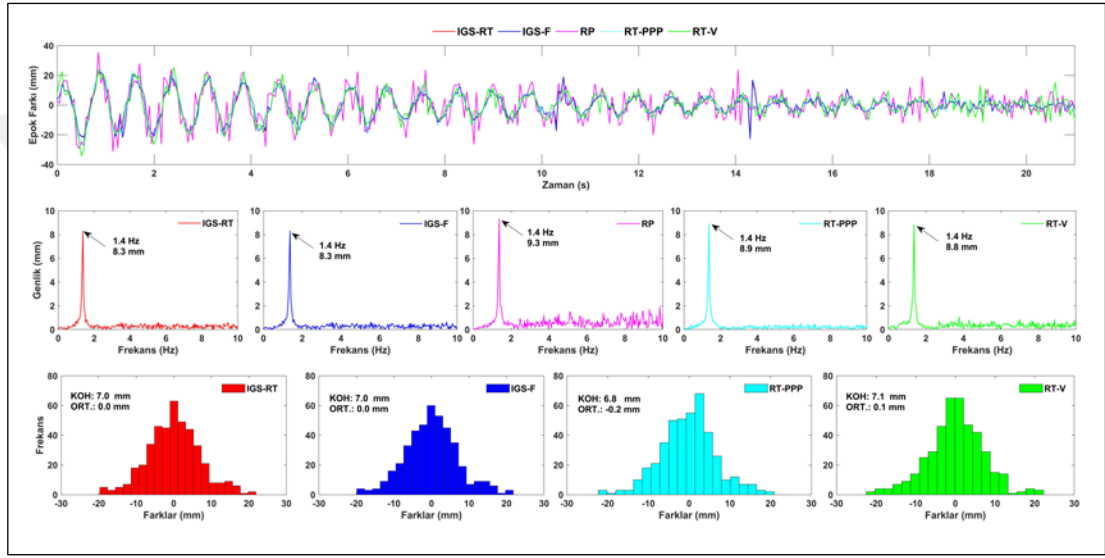
filtreleme uygulamadan ölçüm esnasında meydana gelen uyuşumsuz (outlier) ölçülerin çıkarılmaması, gerçek zamanlı toplanan verilerin alıcı/antenlerden dolayı epok kayıpları, yöntemlerin doğası gereği hataları, GNSS alıcı/anten sinyal gürültü oranları, kullanılan ürünlerin hassasiyeti ve internet kaynaklı gecikmeler neden olmaktadır. Benzer düşey sönümlü harmonik hareket Şekil 7.11’de Durum 2’ye ait epok farkı zaman serisi, buna karşılık frekans alanındaki FFT spektrumları ve istatistiksel olarak olasılık dağılımı verilmiştir. Durum 2’ye ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisinde tüm yöntemlerin düşey harmonik salınımı boyunca birbiri ile tutarlı olduğu fakat RP yönteminde Durum 1’e göre daha açık bir şekilde alıcı sinyal gürültüsünün etkisi görülmektedir. FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 1.4 Hz olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.11: 2. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

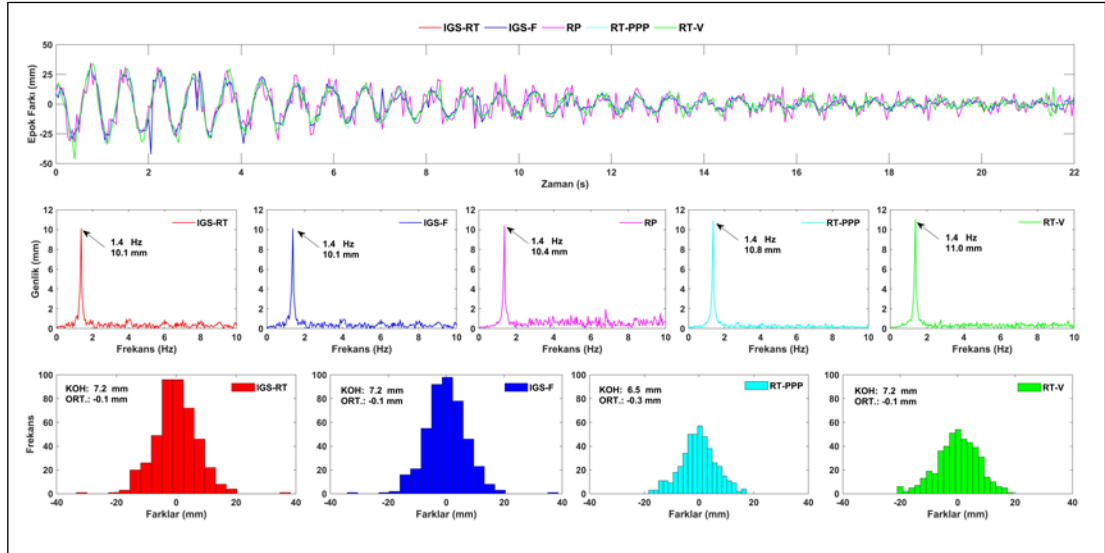
Baskın frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP’ye göre mm altında farklılıklar olduğu en yakın değerin RT-PPP çözümünden elde edildiği görülmüştür. İstatistiksel olarak olasılık dağılımında RP’ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP’ye göre 1 cm altında birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Aynı konsol boyuna ait fakat farklı genlik değerine sahip bir başka düşey harmonik salınım Durum 3’e ait Şekil 7.12’de epok farkı zaman serisi, FFT spektrumları ve olasılık dağılımları verilmiştir. Durum 3’e ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisinde tüm yöntemlerin düşey harmonik salınımı boyunca birbiri ile tutarlı olduğu fakat RP

yönteminde alıcı sinyal gürültüsünün etkisi görülmektedir. FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 1.4 Hz olarak tespit edilmiştir. Baskın frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre mm altında farklılıklar olduğu en yakın değer RT-PPP çözümünden elde edildiği görülmüştür. İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı gözlemlenmiştir. KOH değerlerinde ise RP'ye göre mm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar ortaya koyulmuştur.



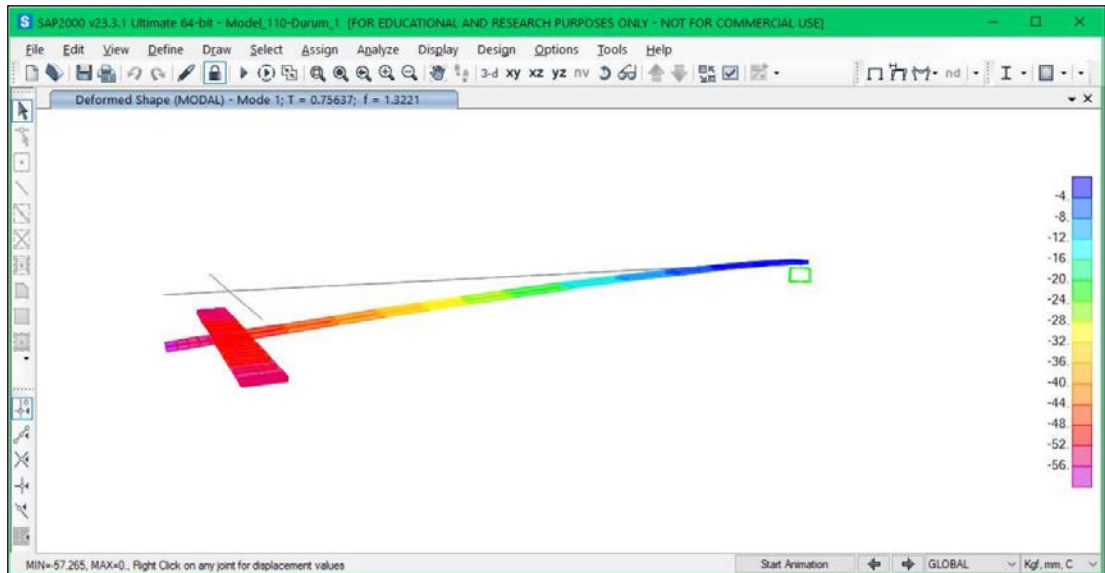
Şekil 7.12: 3. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Konsol boyu 100 cm olan çelik çubuğun serbest ucuna daha fazla kuvvet uygulanarak yöntemlerin yüksek genliklerdeki performansını incelemek için Durum 4'e ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisi, yöntemlerin frekans alanındaki FFT spektrumları ve istatistiksel olasılık dağılımı Şekil 7.13'e gösterilmiştir. Durum 4'e ait FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 1.4 Hz olarak ve bu frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre mm altında farklılıklar olduğu en yakın değer PP-PPP tabanlı çözümlerden elde edildiği görülmüştür. Bu durum, daha yüksek genliğe sahip düşey yönlü dinamik hareketlerin RT-PPP ve RT-V yöntemiyle yakalanabildiğini göstermiştir. İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı KOH değerlerinde ise RP'ye göre mm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7.13: 4. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Ayrıca konsol boyu 100 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi sonucu ortaya çıkan yer değiştirme dağılımı ve frekans değeri Şekil 7.14'te gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi çelik çubuğun frekans değeri 1.3 Hz olmakla birlikte GPS tabanlı 5 yönteme ait frekans değerleri 1.4 Hz'dir. Buna göre konsol boyu 100 cm olan çelik çubuğun düşey harmonik salınım frekansı, GPS tabanlı çözümler ve SEM ile bulunan değerler birbirine çok yakın ve tutarlıdır.

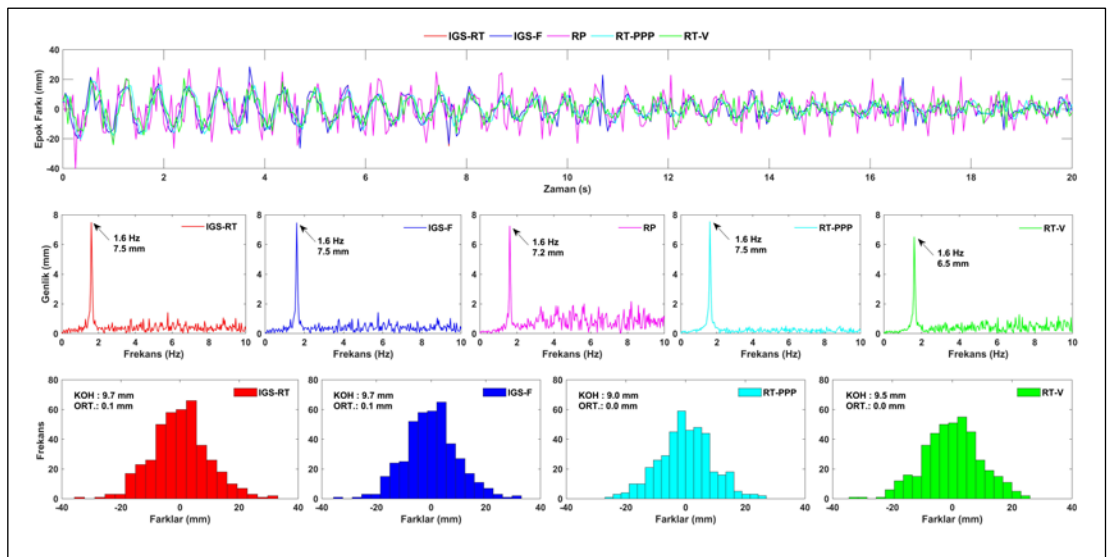


Şekil 7.14: Konsol boyu 100 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmesi.

#### 7.4.1.2. Konsol Boyu 90 cm olan Çubuk Deneyi

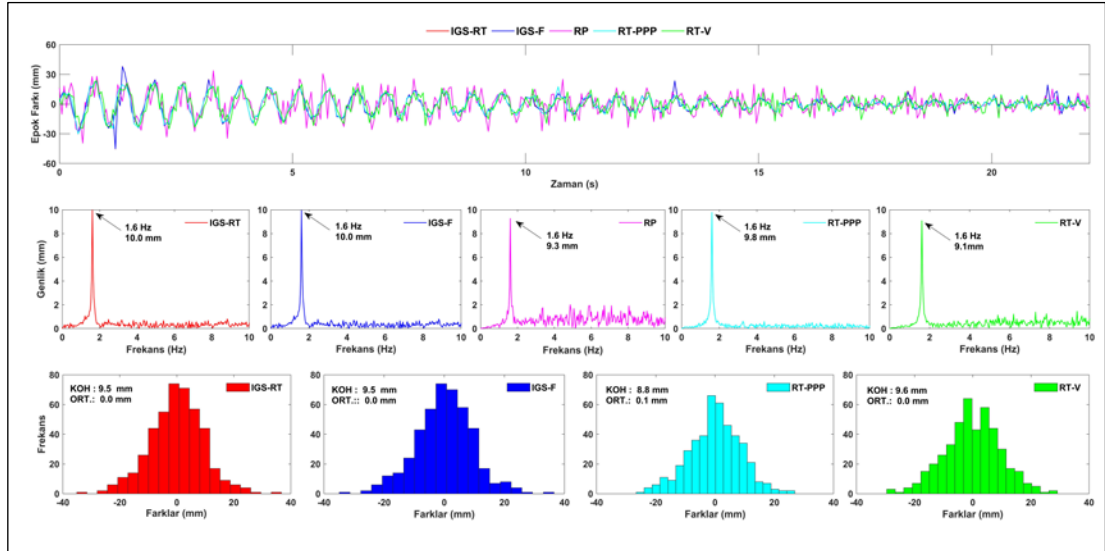
Bu bölümde konsol boyu 10 cm kısaltarak çelik çubuğun sabit kısmından hareketli ucuna kadar ki uzunluğunu 90 cm alarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında çubuk boyunu kısaltmakta ki amacımız yüksek frekanslı düşey yönlü harmonik salınımlar üretmektir. Konsol boyunun kısaltılması çelik çubuğun sabit olan kısmına yaklaştığını ifade eder ki bu da sabit kısmında bulunan çelik ağaç modelin, gerçek yapılarda örneğin köprü gibi köprü elemanlarından dolayı uydudan gelen sinyallerin yansıma veya engellenmesi durumu ile karşılaşma olasılığını arttırmaktadır. Deneylere başlamadan önce, konsol boyunu 90 cm ayarladıktan sonra PPP tabanlı çözümlerin temelinde yakınsama süresinden dolayı yaklaşık 30 dakika bekleme yapıldıktan sonra düşey harmonik salınımlar üretilmeye başlanmıştır. Tezin bu bölümünde, RT-V yönteminin direkt olarak epok farklarının hesaplamasından dolayı diğer 4 yönteme ait çözümlerin MATLAB programlama dilinde epok farkları alınarak deplasman zaman serileri ve zaman serisindeki baskın frekans ve genlik değerleri FFT spektrumu ile elde edilerek her durum için olasılık dağılım grafikleri oluşturulacaktır.

Deneylerde çelik çubuğun konsol boyunun aynı kalmasından dolayı beklenen baskın frekans sonuçları yaklaşık aynı değere sahip olması beklenmektedir. Fakat her durum için genliklerde farklılıklar bulunabilir.



Şekil 7.15: 5. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

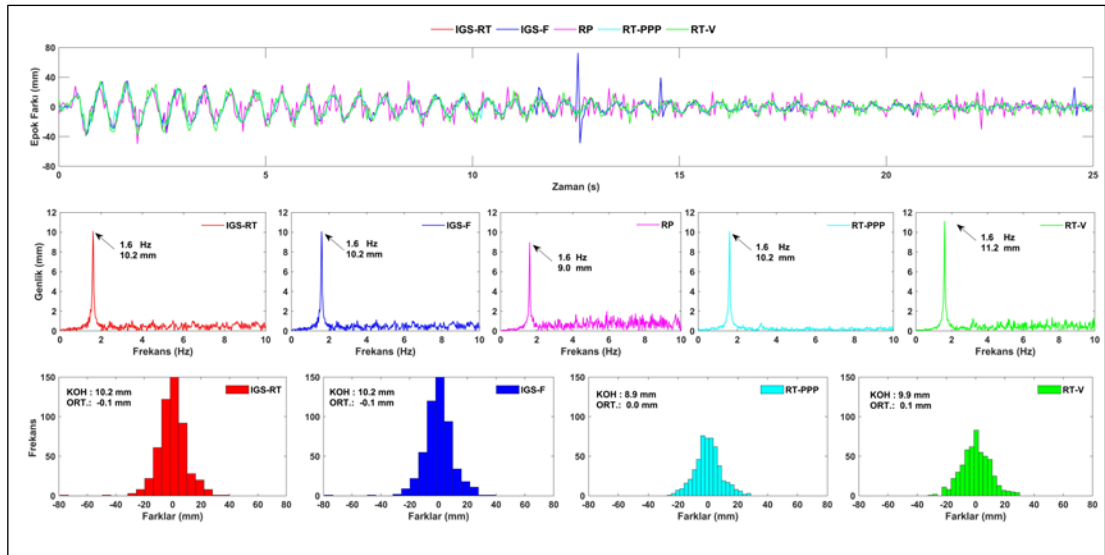
Konsol boyu 90 cm olan çelik çubuğun, düşey sönümlü harmonik salınımına ait Durum 5 için Şekil 7.15'in üst kısmında filtreleme yapılmaksızın epok farkı zaman serisi gösterilmiştir. Bu zaman serisinde PP-PPP temelli çözümlerde bazı zaman aralıklarında epok farklarında meydana gelen küçük sıçramalar görülmektedir. Bu durum PPP yönteminin doğası gereği kısa süreli dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Zaman serisinde 5 yöneme ait çözümlerde epok farkları birbiri ile tutarlı olduğu fakat yöntemlerde küçük epok farkı sıçraması gözükmemektedir. Küçük sıçramalar en fazla RP yöntemine ait çözümlerde oluşmaktadır. Bunun sebebi yöntem gereği kullanılan iki GNSS alıcısının sinyal gürültülerinin toplamı, diğer yöntemlerde kullanılan tek alıcı sinyal gürültüsünden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şeklin orta kısmında ise epok farkı zaman serisine ait frekans alanında FFT spektrumları yer almaktadır. Durum 5 için tüm yöntemlere ait çözümlerden düşey harmonik salınımın baskın frekans değerleri aynı olup, 1.6 Hz olarak bulunmuştur. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise 6.5 ila 7.5 mm arasında değişmektedir. RP yöntemi referans alındığında diğer yöntemlere ait genlik değerleri kıyaslandığında mm altında birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Genlik değerlerindeki bu fark, her yöntem için kullanılan GNSS alıcı/anten tipinden kaynaklı gürültülerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.16: 6. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Şeklin alt kısmında ise RP çözümüne göre diğer yöntemlerin olasılık dağılım grafikleri gösterilmiştir. Referans alınan yöneme göre diğer 4 yöntemin KOH değerleri mm

