T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TROPOSFER İZ DÜŞÜM FONKSİYONLARININ HASSAS MUTLAK NOKTA KONUM BELİRLEME DOĞRULUĞUNA ETKİSİ

Faruk Can DURMUŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Danışman

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

Mart, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TROPOSFER İZ DÜŞÜM FONKSİYONLARININ HASSAS MUTLAK NOKTA KONUM BELİRLEME DOĞRULUĞUNA ETKİSİ

Faruk Can DURMUŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 02.03.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Nursu TUNALIOĞLU ÖCALAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mustafa Tevfik ÖZLÜDEMİR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Farklı Troposfer İz Düşüm Fonksiyonlarının Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme Doğruluğuna Etkisi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Faruk Can DURMUŞ

İmza

TEŞEKKÜR

Her ne kadar sayfalara sığdırmayı uygun görmesem de, bu sayfayı minnet içeren duygularımı belirtmek için ayırmak istiyorum.

Çalışmamın fikir damlalarından havuza dönüştüğü yolculuğunda; büyük bir sabırla beni dinleyen ve yol gösteren Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN'a ve Arş. Gör. Ali Hasan DOĞAN'a birkaç satır teşekkürden fazlasını borç bilirim.

Ayrıca bana, yer ve zaman ayırt etmeksizin destek olan; annem, babam, kardeşim, arkadaşlarım ve Fatma KARA'ya sevgilerimi ve saygılarımı sunarım.

Faruk Can DURMUŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti....1

1.2 Tezin Amacı....7

1.3 Hipotez....9

2 GNSS İLE KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ VE HASSAS MUTLAK NOKTA KONUM BELİRLEME 10

2.1 Bağıl Konum Belirleme....10

2.2 Mutlak Konum Belirleme....11

2.2.1 Tek Nokta Mutlak Konum Belirleme (Single Point Positioning, SPP)....11

2.2.2 Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme (Precise Point Positioning, PPP)11

2.2.3 Gerçek Zamanlı Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme (Real Time-Precise Point Positioning, RT-PPP)....12

2.3 PPP İçin Değerlendirme Yöntemleri....12

2.3.1 Kouba & Heroux Yaklaşımı....12

2.3.2 Gao & Shen Yaklaşımı....14

2.4 PPP Hata Kaynakları....14

2.4.1 Uydu ve Alıcı Antenlerinden Kaynaklı Hatalar....15

2.4.2 Jeofiziksel Etkenlerden Kaynaklı Hatalar....16

2.4.3 Gözlem Modelinden ve Matematiksel Koşullardan Kaynaklı Hatalar....17

2.4.4 Atmosferik Koşullar....19

2.5 İz Düşüm Fonksiyonları....22

2.5.1 Chao Modeli....22

2.5.2 Marini Sürekli Orantısı....22

2.5.3 Herring Modeli.....23
2.5.4 Niell İz Düşüm Fonksiyonu (Niell Mapping Function, NMF).....24
2.5.5 İzobarik İz Düşüm Fonksiyonu (Isobaric Mapping Function, IMF).....26
2.5.6 Viyana İz Düşüm Fonksiyonları (Vienna Mapping Functions, VMF) 26
2.5.7 Viyana İz Düşüm Fonksiyonları 1 (Vienna Mapping Functions 1, VMF1) 27
2.5.8 Global İz Düşüm Fonksiyonu (Global Mapping Function, GMF) 28
2.5.9 Global Sıcaklık ve Basınç Modeli (Global Pressure and Temperature Model, GPT) 28
2.5.10 Global Sıcaklık ve Basınç Modeli 2 (Global Pressure and Temperature Model 2, GPT2).....29

3 FARKLI İZ DÜŞÜM FONKSİYONLARI İLE PPP ÇÖZÜMLERİ 31
3.1 Değerlendirme Yolunun Belirlenmesi ve Verilerin Toplanması.....31
3.2 PPP Çözümleri ve Değerlendirme 33
3.3 Sonuçların Analizi için Hazırlıklar ve Uygulama.....36
3.3.1 Hız Araştırması ve Genel RMS Değerlerinin Elde Edilmesi 37
3.3.2 İz Düşüm Fonksiyonlarının PPP Çözümlerindeki Performansı ve İstasyonun Elipsoidal Yüksekliği Arasındaki İlişki.....50
3.3.3 İz Düşüm Fonksiyonlarının PPP Çözümlerindeki Performansı ve İstasyonun Enlem Değeri Arasındaki İlişki.....52
3.3.4 İz Düşüm Fonksiyonlarının PPP Çözümlerindeki Performansı ve Gözlemin Yapıldığı Mevsim Arasındaki İlişki.....60

4 SONUÇ VE ÖNERİLER 65

KAYNAKÇA 67

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 71

SİMGE LİSTESİ

$t_{f,1-\alpha_0}$	''α_0'' Güven Aralığına Karşılık Gelen t Dağılımı Değeri
$\underline{x}$	Bilinmeyenler vektörü
med	Bir Veri Setindeki Medyan Değeri
s_o	Birim Ağırlık Ölçünün Standart Sapması
L1	Birincil Taşıyıcı Faz Ölçüsü
f_1	Birincil Taşıyıcı Fazın Sabit Frekans Değeri
λ	Boylam Değeri
H_s	Deniz Seviyesinden Hesaplanan Yükseklik Değeri
$\underline{R}$	Dönüklük Matrisi
$\underline{V}$	Düzeltme Vektörü
h	Elipsoidal Yükseklik Değeri
φ	Enlem Değeri
T	Gözlem Süresi
L2	İkincil Taşıyıcı Faz Ölçüsü
f_2	İkincil Taşıyıcı Fazın Sabit Frekans Değeri
M_{f_h}	İz düşüm Fonksiyonunun Hidrostatik Dengedeki Durumu
M_{f_w}	İz düşüm Fonksiyonunun Islak Bileşendeki Durumu
$\underline{A}$	Katsayılar Matrisi
$\underline{l}$	Küçültülmüş Ölçüler Vektörü
f (n,m)	Küresel Harmonik Fonksiyon
h_{nm}	Love Sayısı
mad	Medyan Değerine Bağlı Karşılaştırma Değeri
φ^0	Ortalama Enlem Değeri
C^0	Santigrat Derece
l_{nm}	Shida Sayısı
N_d	Troposferin Kuru Kısmının Kırıcılık İndisi
N_W	Troposferin Islak Kısmının Kırıcılık İndisi
Δ^{Trp_N}	Troposferin Toplam Kırıcılık Miktarı
(S-G)	Troposferin Yarattığı Geometrik Gecikme

E	Uydu Yükseklik Açısı
$M_{f_{(elevation)}}$	Uydu Yükseklik Açısına Bağımlı İz düşüm Fonksiyonu

KISALTMA LİSTESİ

CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System
cm	Santimetre
DOY	Day of The Year
ECEF	Earth Centered, Earth Fixed Coordinate System
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EGM96	Earth Gravitational Model 96
ETOPO5	5-minute Gridded Global Relief Data
EUREF	European Reference Frame
GAMIT	GNSS at Massachusetts Institute of Technology
GAPS	GNSS Analysis and Positioning Software
GIPSY	GNSS-Inferred Positioning System
GLOBK	Global Kalman Filter
GMF	Global Mapping Function
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GPT	Global Pressure and Temperature Model
GPT2	Global Pressure and Temperature Model 2
GPT2w	Global Pressure and Temperature Model 2 Wet
GPT3	Global Pressure and Temperature Model 3
IERS	Inernational Earth Rotation and Reference System Service
IGS	International GNSS Service
IGS-RTS	International GNSS Service-Real Time Service
IMF	Isobaric Mapping Function
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KHO	Kaba Hata Oranı
km	Kilometre
m	Metre
mbar	milibar
mm	Milimetre

NASA	The National Aeronautics and Space Administration
NMF	Niell Mapping Function
NWM	Numerical Weather Model
OASIS	Orbit Analysis Simulation Software
PPP	Precise Point Positioning
RMS	Root Mean Square
RTK	Real Time Kinematic
RT-PPP	Real Time-Precise Point Positioning
RTS	Real Time Service
SHD	Slant Hydrostatic Delay
SPP	Single Point Positioning
STD	Slant Total Delay
SWD	Slant Wet Delay
TEC	Total Electron Content
UNB	University of New Brunswick
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VMF	Vienna Mapping Functions
VMF1	Vienna Mapping Functions 1
VMF2	Vienna Mapping Functions 2
VMF3	Vienna Mapping Functions 3
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay
ZPD	Zenith Path Delay
ZTD	Zenith Total Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 GNSS ile konum belirleme yöntemleri ve PPP 10
Şekil 3.1 Verileri kullanılan istasyonların dağılımı 32
Şekil 3.2 ELIZ istasyonunun JPL arşivindeki zaman serileri..... 41
Şekil 3.3 KAZA istasyonunun JPL arşivindeki zaman serileri 42
Şekil 3.4 KGNI istasyonunun JPL arşivindeki zaman serileri 43
Şekil 3.5 NMF çözümlerinin genel RMS değerlerinin karşılaştırması..... 47
Şekil 3.6 GMF çözümlerinin genel RMS değerlerinin karşılaştırması..... 47
Şekil 3.7 GPT2 çözümlerinin genel RMS değerlerinin karşılaştırması..... 48
Şekil 3.8 VMF1 çözümlerinin genel RMS değerlerinin karşılaştırması..... 48
Şekil 3.9 24 Saatlik gözlemler kullanılan ve farklı iz düşüm fonksiyonlarıyla yapılan çözümlerin yatay bileşenlerdeki RMS değerlerinin karşılaştırması..... 49
Şekil 3.10 24 Saatlik gözlemler kullanılan ve farklı iz düşüm fonksiyonlarıyla yapılan çözümlerin düşey bileşendeki RMS değerlerinin karşılaştırması 49
Şekil 3.11 NMF ile yapılan 2 saatlik çözümlerin düşey bileşen RMS değeri ile istasyonların elipsoidal yükseklikleri arasındaki korelasyon..... 50
Şekil 3.12 VMF1 ile yapılan 2 saatlik çözümlerin düşey bileşen RMS değeri ile istasyonların elipsoidal yükseklikleri arasındaki korelasyon..... 51
Şekil 3.13 GMF ile yapılan 2 saatlik çözümlerin düşey bileşen RMS değeri ile istasyonların elipsoidal yükseklikleri arasındaki korelasyon..... 51
Şekil 3.14 GPT2 ile yapılan 2 saatlik çözümlerin düşey bileşen RMS değeri ile istasyonların elipsoidal yükseklikleri arasındaki korelasyon..... 52
Şekil 3.15 Farklı enlem kuşaklarında, farklı iz düşüm fonksiyonları ile elde edilen yukarı bileşene ilişkin genel RMS değerleri. 59
Şekil 3.16 Farklı enlem kuşaklarında yukarı bileşen için en iyi performans gösteren iz düşüm fonksiyonlarının temsili..... 60

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Düşük enlem değerleri için hidrostatik kısma ilişkin NMF katsayıları 25
Tablo 2.2 Yüksek enlem değerleri için hidrostatik kısma ilişkin NMF katsayıları.....25
Tablo 2.3 Düşük enlem değerleri için ıslak kısma ilişkin NMF katsayıları 25
Tablo 2.4 Yüksek enlem değerleri için ıslak kısma ilişkin NMF katsayıları.....26
Tablo 3.1 GipsyX çözümlerinde karşılaşılan hatalar ve giderilme yöntemleri.....35
Tablo 3.2 Toplam çözülen veri sayısının hesaplaması 36
Tablo 3.3 ELIZ istasyonunun RMS ve hız değerleri.....39
Tablo 3.4 KAZA istasyonunun RMS ve hız değerleri 39
Tablo 3.5 KGNI istasyonunun RMS ve hız değerleri 40
Tablo 3.6 NMF ve VMF1 ile yapılan çözümlerin genel RMS değerleri.....46
Tablo 3.7 GMF ve GPT2 ile yapılan çözümlerin genel RMS değerleri.....46
Tablo 3.8 İz düşüm fonksiyonlarının yukarı bileşenin çözüm performansına etkisi ile elipsoidal yükseklikler arasındaki korelasyon değerleri 50
Tablo 3.9 Doğruluk fonksiyonunun parametre testlerinin sonuçları.....54
Tablo 3.10 ±70 derece enlem değerleri için VMF1 ve NMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri 56
Tablo 3.11 ±70 derece enlem değerleri için GPT2 ve GMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri 56
Tablo 3.12 ±40 derece enlem değerleri için VMF1 ve NMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri 57
Tablo 3.13 ±40 derece enlem değerleri için GPT2 ve GMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri 57
Tablo 3.14 ±10 derece enlem değerleri için VMF1 ve NMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri 58
Tablo 3.15 ±10 derece enlem değerleri için GPT2 ve GMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri 58
Tablo 3.16 VMF1 ve NMF'nin ekvatoral bölge için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri.....61
Tablo 3.17 GMF ve GPT2'nin ekvatoral bölge için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri.....62
Tablo 3.18 VMF1 ve NMF'nin güney yarım küre bölgesi için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri 63
Tablo 3.19 GMF ve GPT2'nin güney yarım küre bölgesi için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri.....63

Tablo 3.20 VMF1 ve NMF'nin kuzey yarım küre bölgesi için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri 64

Tablo 3.21 GMF ve GPT2'nin kuzey yarım küre bölgesi için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri 64

ÖZET

Farklı Troposfer İz Düşüm Fonksiyonlarının Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme Doğruluğuna Etkisi

Faruk Can DURMUŞ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

Farklı mühendislik uygulamaları için Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems ,GNSS)'nin kullanımı etkili bir araç haline gelmiştir. Konumlama tekniklerinin performansını etkileyen çok sayıda hata kaynakları bulunmaktadır. Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme (Precise Point Positioning ,PPP) tekniğinde iyonosfer bağımsız kombinasyonlardan yararlanıldığı ve fark teknikleri kullanılamadığı için söz konusu hatalar modellenmelidir. PPP tekniği üzerine yapılan çalışmalar gösteriyor ki; troposferdeki serbest su buharı ve kuru havanın sebep olduğu GNSS sinyallerine etkiyen troposferik gecikme modellenmesi gereken önemli bir parametredir. Troposferik gecikmeyi modellemek için iz düşüm fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu çalışmada Niell Mapping Function (NMF), Vienna Mapping Functions 1 (VMF1), Global Pressue Temperature Model 2 (GPT2) ve Global Mapping Functions (GMF) iz düşüm fonksiyonlarının konumlama doğruluğuna etkilerini belirlemek amaçlanmıştır. Yalnızca Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS) uydularına yapılan gözlemler değerlendirilmiştir. Analiz için Crustal

Dynamics Data Information System (CDDIS) arşivinden alınan istasyon verileri, Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından üretilen GipsyX yazılımının 1.2 versiyonu ile değerlendirilmiştir. Farklı mevsimlerin etkilerini ortaya çıkarmak için 2018 yılının; Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarının GPS gözlem verileri kullanılmıştır. Çözümler, her bir iz düşüm fonksiyonu ile yapılan değerlendirme için; 2, 3, 4, 6, 8, 12 ve 24 saatlik gözlem süreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve her bir gözlem süresini içeren çözümler için karesel ortalama hata (Root Mean Square, RMS) değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca gözlem yapılan istasyonun enlemi ve elipsoidal yüksekliği ile iz düşüm fonksiyonlarının konum doğruluğuna etkisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Yatay konum doğruluğu ile tüm iz düşüm fonksiyonları arasında; mevsim ve konumdan bağımsız biçimde benzer bir ilişki vardır ve RMS değerleri birbirine oldukça yakındır. Düşey konum doğruluğu için genel olarak VMF1 en düşük RMS değerine sahipken, NMF en yüksek RMS değerine sahiptir. Elipsoidal yükseklik ile düşey konum doğruluğu arasında anlamlı bir ilişki elde edilememiştir. ekvatoral bölgede düşey konum doğruluğu için NMF çözümleri en düşük, VMF1 çözümleri ise en yüksek RMS değerine sahiptir. Aynı bölgede Ocak, Nisan ve Ekim aylarında GMF, Temmuz ayında ise NMF en düşük RMS değerine sahiptir. Kutuplara yaklaşan enlem değerlerinde ise VMF1 en düşük, NMF en yüksek RMS değerine sahiptir. Aynı koşullarda Güney Yarım Küre bölgesi için; Ocak ve Ekim aylarında VMF1 en düşük, Kuzey Yarım Küre bölgesi içinse; Temmuz ayında GMF en yüksek RMS değerine sahiptir.

Anahtar Kelimeler: İz düşüm fonksiyonları, troposfer, Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme, GipsyX

ABSTRACT

The Effect of Different Tropospheric Mapping Functions on Precise Point Positioning Accuracy

Faruk Can DURMUŞ

Department of Geomatic Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

The usage of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) has become an effective instrument for different engineering studies. There are many error sources that effect the performance of positioning techniques. These errors should be modeled for PPP technique, because ionosphere-independent combinations are used and difference techniques cannot be used. Studies about Precise Point Positioning (PPP) technique show that; the tropospheric delay affecting GNSS signals caused by water vapor and dry air in the troposphere is an important parameter that should be modeled. Mapping functions are used for modelling the tropospheric delay. In this study, it was aimed to determine the effects of Niell Mapping Function (NMF), Vienna Mapping Functions 1 (VMF1), Global Pressure Temperature Model 2 (GPT2) and Global Mapping Functions (GMF) mapping functions on positioning accuracy. Only Global Positioning Systems (GPS) observations are evaluated. For analysis, station data from the Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) archive are evaluated with version 1.2 of the GipsyX software developed by the Jet Propulsion Laboratory (JPL). In order to reveal the effects of

different seasons, the GPS observation data of the year 2018 of January, April, July and October months were used. The solutions for each mapping function were carried out using 2, 3, 4, 6, 8, 12 and 24 hour session durations then root mean square (RMS) values were calculated for all session durations. The more, the relationship between the latitude and ellipsoidal height of the station and the effect of mapping functions on positioning accuracy were investigated. There is a similar relationship between horizontal position accuracy and all mapping functions regardless of season and location, and their RMS values are so close to each other. Generally for the vertical positioning accuracy, VMF1 has the lowest, meanwhile NMF has the highest RMS values . Between ellipsoidal height and vertical positioning accuracy, a significant corellation couldn't determined. NMF has the lowest and VMF1 has the highest RMS values on equatorial region. On the same region, GMF in the January, April and October months, and NMF in the July month has the lowest RMS values. With the latitude values that approaching the poles, VMF1 has the lowest and NMF has the highest RMS values. At the same conditions, VMF1 has the lowest RMS values for the Southern Hemisphere region in January and October, and GMF has the highest RMS value for the Northern Hemisphere region in July.

Key Words: Mapping functions, troposphere, Precise Point Positioning, GipsyX

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Konum bilgisinin üretimi ve işlevsel hale getirilmesi birçok bilimsel disiplin için gereklilik haline gelirken, gündelik hayatta ve mühendislik çalışmalarında da konum bilgisinin eriştiği önem derecesi yadsınamaz bir gerçeklik kazanmıştır. Söz konusu bilginin niteliği ise kullanım amacına, fiziki şartlara ve ekonomik imkânlara göre farklılık gösteren bir unsurdur.

Küresel Navigasyon ve Uydu Sistemleri'nin (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) aktif olarak kullanımından beri tek bir alıcı ile yüksek hassasiyetli konum bilgisi elde etmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla ilk olarak 1976 yılında tek alıcı ile konum belirleme fikri ortaya atılmıştır [1]. Fakat tek alıcı ile hassas konum belirlemek için kullanılan Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme (Precise Point Positioning, PPP) tekniğinin, GNSS teknolojisi ile aktif olarak kullanımı ve bilimsel çalışmalara konu olabilmesi ancak 1990'lı yıllarda gerçekleşebilmiştir [2], [3].

Uydu gözlemlerine dayalı bağıl konum belirleme yöntemi ile hassas konum bilgisi elde edilebilmektedir. Yöntemin başarısı; gözlem süresi boyunca oluşan ve farklı kaynaklara sahip hataların fark alma teknikleri ile başarılı şekilde elimine edilmesinden ileri gelmektedir. Hata giderme işlemlerinin büyük bir kısmı, birden fazla alıcının eş zamanlı şekilde gözleme dahil edilmesinden doğan avantajlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. PPP tekniği tek alıcıyla hassas konum belirleme motivasyonu ile ortaya atıldığından, bağıl konum belirleme yöntemi için geçerli olan bu tip hata giderme işlemlerinin kullanımı mümkün değildir. Tekniğin ana prensibinin bu noktada oluşumu açısından birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir. [4]' e göre PPP tekniği ile elde edilen konum hassasiyeti, fiziki koşullardan kaynaklanan ve sinyal kalitesine etkiyen tüm sistematik hatalar doğru şekilde modellendiği takdirde, bağıl konumlama yöntemi ile elde edilen hassasiyete ulaşabilir. PPP tekniği için konum hassasiyetine etki eden hataların, bağıl konumlama yönteminde olduğu gibi fark alma teknikleri ile giderilmesi mümkün değildir. Bu durumda okyanus yüklemesi, kara gelgiti gibi jeofiziksel hareketlerin ve

atmosferin tabakaları olan iyonosfer ve troposferden gelen gözlem hatalarının PPP çözümüne doğrudan dahil edilmesi gerekmektedir. Troposfer katmanı uydudan alıcıya gelen sinyali geciktirmekte ve bu gecikme troposfer katmanı içerisinde kuru ve ıslak olmak üzere iki bileşene ayrılarak incelenmektedir. PPP çözümleri için ciddi bir hata kaynağı oluşturan ve doğrudan çözüme dahil edilmesi gereken uydu sinyallerinin troposferik gecikmesi için çok çeşitli troposferik modeller üretilmiştir. Troposferik gecikmeyi hesaplamayı amaçlayan modeller; sıcaklık, basınç gibi parametrelerden oluşan fonksiyonlar ile işlevini yerine getirmektedir. Troposferik modellerin bu yaklaşımının yanı sıra; oluşan sinyal gecikmesini gözlem anındaki zenit açısının bir fonksiyonu olarak ifade eden iz düşüm fonksiyonları geliştirilmiştir [5]. İz düşüm fonksiyonları genel olarak nötral atmosferden geçen sinyallerin yükseklik açısına bağımlı fonksiyonlarıdır [6]. PPP'nin genel eşitlikleri üzerinden gerçekleştirilen dengeleme modelinde troposferin yarattığı gecikme ZPD (Zenith Path Delay) adıyla ve iz düşüm fonksiyonuyla uydu yükseklik açısına bağlı olarak yer almaktadır [7].

Yeni iz düşüm fonksiyonlarının geliştirilmesi, var olan iz düşüm fonksiyonlarının PPP gözlemlerinde kullanılarak performans analizlerinin yapılması, PPP çözümlerinde konum doğruluğuna etki eden önemli faktörlerin bu iz düşüm fonksiyonlarıyla ilişkisinin araştırılması gibi literatürde birçok çalışma yer almaktadır.

[6]'da yüzey meteorolojisi verilerine erişilemeyen durumlarda yüzey meteorolojisinden bağımsız bir iz düşüm fonksiyonunun üretilmesi amaçlanmıştır. Radyosonda verilerinden yararlanılarak oluşturulan bu iz düşüm fonksiyonuna NMF (Niell Mapping Function) adı verilmiştir.

[8]'de ilk kez sayısal hava modeli (Numerical Weather Model, NWM) kullanılan bir iz düşüm fonksiyonu geliştirilmiştir. ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) adlı sayısal hava modeli ile radyosonda verilerine ihtiyaç duymadan çalışabilen söz konusu iz düşüm fonksiyonu VMF1 (Vienna Mapping Functions 1) olarak adlandırılmıştır. Aynı zamanda VMF'nin parametrelerinin ışın izleme modeli ile kestirim sonucu elde edildiği ve bu modelin her gözlem anı ve konumu için 6 saatte bir güncellendiği belirtilmiştir. ECMWF verileri incelenerek, genişletilmeye ihtiyaç duydukça da yeni VMF versiyonları da (VMF2 ve VMF3 gibi) ortaya çıkarılmıştır.

[9]'da global ECMWF sayısal hava modeli verileri baz alınarak yeni bir iz düşüm fonksiyonu geliştirilmiştir. İz düşüm fonksiyonunun katsayıları VMF1 parametrelerinin global bir grid üzerinde küresel harmoniklerle genişletilmesinden elde edilmiştir. GMF (Global Mapping Function) adı verilen yeni iz düşüm fonksiyonunun NMF gibi sadece gözlem koordinatlarını ve gözlem günü verilerini kullandığı belirtilmiştir. Yapılan analizler sonucunda NMF kullanılarak yapılan gözlemlerde ortaya çıkan ortometrik yüksekliğe bağlı hataların, GMF kullanılarak yapılan gözlemlerde ciddi oranda azaldığı ortaya konulmuştur.

[10]'da dört farklı iz düşüm fonksiyonu olarak NMF, GMF, IMF (Isobaric Mapping Function) ve VMF1'in; VLBI (Very Long Baseline Interferometry) gözlemleri ile elde edilen zamana bağlı konum değişimlerine etkileri incelenmiştir. Bazı istasyonlarda VMF1 kullanılan çözümler ve NMF kullanılan çözümler arasında düşeyde 13 mm'ye kadar değişimler tespit edilirken; IMF kullanılan çözümlerde, VMF kullanılan çözümlere göre neredeyse her düşey bileşenin 1-2 mm daha büyük olduğu belirtilmiştir. Yatay bileşenlerin ise farklı iz düşüm fonksiyonlarının kullanımından 1 mm'den az değişimlerle etkilendiği belirtilmiştir. Sonuç olarak kullanılan değerlendirme metodu VMF1 iz düşüm fonksiyonu ile entegre çalışabiliyorsa; en verimli sonucu doğuracağına dikkat çekilmiştir.

[11]'de troposfer tabakasının kuru bileşeninin yarattığı gecikmeyi temsil eden önsel hidrostatik gecikmeyi, ZHD (Zenith Hydrostatic Delay), hesaplamak için kullanılan basınç değerlerini sağlayan bir model tanıtılmıştır. GPT (Global Pressure Temperature Model) adı verilen model ile türetilmiş ve yüksekliğe bağlı önsel ZHD değerinin alçak ve yüksek enlemlerde iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Çalışılan 11 istasyonun 5'inde VMF verilerinden, her bir grid 0.5 mm'den küçük olacak şekilde enterpole edilen ZHD değerleri kullanılmıştır. Söz konusu değerler, PPP gözlemlerinde oluşan düşey bileşen hatalarını analiz etmek için yerel meteoroloji verileriyle birlikte kullanılmıştır.

[12]'de farklı troposfer modelleri kullanılarak gerçekleştirilen GPS gözlemleriyle elde edilen istasyon koordinatları karşılaştırılmıştır. Önsel ZHD değerleri GMF için GPT'den ve VMF1 için ECMWF sayısal hava modeli verilerinden elde edilmiştir. Böylelikle karşılaştırma ortamı aynı istasyonlara yapılan GPS gözlemleri için GMF/GPT ve VMF1/ECMWF şeklinde tasarlanmıştır. GPT modeli kullanılarak oluşturulan istasyon yüksekliklerinin zaman serilerinin, ECMWF'ye göre daha iyi tekrarlanabilirliğe sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bu sonucun yanı sıra VMF1'in, GMF'ye göre daha yüksek

hassasiyete sahip bir iz düşüm fonksiyonu olduğu sonucuna varılmıştır. PPP sonuçları üzerinde; VMF1/GPT kombine edilerek kullanılan modelin, VMF1/GPT kombine edilerek kullanılan modele göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

[13]'de GPT/GMF kombine edilerek kullanılan modellerin zamansal ve mekansal çeşitliliğinin kısıtlı olmasına dikkat çekilerek; basınç, sıcaklık, su buharı basıncı, global 5 derece grid ortalama değerlerine dayanan yıllık ya da yarı yıllık iz düşüm fonksiyonu katsayıları sağlayan yeni bir model geliştirilmiştir. GPT2 adı verilen bu modelin GPT/GMF ile kıyaslandığında yıllık ya da altı aylık gözlemler söz konusu olan jeofiziksel çalışmalar için kullanımının daha anlamlı olduğu ortaya konulmuştur.

