T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRULUĞU YÜKSEK TROPOSFER MODELİ VE İZ DÜŞÜM FONKSİYONUNUN BELİRLENMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Ali Hasan DOĞAN

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Danışman

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

Haziran, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRULUĞU YÜKSEK TROPOSFER MODELİ VE İZ DÜŞÜM FONKSİYONUNUN BELİRLENMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Ali Hasan DOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 20.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Programı **DOKTORA 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 _____

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ÖZ DEMİR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

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

Danışmanım Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Doğruluğu Yüksek Troposfer Modeli ve İz Düşüm Fonksiyonunun Belirlenmesi: Türkiye Örneği 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.

Ali Hasan DOĞAN

İmza

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2021 yılı 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli fikir ve düşüncelerini paylaşan ve hem akademik hem de günlük hayatta bana her türlü desteği sağlayan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez izleme süreçlerinde bilgi ve birikimlerinden faydalandığım değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Nursu TUNALIOĞLU ÖCALAN ve Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Atmosferik parametrelerin nasıl elde edildiğini yerinde görmek adına radyosonda gözlemlerine katılmama izin veren Meteoroloji 1. Bölge Müdürlüğü'ne ve Meteoroloji Müdürü Bayram DOĞAN'a şükranlarımı sunarım. Tez çalışmasında yer alan nümerik hesaplamaların bir kısmı TRUBA kaynaklarında gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda hem TRUBA kaynaklarını kullanıcılara açtıkları için hem de Alman Yer Bilimleri Araştırma Merkezi'nde (GFZ) araştırmalarımı yapmak üzere sağladıkları 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürlerimi sunarım. Bu bağlamda bir yıl süresince hem tezime yaptıkları katkılardan hem de Potsdam ve genel olarak Almanya'ya alışma sürecindeki desteklerinden dolayı başta Dr. Florian ZUS olmak üzere Prof. Dr. Harald SCHUH, Dr. Galina DICK, Dr. Robert HEINKELMANN, Nicat MAMMADALIYEV ve Chaiyaporn "Na" KITPRACHA'ya sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması boyunca desteklerini esirgemeyen başta Doç. Dr. Taylan ÖCALAN, Dr. Öğr. Üyesi Utkan Mustafa DURDAĞ, Dr. Abdullah KARA, Arş. Gör. Ahmet DELEN ve Arş. Gör. Mert GÜRTÜRK olmak üzere mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Yalçın YILMAZ, Arş. Gör. Dr. Aziz SARAÇOĞLU, Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DUMAN, Arş. Gör. Batuhan KILIÇ ve isimlerini sayamadığım tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak sadece tez çalışmam boyunca değil, tüm eğitim hayatımda maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen başta çok kıymetli annem olmak üzere aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ali Hasan DOĞAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 4
1.2 Tezin Amacı 9
1.3 Hipotez 10
2 TROPOSFERİK GECİKME 12
2.1 Troposferik Gecikme Modeli 13
2.2 Troposfer Modeli 17
3 İZ DÜŞÜM FONKSİYONLARI 25
3.1 Işın İzleme Yöntemi 28
3.2 İz Düşüm Fonksiyonlarının Belirlenmesi 32
3.3 Modifiye Edilmiş İz Düşüm Fonksiyonunun Belirlenmesi 37
4 UYGULAMA 43
4.1 Farklı Veri Setleri ile Oluşturulan Troposfer Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi 43
4.2 Nihai Troposfer Modeli 45
4.3 İz Düşüm Fonksiyonları için Gerçekleştirilen Analizler 49
5 SONUÇ VE ÖNERİLER 57
KAYNAKÇA 61
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 67

SİMGE LİSTESİ

a, b ve c	İz düşüm fonksiyonu katsayıları
A	Modellenen her bir troposferik parametre
A_i	Troposfer modeli katsayıları
A	Katsayılar matrisi
α	Azimut
B_i	Günlük etkiyi ifade eden troposfer modeli katsayıları
C	Kuru bileşen için 0.0031, ıslak bileşen için 0.0006
Δt	Sıcaklık değişim oranı
D	Troposferik gecikme farkı
$dgeo$	Geometrik gecikme
DOY	Yılın günü (Day of Year)
e	Su buharı basıncı
e	Uydu yükseklik açısı
φ	Enlem
g	Gravite değeri
$\bar{g}$	Ortalama gravite değeri
g_n	Normal gravite değeri
G	Uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafe
h	Elipsoidal yükseklik
h_i	Tabaka kalınlıkları
H, H_{ort}	Ortometrik yükseklik
H_D	Jeopotansiyel yükseklik
HOD	Günün saati (Hour of Day)
k_1, k_2've k_3	Kırınım katsayıları
l	Ölçü vektörü
L	Su buharı değişim faktörü
λ	Boylam
m_g	Gradyent iz düşüm fonksiyonu

M_d	Kuru havanın molar kütlesi
M_w	Su buharının molar kütlesi
MF_h	Kuru bileşen için iz düşüm fonksiyonu/faktörü
MF_w	Islak bileşen için iz düşüm fonksiyonu/faktörü
$\mathrm{MF}_{\mathrm{w}}^{*}$	Islak bileşen için modifiye edilmiş iz düşüm fonksiyonu/faktörü
n	Kırınım indisi
N	Kırınım değeri
N_h	Kuru bileşen için kırınım değeri
N_w	Islak bileşen için kırınım değeri
η	Yer merkezindeki açı değeri
N_G ve E_G	Kuzey-güney ve doğu-batı bileşenleri için gradyentler
P	Basınç
P	Profil seviyesi, Ağırlık değeri
Q	Nem
ρ	Toplam hava yoğunluğu
ρ_d	Kuru havanın yoğunluğu
ρ_w	Islak havanın yoğunluğu
r	Yerküre'nin yarıçap değeri
R	Genel gaz sabiti
R_d	Kuru hava gaz sabiti
R_w	Islak hava gaz sabiti
s	Sinyalin izlediği yolun ark mesafesi
S	Sinyalin izlediği yolun toplam mesafesi
t	Sıcaklık
t_d	Doyma noktası sıcaklığı
t_m	Ağırlıklı ortalama sıcaklık
t_v	Virtüel sıcaklık
T	Troposferik gecikme
T_h	Kuru hava kaynaklı troposferik gecikme
T_w	Su buharı kaynaklı troposferik gecikme

θ	Yerel ufuk düzlemine göre yükseklik açısı
$\mathbf{x}$	Bilinmeyenler vektörü
Y	Yüzey seviyesi
Y'	Yüzeyin 2 metre üstündeki seviye
Z	Ek model parametresi

KISALTMA LİSTESİ

3B	3 Boyutlu
BoM	Australian Bureau of Meteorology
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CRF	Celestial Reference Frames
DOY	Day of Year
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EGNOS	European Geo-stationary Navigation Overlay System
EKK	En Küçük Kareler
GMF	Global Mapping Function
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPT	Global Pressure and Temperature
GPT2	Global Pressure and Temperature 2
GPT2w	Global Pressure and Temperature 2w
GPT3	Global Pressure and Temperature 3
IGS	International GNSS Service
ITG	Improved Tropospheric Grid
ME	Mean Error
MF	Mapping Function
NMF	Niell Mapping Function
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWM	Numerical Weather Model
PMF	Potsdam Mapping Function
PPP	Precise Point Positioning
PWV	Precipitable Water Vapor
RS	Radyosonda
RMS	Root Mean Square
SAR	Synthetic Aperture Radar
TRF	Terrestrial Reference Frames
UNB3	University of New Brunswick 3
UNB3m	University of New Brunswick 3m
VMF	Vienna Mapping Functions
WGTEM	Wuhan-University Global Tropospheric Empirical Model

ZHD	Zenith Hydrostatic Delay
ZTD	Zenith Total Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Troposferik gecikme. Mohammed vd. (2018)'den alınarak düzenlenmiştir. 12
Şekil 2.2 Model için kullanılan veri profilleri 21
Şekil 3.1 Uydu yükseklik açısına bağlı iz düşüm faktörleri 26
Şekil 3.2 İz düşüm fonksiyonlarının karşılaştırılması 26
Şekil 3.3 Işın izleme. Nilson vd. (2013)'ten alınarak düzenlenmiştir. 28
Şekil 3.4 Başlangıç uydu yükseklik açısı ile k. katmanındaki uydu yükseklik açısı arasındaki ilişki 32
Şekil 3.5 0 UTC için $D^*(e)$ farkları 38
Şekil 4.1 Yersel meteorolojik istasyonlar 48
Şekil 4.2 IGS istasyonları 48
Şekil 4.3 TUSAGA-Aktif istasyonları 50
Şekil 4.4 Yaklaşımlara ait model doğrulukları 51
Şekil 4.5 Gerçek verilere dayalı çalışmada kullanılan istasyonlar 54

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 ERA5 ile elde edilen meteorolojik parametreler 14
Tablo 2.2 Kullanılan sabitler (Thayer, 1974; Mendes, 1999) 24
Tablo 3.1 GMF ve PMF ile elde edilen troposferik gecikme hataların karşılaştırılması (mm) 27
Tablo 3.2 Tabaka kalınlıkları 31
Tablo 3.3 Doğrusal olmayan EKK için yaklaşık değerler 35
Tablo 3.4 İz düşüm fonksiyonlarının doğruluk değerleri (mm) 36
Tablo 3.5 0 UTC için RMS değerleri (mm) 38
Tablo 3.6 Eşitlik 3.34 ile elde edilen RMS değerleri (mm) 39
Tablo 3.7 Eşitlik 3.35 ile elde edilen RMS değerleri (mm) 40
Tablo 3.8 Eşitlik 3.36 ile elde edilen RMS değerleri (mm) 41
Tablo 3.9 İz düşüm fonksiyonlarının modifiye edilmesi için önerilen yaklaşımlar 42
Tablo 4.1 Test çalışması için model doğrulukları 44
Tablo 4.2 Günlük veriler kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizi 44
Tablo 4.3 Aylık ortalama verileri kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizi 45
Tablo 4.4 Nihai model için model doğrulukları 46
Tablo 4.5 Nihai modelin ERA5 verileri ile doğruluk analizi 47
Tablo 4.6 Nihai modelin yersel meteorolojik veriler ile doğruluk analizi 47
Tablo 4.7 Nihai modelin IGS ürünlerine dayalı doğruluk analizi 49
Tablo 4.8 Simülasyon çalışmalarında kullanılan senaryolar 52
Tablo 4.9 İlk simülasyon çalışmasına ait doğruluk analizi (mm) 52
Tablo 4.10 İkinci simülasyon çalışmasına ait doğruluk analizi (mm) 53
Tablo 4.11 Veri değerlendirme stratejisi 55
Tablo 4.12 Gerçek verilere dayalı gerçekleştirilen çalışmaya ait doğruluk analizi (mm) 56