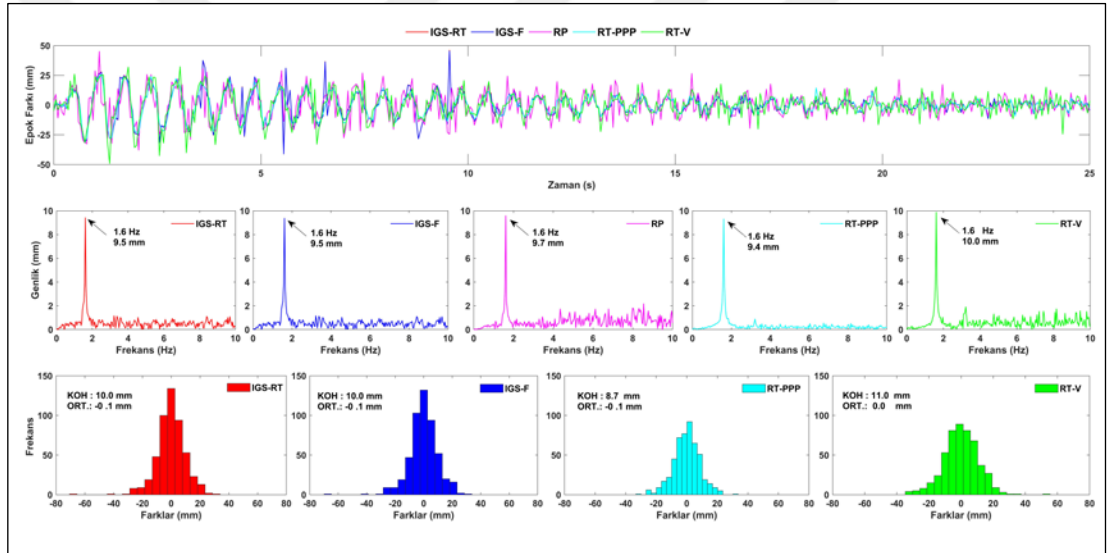
seviyesinde olup yaklaşık 9.0-9.7 mm arasında değişim göstermektedir. Bu farklılıkların oluşmasında, filtreleme uygulamadan ölçüm esnasında meydana gelen uyuşumsuz ölçülerin çıkarılmaması, gerçek zamanlı toplanan verilerin alıcı/antenlerden dolayı epok kayıpları, yöntemlerin doğası gereği hataları, GNSS alıcı/anten sinyal gürültü oranları, kullanılan ürünlerin hassasiyeti ve internet kaynaklı gecikmeler neden olmaktadır. Benzer düşey sönümlü harmonik hareket Şekil 7.16’da Durum 6’ya ait epok farkı zaman serisi buna karşılık frekans alanındaki FFT spektrumları ve istatistiksel olarak olasılık dağılımı verilmiştir. Durum 6’ya ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisinde tüm yöntemlerin düşey harmonik salınımı boyunca birbiri ile tutarlı olduğu fakat RP yönteminde Durum 5’e göre daha küçük alıcı sinyal gürültüsünün etkisi görülmektedir. FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 1.6 Hz olarak belirlenmiştir. Baskın frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP’ye göre mm altında farklılıklar olduğu en yakın değerin RT-V çözümünden elde edildiği görülmüştür. İstatistiksel olarak olasılık dağılımında RP’ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP’ye göre 1 santimetre altında birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7.17: 7. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Durum 7’ye ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisinde tüm yöntemlerin düşey harmonik salınımı boyunca birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı

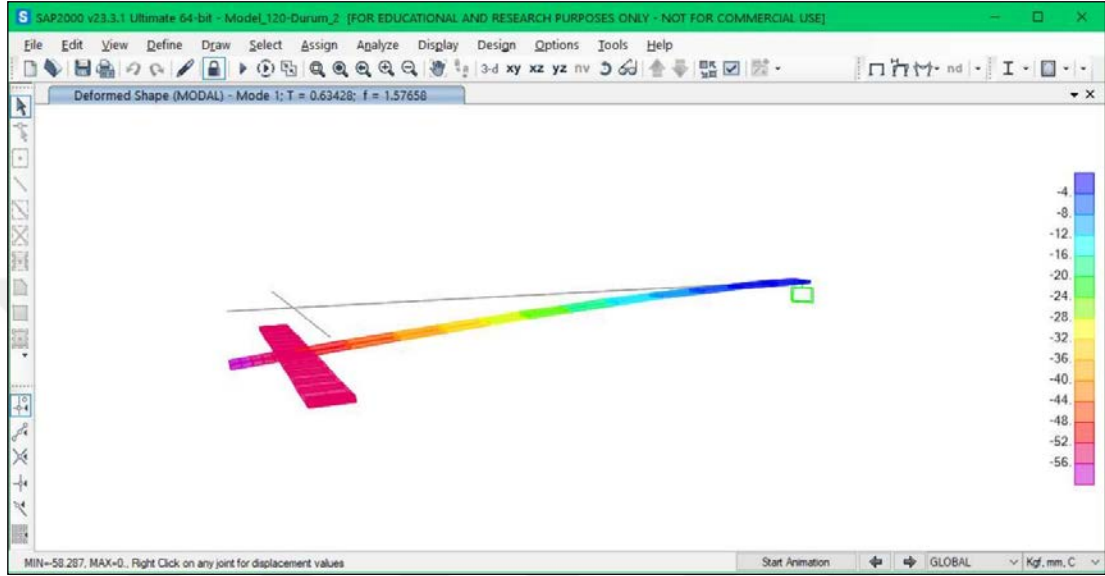
olduğu ve 1.6 Hz olarak tespit edilmiştir. Baskın frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre mm seviyesinde farklılıklar olduğu en yakın değerin PPP tabanlı çözümlerden elde edildiği görülmüştür. İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP'ye göre yaklaşık 1 cm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Hataların IGS-F ve IGS-RT çözümlerinde yüksek çıkmasında deplasman farkı zaman serisinde görüldüğü gibi anlık sıçramalardan meydana gelmektedir. Gerçek zamanlı çözümlerde (RT-PPP ve RT-V) ise deplasman zaman serisinde 15 saniye ve sonrası için gerçekleşen küçük deplasman farklarında RP göre alıcı/anten sinyal gürültüsünün düşük olmasından dolayı bu fark oluşmaktadır.



Şekil 7.18: 8. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Durum 8'e ait FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 1.6 Hz olarak ve bu frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre mm altında farklılıklar olduğu en yakın değerin PPP tabanlı çözümlerden elde edildiği görülmüştür. Bu durum, daha yüksek frekanslara sahip düşey yönlü dinamik hareketlerin RT-PPP ve RT-V yöntemiyle yakalanabildiğini göstermiştir. İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP'ye göre yaklaşık 1 cm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. KOH değerinin RT-V yönteminde yüksek çıkması,

deplasman zaman serisinde salınımlarda meydana gelen sıçramalardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca konsol boyuna 90 cm olan çelik çubuğun SEM ile modellenmesi sonucu ortaya çıkan yer değiştirme dağılımı ve frekans değeri Şekil 7.19’da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi çelik çubuğun frekans değeri 1.6 Hz olmakla birlikte GPS tabanlı 5 yönteme ait frekans değerleri ile aynıdır.



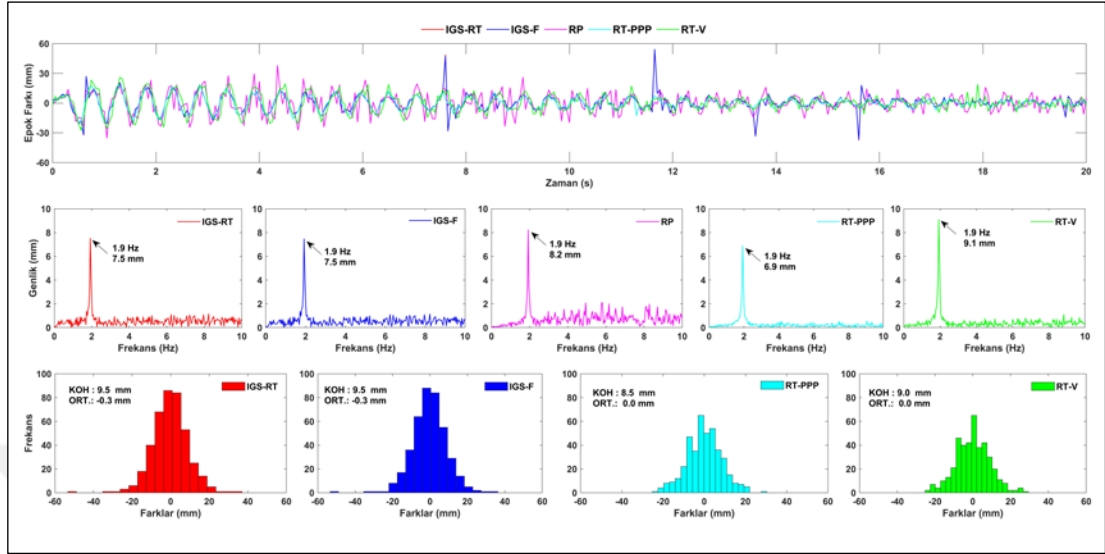
Şekil 7.19: Konsol boyu 90 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmesi.

#### 7.4.1.3. Konsol Boyu 80 cm olan Çubuk Deneyi

Deneylerde kullanılan çelik çubuğun konsol boyunu kısaltarak 7.4.1.2. bölümde üretilen 1.6 Hz frekansında düşey yönlü deplasman farklarını bu bölümde daha yüksek frekansta üretilerek günümüzde mühendislik yapılarının izlenmesinde kullanımı yaygınlaşan yöntemlerin birbiri ile filtreleme uygulamadan hem zaman hem de frekans alanında karşılaştırılmaları yapılacaktır.

Deneylerde çelik çubuğun konsol boyunun aynı kalmasından dolayı beklenen baskın frekans sonuçları yaklaşık aynı değere sahip olması beklenmektedir. Fakat her durum için genliklerde farklılıklar bulunabilir. Bunun sebebi çelik çubuğa uygulanan kuvvet herhangi bir ölçüm cihazından uygulanmadığı ayrıca rastgele insan eli ile uygulanan kuvvet olduğu için her durumda farklı genlik değerleri ile karşılaşılması mümkündür. Konsol boyu 80 cm olan çelik çubuğun, düşey sönümlü harmonik salınımına ait Durum 9 için Şekil 7.20’nin üst kısmında filtreleme yapılmaksızın epok

farklı zaman serisi gösterilmiştir. Bu zaman serisinde PP-PPP temelli çözümlerde bazı zaman aralıklarında epok farklarında meydana gelen sıçramalar görülmektedir.

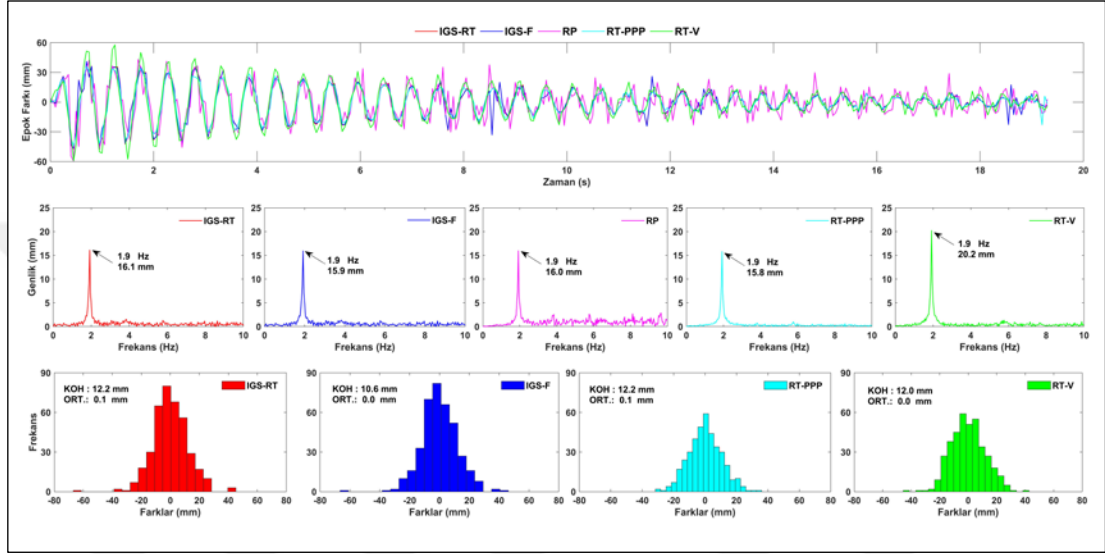


Şekil 7.20: 9. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Bu durum PPP yönteminin doğası gereği kısa süreli dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Zaman serisinde 5 yönteme ait çözümlerde epok farkları birbiri ile tutarlı olduğu fakat yöntemlerde küçük epok farkı sıçraması gözükmemektedir. Küçük sıçramalar en fazla RP yöntemine ait çözümlerde oluşmaktadır. Bunun sebebi yöntem gereği kullanılan iki GNSS alıcısının sinyal gürültülerinin toplamı, diğer yöntemlerde kullanılan tek alıcı sinyal gürültüsünden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şeklin orta kısmında ise epok farkı zaman serisine ait frekans alanında FFT spektrumları yer almaktadır. Durum 9 için tüm yöntemlere ait çözümlerden düşey harmonik salınımın baskın frekans değerleri aynı olup, 1.9 Hz olarak bulunmuştur. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise 7.5 ila 9.1 mm arasında değişmektedir. RP yöntemi referans alındığında diğer yöntemlere ait genlik değerleri kıyaslandığında mm altında birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Genlik değerlerindeki bu fark, her yöntem için kullanılan GNSS alıcı/anten tipinden kaynaklı gürültülerden kaynaklanmaktadır. Şeklin alt kısmında ise RP çözümüne göre diğer yöntemlerin olasılık dağılım grafikleri gösterilmiştir. Referans alınan yönteme göre diğer 4 yöntemin KOH değerleri mm seviyesinde olup yaklaşık 9.0-9.5 mm arasında değişim göstermektedir. Bu farklılıkların oluşmasında, filtreleme uygulamadan ölçüm esnasında meydana gelen uyuşumsuz ölçülerin çıkarılmaması, gerçek zamanlı

toplanan verilerin alıcı/antenlerden dolayı epok kayıpları, yöntemlerin doğası gereği hataları, GNSS alıcı/anten sinyal gürültü oranları, kullanılan ürünlerin hassasiyeti ve internet kaynaklı gecikmeler neden olmaktadır.

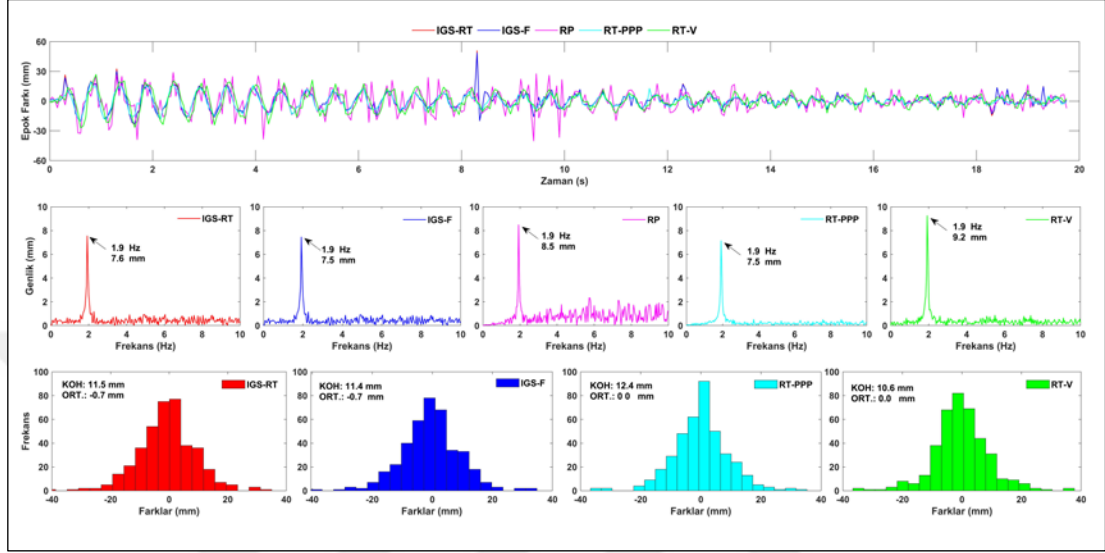
Yüksek genlikler için aynı konsol boyuna sahip düşey sönümlü harmonik hareket Şekil 7.21’de Durum 10’a ait epok farkı zaman serisi, buna karşılık frekans alanındaki FFT spektrumları ve istatistiksel olarak olasılık dağılımı verilmiştir.



Şekil 7.21: 10. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Durum 10’a ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisinde tüm yöntemlerin düşey harmonik salınımı boyunca birbiri ile tutarlı olduğu fakat RT-V yönteminde Durum 9’a göre deplasman farkının biraz daha yüksek olduğu bunun da yüksek frekanslarda oluşan hareketlerin etkisinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 1.9 Hz olarak belirlenmiştir. Baskın frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP’ye göre mm seviyesinde farklılıklar olduğu en yakın değerinin IGS-RT çözümünden elde edildiği görülmüştür. İstatistiksel olarak olasılık dağılımında RP’ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP’ye göre yaklaşık 1 cm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Durum 11’e ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisinde tüm yöntemlerin düşey harmonik salınımı boyunca birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Ancak RP yönteminin gürültü seviyesinin yüksek olması deplasman farkı zaman serisinde görülmektedir.

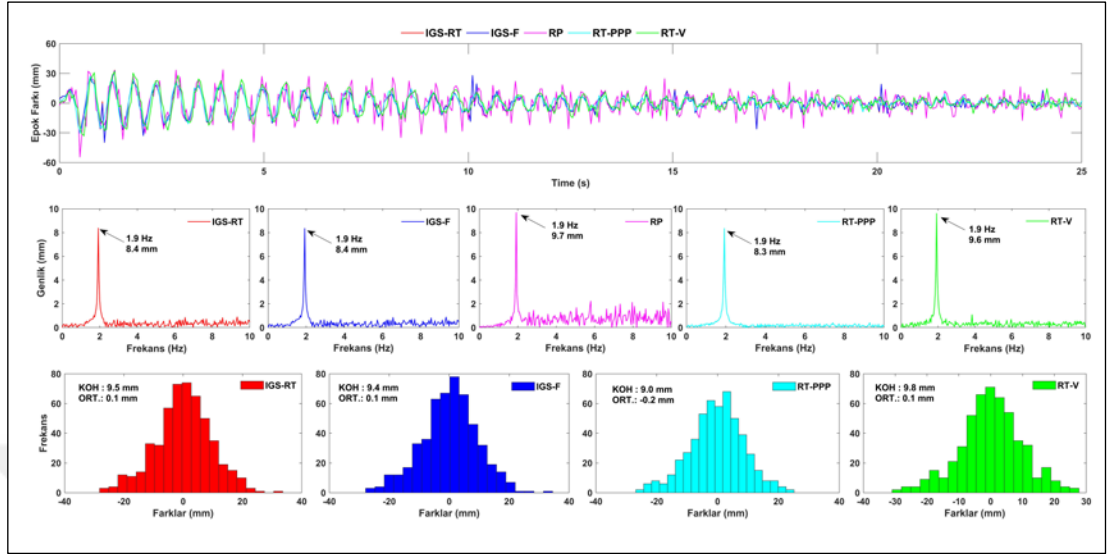
FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 1.9 Hz olarak tespit edilmiştir. Baskın frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre mm seviyesinde farklılıklar olduğu en yakın değerin RT-V tabanlı çözümlerden elde edildiği görülmüştür.