[14]'te uygulama bölgesine yayılmış üç istasyondan oluşan bir ağ üzerinde, troposfer tabakasının ıslak bileşenini oluşturan serbest su buharını ve kuru bileşenden kaynaklanan hidrostatik gecikmeyi belirlemek için farklı iz düşüm fonksiyonları kullanılmıştır. GPT2 ve VMF1 iz düşüm fonksiyonları ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Hidrostatik gecikmeyi ve serbest su buharının oluşturduğu gecikmeyi iz düşüm fonksiyonları ile belirlemek adına, üç noktadan oluşan ağın GNSS gözlemleri GAMIT/GLOBK yazılımı ile bağıl konum belirleme yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Aynı parametrelerin VLBI ve PPP yöntemleri ile de elde edilebileceği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda; yüksek hassasiyetli konum belirlemek için iyonosferik ve troposferik etkilerin, değerlendirme aşamasında bağıl konum belirleme ya da PPP kullanımı fark etmeksizin, kritik bir rol oynadığına dikkat çekilmiştir. Düşey konum hassasiyeti söz konusu ise özellikle VMF1 kullanımı tavsiye edilmiştir.

VMF1 sayısal hava modellerini baz alan bir iz düşüm fonksiyonudur ve söz konusu hava modelleri ECMWF tarafından 6 saatlik güncel olarak üretilmektedir. UNB-VMF1 (University of Brunswick-VMF1) ise Kanada Meteoroloji Merkezi modelinden yararlanarak, VLBI ve GPS için atmosfer modelleri de kullanılmak üzere meteorolojik parametre üreten bir VMF1 versiyonudur. [15]'de GPS istasyon ve VLBI verilerinin değerlendirilmesinde; VMF1 ve UNB-VMF1 kullanımının troposferik gecikme miktarı ve konum açısından yarattığı farklar incelenmiştir. İz düşüm fonksiyonlarının gecikme miktarı üzerindeki performanslarını karşılaştırmak için; Uluslararası GNSS Servis (International GNSS Service, IGS) ağından 411 adet global dağılmış GPS istasyonu ve 61 adet VLBI istasyonu tarafından toplanan 2014 yılının tümüne ilişkin veriler kullanılmıştır. Aynı zaman aralığında konum bilgisi üzerindeki performansları için; 18

adet global dağılmış GPS istasyonu ve 29 adet VLBI istasyonu seçilmiştir. Çalışma sonucunda hidrostatik gecikme için iki iz düşüm fonksiyonu arasında 3.5 mm'nin altında farklılıklar olduğu belirtilmiştir. Serbest su buharına bağlı ıslak gecikmeler için; farkın maksimum değerlerde birkaç cm'yi aşmadığı görülmüştür. Gecikme miktarları ve konumun düşey bileşenleri, yeryüzünün şeklinden kaynaklı olarak enleme bağımlı bir görüntü çizmiştir. İstasyonların konum bileşenleri açısından GAPS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen PPP değerlendirmelerinde, iz düşüm fonksiyonlarının hemen hemen aynı sonucu verdiği ve aynı performansta çalıştığı gözlemlenmiştir. GPS ve VLBI verilerinin kullanıldığı bu çalışmayla birlikte; jeodezik analizler için söz konusu iki iz düşüm fonksiyonunun da eşdeğer performans gösterebileceği sonucuna varılmıştır.

[16]'da IGS tarafından düzeltme verileri sağlanan Gerçek Zamanlı Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme (Real Time Precise Point Positioning, RT-PPP) tekniğinin atmosferdeki su buharını izlemek için yeterli hassasiyete sahip olup olmadığı araştırılmıştır. 5 IGS istasyonu üzerinden gerçekleştirilen çalışmada IGS tarafından sağlanan RTS (Real Time Service) düzeltmeleriyle troposferin ıslak bileşeninin zenit gecikmesini ifade eden ZWD (Zenith Wet Delay) değerleri gerçek zamanlı kestirilmiştir. Kestirim sonucu yoğunlaşabilir su buharı değerleri türetilmiştir. Bu değerler klasik, ölçüm sonrası değerlendirmeye tabi tutulan, PPP yönteminden elde edilen kestirimlerle karşılaştırılmıştır. Farklı iz düşüm fonksiyonları ve öncül troposfer modelleri kullanılarak hangi modelin sonuçlara ne şekilde etki ettiği gözlemlenmiştir. PPP çözümü için IGS tarafından sağlanan hassas efemeris bilgileri kullanılmıştır. Bu çalışmada su buharını izlemek ve atmosferi modellemek adına RT-PPP, Ultra-Rapid hassas efemeris bilgisi ile gerçekleştirilen PPP çözümlerine göre daha başarılı olmuştur. RT-PPP çözümleri için VMF1 başta olmak üzere sayısal hava modellerinden elde edilen modellerin; daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

[17]'de PPP tekniği için şiddetli hava koşullarında farklı troposfer modellerinin konum doğruluğu açısından nasıl performans göstereceği araştırılmıştır. 2013 yazında gerçekleşen Avrupa sel felaketine denk gelen zaman dilimindeki IGS istasyon verileri kullanılmıştır. Her PPP çözümü için kullanılacak farklı troposfer modelleri olarak; ECMWF gridlerinden elde edilen VMF1, GMF ve GPT verileri kullanılarak elde edilen GPT2, UNB verileriyle çalıştırılan NMF, NWM verileriyle elde edilen UNB/VMF1 kombinasyonu kullanılmıştır. Islak gecikme kestirimleri ilgili istasyonda; IGS final

verisinin troposfer parametreleri, yerel yüzey ölçümleri ve ikili farklara dayalı GNSS çözümleriyle doğrulanmıştır. Her metot için ortalama artık hatalar 2 mm'nin altında kaydedilmiştir. VMF1 modeli kullanılarak yapılan PPP çözümleri 4 mm karesel ortalama hata (Root Mean Square, RMS) ile en iyi çözüm performansını göstermiştir. Literatürde yer alan önceki çalışmalardan bilinen sonuçlarla ilişki kurularak, sert hava koşullarının troposfer modellerinin çözüm performansını etkilediği görülmüştür. Yine de VMF1 diğer çalışmalara benzer olarak en iyi çözüm performansını göstermiştir.

Troposferik gecikme, sinyalin alıcıya geliş açısının kestirimine dayalı iz düşüm fonksiyonları ile hesaplanabilmektedir. Eğik sinyal yolundaki toplam troposferik gecikme (Slant Total Delay, STD), GNSS veri işleme adımlarında doğrudan kullanılmak yerine, zenith açısına bağımlı iz düşüm fonksiyonları, gradyent modeller ve bunlardan oluşturulan zenit doğrultusundaki toplam troposferik gecikme (Zenith Total Delay, ZTD) ile temsil edilmektedir. [18]'de 6 farklı çalışma bölgesinde; GMF, NMF, VMF1 iz düşüm fonksiyonları ve MacMillan, Meindl, Chen gradyent modellerinin çözüm performans değerlendirmeleri araştırılmıştır. Uygulama yöntemi olarak ışın izleme metodu, ERA-Interim (European Reanalysis-Interim) veri setleri üzerinde kullanılmıştır. Düşük uydu yükseklik açılarında; 3 iz düşüm fonsiyonunun da performanslarının farklı olduğu ve VMF1'in belirgin olarak daha yüksek doğruluğa sahip çözüm sunduğu belirtilmiştir. Karşılaştırma ölçütü olarak RMS değerleri kullanılmıştır. GNSS değerlendirmelerinde uydu yükseklik açısı 15 dereceye ayarlandığı takdirde; 3 iz düşüm fonksiyonunun da neredeyse eşit sonuçlar vereceği tespit edilmiştir. 15 dereceden düşük uydu yükseklik açısı ile yapılan değerlendirmelerde ise VMF1 kullanımı tavsiye edilmiştir. İz düşüm fonksiyonlarının gösterdiği performansın; gözlem konumu ve gözlem zamanını kapsayan mevsim ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur. RMS değerlerinin serbest su buharı yoğunluğundan kaynaklı olarak yaz mevsiminde kış mevsimine nazaran daha büyük olduğu belirtilmiştir. Her 6 bölge için de seçilen 3 gradyent modelin birbirine yakın çözüm doğruluğu gösterdiği ve iz düşüm fonksiyonları ile entegre çalıştıklarında daha yüksek doğruluklu STD'ler elde edildiği ortaya konmuştur.

[19]'da PPP çözümlerinde [17]'de olduğu gibi farklı troposfer modelleri kullanılarak bu modellerin konum doğruluğu üzerindeki çözüm performansları araştırılmıştır. Bunun yanı sıra aynı troposfer modeli için aynı noktada uydu yükseklik açısı değiştirilerek çözümler yapılmış ve yükseklik açısı ile troposfer modeli arasındaki ilişki ortaya konmak

istenmiştir. Her model için 5, 7, 10 ve 15 derecelik uydu yükseklik açıları kullanılmıştır. Faz ölçüleri ve kod ölçüleri için iyonosfer bağımsız çözümlerin düzeltmeleri ve toposentrik koordinat bileşenleri (Kuzey-Doğu-Yukarı) için günlük değişim miktarları da değerlendirilmiştir. İz düşüm fonksiyonları olarak; NMF, GPT2 ile kullanılan GMF, VMF1 kullanılmıştır. Ayrıca iz düşüm fonksiyonu kullanılmayarak da çözümler elde edilmiştir. Çalışmada, 2015'in Ekim ayını kapsayan dönem için EUREF (European Terrestrial Reference Frame) içerisinde yer alan 4 noktanın verileri analizlerde kullanılmıştır. Analizler sonucunda VMF1 kullanıldığı durumlarda her istasyon için faz ölçülerinin düzeltmeleri en düşük değerlerde elde edilmiştir. Günlük koordinat değişiminin yaklaşık olarak yatayda Doğu 0.3 mm/ Kuzey 0.5 mm, Yukarı bileşende ise 1 ila 1.5 mm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Standart sapmalar göz önüne alındığında yüksek doğruluk için 10 derece uydu yükseklik açısı kullanımı tavsiye edilmiştir. 5 ve 7 derece uydu yükseklik açısının kullanıldığı çözümlerde VMF1'in GMF/GPT2 ve NMF'ye göre daha iyi performans gösterdiği görülmesine rağmen; 10 derece yükseklik açısından sonra GMF/GPT2, VMF1 ile yaklaşık olarak aynı performansı yakaladığı ve 15 derece yükseklik açısından sonra NMF'nin de VMF1 ve GMF/GPT2 ile aynı sonuçları gösterdiği görülmüştür. İz düşüm fonksiyonuyla ortaya konulan troposfer modeli kullanılmayan gözlemlerde ise modellenmesi gereken bir büyüklük olan ve PPP çözüm denklemlerinde yer alan troposferik gecikme yok sayıldığı için düşük çözüm performansları gözlemlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Yer bilimleri için ciddi önem teşkil eden konum bilgisi hassasiyet kaygısı içermesinin yanı sıra; istenilen hassasiyetin elde edilme biçimi, süresi ve ekonomik hacmi de bir o kadar önem teşkil etmektedir. Tek alıcıyla hassas konum belirleme fikri ortaya atıldığından beri PPP üzerine birçok iyileştirme-geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar matematiksel modele etkiyen parametrelerin model içerisindeki yeri ve kullanılış biçimi üzerine olduğu gibi, doğal koşullardan kaynaklanan hataların iyileştirilmesi de dikkate alınmıştır. Bağıl konumlama yöntemlerine nazaran PPP yönteminde hata kaynağı ayırt etmeksizin konum doğruluğuna etki eden hata kaynaklarının modellenmesi gerekmektedir. Gözlem anının doğal durumundan ileri gelen atmosferik koşulların etkisi, literatürde PPP çözümleri için büyük hata olarak kabul edilmektedir. Bu sebepten dolayı PPP performansının arttırılması adına atmosferik

koşulların modellenmesi ve geliştirilmesi bilimsel çalışmaların ciddi bir kısmı için ana motivasyon kaynağı olmuştur. Uydudan gelen sinyalin doğrultusu boyunca uğradığı ve alıcıya geliş zamanı üzerinde gecikmeye sebep olan atmosferin troposfer tabakasının modellenmesi farklı disiplinler açısından da ayrıca önem teşkil etmektedir.

Troposferin hidrostatik kısmına kuru, su buharı açısından zengin olan kısmına ıslak bileşen adı verilmektedir. PPP çözümlerinde kullanılan troposfer modellerinde troposferin yarattığı gecikmeyi hesaplamak için bu iki bileşen ayrı ayrı ele alınmaktadır. Bu durumda da gerekirse farklı bileşen için farklı model kullanılarak optimum çözüme ulaşım sağlanmaktadır. Analitik çözüme yatkın Saastamoinen, Hopfield, Black gibi modeller bu hususta PPP için öncelikli tercih olmaktan çıkmaktadır. Alternatif çözüm olarak uydu sinyalinin alıcıya varış şeklini temel alan, yükseklik açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilen çeşitli fonksiyonlar geliştirilmiştir ve bunlara iz düşüm fonksiyonu adı verilmiştir. PPP'nin çözüm denklemlerine bu ölçüt zenit gecikmesinin lineer katsayısı olarak katılmaktadır. Yaklaşım açısından farklılık gösteren bu iz düşüm fonksiyonlarının bazıları sayısal hava modellerini temel alırken bazıları ise sıcaklık, basınç, radyosonda ölçümleri gibi parametreleri temel almaktadır. Bu noktada GPS gözleminin yapıldığı anın hava durumu, gözlem süresi ve gözlem lokasyonu önem arz etmektedir [2], [3], [4], [5], [6], [7], [12], [13], [17], [19].

PPP çözümlerinde sinyal yolundaki troposferik gecikmeyi hesaplamak için hangi iz düşüm fonksiyonunun daha yüksek konum doğruluğu sağlamak için en iyi çözüm performansını gösterdiğini ortaya koymak bu tezin amacını oluşturmaktadır. Bu bağlamda iz düşüm fonksiyonlarının çözüm performansları ile gözlem yapılan zaman ve konum arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı da araştırılmıştır. Bu amaçla Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) arşivinden alınan ve coğrafi anlamda global olarak dağılmış 294 sabit istasyonun her bir mevsimi temsilen 2018 yılının; Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim aylarına ilişkin GPS gözlemleri GipsyX v1.2 yazılımı kullanılarak PPP yöntemi ile çözülmüştür. Çözümler için JPL tarafından yayınlanan hassas efemeris dosyaları kullanılmıştır. Gözlem süresinin etkisini ortaya koymak için 2, 3, 4, 6, 8, 12 ve 24 saatlik gözlem verileri her istasyonda her koşul için ayrı ayrı çözülmüştür. PPP çözümlerinde modellenmesi gereken tüm hatalar için aynı modeller kullanılırken, troposferik gecikmeyi çözümlemek adına; VMF1, GPT2, GMF ve NMF iz düşüm fonksiyonları ayrı ayrı çözüme dahil edilmiş ve analizlerin sonucu istatistiki olarak

değerlendirilmiştir. Çalışmada iz düşüm fonksiyonlarının gösterdiği performansın; gözlem süresi, istasyon konumu ve mevsimler ile ilişkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

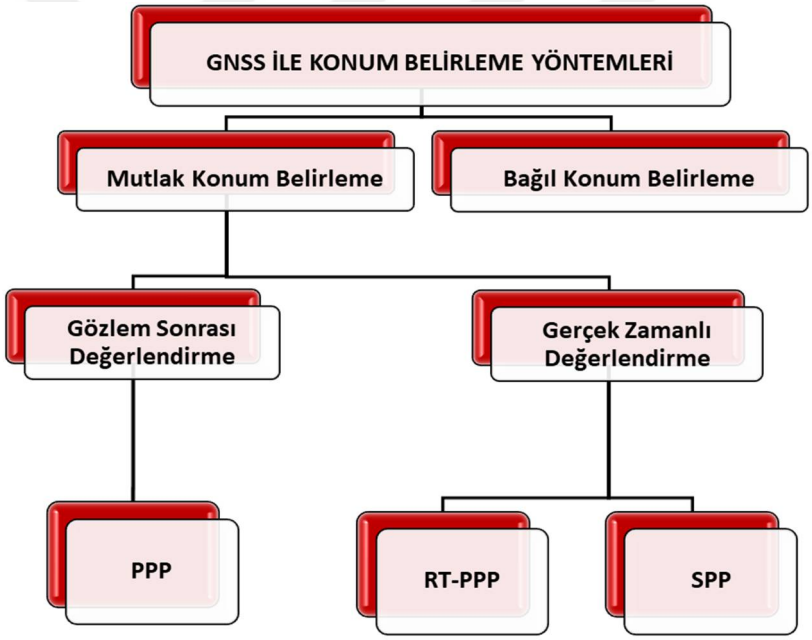
1.3 Hipotez

Troposfer tabakası, GNSS uydularından alıcıya gelen sinyallere gecikme etkisi yaratmaktadır. Söz konusu gecikme etkisi karakteristik olarak iki farklı şekilde ele alınmaktadır. Islak bileşen olarak ele alınan gecikme etkisi, serbest su buharının sinyallere etki etmesiyle oluşmaktadır. Tabakadaki serbest su buharı yoğunluğu ise gözlem noktasının konumuna ve gözlem zamanına ilişkin mevsimlere göre değişmektedir.

PPP yöntemi ile gerçekleştirilen konum belirlemede troposferik gecikme modellenmesi gereken önemli bir parametredir. PPP çözümlerinde troposferik gecikmenin modellenebilmesi için, yükseklik açısının bir fonksiyonu şeklinde ifade edilen iz düşüm fonksiyonları kullanılır. Her iz düşüm fonksiyonu PPP çözümleri için farklı performans gösterir. İz düşüm fonksiyonlarının performansı ile gözlem noktasının konumu, gözlem süresi ve gözlem yapılan mevsim arasında anlamlı bir ilişki vardır. Farklı iz düşüm fonksiyonlarının PPP yönteminin konum doğruluğuna katkısı da bu değişkenlerden kaynaklı olarak etkilenir.

2
GNSS İLE KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ VE HASSAS MUTLAK NOKTA KONUM BELİRLEME

Konum belirleme yöntemleri çalışmanın amacına göre farklılık göstermektedir. Konum bilgisinin kullanılacağı yere göre yeterli olan hassasiyetin elde edilmesi temel beklentidir. Bu durumun yanı sıra gözlem şartları ve maddi kaynaklar da kullanılacak olan tekniğin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu bağlamda konum belirleme yöntemleri temelde Şekil 2.1'de gösterildiği gibi: Mutlak Konum Belirleme ve Bağıl Konum Belirleme olarak ayrılmaktadır



Şekil 2.1 GNSS ile konum belirleme yöntemleri ve PPP

2.1 Bağıl Konum Belirleme

Birden fazla alıcı ile aynı ufka dağılmış özdeş uydulara eş zamanlı gözlem yapılarak, noktalar arasındaki baz bileşenlerinin çözümüne dayanan bir yöntemdir. Gerçek zamanlı veya gözlem sonrası olmak üzere farklı şekillerde değerlendirme yapılabilir. Hassas

konum bilgisi üretmek adına; alıcıların sabit olduğu ve gözlem sonrası değerlendirmeyle çözüme ulaşılan Bağıl Konum Belirleme yöntemi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

Yöntem, ölçü olarak; uydudan gelen kod ölçülerini ve taşıyıcı faz ölçülerini kullanır. İki farklı alıcının aynı uyduya yaptığı gözlemlerin farkı (Tekli Farklar Yöntemi) ile uydu saat hatası giderilir. İki tekli farkın farkı (İkili Farklar Yöntemi) ile de hem alıcı hem de uydu saat hatası giderilir. Konuma etkiyen, çözümde matematiksel model içerisinde yer alan hataların giderilmesi bağıl konum belirleme için; birden fazla alıcının kullanılmasını gerektirmektedir [20].

2.2 Mutlak Konum Belirleme

Tek bir alıcı ile uydulardan toplanan gözlem verileri kullanılarak konum bilgisi üretmek bu yöntem için temel prensiptir. Gerçek zamanlı veya gözlem sonrası değerlendirmeyle konum bilgisi üretilir.

2.2.1 Tek Nokta Mutlak Konum Belirleme (Single Point Positioning, SPP)

Mühendislik çalışmalarında kullanımı için konum hassasiyeti düşük bir yöntemdir. Gerçek zamanlı değerlendirme esastır. Yöntemde çözüm için; ölçü olarak gözlem mesajı içerisinde yer alan kod ölçüleri kullanılır. Konumlamada uydulardan toplanan gözlem verisi haricinde, navigasyon mesajı gibi hassas uydu parametresi içermeyen efemeris bilgileri kullanılır. Navigasyon mesajı ve diğer kaynaklardan, uydu koordinatları ve uydu saat hatası elde edilir. Bu bilgiler ile uydu ve alıcı arasındaki yaklaşık uzaklığın hesaplanması amaçlanır. Bir gözlem epoğunda böylelikle; alıcının yer merkezli ve yer sabit (Earth Centered Earth Fixed, ECEF) koordinatları ile alıcı saat hatası, bilinmeyenler olarak ele alınır ve çözüme ulaşılır [20].

2.2.2 Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme (Precise Point Positioning, PPP)

PPP yöntemi, gözlem sonrası değerlendirmeye tabi tutulan ve hassasiyeti yüksek olan bir çeşit Mutlak Konum Belirleme yöntemidir. Matematiksel çözümü, dengeleme prosedürleri, stokastik modeli ve gözlem hatalarının giderilmesi hususundaki yaklaşımları; diğer konum belirleme yöntemlerinden farklı olan bir yöntemdir. SPP'den farklı olarak faz gözlemleri de ölçü olarak kullanılır. Aynı zamanda yayın efemerisi yerine hassas efemeris bilgileri kullanılmaktadır. Bağıl konum belirlemeden ise fark yöntemlerinin kullanılmadığı gözlem eşitliklerinin kullanılması yönüyle ayrılır. Fark

yöntemleri ve gözlem koşulları ile giderilen iyonosferik gecikme etkisi, alıcı saat hatası, uydu saat hatası gibi hatalar; hassas efemeris bilgilerinin çözüme dahil edilmesi ve matematiksel ölçekte kombine edilmiş iyonosfer bağımsız faz gözlemlerinin ölçü olarak kullanımı ve iyonosfer modelleri ile giderilmektedir. Jeofiziksel koşullardan kaynaklanan hatalar ve troposferik gecikme ise çeşitli modeller ile belirlenerek çözüme entegre edilmektedir [5], [7], [21], [22].

2.2.3 Gerçek Zamanlı Hassas Mutlak Nokta Konum Belirleme (Real Time-Precise Point Positioning, RT-PPP)

PPP yönteminin gerçek zamanlı uygulanabilmesi amacı ile geliştirilmiştir. PPP yönteminden farklı olarak; çözüm için gerekli parametreler sürekli gözlem yapan sabit ağlardan kullanıcıya internet yoluyla aktarılır [22]. 2004 yılında RT-PPP yönteminin ilk sinyalleri, PPP'nin potansiyel bir gelecek nesil Gerçek Zamanlı Kinematik (Real Time Kinematic, RTK) konumlama yöntemi olabileceği potansiyeliyle verilmiştir [23]. 2006 yılında; PPP yönteminin gerçek zamanlı biçimde çalışabilmesi yani RT-PPP yönteminin hayata geçirilip aktif kullanımının sağlanması adına IGS Gerçek Zamanlı Servis (IGS Real Time Service, IGS-RTS) pilot projesi duyurulmuştur. IGS-RTS, global olarak ölçeklendirilmiş yaklaşık 400 adet istasyondan oluşan; PPP, zaman senkronizasyonu ve afet izleme gibi uygulamalar için GNSS yörünge ve saat düzeltme bilgilerini sürekli ve anlık olarak internet yoluyla sağlayan servistir. 1 Nisan 2013 tarihinde hizmet vermeye başlamıştır. Sağladığı ürünler PPP çözümü için gerekli olan; hassas uydu efemerisleri, yer dönme parametreleri, istasyon koordinat ve hızları, uydu istasyon izleme saat bilgileri, troposferik zenit gecikme parametreleri ve global iyonosferik haritalardır. GPS için gözlem anında 25 saniyede; uydu konumlarının yaklaşık 5 cm doğrulukla, saat hatalarının ise 120 ps sapmayla alıcıya ulaştığı belirtilmektedir [24].

2.3 PPP İçin Değerlendirme Yöntemleri

2.3.1 Kouba & Heroux Yaklaşımı

PPP yönteminin henüz gelişme aşamalarında öncül olarak; Lachapell tarafından 1995 yılında kod gözlemlerini ölçü olarak kullanan ve metre mertebesinde doğruluğa sahip bir model ortaya atılmıştır [25]. Hassas konum belirleme kriterlerinden uzak bir hassasiyete sahip olduğu için yeni modeller geliştirilmiştir. Günümüzde kullanılan alternatiflerine en yakın ilk PPP modellerinden biri ise Kouba ve Heroux tarafından geliştirilmiştir [7].

Hassas efemeris bilgilerini ve gözlem sonrası değerlendirme yaklaşımını kullanan bu modelin doğruluğu santimetre mertebesindedir [21].

2.3.1.1 Kouba & Heroux PPP Gözlem Eşitlikleri

P pseudo gözlemleri (kod ölçülerini) ve ϕ taşıyıcı faz gözlemlerini temsil etmek üzere, (2.1) ve (2.2) eşitlikleri; çift frekanslı GPS iyonosfer bağımsız kombinasyonlarının basitleştirilmiş gözlem eşitlikleridir.

$$l_P = \rho + c(dt - dT) + T_r + \varepsilon_P \tag{2.1}$$

$$l_\phi = \rho + c(dt - dT) + T_r + N\lambda + \varepsilon_\phi \tag{2.2}$$

ρ; uydu (X_s, Y_s, Z_s) ve alıcı (x, y, z) arasındaki geometrik uzaklığı göstermektedir ve (2.3) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$\rho = \sqrt{(X_s - x)^2 + (Y_s - y)^2 + (Z_s - z)^2} \tag{2.3}$$

(2.1) ve (2.2)' de:

l_P = Kod ölçülerinin (L1-L2) iyonosfer bağımsız kombinasyonları,

l_ϕ = Taşıyıcı faz ölçülerinin (L1-L2) iyonosfer bağımsız kombinasyonları,

dt = Alıcı saat ofseti,

dT = Uydu saat ofseti,

T_r = Troposferik sinyal gecikmesi,

c = Işık hızı,

λ = Taşıyıcı dalga boyu,

N = İyonosfer bağımsız taşıyıcı fazın tam sayı olmayan belirsizliği,

ε_P ve ε_ϕ = Multipath dahil gürültü bileşenleri olarak temsil edilmektedir.

İz düşüm fonksiyonu ile zenit doğrultusundaki ZPD, eğik sinyal yolu doğrultusundaki SPD' ye dönüştürülür ve hassas efemeris ile elde edilen uydu saat hatası gözlem eşitliğinden çıkartılırsa, M iz düşüm fonksiyonu olmak üzere; (2.4) ve (2.5) eşitlikleriyle basitleştirilir [7].

$$f_P = \rho + cdt + Mzpd + \varepsilon_P - l_P = 0 \tag{2.4}$$

$$f_\phi = \rho + cdt + Mzpd + N\lambda + \varepsilon_\phi - l_\phi = 0 \quad (2.5)$$

2.3.2 Gao & Shen Yaklaşımı

Kouba & Heroux yaklaşımından sonra; parametre kestiriminin iki aşamalı uygulandığı, daha gelişmiş stokastik modele sahip yeni bir yaklaşım ortaya çıkmıştır. Gao & Shen tarafından geliştirilen bu model ile L1 ve L2 taşıyıcı faz ölçülerinin tam sayı belirsizliklerinin eş zamanlı olarak kestirimi mümkün kılınmıştır. Ayrıca; tam sayı belirsizliğinin yakınsama süresinin azaltılabileceği ve sonrasında geliştirilecek yeni modeller ile konum hassasiyetinin arttırılabileceği anlaşılmıştır [21].