ÖZET

Doğruluğu Yüksek Troposfer Modeli ve İz Düşüm Fonksiyonunun Belirlenmesi: Türkiye Örneği

Ali Hasan DOĞAN

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

Troposfer içeriğindeki kuru hava ve su buharından dolayı GNSS ve VLBI gibi uzay jeodezisi tekniklerinde sinyal gecikmelerine neden olmaktadır. Hassas konum bilgisi elde edebilmek için troposferik gecikmelerin elimine edilmesi gerekmektedir. Troposferik gecikmeler her ne kadar sinyal yolu boyunca gerçekleşse de, bu gecikmeler uzay jeodezisi tekniklerinde başucu yönünde hesaplanmaktadır. Bu iki gecikme arasındaki ilişki iz düşüm fonksiyonları ile sağlanmaktadır. İz düşüm fonksiyonları Herring'in sürekli kesir modeline göre belirlendiğinden, atmosferin asimetrik etkilerini tam olarak yansıtamamaktadır. Bu nedenle özellikle düşük uydu yükseklik açılarında cm mertebesinde hatalara neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında, ıslak iz düşüm fonksiyonun modifiye edilebilmesi için üç farklı yaklaşım önerilmiş ve olası model hatalarının azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ECMWF'nin ERA5 veri seti kullanılarak ışın izleme yöntemine dayalı olarak troposferik gecikmeler elde edilmiştir. Daha sonra önerilen yaklaşımlar; iki farklı simülasyon çalışması ve gerçek GPS verilerine dayalı olarak beş farklı senaryo altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre önerilen yaklaşımlar simülasyon çalışmalarında hem ZTD hem de Yükseklik bileşeninde doğruluğu artırmaktadır.

Ancak gerçek verilere dayalı analizlerde her ne kadar ZTD doğrulukları görece iyileşmiş olsa da Yükseklik bileşenine katkı sağlayamamıştır. Bu çalışmada ayrıca Türkiye için doğruluğu yüksek bir troposfer modelinin oluşturulması da amaçlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, mevcut modellerin gerek çözünürlükleri ve kullanılan veri türleri gerek de doğrulukları bakımından farklılıkları göze çarpmaktadır. Bu çalışmada; yıllık, yarı yıllık ve günlük etkilerin dikkate alındığı yeni bir troposfer modeli önerilmiştir. Bu bağlamda ERA5'in 1979 ile 2019 yılları arasındaki 41 yıllık veri seti kullanılmıştır. IGS'nin hassas troposfer ürünleri referans alındığında ZTD doğruluğu 3.15 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca, yersel meteorolojik verilere dayalı gerçekleştirilen analizlerde ise basınç için doğruluk 5.05 mbar, sıcaklık için ise 4.47 K seviyelerindedir.

Anahtar Kelimeler: Troposferik gecikme, troposfer modeli, iz düşüm fonksiyonu, ERA5, GNSS.

ABSTRACT

Determination of High Accurate Troposphere Model and Mapping Function: Case Study of Türkiye

Ali Hasan DOĞAN

Department of Geomatic Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

Due to contents of the dry air and water vapor, troposphere causes radio signal delays in space geodetic techniques such as GNSS and VLBI. These tropospheric delays should be eliminated to achieve precise point positioning. Although tropospheric delays occur along the signal path, these delays are estimated in zenith direction in space geodetic techniques. The relation between these delays is provided by the mapping functions (MFs). Since the MFs are determined according to Herrings continued fraction form, they cannot fully represent the asymmetric effects of the atmosphere. Thus, the MFs cause cm level errors especially in low elevation angles. In this thesis, three different approaches are proposed to modify the wet MF and it is aimed to reduce mismodelling errors. In this context, tropospheric delays were obtained based on ray-tracing algorithm using ECMWF's ERA5 dataset. Next, the proposed approaches were tested based on two simulation studies and real GPS data under five different scenarios. According to results, proposed approaches improve the accuracy of both ZTD and station height in simulation studies. However, although ZTD accuracies were slightly improved, the proposed approaches could not improve the station height's accuracy in real case

study. In this thesis, it is also aimed to develop a troposphere model with high accuracy for Türkiye. According to studies in the literature, the existing models differ from each other in their resolution, data source used and especially in their accuracy. In this study, a new troposphere model which considers annual, semi annual and diurnal effects has been presented. In this context, ERA5's 41 years of data between 1979 and 2019 was used. The ZTD accuracy was obtained as 3.15 cm w.r.t IGS's final troposphere products. Moreover, it was found that the accuracies of the pressure and temperature is 5.05 mbar and 4.47 K w.r.t the terrestrial meteorological data, respectively.

Keywords: Tropospheric delay, troposphere model, mapping function, ERA5, GNSS.

1
GİRİŞ

En sık tercih edilen jeodezik ölçme yöntemlerinden biri olan Küresel Navigasyon ve Uydu Sistemleri (Global Navigation and Satellite Systems, GNSS) ile günün her saatinde ve her türlü hava koşulunda yeryüzü üzerindeki herhangi bir noktada konum bilgisi elde edilebilmektedir. GNSS gözlemleri en basit anlamıyla uydudan yayılan sinyallerin alıcıya ulaşana kadar geçen sürenin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Uydulardan yayılan sinyaller atmosferden geçerken yeryüzü üzerindeki alıcılara ulaşıncaya kadar birçok etkiye maruz kalmaktadır. GNSS yöntemiyle hassas konum bilgisi elde edebilmek için, "Atmosferik Gecikme" olarak adlandırılan bu etkiler ile uydu saat hatası, alıcı saat hatası ve çok yolluluk (multipath) gibi diğer GNSS hata kaynaklarının giderilmesi gerekmektedir. Ancak, son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, GNSS hata kaynaklarının farklı çalışma alanlarında kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Çok yolluluk etkisini içeren sinyaller yardımıyla kar kalınlığı ve toprak nem bilgisi gibi bilgiler elde edilebilirken (Larson vd., 2008; Larson vd., 2009; Tunalıoğlu vd., 2019), sinyal gecikmeleri yardımıyla da atmosferin en alt tabakası olan troposfer modellenebilmektedir (Bevis vd., 1992; Nievinski, 2009).

GNSS ve diğer uzay jeodezisi tekniklerinde, atmosferik gecikmelere iyonosfer ve troposfer tabakaları neden olmaktadır. Bu nedenle bu gecikmeler iyonosferik ve troposferik gecikme olarak ayrılırlar. İyonosferik gecikmeler uydu sinyallerinin frekansına bağlıdır ve sinyal kombinasyonları yardımıyla giderilebilmektedir. Ancak, troposferik gecikmeler sinyal frekansına bağlı olmadığından, sinyal kombinasyonları ile giderilemez ve uygun bir şekilde modellenmelidir. Nötr atmosfer olarak da bilinen ve atmosfer kütlesinin %75-80'ini ve atmosferdeki su buharının neredeyse tamamını içeren troposfer tabakası (Showman ve Dowling, 2014), içeriğindeki kuru hava ve su buharından dolayı sinyallerin gecikmesine neden olur. Kuru hava ve su buharı sinyalleri farklı şekilde kırmaktadır. Kırılmalara bağlı bu gecikmeler kuru ve ıslak gecikme olarak adlandırılır (Davis vd., 1985; Mohammed vd., 2018). Kuru gecikme, yüzey basıncı ve sıcaklık bilgisi ile yüksek doğrulukta elde edilebilirken (Saastamoinen, 1972; Karabatić vd., 2011); ıslak gecikme, su buharının ani ve düzensiz değişiminden dolayı kolaylıkla belirlenemez,

bu nedenle meteorolojik gözlemlerin dikkate alınması gerekmektedir. Ancak her noktada ve her an meteorolojik gözlemlerin yapılması mümkün olmadığından, ıslak gecikmenin modellenmesi gerekmektedir. Troposferik etkilerin dikkate alınmadığı durumlarda, sinyaller 30 m'ye kadar gecikmelere maruz kalabilmektedir (Teunissen ve Montenbruck, 2017).