Şekil 7.22: 11. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

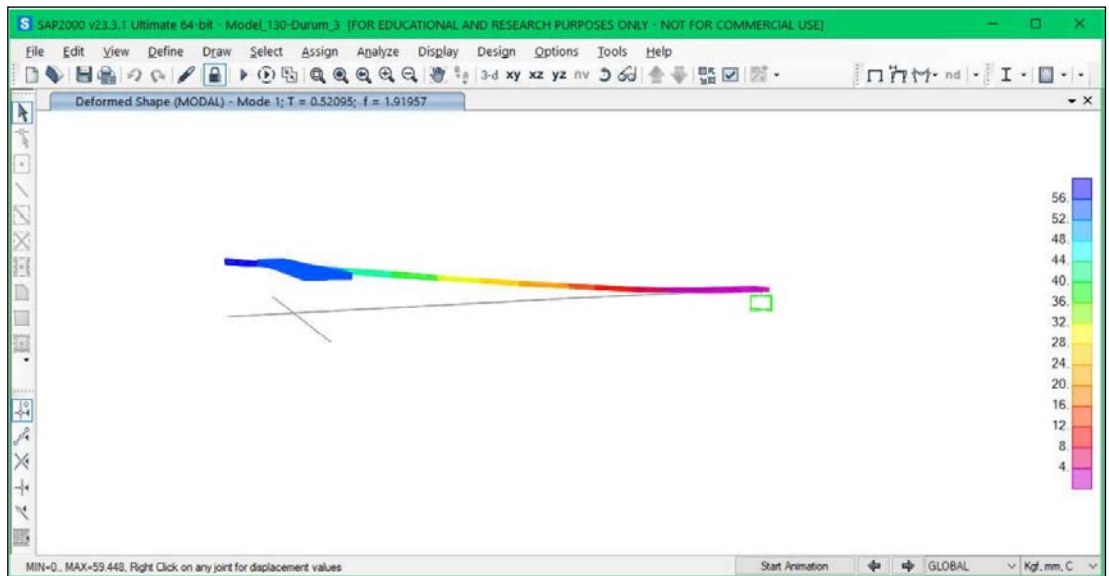
İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP'ye göre yaklaşık 1 cm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Hataların IGS-F ve IGS-RT çözümlerinde yüksek çıkmasında deplasman farkı zaman serisinde görüldüğü gibi anlık sıçramalardan meydana gelmektedir. Gerçek zamanlı çözümlerde (RT-PPP ve RT-V) ise deplasman zaman serisinde küçük deplasman farklarında RP'ye göre alıcı/anten sinyal gürültüsünün düşük olmasından dolayı bu fark oluşmaktadır. Konsol boyu 80 cm olan son durum için gerçekleştirilen çözümlerin sonuçları Şekil 7.23'te verilmiştir. Durum 12'ye ait FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 1.9 Hz olarak ve bu frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre mm seviyesinde farklılıklar olduğu en yakın değerin RT-V çözümlerden elde edildiği görülmüştür. Bu durum, daha yüksek frekanslara sahip düşey yönlü dinamik hareketlerin açık bir şekilde RT-PPP ve RT-V yöntemiyle yakalanabildiğini göstermiştir. İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın

normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP'ye göre yaklaşık 1 cm ve altında birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7.23: 12. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

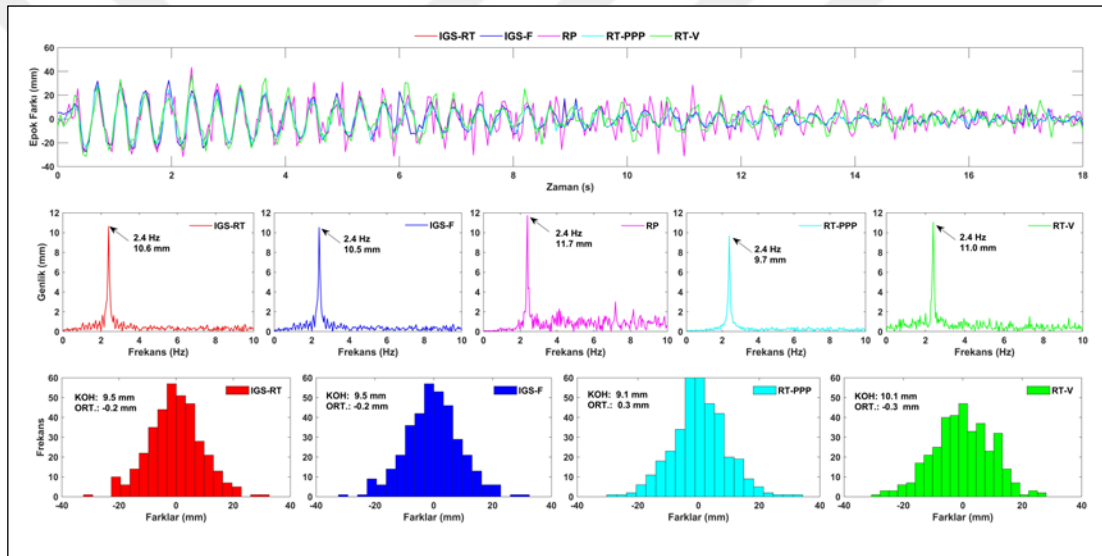
Ayrıca konsol boyu 80 cm olan çelik çubuğun SEM ile modellenmesi sonucu ortaya çıkan yer değiştirme dağılımı ve frekans değeri Şekil 7.24'te gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi çelik çubuğun frekans değeri 1.9 Hz olmakla birlikte GPS tabanlı 5 yönteme ait frekans değerleri ile aynıdır.



Şekil 7.24: Konsol boyuna 80 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmesi.

#### 7.4.1.4. Konsol Boyu 70 cm olan Çubuk Deneyi

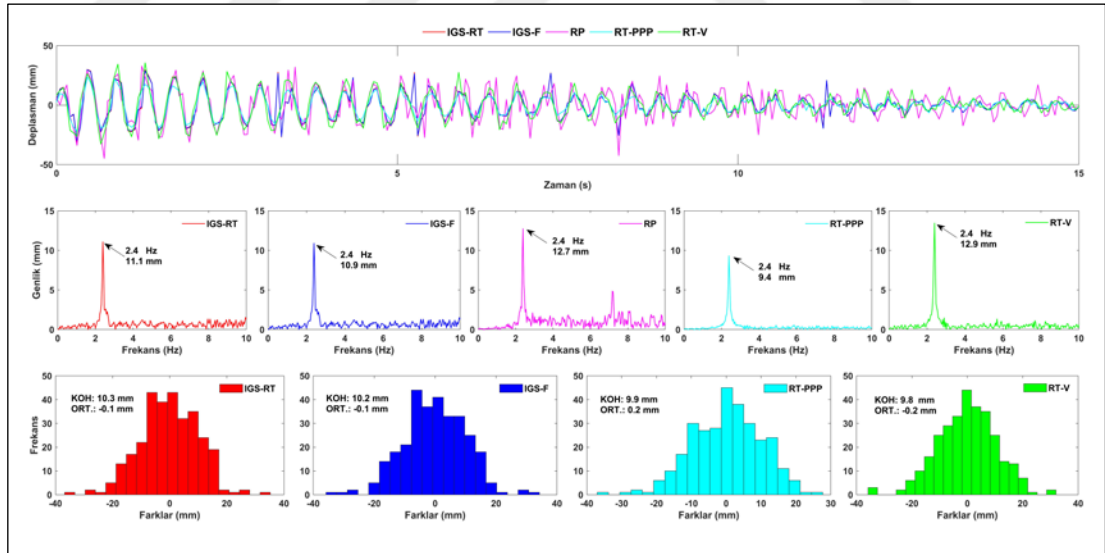
Deneylerde son olarak en kısa konsol boyuna sahip 70 cm durumunda üretilen düşey harmonik hareketlerin kullanılan 5 yönteme göre çözümleri bu kısımda değerlendirilmiştir. Konsol boyunun deney boyunca en kısa durumda olması ve çelik ağaç modele yaklaşmasından dolayı GPS gözlemlerinde uydudan gelen sinyallerin multipath hatasına daha fazla neden olmaktadır. Bu da hem zaman hem de frekans alanında yöntemlerin çözümlerine büyük etki etmektedir. Deneylerde böyle bir koşulun oluşmasını bilerek yapmamızın sebebi de gerçek yapılarda bu durumların oluşmasından dolayı çözümlere etkisinin nasıl olduğunu görmektir.



Şekil 7.25: 13. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Konsol boyu 70 cm olan çelik çubuğun, düşey sönümlü harmonik salınımına ait Durum 13 için Şekil 7.25'in üst kısmında filtreleme yapılmaksızın epok farkı zaman serisi gösterilmiştir. Bu zaman serisinde PP-PPP temelli çözümlerde bazı zaman aralıklarında epok farklarında meydana gelen sıçramalar görülmektedir. Bu durum PPP yönteminin doğası gereği kısa süreli dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Zaman serisinde 5 yönteme ait çözümlerde epok farkları birbiri ile tutarlı olduğu fakat yöntemlerde küçük epok farkı sıçraması gözükmemektedir. Küçük sıçramalar en fazla RP yöntemine ait çözümlerde oluşmaktadır. Bunun sebebi yöntem gereği kullanılan iki GNSS alıcısının sinyal gürültülerinin toplamı, diğer yöntemlerde kullanılan tek alıcı

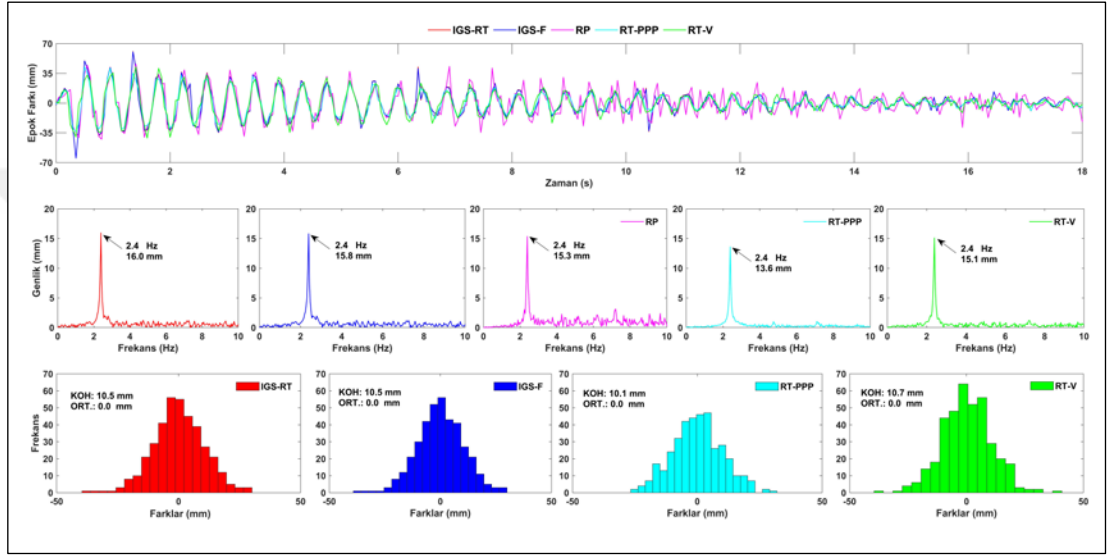
sinyal gürültüsünden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şeklin orta kısmında ise epok farkı zaman serisine ait frekans alanında FFT spektrumları yer almaktadır. Durum 9 için tüm yöntemlere ait çözümlerden düşey harmonik salınımın baskın frekans değerleri aynı olup, 2.4 Hz olarak bulunmuştur. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise 9.7 ila 11.7 mm arasında değişmektedir. RP yöntemi referans alındığında diğer yöntemlere ait genlik değerleri kıyaslandığında mm seviyesinde birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Genlik değerlerindeki bu fark, her yöntem için kullanılan GNSS alıcı/anten tipinden kaynaklı gürültülerden kaynaklanmaktadır. Şeklin alt kısmında ise RP çözümüne göre diğer yöntemlerin olasılık dağılım grafikleri gösterilmiştir. Referans alınan yönteme göre diğer 4 yöntemin KOH mm seviyesinde olup yaklaşık 9.1-10.1 mm arasında değişim göstermektedir. Bu farklılıkların oluşmasında, filtreleme uygulamadan ölçüm esnasında meydana gelen uyuşumsuz ölçülerin çıkarılmaması, gerçek zamanlı toplanan verilerin alıcı/antenlerden dolayı epok kayıpları, yöntemlerin doğası gereği hataları, GNSS alıcı/anten sinyal gürültü oranları, kullanılan ürünlerin hassasiyeti ve internet kaynaklı gecikmeler neden olmaktadır.



Şekil 7.26: 14. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Durum 14'e ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisinde tüm yöntemlerin düşey harmonik salınımı boyunca birbiri ile tutarlı olduğu fakat RT-V ve RP yönteminde Durum 13'e göre deplasman farkının biraz daha yüksek olduğu bunun da yüksek frekanslarda oluşan hareketlerin etkisinden kaynaklı olduğu

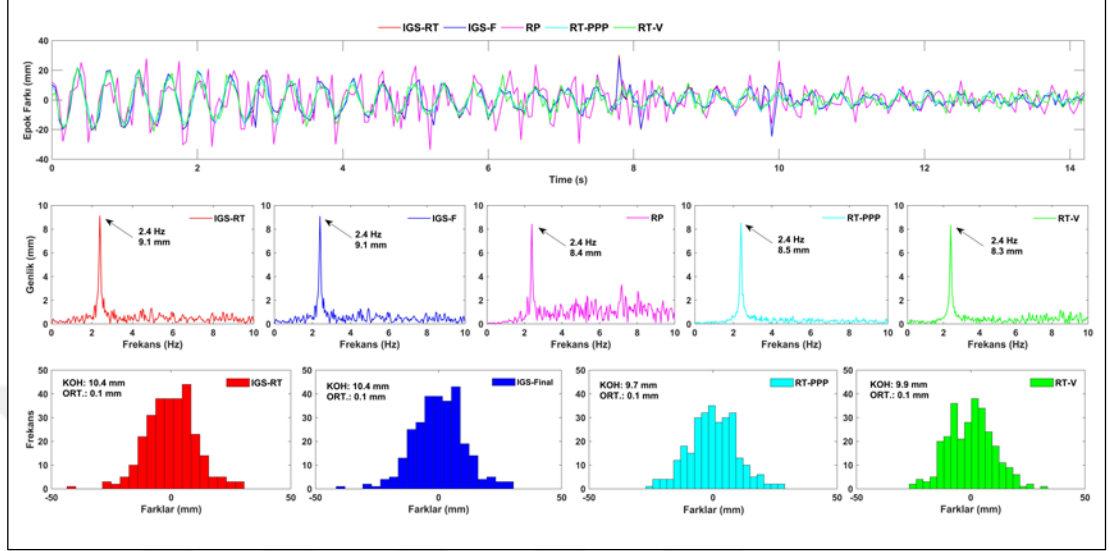
düşünülmektedir. FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 2.4 Hz olarak belirlenmiştir. Baskın frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre mm seviyesinde farklılıklar olduğu en yakın değerin RT-V çözümünden elde edildiği görülmüştür. İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP'ye göre yaklaşık 1 cm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7.27: 15. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

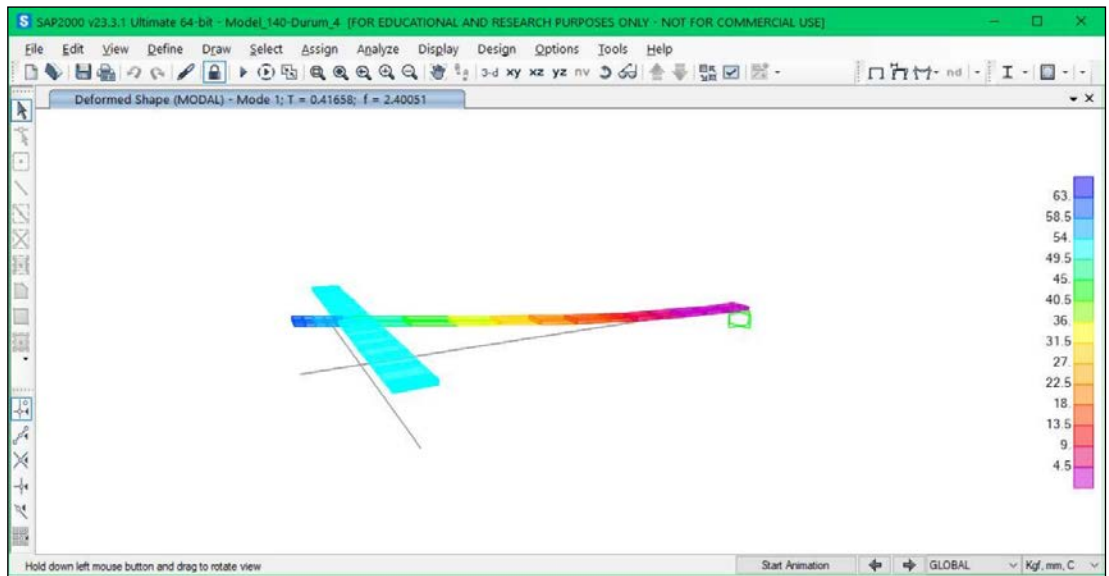
Durum 15'e ait filtreleme yapılmamış epok farkları alınmış zaman serisinde tüm yöntemlerin düşey harmonik salınımı boyunca birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Ancak RP yönteminin gürültü seviyesinin yüksek olması yaklaşık 7 sn sonrasında deplasman farkı zaman serisinde görülmektedir. FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve 2.4 Hz olarak tespit edilmiştir. Baskın frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre milimetre seviyesinde farklılıklar olduğu en yakın değerin RT-V çözümlerden elde edildiği görülmüştür. İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP'ye göre yaklaşık 1 cm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Konsol boyu 70 cm olan son durum için gerçekleştirilen çözümlerin sonuçları Şekil 7.28'de verilmiştir. Durum 16'ya ait FFT spektrumlarına bakıldığında baskın frekans değerinin tüm yöntemlerde aynı olduğu ve

2.4 Hz olarak ve bu frekansa karşılık genlik değerlerinde ise RP'ye göre milimetre altında farklılıklar olduğu en yakın değerin gerçek zamanlı şartlarda çözümlerden elde edildiği görülmüştür.



Şekil 7.28: 16. durum için PP-PPP (IGS-F ve IGS-RT), RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin epok farkı zaman serileri, FFT spektrumları ve olasılık dağılımı.

Bu durum, daha yüksek frekanslara sahip düşey yönlü dinamik hareketlerin genlik ve frekans değerlerinin açık bir şekilde RT-PPP ve RT-V yöntemiyle yakalanabildiğini göstermiştir.



Şekil 7.29: Konsol boyu 70 cm olan çelik çubuğun sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmesi.

İstatiksel olarak olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. KOH değerlerinde ise RP'ye göre yaklaşık 1 cm ve altında birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca konsol boyu 70 cm olan çelik çubuğun SEM ile modellenmesi sonucu ortaya çıkan yer değiştirme dağılımı ve frekans değeri Şekil 7.29'da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi çelik çubuğun frekans değeri 2.4 Hz olmakla birlikte GPS tabanlı 5 yönteme ait frekans değerleri ile aynıdır.

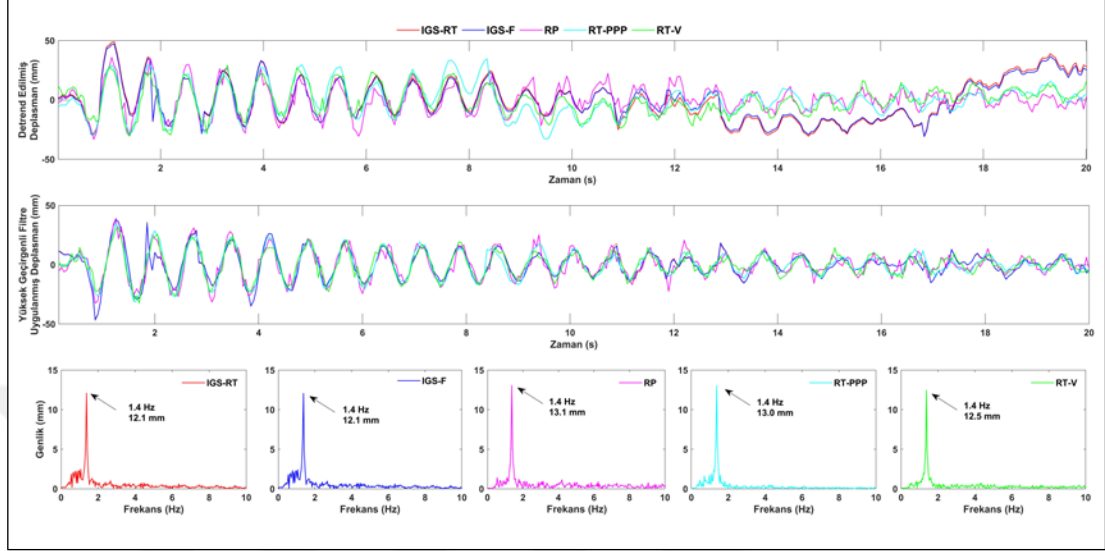
#### **7.4.2. Deplasman Sonuçları (Filtrelenmiş)**

Tezin bu bölümünde tüm deney setlerinde görüldüğü gibi kısa ve uzun vadeli dalgalanmaların ortadan kaldırabilmesi için farklı filtrelemeler kullanılabilir. Bunun için çalışmada yapılan deneylere ve kullanılan tüm yöntemlere ait zaman alanında, kesme frekansı 0.5 Hz olan beşinci dereceden bir Butterworth yüksek geçiş filtresi uygulanarak filtreleme yapılmıştır. Filtreleme sonucunda düşey harmonik hareketlerindeki dalgalanmalar ve alıcı/anten gürültü nedeniyle sıçramalar, deplasman zaman serisinde giderilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda filtreleme sonrası 5 farklı çözümden elde edilen yöntemlerin hem zaman hem de frekans alanında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Benzer durum 7.4.1'de anlatılan bölümdeki gibi Konsol boylarına göre 100, 90, 80 ve 70 cm uzunluğunda gerçekleştirilen düşey harmonik salınım testleri şeklinde ayrılmıştır. Her bir konsol boyu için normal şartlarda 6 veya 7 tane hareket üretilmiş. Deney setlerinin içerisinde her bir konsol boyuna göre 4 tane durum alınmıştır. Her duruma ait zaman serisi, FFT spektrumu ve olasılık dağılımı aşağıda ilgili bölümlerde açıklanarak değerlendirilmiştir.