Günümüzde kullanılan PPP gözlem modelleri Kouba & Heroux ve Gao & Shen yaklaşımları baz alınarak geliştirilmiştir. Hassas efemeris bilgilerinin gözlem sonrası değerlendirmede kullanımını öneren Kouba & Heroux yaklaşımı geliştirilecek yeni modellerin matematiksel temelini atmıştır. Gao & Shen yaklaşımı ise; tek alıcı ile gerçekleştirilen gözlemlerin, hassas konum üretmek için kullanılması konusunda en büyük dezavantajlarından biri olan, taşıyıcı faz ölçülerinin tam sayı belirsizliklerinin kestirimine değinmiştir. Söz konusu model ile PPP için ilk kez gelişmiş bir stokastik model öngörülmüştür ve uygulamada yakınsama süresinin yol açtığı problemlerin çözümüne ışık tutmuştur [7], [21].

2.4 PPP Hata Kaynakları

PPP yönteminde taşıyıcı faz ölçüsüne etkiyen hatalar ve bu hataların kaynakları, diğer uydu tabanlı konumlama yöntemlerindekiler ile benzerlik göstermektedir. Fakat düzeltme ve indirgeme işlemleri, diğer yöntemler gibi çoğu zaman doğrudan yapılamamakta, bu nedenle de çeşitli modelleme yaklaşımları esas alınarak bu işlemler gerçekleştirilmektedir.

PPP yöntemi için; atmosferik hatalar, rölativistik etkilerin sebep olduğu hatalar, saat hataları gibi; metre mertebesinde sapmalara yol açan hatalar, diğer konumlama yöntemlerinde de göz ardı edilemeyecek kadar büyük hatalardır. Bu hataların haricinde, cm mertebesinde sapmalara yol açabilen ve diğer konumlama yöntemlerinde, hassasiyete bağlı olarak, göz ardı edilebilen hatalar da mevcuttur. Diğer konumlama yöntemleri için göz ardı edilebilen bu hatalar, PPP yöntemi için göz ardı edilemez ve mutlaka gözlem modeline dahil edilmelidirler [7], [26].

2.4.1 Uydu ve Alıcı Antenlerinden Kaynaklı Hatalar

Uydu tabanlı konumlama yöntemlerinin hepsi, uzayda bir veya birden fazla noktayı ve bu noktaların koordinatlarını temel alarak hesaplamalar yapma eğilimindedir. Fakat geometrik olarak bu mümkün değildir. Çünkü alıcı ve uydular uzayda 3 boyutlu yer kaplayan cisimlerdir. Söz konusu noktasal varsayımların işler hale gelebilmesi için alıcılar ve uydular uzayda 3 boyutlu ifade edilen cisimler değil, nokta olarak tasvir edilen, varsayılan olgular olarak kabul edilir. Bu durumda da hem alıcıların hem uyduların koordinat değerlerinin saptanabilmesi ancak ve ancak üzerlerindeki bir noktanın, tüm yapıyı temsil etmesiyle mümkündür. Tüm gözlemlerin alıcı ve uydu antenleri arasındaki sinyal alışverişi ile yapıldığı göz önüne alınırsa, söz konusu antenlerin faz merkezleri hesaplanan koordinatlara ilişkin noktaları temsil eder. Gözlem yapılan uydunun koordinatı uydunun kütle merkezine ve gözlemin yapıldığı noktanın koordinatı da doğrudan o noktanın yeryüzündeki konumuna atfedilir. Bu durumda da alıcı ve uydu antenlerinin neden olduğu hatalar ve antenlerin faz merkezi ile söz konusu varsayımdan ileri gelen noktaların konumları arasındaki ilişki PPP gözlem modellerinde göz önüne alınmalıdır.

2.4.1.1 Anten Ofseti

Uydu anten ofseti; GNSS uydularının kütle merkezi ile antenlerinin faz merkezleri arasındaki mesafedir. Sinyalin çıkış merkezinin, uydu anteninin faz merkezi olduğu göz önüne alınır ve uydu konumunun da uydunun ağırlık merkezindeki bir nokta olduğu düşünülürse, iki merkez arasındaki mesafenin yani uydu anten ofsetinin bilinmesi ve gözlem modeline dahil edilmesi gerekmektedir. Söz konusu ofset değerleri Dünya'nın kütle merkezine yönelen Z bileşeni, Güneş'in kütle merkezine yönelen X bileşeni ve bu X bileşenine dik olan Y bileşeni ile oluşturulan kartezyen bir sistemde ifade edilmektedir. Benzer şekilde bir ofset değeri de gözlem için kullanılan alıcının, konumu belirlenecek noktaya çekül doğrultusunda taşınan merkezi ile anten faz merkezi arasında da bulunmaktadır ve PPP gözlem modeline dahil edilmelidirler [7], [27].

2.4.1.2 Uydu Anteni Faz Dönme Etkisi

GNSS uyduları sabit yörüngesel hareketlerini korumak ve momentumlarını kaybetmemek için Güneş enerjisi kullanırlar. Güneş'ten enerji alabilmeleri içinse solar panellerini sürekli Güneş doğrultusuna çevirmektedirler. Bu esnada da Dünya'nın ağırlık

merkezi doğrultusunda sabitlenmiş uydu antenleri söz konusu dönüş hareketinden etkilenirler. Alıcı antenleri bu hareketi yanlış yorumlayarak, anlık bir faz değişimi olarak algılayabilmektedir. Bu etki diğer konumlama yöntemlerinde göz ardı edilebilse de PPP için gözlem modeline düzeltme olarak getirilmelidir. Getirilecek düzeltme, çapraz dipol antenlerin matematiksel konumundan türetilerek doğrudan hesaplanabilir [28], [29].

2.4.1.3 Faz Merkez Kayıklıkları

Alıcılarda faz ölçülerinin toplandığı, sinyalin ulaştığı nokta ve uydularda aynı büyüklüğün çıkış noktası sabit ve fiziksel bir olgu değildir. Çünkü sinyalin doğrultusu ve karakteri değiştikçe faz merkezi de değişmektedir. Bu bağlamda referans sistemde tanımlı noktanın azimutu ve yükseklik açısı faz merkezinin belirlenmesinde rol oynayan bileşenlerdir. PPP gözlemlerinde hem alıcı hem uydu antenleri için göz önüne alınması gerek bir kayıklıktır [26], [30], [31].

2.4.2 Jeofiziksel Etkenlerden Kaynaklı Hatalar

Yer küre üzerindeki ve altındaki kütle değişimleri, tektonik plakaların hareketleri, kutup gelgitleri ve Ay ve Güneş'in çekim etkileri gözlemin yapıldığı noktanın konumunu etkilemektedir. Deneysel olarak izleme yoluyla bazı jeofiziksel etkenler belirlenebildiği gibi birçoğu modelleme yaklaşımlarıyla belirlenmektedir. Bağıl gözlemlere dayanmayan, PPP gibi hassas konum belirleme yöntemlerinde bu tip jeofiziksel etkenler dikkate alınmalıdır [7], [26], [32], [33].

2.4.2.1 Yer Dönmesi

Gözlem yapılan istasyon, küresel anlamda fiziksel ve periyodik hareketlere maruz kalmaktadır ve hata miktarı olarak dm mertebesine ulaşabilen bu hareketler; GPS istasyonunun ITRF'te tanımlı konumuna dahil edilmemektedir. PPP için söz konusu hareketlerin gözleme ilişkin ITRF koordinat değerlerine gelen yer değiştirme etkileri olarak modellenip çözüme dahil edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda IERS, JPL gibi oluşumlar tarafından yayımlanan yer dönme parametreleri PPP çözümlerine dahil edilerek bu etkilerin konumlama üzerindeki hataları giderilebilmektedir [7], [33].

2.4.2.2 Kara Gelgiti

Yer kabuğunun dış gelgit üretme potansiyeline karşı elastik bir tepkisi bulunmaktadır. Söz konusu etki kara gelgiti olarak adlandırılmaktadır. Yeryüzündeki bir noktanın

konumu bu etki sebebiyle zamana bağımlı olarak değişmektedir. Bu sebeple PPP yöntemi için modellenmesi gereken bir hata oluşturmaktadır. Özellikle de sonuç ürünü zaman serilerine dayanan veya periyodik ölçüler barındıran çalışmalarda, kara gelgitinin modellenmesi ve hesaba katılması daha da önem taşımaktadır. Herhangi bir noktanın kara gelgitine bağlı olarak düşey ve yatay yer değiştirmesi; Love sayısı (h_{nm}) ve Shida sayısı (l_{nm}) ile karakterize edilen küresel harmonikler ile ifade edilir. Söz konusu küresel harmonikler ile oluşturulan fonksiyon $f(n, m)$ kullanılarak da kara gelgiti modellenebilir [7], [26], [32].

2.4.2.3 Okyanus Yüklemesi

Ay ve Güneş'in çekim etkisiyle oluşan, kara kütlesinin gelgiti gibi su kütlesinin de bir gelgit hareketi mevcuttur. Su kütlesinin gelgit hareketiyle yer kabuğuna uyguladığı bir kuvvet oluşmaktadır. Söz konusu kuvvet ve bu kuvvetin oluşturduğu periyodik deformasyonlar okyanus yüklemesi olarak adlandırılmaktadır. Okyanus yüklemesi özellikle kıyı kesimlerindeki periyodik GPS gözlemlerinde, düşey konum doğruluğu açısından birkaç cm hataya sebep olabilmektedir. PPP gözlemleri için de göz önüne alınması gereken bir hata miktarı ortaya çıkmaktadır. Okyanus yüzeyindeki yükseklik değişimleri baz alınarak okyanus yüklemesi modelleri oluşturulmaktadır. Ayrıca deneysel gelgit bilgileri ve mekansal çözünürlük ile ilişkilendirilen okyanus yüklemesi modelleri de mevcuttur. Bu modeller ile okyanus yüklemesinin yarattığı hata miktarı belirlenerek PPP çözümüne dahil edilebilmektedir [26], [34].

2.4.3 Gözlem Modelinden ve Matematiksel Koşullardan Kaynaklı Hatalar

PPP yöntemi hassas konum belirleme amacıyla faz ölçülerini kullanır ki faz ölçüsü de uydu ve alıcı arasındaki sinyalin tam dalga sayısı haricindeki kısmıdır. Faz gözlem modeli ise temelde sinyalin tam dalga sayısını ve alıcı koordinatlarını belirlemek için oluşturulur. Bu noktada sabit olan ışık hızının haricinde sinyalin çıktığı uydu konumu, çıkış anı ve alıcıya sinyalin geliş anı bilinmelidir. Gözlem modelinin ve dengeleme işlemlerinin PPP için geçerli kılınması açısından bu parametrelere ihtiyaç vardır. Fakat hatasız bir biçimde belirlenemeyen bu parametrelerin model içerisinde göz önüne alınıp giderilmesi gerekmektedir [5], [7], [20], [21], [26].

2.4.3.1 Uydu Yörüngelerinin Belirlenmesi

PPP için oluşturulan gözlem modellerinin tümünde çözüme ulaşmak için gerekli parametrelerden biri de gözlem yapılan uyduların koordinatlarıdır. Her uydu mesajından ve IGS destekleyici ürünlerinden bu bilgiye bir şekilde ulaşmak mümkündür. Fakat tüm hataların dikkate alındığı ve hassas konuma ulaşmayı hedefleyen PPP yöntemi için söz konusu parametreleri en hassas biçimde belirleyerek çözüme dahil etmek esastır. Bu sebeple en hassas efemeris bilgisi olan ‘’Final’’ verisinin gözlem sonrası değerlendirme aşamasına dahil edilmesi, PPP yönteminin felsefesi açısından en doğru seçenek olmaktadır. Final verisine erişimin mümkün olmadığı durumlarda daha az hassasiyete sahip fakat daha hızlı erişimin sağlanabildiği ‘’Rapid’’ veri de kullanılabilmektedir [5], [20], [21].

2.4.3.2 Saat Hataları

Uydu tabanlı gözlemlerde ışık hızına eş değer hıza sahip sinyallerden söz edilebilmektedir. Bu durumda da yapılacak tüm hesaplar için sinyallerin uydudan çıkış ve alıcıya geliş anlarının hassas şekilde kaydedilmesi gereklidir. Işık hızı fiziksel anlamda var olan maksimum hızı temsil ettiğinden dolayı, mikro saniye mertebesindeki yanlış zaman hesaplamaları dahi konumlama adına majör hatalara sebep olabilmektedir. Bu işlem için atom saatleri kullanılmaktadır. Mutlak zaman kavramı mevcut olmadığından, atom saatleri zamanı ne kadar hassas belirlese de belirli bir hata miktarına sahiptirler. Alıcı ve uydu saat hataları konumlama yöntemleri için bu noktada hesaba katılması gereken büyüklüklerdir. Söz konusu saat hataları, GPS zamanı referans alınmak üzere hesaplanan zamanın sapmasını ifade etmektedir. Hassas bağıl nokta konum belirleme yöntemlerinde saat hataları fark alma yöntemleri ile giderilmektedir. Aynı uydulara eş zamanlı yapılan gözlemlerin matematiksel farkı ile ölçüleri aynı hataya maruz bırakan uydu ve alıcı saatlerinin etkisi giderilebilmektedir. PPP yönteminde fark alma yöntemlerinin kullanılması mümkün olmayan gözlem modelleri kullanıldığından, bu majör hataların giderilmesi için farklı yollar izlenmektedir. Uydu saat hataları, hassas efemeris bilgilerini içeren verilerde matematiksel olarak ifade edilebilmektedir. PPP gözlemlerine hassas efemeris sayesinde doğrudan katılabilirler. Alıcı saat hataları ise PPP dengeleme modeline bilinmeyen parametre olarak katılmaktadır ve ölçü sayısı arttıkça bu hataların kestirimi daha sağlıklı hale gelmektedir [5], [7], [20], [21], [26], [35], [36].

2.4.3.3 Rölativistik Etki

GNSS uydu ve alıcılarında kullanılan atomik saatler, büyük derecede gravite ve hareketsel frekans değişimlerine sahiptir. Çok sayıda görelilik etkisini içeren bu değişimler hesaba katılmadan atomik saatlerin doğru çalışması mümkün değildir. PPP yönteminde alıcı ve uydu saatlerinin hassas çalışabilmesi için de kesinlikle söz konusu rölativistik etki göz ardı edilmemelidir. Bu etkinin düzeltmesi uydudan uyduya ve gözlem epoğuna göre sürekli değişmektedir. Her gözlem yapılan uydu ve gözlem anı için ayrı şekilde hesaba katılmalıdır [5], [35].

2.4.4 Atmosferik Koşullar

GPS sinyalleri gibi elektromanyetik sinyallerin, yüklü ya da nötr parçacıklarla etkileşerek hızlarının ve yönlerinin değişmesine atmosferin sebep olduğu kırılma adı verilmektedir [37]. Uydu sinyalleri alıcıya ulaşıncaya dek atmosfer boyunca bir yol izlemektedir. Atmosferin iyonosfer ve troposfer tabakaları GPS sinyallerinin bu yol boyunca yayılımını etkilemektedir [5].

GPS gözlemleriyle elde edilen konum bilgisinin doğruluğuna ve hassasiyetine etki eden hataların bir kısmı PPP tekniği için çeşitli analiz kaynaklarından elde edilen hassas efemerisler ile giderilebilmektedir [19]. Gözlem konumu ve anıyla doğrudan bağımlı, yalnız o gözleme ilişkin spesifik koşullar için söz konusu olan hataların giderilmesi ise ancak bunlara neden olan hata kaynaklarının veya oluşum şekillerinin modellenmesi ile mümkün olabilmektedir. Göz ardı edilemeyecek hatalara sebep olan atmosferik koşulların bu sebeple PPP gözlemlerinde hesaba katılmak üzere modellenmesi gerekmektedir. Uydu tabanlı gözlemler için sinyal yoluna etki eden atmosferik gecikmeler büyük oranda gözlem noktasının konumuna ve alıcı saat hatasına bağlı olduğu için de en uygun atmosferik modellerin seçimi ise ayrıca önem arz etmektedir [9].

2.4.4.1 İyonosferik Etki

Atmosferin; Dünya yüzeyinden yaklaşık 80 km yükseklikten başlayarak 1000 km ve daha yüksek kısımlara uzanan, iyonize havayla kaplı kısmına iyonosfer adı verilmektedir. İyonosferdeki parçacıklar, Güneş'ten gelen ultraviyole radyasyon ve X-ışınları sebebiyle sürekli iyonize kalma eğilimindedirler. İyonize maddeler doğası gereği serbest elektronlar ile çevrilidir. Serbest elektronlar da GNSS sinyalleri gibi elektromanyetik dalgalara yayılım etkisi uygulamaktadırlar. Bu sebeple iyonosfer boyunca yol alan GNSS sinyalleri

alıcıya olması gerekenden farklı bir zamanda veya farklı bir açıyla ulaşabilirler. İyonosferin, sinyallere karşı oluşturduğu bu etki GNSS gözlemlerinde göz ardı edilmemesi gereken büyük hatalara sebep olmaktadır. Belirli baz mesafelerinin altındaki bağıl gözlemlerde, iyonosferin oluşturduğu etkiler fark yöntemleriyle giderilebilmektedir. Ayrıca toplam elektron yoğunluğundan (Total Electron Content, TEC) oluşturulan iyonosferik haritalardan elde edilen veriler de çözümlere entegre edilebilmektedir [5], [20], [38].

PPP çözümlerinde iyonosferik etkiyi ortadan kaldırabilmek için türetilmiş iyonosfer bağımsız faz kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu kombinasyonlar gerçek anlamda bir faz ölçüsü değildir. Kaydedilen kod ve faz ölçülerinden türetilmiş matematiksel eşitliklerdir ve doğrudan faz ölçüleri gibi gözlem modeline dahil edilmektedirler. Örnek olarak; PPP gözlem eşitliklerinde, kod ve faz gözlemlerinin Wide Lane kombinasyonuyla tam sayı belirsizliği çözümü gerçekleştirilmektedir. Buradan da Taylor polinomlarına açılan bölgesel iyonosferik etki modellenebilmektedir. İyonosferin tümünü doğru bir şekilde modelleme yaklaşımı pek mümkün olamamaktadır. Çünkü özellikle orta enlem kuşaklarında iyonosfer tabakasındaki elektromanyetik fırtınalar çok yoğun ve karmaşık olabilmektedir. İyonosferin bu fırtınalara sebep olan Güneş patlamalarına maruz kaldığı zaman aralıkları nedeniyle de düzenli bir hareket saptanamamaktadır. Fakat PPP gözlemleri için bölgesel iyonosferik etkiyi modellemek yeterli olmaktadır, çünkü tek alıcıyla yapılan uydu gözlemleri söz konusudur. Ayrıca iyonosfer tek bir tabaka olarak düşünülse de GNSS sinyallerine etkisi bakımından farklı bölümlere sahiptir. Faz kombinasyonlarının yanı sıra PPP gözlemlerine iyonosferin diğer kısımlarının modellenebilmesi için manyetik modeller ve elektron yoğunluk haritaları kullanılmaktadır [7], [20], [26], [38], [39].

2.4.4.2 Troposferik Gecikme

Uydu jeodezisi, atmosferin tabakalarını diğer disiplinlerden farklı şekilde ele almaktadır. Jeodezik açıdan ele alındığında; çok sayıda serbest gaz moleküllerinin bir arada bulunduğu, yeryüzünden atmosferin dış kabuğuna doğru 80 km'ye kadar uzanan kısma yani nötr durumdaki atmosfere troposfer adı verilmektedir. GPS sinyalleri, alıcıya kadar uzanan yol boyunca; sıcaklık, basınç ve serbest su buharına maruz kalarak gecikmeye uğramaktadırlar [40]. Troposfer tabakasının hidrostatik dengedeki kısmı ve serbest su buharının yoğun olduğu kısım, fiziksel olarak kesin bir şekilde ayrılamasa da; uydu

sinyallerine farklı şekilde etki ederler. Troposferin bu kısımlarının oluşturduğu kırınım etkisi:

N_d : Troposferin hidrostatik dengedeki, kuru kısmındaki hava kırılma indisi,

N_w : Troposferin su buharı yoğun, ıslak kısmındaki hava kırılma indisi olmak üzere:

$$\Delta^{\mathrm{Trp}_N} = 10^{-6} \int_s^{\infty} N_d \, ds + 10^{-6} \int_s^{\infty} N_w \, ds \tag{2.6}$$

(2.6) eşitliği ile ifade edilmektedir [41].

Faz büyüklüklerinin ölçü olarak alındığı durumlarda sinyalin fiziksel karakteri ve troposferin uyguladığı kırınım etkisi, gecikme etkisinin modellenmesinde oldukça önemlidir. Bu nedenle de troposferik gecikme, taşıyıcı fazın izlediği yol ile ilişkilendirilerek anlam kazanmaktadır.

Taşıyıcı faza sahip uydu sinyallerinin alıcıya ulaşana dek düz bir yol boyunca ilerlemediği ve dalgasal yayılım ile eğrisel bir yol izlediği görülmektedir. Sinyallerin maruz kaldığı troposferik gecikme bu durumda hava kırılma indisleriyle doğrudan ifade edilemez. Çünkü sinyal yolunun eğri olmasından ileri gelen gecikme etkisinin, yani eğrisel sinyal yolu ile düz doğrultudaki sinyal yolu arasındaki uzunluk farkının da hesaba katılması gerekmektedir. Geometrik gecikme adı verilen bu etki; eğrisel gerçek sinyal yolunun uzunluğu ‘’S’’ ve geometrik olarak hesaplanan düz sinyal yolunun uzunluğu ‘’G’’ olmak üzere; (S-G) şeklinde ifade edilmekte ve bu durumda sinyale etkiyen troposferik gecikme; (2.7) eşitliğiyle belirtilmektedir [42].

$$\Delta^{\mathrm{Trp}} = 10^{-6} \int_s^{\infty} N_d \, ds + 10^{-6} \int_s^{\infty} N_w \, ds + (S - G) \tag{2.7}$$

Troposferik modeller, sayısal olarak ifadesi mümkün ve sabit katsayılara bağlı modellerdir. Troposferin bölgesel bir kısmının modellenmesiyle hesaplanan troposferik gecikme miktarları zenit doğrultusunda ifade edilir [42]. Sinyallerin zenit doğrultusunda gecikmeye uğradığını varsayarsak, toplam zenit gecikmesi ZTD; yine zenit doğrultusundaki troposferin kuru bileşeninin ZHD değeri ve ıslak bileşeninin yol açtığı ZWD değerinin toplamları olarak (2.8)’deki gibi ifade edilebilir [43].

$$\mathrm{ZTD} = \mathrm{ZHD} + \mathrm{ZWD} \tag{2.8}$$

Sinyalin gerçek yolundaki, eğrisel doğrultuda olan toplam troposferik gecikme (Slant Total Delay, STD) ise benzer şekilde, eğrisel yoldaki toplam kuru gecikmenin (Slant Hydrostatic Delay, SHD) ve ıslak gecikmenin (Slant Wet Delay, SWD) toplamı şeklinde, (2.9)'daki gibi ifade edilebilir [9], [42], [43]:

$$\mathrm{STD} = \mathrm{SHD} + \mathrm{SWD} \tag{2.9}$$

2.5 İz Düşüm Fonksiyonları

PPP çözümlerinde troposferin doğrudan modellenmesinin yanı sıra, troposferik gecikmenin modellenmesi yaklaşımı da benimsenmiştir. Bu bağlamda en doğru ve uygulamada pratik hale gelecek şekilde troposferik gecikmenin belirlenebilmesi için; eğik doğrultudaki gecikmelerin, zenit doğrultusundaki gecikmelere dönüştürülmesi gerekmektedir.

$$\mathrm{STD} = \mathrm{M}_{\mathrm{F(elevation)}}\ \mathrm{x}\ \mathrm{ZTD} \tag{2.10}$$

Bu işlem için iz düşüm fonksiyonları; kullanılmaktadır ve (2.10) eşitliği ile ifade edilebilmektedir [9], [42], [43]. Bu bağlamda literatürde; ''NMF, VMF1, GMF, GPT2'' gibi iz düşüm fonksiyonları yer almaktadır.