GNSS uydularından yayılan sinyaller, farklı eğim açıları ve farklı yönlerden gelerek alıcıya ulaşmaktadır. Troposfer tabakası kaynaklı gecikmeler de sinyal yolu boyunca gerçekleşmektedir. Ancak, GNSS çözümlerinde troposferik gecikmeler başucu yönünde belirlenmektedir. Eğik gecikmeler ile başucu yönündeki gecikmeler arasındaki ilişki iz düşüm fonksiyonları (Mapping Functions, MFs) ile sağlanmaktadır. İz düşüm fonksiyonları, radyosonda (RS) veya sayısal hava modelleri (Numerical Weather Model, NWM) verileri yardımıyla oluşturulmaktadır. Literatür incelendiğinde iz düşüm fonksiyonlarının, atmosferin küresel ve simetrik olduğu varsayımı altında üretildiği görülmektedir. Ancak atmosfer (troposfer) simetrik olmadığından, asimetrik etkinin de GNSS ve diğer uzay jeodezisi tekniklerinde dikkate alınması gerekmektedir. Asimetrik etki troposferik gradyentler yardımıyla çözümlere dahil edilmektedir. Nilsson vd. (2013), özellikle düşük uydu yükseklik açısına sahip gözlemlerin dahil edildiği çözümlerde troposferik gradyentlerin de modele dahil edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Rothacher vd. (1998) ve Masoumi vd. (2017) ise düşük uydu yükseklik açısına sahip gözlemlerin; istasyon yüksekliği, troposferik gecikme ve alıcı saat hatası arasındaki korelasyonu düşürdüğünü vurgulamıştır. Bilinmeyenler arasındaki korelasyon dikkate alındığında, troposferin hatalı modellenmesi veya iz düşüm fonksiyonlarının hatalı üretilmesinin özellikle istasyon yüksekliğindeki hataları artıracağı görülmektedir. Bu bağlamda, GNSS ve diğer uzay jeodezisi tekniklerinde, uygun troposferik gecikme modelinin kullanılması önem arz etmektedir. Uygun troposferik gecikme modelinin yanı sıra, önsel troposferik gecikme değeri de GNSS çözüm sonuçlarını etkilemektedir. Zus vd. (2021), daha doğru önsel gecikme (kuru gecikme) değerlerinin istasyon yüksekliklerindeki hataları 5.7 mm'den 2.9 mm'ye düşürdüğünü göstermiştir. Tunalı ve Özlüdemir (2019), daha doğru önsel gecikme (kuru gecikme) değerleri kullanıldığında hassas nokta konumlama (Precise Point Positioning, PPP) tekniğinin doğruluğunu artırdığını vurgulamıştır. Doğruluğu yüksek önsel gecikme değerinin hesaplanması için, istasyonun bulunduğu

konumdaki gözlem anına ait meteorolojik parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Ancak her noktada ve her an bu parametrelerin elde edilmesi mümkün olmadığından kullanıcılar tarafından standart atmosferik parametreler kullanılmaktadır (Xu vd., 2020). Ancak bu durumda da elde edilen doğruluk düşük olduğundan, doğruluğun artırılması için birçok troposfer modeli geliştirilmiştir (Penna vd., 2001; Krüger vd., 2004; Leandro vd., 2006; Böhm vd., 2007; Leandro vd., 2008; Li vd., 2012; Lagler vd., 2013; Schüler, 2014; Böhm vd., 2015; Yao vd., 2015; Xu vd., 2020).

Doğruluğu yüksek troposfer modelleri, iz düşüm fonksiyonları ve bunları içeren troposferik gecikme modelleri sadece hassas konum belirleme çalışmaları için değil, aynı zamanda iklim değişikliği çalışmaları için de büyük bir önem arz etmektedir. İklim değişikliğinin küresel anlamda sıcaklık artışına ve buna bağlı olarak buzulların erimesine ve deniz seviyesinin yükselmesine neden olduğu bilinmektedir. Güncel iklim modelleri aşırı kış yağışlarını öngörmektedir (Solomon, 2007; Scaife vd., 2012). Aşırı ani yağışlar büyük bir risk teşkil ettiğinden, bu yağışların önceden belirlenebilmesi de risk önleme çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Ani yağışların belirlenebilmesi için anlık su buharı bilgisinin bilinmesi gerekmektedir (Champollion vd., 2004; Choy vd., 2013; Rohm vd., 2014). Su buharı; RS, GNSS, mikrodalga radyometreler, Lidar ve sentetik açıklıklı radar (Synthetic Aperture Radar, SAR) yöntemleri ile ölçülebilmektedir. Bu yöntemler arasında GNSS, gerek sürekli gözlem yapan nokta sıklığı gerek de her türlü hava koşulunda çalışabilir olması bakımından zamansal ve konumsal çözünürlüğü artırdığı için ayrı bir öneme sahiptir. GNSS ile su buharı bilgisi başucu yönündeki ıslak gecikme bilgisi (Zenith Wet Delay, ZWD) yardımıyla elde edilmektedir (Askne ve Nordius, 1987; Bevis vd., 1992; Rocken vd., 1995; Nievinski, 2009; Bosy vd., 2012).

Bu tez çalışmasında Türkiye için doğruluğu yüksek troposfer modelinin ve iz düşüm fonksiyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, RS veya yersel meteorolojik gözlemler yerine NWM verileri kullanılarak elde edilen model ve fonksiyonların daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) tarafından üretilen ERA5 veri seti kullanılmıştır. Çalışmanın bu

bölümünde literatürdeki çalışmalar, tez çalışmasının amacı ve hipotezinden bahsedilecektir.

1.1 Literatür Özeti

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde troposferik gecikme modellerinin, iz düşüm fonksiyonlarının ve önsel troposferik gecikme değerlerinin (troposfer modelleri) GNSS ve diğer uzay jeodezisi tekniklerine etki ettiği görülmektedir. Bu bölümde öncelikle önsel troposferik gecikme değerlerinin elde edilmesini sağlayan troposfer modellerinden daha sonra da literatürdeki iz düşüm fonksiyonlarından ve bu çalışmada da kullanılan ERA5 veri setinin kullanıldığı çalışmalardan bahsedilecektir.

Önsel troposferik gecikme değerlerinin elde edilmesini sağlayan ve küresel ölçekte üretilmiş troposfer modelleri; University of New Brunswick 3 (UNB3), University of New Brunswick 3m (UNB3m), European Geo-stationary Navigation Overlay System (EGNOS), TropGrid, TropGrid2, Global Pressure and Temperature (GPT), Global Pressure and Temperature 2 (GPT2), Global Pressure and Temperature 2w (GPT2w), Improved Tropospheric Grid (ITG), IGGTrop ve Wuhan-University Global Tropospheric Empirical Model (WGTEM) şeklinde sıralanabilir.

Collins ve Langley (1998) standart atmosferik parametrelerin metre mertebesinde hatalara neden olduğunu belirtmiştir. Bu hatayı azaltmak için Kuzey Amerika'da bulunan RS istasyonlarının 50 yıllık verisini kullanarak UNB3 troposfer modelini geliştirmişlerdir. Model doğruluğunun 5 cm, ortalama hataların 2 cm civarında olduğu belirtilmiştir. Modelin kuru gecikme değeri için yeterli doğrulukta olduğu, ancak su buharının ani değişiminden dolayı, ıslak gecikme değeri için yeterli doğrulukta olmadığı ve bu nedenle de UNB3'ün gecikme değeri tahminlerinin yeterli doğrulukta olmadığı vurgulanmıştır. Leandro vd. (2006), ıslak gecikme değeri doğruluğunu artırmak amacıyla 7 yıllık RS verilerini kullanarak UNB3'ün düzeltilmiş modeli olan UNB3m'yi geliştirmiştir. Bu modelde mevsimsel etkiler ve enlem etkisi göz önüne alınmıştır. Model doğruluğunun UNB3'te olduğu gibi 5 cm, ancak ortalama hataların 5 mm olduğu belirtilmiştir. Penna vd. (2001), UNB3'ün küresel anlamda kullanılabilir olduğunu, ancak kullanılan RS verilerinin Kuzey Amerika'da bulunduğunu belirtmiştir. Ayrıca, UNB3'ün zamansal hava durumu değişikliklerini tam olarak yansıtamadığı vurgulanmıştır. Bu nedenle, UNB3'e çok

benzer EGNOS modeli önerilmiştir. Model doğruluğunu test etmek için 5 istasyona ait bir yıllık sürekli GPS gözlem verisi kullanılmıştır. Model doğruluğunun 4 ile 4.7 cm arasında değiştiği vurgulanmıştır.

Krüger vd. (2004), NWM verileri ile troposfer modellerinin doğruluğunun artırılabileceğini belirtmiştir. Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi'nin (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 3.5 yıllık 1°x1° ve ECMWF'nin 15 yıllık 1.5°x1.5° NWM grid verisini kullanarak TropGrid'i geliştirmiştir. Modellemede yıllık ve günlük etkileri içeren harmonik fonksiyon parametreleri en küçük kareler (EKK) yöntemiyle kestirilmiştir. Model doğruluğunun yaklaşık 3.8 cm olduğu vurgulanmıştır. Schüler (2014), TropGrid'in geliştirilmiş versiyonu olan TropGrid2'yi önermiştir. Bu modelin doğruluğunun yaklaşık 3.7 cm olduğu ve TropGrid'in 8 mm'lik ortalama hatasının 3 mm'ye düştüğü vurgulanmıştır.

Böhm vd. (2007), ECMWF tarafından üretilen ERA40 veri setinin 1999-2002 yılları arasındaki 15°x15° aylık sıcaklık ve basınç profil ortalama grid verilerini kullanarak bir küresel sıcaklık ve basınç modeli olan GPT'yi geliştirmiştir. Bu modelde profil verileri önce yüzeye indirgenmiş daha sonra bu yüzey verileri dokuzuncu derece ve mertebeden küresel harmonik fonksiyonlar kullanılarak modellenmiştir. Lagler vd. (2013) GPT'nin konumsal ve zamansal çözünürlüğünü artıran GPT2'yi geliştirmiştir. GPT2'de yıllık etkilerin yanı sıra yarı yıllık ve ortalama etkiler de dikkate alınmıştır. 2001-2010 yılları arasındaki ERA-Interim verisi kullanılarak oluşturulan bu model ile su buharı basıncı bilgisi de elde edilebilmektedir. Böhm vd. (2015) GPT2'nin ıslak bileşene ait doğruluğunu artırmak için GPT2w modelini geliştirmiştir. Bu model ile su buharı indirgeme faktörü ve ağırlıklı ortalama sıcaklık bilgisi verileri de elde edilebilmektedir. GPT2'nin 5° çözünürlüğü 1°'ye indirilmiştir. Model doğruluğunun 3.79 cm'den 3.61 cm'ye; ortalama hatasının 2.8 mm'den 0.2 mm'ye düştüğü belirtilmiştir.

Yao vd. (2015), GPT2 ve TropGrid2'nin geliştirilmiş versiyonu olan ITG'yi önermiştir. Yıllık, yarı yıllık ve günlük değişimleri içeren bu modelin yatay çözünürlüğü 1°'dir. Model çıktı verisi olarak; sıcaklık, basınç, sıcaklık değişim oranı ve başucu ıslak gecikme verisi sağlamaktadır. ITG'nin, GPT2 ve TropGrid2'ye göre doğruluğunun yüksek olduğu vurgulanmıştır. Xu vd. (2020), GPT2'nin günlük değişimleri, TropGrid2'nin yarı yıllık etkileri içermediğini vurgulamıştır. Hem

ITG'nin hem de TropGrid2'nin günlük değişimleri sadece kosinüzoidal olarak ele aldığını vurgulamış ve WGTEM modelini önermiştir. WGTEM modelinde yıllık, yarı yıllık ve günlük değişimler göz önüne alınarak 2001-2010 yılları arasındaki 2.5°x2.5°'lik 6 saatlik zamansal çözünürlükteki ERA-Interim grid verisi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hem sıcaklık hem de basınç parametre doğruluklarının diğer üç modelden daha yüksek olduğu vurgulanmıştır.