##### **7.4.2.1 Konsol Boyu 100 cm olan Çubuk Deneyi**

Düşey yönlü sönümlü harmonik hareket yapabilen yassı çelik çubuğun hareketli kısmına entegre edilen GNSS sensörleri ile düşey dinamik hareketler üretilmiştir. Durum 1'e ait üretilen hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.30'da gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş yer değiştirme zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden

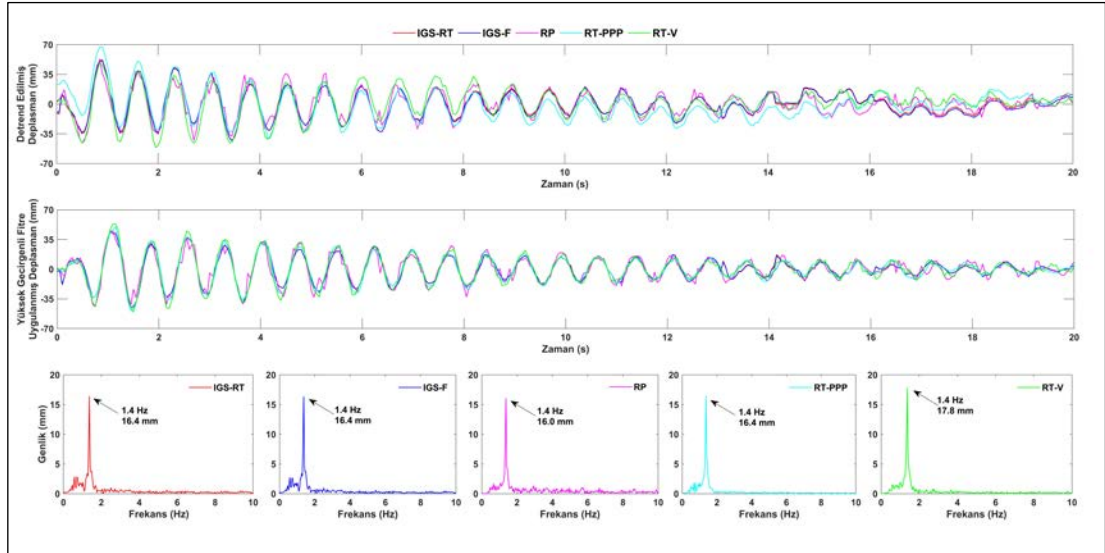
elde edilen yer değiştirmelere, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş yer değiştirme zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu yer değiştirme zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir.



şekil 7.30: 1. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 45 mm'dir. Durum 1 için toplam süre 20 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yönteme ait zaman serisinin birbirini ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumlarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Kısa süreli hareketlerde görülen bu dalgalanmalar şekil 2.30'un orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak düzeltilmiştir. Bu çalışmadaki temel amaç kullanılan yöntemlerin düşey yönlü dinamik hareketleri yakalayabilme performansını değerlendirmektir. Bu yüzden 5 yönteme ait frekans alanında FFT spektruma karşılık gelen frekans ve genlik değerleri birbirini ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar verdiği grlmştir. şekilde de görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.4 Hz'dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır. RT-V ve RP yöntemi arasındaki fark 0.6 mm iken, RT-PPP ve RP arasındaki fark ise 0.1 mm'dir. Ayrıca IGS-RT ve IGS-F'nin, RP arasındaki farklar ise 1 mm'dir. Bu sonuçlar RT-PPP ve RT-V yöntemi ile elde edilen genlik değerinin RP'ye göre başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Genlik değerlerindeki farkın oluşmasında kullanılan alıcı antenlerinin grltş, yöntemlerin doğası gereği oluşan hatalar sebep olmaktadır. FFT sonuçlarına bakıldığında mühendislik yapılarında

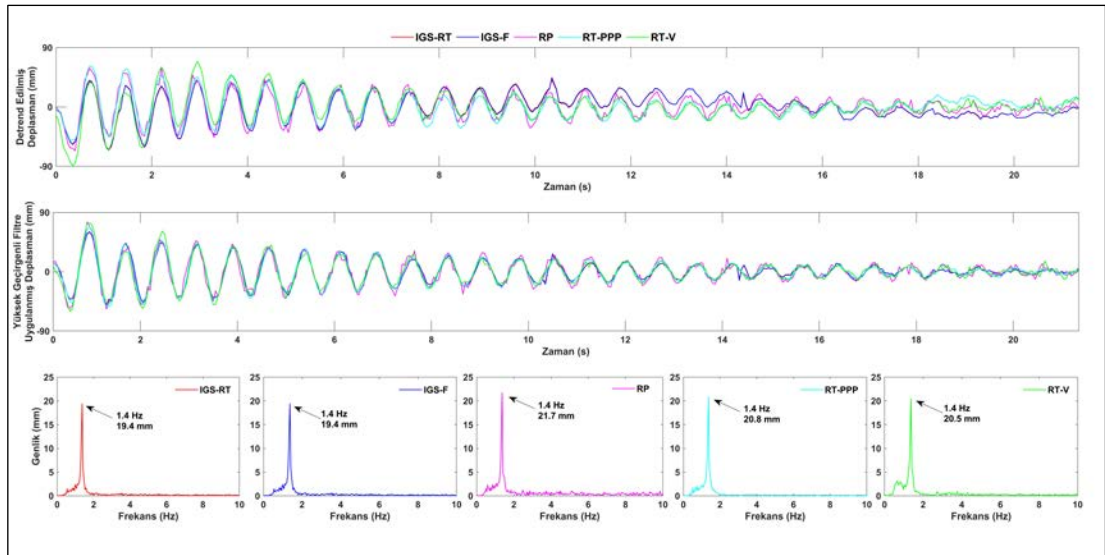
meydana gelen düşey yönlü hareketleri yakalama kabiliyeti referans alınan RP yöntemine göre diğer dört yöntemde de iyi olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. RT-PPP, RT-V, IGS-RT ve IGS-F yöntemlerinin zaman alanındaki performanslarını incelemek için RP yöntemi referans alınarak KOH değerleri hesaplanmış ve Tablo 7.5'te gösterilmiştir. Durum 1 için RT-PPP ve RT-V çözümlerinden elde edilen KOH değerleri birbiri ile uyumlu iken IGS-RT ve IGS-F çözümlerinden elde edilen KOH değerleri de birbiri ile tutarlıdır. KOH değerlerindeki bu fark yaklaşık 1 mm altında olup anlamlı olmadığı görülmüştür. Zaman alanındaki sonuçlar gerçek zamanlı RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin yüksek frekanslı GNSS alıcısıyla mühendislik yapılarında meydana gelebilecek düşey yönlü hareketlerin referans bir alıcıya ihtiyaç duymadan deplasmanları yakalama performanslarının başarılı şekilde sonuçlar verdiği açıkça gösterilmiştir. Fakat RT-PPP yönteminin, deprem şiddeti yüksek olan yer kabuğu hareketlerinde meydana gelebilecek internet kesintisinden kaynaklı oluşabilecek RTS ürünlerinin gecikmesi durumundan ve PP-PPP yönteminde kullanılan Final ürünlerinin 13 ila 17 gün süre ile sunulmasından dolayı VADASE yaklaşımının önemini ortaya çıkarmaktadır. Böylece mühendislik yapılarında meydana gelebilecek hareketlerin anlık olarak hızlı tehlike değerlendirme ve deprem erken uyarı sistemlerinde kullanılabileceği net bir şekilde görülmüştür.



Şekil 7.31: 2. durum için 5 yöntemle ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Durum 2'ye ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.31'de gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP,

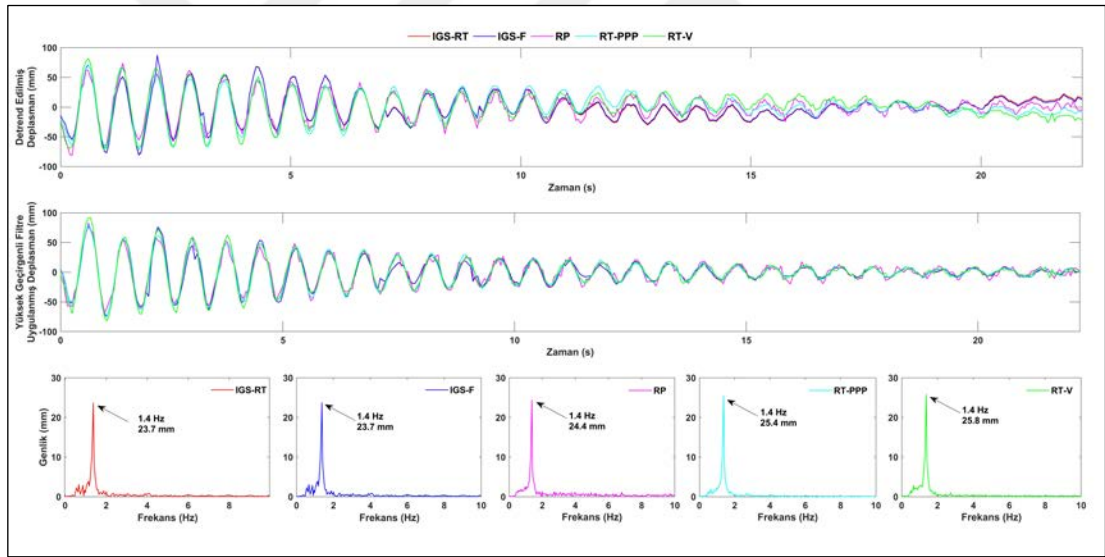
RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş yer değiştirme zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen yer değiştirmelere, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş yer değiştirme zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu yer değiştirme zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 35 mm'dir. Durum 2 için toplam süre 20 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yonteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumlarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Kısa süreli hareketlerde görülen bu dalgalanmalar Şekil 2.31'in orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak bu dalgalanmalar düzeltilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.4 Hz'dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır. PPP tabanlı yöntemler ile RP yöntemi arasındaki fark 0.4 mm iken, RT-V ve RP arasındaki fark ise 1.8 mm'dir. RP yöntemi referans alındığında diğer dört yöntemin KOH değerleri birbiri ile uyumlu olup milimetre seviyesindedir. Bu da düşey yönlü hareketlerin referans bir alıcıya ihtiyaç duymadan deplasmanları yakalama performanslarının başarılı şekilde tespit edilebileceğini gösterilmiştir.



Şekil 7.32: 3. durum için 5 yonteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Durum 3'e ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.32'de gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer

trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 40 mm'dir. Durum 3 için toplam süre 22 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı yani 10 saniyeden sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir. Kısa süreli hareketlerde görülen bu dalgalanmalar Şekil 2.32'nin orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçirgenli filtre uygulanarak bu dalgalanmalar düzeltilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.4 Hz'dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır. RP yöntemi referans alındığında diğer dört yöntemin KOH değerleri birbiri ile uyumlu olup mm seviyesindedir.



Şekil 7.33: 4. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Durum 4'e ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.33'te gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği

yaklaşık 50 mm'dir. Durum 3 için toplam süre 22 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı yani 11 saniyeden sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir. Kısa süreli hareketlerde görülen bu dalgalanmalar Şekil 7.33'ün orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak bu dalgalanmalar düzeltilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.4 Hz'dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır. RP yöntemi referans alındığında diğer dört yöntemin Tablo 7.5'te gösterilen KOH değerleri birbiri ile uyumlu olup milimetre seviyesindedir.

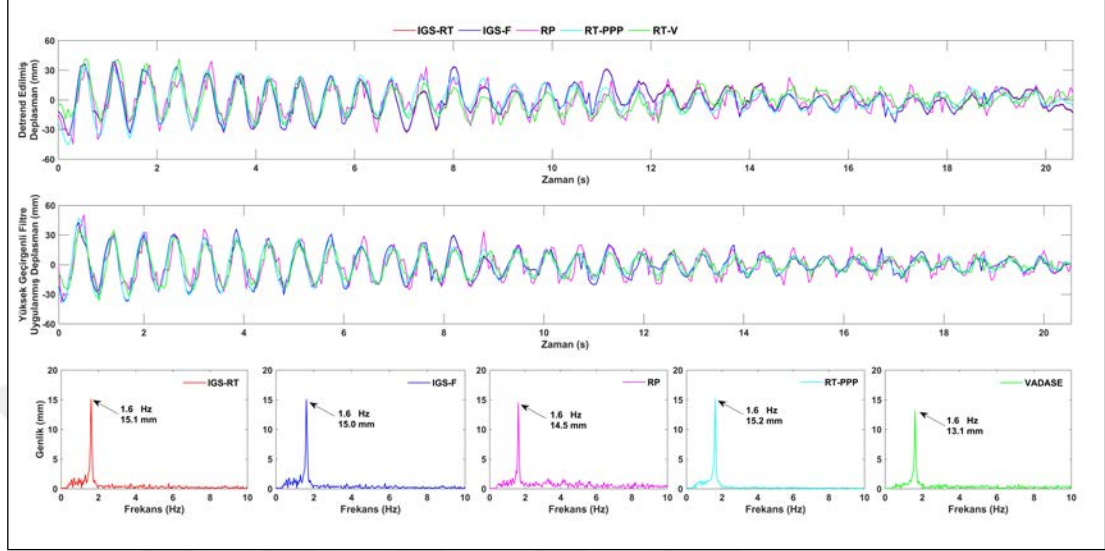
Tablo 7.5: Konsol boyu 100 cm için Filtreleme sonrası çözümlerden elde edilen istatistiksel değerler.

| Durum No | IGS-RT   |          |               | IGS-F    |          |               | RT-PPP   |          |               | RT-V     |          |               |
|----------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|
|          | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) |
| 1        | 6.6      | 35.8     | -0.1          | 6.6      | 34.5     | -0.1          | 5.0      | 16.0     | 0.0           | 5.5      | 19.3     | -0.1          |
| 2        | 7.8      | 53.1     | 0.1           | 7.5      | 46.7     | 0.0           | 5.8      | 22.2     | 0.0           | 6.0      | 26.3     | 0.0           |
| 3        | 6.5      | 20.7     | 0.0           | 6.5      | 20.3     | 0.0           | 5.7      | 18.8     | 0.0           | 6.4      | 21.7     | 0.0           |
| 4        | 7.4      | 33.3     | 0.0           | 7.4      | 33.4     | 0.0           | 5.6      | 19.6     | 0.0           | 6.6      | 24.9     | 0.0           |

#### 7.4.2.2. Konsol Boyu 90 cm olan Çubuk Deneyi

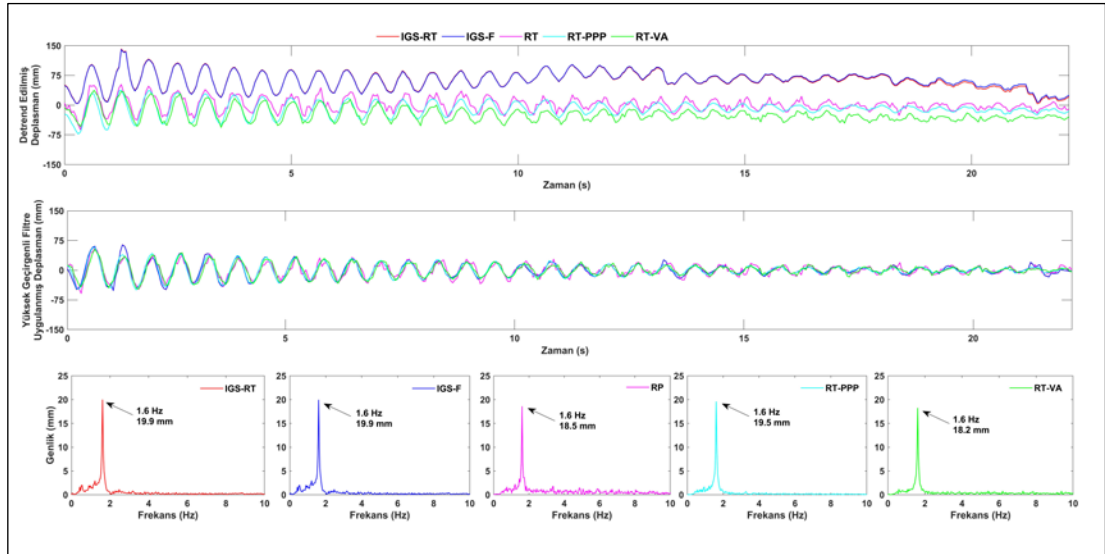
Deneylerde frekans değerindeki değişimin harmonik hareket üzerindeki etkisini incelemek için Durum 1-2-3-4'e göre baskın frekans değerini daha yüksek elde etmek için çelik çubuğun konsol boyunu 10 cm kısaltarak düşey salınımlar üretilmiştir (Durum 5-6-7-8). Şekil 7.34'te GPS tabanlı 5 yönteme ait üretilen lineer trend edilmiş yer değiştirme zaman serisi ve düşey yönlü salınımların baskın frekans ve genlik değerlerini incelemek için bu yöntemlerin FFT spektrumlarının zaman serileri gösterilmektedir. Sönümlü harmonik hareketin başlangıç salınım genliği 30 mm ve hareketin toplam zamanı 20.5 s'dir. Deneylerde PPP tabanlı yöntemlerde oluşan epok kaybını spline enterpolasyon ile düzeltip ofset ve lineer trendler kaldırıldıktan sonra deneyde yöntemlerden kaynaklı dalgalanmaları gidermek için MATLAB yazılımında 0.5 Hz'lik kesme frekansına sahip beşinci dereceden Butterworth yüksek geçiren filtre

tasarlanarak uygulanmıştır. Şekil 7.34'te (orta grafik) 5 yönteme ait filtrelenmiş deplasman zaman serisi görülmekte olup bu yöntemlerden üretilen deplasmanların deney süresince birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



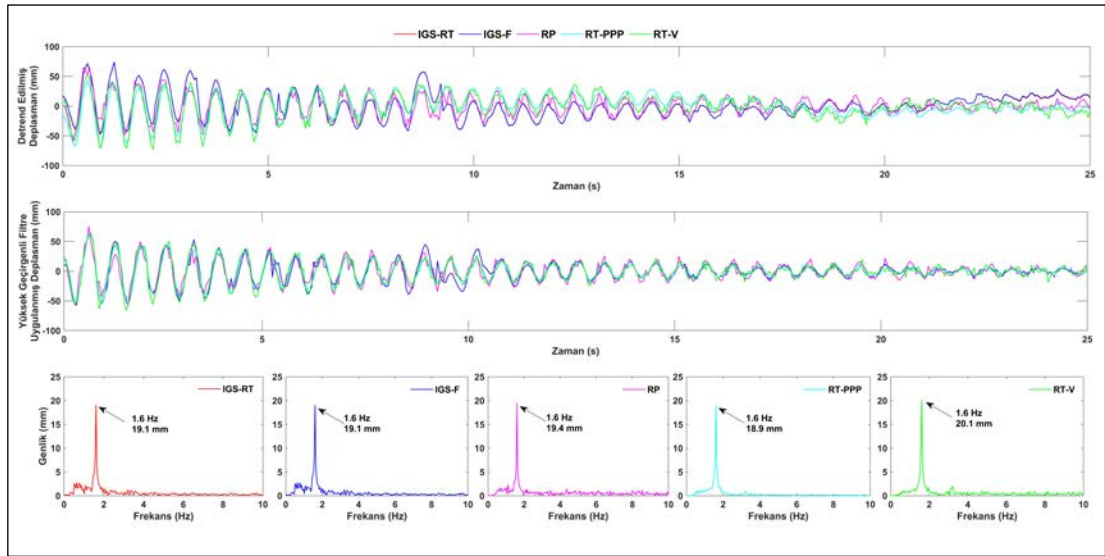
Şekil 7.34: 5. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

FFT spektrum sonuçlarına bakıldığında baskın frekans değerlerinin birbiri ile aynı olduğu ve genlik değerlerinde ise mm seviyesinde birbiri ile tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.