2.5.1 Chao Modeli

Troposferin izlenmesi ve akabinde ortaya çıkan modern iz düşüm fonksiyonlarına en yakın olan ilk iz düşüm fonksiyonu; bir yıl süreyi aşkın radyosonda gözlemlerine dayalı olarak oluşturulmuştur [44]. ''E'' uydu yükseklik açısı, ''b'' ve ''c'' ise troposferin ıslak ve kuru bileşenlerinin radyosonda gözlemlerinden elde edilen katsayılar olmak üzere; (2.11) eşitliğiyle belirlenmiş bir iz düşüm fonksiyonudur [42], [44].

$$\mathrm{MF} = \frac{1}{\sin(\mathrm{E}) + \dfrac{\mathrm{b}}{\tan(\mathrm{E}) + \mathrm{c}}} \tag{2.11}$$

2.5.2 Marini Sürekli Orantısı

İz düşüm fonksiyonu olarak doğrudan kullanımı pek yaygın olmasa da, çoğu iz düşüm fonksiyonunun benimsediği oransal iterasyonu ilk ortaya çıkaran modeldir. Troposferin sonsuz sayıdaki kısmının sonsuz sayıda sinyal kırma karakterine sahip olduğu

varsayılarak sonsuza uzanan bir iterasyon şeklinde oluşturulmuştur. ‘’E’’ uydu yükseklik açısı, ‘’a’’, ‘’b’’ ve ‘’c’’ ise troposfer boyunca belirlenebilir katsayılar olmak üzere; (2.12) eşitliğiyle belirlenmiştir [42], [45].

$$MF = \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + \frac{c}{\sin(E) + \cdots}}} \tag{2.12}$$

2.5.3 Herring Modeli

Bölgesel olarak hesaplanmış model katsayıları ve Marini’nin orantısı ile oluşturulmuş bir iz düşüm fonksiyonudur. Model katsayıları radyosonda verileriyle hesaplanmıştır ve gecikmenin belirleneceği istasyonların; enlem değerleri 27 ila 65 derece arasında, deniz seviyesinden yükseklikleri ise 0 ila 1.6 km arasında ve yüzey sıcaklıkları santigrat derece (C^0) mertebesinde tanımlıdır. Troposferin hidrostatik kısmının ve su buharı yoğun olan ıslak kısmının oluşturduğu gecikmeyi farklı parametrelerle değerlendirerek hesaplayabilen bir iz düşüm fonksiyonudur. Bu bağlamda ‘’φ‘’ istasyonun enlem değerini, ‘’H_s‘’ istasyonun km cinsinden deniz seviyesinden yüksekliğini ve ‘’T_s‘’ (C^0) olarak yüzey sıcaklığını göstermek üzere; (2.13), (2.14) ve (2.15) eşitlikleriyle hesaplanan parametreler ile ‘’E’’ uydu yükseklik açısı olmak üzere hidrostatik gecikme; (2.16) eşitliğiyle belirlenebilmektedir.

$$a_h = [1.2320+0.0139\cos(\varphi) - 0.0209\,H_s + 0.00215\,(T_s - 10)] \times 10^{-3} \tag{2.13}$$

$$b_h = [3.1612+0.1600\cos(\varphi) - 0.0331\,H_s + 0.00206\,(T_s - 10)] \times 10^{-3} \tag{2.14}$$

$$c_h = [71.244+4.2930\cos(\varphi) - 0.1490\,H_s + 0.00210\,(T_s - 10)] \times 10^{-3} \tag{2.15}$$

$$MF_h = \frac{1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{1 + c_h}}}{\sin(E) + \frac{a_h}{\sin(E) + \frac{b_h}{\sin(E) + c_h}}} \tag{2.16}$$

Benzer şekilde ıslak gecikme ise; (2.17), (2.18) ve (2.19) eşitlikleriyle hesaplanan parametreler ve (2.20) eşitliğiyle belirlenebilmektedir [46].

$$a_w = [0.583+0.011\cos(\varphi) - 0.052\,H_s + 0.0014\,(T_s - 10)] \times 10^{-3} \tag{2.17}$$

$$b_w = [1.402+0.102\cos(\varphi) - 0.101\,H_s + 0.0020\,(T_s - 10)] \times 10^{-3} \tag{2.18}$$

$$c_w = [45.85+1.910\cos(\varphi) - 1.290\,H_s + 0.015\,(T_s - 10)] \times 10^{-3} \quad (2.19)$$

$$MF_w = \frac{1 + \dfrac{a_w}{1 + \dfrac{b_w}{1 + c_w}}}{\sin(E) + \dfrac{a_w}{\sin(E) + \dfrac{b_w}{\sin(E) + c_w}}} \quad (2.20)$$

2.5.4 Niell İz Düşüm Fonksiyonu (Niell Mapping Function, NMF)

Herring modelindeki genel yaklaşımları kullanan bir iz düşüm fonksiyonudur; fakat parametrelerin elde ediliş biçimi farklıdır. Hidrostatik gecikme ve ıslak gecikme bu iz düşüm fonksiyonunda da ayrı ayrı ele alınmıştır. Ayrıca hidrostatik gecikmeye yükseklik düzeltmesi eklenerek fonksiyon genişletilmiştir. Diğer iz düşüm fonksiyonlarına göre en öne çıkan özelliği; 26 adet farklı istasyondan gözlenen radyosonda verilerinin kullanılmış olmasıdır. Bu veriler ile belirlenen sıcaklık ve basınç değerleriyle iz düşüm fonksiyonunun parametreleri oluşturulmuştur. Parametreler, hem hidrostatik gecikme için hem de ıslak gecikme için ortalama değer olarak enleme göre her 15 derecede bir değişmektedir. Bu noktada parametreler, gözlemin yapılacağı istasyonun enlemine, deniz seviyesinden yüksekliğine ve gözlem yapıldığı yılın gününe (Day of the Year, DOY) bağımlıdır. Hidrostatik kısım için ortalama parametreler Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de belirtilmiştir. Hidrostatik gecikmeye getirilecek yükseklik düzeltmesinin katsayıları içins her koşulda; (2.21)'deki değerler kullanılmaktadır. Bu durumda hidrostatik gecikme için fonksiyon, ''E'' uydu yükseklik açısı ve ''H'' deniz seviyesinden olan yükseklik olmak üzere; (2.22) eşitliğiyle belirlenmektedir.

$$a_{ht} = 2.53\text{x}10^{-5},\ b_{ht} = 2.53\text{x}10^{-5},\ c_{ht} = 2.53\text{x}10^{-5} \quad (2.21)$$

$$MF_h = \frac{1+\dfrac{a_h}{1+\dfrac{b_h}{1+c_h}}}{\sin(E)+\dfrac{a_h}{\sin(E)+\dfrac{b_h}{\sin(E)+c_h}}} + H\left(\frac{1}{\sin(E)} - \frac{1+\dfrac{a_{ht}}{1+\dfrac{b_{ht}}{1+c_{ht}}}}{\sin(E)+\dfrac{a_{ht}}{\sin(E)+\dfrac{b_{ht}}{\sin(E)+c_{ht}}}}\right) \quad (2.22)$$

Islak gecikme için oluşturulan iz düşüm fonksiyonu için ise, katsayılar benzer şekilde Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'te gösterildiği değerler ile hesaplanmıştır. Parametreler belirlendikten sonra ıslak gecikme için oluşturulan iz düşüm fonksiyonu, (2.23) eşitliğiyle oluşturulmuştur. Fonksiyonun işleyebilmesi için gözlemin yapıldığı istasyonun yüksekliği ve yaklaşık enlem değeri bilinmelidir [6].

$$MF_w = \frac{1 + \dfrac{a_w}{1 + \dfrac{b_w}{1 + c_w}}}{\sin(E) + \dfrac{a_w}{\sin(E) + \dfrac{b_w}{\sin(E) + c_w}}} \tag{2.23}$$

Tablo 2.1 Düşük enlem değerleri için hidrostatik kısma ilişkin NMF katsayıları

	Enlem (φ^0)		
Katsayı	$\mathbf{15^0}$	$\mathbf{30^0}$	$\mathbf{45^0}$
a_h	1.2769934x10^{-3}	1.2683230x10^{-3}	1.2465397x10^{-3}
b_h	2.9153695x10^{-3}	2.9152299x10^{-3}	2.9288445x10^{-3}
c_h	62.610505x10^{-3}	62.837393x10^{-3}	63.721774x10^{-3}

Tablo 2.2 Yüksek enlem değerleri için hidrostatik kısma ilişkin NMF katsayıları

	Enlem (φ^0)	
Katsayı	$\mathbf{60^0}$	$\mathbf{75^0}$
a_h	1.2196049x10^{-3}	1.2045996x10^{-3}
b_h	2.9022565x10^{-3}	2.9024912x10^{-3}
c_h	63.824265x10^{-3}	64.258455x10^{-3}

Tablo 2.3 Düşük enlem değerleri için ıslak kısma ilişkin NMF katsayıları

	Enlem (φ^0)		
Katsayı	$\mathbf{15^0}$	$\mathbf{30^0}$	$\mathbf{45^0}$
a_w	5.8021897x10^{-4}	5.6794847x10^{-4}	5.8118019x10^{-4}
b_w	1.4275268x10^{-3}	1.5138625x10^{-3}	1.4572752x10^{-3}
c_w	4.3472961x10^{-2}	4.6729510x10^{-2}	4.3908931x10^{-2}

Tablo 2.4 Yüksek enlem değerleri için ıslak kısma ilişkin NMF katsayılar

	Enlem (φ^0)	
Katsayı	$\mathbf{60^0}$	$\mathbf{75^0}$
a_w	5.9727542×10^{-4}	6.1641693×10^{-4}
b_w	1.5007428×10^{-3}	1.7599082×10^{-3}
c_w	4.4626982×10^{-2}	5.4736038×10^{-2}

2.5.5 İzobarik İz Düşüm Fonksiyonu (Isobaric Mapping Function, IMF)

NMF'nin yılın zamanını kullanarak yani herhangi bir yılın herhangi bir gününü temsilen çalışmasından dolayı, daha kısa vadeli gözlemlerde daha doğru sonuçlar (günlük ya da haftalık gibi) verebilen yeni bir iz düşüm fonksiyonu geliştirilmiştir. Troposferik gecikmenin daha kısa zaman aralıklarında hesaplanabilmesi için; atmosferin temsili olarak bölgesel bir kısmının değil, sadece o gözleme ilişkin daha lokal bir kısmının izlenmesi gereklidir. Bu sebeple de NWM değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. IMF, ilk kez NWM kullanılarak oluşturulmuş bir iz düşüm fonksiyonudur. IMF'de; Herring modeli ile geliştirilen, NMF'de de kullanılan matematiksel eşitliğin aynısı kullanılmaktadır. Fakat girdi parametreleri, NWM kullanılarak elde edilmektedir. [47].

2.5.6 Viyana İz Düşüm Fonksiyonları (Vienna Mapping Functions, VMF)

IMF, 200 mbar basınç seviyelerini (z200) 3.3^0 yüksekliği boyunca oluşan ıslak gecikme oranlarını ve bu seviyedeki zenit gecikmelerini girdi parametresi olarak kullanmaktadır [47]. Bu parametreler hesaplandıktan sonra fonksiyonun parametreleri oluşturulmaktadır ve bu da NWM'nin tam anlamıyla kullanımını kısıtlamakta, fonksiyonun işleyişini yine radyosonda verilerine bir noktada bağımlı hale getirmektedir. ECMWF'nin verileriyle IMF kullanılırken, söz konusu girdi parametrelerine gerek duyulmadan; NWM üzerinden doğrudan elde edilen veriler ile sinyal yolunun gecikmesini belirlemenin daha doğru sonuçlar vereceği yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşım ile sadece gözlem yapılan istasyonun yüksekliğine bağımlı çalışan VMF oluşturulmuştur. VMF'de hidrostatik ve ıslak gecikme için NMF ve IMF'deki gibi aynı oransal model kullanılmıştır. Fakat ''a'', ''b'' ve ''c'' katsayıları radyosonda verilerinden değil, doğrudan ECMWF üzerinden hesaplanmaktadır ve NMF'deki gibi hidrostatik kısım ile ıslak kısım için farklıdır. IMF,

girdi parametrelerini NWM'den alarak oluşturulan ilk iz düşüm fonksiyonu olsa da, her gözlem ve gözlem anı için kestirime dayalı NWM verilerini kullanan ilk iz düşüm fonksiyonu VMF'dir [8], [47].

VMF'nin oluşturulması kapsamında aynı zamanda ECMWF'den elde edilen sıcaklık ve basınç parametrelerine dayalı bir ışın izleme modeli oluşturulmuştur ki bu parametreler ECMWF'de her gözlem noktası ve her gözlem anı için 6 saatte bir tanımlıdır. Söz konusu ışın izleme modelinden; 90°, 70°, 50°, 30°, 20°, 15°, 10°, 7°, 5°, 3.3° uydu yükseklik açılarındaki basınç seviyeleriyle yaklaşık yükseklik açıları belirlenmiştir. Bu yaklaşık değerler ile fonksiyon üzerinden en küçük kareler dengeleme prosedürleri ile ‘’a’’, ‘’b’’ ve ‘’c’’ katsayılarının kestirimleri hidrostatik ve ıslak gecikme için ayrı ayrı yapılmıştır. Dengeleme sonucu; zenit gecikmelerini 3° seviyelerine kadar belirleyebilmek için yalnız 3 parametrenin yeterli olacağı anlaşılmıştır [8].

VMF'de kullanılan parametreler, teknolojinin ve bu alandaki çalışmaların gelişmesiyle güncellenmektedir. Bu durumun sonucu olarak da güncellenmiş halleriyle VMF'nin yeni versiyonları ortaya çıkmaktadır. (VMF1, VMF2, VMF3...)

2.5.7 Viyana İz Düşüm Fonksiyonları 1 (Vienna Mapping Functions 1, VMF1)

VMF'nin ilk güncellenen versiyonudur. VMF ile aynı matematiksel modeli kullanmaktadır fakat hidrostatik gecikmeyi elde eden kısım için belirlenen ‘’b’’ ve ‘’c’’ katsayıları farklıdır. VMF1 için ışın izleme modelinden elde edilen ‘’c’’ katsayısı, üzerindeki sistematik hataları giderebilmek için; VMF'den farklı olarak, enleme ve yılın gününe bağımlı bir fonksiyonla ifade edilmiştir [48].

ECMWF verileri, son 40 yıllık verilerinin yeniden analizi olan ERA-40'ın; (ECMWF Re-Analysis 40-Years) yaklaşık 125 km'ye denk gelen yatay çözünürlüğe sahip küresel harmoniklerin açılımı olarak depolanmaktadır. VMF1'in geliştirilmesi için de bu veriden; 2001 yılını kapsayan aylık ortalama değerler ile global bir grid ağı tasarlanmıştır. Bu grid ağı, su buharı basıncı, sıcaklık, toplam yüzey basıncı ve yükseklik verilerini içeren 23 farklı seviyeye bölünmüştür. Bu seviyelerdeki farklı noktalardan, farklı epoktaki değerler elde edilerek yeni parametreler en küçük kareler yöntemiyle kestirilmiştir. GPS ve VLBI verileriyle de, VMF1'in NMF ve VMF'ye göre daha iyi performans gösterdiği kaydedilmiştir [48].

2.5.8 Global İz Düşüm Fonksiyonu (Global Mapping Function, GMF)

GMF; VMF1 parametrelerinin; global bir grid ağında küresel harmoniklere genişletilmesiyle oluşturulmuş bir iz düşüm fonksiyonudur. Fonksiyon, VMF1'in ana matematiksel eşitliğini, oransal ifadeyi kullanır. Ayrıca NMF gibi girdi parametresi olarak DOY'u kullanmaktadır. Basınç, nem ve sıcaklık verilerini elde etmek için aylık ortalamaları içeren ''15° x 15°'' lik global grid ağı kullanılmıştır. VMF' de olduğu gibi, bu global grid ağı da ECMWF ERA40'tan alınmıştır. Hidrostatik ve ıslak gecikme için ''a'' katsayısı, VMF1 ile aynı yöntem kullanılarak Eylül 1999-Ağustos 2002 aralığı için belirlenmiştir. Yine VMF1 için kullanılan deneysel eşitliklerle GMF' nin ''b'' ve ''c'' katsayıları oluşturulmuştur. NMF' de kullanılan yükseklik düzeltmesi, hidrostatik gecikme parametrelerine uygulanmıştır. Kullanılan global grid ağındaki her bir grid noktasında, NMF ile aynı faza sahip (28 Ocak'a sabit) sinüzoidal bir fonksiyon; ''a'' parametrelerinin zaman serisine uygun olarak oluşturulmuştur. Bu fonksiyon ile hidrostatik ve ıslak gecikmedeki ''a'' parametreleri her DOY ve gözlem noktası için belirlenebilmektedir. Söz konusu fonksiyon: ''A'' yıllık genlikler, ''a_0'' ortalama değerler olmak üzere; (2.24) eşitliğiyle oluşturulmuştur.

$$a = a_0 + A\cos\left(\frac{DOY - 28}{365} \text{ x } 2\pi\right) \tag{2.24}$$

''A'' ve ''a_0'' küresel harmoniklerle hesaplanmaktadır. Ortalama değerleri temsil eden ''a_0'' gözlem noktasının enlem ve boylamı kullanılarak; (2.25)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [9].

$$a_0 = \sum_{n=0}^{9}\sum_{m=0}^{n} P_{nm}(\sin(\varphi))[A_{nm}\cos(m \text{ x } \lambda) + B_{nm}\sin(m \text{ x } \lambda)] \tag{2.25}$$

2.5.9 Global Sıcaklık ve Basınç Modeli (Global Pressure and Temperature Model, GPT)

GPT, yeryüzündeki herhangi bir noktadaki sıcaklık ve basınç verilerini sağlayan gözleme dayalı veriler ile oluşturulmuş bir modeldir. Önsel hidrostatik gecikmenin belirlenmesi her gözlem için gerekli olmaktadır. Bunun için de ya gözleme ilişkin anlık basınç değerleri kullanılmakta ya da sayısal hava modellerinden elde edilmektedir. İki yöntemin de kullanılamadığı durumlar için alternatif olarak GPT geliştirilmiştir. Ayrıca diğer

yöntemlere göre daha hassas ve yükseklikten kaynaklı sistematik hatalardan arınmış veriler sağlamaktadır. Bu hatalardan arınmak için; yeryüzündeki yıllık basınç değişimlerinden faydalanılmaktadır [49].

Matematiksel ve meteorolojik açıdan GMF ile aynı prensipte geliştirilmiştir. Fakat NMF ve GMF gibi yükseklik düzeltmesi kullanılmayıp daha farklı bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu yaklaşım için öncelikle her düşey profilde sırasıyla; üstel ve doğrusal enterpolasyon ile yeryüzündeki sıcaklık ve basınç değerleri elde edilmiştir. Sonrasında yeryüzündeki basınç değerleri, ortalama deniz seviyesindeki basınç değerlerine indirgenmiştir. Yükseklik arttıkça da doğrusal bir düşüşle sıcaklığın da etkilendiği göz önüne alınmıştır ''p'' ve ''h'' yer yüzeyindeki basınç ve noktanın yüksekliği, ''p_r'' ve ''h_r'' de ortalama deniz seviyesindeki basınç ve ortalama deniz seviyesi olmak üzere; (2.26) eşitliği kullanılmaktadır. Ayrıca sıcaklığın yüksekliğe bağımlı doğrusal düşüşündeki eğim ise, (2.27) eşitliğiyle belirlenmiştir.

$$p = p_r(1 - 0.0000226(h - h_r))^{5.225} \tag{2.26}$$

$$\frac{dT}{dH} = -0.0065 \frac{C^0}{m} \tag{2.27}$$

Bu şekilde de her bir grid noktası için, ortalama deniz seviyesindeki 36 aylık ortalama basınç ve sıcaklık değerleri oluşturulabilmektedir. Yükseklik indirgemesi söz konusu yöntem ile sağlanmaktadır. Eşitliklerde geçen yükseklik kavramı ortometrik yüksekliği ifade etmektedir. Fakat GPT modeli aynı zamanda girdi parametresi olarak elipsoidal yükseklikleri de kabul etmektedir. Bunun için jeoit ondülasyonu Avrupa Gravitasyonel Model 1996 (European Gravitational Model 1996, EGM96) ile elde edilmektedir. Belirlenen jeoid ondülasyonu sonrasında küresel harmoniklere açılarak aynı eşitliklere entegre edilebilmektedir [49].

2.5.10 Global Sıcaklık ve Basınç Modeli 2 (Global Pressure and Temperature Model 2, GPT2)

GPT2; GMF ve GPT kombine edilerek oluşturulmuş ve geliştirilmiş bir modeldir. Geliştirilen özelliklerin başında sayısal hava modelinin verileri ve çözünürlüğü gelmektedir. ECMWF'nin; düşey profilde 37 izobarik basınç seviyesine denk gelen, 2001-2010 yıllarının verilerini kapsayan aylık ortalamaları kullanan ''ERA-Interim'' verileri kullanılmıştır. GMF'de ''a'' katsayıları için kullanılan sinüzoidal fazın genliği

yıllıktır (NMF gibi 28 Ocak'a sabittir). Fakat GPT2 için kestirim değerlerinden belirlenen yarı yıllık genlikler de kullanılmıştır ve böylelikle modelin zamansal çözünürlüğü arttırılmıştır. GPT'de yüksekliğin artmasıyla sıcaklığın düşüşü sabit bir değer ile ifade edilmektedir. Bu düşüş, GPT2'de her grid noktası için yarı yıllık ortalama sıcaklık değerlerinin varyasyonları ile belirlenmektedir. Basınç, sıcaklık ve nem değerleri için, yer yüzeyinden yapılacak enterpolasyonda topografya verisi, ''5 Dakikalık Gridli Global Engebe Verisinden (5-minute Gridded Global Relief Data, ETOPO5)'' 1 derecelik çözünürlükle örneklenerek elde edilmiştir. Tüm bu geliştirmeler ile GPT2'de yatayda 5 derecelik çözünürlük sağlanmıştır ve zamansal çözünürlük diğer modellere, fonksiyonlara göre arttırılmıştır [13]. GPT2; GPT2w, GPT3 modelleriyle güncellenmiştir ve güncellenmeye de devam etmektedir [50], [51].

3
FARKLI İZ DÜŞÜM FONKSİYONLARI İLE PPP ÇÖZÜMLERİ

Tek alıcı ile hassas konum belirlemek için geliştirilen PPP yönteminde; alıcı ve uydu kaynaklı hatalar, ölçü süresine ve kalitesine bağımlı olarak matematiksel yöntemlerle ve hassas efemeris gibi destekleyici gözlem verileriyle giderilebilmektedir. Fakat jeofiziksel ve atmosferik koşullar için; GNSS sinyallerine etki eden ya da noktanın konumunda sistematik hataya sebep olan tüm hataları modelleyerek veya modellenmiş hata kaynaklarından hata miktarını belirleyerek PPP'nin SPP'den farklı şekilde hassas konum bilgisi elde etmesi sağlanmaktadır [4], [5], [7], [17], [19], [21], [22], [23], [26], [39], [40].

PPP hata kaynakları arasında önemli bir yer tutan atmosferin troposfer tabakası, gözlem modelinde dikkate alınmadığı takdirde önemli derecede hatalara sebep olmaktadır. Bu durumda da, hataya sebep olan troposferik etkilerin modellenerek PPP çözümlerine entegre edilmesi mutlak bir gereklilik haline gelmektedir.

Troposferik gecikme de doğası gereği troposferin karakterine bağımlıdır ki bu karakter hava koşullarından ve olağan atmosfer hareketlerinden etkilenmektedir. Her iz düşüm fonksiyonu da ''Bölüm 2.4.4.2.1'' de belirtildiği gibi; enlem, yükseklik, uydu yükseklik açısı, gözlem anı, gözlem lokasyonu ve zamanıyla ilgili değişkenlerden bir veya birden fazlasına bağımlı çalışmaktadır. Üstelik iz düşüm fonksiyonları; radyosonda verilerinden ya da sayısal hava modelleri yoluyla hesaplanan parametreler içermektedir. Bu nedenlerle de iz düşüm fonksiyonları troposferik gecikmeyi modellemek için kullanılsalar da, troposferin karakterinden ve gözlem koşullarından bağımsız düşünülemezler [6], [8], [9], [11], [13], [17], [19], [42], [45], [46], [47], [48], [49], [52].

3.1 Değerlendirme Yolunun Belirlenmesi ve Verilerin Toplanması

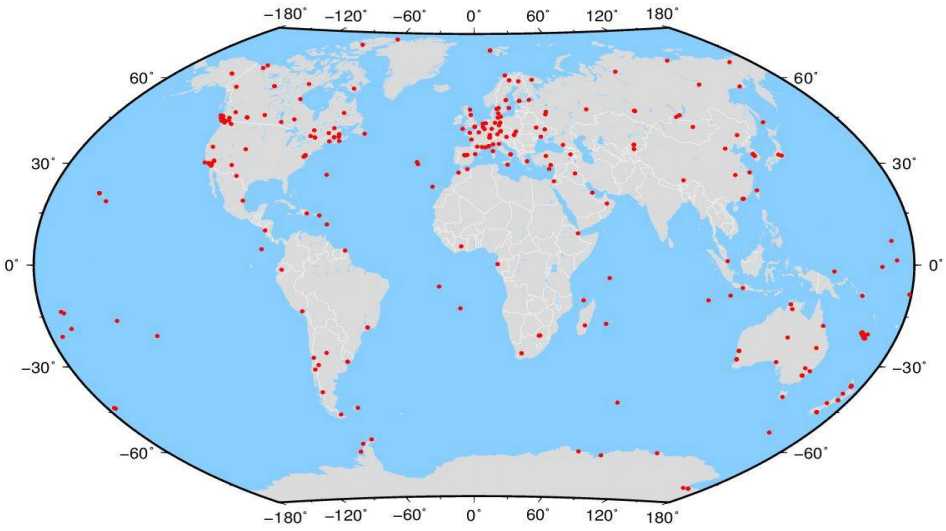
Bu çalışmanın motivasyon kaynağını ''Bölüm 1.2'' de belirtildiği gibi; PPP yönteminde troposferik gecikmenin modellenmesinde kullanılan iz düşüm fonksiyonlarının farklı coğrafi ve çevresel koşullarda farklı performans göstermesi oluşturmaktadır. Bu kapsamda çok sayıda PPP çözümlerinde farklı iz düşüm fonksiyonlarının çözüm

performansları araştırılmış ve söz konusu koşullarla, iz düşüm fonksiyonları arasında anlamlı bir korelasyon olup olmadığı incelenmiştir.

Çalışma kapsamında çok sayıda veri kümesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu durumun başlıca sebepleri;

- PPP çözümlerinin hata ve hata kaynaklarının, her gözlem noktasında veya her epokta modellenebilmesinin mümkün olmaması,
- Atmosferik koşulların zamana bağımlı olarak ciddi değişiklikler göstermesi,
- Veri setindeki ölçü sayısı arttıkça istatistiki anlamlılık derecesine yaklaşılması,
- Enlem, yükseklik değerleri ve mevsimsel hava koşulları ile iz düşüm fonksiyonlarının kullanımı arasında anlamlı bir korelasyon kurulabilmesi için her durumun değerlendirilmesine olanak sağlanması,
- Veri arşivindeki her istasyonun, PPP çözümü için gerekli verileri barındırmaması durumuna karşılık veri setinden çıkarılma ihtimali ve bu durumun sonucunda da veri sayısının azalması tehdidi,
- Çalışmanın global ölçekte tanımlanabilmesi ihtimaline yaklaşılmasıdır.

Söz konusu sebeplerden dolayı, çalışmanın veri setini oluşturmak üzere; Amerikan, Ulusal Uzay ve Havacılık Dairesi (National Aeronautics and Space Administration, NASA) tarafından yönetilen, CDDIS arşivinden 294 adet istasyon seçilmiştir ve Şekil 3.1'de bu istasyonların konumu gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Verileri kullanılan istasyonların dağılımı

Gözlem epoğu olarak her mevsimi temsilen 2018 yılının; Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarının kesintisiz aralıkları seçilmiştir. Epoklar arasındaki zaman farkının asıl sebebi; troposferin hava koşullarından etkilenmesi ve buna bağlı olarak her mevsimin hava durumunu en iyi temsil edecek 1 aylık zamanların veri setine dahil edilmesidir. Kuşaklar arası iklim farklılıklarını göz önüne alabilmek için de istasyonların global dağılımının avantajından faydalanılmıştır.

3.2 PPP Çözümleri ve Değerlendirme

GipsyX, NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından geliştirilmiş bir GNSS değerlendirme yazılımıdır ve yine JPL tarafından geliştirilmiş ‘’GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software (GIPSY-OSASIS)’’ yazılımının gelişmiş bir versiyonu olarak tanıtılmıştır. GIPSY-OASIS için son güncellemenin 2023 yılında olacağı duyurulmuştur. Bu durumda da; hassas efemeris bilgileri, jeofiziksel modeller gibi en gelişmiş JPL ürünlerini kullanan ve PPP değerlendirmesi yapabilen GipsyX’in, 2023 yılı itibari ile GIPSY-OASIS’ in yerini alacağı bildirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, tüm PPP çözümleri GipsyX yazılımının 1.2 versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

PPP çözümlerinin kalitesi, diğer GPS ile konum belirleme yöntemlerinde olduğu gibi, gözlem süresi ile ilişkili olarak değişmektedir. Fakat troposferik koşulların günlük aralıktan kısa değişimlerinde iz düşüm fonksiyonlarının performansını izleyebilmek için farklı gözlem süreleri ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca gözlemlerin aynı güne ilişkin hata miktarı daha büyük olan aralıklarında analiz yapabilme imkânı da bu şekilde elde edilmiştir. 123 günlük gözlem verileri; her gün içerisinde 2, 3, 4, 6, 8, 12 ve 24 saatlik farklı gözlem süreleriyle çözülmüştür.

Çalışmanın amacı kapsamında sinyal yolu boyunca gerçekleşen troposferik gecikmeyi modellemek için iz düşüm fonksiyonları kullanılmıştır. İz düşüm fonksiyonlarının PPP çözümlerindeki performanslarını araştırmak içinse tüm hatalar aynı şekilde modellenmiştir.