Troposfer modelleri, doğruluğu yüksek önsel troposferik gecikme değerlerini elde etme açısından büyük bir öneme sahiptir. Literatürdeki modeller; kullanılan veri türü, ek bilgiye ihtiyaç duyup duymaması, zamansal ve konumsal çözünürlükleri bakımından farklılaşmaktadır. Bu nedenle araştırmacıların GNSS verilerinin değerlendirilmesi aşamasında troposfer model seçimine dikkat etmeleri gerekmektedir. Troposfer modeli dışında; eğik gecikmeler ile başucu yönündeki gecikmeler arasındaki ilişkiyi sağlayan iz düşüm fonksiyonlarının seçimi de GNSS değerlendirme sonuçlarını etkilediğinden, hangi fonksiyonun seçileceği de büyük bir önem arz etmektedir. Küresel ölçekte üretilen ve literatürde en çok tercih edilen iz düşüm fonksiyonları; Niell Mapping Function (NMF), Global Mapping Function (GMF), GPT2 ve Vienna Mapping Functions 1 (VMF1) şeklinde sıralanabilir.

NMF; 1987, 1988, 1992 yıllarına ait en az 25 basınç seviyesi ölçümlerine sahip RS verileri kullanılarak oluşturulmuştur (Niell, 1996). Kuru ve ıslak bileşen için ayrı ayrı belirlenmiş, 3° uydu yükseklik açısına kadar fonksiyon parametresi sağlamaktadır. Kuru bileşen; enlem, yükseklik ve yılın gününe (Day of Year, DOY) bağlıyken; ıslak bileşen sadece enleme bağlıdır. Böhm ve Schuh (2004) ECMWF veri setlerini kullanarak 3.3° uydu yükseklik açısına kadar fonksiyon parametresi sağlayan VMF'yi geliştirmiştir. Fonksiyon parametreleri ışın izleme yöntemiyle belirlenen bu fonksiyonun; baz tekrarlılıklarını NMF'ye göre %5-10 oranında geliştirdiği belirtilmiştir. Ancak Herring (1992)'nin sürekli kesir modeline göre oluşturulan VMF'nin *b* ve *c* katsayılarının mevsimsel etkiyi tam olarak içermemesinden dolayı, Böhm vd. (2006a) VMF'yi geliştirerek VMF1 modelini oluşturmuştur. Burada *b* katsayısı, ışın izleme yöntemiyle belirlenmiş ve ortalama değeri hesaplanmıştır. Daha sonra *c* katsayısı önce ışın izleme yöntemiyle belirlenmiş, daha sonra bu katsayılar için DOY ve enleme bağlı bir fonksiyon oluşturulmuştur. *b* ve *c* katsayıları belirlendikten sonra *a* katsayısı ışın izleme

yöntemine göre belirlenmiş ve model oluşturulmuştur. Bu model katsayıları 6 saatlik çözünürlükte grid formatında yayınlanmaktadır.

GMF, Böhm vd. (2006b) tarafından dokuzuncu derece ve mertebeden harmonik fonksiyonlara açılarak oluşturulmuş küresel bir iz düşüm fonksiyonudur. ECMWF'nin 1999-2002 yılları arasında ERA40 verileri kullanılarak oluşturulan bu model NMF'de olduğu gibi enlem, yükseklik ve DOY'a bağlı olarak fonksiyon parametresi sağlamaktadır. GMF; NMF'nin mevsimsel ve bölgesel yükseklik hatalarını gidermiş olsa da, VMF1'e göre düşük doğruluğa sahiptir.

GPT2, küresel bir troposfer modeli olmasının yanı sıra iz düşüm fonksiyonu verisi de sağlamaktadır (Lagler vd. 2013). GPT2, yıllık ve yarı yıllık etkileri içerdiğinden GPT/GMF kombinasyonu yerine GPT2'nin kullanılmasının jeofiziksel çalışmalarda daha anlamlı sonuçlar vereceği ifade edilmektedir.

Zus vd. (2014), NWM verilerini kullanarak eğik gecikmeleri hesaplayabilmek için daha hızlı bir ışın izleme (ray-tracing) algoritması geliştirmiştir. Bu algoritma sayesinde yeryüzü üzerindeki herhangi bir nokta için eğik ve başucu yönündeki gecikmeler hesaplanabilmektedir. Ayrıca, bu algoritma ile elde edilen gecikmeler yardımıyla istasyon özelinde direkt iz düşüm (direct mapping) yöntemiyle iz düşüm fonksiyonu belirlenebilmektedir. Potsdam Mapping Function (PMF) olarak isimlendirilen bu iz düşüm fonksiyonunun, VMF1 ve VMF1 stratejisi ile üretilen diğer iz düşüm fonksiyonları ile uyuştuğu belirtilmiştir.

Tesmer vd. (2007), farklı iz düşüm fonksiyonlarının yersel referans çerçeveleri (Terrestrial Reference Frames, TRF), göksel referans çerçeveleri (Celestial Reference Frames, CRF) ve istasyon konum bilgileri üzerine etkisini incelemiştir. VLBI çözümlerinin kullanıldığı bu çalışmada iz düşüm fonksiyonlarının CRF üzerine bir etkisi olmadığı, ancak TRF çözümlerinde anlamlı farklar olduğu belirtilmiştir. Farklı iz düşüm fonksiyonlarının yatay bileşeni 1.4 mm'ye kadar, düşey bileşeni ise 13 mm'ye kadar etkilediği gösterilmiştir. Ayrıca, en büyük farklılıkların VMF1 ve NMF arasında olduğu ve tekrarlılıklardan elde edilen en iyi doğruluk değerlerinin VMF1 ile elde edildiği ifade edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, genel olarak VMF1'in diğer iz düşüm fonksiyonlarından daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. VMF1'in dışında yine aynı strateji ile ancak farklı NWM veri setleri ile üretilmiş UNB-VMF1

(Santos vd., 2012; Urquhart vd., 2014) ve GFZ-VMF1 (Zus vd., 2015) gibi iz düşüm fonksiyonları da tercih edilmektedir. Örneğin Nikolaidou vd. (2018), NWM verileri ile üretilmiş iz düşüm fonksiyonlarının (VMF1, UNB-VMF1) GPS ve VLBI çözümleri üzerine etkisini irdelemiştir. GPS çözümlerinden elde edilen ıslak bileşen gecikme farklarının, kuru bileşenin yaklaşık 2 katı olduğu vurgulanmıştır. VLBI çözümlerinde ise istasyon bazında 2.5 cm'ye varan farkların olduğu ifade edilmiştir.

Deo ve El-Mowafy (2019), troposfer modellerinin (GPT2, GPT2w) ve NWM verilerinin (Australian Bureau of Meteorology-BoM, ECMWF), başucu yönündeki toplam gecikme (Zenith Total Delay, ZTD) değerleri üzerine etkisini incelemiştir. Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS) tarafından üretilen ZTD değerlerinin referans alındığı bu çalışmada, NWM verileri ile üretilen ZTD doğrulukların daha yüksek olduğu belirtilmiştir. GPT2w'nin ise GPT2'den daha doğru sonuçlar ürettiği vurgulanmıştır.

Du vd. (2020) ZTD değerini elde etmek için GPT2w'nin geliştirilmiş versiyonu olan IGPT2w'yi önermektedir. IGPT2w modelinde; GPT2w'den elde edilen ZTD değerleri ile GNSS çözümlerinden elde edilen ZTD değerleri ile arasındaki farklar modellenmektedir. Daha sonra bu modelden elde edilen düzeltme değeri GPT2w'den elde edilen ZTD değerine eklenerek nihai ZTD değeri hesaplanmaktadır. Bu çalışmada IGPT2w ile daha yüksek doğruluğa ulaşıldığı ifade edilmiştir.

Sezer vd. (2022) iz düşüm fonksiyonlarının GNSS ağ çözümlerine etkisini incelemiştir. Farklı baz uzunluklarına sahip üç farklı GNSS ağı; NMF, GMF ve VMF1 kullanılarak analiz edilmiş ve iz düşüm fonksiyonlarının istasyonların yatay konum değerlerine anlamlı bir etkisinin olmadığını, ancak düşey bileşeni etkilediği ve özellikle baz uzunluğunun büyük olduğu ağlarda iz düşüm fonksiyonlarının seçiminin sonuçları etkileyebileceği belirtilmiştir.