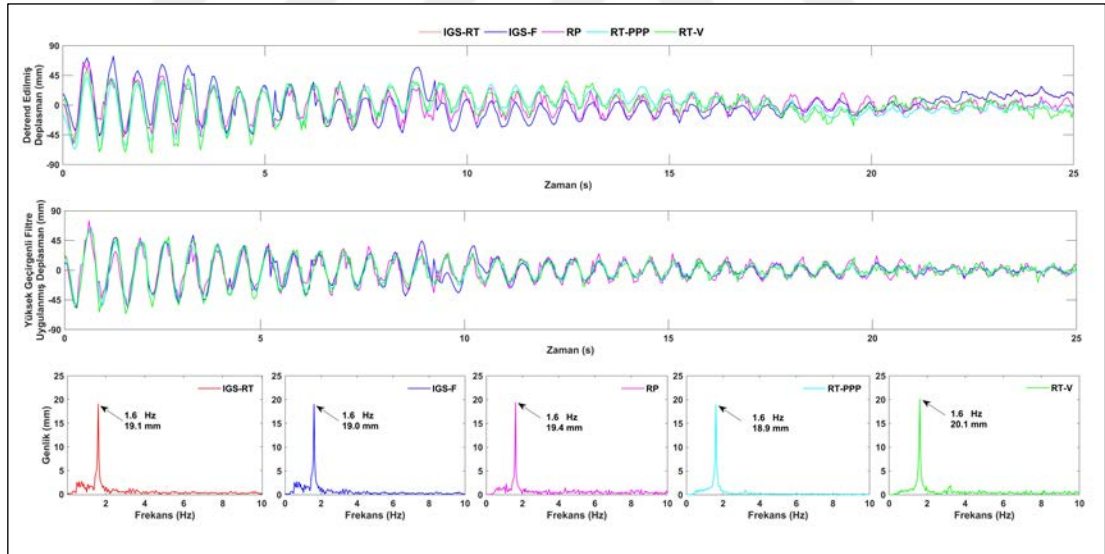
Şekil 7.35: 6. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Bu sonuçlar dinamik hareketlerin RT-PPP ve RT-V yöntemleri ile anlık deplasmanları yakalama yeteneği açısından başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Durum 6'ya ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.35'te gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 70 mm'dir. Durum 6 için toplam süre 22 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, frekansın artmasıyla düşey hareketin azaldığı durumdan sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir. Ayrıca PPP tabanlı IGS-RT ve IGS-F yöntemlerin hareket öncesi meydana gelen yakınsamadan dolayı filtreleme yapılmamış deplasman zaman grafiğinde diğer yöntem çözümlerindeki gibi birbiri ile tutarlı olmamakla birlikte ofset hatası oluşmaktadır. Kısa süreli hareketlerde görülen dalgalanmalar ve ofsetleri Şekil 2.35'in orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak meydana gelen dalgalanmalar ve ofsetler düzeltilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.6 Hz'dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır.



Şekil 7.36: 7. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Durum 7'ye ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.36'da gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 50 mm'dir. Durum 7 için toplam süre 25 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumdan sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir. Kısa süreli hareketlerde görülen dalgalanmalar Şekil 2.36'nın orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak meydana gelen dalgalanmalar düzeltilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.6 Hz'dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır.



Şekil 7.37: 8. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Durum 8'e ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.37'de gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde

edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 45 mm'dir. Durum 7 için toplam süre 25 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yöntemle ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumdan sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir. Kısa süreli hareketlerde görülen dalgalanmalar Şekil 2.37'nin orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak meydana gelen dalgalanmalar düzeltilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.6 Hz'dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır. RT-PPP, RT-V, IGS-RT ve IGS-F yöntemlerinin zaman alanındaki performanslarını incelemek için RP yöntemi referans alınarak KOH değerleri hesaplanmış ve Tablo 7.6'da gösterilmiştir.

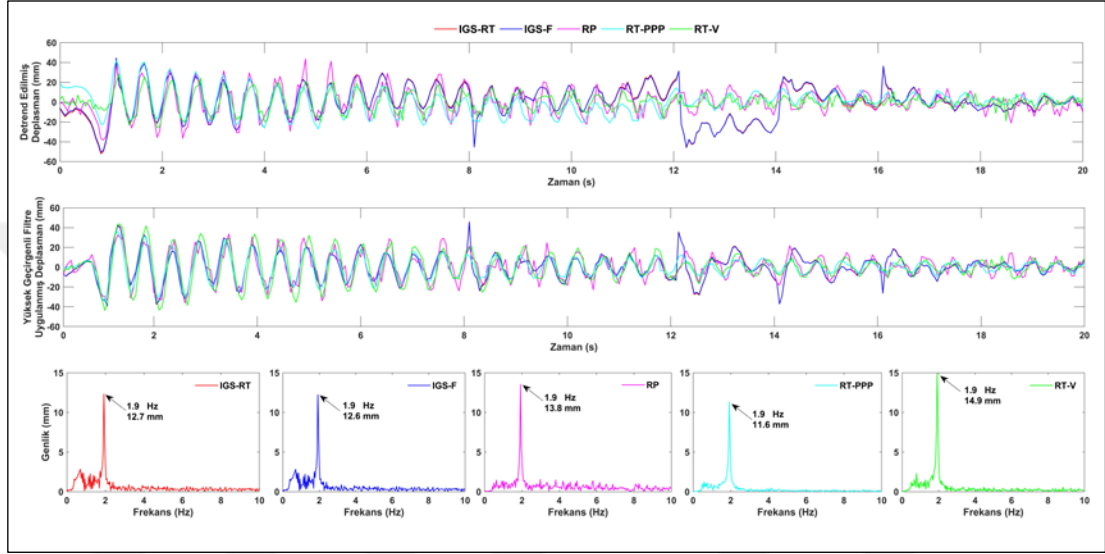
Tablo 7.6: Konsol boyu 90 cm için Filtreleme sonrası çözümlerden elde edilen istatistiksel değerler.

| Durum No | IGS-RT   |          |               | IGS-F    |          |               | RT-PPP   |          |               | RT-V     |          |               |
|----------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|
|          | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) |
| 5        | 8.7      | 33.1     | 0.0           | 8.8      | 32.9     | 0.0           | 7.5      | 26.6     | 0.0           | 7.3      | 25.4     | 0.0           |
| 6        | 9.4      | 54.9     | 0.2           | 9.4      | 54.9     | 0.2           | 8.1      | 27.6     | 0.0           | 7.4      | 21.4     | 0.0           |
| 7        | 9.6      | 68.1     | -0.1          | 9.6      | 68.4     | -0.1          | 8.1      | 24.9     | 0.0           | 8.7      | 28.3     | 0.0           |
| 8        | 9.7      | 51.5     | 0.1           | 9.7      | 51.0     | 0.1           | 7.6      | 24.6     | 0.0           | 9.1      | 46.8     | 0.0           |

#### 7.4.2.3. Konsol Boyu 80 cm olan Çubuk Deneyi

Mühendislik yapılarında meydana gelen daha yüksek frekanslı düşey salınım hareketlerini test etmek için çelik çubuğun konsol boyunu 10 cm daha kısaltarak baskın frekans değeri daha yüksek olan salınımlar üretilmiştir (Durum 9-10-11-12). Şekil 7.38'de kullanılan 5 yöntemle ait lineer trendi yapılmış, yöntemler arasındaki ofsetleri giderilmiş deplasman zaman grafiği gösterilmektedir. Ayrıca PPP tabanlı çözümlerde oluşan epok kaybı interpolasyon yöntemi ile giderilmiştir. Deplasman zaman grafiğinde görülen alıcının anteninden kaynaklı gürültülerden, multipath hatası

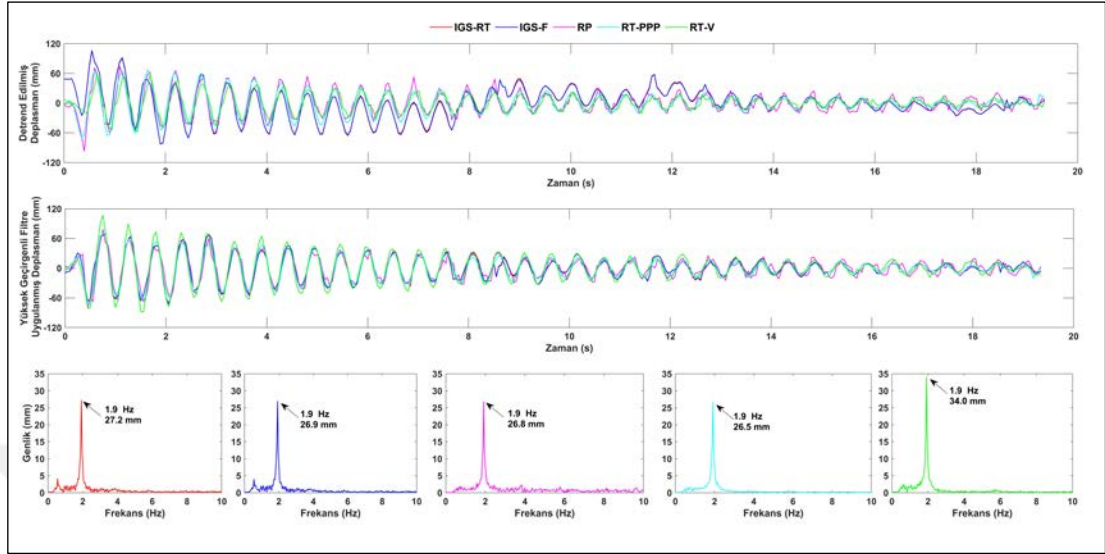
ve PPP yönteminin yakınsamasından kaynaklı dalgalanmaların giderilmesi için 0.5 Hz’lik kesme frekansına sahip beşinci dereceden Butterworth yüksek geçiren filtre uygulanmıştır. Başlangıç salınım genliği 40 mm ve hareketin toplam zamanı 20 s’dir. Yüksek frekanslı salınım sonucu 5 farklı yöntemin, düşey yönlü hareketleri yakalama kabiliyetini test etmek için frekans alanında FFT spektrumuna karşılık gelen genlik ve frekansları incelenmiştir.



Şekil 7.38: 9. durum için 5 yönetime ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

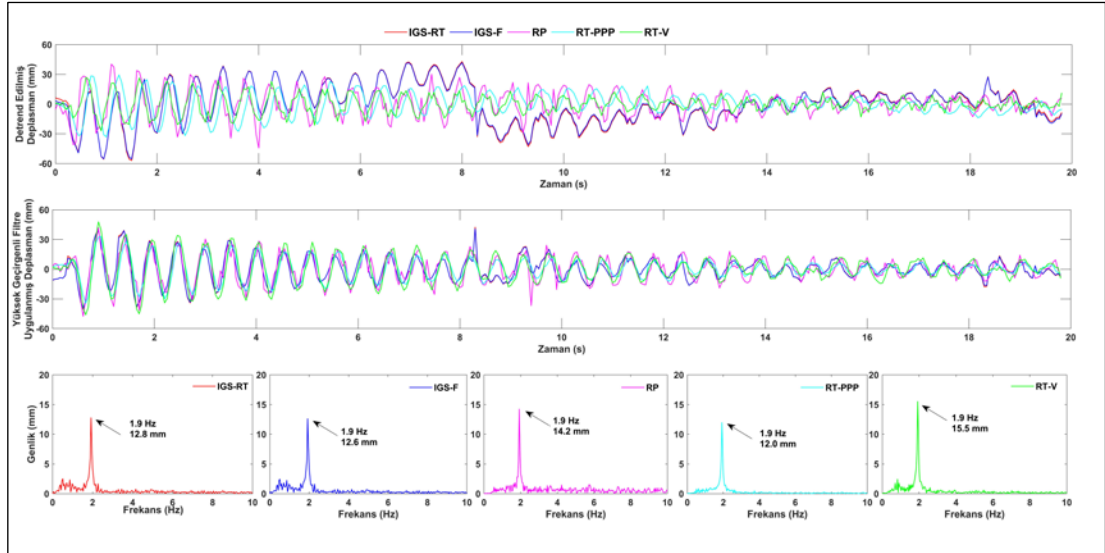
Şekil 7.38’de FFT spektrumuna bakıldığında 5 yöntemin de baskın frekans değerlerinin 1.9 Hz olup aynı olduğu görülmüştür. Günümüze kadarki birçok düşey yönlü dinamik hareketlerin tespiti çalışmalarında referans olarak alınan RP yöntemine göre RT-V, RT-PPP, IGS-RT ve IGS-F yöntemlerinin baskın genlik değerlerinde milimetre seviyesinde bir fark gözlemlenmiştir. Durum 10’a ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.39’da gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 60 mm’dir. Durum 10 için toplam süre 19.3 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5

yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumdan sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir.



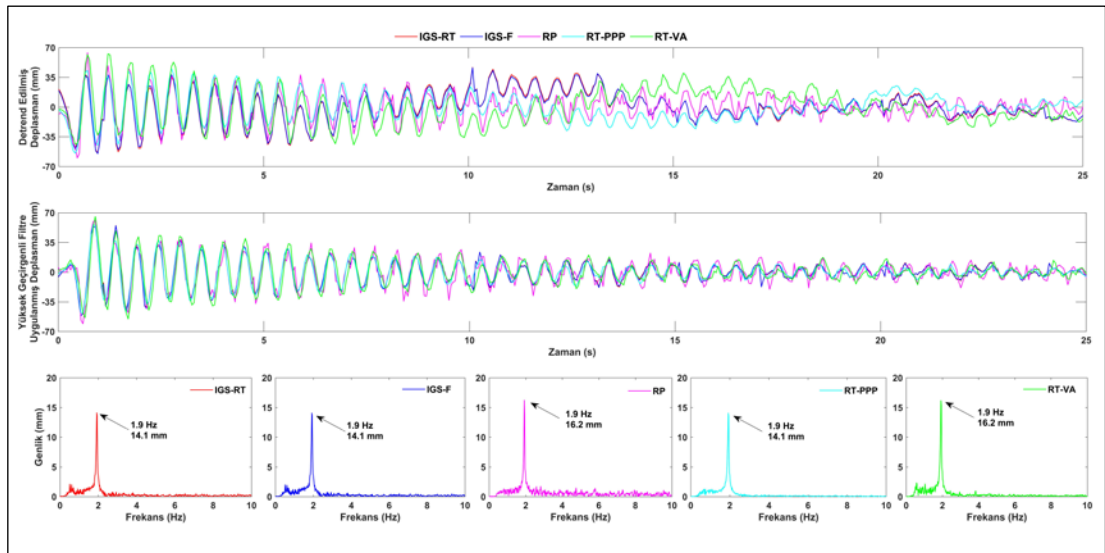
Şekil 7.39: 10. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Ayrıca PPP tabanlı IGS-RT ve IGS-F yöntemlerin hareket öncesi meydana gelen yakınsamadan dolayı filtreleme yapılmamış deplasman zaman grafiğinde diğer yöntem çözümlerindeki gibi birbiri ile tutarlı fakat deplasman değerlerinde küçük ofset hatası oluşmaktadır. Kısa süreli dalgalanmalar ve ofsetler Şekil 7.39'un orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak meydana gelen dalgalanmalar düzeltilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.9 Hz'dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır. Durum 11'e ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.40 da gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 30 mm'dir. Durum 11 için toplam süre yaklaşık 20 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumdan sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir.



Şekil 7.40: 11. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Ayrıca PPP tabanlı IGS-RT ve IGS-F yöntemlerin hareket öncesi meydana gelen yakınsama ve sıçramalardan dolayı filtreleme yapılmamış deplasman zaman grafiğinde diğ r yöntem     mlerindeki gibi birbiri ile tutarlı fakat deplasman değ rlerinde küçük ofset hataları ve sıçramalar oluşmaktadır. Kısa süreli dalgalanmalar, ofset ve sıçramaların Şekil 7.40'ın orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak meydana gelen durumlar düzeltilmiştir.



Şekil 7.41: 12. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Şekilde yöntemlerin FFT spektrumlarında görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.9 Hz’dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyince küçük farklılıklar bulunmaktadır. Durum 12’ye ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.41’de gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 60 mm’dir. Durum 11 için toplam süre yaklaşık 25 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumdan sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir. Ayrıca PPP tabanlı IGS-RT ve IGS-F yöntemlerin hareket öncesi meydana gelen yakınsama dolayı filtreleme yapılmamış deplasman zaman grafiğinde diğer yöntem çözümlerindeki gibi birbiri ile tutarlı fakat deplasman değerlerinde küçük ofset hataları oluşmaktadır. Benzer durum RT-V yönteminde de meydana gelmiştir. Kısa süreli dalgalanmalar ve ofset Şekil 7.38’in orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak meydana gelen durumlar düzeltilmiştir. Şekilde yöntemlerin FFT spektrumlarında görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 1.9 Hz’dir. Günümüze kadarki birçok düşey yönlü dinamik hareketlerin tespiti çalışmalarında referans olarak alınan RP yöntemine göre RT-V yönteminin baskın genlik değerlerinde aynı sonuçlar gözlemlenmişken, diğer GPS tabanlı PPP yöntemlerinde ise bu fark yaklaşık 2 mm’dir.

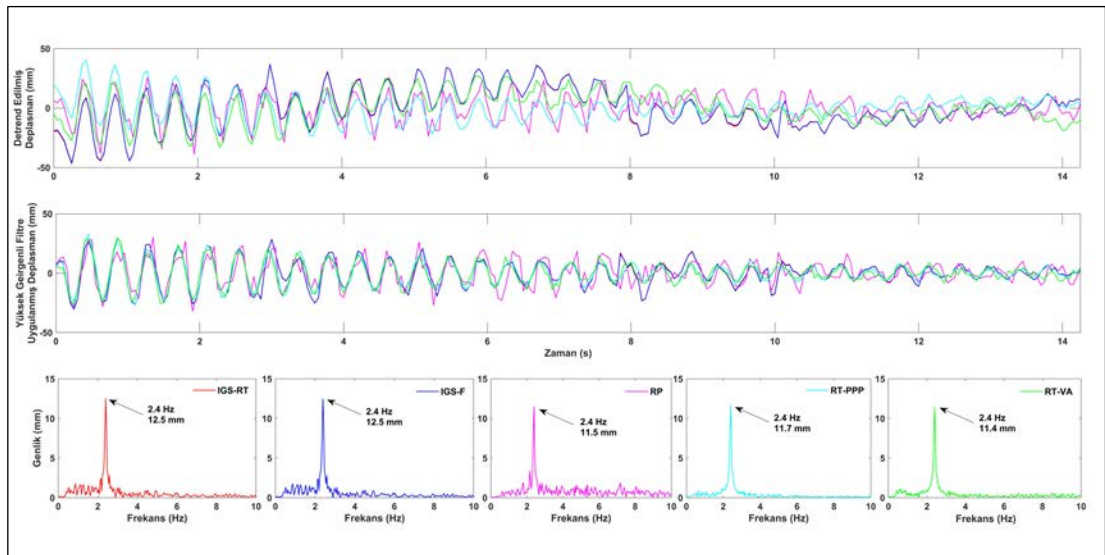
Tablo 7.7: Konsol boyu 80 cm için Filtreleme sonrası çözümlerden elde edilen istatistiksel değerler.

| Durum No | IGS-RT   |          |               | IGS-F    |          |               | RT-PPP   |          |               | RT-V     |          |               |
|----------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|
|          | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) |
| 9        | 9.0      | 38.3     | 0.0           | 9.0      | 37.7     | 0.0           | 7.3      | 18.5     | 0.0           | 8.3      | 28.9     | 0.0           |
| 10       | 11.1     | 57.8     | -0.1          | 11.0     | 57.2     | -0.1          | 8.3      | 34.6     | 0.0           | 12.5     | 48.7     | 0.0           |
| 11       | 8.8      | 34.6     | 0.2           | 8.7      | 34.3     | 0.2           | 7.4      | 39.7     | 0.0           | 7.9      | 32.4     | 0.0           |
| 12       | 8.0      | 34.4     | 0.0           | 8.0      | 34.9     | 0.0           | 7.2      | 23.0     | 0.0           | 8.7      | 29.3     | 0.0           |

RT-PPP, RT-V, IGS-RT ve IGS-F yöntemlerinin zaman alanındaki performanslarını incelemek için RP yöntemi referans alınarak KOH değerleri hesaplanmış ve Tablo 7.7’de gösterilmiştir.