GipsyX, PPP çözüm ve değerlendirme aşamalarında, öngördüğü standart iyonosfer bağımsız matematiksel modelleri kullanmaktadır. GPS gözlemlerinden elde edilen faz ölçüleriyle farklı iyonosfer bağımsız kombinasyonlar türetilerek, bu kombinasyonlar PPP çözümlerine direkt ölçü olarak katılmaktadırlar. Bu kombinasyonlardan biri; ‘’L_1’’ ve

‘’L_2’’ GPS gözlemlerinden elde edilen faz ölçüleri ve ‘’f_1’’ ve ‘’f_2’’ bu faz ölçülerinin frekans değerleri olmak üzere, (3.1)’deki katsayılar hesaplandıktan sonra; (3.2) eşitliğiyle ‘’LC’’ iyonosfer bağımsız kombinasyonu belirlenmektedir.

$$a_1 = \frac{{f_2}^2}{({f_1}^2 - {f_2}^2)} = 1.5457,\ a_2 = a_1 + 1 = 2.5457 \tag{3.1}$$

$$LC = a_2 L_1 - a_1 L_2 \tag{3.2}$$

Bir başka iyonosfer bağımsız kombinasyon olan ‘’Wide-Lane’’ ise (3.3) eşitliğiyle belirlenmektedir.

$$L_{WL} = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} \tag{3.3}$$

GipsyX, bu kombinasyonların yanı sıra başka kombinasyonlar da kullanmaktadır. Bu durum GPS gözleminden elde edilen faz ölçülerinin frekansına ve kombinasyonların sebep olduğu hata miktarlarına göre değişmektedir. Söz konusu iyonosfer bağımsız kombinasyonların ölçü olarak kullanıldığı PPP çözümleri, fark yöntemi kullanılmayan (zero-differenced) gözlem eşitlikleriyle gerçekleştirilmektedir. Kullanıcı tarafından ana matematiksel modellere müdahale edilmesine izin verilmemektedir. Yani; stokastik model, gözlem eşitlikleri ve bu eşitliklere bağlı kestirim değerleri, GipsyX için belirlenmiş kaynak kodlar ile koruma altına alınmıştır ve değiştirilemezler. Gözlem hatalarını gidermek için de aynı şekilde önceden belirlenmiş modeller mevcuttur ve çözümlere dahil edilmektedir. Fakat bu aşamada kullanıcı tarafından seçilen veriler ve modeller ile de çözümler gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda GipsyX’in 1.2 versiyonu ile gerçekleştirilen PPP çözümlerinde hatalar, her gözlem süresi ve her gözlem noktası için Tablo 3.1’de belirtildiği şekliyle çözüme dahil edilmiştir. Tüm bunların aksine troposferik gecikmeyi modellemek için her gözlem noktası ve her gözlem süresine ilişkin çözümlerde farklı yaklaşımlar kullanılmıştır.

Tüm çözümlerde; zenit doğrultusu boyunca troposferin oluşturduğu hidrostatik gecikmeyi modellemek için ‘’Statik Model’’ kullanılmıştır. Söz konusu model, ‘’h’’ istasyonun elipsoidal yüksekliği olmak üzere önsel ZHD miktarı; (3.4) eşitliğiyle ifade edilmektedir ve GipsyX’in standart olarak kullandığı modeldir. Zenit doğrultusundaki ıslak gecikmenin önsel değeri içinse (ZWD) 0.1 m sabit değer kullanılmıştır.

$$\mathrm{ZHD} = 2.29951\ \mathrm{x(e)}^{(-0.000116\ \mathrm{x\ h})} \tag{3.4}$$

Önsel ZHD için sadece elipsoidal yüksekliğe bağımlı modelin, önsel ZWD içinse hiçbir değişkene bağımlı olmayan sabit 0.1 m değerinin kullanılmasının temel sebebi; iz düşüm fonksiyonlarının işlevlerini daha da ön plana çıkarmaktır. Bu bağlamda da iz düşüm fonksiyonlarının çözüm performansları arasında yorum yapabilmek için, ZHD ve ZWD' nin az değişkene bağımlı olması sağlanmıştır.

Tablo 3.1 GipsyX çözümlerinde karşılaşılan hatalar ve giderilme yöntemleri

Hata	**Giderilme Yöntemi**
Anten Ofseti, Faz Merkez Kayıklıkları	İstasyonların JPL arşivindeki anten bilgileri
Faz Dönme Etkisi	GipsyX çapraz dipol anten çözümleri
Yer Dönme Etkisi	JPL yer dönme parametreleri
Kara Gelgiti	Love (h_{nm}) ve Shida (l_{nm}) sayılarıyla ifade edilen küresel harmonikleri
Okyanus Yüklemesi	FES2004 modelinden elde edilen verileri
Uydu Yörünge ve Uydu Saat Hataları	JPL Final verilerinden elde edilen hassas uydu bilgileri
İyonosferik Gecikme	İyonosfer bağımsız faz kombinasyonları

Her gözlem istasyonu ve her istasyondaki farklı gözlem sürelerini içeren çözümler için 4 farklı iz düşüm fonksiyonu kullanılmıştır. Bunlar; NMF, VMF1, GMF, GPT2 olarak belirlenmiştir. Böylelikle GipsyX ile gerçekleştirilen toplam PPP çözümü, Tablo 3.2'de belirtilen farklı gözlem koşullarıyla (3.5)'de hesaplandığı üzere 1,012,536 adet olmuştur. Linux işletim sistemi ile GipsyX kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilen 1,012,536 adet PPP çözümlerinin tümü; eksik gözlem verilerinden dolayı düzgün kaydedilememiş veya tamamlanamamıştır. Bu durumun sonucu olarak da, 5 adet istasyona ilişkin gözlemler veri setinden çıkarılmıştır. Böylelikle toplam çözülen veri sayısı 995,316 adet olmuştur.

Tablo 3.2 Toplam çözülen veri sayısının hesaplaması

	Sayısı
İstasyon	CDDIS arşivinden seçilen; **294**,
Gözlem Günü	2018 yılının Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarından; **123**,
Farklı Gözlem Süresi	2, 3, 4, 6, 8, 12, 24 saatlik; **7**,
Farklı İz Düşüm Fonksiyonu	NMF, VMF1, GMF, GPT2 ile; **4**

$$294 \text{ x } 123 \text{ x } 7 \text{ x } 4 = 1{,}012{,}536 \tag{3.5}$$

3.3 Sonuçların Analizi için Hazırlıklar ve Uygulama

Sonuçların doğruluk parametresi olarak ifade edilebilmesi için RMS değerleri kullanılmıştır. Her istasyonun, her gözlem süresinde ve her iz düşüm fonksiyonunun ayrı ayrı kullanıldığı çözümleri için ‘’n, e, u (North-East-Up)’’ toposentrik koordinat sistemine ilişkin ‘’RMS_n , RMS_e, RMS_u’’ RMS değerlerinin hesaplanması hedeflenmiştir.

‘’i’’ herhangi bir istasyonu, ‘’j’’ 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24 saatlik gözlem sürelerinden birini, ‘’k’’ NMF, VMF1, GMF, GPT2 iz düşüm fonksiyonlarından birini ve ‘’l’’ veri setindeki herhangi bir gözlem epoğunun sırasını temsil etmek üzere, ‘’$\tilde{X}_{i,j,k,l}$, $\tilde{Y}_{i,j,k,l}$, $\tilde{Z}_{i,j,k,l}$’’ ilgili istasyonun her epoktaki, her gözlem süresindeki ve her bir iz düşüm fonksiyonuyla yapılan PPP çözümü sonucu elde edilen ITRF datumunda tanımlı kartezyen koordinat bileşenleri, ‘’$\tilde{X}_{ref_i}$, $\tilde{Y}_{ref_i}$, $\tilde{Z}_{ref_i}$’’ CDDIS arşivinde kayıtlı koordinat değerleri, (3.6) eşitliğindeki ‘’μ_{x_i} , μ_{y_i} , μ_{z_i}’’ değerleri beklenen değerler olmak üzere; koordinat fark değerleri (3.7), (3.8) ve (3.9) eşitlikleriyle belirlenmiştir.

$$\mu_{x_i} = \tilde{X}_{ref_i} \quad , \mu_{y_i} = \tilde{Y}_{ref_i} \quad , \quad \mu_{z_i} = \tilde{Z}_{ref_i} \tag{3.6}$$

$$\bar{X}_{i,j,k,l} = |\mu_{x_i} - \tilde{X}_{i,j,k,l}| \tag{3.7}$$

$$\bar{Y}_{i,j,k,l} = |\mu_{y_i} - \tilde{Y}_{i,j,k,l}| \tag{3.8}$$

$$\bar{Z}_{i,j,k,l} = |\mu_{z_i} - \tilde{Z}_{i,j,k,l}| \tag{3.9}$$

‘’$\overline{X}_{i,j,k,l}$, $\overline{Y}_{i,j,k,l}$, $\overline{Z}_{i,j,k,l}$’’ fark değerlerinin, toposentrik koordinat sistemindeki ‘’$\bar{n}_{i,j,k,l}$, $\bar{e}_{i,j,k,l}$, $\bar{u}_{i,j,k,l}$’’ değerlerine dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Dönüşüm için kullanılan ortogonal dönüklük matrisinin belirlenebilmesi için, her istasyona ilişkin gerekli enlem ve boylam değerleri JPL arşivinden elde edilmiştir. Söz konusu ortogonal dönüşüm matrisi ‘’$\underline{R}$’’, ‘’φ’’ istasyonun enlem değeri ve ‘’λ’’ istasyonun boylam değeri olmak üzere; (3.10) eşitliğiyle belirlenmiştir.

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(\varphi)\,x\cos(\lambda) & -\sin(\varphi)\,x\,\sin(\lambda) & \cos(\varphi) \\ \cos(\varphi)\,x\cos(\lambda) & \cos(\varphi)\,x\,\sin(\lambda) & \sin(\varphi) \end{bmatrix} , \begin{vmatrix} \bar{e}_{i,j,k} \\ \bar{n}_{i,j,k} \\ \bar{u}_{i,j,k} \end{vmatrix} = \underline{R} \begin{vmatrix} \overline{X}_i \\ \overline{Y}_i \\ \overline{Z}_i \end{vmatrix} \qquad (3.10)$$

Düzeltme değerleriyle, ‘’s’’ herhangi bir veri setindeki veri sayısını, toposentrik koordinat sistemindeki koordinatlara ilişkin RMS değerlerinin; (3.11), (3.12) ve (3.13)’teki eşitliklerle hesaplanması planlanmıştır.

$$RMS_{n_{i,j,k}} = \sqrt{\frac{1}{s}\sum_{l=1}^{s} \bar{n}_{i,j,k,l}{}^2} \qquad (3.11)$$

$$RMS_{e_{i,j,k}} = \sqrt{\frac{1}{s}\sum_{l=1}^{s} \bar{e}_{i,j,k,l}{}^2} \qquad (3.12)$$

$$RMS_{u_{i,j,k}} = \sqrt{\frac{1}{s}\sum_{l=1}^{s} \bar{u}_{i,j,k,l}{}^2} \qquad (3.13)$$

Belirtilen eşitlikler; ‘’i’’ istasyonun, ‘’j’’ gözlem süresiyle yapılan, ‘’k’’ iz düşüm fonksiyonu kullanılmış PPP çözümlerinin her ‘’l’’ inci düzeltmeleriyle hesaplanan toposentrik koordinat sistemi için RMS değerlerini ifade etmektedir.

3.3.1 Hız Araştırması ve Genel RMS Değerlerinin Elde Edilmesi

Beklenen değer olarak kullanılan arşiv koordinatları ile PPP çözümlerinden elde edilen koordinatlar arasında epok farklılığı bulunmaktadır. Bu epok problemini çözebilmek için; arşivden alınan referans epoktaki koordinatların, gözlem epoğunda olan PPP çözüm değerlerindeki epoğa dönüştürülmesi gereklilik haline gelmiştir. Bu noktada istasyonların hız bilgilerine ihtiyaç duyulmuştur.

Sürekli gözlem yapan istasyonların, JPL arşivinde hız değerleri ve zaman serileri mevcuttur. Fakat tüm istasyonların hız bilgileri arşivde yer almamaktadır. Çalışma kapsamında da PPP çözümü sorunsuz gerçekleştirilen 289 adet istasyondan, 59 adet istasyonun hız değerine erişilememiştir. Bu nedenle de, çalışma kapsamından çıkarılmıştır. Geriye kalan 230 istasyonun hız değerleri elde edilebilmiştir. Elde edilen hız değerleri ile arşivdeki koordinat değerleri gözlem epoklarına kaydırılmıştır. Aynı epoğa sahip referans koordinatları kullanılarak 230 adet istasyonun farklı iz düşüm fonksiyonu ile çözülmüş ve farklı gözlem sürelerine ait toplam 6440 adet, toposentrik koordinat sistemindeki ''$\mathrm{RMS}_{\mathrm{n}_{\mathrm{i,j,k}}}$, $\mathrm{RMS}_{\mathrm{e}_{\mathrm{i,j,k}}}$, $\mathrm{RMS}_{\mathrm{u}_{\mathrm{i,j,k}}}$'' değeri hesaplanmıştır.

Ayrıca PPP çözümlerine ilişkin her iz düşüm fonksiyonunun her gözlem süresindeki doğruluk performansını analiz edebilmek için ''$\mathrm{RMS}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{Ovr}}$, $\mathrm{RMS}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{Ovr}}$, $\mathrm{RMS}_{\mathrm{u}}^{\mathrm{Ovr}}$'' genel RMS değerlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Genel RMS değerlerinin yanıltıcı sonuçlar vermemesi için, hesaplanan RMS değerlerinden, dağılıma aykırı sonuçlar veren RMS değerlerine sahip istasyonların arşivden alınan zaman serileri, çalışma kapsamındaki gözlem zamanlarına denk gelen aralıklardaki anten değişim bilgileri, arşivdeki ECEF hız değerleri ile PPP sonuçlarından elde edilen koordinatlarla hesaplanan ECEF hız değerlerinin karşılaştırması incelenmiştir. Bu süreç için PPP ile elde edilen ve belirli bir kesintisiz zaman aralığına sahip ECEF koordinat değerleriyle hız kestirimi yapılmıştır. Her gözlemin her 3 koordinat bileşeni için de basit lineer hız fonksiyonu öngörülmüştür.

$$(\mathrm{XYZ_i})_t = (\mathrm{XYZ_i})_{t_o} + \mathrm{V_{x,y,z}}(t - t_o) \tag{3.14}$$

''i'' herhangi bir gözlem epoğunu, temsil etmek üzere; (3.14)'te gösterildiği şekilde parametre kestirimi yapılmıştır. Kestirim için 24 saatlik gözlemlerin sonuçları kullanılmıştır. Her istasyonun her bir koordinat bileşeni için kestirimden elde edilen ''V'' parametresi hız değeri olarak belirlenmiştir. İnceleme sonucunda 37 adet istasyon veri setinden çıkarılarak, 193 adet istasyona ilişkin RMS değerleriyle, genel RMS değerlerinin hesaplanmasına karar verilmiştir. Çıkarılmasına karar verilen istasyonlardan ''ELIZ, KAZA, KGNI'' istasyonlarının, örnek teşkil etmek üzere; 24 saatlik GMF ile çözülmüş toposentrik koordinat sisteminde çözülmüş 3 ayrı koordinat bileşeninin RMS değerleri, arşivdeki yıllık hız değerleri ve kestirilen yıllık hız değerleri Tablo 3.3, Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.3 ELIZ istasyonunun RMS ve hız değerleri

İstasyon Adı: ELIZ		
24 Saatlik GMF ile Çözülmüş RMS Değerleri (n-e-u, mm)		
2.271	4.841	109.218
Arşivdeki Hız Değerleri (mm/yıl)		
$\boldsymbol{Vx}$	$\boldsymbol{Vy}$	$\boldsymbol{Vz}$
-8.975	-1.078	12.28
Kestirilen Hız Değerleri (mm/yıl)		
$\boldsymbol{Vx}$	$\boldsymbol{Vy}$	$\boldsymbol{Vz}$
-111.8533	-141.4741	198.3783

Tablo 3.4 KAZA istasyonunun RMS ve hız değerleri

İstasyon Adı: KAZA		
24 Saatlik GMF ile Çözülmüş RMS Değerleri (n-e-u, mm)		
6.222	2.972	7.872
Arşivdeki Hız Değerleri (mm/yıl)		
$\boldsymbol{Vx}$	$\boldsymbol{Vy}$	$\boldsymbol{Vz}$
27.408	2.046	5.941
Kestirilen Hız Değerleri (mm/yıl)		
$\boldsymbol{Vx}$	$\boldsymbol{Vy}$	$\boldsymbol{Vz}$
-33.2712	0.8174	1.2849

Tablo 3.5 KGNI istasyonunun RMS ve hız değerleri

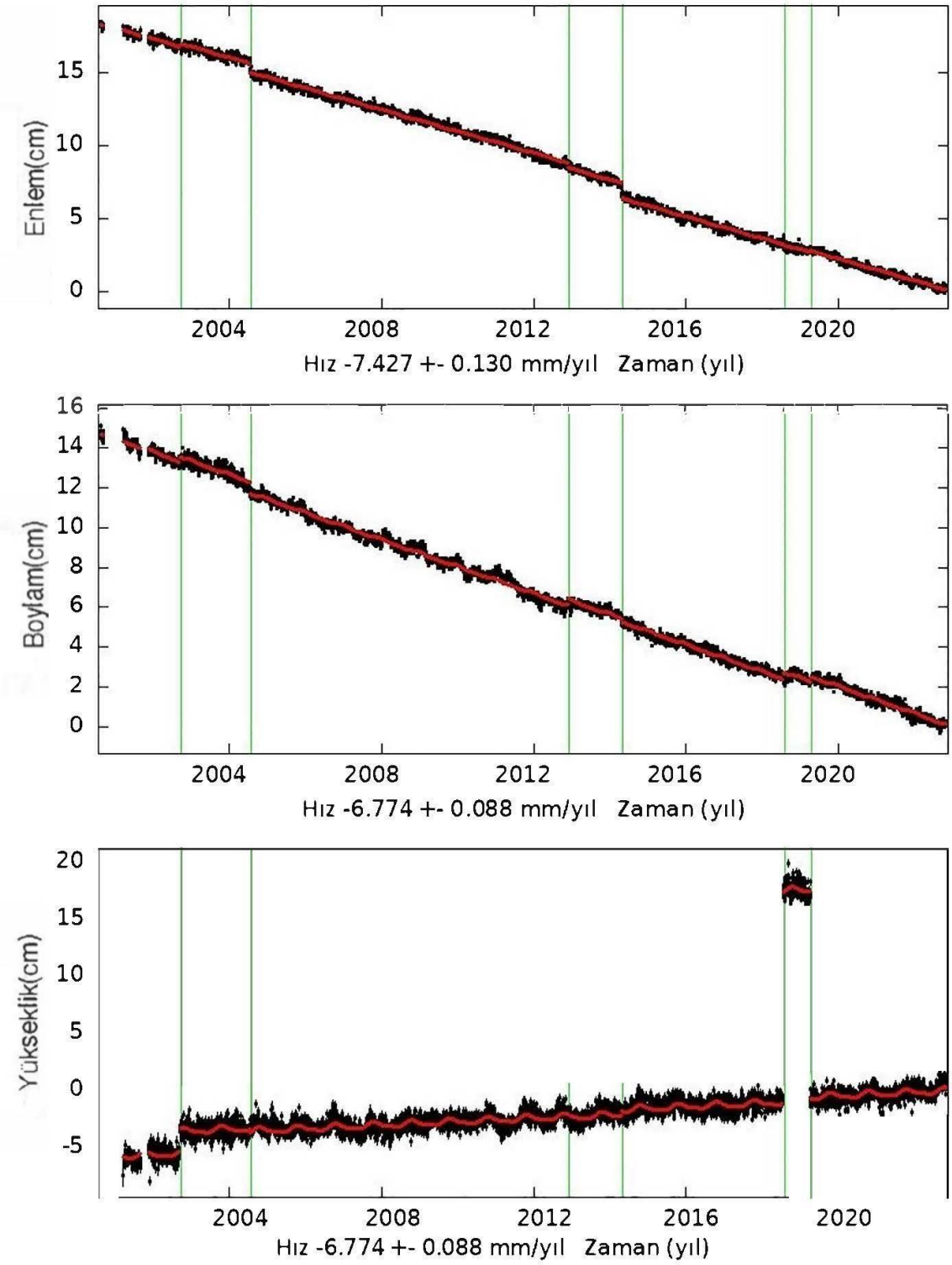
İstasyon Adı: KGNI		
24 Saatlik GMF ile Çözülmüş RMS Değerleri (n-e-u, mm)		
2.568	27.205	25.674
Arşivdeki Hız Değerleri (mm/yıl)		
$\boldsymbol{Vx}$	$\boldsymbol{Vy}$	$\boldsymbol{Vz}$
-3.030	2.852	-2.857
Kestirilen Hız Değerleri (mm/yıl)		
$\boldsymbol{Vx}$	$\boldsymbol{Vy}$	$\boldsymbol{Vz}$
-14.5183	-5.5530	-7.0528

ELIZ istasyonu; özellikle yukarı bileşeninin RMS değeri çok büyük ve kestirilen hız değerleri ile arşivdeki hız değerleri arasındaki fark fazla olduğu için incelenmiştir. İnceleme sonucunda; istasyon anteninin 2018 yılının Mart ayında değiştiği öğrenilmiş ve bu değişimden kaynaklı farkın da zaman serisine yansıtıldığı görülmüştür. Sırasıyla enlem, boylam ve elipsoidal yükseklik bileşenlerinin JPL arşivine işlenmiş zaman serileri Şekil 3.2'deki gibidir. Bu sebeplerle genel RMS hesabından çıkarılmıştır.

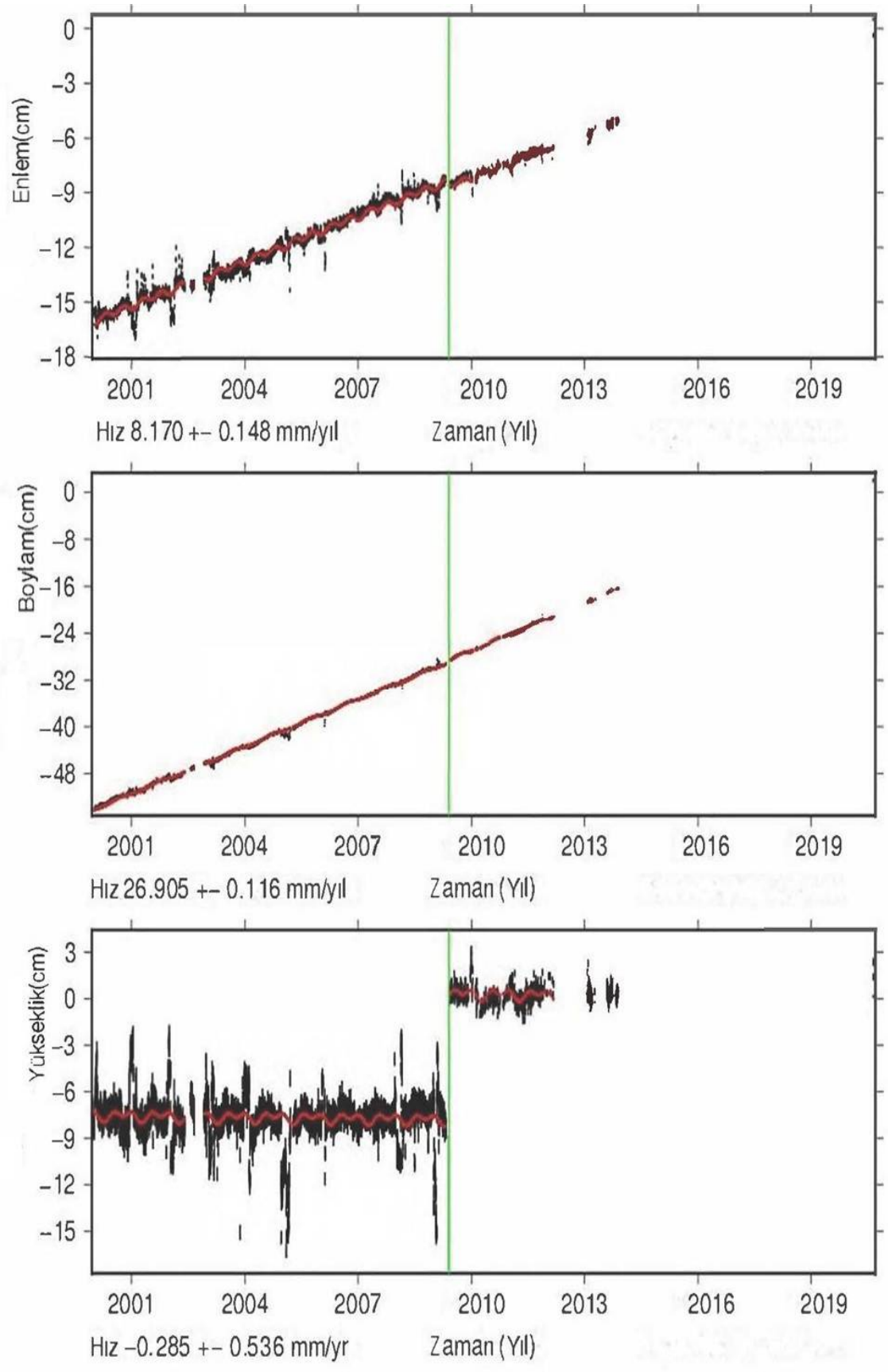
KAZA istasyonu; X bileşenindeki kestirilen hızı ve arşivdeki hızı arasındaki yön ve büyüklük farkından dolayı incelenmiştir. Arşivdeki zaman serisine 2014 yılından sonra veri işlenmediği görülmüştür. Sırasıyla enlem, boylam ve elipsoidal yükseklik bileşenlerinin JPL arşivine işlenmiş zaman serileri Şekil 3.3'teki gibidir. Bu sebeple genel RMS hesabından çıkarılmıştır.

KGNI istasyonu; kuzey ve yukarı bileşenlerinin RMS değerleri büyük olduğu için incelenmiştir. 11 Mart 2011 tarihli 9.1 Mw'lik Tohoku depreminin post-sismik etkisinin devam ettiği görülmüştür. Ayrıca istasyon Koganei bölgesindeki Key Stone Project (KSP) kapsamında kullanılan tektonik hareket izleme amaçlı bir istasyondur. KGNI istasyonundan; kullanım amacı nedeniyle kısa periyotlarda sağlıklı bir hız verisi elde

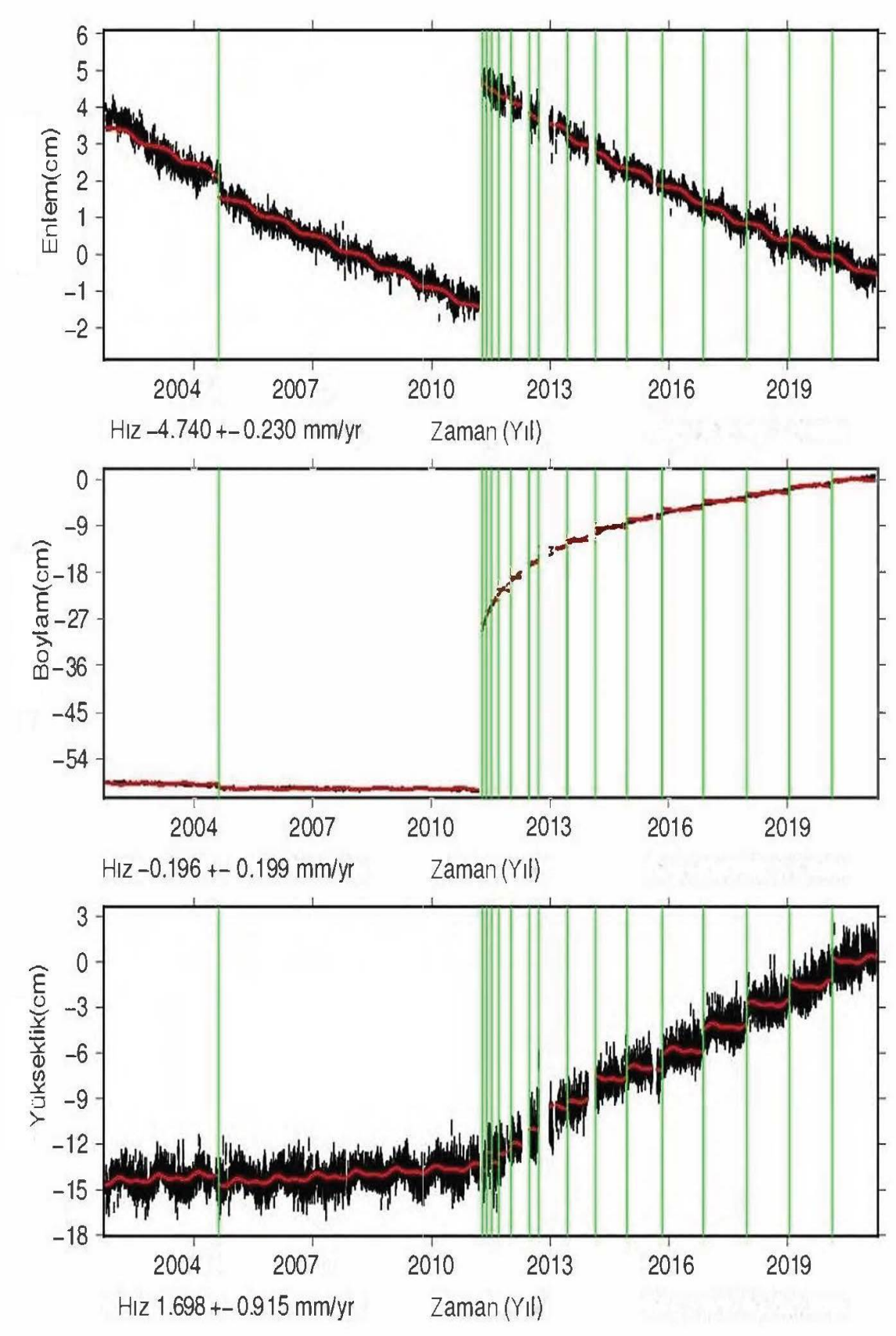
etmek mümkün olamamaktadır. Sırasıyla enlem, boylam ve elipsoidal yükseklik bileşenlerinin JPL arşivine işlenmiş zaman serileri Şekil 3.4' teki gibidir. Bu sebeplerle genel RMS hesabından çıkarılmıştır.