İz düşüm fonksiyonlarının belirlenebilmesi için düşey profil boyunca atmosfer parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle fonksiyonlar, RS veya NWM verileri kullanılarak oluşturulmaktadır. Ancak literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, her ne kadar RS verilerinin doğruluğu daha yüksek olsa da, NWM verileri kullanılarak oluşturulan fonksiyonların daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında, ECMWF'nin ERA5 veri seti kullanılmıştır. ERA5 gerek küresel anlamda veri sağlayabilmesi gerek de zamansal

ve konumsal çözünürlüğünün yüksek olması sebebiyle araştırmacılar tarafından da tercih edilmektedir. Örneğin, Zhang vd. (2019a), 1 saatlik zamansal çözünürlüğe sahip ERA5 verilerinden elde edilen yağışa dönüşebilir su buharı (Precipitable Water Vapor, PWV) bilgisinin kullanılabilirliğini araştırmıştır. ERA5 ve ERA-Interim verilerinin yersel meteorolojik istasyonlardan elde edilen değerlerle karşılaştırıldığı bu çalışmada, ERA5'ten elde edilen basınç değerlerinin ERA-Interim verilerine göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, ERA5 ile elde edilen PWV değerlerinin yersel gözlemlerden elde edilen değerlerle uyuştuğu ve ERA5'in PWV'nin belirlenmesine yüksek katkı sağlayacağı belirtilmiştir. Zhou vd. (2020), NWM verilerinin troposferik gecikme değerlerinin belirlenmesi üzerine etkisini incelemiştir. ECMWF'nin ERA-Interim ve ERA5 verilerinin kullanıldığı bu çalışmada, 1 saatlik çözünürlükle elde edilen ZTD değerlerini, IGS tarafından yayınlanan ZTD değerleri ile karşılaştırmıştır. ERA5 verileri ile elde edilen ZTD değerlerinin doğruluğunun, ERA-Interim sonuçlarına göre %20.3 daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, ERA5 sonuçlarının ortalama hatalarının da ERA-Interim'e göre %48.4 daha iyi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, ERA5'in de gerek küresel anlamda atmosferik parametreleri sağlıyor olması gerek de zamansal ve konumsal çözünürlüğünün yüksek olması sebebiyle model ve fonksiyonların üretilmesinde kullanılabilir olduğu görülmektedir. Zus vd. (2015) ERA5 kullanılarak üretilen GFZ-VMF1 ile PMF sonuçlarını karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, VMF1 stratejisi ile üretilen iz düşüm fonksiyonlarının düşük uydu yükseklik açısına sahip gözlemlerin dahil edildiği çözümlerde istasyon yüksekliklerinde sistematik hatalara neden olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle bu tez çalışmasında Türkiye için iz düşüm fonksiyonu belirlenirken, VMF1 veya benzeri bir strateji yerine istasyon özelinde ve direkt iz düşüm yöntemi tercih edilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Kullanıcılar tarafından sıklıkla tercih edilen iz düşüm fonksiyonları incelendiğinde; kullanılan veri türü, zamansal ve konumsal çözünürlükleri ve üretilme stratejisi gibi farklılıklar göze çarpmaktadır. Ayrıca, yıllık ve yarı yıllık etkilerin göz önüne alınmadığı durumlarda, bölgesel yükseklik hatalarına neden olduğu görülmektedir (Böhm vd., 2006b). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde VMF1 ile genellikle daha yüksek doğruluk elde edilmesine rağmen düşük uydu yükseklik açısına sahip

gözlemlerin dahil edildiği çözümlerde istasyon yüksekliklerinde sistematik hatalara neden olduğu göz önüne alındığında, iz düşüm fonksiyonlarının güncel meteorolojik değerler dikkate alınarak üretilmesi gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, mevcut troposfer modelleri incelendiğinde; ilgili modellerin de gerek çıktı verisi gerek de zamansal ve konumsal çözünürlük ve doğruluk açısından avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülmektedir. Yıllık, yarı yıllık ve günlük değişim gibi faktörler troposfer modellerinin doğruluğunu etkilemektedir (Lagler vd., 2013; Xu vd., 2020).

Hem troposfer ve troposferik gecikme modellerinin hem de iz düşüm fonksiyonlarının GNSS çözümlerinden elde edilen konum doğruluklarını ve başucu ıslak gecikme değerini ve buna bağlı olarak su buharı bilgisini etkilediği görülmektedir. GNSS ile elde edilen su buharı bilgisinin ve troposfer modellerinin iklim değişikliği çalışmaları için önemi düşünüldüğünde; Türkiye için doğruluğu yüksek bir iz düşüm fonksiyonunun ve troposfer modelinin, güncel meteorolojik parametreler dikkate alınarak belirlenmesi gerektiği bu tez çalışmasının ana motivasyonunu oluşturmaktadır.

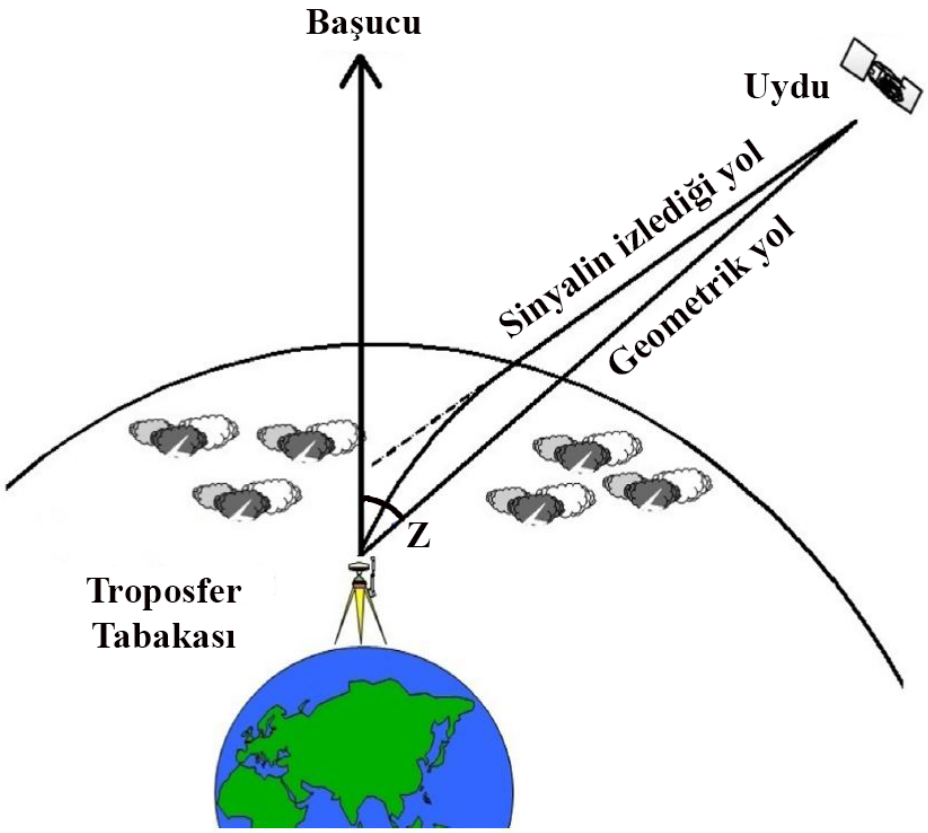
1.3 Hipotez

Atmosfer kütlesinin %75-80'ini ve atmosferdeki su buharının neredeyse tamamını içeren troposfer, içeriğindeki kuru hava ve su buharından dolayı GNSS sinyallerinde 30 m'ye varan gecikmelere neden olmaktadır. GNSS ile hassas konum belirleme için bu gecikmelerin giderilmesi gerekmektedir. Troposferik gecikmelerin giderilebilmesi için önsel gecikme değeri ile beraber eğik gecikmeler ile başucu yönündeki gecikmeler arasındaki ilişkiyi sağlayan iz düşüm fonksiyonları da çözüme dahil edilmektedir. Literatürdeki iz düşüm fonksiyonları ve önsel gecikme değerinin elde edilmesini sağlayan troposfer modelleri incelendiğinde, gerek zamansal ve konumsal çözünürlükleri gerek de doğrulukları bakımından farklılıklar görülmektedir. Güncel meteorolojik parametreler kullanılarak üretilen iz düşüm fonksiyonları (VMF1 ve PMF gibi) ile daha yüksek doğruluğa sahip sonuçların elde edildiği göz önüne alındığında, küresel ölçekte veri sağlayan zamansal ve konumsal çözünürlüğü yüksek bir NWM olan ERA5 kullanılarak direkt iz düşüm yöntemiyle üretilecek bir iz düşüm fonksiyonu ve troposfer modeli ile daha yüksek doğruluğa sahip sonuçlar elde edilebilecektir. Ayrıca, fonksiyonların belirlenmesi aşamasında, troposferik gecikme modeline eklenecek ek bir parametre yardımıyla modifiye

edilmiş iz düşüm fonksiyonu belirlenebilir. Elde edilen yeni fonksiyon ile klasik yaklaşıma göre istasyon yüksekliği ve başucu yönündeki ıslak gecikme değeri gibi bilinmeyenlerin hatası azalacaktır.

2
TROPOSFERİK GECİKME

Atmosferin en alt tabakası olan ve tüm hava olaylarının gerçekleştiği troposfer, içeriğindeki kuru hava ve su buharından dolayı GNSS ve VLBI gibi uzay jeodezisi tekniklerinde sinyallerin gecikmesine neden olmaktadır. Kuru hava ve su buharı, sinyalleri farklı şekilde kırmaktadırlar. Bu kırılmalar sinyallerin bükülmesine ve alıcıya daha geç ulaşmasına neden olmaktadır. Şekil 2.1'de sinyalin izlemesi gereken yol (geometrik yol) ve izlediği yol gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Troposferik gecikme. Mohammed vd. (2018)'den alınarak düzenlenmiştir.

Kuru hava ve su buharına bağlı gecikmeler kuru (hidrostatik) ve ıslak gecikme olarak ikiye ayrılmaktadır. Her ne kadar başucu yönündeki kuru gecikme (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) değeri istasyonun basınç değeri kullanılarak Saastamoinen (1972) veya Davis vd. (1985)'in eşitlikleri ile doğru bir şekilde belirlenebilse de; ZWD, atmosferdeki nem alanının (su buharının) hem zamansal hem de konumsal

ani ve düzensiz değişiminden dolayı ampirik yaklaşımlarla doğru bir şekilde belirlenemez, modellenmesi gerekir. Tez çalışmasının bu bölümünde ise troposferik gecikme modelinden ve meteorolojik parametreler yardımıyla troposferik gecikmelerin nasıl hesaplandığından bahsedilecektir. Ayrıca, önsel troposferik gecikme değerinin elde edilmesini sağlayan ve bu tez çalışması kapsamında Türkiye için oluşturulan troposfer modeli ve modeldeki eşitlikler anlatılacaktır.