#### 7.4.2.4. Konsol Boyu 70 cm olan Çubuk Deneyi

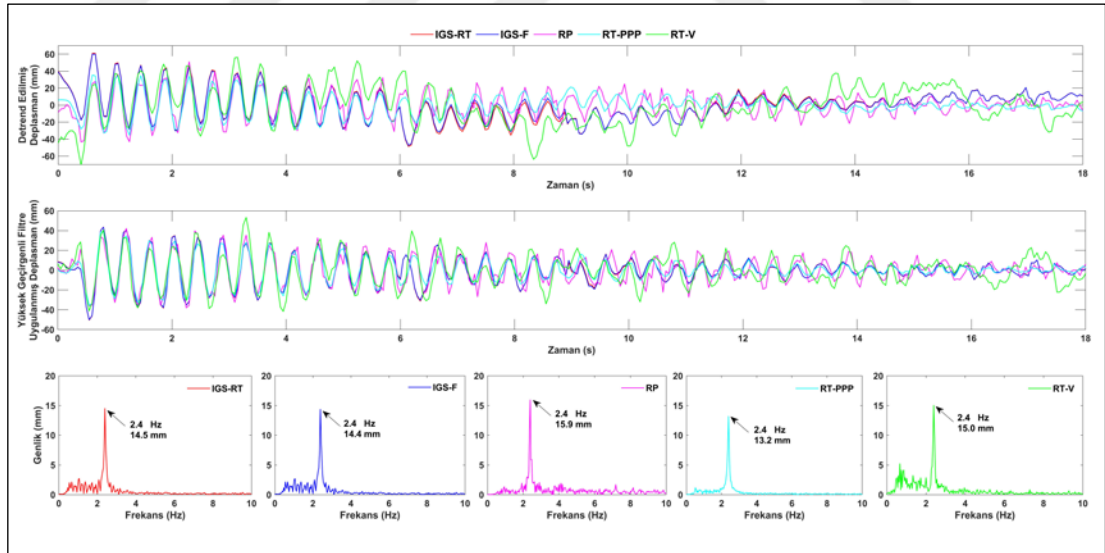
Düşey yönlü dinamik hareketlerin yapıya etki etmesi sonucu yüksek frekanslı titreşimler meydana gelmektedir. Titreşimlerin mühendislik yapılarındaki etkisini bu çalışmada kullanılan yöntemlerle yakalanabilme kabiliyetini incelemek için çelik çubuğun konsol boyunu 7.4.1.3. bölümünde yapılan deneylere göre 10 santimetre daha kısaltarak yüksek frekanslı salınımlar üretilmiştir (Durum 13-14-15-16). Şekil 7.42’nin üst kısmında sadece-GPS gözlemlerine dayalı GPS tabanlı 5 yönteme ait üretilen lineer trend edilmiş deplasman zaman serisi, şeklin orta kısmında deplasman zaman serisinde görülen dalgalanmaların giderilmesi için filtreleme uygulanmış deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında düşey yönlü salınımların baskın frekans ve genlik değerlerini incelemek için bu yöntemlerin FFT spektrumları gösterilmektedir.



Şekil 7.42: 13. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Sönümlü harmonik hareketin başlangıç salınım genliği 55 mm ve hareketin toplam zamanı 18 s’dir. Durum 13’e ait FFT spektrumuna bakıldığında GPS tabanlı 5

yönteme ait baskın frekans değerlerinin 2.4 Hz olup tüm yöntemlerde aynıdır. Bu frekansa karşılık gelen genlik değerleri incelendiğinde, RP yöntemine göre RT-V ve RT-PPP yaklaşımlarının mm altında birbiri ile tutarlı sonuçlar verdiği diğer PPP tabanlı yöntemlerinde ise yaklaşık 1 mm farklar olduğu görülmüştür. Durum 14'e ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.43'te gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 50 mm'dir. Durum 11 için toplam süre yaklaşık 18 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5. yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumdan sonra dalgalanmalar meydana gelmiştir. Ayrıca PPP tabanlı IGS-RT ve IGS-F yöntemlerin hareket öncesi meydana gelen yakınsamadan dolayı filtreleme yapılmamış deplasman zaman grafiğinde diğer yöntem çözümlerindeki gibi

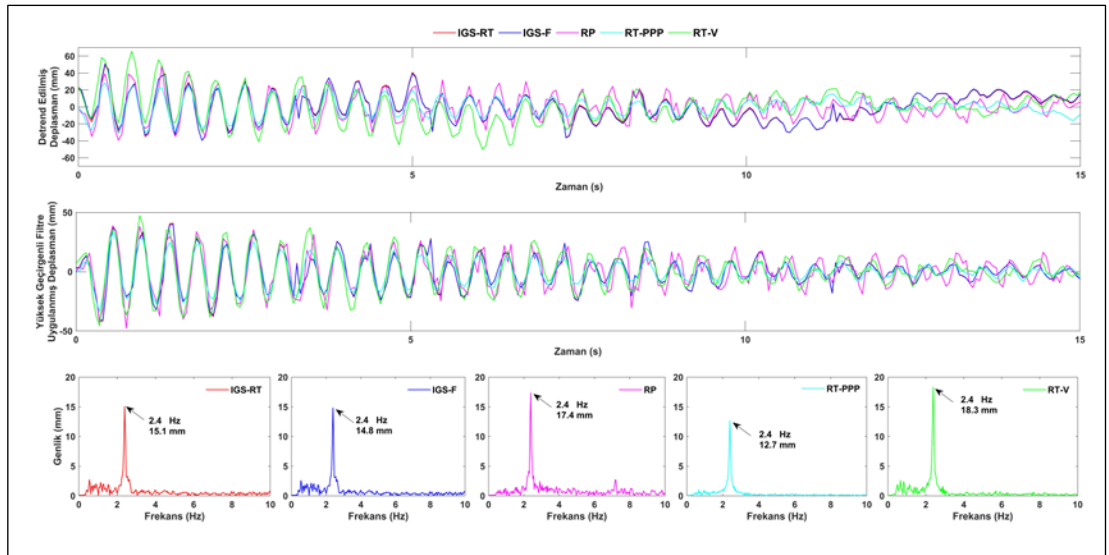


Şekil 7.43: 14. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

birbiri ile tutarlı fakat deplasman değerlerinde küçük ofset hataları oluşmaktadır. Kısa süreli dalgalanmalar ve ofset Şekil 7.43'ün orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak meydana gelen durumlar düzeltilmiştir. Şekilde yöntemlerin FFT spektrumlarında görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım

frekansları eşit olup 2.4 Hz'dir. Günümüze kadarki birçok düşey yönlü dinamik hareketlerin tespiti çalışmalarında referans olarak alınan RP yöntemine göre RT-V yönteminin baskın genlik değerinde mm altında fark gözlemlenmişken, diğer GPS tabanlı PPP yöntemlerinde ise bu fark yaklaşık 1 ila 2 mm arasındadır.

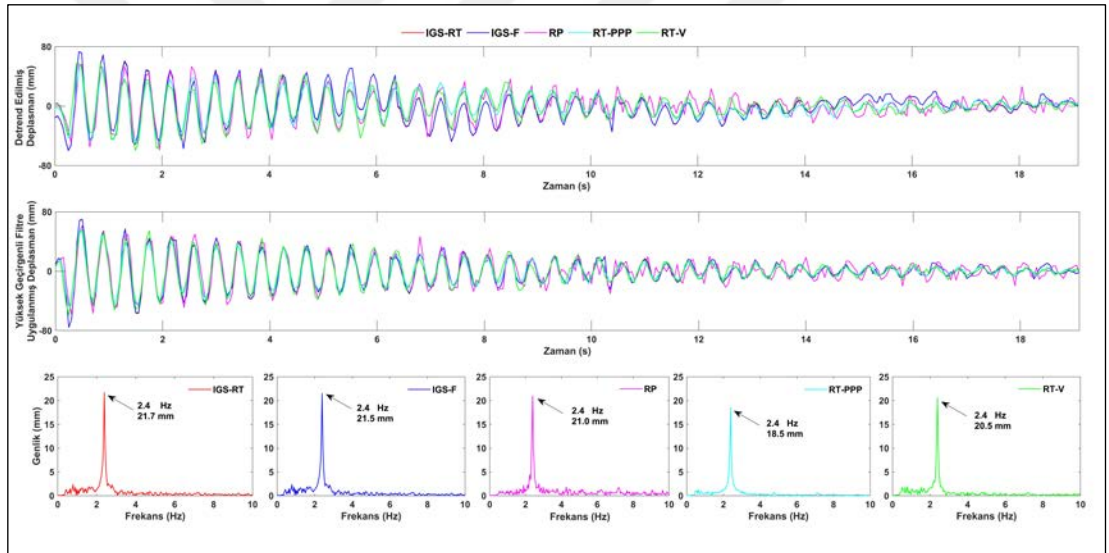
Durum 15'e ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.44'te gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 45 mm'dir. Durum 15 için toplam süre yaklaşık 15 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yöntemle ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın, hareketin azaldığı durumdan sonra PPP (IGS-RT ve IGS-F) tabanlı çözümlerde dalgalanmalar ve ofsetler meydana gelmiştir. Kısa süreli dalgalanmalar ve ofsetler Şekil 7.44'in orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçirgenli filtre uygulanarak meydana gelen durumlar düzeltilmiştir.



Şekil 7.44: 15. durum için 5 yöntemle ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Şekilde yöntemlerin FFT spektrumlarında görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 2.4 Hz'dir. Bu frekansa karşılık gelen genlik değerleri incelendiğinde, RP yöntemine göre RT-V yaklaşımlarının mm altında birbiri

ile tutarlı sonuçlar verdiği diğer PPP tabanlı yöntemlerinde ise yaklaşık 2 ila 5 mm arasında farklar olduğu görülmüştür. Durum 16'ya ait üretilen düşey harmonik hareketlerin GPS tabanlı yöntemler ile karşılaştırılması Şekil 7.45'te gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında IGS-RT, IGS-F, RP, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer trendi giderilmiş deplasman zaman serisi gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında ise bu yöntemlerden elde edilen deplasmanlara, yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş deplasman zaman serisi ve şeklin alt kısmında da bu deplasman zaman serilerinin FFT spektrumları gösterilmiştir. Harmonik hareketin ilk başlangıç genliği yaklaşık 80 mm'dir. Durum 16 için toplam süre yaklaşık 19 saniyedir. Deplasmanları elde edilen 5 yönteme ait zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu fakat salınımın 6. saniyesinden sonra PPP (IGS-RT ve IGS-F) tabanlı çözümlerde dalgalanmalar meydana gelmiştir.



Şekil 7.45: 16. durum için 5 yönteme ait detrend edilmiş, filtrelenmiş deplasman zaman serileri ve FFT spektrumları.

Kısa süreli dalgalanmalar Şekil 7.45'in orta kısmında görüldüğü gibi yüksek geçişli filtre uygulanarak meydana gelen durumlar düzeltilmiştir. Şekilde yöntemlerin FFT spektrumlarında görüldüğü gibi tüm yöntemlerle elde edilen harmonik salınım frekansları eşit olup 2.4 Hz'dir. Bu frekansa karşılık gelen genlik değerleri incelendiğinde, RP yöntemine göre RT-V, IGS-RT ve IGS-F yaklaşımlarının mm altında birbiri ile tutarlı sonuçlar verdiği diğer RT-PPP tabanlı yönteminde ise yaklaşık 2.5 mm fark olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Tablo 7.8'de RP referans alınarak KOH

değerlerine bakıldığında zaman alanında 4 yönteminde 1 cm altında deplasmanları yakalayabildiği sonucu ortaya çıkmıştır.

Tablo 7.8: Konsol boyu 70 cm için Filtreleme sonrası çözümlerden elde edilen istatistiksel değerler.

| Durum No | IGS-RT   |          |               | IGS-F    |          |               | RT-PPP   |          |               | RT-V     |          |               |
|----------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|
|          | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) | KOH (mm) | Max (mm) | Ortalama (mm) |
| 13       | 8.6      | 30.6     | 0.0           | 8.6      | 29.4     | 0.0           | 7.7      | 24.8     | -0.1          | 8.1      | 25.5     | 0.0           |
| 14       | 9.0      | 41.8     | 0.0           | 9.0      | 41.0     | 0.0           | 7.8      | 27.3     | 0.0           | 11.7     | 35.3     | 0.1           |
| 15       | 9.0      | 30.9     | 0.0           | 8.9      | 30.1     | 0.0           | 8.3      | 24.7     | 0.0           | 9.5      | 30.9     | 0.0           |
| 16       | 8.9      | 33.6     | 0.0           | 8.9      | 33.4     | 0.0           | 8.3      | 23.2     | 0.0           | 9.4      | 38.6     | 0.1           |

## 8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, farklı mühendislik yapılarında meydana gelen düşey dinamik yer değiştirmelerin, yüksek frekanslı RT-PPP ve RT-V yöntemi ile yakalanabilme performansı test edilmiştir. Deneyler boyunca hem RT-PPP hem de RT-V yönteminin doğruluğunu karşılaştırmak için günümüze kadar birçok benzer çalışmada referans olarak alınan RP yöntemine göre kıyaslama yapılmıştır. Ayrıca PPP yöntemine dayalı sonradan değerlendirme (IGS-Final) ve yakın gerçek zamanlı (IGS-RT) ürünler kullanılarak çözümler de ortaya koyulmuştur. PPP tabanlı çözümlerin RT-PPP ve RT-V yöntemi ile karşılaştırılmasındaki sebep ise bu tezin asıl amacı doğrultusunda tek bir GNSS alıcısı ile mühendislik yapılarında meydana gelen dinamik titreşimlerin gerçek zamanlı Hassas Nokta Konumlandırma ve VADASE yöntemiyle tespit edilebilirliğini incelemektir. Fakat bu yöntemler de kullanılan GNSS alıcısı bir tane olup, referans olarak alınan RP yönteminde ise GNSS alıcısı iki tanedir. Bu durumda çözümlerin adil bir şekilde değerlendirilmesi ve günümüzde birçok çalışma alanında IGS-F ve IGS-RT ürünleri kullanılarak yapılan PPP tabanlı çözümler bu tez çalışmasında da kullanılmıştır. Ayrıca IGS-RT ürünleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, yapıların yakın gerçek zamanlı şartlar altında performansı da değerlendirilmiştir. Deneyler boyunca sadece-GPS uydu gözlemlerine dayalı çözümler yapılmıştır. Bunun en önemli sebebi RT-PPP çözümlerinde kullanmış olduğumuz Trimble MB-2 OEM GNSS alıcısının sadece-GPS gözlemlerini toplamasından kaynaklanmaktadır. İlerleyen çalışmalarda çoklu-GNSS gözlem kombinasyonlarının RT-PPP ve RT-V yöntemi ile düşey yönlü dinamik hareketlerin performansı daha kapsamlı incelenmesi düşünülmektedir. Bununla birlikte günümüzde kullanılan GNSS alıcılarında veri toplama hızı, kapasitesi ve depolama alanlarındaki gelişmeler ile aynı anda farklı frekanslarda (düşük-orta-yüksek) veri toplanarak RT-PPP ve RT-V çözümlerinin düşey dinamik hareketleri yakalama performansı ve farklı frekanslarda veri toplanmasının etkilerinin değerlendirilme çalışmalarının yapılması da planlanmaktadır. Deney sonuçları bölümünde, epok farkı sonuçları ve deplasman sonuçları olarak iki alt başlık altında 5 farklı yöntemin sonuçları incelenmiştir. Bu iki başlık altında incelenmesinin nedenlerinden biri, RT-V yönteminin direk epoklar arası deplasman bilgisini vermesidir. İkincisi ise yöntemlerden kaynaklı dalgalanma, ofset, alıcı anten gürültüsü gibi parametrelerin

etkisini azaltarak veya ortadan kaldırarak filtreleme yapılmış ve filtreleme yapılmamış sonuçları karşılaştırmaktır. Her bir bölümde kendi içerisinde 4 başlığa ayrılmıştır. Bunun nedeni ise gerçekleştirmiş olduğumuz deneylerde, yapıya etkiyen farklı frekans ve genlik değerlerinin, oluşturmuş olduğumuz modelde de uygulanmasıdır. Bunun için düşey sönümlü harmonik hareketler üreten çelik çubuğun serbest uç kısmı ile sabit nokta arasındaki konsol boyları 100 cm, 90 cm, 80 cm ve 70 cm alınarak yüksek frekanslı düşey hareketler üretilmiştir. Bununla birlikte farklı frekanslara sahip düşey hareketlerin 5 yönteme ait çözümleri hem zaman hem de frekans alanında birbiri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Epok farkları alınarak filtreleme yapılmadan 5 farklı yöntemin deplasman zaman serilerine bakıldığında birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Fakat bazı durumlarda PPP tabanlı çözümlerde yakınsamadan kaynaklı dalgalanmalar, mühendislik yapılarında yaygın bir şekilde görülen multipath etkisinin deneylerde çevresel şartlar ile bu etkinin oluşturulması ve kullanılan alıcıların oluşturduğu beyaz gürültüler gibi görülen etkiler zaman serisinde 5 farklı yöntemin birbiri ile uyumunu bozmaktadır. Alıcı donanımından kaynaklı beyaz gürültü, iki GNSS alıcısının kullanıldığı RP yönteminde daha fazla görülmektedir. Epok farkı alınmış 5 farklı çözümün FFT spektrumlarına bakıldığında, 100 cm, 90 cm, 80 cm ve 70 cm farklı konsol boylarında sırasıyla 1.4 Hz, 1.6 Hz, 1.9 Hz ve 2.4 Hz'lik aynı frekanslar bulunmuştur. Baskın frekanslara karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm ve mm altında birbiri ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda yapılarda meydana gelen titreşimlerin genlik ve frekans bilgisinin gerçek zamanlı şartlar altında RT-PPP ve RT-V yöntemleri ile güvenilir bir şekilde elde edilebileceği açıktır. Daha detaylı karşılaştırılma yapılması için 4 farklı yöntemin RP yöntemine göre olasılık dağılımına ve istatistiksel değerlerine bakıldığında KOH değerlerinin yaklaşık 1 cm veya cm altında birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca epok farkı sonuçları bölümünde gösterilen istatistiksel değerlerin oluşturulduğu tablolara bakıldığında konsol boyunun kısılması ile yüksek frekanslı düşey harmonik hareketlerin üretilmesine bağlı olarak KOH değerlerinde artış meydana gelmektedir. Bu durum uydulardan gelen sinyallerin çelik ağaç model yapısından dolayı multipath veya gelen sinyalin engellenmesine neden olmasından dolayı kaynaklanmaktadır. İstatistiksel anlamda olasılık dağılımında RP'ye göre farkların ortalama değerlerinin yaklaşık sıfıra çok yakın normal dağılım şeklinde eşit dağıldığı görülmektedir. Bu tezin amacı kapsamında RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin filtreleme uygulamadan gerçek zamanlı hem zaman hem de frekans alanında değerlendirildiğinde düşey harmonik salınımları

yakalama kabiliyetinin başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Değerlendirme yöntemlerinin çözümlerinden kaynaklı dalgalanmalar, ofsetler, alıcı donanım kaynaklı gürültüler gibi etkilerin filtreleme yapıldıktan sonra azaltılıp veya ortadan kaldırılarak incelediğimizde tüm durumlarda deplasman zaman serilerinde 5 farklı çözümün birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Frekans alanında FFT spektrumları alındığında 4 farklı konsol boyunda 5 farklı yönteminde aynı frekans değerlerini yakaladığı ve bu frekanslara karşılık gelen genlik değerlerinde mm veya mm altında birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Tez kapsamında RT-PPP ve RT-V yönteminin dinamik hareketleri yakalama performansını daha iyi analiz edebilmek için zaman alanında istatistiksel değerlendirme yapıldığında RP göre tüm yöntemlerin doğruluğu yaklaşık 1 cm veya cm altında birbiri ile tutarlı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlara göre hem RT-PPP hem de RT-V yönteminin tek bir alıcı ile düşey yönlü dinamik hareketlerin yakalanmasında cm altında başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Böylece deprem, tsunami, rüzgâr gibi doğal olayların mühendislik yapılarında meydana getirdiği kısa süreli dinamik hareketlerin yakalanmasında, RP yöntemine göre RT-PPP ve RT-V yaklaşımlarının alternatif birer yöntem olduğu ortaya koyulmuştur. Bununla birlikte RP yönteminin deprem şiddeti yüksek olan yer kabuğu hareketlerinde sabit noktanın yer değiştirmesinden kaynaklı sınırlamaların olması, sonradan değerlendirme (PP)-PPP tekniğinde kullanılan uydu yörünge ve saat düzeltme ürünlerinin (IGS-F) 13 ila 17 gün süre ile sunulması ve RT-PPP yönteminde anlık internet servisine dayalı kesintiler, gerçek zamanlı ürünlerin Gerçek Zamanlı Servis (RTS) kaynaklı gecikmeleri, bu yöntemlerin gerçek zamanlı şartlar altında dinamik hareketleri izlemede kullanılabilirliğini sınırlandırmaktadır. Bundan dolayı RT-V yaklaşımı mühendislik yapılarında meydana gelebilecek dinamik hareketlerin anlık olarak hiçbir dış parametreye bağlı kalmadan değerlendirilebileceği için net bir şekilde önemini ortaya çıkarmaktadır.