Şekil 3.2 ELIZ istasyonunun JPL arşivindeki zaman serileri



Şekil 3.3 KAZA istasyonunun JPL arşivindeki zaman serileri



Şekil 3.4 KGNI istasyonunun JPL arşivindeki zaman serileri

Örnek verilen noktaların çıkarılma sebepleri, çıkarılan diğer noktalara emsal teşkil etmektedir. Yani geriye kalan 34 istasyonun da veri setinden çıkarılma sebepleri ‘’ELIZ, KGNI ve KAZA’’ istasyonlarının çıkarılma sebepleri ile benzerdir.

Bu istasyonların hız verisinin sağlıklı olup olmadığı tartışmalıdır. Söz konusu sebeplerle; farklı iz düşüm fonksiyonlarıyla elde edilen, farklı gözlem sürelerine ait genel RMS değerleri; söz konusu 37 istasyonun verileri dahil edilmeyerek, 193 adet istasyonun verileriyle hesaplanmıştır. Çıkarılan istasyonlarla birlikte genel RMS üzerindeki kaba hatalardan kaçınılması amaçlanmıştır. Fakat buna rağmen veri setinin kaba hata içermeye devam edebileceği göz önüne alınmıştır. Bu sebeple de bir robust kestirici olan medyan yöntemi, genel RMS hesaplanmamış veri setine uygulanmıştır. RMS hesabında da kullanılan ‘’$\bar{n}_{i,j,k,l}$, $\bar{e}_{i,j,k,l}$, $\bar{u}_{i,j,k,l}$’’ düzeltme değerlerini, ‘’$med_{i,j,k}$’’ düzeltme değerlerinin büyükten küçüğe sıralandıktan sonraki ortanca değerini, ‘’s’’ herhangi bir veri setindeki veri sayısını belirtmektedir ve düzeltme vektörü (3.15)’te verildiği gibi belirlenmiştir.

$$\underline{d} = | \underline{\bar{n}} - \underline{med} | \tag{3.15}$$

Düzeltme vektörü kullanılarak hesaplanan ‘’$mad_{n_{i,j,k,l}}$, $mad_{e_{i,j,k,l}}$, $mad_{u_{i,j,k,l}}$’’ değerlerinin 3 katı sınır değer olarak belirlenmiştir. Bu değerler (3.16), (3.17) ve (3.18) eşitliklerinde belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$mad_{n_{i,j,k,l}} \begin{cases} 1.2533 \text{ x } \frac{1}{s} \text{ x } \sum_{l=1}^{s} | \bar{n}_{i,j,k,l} - med_{i,j,k}| \text{ ,} & median(\underline{d}) = 0 \\ 1.4826 \text{ x median} (\underline{d}), & median(\underline{d}) \neq 0 \end{cases} \tag{3.16}$$

$$mad_{e_{i,j,k,l}} \begin{cases} 1.2533 \text{ x } \frac{1}{s} \text{ x } \sum_{l=1}^{s} | \bar{e}_{i,j,k,l} - med_{i,j,k}| \text{ ,} & median(\underline{d}) = 0 \\ 1.4826 \text{ x median} (\underline{d}), & median(\underline{d}) \neq 0 \end{cases} \tag{3.17}$$

$$mad_{u_{i,j,k,l}} \begin{cases} 1.2533 \text{ x } \frac{1}{s} \text{ x } \sum_{l=1}^{s} | \bar{u}_{i,j,k,l} - med_{i,j,k}| \text{ ,} & median(\underline{d}) = 0 \\ 1.4826 \text{ x median} (\underline{d}), & median(\underline{d}) \neq 0 \end{cases} \tag{3.18}$$

Veri setindeki her bir değer, ilgili sınır değerin 3 katından büyük ise; kaba hatalı ölçü olarak belirlenip, veri setinden çıkarılmıştır. Çıkarılan verilerin ilgili veri setindeki ölçü sayısına oranı ‘’Kaba Hata Oranı (KHO)’’ olarak kaydedilmiştir. KHO değerlerinin; ‘’%0.00 ila %36.82’’ aralığında seyrettiği görülmüştür.

193 istasyonun, her gözlem süresi ve her iz düşüm fonksiyonuyla elde edilmiş toposentrik koordinat değerlerine ilişkin RMS değerleri ‘’$\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{n_{i,j,k}}}$, $\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{e_{i,j,k}}}$, $\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{u_{i,j,k}}}$’’ yeniden hesaplanmıştır.

Medyan sonrası hesaplanan RMS değerleriyle, her iz düşüm fonksiyonunun farklı gözlem sürelerindeki genel RMS değerleri hesaplanmıştır. ‘’i’’ istasyonu, ‘’j’’ gözlem süresini, ‘’k’’ iz düşüm fonksiyonunu ‘’$\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{n_{i,j,k}}}$, $\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{e_{i,j,k}}}$, $\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{u_{i,j,k}}}$’’ medyan sonrası hesaplanmış ‘’i’’ istasyonundaki, ‘’j’’ gözlem süresinde ve ‘’k’’ iz düşüm fonksiyonuyla çözülmüş verilerle hesaplanan RMS değerlerini, ‘’s’’ bu RMS değerlerini hesaplarken kullanılan veri sayısını, ‘’t’’ herhangi bir istasyonun sadece aynı gözlem süresi ve aynı iz düşüm fonksiyonuyla çözülmüş tüm verilerinin toplam sayısını belirtmek üzere genel RMS değerleri; (3.19), (3.20) ve (3.21) eşitliklerinde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{n_{j,k}}} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{193} \overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{n_{i,j,k}}}{}^{2}\, \mathrm{s_{i,j,k}}}{\mathrm{t}}} \tag{3.19}$$

$$\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{e_{j,k}}} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{193} \overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{e_{i,j,k}}}{}^{2}\, \mathrm{s_{i,j,k}}}{\mathrm{t}}} \tag{3.20}$$

$$\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{u_{j,k}}} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{193} \overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{u_{i,j,k}}}{}^{2}\, \mathrm{s_{i,j,k}}}{\mathrm{t}}} \tag{3.21}$$

Genel RMS değerleri, her bir iz düşüm fonksiyonunun her gözlem süresindeki doğruluk performansını ifade etmektedir. Bu değerler, iz düşüm fonksiyonlarının hangi gözlem süresinde ne kadar doğruluk seviyesinde performans göstereceğini yorumlamak için kullanılmıştır. ‘’$\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{n_{j,k}}}$, $\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{e_{j,k}}}$, $\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{u_{j,k}}}$’’ genel RMS değerleri Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de verilmiştir. İlgili tablolar: NMF, VMF1, GMF ve GPT2 iz düşüm fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiş tüm istasyonları kapsayan PPP çözümlerinin; 2, 3, 4, 6, 8, 12 ve 24 saatlik gözlem sürelerindeki mm mertebesinde olan genel RMS değerlerini göstermektedir. Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’deki altı çizili, koyu ve italik olarak belirtilmiş değerler ilgili gözlem süresi ve koordinat bileşeni için en küçük RMS değerini ifade etmektedir.

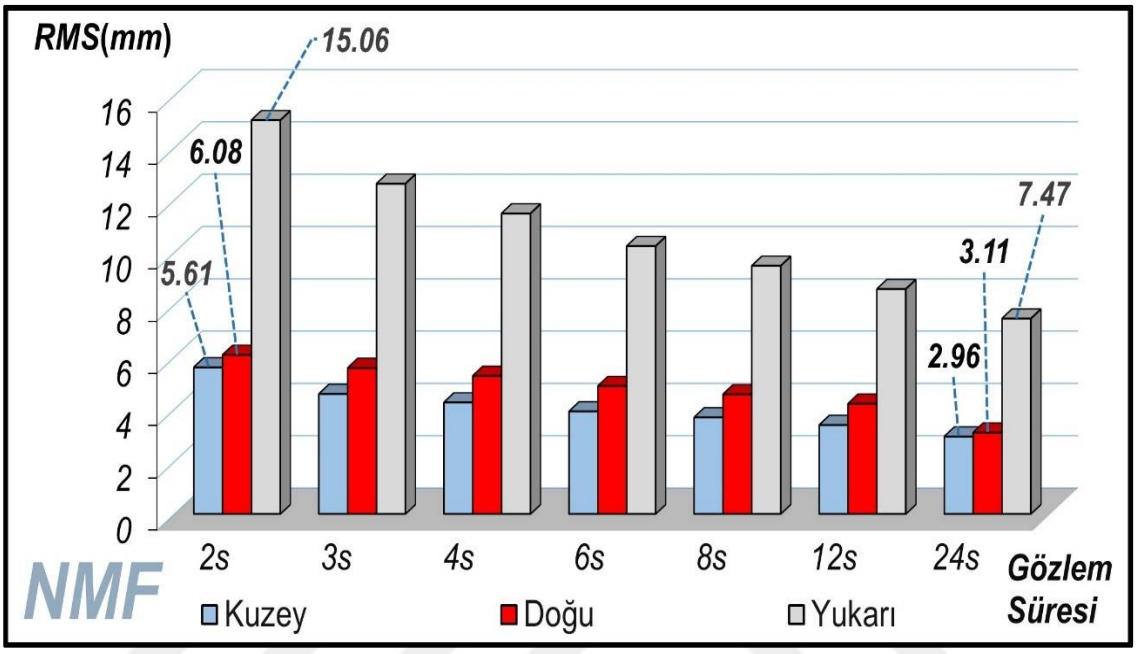
Tablo 3.6 NMF ve VMF1 ile yapılan çözümlerin genel RMS değerleri

Gözlem Süresi	**NMF** (mm)			**VMF1** (mm)		
	RMS_n^{Ovr}	RMS_e^{Ovr}	RMS_u^{Ovr}	RMS_n^{Ovr}	RMS_e^{Ovr}	RMS_u^{Ovr}
2 Saatlik	5.606	6.082	15.055	***5.585***	***6.079***	***14.691***
3 Saatlik	4.587	***5.581***	12.626	4.588	5.583	***12.188***
4 Saatlik	4.266	5.280	11.491	***4.264***	***5.279***	***11.024***
6 Saatlik	3.921	***4.890***	10.240	3.920	***4.890***	***9.715***
8 Saatlik	3.693	4.575	9.488	***3.690***	4.574	***8.922***
12 Saatlik	3.402	4.217	8.600	***3.398***	4.220	***7.985***
24 Saatlik	***2.962***	3.111	***7.470***	2.967	***3.109***	***6.748***

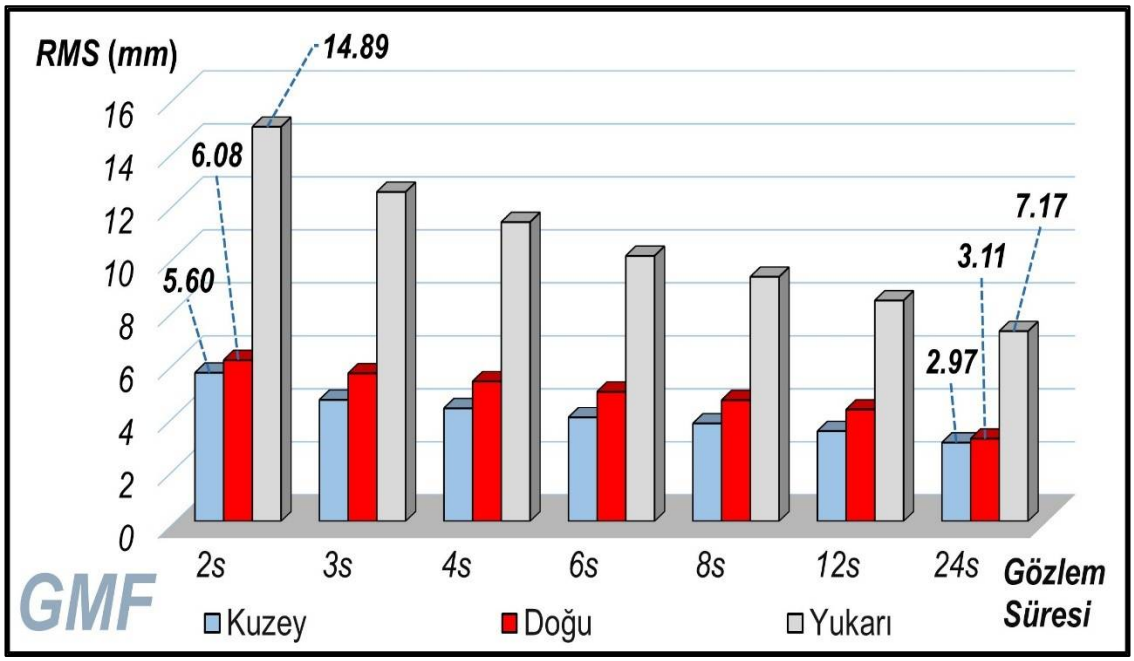
Tablo 3.7 GMF ve GPT2 ile yapılan çözümlerin genel RMS değerleri

Gözlem Süresi	**GMF** (mm)			**GPT2** (mm)		
	RMS_n^{Ovr}	RMS_e^{Ovr}	RMS_u^{Ovr}	RMS_n^{Ovr}	RMS_e^{Ovr}	RMS_u^{Ovr}
2 Saatlik	5.605	6.083	14.888	5.609	6.085	14.865
3 Saatlik	***4.584***	5.583	***12.430***	4.586	5.584	12.387
4 Saatlik	4.266	5.280	11.292	4.265	***5.279***	11.240
6 Saatlik	3.920	4.891	10.019	***3.919***	4.891	9.954
8 Saatlik	3.691	***4.571***	9.224	3.691	4.574	9.168
12 Saatlik	3.401	***4.216***	8.331	3.402	4.217	8.254
24 Saatlik	2.968	3.114	7.172	2.964	3.113	7.078

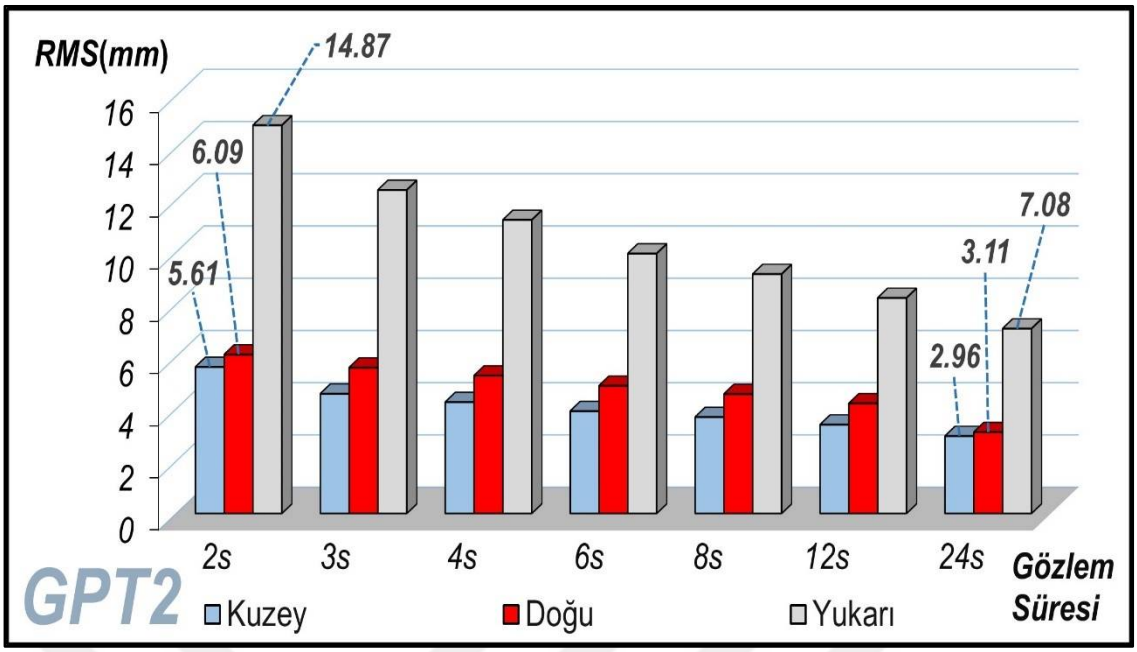
Beklenildiği gibi farklı iz düşüm fonksiyonlarıyla farklı doğruluklar elde edilmiştir. Fakat sonuçların mm mertebesinde birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Yatay bileşenlerde her gözlem süresi için iz düşüm fonksiyonlarının performansının neredeyse aynı seviyede olduğu analiz edilmiştir. Tablo 3.6 ve Tablo 3.7'de ifade edilen değerler ayrıca Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



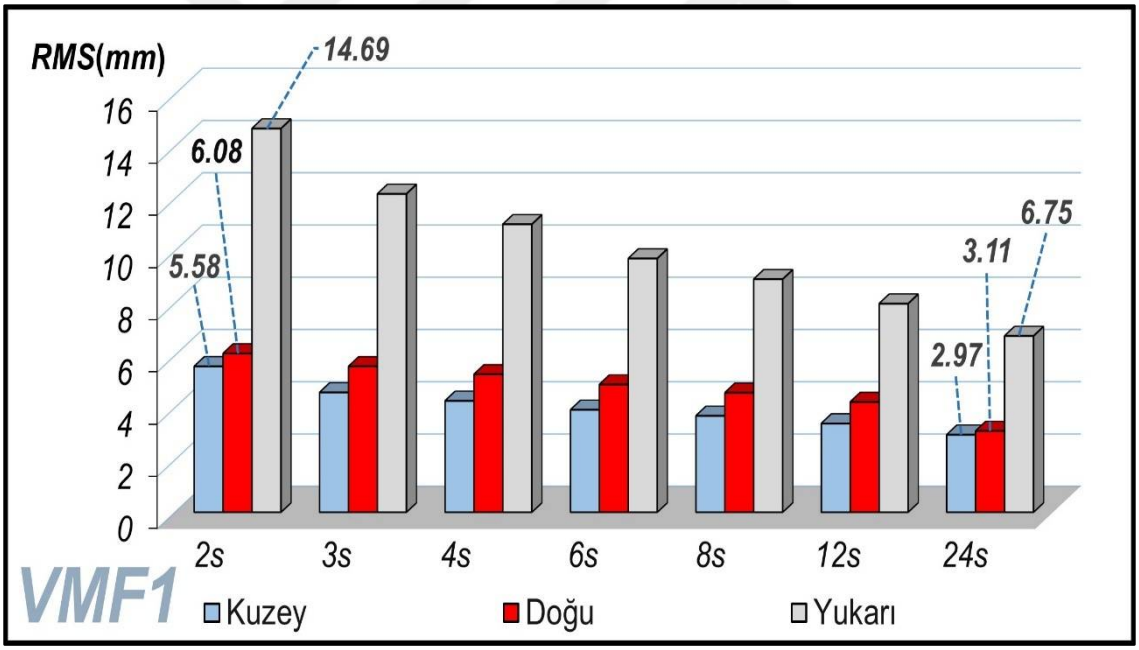
Şekil 3.5 NMF çözümlerinin genel RMS değerlerinin karşılaştırması



Şekil 3.6 GMF çözümlerinin genel RMS değerlerinin karşılaştırması



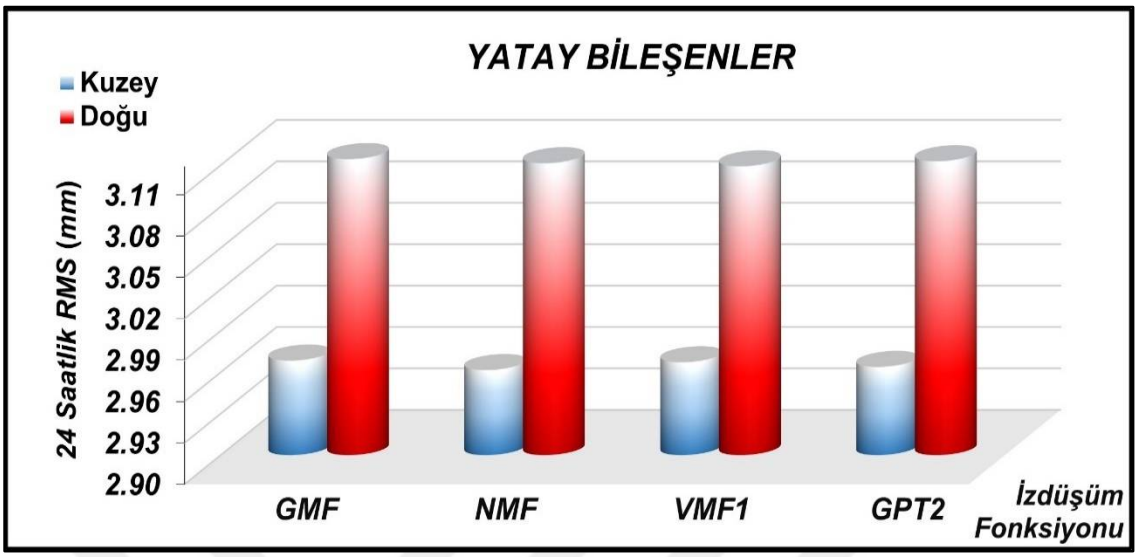
Şekil 3.7 GPT2 çözümlerinin genel RMS değerlerinin karşılaştırması



Şekil 3.8 VMF1 çözümlerinin genel RMS değerlerinin karşılaştırması

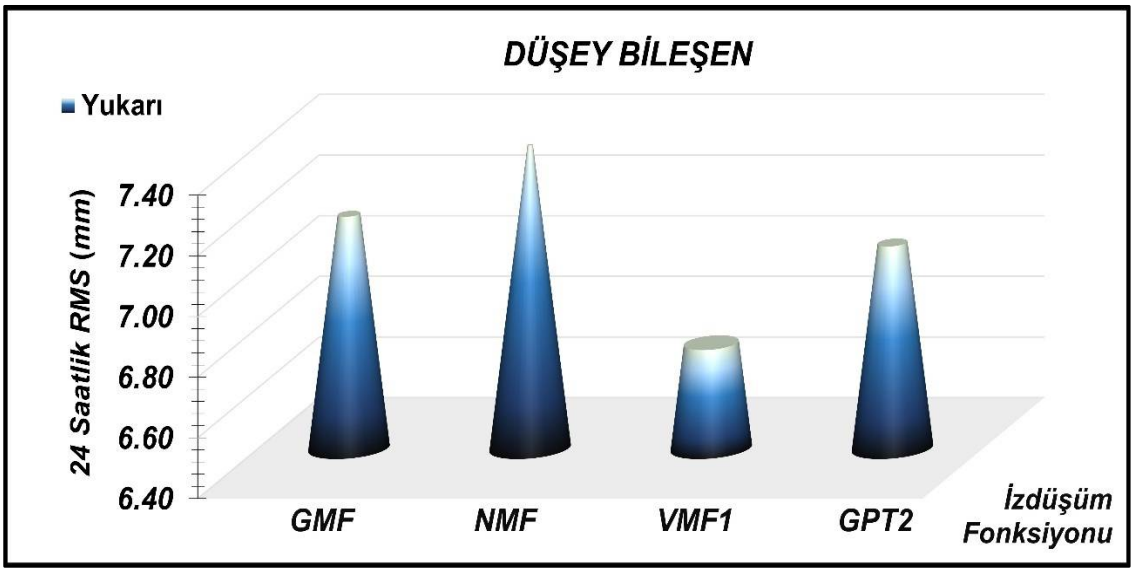
Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de bu durum grafiklerle açıklanmıştır. Buradan hareketle GPS ile gözlem yapılacak ve PPP çözümüne tabi tutulacak söz konusu 193 istasyonun çözümlerinde; troposferik gecikmeyi modellemek için kullanılacak iz düşüm

fonksiyonu seçiminin, yatay konum doğruluğunu mm mertebesinde anlamlı derecede etkilemeyeceği sonucuna varılmıştır. Bu durum Şekil 3.9'da grafik ile gösterilmiştir.



Şekil 3.9 24 Saatlik gözlemler kullanılan ve farklı iz düşüm fonksiyonlarıyla yapılan çözümlerin yatay bileşenlerdeki RMS değerlerinin karşılaştırması

Düşey bileşende ise farklar yatay bileşendekilere göre daha fazladır. Fakat yine mm mertebesinde farklardan söz edilebilmektedir. VMF1'in çözüm performansı bu noktada diğer iz düşüm fonksiyonlarına göre daha iyi, NMF'nin çözüm performansı ise daha kötüdür. Bu durum Şekil 3.10'da grafik ile gösterilmiştir.