2.1 Troposferik Gecikme Modeli

Troposferik gecikme T aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$T = \int_S n(s)\, ds - G \tag{2.1}$$

Burada; s sinyalin izlediği yolun ark mesafesini, n kırınım indisini ve G uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafeyi ifade etmektedir. Kırınım indisi, kuru ve ıslak kırınım değerleri ile ilişkili olduğundan;

$$n = 10^{-6}N + 1 \tag{2.2}$$

şeklinde ifade edilirse T aşağıdaki gibi yazılabilir. Burada; N toplam kırınım değerini ifade etmektedir.

$$T = \int_S [10^{-6}N(s) + 1]\, ds - G = \int_S 10^{-6}N(s)\, ds + \int_S ds - G \tag{2.3}$$

Toplam kırınım değeri de kuru ve ıslak bileşen için Eşitlik 2.4'teki şekliyle ayrı ayrı yazılabilir.

$$N = N_h + N_w \tag{2.4}$$

Burada; N_h ve N_w sırasıyla kuru ve ıslak bileşen için kırınım değerlerini göstermektedir. Eşitlik 2.3 ve 2.4 dikkate alınırsa T gecikme değeri;

$$T = 10^{-6} \int_S [N_h(s) + N_w(s)]\, ds + S - G \tag{2.5}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, S sinyalin gerçekte izlediği yolun toplam mesafesini ifade etmektedir. Toplam durumunda bulunan kuru ve ıslak bileşen

kırınım değerleri için integraller ayrı ayrı yazılır ve eşitlik düzenlenirse T gecikme değeri için (2.6) eşitliği elde edilir.

$$T = 10^{-6} \int_S N_h(s)\, ds + 10^{-6} \int_S N_w(s)\, ds + S - G \tag{2.6}$$

Kırınım değerleri; sıcaklık, basınç ve su buharına bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilebilir. Bu değerlerin hesaplanabilmesi için de düşey profil boyunca meteorolojik parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenden dolayı, kırınım değerleri RS veya NWM verileri kullanılarak hesaplanmaktadır. RS gözlemleri günde iki defa (0 ve 12 UTC) ve görece az sayıda istasyonda gerçekleştirilmektedir. NWM verileri ise yüksek zamansal çözünürlüğe sahip 3 boyutlu (3B) meteorolojik parametre bilgisi sağlayabilmektedir. Literatürdeki çalışmalar, NWM verileri ile üretilen model ve fonksiyonların doğrululuğunu artırdığını göstermektedir. Bu bağlamda bu tez çalışmasında ECMWF tarafından üretilen ERA5 veri setinin 1 saatlik zamansal çözünürlüğe sahip hem yüzey hem de profil verisi kullanılmıştır (Tablo 2.1). ERA5, grid veri formatında 0.25° konumsal çözünürlükte veri sağlamaktadır (C3S, 2017; Hersbach vd., 2020).

Tablo 2.1 ERA5 ile elde edilen meteorolojik parametreler

Veri Tipi	**Parametreler**
Yüzey verisi	Basınç (Pa)
	Yüzey sıcaklığı (K)*
	Doyma noktası sıcaklığı (K)*
	Jeopotansiyel değer (m^2s^{-2})
Profil verisi	Sıcaklık (K)
	Nem (kg/kg)
	Bağıl nem (%)
	Jeopotansiyel değer (m^2s^{-2})

*Yüzeyin 2 metre üstündeki değerler elde edilmektedir.

Kuru ve ıslak kırınım değerlerinin (N_h ve N_w) hesaplanabilmesi için su buharı basıncının bilinmesi gerekmektedir. Tablo 2.1'den de görülebileceği üzere ERA5 ile su buharı bilgisi doğrudan elde edilememektedir. Su buharı bilgisi yüzey verileri için Zhang vd. (2019b)'de yer alan eşitlik ile;

$$\mathrm{e} = 6.112 \times \exp\left(\frac{17.67 \times t_d}{t_d + 243.5}\right) \tag{2.7}$$

şeklinde elde edilmiştir. Burada, e su buharı basıncını (mbar) ve t_d doyma noktası sıcaklığını (°C) ifade etmektedir. Wallace ve Hobbs (2006) ve Nafisi vd. (2012) basınç ve nem değerleri bilindiği takdirde, su buharı basıncının Eşitlik 2.8'deki gibi belirlenebileceğini göstermiştir. ERA5 profil verileri nem bilgisi sağladığından, profil verileri için su buharı basıncı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\mathrm{e} \cong \frac{Q\mathrm{P}}{\frac{M_w}{M_d} - \left(1 - \frac{M_w}{M_d}\right) Q} \tag{2.8}$$

Burada, Q nem değerini (kg/kg), P basıncı (mbar) ve M_w ve M_d ise sırasıyla su buharı ve kuru havanın molar kütlelerini (kg/kmol) ifade etmektedir.

Kuru ve ıslak kırınım değerleri (2.9) ve (2.10) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$N_h = k_1 \frac{M_d}{R} \rho \tag{2.9}$$

$$N_w = k_2' \frac{\mathrm{e}}{t} + k_3 \frac{\mathrm{e}}{t^2} \tag{2.10}$$

Burada, k_1, k_2' ve k_3 Thayer (1974) tarafından ampirik olarak belirlenmiş kırınım katsayılarını, R genel gaz sabitini, t sıcaklığı (K) ve ρ toplam hava yoğunluğu ifade etmektedir. ρ aşağıdaki eşitlikler ile elde edilebilir.

$$\rho_d = (\mathrm{P} - \mathrm{e}) \frac{M_d}{R} \frac{1}{t} \tag{2.11}$$

$$\rho_w = \mathrm{e} \frac{M_w}{R} \frac{1}{t} \tag{2.12}$$

$$\rho = \rho_d + \rho_w \tag{2.13}$$

Burada, $\rho_d$ve ρ_w sırasıyla kuru ve ıslak hava yoğunluğunu ifade etmektedir. (2.7) ile (2.13) arası eşitlikler göz önüne alındığında, kuru hava ve su buharı kaynaklı troposferik gecikmeler ($T_h$ve T_w) için;

$$T_h = 10^{-6} \int_S N_h(s)\, ds + S - G \tag{2.14}$$

$$T_w = 10^{-6} \int_S N_w(s)\, ds \tag{2.15}$$

eşitlikleri yazılabilir. (2.14) eşitliği dikkatli bir şekilde incelenecek olursa, kuru gecikmenin sadece kuru hava kaynaklı troposferik gecikmeyi değil aynı zamanda geometrik gecikmeyi de içerdiği görülmektedir.

Troposferik gecikmeler her ne kadar sinyal yolu boyunca gerçekleşse de, GNSS ve VLBI gibi uzay jeodezisi tekniklerinde bu gecikmeler başucu yönünde hesaplanmaktadır. Eğik gecikmeler ve başucu yönündeki gecikmeler arasındaki ilişki iz düşüm fonksiyonları ile sağlanmaktadır. İz düşüm fonksiyonları, Marini (1972)'nin sürekli kesir modeli göz önüne alınan Herring (1992) tarafından geliştirilmiş sürekli kesir modelinin katsayılarının belirlenmesi ile oluşturulmaktadır (Eşitlik 2.16).

$$\mathrm{MF} = \frac{1 + \dfrac{a}{1 + \dfrac{b}{1 + c}}}{\sin(e) + \dfrac{a}{\sin(e) + \dfrac{b}{\sin(e) + c}}} \tag{2.16}$$

Burada; a, b ve c iz düşüm fonksiyonu katsayılarını ve e uydu yükseklik açısını ifade etmektedir. Bu eşitlikte yer alan iz düşüm fonksiyonu katsayıları doğrusal olmayan EKK yöntemiyle belirlenmektedir. Bu tez çalışmasında ise katsayılar belirlenirken, Zus vd. (2021) yer alan strateji izlenmiştir. İz düşüm fonksiyonlarının belirlenmesi aşamaları Bölüm 3'te ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Eşitlik 2.16 incelendiğinde, iz düşüm fonksiyonlarının azimuttan bağımsız ve sadece uydu yükseklik açısına bağlı olduğu görülmektedir. Bu durumda GNSS çözümlerinde troposferik gecikme modeli aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılabilir.

$$T(e, \alpha) = T(e) + \cdots \tag{2.17}$$

Burada; α azimut açısını, $T(e, \alpha)$ farklı azimut altındaki atmosferik koşulların dikkate alındığı durumdaki troposferik gecikmeyi, $T(e)$ ise atmosferin küresel ve simetrik olduğu varsayıldığı durumdaki troposferik gecikmeyi ifade etmektedir. Bu modelde $T(e)$ gecikme değeri iz düşüm fonksiyonlarını içermektedir.

$$T(e) = \mathrm{MF_h} \times \mathrm{ZHD} + \mathrm{MF_w} \times \mathrm{ZWD} \tag{2.18}$$

Bu eşitlikte, $\mathrm{MF_h}$ ve $\mathrm{MF_w}$ sırasıyla kuru ve ıslak bileşen için iz düşüm faktörünü ifade etmektedir. GNSS uydularından yayılan sinyaller, farklı eğim açıları ve farklı yönlerden gelerek alıcıda toplanmaktadır. Her ne kadar iz düşüm fonksiyonları yardımıyla atmosferin (troposferin) simetrik etkileri modellenebilse de, azimut açısına bağlı asimetrik etkilerin de troposferik gecikme modeline dahil edilmesi gerekmektedir. Bu etkiler, troposferik gradyentlerin troposferik gecikme modeline dahil edilmesi ile modellenmesi esasına dayanmaktadır (Chen ve Herring, 1997). Troposferik gradyentlerin gecikme modeline dahil edilmesi ile (2.17) eşitliği;

$$T(e,\alpha) = T(e) + m_g(e)[N_G \cos\alpha + E_G \sin\alpha] + \cdots \tag{2.19}$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $m_g(e)$ uydu yükseklik açısına bağlı olan gradyent iz düşüm fonksiyonunu, N_G ve E_G sırasıyla kuzey-güney ve doğu-batı gradyentlerini ifade etmektedir. Gradyent iz düşüm fonksiyonu;

$$m_g(e) = \frac{1}{\sin(e)\tan(e) + C} \tag{2.20}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte C değeri kuru bileşen için 0.0031, ıslak bileşen için 0.0006 olarak seçilmektedir (Chen ve Herring, 1997).