Sonuçlara bakıldığında mühendislik yapılarına etki eden doğal (deprem, rüzgâr, tsunami ve volkan gibi) ve yapay (trafik yükü, eşya yükü gibi) etkiler sonucu oluşan dinamik yüklerden kaynaklı düşey deplasmanların gerçek zamanlı şartlar altında sadece-GPS gözlemlerine dayalı RT-PPP ve RT-V yöntemiyle izlenebileceği ve güvenilir sonuçlar vereceği başarılı bir şekilde gösterilmiştir.

Ayrıca, RT-PPP ve RT-V yöntemlerinin, yatay yer değiştirmelerin yanı sıra düşey yer değiştirmelerin tespit edilmesi, yapıda hasar verici veya yıkıcı etkilerinin yapı sağlığı izleme uygulamalarında ve hızlı tehlike değerlendirme uygulamalarında

etkin bir role sahip olacaktır. Mühendislik yapılarında meydana gelen yatay ve düşey yönlü yer değiştirmelerin tespiti için yapı sağlığı izleme sistemlerine entegre olan GNSS tabanlı alıcı/anten donamları kullanıldığında sinyal gürültü oranı düşük yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS alıcıları tercih edilmelidir.

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda yapılarda meydana gelen düşey deplasmanları tespit edebilmek için referans olarak GNSS tabanlı sensörler kullanılarak bağıl konum belirleme referans alınmıştır. Referans alınan yöntemde kullanılan GNSS alıcı sayısı minimum iki tane olmasından dolayı çözümlerde iki alıcı/anten gürültüsünün etkisi bulunmaktadır. Bununla birlikte, tez kapsamında araştırılan diğer 4 yöntemde kullanılan GNSS alıcı/anten sayısı bir tanedir. İlerleyen çalışmalarda GNSS gözlemlerinden bağımsız, doğrudan yer değiştirmeyi hesaplayabilen geoteknik sensörler kullanılarak düşey dinamik yer değiştirmelerin çoklu-GNSS uydu kombinasyonları ile hem RT-PPP hem de RT-V yöntemiyle daha kapsamlı incelenmesi düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Larson K. M., (2003), "Using 1-Hz GPS Data to Measure Deformations Caused by the Denali Fault Earthquake", *Science*, 300, 1421–1424.
- [2] Larson K. M., (2009), "GPS seismology", *Journal of Geodesy*, 83, 227–233.
- [3] Kouba J., (2003), "Measuring Seismic Waves Induced by Large Earthquakes with GPS", *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47, 741–755.
- [4] Crowell B. W., Bock Y., Melgar D., (2012), "Real-time inversion of GPS data for finite fault modeling and rapid hazard assessment", *Geophysical Research Letters*, 39, L09305.
- [5] Blewitt G., Kreemer C., Hammond W. C., Plag H. P., Stein S., Okal E., (2006), "Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems", *Geophysical Research Letters*, 33, L11309.
- [6] Colombelli S., Allen R. M., Zollo A., (2013), "Application of real-time GPS to earthquake early warning in subduction and strike-slip environments", *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 118, 3448–3461.
- [7] Crowell B. W., Bock Y., Squibb M. B., (2009), "Demonstration of Earthquake Early Warning Using Total Displacement Waveforms from Real-time GPS Networks", *Seismological Research Letters*, 80, 772–782.
- [8] Yi T., Li H., Gu M., (2013), "Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures", *Structural Control and Health Monitoring*, 20 (5), 649–670.
- [9] Moschas F., Stiros, S., (2015), "Dynamic deflections of a stiff footbridge using of 100-Hz GNSS and accelerometer data", *Journal of Surveying Engineering*, 141 (4), 4015003.
- [10] Wang J., Meng X., Qin C., Yi J., (2016), "Vibration frequencies extraction of the forth road bridge using high sampling GPS data", *Shock and Vibration*, 2016, 1-18.
- [11] Yu J., Yan B., Meng X., (2016), "Measurement of bridge dynamic responses using network-based real-time kinematic GNSS technique", *Journal of Surveying Engineering*, 142 (3), 04015013.
- [12] 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.

- [13] Çelebi M., (2000), "GPS in dynamic monitoring of long-period structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20, 477–483.
- [14] Tamura Y., Matsui M., Pagnini L. C., Ishibashi R., Yoshida A., (2002), "Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90 (12), 1783–1793.
- [15] Kijewski-Correa T., Kilpatrick J., Kareem A., Kwon D. K., Bashor R., Kochly M., Young B. S., Abdelrazaq A., Galsworthy J., Isyumov N., (2006), "Validating Wind-Induced Response of Tall Buildings: Synopsis of the Chicago Full-Scale Monitoring Program", *Journal of Structural Engineering American Society of Civil Engineers*, 132, 1509–1523.
- [16] 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 Solutions*, 10, 233–247.
- [17] 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, 2771–2781.
- [18] Park H. S., Sohn H. G., Kim I. S., Park J. H., (2008), "Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17, 117–132.
- [19] 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, 103–113.
- [20] Pehlivan H., Aydın Ö., Güral E., Bilgili E., (2013), "Determining the behaviour of high-rise structures with geodetic hybrid sensors", *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6 (8), 702–717.
- [21] Nakamura S. I., (2000), "GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements", *Journal of Structural Engineering*, 126 (12), 1413–1419.
- [22] Xu L., Guo J. J., Jiang J. J., (2002), "Time–frequency analysis of a suspension bridge based on GPS", *Journal of Sound and Vibration*, 254, 105–116.
- [23] Roberts G. W., Meng X., Dodson A., (2004), "Integrating a Global Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges", *Journal of Surveying Engineering*, 130, 65–72.
- [24] Erdoğan H., Akpınar B., Güral E., Ata E., (2007), "Monitoring the dynamic behaviors of the Bosphorus Bridge by GPS during Eurasia Marathon", *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14, 513–523.
- [25] Meng X., Dodson A., Roberts G., (2007), "Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers", *Engineering Structures*, 29 (11), 3178–3184.

- [26] Yi J., Zhang J. W., Li Q. S., (2013), “Dynamic characteristics and wind-induced responses of a super-tall building during typhoons”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 121, 116–130.
- [27] Xu Y., Brownjohn J. M. W., Hester D., Koo K. Y., (2017), “Long-span bridges: Enhanced data fusion of GPS displacement and deck accelerations”, *Engineering Structures*, 147, 639–651.
- [28] Roberts G. W., Tang X., Brown C. J., (2018), “Measurement and correlation of displacements on the Severn Suspension Bridge using GPS”, *Applied Geomatics*, 11, 161–176.
- [29] Meng X., Nguyen D. T., Owen J. S., Xie Y., Psimoulis P., Ye G., (2019), “Application of GeoSHM System in Monitoring Extreme Wind Events at the Forth Road Bridge”, *Remote Sensing*, 11 (23), 2799.
- [30] 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, 1112–1133.
- [31] 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, 432–433.
- [32] 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.
- [33] 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, 23–42.
- [34] Psimoulis P. A., Stiros S. C., (2013), “Measuring Deflections of a Short-Span railway ridge using a robotic total station”, *Journal of Bridge Engineering*, 18 (2), 182–185.
- [35] 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.
- [36] 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, 1471–1482.
- [37] 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, 389–403.

- [38] Wang Y., Wu W., Zhu Q., Shen G., (2011), “Discrete wavelet transform for nonstationary signal processing”. In: J. T. Olkkonen, Editors, “Discrete wavelet transform – theory and applications”, London: InTech.
- [39] Kuter N., Kuter S., (2010), “Accuracy comparison between GPS and DGPS: a field study at METU campus”, *Italian Journal of Remote Sensing*, 42 (3), 3– 14.
- [40] Kaloop M. R., Hu J. W., Elbeltagi E., (2016), “Adjustment and Assessment of the Measurements of Low and High Sampling Frequencies of GPS Real-Time Monitoring of Structural Movement”, *International Journal of Geo- Information*, 5, 222.
- [41] Montillet J. P., Szeliga W., Melbourne T. I., Flake R. M., Schrock G., (2016), “Critical infrastructure monitoring with global navigation satellite systems”, *Journal of Surveying Engineering*, 142 (4), 4016014.
- [42] Bao Y., Guo W., Wang G., ASCE M., Gan W., Zhang M., Shen S., (2018), “Millimeter-accuracy structural deformation monitoring using stand-alone GPS: case study in Beijing, China”, *Journal of Surveying Engineering*, 144 (1), 05017007 (1–14).
- [43] Liu Y., Fan X., Lv C., Wu J., Li L., Ding D., (2018), “An innovative information fusion method with adaptive Kalman filter for integrated INS/GPS navigation of autonomous vehicles”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 100, 605–616.
- [44] Landau H., Vollath U., Chen X., (2002), “Virtual Reference Station Systems”, *Journal of Global Positioning System*, 1 (2), 137-143.
- [45] Jansen V., (2009), “A Comparison of The VRS and MAC Principles for Network RTK”, *International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium, Surfers Paradise, Qld, Australia, 1-3 December*.
- [46] Öcalan T., (2012), “GNSS/CORS Ağları ile Gerçek Zamanlı Konumsal Bilgi”, *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, 530, 66-71.
- [47] Akpınar B., Aykut N. O., Dindar A. A., Gürkan K., Güllal E., (2017), “Ağ RTK GNSS Yönteminin Yapı Sağlığı İzleme Çalışmalarında Kullanımı”, *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 17, 1030-1040.
- [48] Shu Y., Shi Y., Xu P., Niu X., Liu J., (2017), “Error analysis of high-rate GNSS precise pointpositioning for seismic wave measurement”, *Advances in Space Research*, 59 (11), 2691–2713.
- [49] Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H., (1997), “Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks”, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 102 (B3), 5005–5017.

- [50] Kouba J., Heroux P., (2001), "Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products", *GPS Solutions*, 5 (2), 12-28.
- [51] Gao Y., Shen X., (2002), "A new method for carrier phase based precise point positioning", *Navigation*, 49 (2), 109–116.
- [52] Wang M., Gao Y., (2006), "GPS Un-Differenced Ambiguity Resolution and Validation", *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, 292-300, Fort Worth, TX, USA, 26-29 September 2006.
- [53] Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J., (2008), "Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations", *Journal of Geodesy*, 82 (7), 389–399.
- [54] Laurichesse D., Mercier F., Berthias J. P., Broca P., Cerri L., (2009), "Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination", *Navigation*, 56, 135-149.
- [55] Collins P., Bisnath S., Lahaye F., Heroux P., (2010), "Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing", *Navigation*, 57, 123-135.
- [56] 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 Geophysical Research*, 116, B02305.
- [57] Hefty J., Gerháťová 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.
- [58] 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.
- [59] Nie Z., Zhang R., Liu G., Jia Z., Wang D., Zhou Y., Lin M., (2016), "GNSS seismometer: Seismic phase recognition of real-time high-rate GNSS deformation waves", *Journal of Applied Geophysics*, 135, 328–337.
- [60] 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.
- [61] Xu P., Shu Y., Niu X., Yao W., Chen Q., (2019), "High-rate multi-GNSS attitude determination: Experiments, comparisons with inertial measurement units and

applications of GNSS rotational seismology to the 2011 Tohoku Mw9.0 earthquake”, *Measurement Science and Technology*, 30 (2), 024003.

- [62] 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.
- [63] Tang X., Roberts G. W., Li X., Hancock C., (2017), “Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn suspension bridge, UK.”, *Advances in Space Research*, 60 (5), 925–937.
- [64] Kaloop M. R., Yigit C. O., Hu J. H., (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.
- [65] 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.
- [66] Kaloop R. M., Yigit C. O., El-Mowafy A., Bezcioglu M., Dindar A. A., Hu J. W., (2020b), “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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] Beutler G., Rothacher M., Schaer S., Springer T. A., Kouba J., Neilan R. E., (1999), “The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth sciences”, *Advances in Space Research*, 23 (4), 631-635.
- [70] Dow J. M., Gendt G., Moore A., Neilan R. E., Weber R., (2004), “The International GPS Service—what’s next? 10th anniversary assembly charts future directions. In: *Proceedings of ION GNSS 2004*, Long Beach, CA, USA, 21–24 September, 1741–1748.
- [71] Web 1, (2021), <https://igs.org/products/>, (Erişim Tarihi: 10/11/2021).
- [72] Kouba J., (2009) “A Guide to using international GNSS Service (IGS) Products”, *Geodetic Survey Division Natural Resources Canada*, 6-34.

- [73] Caissy M., Agrotis L., (2011), “Real-time working group and real-time pilot project”, International GNSS Service Technical Report, 183–190.
- [74] Wang Z., Li Z., Wang L., Wang X., Yuan H., (2018), “Assessment of multiple GNSS real-time SSR products from different analysis centers”, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) International Journal of Geo-Information, 7 (3), 85.
- [75] Zhang L., Yang H., Gao Y., Yao Y., Xu C., (2018), “Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers”, Advances in Space Research, 61 (12), 2942–2954.
- [76] Elsobeiey M., Al-Harbi S., (2016), “Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service”, GPS Solutions, 20 (3), 565–571.
- [77] Weber G., Dettmering D., Gebhard H., (2005), “Networked transport of RTCM Via Internet Protocol (NTRIP)”, International Association of Geodesy Symposia, 128, 60–64.
- [78] Wübbena G., Schmitz M., Bagge A., (2005), “PPP-RTK: precise point Positioning using state-space representation in RTK networks. In: Proceedings of ION GNSS 2005”, Institute of Navigation, 2584-2594, Long Beach, California, USA, September 13–16.
- [79] Hadas T., Bosy J., (2015), “IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time”, GPS Solutions, 19 (1), 93–105.
- [80] Krzan G., Przestrzelski P., (2016), “GPS/GLONASS Precise Point Positioning with IGS Real-time service product”, Acta Geodynamica et Geomaterialia, 13 (1), 69–81.
- [81] El-Mowafy A., Deo M., Kubo N., (2016), “Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections”, GPS Solutions, 1–11.
- [82] Alcay S., Turgut M., (2017), “Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning Method”, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95, 032023, 2017.
- [83] Alcay S., (2019), “Investigation of The Positioning Performance of Real Time Precise Point Positioning Method (RT-PPP) In Terms Of Accuracy And Precision”, Omer Halisdemir University Journal of Engineering Science, 8 (1), 121-133.
- [84] 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 (3), 243–253.

- [85] 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.
- [86] El-Mowafy A., Deo M., (2017), “Bridging Real-Time Precise Point Positioning in Natural Hazard Warning Systems during Outages of MADOCA Corrections”, *Proceedings of the ION Pacific PNT 2017 Conference*, ION PNT 2017, Honolulu, Hawaii, May 1-4.
- [87] Martín A., Anquela A.B., Dimas-Pagés A., Cos-Gayón F., (2015), “Validation of performance of real-time kinematic PPP. A possible tool for deformation monitoring”, *Measurement*, 69, 95–108.
- [88] 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 Solutions* 23 (1), 1–12.
- [89] 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.
- [90] Zheng K., Zhang X., Li X., Li P., Sang J., Ma T., Schuh H., (2019), “Capturing coseismic displacement in real time with mixed single- and dual-frequency receivers: application to the 2018 Mw7.9 Alaska earthquake”, *GPS Solutions*, 23 (1), 1–14.
- [91] 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 (2), 1–17.
- [92] Colosimo G., Crespi M., Mazzoni A., (2011), “Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116 (11), 1–14.
- [93] 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 RT-VA Algorithm”, *Seismological Research Letters*, 85, 649–656.
- [94] Fratarcangeli F., Ravanelli M., Mazzoni A., Colosimo G., Benedetti E., Branzanti M., Savastano G., Verkhoglyadova O., Komjathy A., Crespi M. (2018), “The variometric approach to real-time high-frequency geodesy”, *Rendiconti Lincei-Scienze Fisiche e Naturali Journal*, 29, 95–108.
- [95] Branzanti M., Colosimo G., Crespi M., Mazzoni A., (2013), “GPS near-real-Time coseismic displacements for the great Tohoku-oki earthquake”, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10 (2), 372-376.

- [96] Geng T., Xie X., Fang R., Su X., Zhao Q., Liu G., (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 (1), 161–167.
- [97] 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), S0553.
- [98] Tesolin F., Vitti A., Mazzoni A., Crespi M., (2019), “Impact of Galileo data on the solutions of the variometric approach for displacement analysis”, *Advances in Space Research*, 63 (9), 3053-3061.
- [99] Bezcioglu M., Karadeniz B., Yigit C.Ö., Dindar A.A., El-Mowafy A., Avcı Ö., (2022). “Gerçek Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi”, *Harita Dergisi*, 167, 1-11.
- [100] Karadeniz B., Bezcioglu M., Yigit C.Ö., Dindar A.A., Avcı Ö., (2022). “Gerçek Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Düşey Yönlü Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi”, *AKÜ FEMÜBİD*, 22(3), 626-636.
- [101] Karadeniz B., Yigit C.O., Bezcioglu M., Dindar A.A., Avcı O., (2022) Gerçek Zamanlı GPS-VADASE Yaklaşımının Düşey Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Performansının İncelenmesi, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2022 Bilimsel Toplantısı, 02-04 Kasım 2022, Kocaeli, Türkiye.
- [102] 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.
- [103] Fortunato M., Ravanelli M., Mazzoni A., (2019). “Real-Time Geophysical Applications with Android GNSS Raw Measurements”, *Remote Sensing*, 11, 2113.
- [104] Çolak M., (2019), “GPS Tarihçesi ve Çalışma Prensipleri”, Lisans Bitirme Tezi, Karabük Üniversitesi.
- [105] Web 2, (2022), [https://stringfixer.com/tr/GPS\\_satellites](https://stringfixer.com/tr/GPS_satellites), (Erişim Tarihi: 10/03/2022).
- [106] Web 3, (2022), <https://www.navcen.uscg.gov/global-positioning-system-overview>, (Erişim Tarihi: 11/03/2022).
- [107] Web 4, (2022), <https://www.e-education.psu.edu/geog862/l9.html>, (Erişim Tarihi: 11/03/2022).
- [108] Web 5, (2022), <https://www.glonass-iac.ru/en/index.ph>, (Erişim Tarihi: 21/03/2022).

- [109] Web 6, (2022), <https://www.gsceuropa.eu/galileo/programme>, (Erişim Tarihi: 21/03/2022).
- [110] Falcone M., Hahn J., Burger T., (2017), “Galileo”. In: P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck, Editors, “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer, Cham.
- [111] Kahveci M., Yıldız F., (2017), “GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori-Uygulama”, 11. Basım, Nobel Akademik Yayıncılık.
- [112] Montenbruck O., Teunissen P., (2017). “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, 1st Edition, Springer.
- [113] Koca B., Ceylan A., (2018), “Uydu Konum Belirleme Sistemlerindeki (GNSS) Güncel Durum ve Son Gelişmeler”, Geomatik Dergisi, 3 (1), 63-73.
- [114] Betz J. W., (2016), “Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: Global Navigation Satellite Systems, Signals, and Receivers”, 1st Edition, Wiley.
- [115] Web 7, (2022), <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1879>, (Erişim Tarihi: 11/04/2022).
- [116] Web 8, (2022), <https://en.wikipedia.org/wiki/IRNSS-1I>, (Erişim Tarihi: 21/04/2022).
- [117] Web 9, (2022), <https://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html>, (Erişim Tarihi: 12/04/2022).
- [118] Web 10, (2022), <https://www.savunmasanayiidergilik.com/tr/HaberDergilik/Gunes-ve-Ay-in-uydu-yorungelerine-etkisi>, (Erişim Tarihi: 20/03/2022).
- [119] Leick A., (2004), “GPS Satellite Surveying”, 3rd Edition, Wiley.
- [120] Kahveci M., Yıldız F., (2001), “GPS-Global Konum Belirleme Sistemi Teori-Uygulama”, Nobel.
- [121] Mirsa P., Enge P., (2012), “Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance”, Revised 2nd edition, Ganga-Jamuna Press.
- [122] Abdallah M., (2016), “Precise Point Positioning for Kinematic Applications to Improve Hydrographic Survey”, Doctoral Thesis, University of Stuttgart.
- [123] Hoffmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., (2000), “GPS: Theory and Practice”, 4th Edition, Springer-Verlag/Wien.
- [124] Kaplan E., Hegarty C., (2006), “Understanding GPS Principles and Applications”, 2nd edition, Artech House.