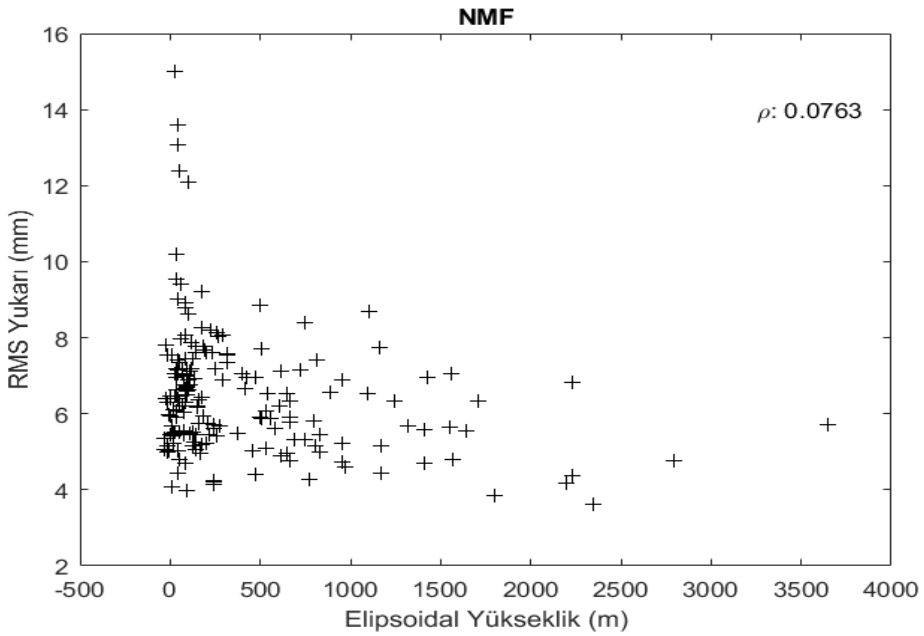
Şekil 3.10 24 Saatlik gözlemler kullanılan ve farklı iz düşüm fonksiyonlarıyla yapılan çözümlerin düşey bileşendeki RMS değerlerinin karşılaştırması

3.3.2 İz Düşüm Fonksiyonlarının PPP Çözümlerindeki Performansı ve İstasyonun Elipsoidal Yüksekliği Arasındaki İlişki

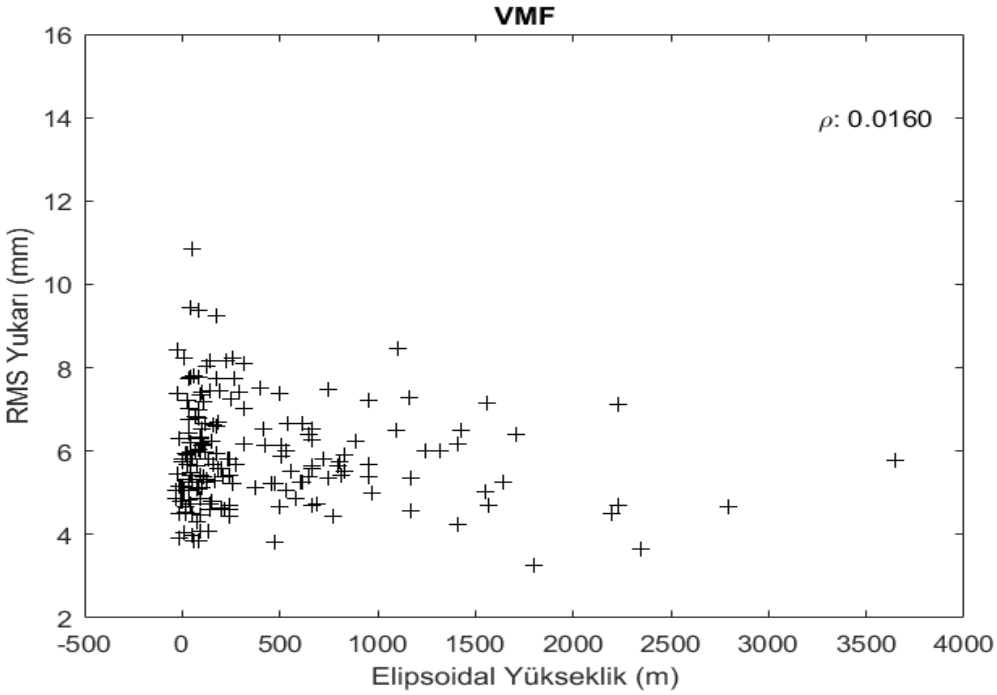
Gözlem süresinden kaynaklı olarak 2 saatlik RMS değerlerinin, beklenen şekilde daha uzun gözlem sürelerindeki RMS değerlerine kıyasla daha büyük olduğu görülmüştür. Bu sebeple her istasyonun; JPL arşivinden alınan elipsoidal yükseklik değerleri kullanılarak 2 saatlik RMS değerlerinin değişimi incelenmiştir. Karşılaştırma sonucu 4 iz düşüm fonksiyonu için de; 2 saatlik çözümlerin düşey bileşendeki RMS değerlerinin, elipsoidal yüksekliklerle arasındaki korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Yorumlar bu korelasyon katsayıları üzerinden yapılmıştır. Her iz düşüm fonksiyonuyla yapılan 2 saatlik çözümlerin RMS değerleriyle, arşivdeki 193 noktanın elipsoidal yükseklikleri arasında korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Tablo 3.8'de bu katsayılar verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te elipsoidal yükseklik ile RMS değerleri arasındaki ilişki grafiklerle gösterilmiştir.

Tablo 3.8 İz düşüm fonksiyonlarının yukarı bileşenin çözüm performansına etkisi ile elipsoidal yükseklikler arasındaki korelasyon değerleri

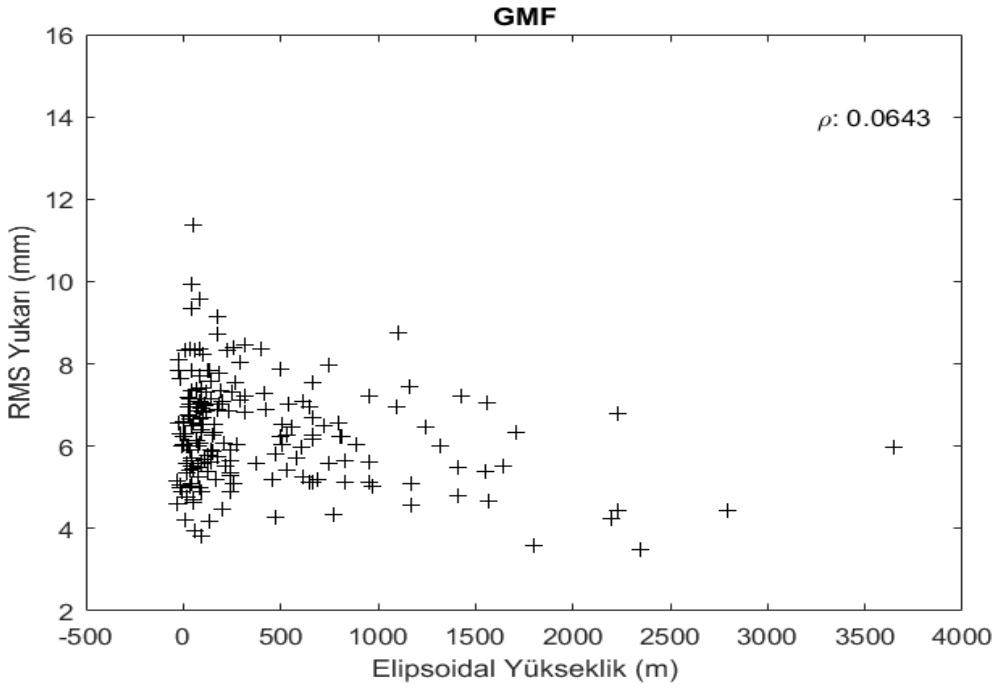
ρ_{NMF}	ρ_{VMF1}	ρ_{GMF}	ρ_{GPT2}
0.0763	0.0160	0.0643	0.0441



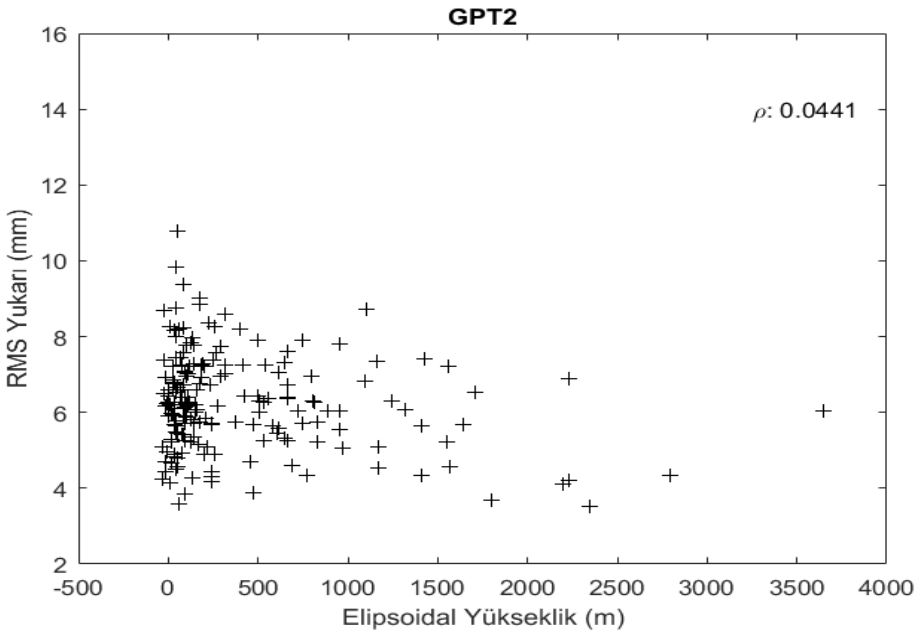
Şekil 3.11 NMF ile yapılan 2 saatlik çözümlerin düşey bileşen RMS değeri ile istasyonların elipsoidal yükseklikleri arasındaki korelasyon



Şekil 3.12 VMF1 ile yapılan 2 saatlik çözümlerin düşey bileşen RMS değeri istasyonların elipsoidal yükseklikleri arasındaki korelasyon



Şekil 3.13 GMF ile yapılan 2 saatlik çözümlerin düşey bileşen RMS değeri ile istasyonların elipsoidal yükseklikleri arasındaki korelasyon



Şekil 3.14 GPT2 ile yapılan 2 saatlik çözümlerin düşey bileşen RMS değeri ile istasyonların elipsoidal yükseklikleri arasındaki korelasyon

Gözlem yapılan istasyonun elipsoidal yüksekliği ile troposferik gecikmeyi modellemek için kullanılan iz düşüm fonksiyonlarının PPP çözümlerinde düşey bileşende verdiği doğruluk arasında yüksek bir korelasyona rastlanamamıştır. En çok ilişkiye sahip NMF çözümleri olmuştur. VMF1 ise en düşük korelasyona sahiptir.

3.3.3 İz Düşüm Fonksiyonlarının PPP Çözümlerindeki Performansı ve İstasyonun Enlem Değeri Arasındaki İlişki

İz düşüm fonksiyonlarının geliştirilme aşamalarında, önceki iz düşüm fonksiyonlarından etkilendiği veya matematiksel modellerinin bir kısmının kullanıldığı bilinmektedir. İz düşüm fonksiyonlarında doğrudan girdi parametresi olarak kullanılmasa da, parametrelerinin belirlenmesinde gözlem yapılan noktanın enleminin kullanıldığı, yani troposferik gecikmenin, istasyonun bulunduğu enlem boyunca hesaplandığı görülmüştür.

Enlem ve iz düşüm fonksiyonları arasındaki ortaya konulan ilişkilerden alınan motivasyon ile çalışma kapsamındaki farklı iz düşüm fonksiyonlarıyla PPP çözümüne ulaşmış istasyonların RMS değerlerini kullanarak; enlem ve iz düşüm fonksiyonlarının PPP'ye etki eden konum doğrulukları arasında bir ilişki kurulması amaçlanmıştır. Enlem ve iz düşüm fonksiyonları arasındaki ilişkinin kurulabilmesi için ''a, b, c, d'' fonksiyonun parametre kestirimine tabi tutulacak sabitleri için ''φ'' istasyonun enlemini, ''T'' gözlem

süresini ifade etmek üzere; (3.22)'de belirtildiği şekilde doğruluk fonksiyonu kullanılmıştır [53], [54]. Analizlerde enlem derece ve gözlem süresi saat birimindedir.

$$f(\varphi, T) = RMS = \sqrt{\frac{a}{T} + \frac{b\varphi^2}{T} + c + d\varphi^2} \tag{3.22}$$

Herhangi bir enlem değeri ve gözlem süresini girdi olarak kullanan bu doğruluk fonksiyonu ile farklı enlemlerde ve farklı gözlem süresi ile PPP çözümü yapıldığında; iz düşüm fonksiyonlarının göstereceği doğruluk parametreleri ''$\overline{RMS}_{n_{\varphi,j,k}}$, $\overline{RMS}_{e_{\varphi,j,k}}$, $\overline{RMS}_{u_{\varphi,j,k}}$'' hesaplanmıştır.

Öncelikle fonksiyonun parametrelerini, çalışmanın verileriyle ilişkilendirerek kestirebilmek amaçlanmıştır. Kestirilen parametreler ile her iz düşüm fonksiyonunun her koordinat bileşeni için ayrı bir doğruluk fonksiyonu belirlenmiştir. Parametre kestirim en küçük kareler yöntemi ile yapılmıştır.

Kestirilen parametreler, parametre testine tabi tutulmuştur. Güven değerinin hesaplanmasında ''t dağılımı (Student Distribution (Studentleştirilmiş Dağılımı))'' kullanılmıştır ve güven aralığı %95 olarak belirlenmiştir. ''T'' karşılaştırma değeri, ''α_0'' güven aralığı ''f'' serbestlik derecesi olmak üzere; T karşılaştırma değerinin t istatistik test değerinden büyük çıktığı durumlarda ilgili parametre anlamlı olarak kabul edilmiştir. İstatistiki açıdan anlamsız çıkan parametreler, en küçük karelerle uygulanan parametre kestirimi probleminden çıkarılarak yeniden kestirim yapılmıştır. Tüm parametrelerin anlamlı çıktığı durumda fonksiyonun son hali oluşturulmuştur. Dört farklı iz düşüm fonksiyonu için de analizler gerçekleştirilmiştir.

Doğruluk fonksiyonlarının uygun şekilde oluşturulmasına imkan vermeyen 6 istasyon veri seti çözümlerden çıkarılmıştır. Kalan 187 istasyon ile işlemler yeniden yapılmıştır. Parametre testinin sonuçları Tablo 3.9'da gösterilmiştir. Anlamlı olan parametrelerle doğruluk fonksiyonları belirlenmiştir.

Doğruluk fonksiyonları: (3.23), (3.24), (3.25), (3.26), (3.27), (3.28), (3.29), (3.30), (3.31), (3.32), (3.33) ve (3.34) eşitliklerindeki gibi son hallerini almıştır. Fonksiyon çıktıları mm birimindedir.

Tablo 3.9 Doğruluk fonksiyonunun parametre testlerinin sonuçları

İz düşüm Fonksiyonu	Koordinat Bileşeni	Parametrenin Anlamlılığı			
		a_{neu_k}	b_{neu_k}	c_{neu_k}	d_{neu_k}
GMF	**Kuzey** (n_{GMF})	Anlamlı	**Anlamsız**	Anlamlı	Anlamlı
	Doğu (e_{GMF})	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı
	Yukarı (u_{GMF})	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı
NMF	**Kuzey** (n_{NMF})	Anlamlı	**Anlamsız**	Anlamlı	Anlamlı
	Doğu (e_{NMF})	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı
	Yukarı (u_{NMF})	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı
VMF1	**Kuzey** (n_{VMF1})	Anlamlı	**Anlamsız**	Anlamlı	Anlamlı
	Doğu (e_{VMF1})	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı
	Yukarı (u_{VMF1})	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı	**Anlamsız**
GPT2	**Kuzey** (n_{GPT2})	Anlamlı	**Anlamsız**	Anlamlı	Anlamlı
	Doğu (e_{GPT2})	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı
	Yukarı (u_{GPT2})	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı	Anlamlı

$$f(\varphi, T) = RMSn_{NMF} = \sqrt{\frac{51.3557}{T} + 25.2427 - 0.0052 \text{ x } \varphi^2} \tag{3.23}$$

$$f(\varphi, T) = RMSe_{NMF} = \sqrt{\frac{48.3892}{T} - \frac{0.0055 \text{ x } \varphi^2}{T} + 10.2141 - 0.0015 \text{ x } \varphi^2} \tag{3.24}$$

$$f(\varphi, T) = RMSu_{NMF} = \sqrt{\frac{426.9590}{T} - \frac{0.0430 \text{ x } \varphi^2}{T} + 14.8053 + 0.0098 \text{ x } \varphi^2} \tag{3.25}$$

$$f(\varphi, T) = RMSn_{VMF1} = \sqrt{\frac{51.3557}{T} + 25.2758 - 0.0052 \text{ x } \varphi^2} \tag{3.26}$$

$$f(\varphi, T) = RMSe_{VMF1} = \sqrt{\frac{48.4969}{T} - \frac{0.0056 \text{ x } \varphi^2}{T} + 10.2020 - 0.0015 \text{ x } \varphi^2} \tag{3.27}$$

$$f(\varphi, T) = RMSu_{VMF1} = \sqrt{\frac{419.6106}{T} - \frac{0.0397 \text{ x } \varphi^2}{T} + 24.8050} \quad (3.28)$$

$$f(\varphi, T) = RMSn_{GMF} = \sqrt{\frac{51.3401}{T} + 25.2526 - 0.0052 \text{ x } \varphi^2} \quad (3.29)$$

$$f(\varphi, T) = RMSe_{GMF} = \sqrt{\frac{48.4911}{T} - \frac{0.0055 \text{ x } \varphi^2}{T} + 10.2092 - 0.0015 \text{ x } \varphi^2} \quad (3.30)$$

$$f(\varphi, T) = RMSu_{GMF} = \sqrt{\frac{428.8418}{T} - \frac{0.0445 \text{ x } \varphi^2}{T} + 22.5817 + 0.0040 \text{ x } \varphi^2} \quad (3.31)$$

$$f(\varphi, T) = RMSn_{GPT2} = \sqrt{\frac{51.3536}{T} + 25.2434 - 0.0052 \text{ x } \varphi^2} \quad (3.32)$$

$$f(\varphi, T) = RMSe_{GPT2} = \sqrt{\frac{48.5716}{T} - \frac{0.0056 \text{ x } \varphi^2}{T} + 10.2023 - 0.0015 \text{ x } \varphi^2} \quad (3.33)$$

$$f(\varphi, T) = RMSu_{GPT2} = \sqrt{\frac{429.9485}{T} - \frac{0.0449 \text{ x } \varphi^2}{T} + 20.4758 + 0.0046 \text{ x } \varphi^2} \quad (3.34)$$

Oluşturulan doğruluk fonksiyonları ile $\pm 10^0$, $\pm 40^0$, $\pm 70^0$ enlemlerinde, her gözlem süresinde toposentrik koordinat bileşenleri için RMS değerleri hesaplanmıştır. RMS değerleri Tablo 3.10, Tablo 3.11, Tablo 3.12, Tablo 3.13, Tablo 3.14 ve Tablo 3.15'te verilmiştir. Tablolarda altı çizili, koyu ve italik olarak belirtilmiş değerler ilgili gözlem süresi ve koordinat bileşeni için en küçük RMS değerini ifade etmektedir. İz düşüm fonksiyonlarının yatay bileşenlerde her üç enlem değeri için de birbirine yakın sonuçlar gösterdiği görülmüştür. Anlamlı bir fark analiz edilememiştir. Fakat düşey bileşenin RMS değerleri incelendiğinde farkların mm mertebesinde kalmasına rağmen; kutuplara doğru yaklaşıldıkça VMF1'in, ekvatora doğru yaklaşıldıkça da NMF'nin en iyi sonuçlara sahip olduğu analiz edilmiştir. Tam aksi şekilde de kutup bölgelerinde NMF ve ekvatoral bölgelerde de VMF1 en büyük RMS değerlerine sahiptir. Kutup ve ekvatoral bölgeler arasındaki kuşakta ise kutuplara benzer şekilde VMF1'in en düşük, NMF en yüksek RMS değerlerine sahip olduğu fakat değerlerin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Burada farklar mm mertebesinin de altındadır. GMF ve GPT2'nin performansı her enlem değerinde VMF1 ve NMF'nin arasında kalmaktadır. Kutuplara yaklaştıkça GMF'nin

çözüm performansı, ekvatora yaklaştıkça da GPT2'nin performansının biraz daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 3.10 ±70 derece enlem değerleri için VMF1 ve NMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri

70 derece	**RMS~VMF1** (mm)			**RMS~NMF** (mm)		
Gözlem Süresi	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
2 Saat	***5.030***	***3.648***	***11.718***	5.037	3.685	13.084
3 Saat	***4.093***	***3.131***	***9.990***	4.101	3.158	11.623
4 Saat	***3.533***	***2.837***	***9.003***	3.541	2.859	10.819
6 Saat	***2.866***	***2.509***	***7.893***	2.873	2.525	9.951
8 Saat	***2.465***	***2.328***	***7.275***	2.473	2.339	9.487
12 Saat	***1.985***	2.132	***6.600***	1.994	2.138	8.999
24 Saat	***1.343***	1.915	***5.846***	1.355	1.916	8.483

Tablo 3.11 ±70 derece enlem değerleri için GPT2 ve GMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri

70 derece	**RMS~GPT2** (mm)			**RMS~GMF** (mm)		
Gözlem Süresi	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
2 Saat	5.037	3.660	12.157	5.034	3.666	12.142
3 Saat	4.100	3.139	10.621	4.097	3.143	10.597
4 Saat	3.539	2.842	9.763	3.536	2.845	9.732
6 Saat	2.872	2.512	8.822	2.868	2.513	8.783
8 Saat	2.472	2.329	8.312	2.468	2.329	8.268
12 Saat	1.992	2.130	7.768	1.987	***2.129***	7.718
24 Saat	1.353	1.911	7.183	1.346	***1.909***	7.126

Tablo 3.12 ±40 derece enlem değerleri için VMF1 ve NMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri

40 derece	**RMS~VMF1** (mm)			**RMS~NMF** (mm)		
Gözlem Süresi	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
2 Saat	***6.523***	***5.249***	***14.242***	6.525	5.254	14.479
3 Saat	***5.831***	***4.578***	***11.979***	5.833	4.582	12.245
4 Saat	***5.452***	***4.203***	***10.669***	5.453	4.207	10.958
6 Saat	5.046	***3.791***	***9.173***	5.046	3.794	9.499
8 Saat	***4.829***	***3.567***	***8.325***	***4.829***	3.569	8.678
12 Saat	4.603	***3.328***	***7.381***	***4.602***	3.330	7.770
24 Saat	4.365	3.071	***6.296***	4.364	3.072	6.741

Tablo 3.13 ±40 derece enlem değerleri için GPT2 ve GMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri

40 derece	**RMS~GPT2** (mm)			**RMS~GMF** (mm)		
Gözlem Süresi	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
2 Saat	6.525	5.254	14.381	6.525	5.253	14.414
3 Saat	5.832	4.582	12.130	5.832	4.581	12.171
4 Saat	5.453	4.206	10.831	5.453	4.205	10.878
6 Saat	5.046	3.792	9.352	***5.045***	3.792	9.409
8 Saat	***4.829***	3.568	8.517	***4.829***	3.568	8.581
12 Saat	***4.602***	***3.328***	7.591	***4.602***	***3.328***	7.663
24 Saat	***4.363***	***3.070***	***6.535***	***4.363***	***3.070***	6.620

Tablo 3.14 ±10 derece enlem değerleri için VMF1 ve NMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri

10 derece	**RMS~VMF1** (mm)			**RMS~NMF** (mm)		
Gözlem Süresi	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
2 Saat	***7.098***	5.833	15.252	7.099	***5.830***	***15.070***
3 Saat	***6.468***	5.102	12.781	***6.468***	***5.100***	***12.517***
4 Saat	***6.129***	4.694	11.345	***6.129***	***4.693***	***11.021***
6 Saat	5.770	***4.247***	9.699	***5.769***	***4.247***	***9.286***
8 Saat	5.582	***4.005***	8.761	***5.580***	***4.005***	***8.284***
12 Saat	5.387	***3.748***	7.710	***5.385***	***3.748***	***7.142***
24 Saat	5.185	***3.471***	***6.490***	***5.183***	3.472	***5.779***

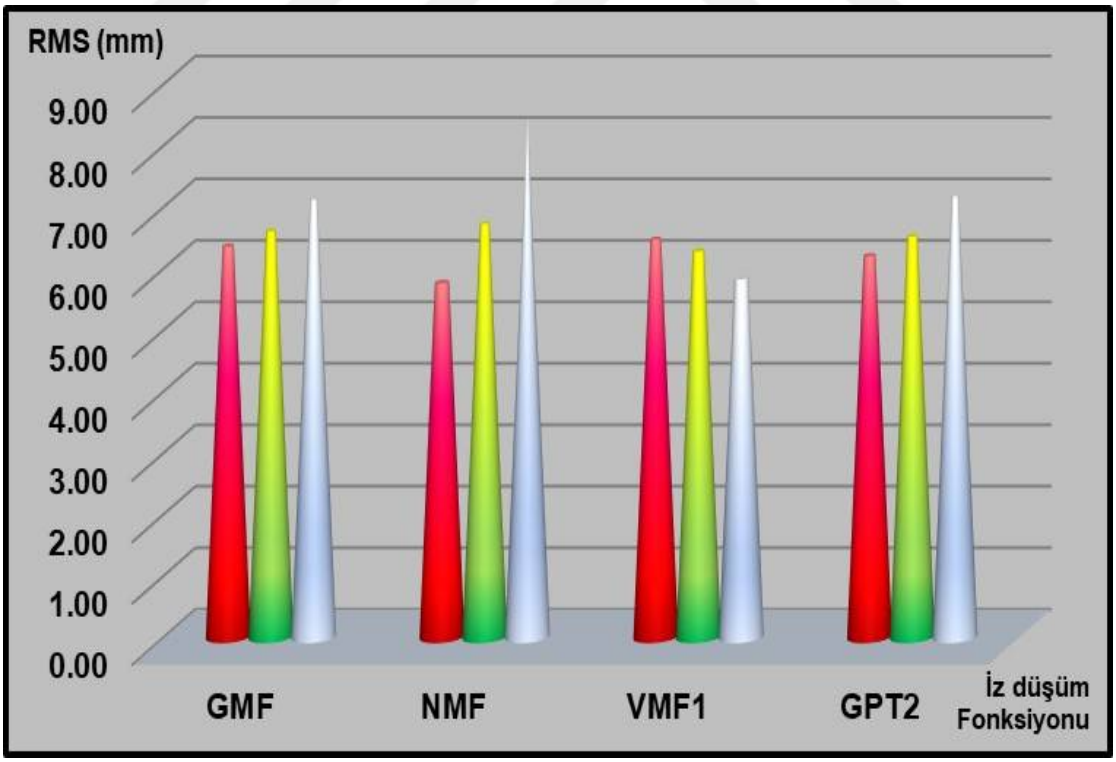
Tablo 3.15 ±10 derece enlem değerleri için GPT2 ve GMF çözümlerinin ayrı bileşenlerdeki RMS değerleri

10 derece	**RMS~GPT2** (mm)			**RMS~GMF** (mm)		
Gözlem Süresi	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
2 Saat	7.099	5.836	15.286	7.099	5.833	15.335
3 Saat	***6.468***	5.104	12.757	6.469	5.103	12.824
4 Saat	***6.129***	4.696	11.283	***6.129***	4.695	11.361
6 Saat	***5.769***	4.249	9.583	5.770	4.248	9.680
8 Saat	***5.580***	4.007	8.609	5.581	4.006	8.719
12 Saat	***5.385***	3.749	7.509	5.386	3.749	7.638
24 Saat	***5.183***	***3.471***	6.218	5.184	3.472	6.377

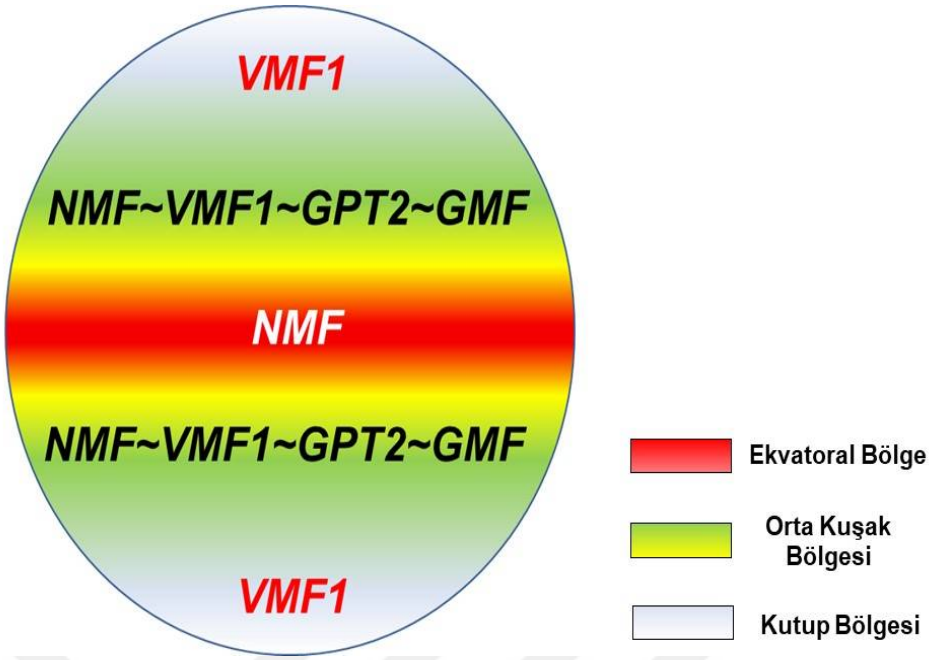
PPP çözümlerinde; iz düşüm fonksiyonlarının düşey bileşen doğruluğuna etkisi ve istasyonun enlemi arasındaki ilişki ele alındığında;

- ±70 derece enlem değerli kutba yakın kuşakta; VMF1 en düşük RMS değerine sahip, NMF en yüksek RMS değerlerine sahip
- ±40 derece enlem değerli aradaki kuşakta; NMF, VMF1, GMF, GPT2 birbirine yakın
- ±10 derece enlem değerli ekvatoral kuşakta; NMF en düşük, VMF1 en yüksek RMS değerlerine sahip iz düşüm fonksiyonları olduğu belirlenmiştir.