(2.19) eşitliği, (2.18) eşitliği göz önüne alınarak yeniden yazılırsa;

$$T(e,\alpha) = \mathrm{MF_h} \times \mathrm{ZHD} + \mathrm{MF_w} \times \mathrm{ZWD} + m_g(e)[N_G \cos\alpha + E_G \sin\alpha] \tag{2.21}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik, mevcut literatürde tercih edilen troposferik gecikme modeli olarak ifade edilebilir. Daha önce de ifade edildiği gibi, eşitliğin sağ tarafında yer alan ZHD değeri literatürde yer alan ampirik yaklaşımlar yardımıyla doğru bir şekilde elde edilebilmektedir (Ör. Saastamoinen, 1972). GNSS çözümlerinde ise ZHD değerleri önsel troposferik gecikme değeri olarak kullanılmaktadır. Bu bilgiler ışığında troposferik gecikme modelinin hem iz düşüm fonksiyonlarını hem de önsel troposferik gecikme değerlerinin elde edilmesini sağlayan troposfer modellerini içerdiği ifade edilebilir.

2.2 Troposfer Modeli

GNSS ve VLBI gibi uzay jeodezisi tekniklerinde, ZHD değerleri önsel troposferik gecikme değeri olarak kullanılmaktadır. Tunalı ve Özlüdemir (2019), daha doğru önsel gecikme değerleri kullanılmasının PPP tekniğinin doğruluğunu artırdığını

vurgulamıştır. Bu bağlamda en uygun ve en doğru önsel gecikme değerinin kullanılması ile hem konum hem de ZWD değerlerindeki hataların azalabileceği belirtilebilir. Bir istasyon için ZHD değeri, atmosferik basınç değeri bilindiği takdirde Saastamoinen (1972) ve Davis vd. (1985)'te yer alan eşitliklerle aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\mathrm{ZHD} = \frac{0.0022768 \times \mathrm{P}}{1 - 0.00266 \times \cos 2\varphi - 0.28 \times 10^{-6} h} \tag{2.22}$$

Burada, φ ve h sırasıyla ilgili istasyonun enlem değerini ve elipsoidal yüksekliğini (metre) ifade etmektedir. Doğruluğu yüksek ZHD değerinin elde edilebilmesi için gözlem anında istasyonun bulunduğu konumda basınç değerinin ölçülmesi gerekmektedir. Ancak, her noktada ve her an meteorolojik gözlemlerin yapılması mümkün değildir. Standart atmosferik parametrelerin kullanılması da elde edilen parametrelerin doğruluğunu düşürmektedir (Xu vd., 2020). Bu nedenle araştırmacılar birçok troposfer modeli geliştirmiştir. Ancak literatürdeki modeller incelendiğinde, modellerin kullanılan veri türü, zamansal ve konumsal çözünürlükleri, yıllık, yarı yıllık ve günlük etkilerin dikkate alınıp alınmadığı gibi farklılıkları göze çarpmaktadır. Troposfer modellerine ek olarak, NWM verileri ile de doğrudan ZHD değerleri elde edilebilmektedir. Deo ve El-Mowafy (2019) NWM verileri ile elde edilen ZTD değerlerinin karşılaştırma yapılan troposfer modellerine göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca, Zus vd. (2021) NWM verileri ile üretilen ZHD değerlerinin kullanıldığı durumda, ZTD ve yükseklik bileşenindeki hataların düştüğünü göstermiştir. Bu durumda, GNSS çözümlerinde önsel gecikme değerlerinin NWM verilerinden elde edilmesi gerektiği ifade edilebilir. Ancak Steigenberger vd. (2009), karasal olmayan atmosferik yüklemelerin (non-tidal atmospheric loading) dikkate alınmadığı durumda troposfer modelleri kullanılarak elde edilen ZHD değerlerinin kullanılması gerektiğini göstermiştir. Bu bağlamda, NWM verilerinin yanı sıra doğruluğu yüksek bir troposfer modelinin de GNSS çözümlerine katkı sağlayacağı görülmektedir. Bu çalışmada Türkiye için doğruluğu yüksek bir troposfer modelinin de geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu model ile basınç (mbar), sıcaklık (°C), su buharı basıncı (mbar), sıcaklık değişim oranı (°C/km), su buharı değişim faktörü, nem (kg/kg), ağırlıklı ortalama sıcaklık (K) ve başucu yönündeki kuru ve ıslak gecikme değerlerinin

üretilmesi planlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar NWM verileri ile üretilen modellerin doğruluğunun daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda ECMWF tarafından üretilen ERA5 veri setinin hem yüzey hem profil verileri kullanılmıştır. ERA5 ile günlük ve 1 saatlik çözünürlükteki verilerin yanı sıra hem aylık ortalama hem de günün her saati için aylık ortalama verileri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada 2015-2019 yılları arasındaki 5 yıllık veri setinin 1° konumsal çözünürlükteki günlük verileri ile her saat için aylık ortalama verileri karşılaştırılmış ve nihai model belirlenmiştir. Türkiye için oluşturulan bu model 20°-50° doğu boylamları ve 30°-50° kuzey enlemleri arasında kalan bölge için geçerlidir.

Türkiye için oluşturulan modelin, model doğruluğunun artırılması için yıllık ve yarı yıllık etkilerin yanı sıra günlük etkiler de dikkate alınmıştır. Ayrıca bu etkilerin hem sinüzoidal hem de kosinüzoidal formları modele dahil edilmiştir (Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.24).

$$A = A_0 + A_1\cos\left(\frac{DOY}{365.25}2\pi\right) + A_2\sin\left(\frac{DOY}{365.25}2\pi\right) + A_3\cos\left(\frac{DOY}{365.25}4\pi\right) + A_4\sin\left(\frac{DOY}{365.25}4\pi\right) \quad (2.23)$$

$$A_i = B_0 + B_1\cos\left(\frac{HOD}{24}2\pi\right) + B_2\sin\left(\frac{HOD}{24}2\pi\right) \quad (2.24)$$

Burada, A her bir troposferik parametreyi (Ör. basınç, sıcaklık ve su buharı basıncı), A_0 ortalama değeri, A_1 ve A_2 yıllık etkileri ve A_3 ve A_4 yarı yıllık etkileri ifade etmektedir. Ayrıca, her bir A_i parametresi günlük etkileri de içermektedir. B_0 günlük ortalamaları, B_1 ve B_2 günlük etkileri ve HOD günün saatini göstermektedir.

Model oluşturulurken basınç ve sıcaklık gibi her bir parametre 1° konumsal çözünürlükteki her bir grid noktası için ayrı ayrı modellenmiştir. Ayrıca, ERA5 profil verileri üretilirken yüzeyin altındaki profil verileri ekstrapole edildiğinden (URL-1), bu ekstrapolasyon kaynaklı olası hataları en aza indirmek için sadece yüzey ve yüzeyin üstünde yer alan profil verileri kullanılmıştır.

Sıcaklık ve basınç gibi parametreler yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle bu parametreler belirli referans yükseklik değerleri için modellenmelidir.

ERA5 ile jeopotansiyel değerler elde edilebilmektedir. Ancak bu değerlerden ortometrik yüksekliklere geçiş yapılması gerekmektedir.

Jeoptansiyel yükseklik değeri Eşitlik 2.25'teki gibi hesaplanabilmektedir.

$$H_D = \frac{C}{g_n} \tag{2.25}$$

Burada, H_D jeopotansiyel yüksekliği (m), C jeopotansiyel sayıyı (m^2s^{-2}) ve g_n normal gravite değerini (9.80665 ms^{-2}) ifade etmektedir. Hobiger vd. (2008) ise ilgili noktadaki ortalama gravite değeri bilindiği takdirde ortometrik yükseklik değerinin Eşitlik 2.26'daki gibi hesaplanabileceğini göstermiştir.

$$H_{ort} = \frac{C}{\bar{g}(\varphi, \lambda, H_{ort})} \tag{2.26}$$

Burada, H_{ort} ortometrik yüksekliği, $\bar{g}$ ortalama gravite değerini ve λ ilgili istasyonun boylam değerini göstermektedir. Böhm vd. (2013) ortalama gravite değeri için boylam etkisi ihmal edildiğinde yukarıdaki eşitliğin aşağıdaki gibi yazılabileceğini ifade etmiştir.

$$H_{ort} = \frac{H_D g_n}{g(\varphi, {}^{H_{ort}}/_{2})} \tag{2.27}$$

Kraus (2001)'e göre g gravite değeri;

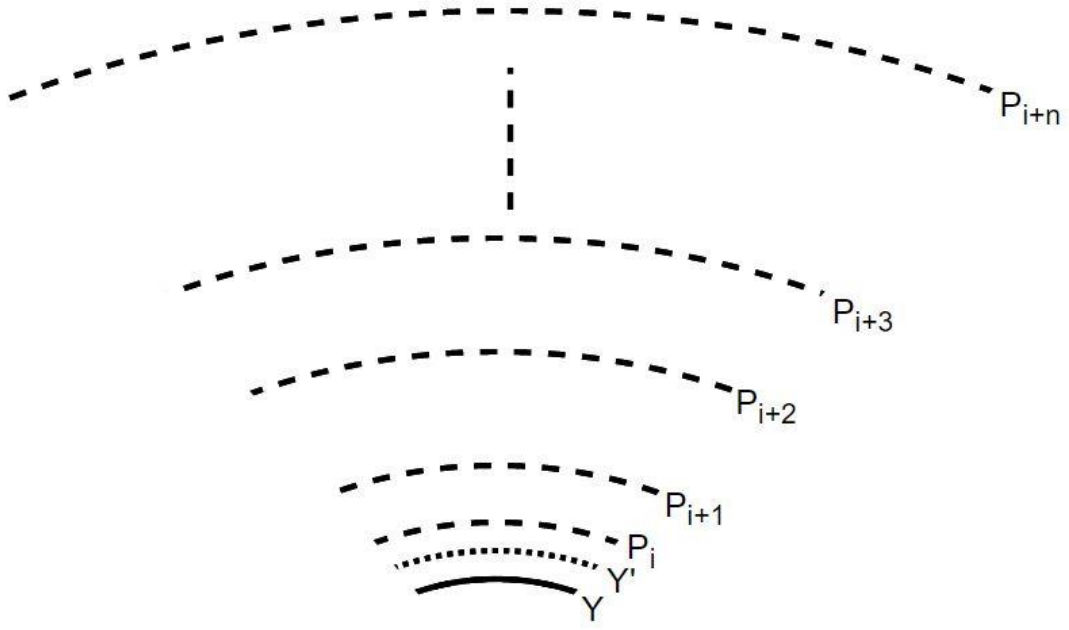
$$g(\varphi, H_{ort}) = g_n[1 - 0.0026373\cos 2\varphi + 0.0000059\cos^2 2\varphi] \times (1 - 3.14 \times 10^{-7} H_{ort}) \tag{2.28}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Her bir grid noktası için ortometrik yükseklikler belirlendikten sonra ilgili noktalar için EGM2008 modeli kullanılarak jeoit yükseklikleri de elde edilmiştir (Pavlis et al., 2012; URL-2). Bu sayede hem (2.22) eşitliği kullanılarak ZHD değeri hesaplanabilecek hem de elipsoidal yükseklik değerleri de kullanılarak herhangi bir nokta için model değerleri elde edilebilecektir.