- [125] El-Rabbany A., (2002), "Introduction to GPS, the Global Positioning System", 5th Edition, Artech House.
- [126] Wells D., Beck N., Delikaraoglou D., Kleusberg A., Krakiwsky E., Langley R., Nakiboglu M., Schwarz K., Tranquilla J., Vanicek P., (1999), "Guide to GPS Positioning", University of New Brunswick, Canadian GPS Associates, Canada.
- [127] Anderle R. J., (1976), "Satellite Doppler Positioning", International Geodetic Symposium, A77-47370 22-43, Las Cruces-New Mexico-ABD, 12-14 October.
- [128] Xu C., Wang J., Gao J., Wang J., Hu H., (2011), "Precise Point Positioning and its application in mining deformation monitoring", Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 21, 499-505.
- [129] Defraigne P., Bruyninx C., (2007), "On the link between GPS pseudorange noise and day-boundary discontinuities in geodetic time transfer solutions", GPS Solutions, 11 (4), 239–249.
- [130] Dach R., Schaer S., Lutz S., Meindl M., Schaer S., Steigenberger P., Beutler G., (2010), "Combining the observations from different GNSS", In: European Reference (EUREF) 2010 Symposium, Gävle, Sweden, 02–05 June.
- [131] Geng J., Meng X., Dodson A. H., Teferle F. N., (2010), "Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison", Journal of (2010), "Combining the observations from different GNSS", In: European Geodesy, 84 (9), 569–581.
- [132] Wanninger L., (2012), "Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers", Journal of Geodesy, 86 (2), 139–148.
- [133] Chen J., Pei X., Zhang Y., Wu B., (2013), "GPS/GLONASS system bias estimation and application in GPS/GLONASS combined positioning", In: J. Sun, W. Jiao, H. Wu, C. Shi, "China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings", Springer.
- [134] Chuang S., Wenting, Y., Weiwei, S., Yidong L., Yibin Y., Rui Z., (2013), "GLONASS pseudorange inter-channel biases and their effects on combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning", GPS Solutions, 17 (4), 439–451.
- [135] Chen P., Whang J., Zhang Y., Yang S., (2015), "A simplified and unified model of multi-GNSS precise point Positioning", Advances in Space Research, 55, 125-134.
- [136] Rizos B. C., (1999), "Satellite Ephemeris Bias, Principles and Practice of GPS Surveying", The University of New South Wales, 1st Edition.
- [137] Ebner R., (2008), "Validation and Application of Free-online and Commercial Post-processing PPP Packages", Master Thesis, Graz University of Technology.

- [138] Guo F., Li X., Zhang X., Wang J., (2017), ‘‘The contribution of multi-GNSS experiment (MGEX) to precise point Positioning’’, *Advances in Space Research*, 59 (11), 2714-2725.
- [139] Web 11, (2022), <https://www.insidegnss.com/auto/novdec08-gnss-sol-v1.pdf>, (Erişim Tarihi: 28/04/2022).
- [140] Witchayangkoon B., (2000), ‘‘Elements of GPS Precise Point Positioning’’, Doctor of Philosophy Thesis, University of Maine.
- [141] Choy S. L., (2009), ‘‘An Investigation Into The Accuracy Of Single Frequency Precise Point Positioning (PPP)’’, Doctoral Thesis, School of Mathematical and Geospatial Sciences College of Science, Engineering and Health RMI University.
- [142] Dow J. M., Neilan R. E., Gendt G., (2005) ‘‘The International GPS Service: celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade’’, *Advance in Space Research*, 36, 320–326.
- [143] Web 12, (2022), <https://igs.org/products/>, (Erişim Tarihi: 29/04/2022).
- [144] Zhu S. Y., Massmann F. H., Yu Y., Reigber C., (2003), ‘‘Satellite antenna phasecenter off sets and scale errors’’, *Journal of Geodesy*, 76, 668-672.
- [145] Flechtner F., (2010), ‘‘System Earth Via Geodetic-geophysical Space Techniques’’, 1st Edition, Springer.
- [146] Wu J. T., Wu S. C., Hajj G. A., Bertiguer W.I., Lichten S. M., (1993), ‘‘Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase Measurements’’, *Manuscripta Geodaetica*, 18, 91-98.
- [147] Kahveci M., (2010), ‘‘GPS/GNSS Gözlemlerini Değerlendirme Yöntemlerinde Son Gelişmeler’’, *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, 102, 3-9.
- [148] Hatch R., ‘‘Relativity and GPS-I’’, *Galilean Electrodynamics*, 6 (3), 52–57.
- [149] Ashby N., J. J. Spilker, Jr., (1996), ‘‘Introduction to Relativity Effects on the Global Positioning System,’’ in *Global Positioning System: Theory and Applications*, Volume II, B. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., (eds.), Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [150] Öcalan T., (2015), ‘‘GNSS ağlarında gps hassas nokta konumlama (gps-ppp) tekniği yaklaşımlı çözümler’’, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [151] Tao W., (2008), ‘‘Near Real-time GPS PPP-inferred Water Vapor System Development and Evaluation’’, Doctor of Philosophy Thesis, University of Calgary.

- [152] Web 13, (2022), <http://astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/s/Shapiro+Delay>, (Erişim Tarihi: 15/04/2022).
- [153] Rothacher M., Beutler G., (2002), “Advanced Aspects of Satellite Positioning”, Lecture Notes, The University of Calgary, Canada.
- [154] McCarthy D., Petit G., (2004), IERS 2003 Conventions. Verlag des Bundes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main p 127.
- [155] Chen K., (2005), “Real-Time Precise Point Positioning, Timing and Atmospheric Sensing”, Doctor of Philosophy (PhD) Thesis, University of Calgary.
- [156] Ashby N., Weiss M., (1999), “Global Positioning System Receivers and Relativity”, National Institute of Standards and Technology (NIST) Technical Note 1385, Boulder, CO.
- [157] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., (2008), “GNSS Global Navigation Satellite Systems”, 1st Edition, Springer Verlag Wien.
- [158] Tiryakioğlu İ., (2005), “GPS Sinyal Yansımasının (Multipath) Nokta Konumlarına Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [159] Web 14, (2022), <https://www.denizcilikbilgileri.com/gel-git-olayi-nedir/>, (Erişim Tarihi: 10/05/2022).
- [160] Web 15, (2022), <https://tua.gov.tr/tr/blog/dunya/dunya-nin-atmosferi-ve-katmanlari>, (Erişim Tarihi: 12/05/2022).
- [161] Petrov L., Boy J. P., (2004), “Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations”, Journal of Geophysical Research, 109 (B03405), 1-14.
- [162] Ray R., Ponte R., (2003), “Barometric tides from ECMWF Operational analyses”, Annales Geophysicae, 21 (8), 1897–1910.
- [163] Web 16, (2022) <https://geophy.uni.lu/atmosphere/tide-loading-calculator/>, (Erişim Tarihi: 12/05/2022).
- [164] Web 17, (2022), <http://www.ionolab.org/index.php?page=ionosphere&language=tr>, (Erişim Tarihi: 12/05/2020).
- [165] Arslan N., (2004), “GPS ile İyonosfer Toplam Elektron Yoğunluğu Değişimlerinin Koordinatlara Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [166] Erkan Y., Aktuğ B., Lenk O., Parmaksız E., Mert İ., Bacanlı H., (2010), “TUSAGA-Aktif (CORS-TR) Sistemi Atmosferik Çalışmalara Ait Ön Sonuçlar”, Uluslararası Katılımlı 1. Meteoroloji Sempozyumu, 71-82, Ankara, Keçiören, Türkiye, 27-28 Mayıs.

- [167] Ya'acob N., Abdullah M., Ismail M., (2008), "Determination of GPS total electron content using single layer model (SLM) ionospheric mapping function", International Journal of Computer Science and Network Security, 8 (9), 154-160.
- [168] Keder S., Hajj G., Wilson B., Heflin M., (2003), "The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions", Geophysical Research Letters, 30 (16), 1829.
- [169] Mekik Ç., (1999), "GPS'e Atmosferin Etkileri", Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Dergisi, 86, 14-20.
- [170] Rocken C., Hove T. V., Johnson J., Solheim F., Ware R., Bevis M., Chiswell S., Businger S., (1994), "GPS/STORM-GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor for Meteorology", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 12, 468-478.
- [171] Niell A., (1996), "Global mapping functions for the atmosphere delay at Radio Wavelengths", Journal of Geophysical Research Solid Earth, 101 (B2), 3227-3246.
- [172] Boehm J., Werl B., Schuh H., (2006), "Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data", Journal of Geophysical Research, 111 (B2), B02406.
- [173] Alkan R. M., Mutlu B., (2022), "IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği", Yerbilimleri, 43 (1), 76-95.
- [174] Öcalan T., Cingöz A., Duman H., Hastaoğlu K., Kara T., Gezer M. V., Özer E., Salgın Ö., (2015), "Büyük Ölçekli Harita Üretimi Standartlarının Geliştirilmesine Yönelik GPS PPP Tekniğinin Doğruluğunun Araştırılması", TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 15.Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 25-28 Mart.
- [175] Öcalan T., Alkan R. M., (2013), "Performance Analysis of Web-Based Online Precise Point Positioning (PPP) Services for Marine Applications", International Association of Institutes of Navigation & Arab Institute of Navigation, 24-29, Cairo, Egypt 01-03 October.
- [176] Alkan R. M., Ocalan T., Tunalioglu N., (2013), "Kinematic PPP Performance of Low-Cost GPS Receiver Using Online Post-Processing Service", GNSS Precise Point Positioning Workshop: Reaching Full Potential, Ottawa, Canada, 12-14 June.
- [177] Öcalan T., Tunalioglu N., Alkan R. M., (2013), "Performance Analysis of Trimble Center Point RTX Post-Processing Service for GNSS Static Data", The

2nd International Conference on: Measurement Technologies in Surveying,  
Warsaw, Poland, 23-25 May.

- [178] Kahveci M., Yıldız F., (2012), GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama, Nobel Akademik Yayıncılık, 222s, 5.Baskı, Ankara.
- [179] Kahveci M., (2009), “Kinematik GNSS ve RTK CORS Ağları”, 1. Baskı, Zerpa Turizm Yayıncılık.
- [180] Mekik Ç., Arslanoğlu M., (2003), “Gerçek Zamanlı Kinematik GPS Konumlarının Doğruluk Analizi ve Bir Örnek Uygulama”, 9. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 549-558, Ankara, Çankaya, Türkiye, 31 Mart-04 Nisan.
- [181] Martin I., (2013), “GNSS Precise Point Positioning The Enhancement with GLONASS”, Doctor of Philosophy Thesis, School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University.
- [182] Rizos C., Han, S., (2003), “Reference station network based RTK systems concepts and progress”, Wuhan University Journal of Natural Sciences, 8, 566-574.
- [183] Ahmed F., Va’clavovic P., Teferle F. N., Dous’a J., Bingley R., Laurichesse D., (2016), “Comparative analysis of real-time Precise Point Positioning zenith total delay estimates”, GPS Solutions, 20, 187–199.
- [184] 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.
- [185] Wübbena G., (2012). “RTCM State Space Representation (SSR) Overall Concepts Towards PPP-RTK”, PPP-RTK & Open Standards Symposium, Frankfurt, Germany, 12-13 March.
- [186] Teunissen P. J. G., (1993), “Least squares estimation of the integer GPS Ambiguities”, Invited Lecture, Section IV Theory and Methodology, International Airlines Groups General Meeting, Beijing, China.
- [187] Heo Y., Yan T., Lim S., Rizos C., (2009), “International Standard GNSS Real-Time Data Formats and Protocols”, International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium, Surfers Paradise, Qld, Australia, 1-3 December.
- [188] Öcalan T., Soycan M., (2011), “GNSS Verisinin Gerçek Zamanlı İletimi İçin Uluslararası Standartlar ve Gelişmeler”, Harita ve Kadastro Mühendisleri Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 2, 123-133.

- [189] Web 18, (2022), [https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public\\_index\\_en.html](https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html), (Erişim Tarihi: 09/06/2022).
- [190] Web 19, (2022), <http://www.ppp-wizard.net/index.html>, (Erişim Tarihi:10/06/2022).
- [191] Laurichesse D., Mercier F., Berthias J., Broca P., Cerri L, (2014), “Integer Ambiguity Resolution on undifferenced GPS Phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination”, Journal of Navigation, 56 (02) 135-149.
- [192] Karadeniz B., Bezcioglu 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, Ankara, Türkiye, 25-27 Kasım.
- [193] Roberts G. W., Meng X., Dodson A. H., (2000), “Structural dynamic and deflection monitoring using integrated GPS and triaxial accelerometers”, The Institute of Navigation GPS, Salt Lake City, UT, 19-22 September.
- [194] Web 20, (2022), [http://zeminarastirma.net/deneyler/inklinometre\\_deneyi\\_nedir\\_nasil\\_yapilir.html](http://zeminarastirma.net/deneyler/inklinometre_deneyi_nedir_nasil_yapilir.html), (Erişim Tarihi:15/06/2022).
- [195] Schofield W., Breach M., (2007), “Engineering Surveying. UK.”, Elsevier Books and Journals, 622, ISBN 978-0-7506-6948-8.
- [196] Psimoulis P., Stiros S., (2007), “Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS)”, Engineering Structures, 29 (12), 3312-3324.
- [197] Moschas F., Psimoulis P., Stiros S., (2012), “GPS-RTS data fusion to overcome signal deficiencies in certain bridge dynamic monitoring projects”, Smart Structures and Systems, 12 (3-4), 251-269.
- [198] Lienhart W., Ehrhart M., Grick M., (2016), “High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations”, Journal of Applied Geodesy, 11 (1), 1–8.
- [199] Pehlivan H., (2021), “The Analysis Methodology of Robotic Total Station Data For Determination of Structural Displacements”, Advanced Geomatics, 1 (1), 01-07.
- [200] Kraus, K., (2004), “Photogrammetrie Band 1: Geometrische Informationen Aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 7. Auflage.
- [201] Zhou, Z., Shao, S., Deng, G., Gao, Y., Wang, S., Chu, X., (2021), “Vision-based modal parameter identification for bridges using a novel holographic visual sensor, Measurement, 179, 109551.

- [202] Chopra, A. K., (1995), “Dynamics of Structures: Theory And Applications To Earthquake Engineering, 4th Edition, Englewood Cliffs (NJ), Prentice Hall.
- [203] Cain, C., (2009), “Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurement, Master Thesis, University of Calgary.
- [204] Web 21, (2022), <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/rtp>, (Erişim Tarihi: 09/05/2022).



## ÖZGEÇMİŞ

Barış KARADENİZ İlkokul, Ortaokul ve Lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2015 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümünü 2019 yılında hem Mühendislik Fakültesi hem de Harita Mühendisliği Bölüm birincisi olarak başarıyla tamamlayıp aynı yıl yüksek lisans eğitimine Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2021 yılına gelindiğinde yüksek lisans öğrenimine Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalında devam etti. 2021 yılından beri Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Ölçme Tekniği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

## **EKLER**

### **Ek A1: Tez Çalışması Kapsamında TR Dizinde Taranan Yayın Listesi**

Karadeniz B., Bezcioglu M., Yigit C.Ö., Dindar A.A., Avcı Ö. (2022), “Gerçek Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Düşey Yönlü Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi”, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22, 626-636.

### **Ek A2: Tez Çalışması Kapsamında Uluslararası Tam Metin Bildiri Listesi**

Karadeniz B., Bezcioglu M., Yigit C.O., Dindar A.A., Akpınar B. (2022) High-rate real-time PPP for dynamic motion detection in vertical direction, 5th Joint Symposium on Deformation Monitoring, JISDM 2022, 20-22 June, Valencia, Spain.

### **Ek A3: Tez Çalışması Kapsamında Ulusal Sözlü Özet Bildiri Listesi**

Karadeniz B., Yigit C.Ö., Bezcioglu M., Dindar A.A., Avcı Ö. (2022) Gerçek Zamanlı GPS-VADASE Yaklaşımının Düşey Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Performansının İncelenmesi, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2022 Bilimsel Toplantısı, 02-04 Kasım 2022, Kocaeli, Türkiye.

### **Ek B: Uluslararası SCI/SCI-E İndekslerinde Taranan Diğer Yayınlar Listesi**

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.

Yigit C.O., Bezcioglu M., Ilci V., Ozulu I.M., Alkan R.M., Dindar A.A., Karadeniz B. (2022) Assessment of Real-Time PPP with Trimble RTX correction service for real-time dynamic displacement monitoring based on high-rate GNSS observations, Measurement, 201, 111704.

Bezcioglu M., Yigit C.O., Karadeniz B., Dindar A.A., El-Mowafy A., Avcı Ö. (2023) 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, 27(1), 43.

### **Ek C: Ulusal TR Dizinde Taranan Diğer Yayınlar Listesi**

Karadeniz B., Bezcioglu M., Bilgen Ö.F., Yigit, C.Ö., (2021) GPS/Galileo PPP-AR ve PPP Yöntemlerinin Doğruluklarının Gözlem Süresi ve Uydu Kombinasyonları Açısından İncelenmesi, AKÜ FEMÜBİD, 21: 1377-1392.

Bezcioglu 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 D: Uluslararası Sözlü Diğer Tam Metin Bildiri Listesi**

Pehlivan H., Karadeniz B. (2021) A New Filtering and Analysis Approach for Poor Quality GNSS Data. 7th International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS), June 23- 27, 2021 in Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

Bezcioglu M., Karadeniz B., Yigit C.O., Dindar A. A., Tiryakioğlu I., Aktug B. (2021) Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) for Capturing Seismic Waveform and Coseismic Displacement, 6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ICEES), 13-15 October 2021, Gebze, Turkey.

Karabulut M.F., Aykut N.O., Akpınar B., Topal G.O., Cakmak Z.B., Doran B., Dindar A.A., Yigit C.O., Karadeniz B., Inam I.E. (2021) The Positioning Performance of Low-Cost GNSS Receivers in Precise Point Positioning Method, International Symposium on Applied Geoinformatics (ISAG'2021), 2-3 December, Riga, Latvia.

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

Bezcioglu M., Karadeniz B., Yigit C.O., Dindar A.A., Akpınar B. (2022) High-rate real-time single-frequency PPP for structural motion detection in horizontal direction, 5th Joint Symposium on Deformation Monitoring, JISDM 2022, 20-22 June, Valencia, Spain.

#### **Ek E: Ulusal Sözlü Diğer Özet Bildiri Listesi**

Karadeniz B., Bezcioglu 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.

Karabulut M. F., Aykut N.O., Akpınar B., Yiğit C.O., Topal G.O., Karadeniz B., Çakmak Z.B., Doran B., Dindar A. A., Inam İ.E. (2021) Düşük Maliyetli GNSS Alıcılarının Farklı Anten Tiplerine Göre Konum Doğruluklarının Belirlenmesi, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2021 Yılı Bilimsel Toplantısı, 25-27 Kasım 2021, Ankara, Türkiye.

Bezcioglu M., Yigit C.O., Dindar A.A., Avcı O., El-Mowafy A., Karadeniz B. (2022) Yatay Yönlü Dinamik Davranışların Gerçek-Zamanlı Olarak Tespit Edilmesi Uygulamalarında Farklı Gerçek Zamanlı Yaklaşımların İncelenmesi: Gerçek-Zamanlı PPP ve VADASE Yaklaşımı, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2022 Bilimsel Toplantısı, 02-04 Kasım 2022, Kocaeli, Türkiye.