Enlem değerlerine bağlı bölgesel temsile dayanarak elde edilen RMS değerleri Şekil 3.15'te gösterildiği üzere grafik haline getirilmiştir. Bölgesel temsil, Şekil 3.16'da şematize edildiği gibi; kırmızı tonları ekvatoral bölgeyi, sarı ve yeşil tonları orta kuşağı, mavi ve beyaz tonları ise kutup bölgesini gösterecek şekildedir. Başka bir ifade ile söz konusu 187 istasyonun PPP çözümlerinde, düşey bileşenin doğruluğu esas ise, troposferik gecikmeyi modelleyecek iz düşüm fonksiyonu olarak; yüksek enlem derecelerinde VMF1, ekvatoral bölgeye yakın düşük enlemlerde ise NMF kullanımı önerilmektedir.



Şekil 3.15 Farklı enlem kuşaklarında, farklı iz düşüm fonksiyonları ile elde edilen yukarı bileşene ilişkin genel RMS değerleri



Şekil 3.16 Farklı enlem kuşaklarında yukarı bileşen için en iyi performans gösteren iz düşüm fonksiyonlarının temsili

3.3.4 İz Düşüm Fonksiyonlarının PPP Çözümlerindeki Performansı ve Gözlemin Yapıldığı Mevsim Arasındaki İlişki

Hava koşulları; sıcaklık, basınç, serbest su buharı miktarı gibi parametreleri etkilemektedir. Troposferik gecikme de bu parametrelerden bağımsız düşünülemediği için, iz düşüm fonksiyonlarının mevsimlere göre gösterdiği performanslar araştırılmıştır. Her mevsimi temsilen; Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarını içeren veri seti kullanılarak, her istasyon için her iz düşüm fonksiyonu kullanılarak çözüme ulaşılmış ve her ay bazında genel RMS değerleri hesaplanmıştır. Sadece 2 saatlik gözlemlerin RMS değerleri ile genel RMS değerleri incelenmiştir. Çünkü 2 saatlik gözlemlerdeki hata miktarları daha fazladır ve bu koşullarda iz düşüm fonksiyonlarının göstereceği performanslar üzerine sonuca ulaşılması hedeflenmiştir. Ayrıca genel RMS değerleri her bileşen için hesaplanmıştır. Fakat yerkürenin her bölgesinde aynı mevsim yaşanmamakta ve hava koşulları değişmektedir. Bu nedenle de; ekvatoral bölgedeki istasyonlar, kuzey yarım küredeki istasyonlar, güney yarım küredeki istasyonlar gruplandırılarak genel RMS değerleri bu gruplara göre farklı hesaplanmıştır. ±10 derece enlem bölgesindeki istasyonlar ekvatoral bölgede, -10 derece enleminden daha alçak enlemlerdeki istasyonlar güney yarım küre bölgesinde ve +10 dereceden yüksek enlemlerdeki istasyonlar kuzey

yarım küre bölgesinde değerlendirilmiştir. ‘’i’’ istasyonu, ‘’j’’ 2 saatlik gözlemleri içeren yılın ayını, ‘’k’’ PPP çözümünde kullanılan iz düşüm fonksiyonunu, ‘’l’’ istasyonun enlemine göre bulunduğu bölgeyi, ‘’$\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{n_{i,j,k,l}}}$, $\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{e_{i,j,k,l}}}$, $\overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{u_{i,j,k,l}}}$’’ medyan sonrası hesaplanmış RMS değerlerini, ‘’s’’ istasyona ilişkin veri setindeki veri sayısını ve ‘’t’’ aynı koşullarda tüm istasyonları içeren veri setindeki veri sayılarının toplamını göstermek üzere genel RMS değerleri her bileşen için; (3.47), (3.48) ve (3.49) eşitlikleriyle hesaplanmıştır. 193 istasyona ilişkin veriler kullanılmıştır.

$$\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{n_{j,k,l}}} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{193} \overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{n_{i,j,k,l}}}{}^{2} \mathrm{s_{i,j,k,l}}}{\mathrm{t}}} \tag{3.47}$$

$$\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{e_{j,k,l}}} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{193} \overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{e_{i,j,k,l}}}{}^{2} \mathrm{s_{i,j,k,l}}}{\mathrm{t}}} \tag{3.48}$$

$$\mathrm{RMS}^{\mathrm{Ovr}}_{\mathrm{u_{j,k,l}}} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{193} \overline{\mathrm{RMS}}_{\mathrm{u_{i,j,k,l}}}{}^{2} \mathrm{s_{i,j,k,l}}}{\mathrm{t}}} \tag{3.49}$$

Değerlerin mm mertebesinde birbirine çok yakın olduğu saptanmıştır. Bölüm 3.3.1 ve 3.3.3’ teki sonuçlara benzer şekilde, genel RMS değerlerinin yukarı bileşende daha büyük olduğu görülmüştür. Ekvatoral bölge için sonuçlar Tablo 3.16 ve Tablo 3.17’de verilmiştir. Tablolarda altı çizili, koyu ve italik olarak belirtilmiş değerler ilgili gözlem süresi ve koordinat bileşeni için en küçük RMS değerini ifade etmektedir.

Tablo 3.16 VMF1 ve NMF’nin ekvatoral bölge için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri

Ekvatoral Bölge	**RMS~VMF1** (mm)			**RMS~NMF** (mm)		
Ay	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
Ocak	***6.246***	7.661	16.616	6.248	7.647	16.872
Nisan	***5.795***	***6.125***	16.191	***5.795***	6.148	16.499
Temmuz	5.860	6.547	16.131	5.879	***6.515***	***16.006***
Ekim	6.442	6.274	17.106	***6.381***	6.327	17.001

Tablo 3.17 GMF ve GPT2'nin ekvatoral bölge için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri

Ekvatoral Bölge	**RMS~GMF** (mm)			**RMS~GPT2** (mm)		
Ay	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
Ocak	6.266	***7.646***	***16.370***	6.297	7.701	16.433
Nisan	5.806	6.135	***16.055***	5.815	6.139	16.097
Temmuz	***5.845***	6.531	16.155	5.866	6.565	16.200
Ekim	6.417	6.293	***16.981***	6.450	***6.262***	17.050

±10 derece enlem değerindeki istasyonları temsil eden ekvatoral bölge için yatay bileşenlerde her iz düşüm fonksiyonunun çözüm performansının neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Düşey bileşende ise Ocak ayında en düşük RMS değerine sahip iz düşüm fonksiyonunun GMF, en yüksek RMS değerine sahip iz düşüm fonksiyonunun ise NMF olduğu analiz edilmiştir. Aynı durum fark daha az olsa da Nisan ayında da gözlemlenmiştir. Temmuz ve Ekim aylarında ise farkın, yatay bileşenlerdeki gibi daha da az olduğu görülmüştür. Fakat Temmuz ayında az bir farkla da olsa NMF'nin, Ekim ayında ise GMF'nin daha daha düşük RMS değerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

-10 derece'den daha alçak enlem değerindeki istasyonları temsil eden güney yarım küre bölgesi için yatay bileşenlerde her iz düşüm fonksiyonunun performansının neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Düşey bileşende ise her iz düşüm fonksiyonunun, Temmuz ayında diğer aylara göre daha düşük RMS değerine sahip olduğu görülmüştür. Ocak ve Ekim aylarında en düşük RMS değerine sahip iz düşüm fonksiyonunun VMF1, en yüksek RMS değerine sahip iz düşüm fonksiyonunun ise NMF olduğu görülmüştür. Nisan ayında NMF en yüksek RMS değerine sahipken, diğer iz düşüm fonksiyonları ise benzer performans göstermiştir. Sonuçlar Tablo 3.18 ve Tablo 3.19'da verilmiştir. Tablolarda altı çizili, koyu ve italik olarak belirtilmiş değerler ilgili gözlem süresi ve koordinat bileşeni için en küçük RMS değerini ifade etmektedir.

Tablo 3.18 VMF1 ve NMF'nin güney yarım küre bölgesi için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri

Güney Yarım Küre	**RMS~VMF1** (mm)			**RMS~NMF** (mm)		
Ay	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
Ocak	***6.046***	6.603	***16.804***	6.069	6.609	17.968
Nisan	5.506	5.605	15.320	5.552	5.620	16.027
Temmuz	5.149	5.665	***13.469***	***5.136***	5.662	13.599
Ekim	4.516	5.041	***13.486***	4.536	5.043	14.202

Tablo 3.19 GMF ve GPT2'nin güney yarım küre bölgesi için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri

Güney Yarım Küre	**RMS~GMF** (mm)			**RMS~GPT2** (mm)		
Ay	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
Ocak	6.057	***6.601***	17.012	6.091	6.610	16.966
Nisan	5.410	5.619	15.394	***5.394***	***5.603***	***15.312***
Temmuz	5.143	5.668	13.624	5.141	***5.658***	13.535
Ekim	4.520	5.035	13.703	***4.515***	***5.031***	13.576

+10 derece' den daha yüksek enlem değerindeki istasyonları temsil eden kuzey yarım küre bölgesi için yatay bileşenlerde her iz düşüm fonksiyonunun performansının neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Düşey bileşende ise her iz düşüm fonksiyonunun Nisan ayında diğer aylara göre daha düşük RMS değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu enlem bölgesi için elde edilen sonuçlara göre; her gözlem yapılan ayda VMF1 en düşük RMS değerine sahiptir. Diğer iz düşüm fonksiyonları ise Temmuz ayı hariç birbirine yakın performansa sahiptir. Temmuz ayında ise GMF biraz daha yüksek RMS değerine sahiptir. Söz konusu sonuçlar, bölüm 3.3.1' deki sonuçlarla örtüşmektedir. Sonuçlar Tablo 3.20 ve Tablo 3.21'de verilmiştir. Tablolarda altı çizili, koyu ve italik olarak belirtilmiş değerler ilgili gözlem süresi ve koordinat bileşeni için en küçük RMS değerini ifade etmektedir.

Tablo 3.20 VMF1 ve NMF'nin kuzey yarım küre bölgesi için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri

Kuzey Yarım Küre	**RMS~VMF1** (mm)			**RMS~NMF** (mm)		
Ay	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
Ocak	***5.204***	***6.214***	***13.727***	5.210	6.233	14.025
Nisan	5.629	***5.639***	***13.609***	5.599	5.684	13.989
Temmuz	***5.903***	6.552	***16.124***	5.960	***6.540***	16.390
Ekim	***5.674***	***5.944***	***14.310***	5.691	5.956	14.444

Tablo 3.21 GMF ve GPT2'nin kuzey yarım küre bölgesi için hesaplanmış farklı aylardaki genel RMS değerleri

Kuzey Yarım Küre	**RMS~GMF** (mm)			**RMS~GPT2** (mm)		
Ay	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**	**Kuzey**	**Doğu**	**Yukarı**
Ocak	5.227	6.232	14.019	5.220	6.229	14.006
Nisan	***5.560***	5.663	13.909	5.671	***5.639***	13.806
Temmuz	5.963	6.573	16.512	6.001	6.581	16.386
Ekim	5.706	5.964	14.552	5.720	5.963	14.550

4
SONUÇ VE ÖNERİLER

PPP yöntemi; tek alıcı ile gözlem sonrası değerlendirme yapılarak hassas konum bilgisi üretmeyi amaçlayan uzay tabanlı bir konumlama yöntemidir. Temel yaklaşım; tek alıcı ile yapılan gözlemlerin doğurduğu dezavantajları, gözlem sonrası değerlendirme aşamasında gidererek en hassas çözüme ulaşmaktır. Bu bağlamda tüm hatalar, gözlem koşullarına göre en optimum şekilde modellenerek çözüme dahil edilir.

Çalışma kapsamında farklı sürelerde ve koşullarda toplanan 294 adet istasyona ilişkin GPS verileri elde edilmiştir. GPS gözlem verileri, GPS sinyalleri üzerinde etkili olan tüm hatalar aynı yöntemler ile modellenerek PPP yöntemi ile değerlendirilmiştir. Troposferik gecikmeyi modellemek içinse iz düşüm fonksiyonları kullanılmıştır. Gözlem süresi, gözlem anı ve gözlem koşulları ayırt edilmeksizin; ‘’NMF, VMF1, GMF, GPT2’’ olmak üzere dört farklı iz düşüm fonksiyonu ile çözümler gerçekleştirilmiştir. 193 adet istasyonun verileriyle doğruluk parametreleri hesaplanabilmiştir. Gözlem süresi değişimleri ile farklı iz düşüm fonksiyonlarının ilişkisi incelendiğinde konum doğruluğu açısından anlamlı farklar gözlemlenememiştir.

Farklı iz düşüm fonksiyonlarının, özellikle uzun süreli 24 saatlik gözlemlerde, PPP çözümlerinin yatay bileşende benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Buna karşın düşey bileşende çözüm süresi artsa dahi farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu durumda NMF ile yapılan çözümler en yüksek RMS değerine sahiptir. Sayısal hava modeli ile oluşturulmuş ve 6 saatte bir ışın izleme modeli ile güncellenen VMF1 ile yapılan çözümler ise en düşük RMS değerlerine sahiptir.

Farklı iz düşüm fonksiyonlarına ait RMS değerleri incelendiğinde; kısa süreli ölçülerde ve yükseklik bileşeninde doğruluk değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu bağlamda noktaların elipsoidal yükseklikleri ile iz düşüm fonksiyonlarından yukarı bileşende 2 saatlik gözlemlerden elde edilen 193 noktaya ilişkin RMS değerleri incelenmiştir. Analizlerden elde edilen korelasyon değerleri çok düşüktür. Bu nedenle noktaların elipsoidal yükseklik değerleri ile nokta düşey konum doğrulukları arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır.

Çalışmada ayrıca istasyonun enlemi ile iz düşüm fonksiyonlarının konum doğruluğu arasındaki ilişki incelenmiştir. 187 adet istasyonun verileri kullanılmıştır. Yatay ve düşey konum doğrulukları istasyonların enlem değerlerine göre değişiklik göstermesine karşın; özellikle yatay konum doğruluğunda iz düşüm fonksiyonları açısından fark çok düşüktür. Düşey konum doğruluğu açısından ekvatoral bölgede NMF en küçük, VMF1 en büyük RMS değerlerine sahiptir. Kutuplara yakın bölgelerde ise VMF1 en küçük, NMF ise en büyük RMS değerlerine sahip iz düşüm fonksiyonlarıdır.

Troposfer tabakası; sıcaklık, basınç ve serbest su buharı gibi parametrelere bağlı olarak GPS sinyallerine farklı derecede gecikme etkisi uygulamaktadır. Bu nedenle de gözlem yapılan mevsim ile troposferin uyguladığı gecikme etkisi doğrudan ilişkilidir. 2 saatlik gözlem süresi ile değerlendirilen PPP çözümlerinde; herhangi bir iz düşüm fonksiyonunun yatay konum doğruluğuna etkisi ile gözlem yapılan ay arasında anlamlı bir ilişki yoktur. Ekvatoral bölge için düşey konum doğruluğu önemli olan ve Ocak, Nisan, Ekim aylarını kapsayan 2 saatlik gözlemlerin kullanıldığı PPP çözümlerinde; troposferik gecikmeyi modellemek için GMF'nin, Temmuz ayında ise NMF'nin kullanılması önerilmektedir. Aynı koşullarda Güney Yarım Küre bölgesi için; Ocak ve Ekim aylarını kapsayan çözümlerde troposferik gecikmeyi modellemek için VMF1 kullanımı önerilmektedir. Kuzey yarım küre bölgesi içinse; Temmuz ayını kapsayan çözümlerde GMF yüksek RMS değerine sahiptir. Gözlem yapılan aydan bağımsız olarak bu bölgede troposferik gecikmeyi modellemek için VMF1 kullanımı önerilmektedir. Bu sonuçlara; 193 adet istasyonun verileriyle yapılan analizler kullanılarak varılmıştır.

İz düşüm fonksiyonları, sayısal hava modellerinin ve meteoroloji biliminin gelişimiyle güncellenmekte ve daha işlevsel hale getirilmektedir. Ayrıca lokal çalışmalar için, sadece belirli bir bölgede konum doğruluğuna olumlu etki yaratan yeni iz düşüm fonksiyonları da üretilmektedir. Bu çalışma kapsamında iz düşüm fonksiyonlarının global anlamda performansları araştırılmıştır.

Gerçek zamanlı değerlendirme imkânı sunan ve PPP yönteminin temel prensiplerini kullanan RT-PPP, PPP'den sonra literatüre kazandırılmıştır. Bu yöntemin geliştirilmesi için PPP adına yapılan çalışmalar önem teşkil etmektedir. Troposferik gecikmeyi modellemek için kullanılan iz düşüm fonksiyonlarının performansı RT-PPP tekniği ile entegre şekilde ele alınabilir ve sonuçlar doğrultusunda gerçek zamanlı hassas konum belirleme adına çalışmalar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKÇA

[1] R. J. Anderle, ‘’Point Positioning Concept Using Precise Ephemeris’’, Satellite Doppler Positioning; Proceedings of the International Geodetic Symposium, Las Cruces Volume 1, 1976, A77-47370 22-43.

[2] T. Grinter, C. Roberts, ‘’Precise Point Positioning: Where are we now?’’ University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, 2011.

[3] C. Rizos, V. Janssen, V. Roberts, T. Grinter, ‘’Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End?’’ FIG Working Week, Rome, Italy, 2012.

[4] J. F. Zumberge, M. B. Heflin, D.C. Jefferson, M. Watkins, F.H. Webb, ‘’ Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks‘’, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 1997.

[5] Boonsap Witchayangkoon, ‘’Elements of GPS Precise Point Positioning’’, The University of Maine, USA, 2000.

[6] A. E. Niell, ‘’Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths’’ Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology, Westford, 1996.

[7] Jan Kouba, Pierre Héroux, ‘’Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products’’ Geodetic Survey Division Natural Resources Canada, 2000.

[8] J. Boehm, H. Schuh, ‘’Vienna Mapping Functions’’, Institute of Geodesy and Geophysics (IGG), TU Vienna, Austria, 2004.

[9] J. Boehm, A. E. Niell, P. Tregoning, H. Schuh, ‘’ Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data’’, Geophysical Research Letters, Vol. 33, 2006.

[10] V. Tesmer, J. Boehm, R. Heinkelmann, H. Schuh, ‘’Effect of different tropospheric mapping functions on the TRF, CRF and position time-series estimated from VLBI’’ Journal of Geodesy, 2007.

[11] J. Kouba, ‘’Testing of global pressure/temperature (GPT) model and global mapping function (GMF) in GPS analyses’’, Journal of Geodesy, 2008.

[12] P. Steigenberger, J. Boehm, V. Tesmer, ‘’Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading’’, Journal of Geodesy, 2009.

[13] K. Lagler, M. Schindelegger, J. Böhm, H. Krásná, T. Nilsson, ‘’GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques’’ Geophysical Research Letters, Vol. 40, 1069–1073, 2013.

[14] S. Nistor, A. S. Buda, ‘’Using Different Mapping Function In GPS Processing For Remote Sensing The Atmosphere’’, Journal of Applied Engineering Sciences, 2015.

[15] T. Nikolaidou, K. Balidakis, F. Nievinski, M. Santos, H. Schuh, ‘’Impact of Different NWM-derived Mapping Functions on VLBI and GPS Analysis’’, Earth, Planets and Space, 2018.

[16] Engin Tunalı ‘’PPP ve IGS Gerçek Zaman Servisi ile Su Buharı Hareketlerinin İzlenmesi’’, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2018.

[17] Engin Tunalı, Mustafa Tevfik Özlüdemir, ‘’GNSS PPP with different troposphere models during severe weather conditions’’, GPS Solutions, 2019.

[18] C. Qiu, ‘’The Performance of Different Mapping Functions and Gradient Models in the Determination of Slant Tropospheric Delay’’, Remote Sensing, 2020.

[19] S. Nistor, N. Suba, A. Buda, ‘’The impact of tropospheric mapping function on PPP determination for one-month period’’ Acta Geodyn. Geomater., Vol. 17, No. 2 (198), 237–252, 2020.

[20] Shin-Chan Han, ‘’Static and Kinematic Absolute GPS Positioning and Satellite Clock Error Estimation’’, Report No. 454, Geodetic Science and Surveying Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science The Ohio State University Columbus, Ohio 43210-1275, 2000.

[21] X. Shen, ‘’Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning’’ Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 2001.

[22] J. Chen, H. Li, B. Wu, Y. Zhang, ‘’Performance of Real-Time Precise Point Positioning’’ Marine Geodesy, 36:1, 98-108, 2013.

[23] Y. Gao, K. Chen, ‘’ Performance Analysis of Precise Point Positioning Using RealTime Orbit and Clock Products’’ Journal of Global Positioning Systems Vol. 3, No. 1-2: 95- 100, 2004.

[24] ‘’IGS Quality of Service Fact Sheet’’, http://kb.igs.org/hc/enus/article_attachments /200407513/IGS_Quality_of_Service_131121.pdf, 2013.

[25] G. Lachapelle, R. Klukas, W. Qiu, ‘’One-Meter Kinematics Point Positioning, Using Precise Orbits and Satellite Clock Corrections.’’ Proceedings of ION GPS-96, Salt Lake City, Utah, September 20-23, 1995.

[26] T. Öcalan, M. Soycan, ‘’RTCM/SSR Mesajları İle Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (PPP-RTK) Tekniği’’, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 4, No: 2, 2012 (30-41), 2012.

[27] M. Rothacher, S. Schaer, L. Mervart, G. Beutler, ‘’Determination of Antenna Phase Center Variations Using GPS Data’’, IGS Workshop Proceedings: Special Topics and New Directions, 1995.

[28] J.T. Wu, S.C. Wu, G.A. Hajj, W.I. Bertiger, S.M. Lichten, ‘’Effects of antenna orientation on GPS carrier phase’’, Manuscripta Geodaetica 18, pp. 91-98, 1993.

[29] J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza, M. Hernández-Pajares, ‘’Carrier Phase Wind-up Effect’’ Technical University of Catalonia, Spain, 2011.

[30] A. E. Niell, ‘’Near-Field Problems for GPS Antennas’’, The Global Positioning System for the Geosciences Summary and Proceedings of a Workshop on Improving

the GPS Reference Station Infrastructure for Earth, Oceanic, and Atmospheric Science Applications, National Academy Press Washington D.C. pp. 219–222, 1997.

[31] E. Gülal, N. O. Aykut, B. Akpınar, S. Ö. Uygur, ‘’Gnss Antenlerinin Faz Merkezi ve Değişiminin Araştırılması’’, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 2011.

[32] C. Watson, P. Tregoning, R. Coleman, ‘’Impact of Solid Earth Tide Models on GPS Coordinate and Tropospheric Time Series’’, Geophysical Research Letters Vol. 33, L08306, 2006.

[33] P. Steigenberger, O. Montenbruck, M. Bradke, M. Ramatschi, U. Hessels, Evaluation of earth rotation parameters from modernized GNSS navigation messages, GPS Solutions No: 50, 2022.

[34] C. Urschl, R. Dach, U. Hugentobler, S. Schaer, G. Beutler ‘’Validating ocean tide loading models using GPS, Journal of Geodesy 78: 616–625, 2005.

[35] N. Ashby, ‘’Relativity in the Global Positioning System’’, Dept. of Physics, University of Colorado Boulder, CO 80309–0390 U.S.A. 2003.

[36] P. Defraigne, J.M. Sleewaegen, ‘’Code-Phase Clock Bias and frequency offset in PPP clock solutions’’, TUFFC.2015.2501350, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015.

[37] P. J. G. Teunissen, A. Kleusberg, ‘’GPS for Geodesy.’’ 1996.

[38] T. Tsugawa, M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, P. Supnithi, ‘’Total Electron Content Observations by Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS’’, Journal of Disaster Research, 2018.

[39] W. Chen, C. Hu, S. Gao, Y. Chen, X. Ding ‘’Absolute ionospheric delay estimation based on GPS PPP and GPS active network’’, The 2004 International Symposium on GNSS/GPS, 2004.

[40] S. Katsougiannopoulos, C. Pikridas, D. Rossikopoulos, I. Ifadis, A. Fotiou, “Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radiosonde Measurements and Permanent GPS Data”, PS5. 4–GNSS Processing and Applications, 15, 2006.

[41] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, ‘’Global Positioning System: Theory and Practice’’, 5th edition Springer-Verlag Wien New York, Austria, 2001.

[42] A. N. Mohammed, M. A. Abdelfatah, A. E. Mousa, G. S. El-Fiky, ‘’Regional Egypt tropospheric mapping function model’’, Alexandria Engineering Journal 57, 4157-4165, 2018.

[43] Q. Zhao, Y. Yao, W. Yao, Z. Li, ‘’ Real-time precise point positioning based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting’’, Scientific Reports, 2018.

[44] C.C. Chao, ‘‘A model for tropospheric calibration from delay surface and radiosonde balloon measurements”, JPL Technical Memorandum, JET Propulsion Lab, Pasadena, USA, pp. 391–396, 1972.

[45] J. W. Marini, ‘’Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile’’, Radio Science 7 223-231, 1972.

[46] T. A. Herring, ‘’Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data’’ Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, 157-164, 1992.

[47] A. E. Niell, ‘’Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS’’, Earth Planets Space, 52,699-702, 2001.

[48] J. Boehm, B. Werl, H. Schuh ‘’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, Vol. 111, B02406, 2006.

[49] J. Boehm, R. Heinkelmann, H. Schuh, ‘’Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications’’, Journal of Geodesy 81:679–683, 2007.

[50] J. Böhm, G. Möller, M. Schindelegger, G. Pain, R. Weber, ‘’Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)’’, GPS Solutions Vol. 19, 433–441, 2015.

[51] D. Landskron, J. Böhm ‘’VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions’’, Journal of Geodesy Vol. 92, 349–360, 2018.

[52] T.A. Musa, S. Amir, R. Othman, S. Ses, K. Omar, K. Abdullah, S. Lim, C. Rizos, ‘’GPS meteorology in a low-latitude region: Remote sensing of atmospheric water vapor over the Malaysian Peninsula’’, J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 73 2410–2422, 2011.

[53] M.C. Eckl, R. A. Snay, T. Soler, M.W. Cline, G.L. Mader, ‘’Accuracy of GPS-Derived Relative Positions as a Function of Interstation Distance and Observing-Session Duration’’, Journal of Geodesy 75: 633-640, 2001.

[54] A. Saraçoğlu, D. U. Şanlı, ‘’Effect of meteorological seasons on the accuracy of GPS positioning’’, Measurement 152 (2020) 107301, 2019.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. F. C. Durmuş, B. Erdoğan, ‘’The Effect of the State-of-the-Art Mapping Functions on Precise Point Positioning’’, EGU21 General Assembly, 2021

2. F. C. Durmuş, A. H. Doğan, B. Erdoğan, ‘’Investigation of the effect of tropospheric mapping functions for different station heights and latitudes on PPP’’, EGU22 General Assembly, 2022