ERA5 yüzey verileri ile basınç değeri yüzey yüksekliğinde elde edilebilse de, sıcaklık ve doyma noktası sıcaklıkları yüzeyin 2 metre üstündeki değerlerdir. Ayrıca, sıcaklık değişim oranı, su buharı değişim faktörü gibi değerlerin hesaplanabilmesi için yüzeyin üstündeki profil verilerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan dolayı model

oluşturulurken yüzey verilerine ek olarak ERA5 tarafından sağlanan profil verileri de kullanılmıştır (Şekil 2.2). Şekil 2.2'de Y yüzeyi Y' yüzeyin 2 metre üstündeki seviyeyi ve P ile ifade edilen seviyeler ise profil verilerini ifade etmektedir. Sıcaklık değişim oranı, su buharı değişim faktörü vb. parametreler belirlenirken P_{i+n} 300 mbar seçilmiştir. 300 mbar basınç seviyesi ~9-10 km yüksekliği ifade etmektedir. Bu seviyeden sonra sıcaklık değişim oranı değişmektedir. Aynı zamanda atmosferde yer alan su buharının çok büyük bir kısmı bu seviyenin altında yer almaktadır.



Şekil 2.2 Model için kullanılan veri profilleri

Y' seviyesindeki sıcaklık değerini yüzeye indirgemek için yüksekliğe bağlı sıcaklık değişim oranının hesaplanması gerekmektedir (Eşitlik 2.29).

$$\Delta t_j = \frac{t_j - t_{Y'}}{H_j - H_{Y'}}, \qquad j = i : i + n \tag{2.29}$$

Y' seviyesi ile her bir profil verisi arasındaki Δt_j sıcaklık değişim oranlarına Medyan analizi uygulanmış (Hampel vd., 2011) ve analiz sonrası ortalama değer nihai sıcaklık değişim oranı (Δt) olarak belirlenmiştir. Yüzeydeki sıcaklık değerini elde etmek için Eşitlik 2.30 kullanılmıştır.

$$t_Y = t_{Y'} + \Delta t(H_Y - H_{Y'}) \tag{2.30}$$

Yüzeydeki sıcaklık değeri elde edildikten sonra ise yine yüzey için su buharı değerinin hesaplanması aşamasına geçilmiştir. Bunun için öncelikle Y' seviyesi ve

her bir profil için (2.7) ve (2.8) eşitlikleri yardımıyla su buharı değerleri hesaplanmıştır. Yüzey için su buharı değeri doğrudan elde edilmediği için iteratif bir çözüm gerçekleştirilmiştir. İteratif çözüm sonrasında hem su buharı değişim faktörü hem de yüzeye ait su buharı bilgisi elde edilmiştir (Eşitlik 2.31-34).

İteratif çözüm için $\mathrm{P}_{Y'} = \mathrm{P}_Y$ alınarak;

$$L_j = \left(\log_{\mathrm{P}_j / \mathrm{P}_{Y'}} {}^{\mathrm{e}_j}/_{\mathrm{e}_{Y'}} \right) - 1, \quad j = i : i + n \tag{2.31}$$

eşitliği çözülürse, Y' seviyesi ile her bir profil verisi arasındaki L_j su buhar değişim faktörü değerleri hesaplanabilmektedir. Yine Medyan analizi sonrası ortalama değerler yardımıyla nihai su buhar değişim faktörü (L) belirlenebilir. Daha sonra ise L ve Y' seviyesindeki su buharı değeri yardımıyla yüzey için su buharı bilgisi elde edilebilmektedir (Eşitlik 2.32).

$$\mathrm{e}_Y = \mathrm{e}_{Y'} \times \left(\frac{\mathrm{P}_Y}{\mathrm{P}_{Y'}} \right)^{L+1} \tag{2.32}$$

Yüzey için su buharı bilgisi elde edildikten sonra Y' seviyesi için basınç değeri;

$$\mathrm{P}_{Y'} = \mathrm{P}_Y \times \exp\left(-g_n \frac{(H_{Y'} - H_Y)}{R_d t_v} \right) \tag{2.33}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, R_d kuru hava gaz sabitini ve t_v virtüel sıcaklığı ifade etmektedir. t_v değeri (2.34) eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$t_v = \frac{t_Y \mathrm{P}_Y}{\mathrm{P}_Y - \left(1 - \frac{M_w}{M_d}\right) \mathrm{e}_Y} \tag{2.34}$$

Eşitlik 2.31 ile Eşitlik 2.34 arasındaki işlem adımları iki iterasyon arasındaki e_Y farkları 0.0001 mbar'dan küçük oluncaya kadar tekrarlanır. Su buharı basıncı ve basınç değeri kullanılarak yüzey için nem değeri (Q_Y) aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$Q_Y = \frac{\frac{M_w}{M_d} \mathrm{e}_Y}{\mathrm{P}_Y - \left(1 - \frac{M_w}{M_d}\right) \mathrm{e}_Y} \tag{2.34}$$

Türkiye için oluşturulan troposfer modeli ile basınç, sıcaklık, su buharı basıncı ve nem değerleri ile sıcaklık değişim oranı ve su buharı değişim faktörünün yanı sıra ağırlıklı ortalama sıcaklık (t_m), ZHD ve ZWD değerleri de elde edilebilmektedir. Ancak bu değerler hesaplanırken 1 mbar seviyesine kadar olan tüm profil verileri kullanılmıştır. Askne ve Nordius (1987) ağırlıklı ortalama sıcaklık için Eşitlik 2.35'i önermektedir. Eşitlik 2.35 düzenlenip toplam formülü şeklinde yeniden yazılırsa Eşitlik 2.36 elde edilir.

$$t_m = \frac{\int_H^\infty {\mathrm{e}}/{t}\, dH}{\int_H^\infty {\mathrm{e}}/{t^2}\, dH} \tag{2.35}$$

$$t_m = \frac{\sum_{i=0}^{n} {\mathrm{e}H}/{t}}{\sum_{i=0}^{n} {\mathrm{e}H}/{t^2}} \tag{2.36}$$

Yukarıdaki eşitlikte "0" yüzeyi, n ise en üst seviyedeki profil verisini ifade etmektedir.

ZHD, modelden elde edilen basınç değeri kullanılarak (2.22) eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır. ZWD ise Askne ve Nordius (1987) ve Landskron ve Böhm (2018)'de yer alan aşağıdaki eşitlik yardımıyla elde edilmektedir.

$$\mathrm{ZWD} = 10^{-6} \times \left(k_2' + \frac{k_3}{t_m}\right) \times \frac{R_d \mathrm{e}}{g_n(L+1)} \tag{2.37}$$

Troposfer modeli oluşturulurken kullanılan sabitler ve birimleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir. Türkiye için troposfer modeli oluşturulurken basınç ve sıcaklık gibi her bir parametre 1° konumsal çözünürlükteki her bir grid noktası için ayrı ayrı modellenmiştir. Bu aşamada her bir grid noktası için grid yükseklikleri yüzey verilerinden elde edilmiştir. Oluşturulan model yardımıyla troposferik parametrelerin elde edilebilmesi için bu parametrelere ilgili hedef noktasının yüksekliğine bağlı olarak yükseklik düzeltmelerinin getirilmesi gerekmektedir. Sıcaklık, basınç ve su buharı basıncı için yükseklik düzeltmeleri sırasıyla (2.30), (2.33) ve (2.32) eşitlikleri ile gerçekleştirilmektedir. Hedef noktayı içine alan her bir grid noktası için parametreler hedef nokta yüksekliğine göre elde edildikten sonra ise 4 parametreli bir yüzey modeli oluşturularak hedef nokta için troposferik parametreler elde edilmektedir (Eşitlik 2.38).

$$A(\varphi,\lambda) = a_0 + a_1\varphi + a_2\lambda + a_3\varphi\lambda \quad (2.38)$$

Burada $A(\varphi,\lambda)$ modellenen her bir troposferik parametre için yüzey modelini ve a_i bu yüzey modelinin katsayılarını ifade etmektedir.

Tablo 2.2 Kullanılan sabitler (Thayer, 1974; Mendes, 1999)

Sabit	**Değer**
Genel Gaz Sabiti	$R = 8314.510\ \frac{J}{K\ kmol}\ \frac{kg\ m^2}{K\ kmol\ s^2}$
Kuru Havanın Molar Kütlesi	$M_d = 28.9644\ \frac{kg}{kmol}$
Su Buharının Molar Kütlesi	$M_w = 18.01528\ \frac{kg}{kmol}$
Kuru Hava Gaz Sabiti	$R_d = \frac{R}{M_d} = 287.0596\ \frac{m^2}{K\ s^2}$
Islak Hava Gaz Sabiti	$R_w = \frac{R}{M_w} = 461.5254\ \frac{m^2}{K\ s^2}$
Kırınım Katsayıları	$k_1 = 77.604 \pm 0.014 \frac{K}{mbar}$
	$k_2 = 64.79 \pm 0.08 \frac{K}{mbar}$
	$k_3 = (3.776 \pm 0.004)10^5 \frac{K^2}{mbar}$
	$k_2' = k_2 - k_1\frac{M_w}{M_d} = 16.521 \frac{K}{mbar}$

3
İZ DÜŞÜM FONKSİYONLARI

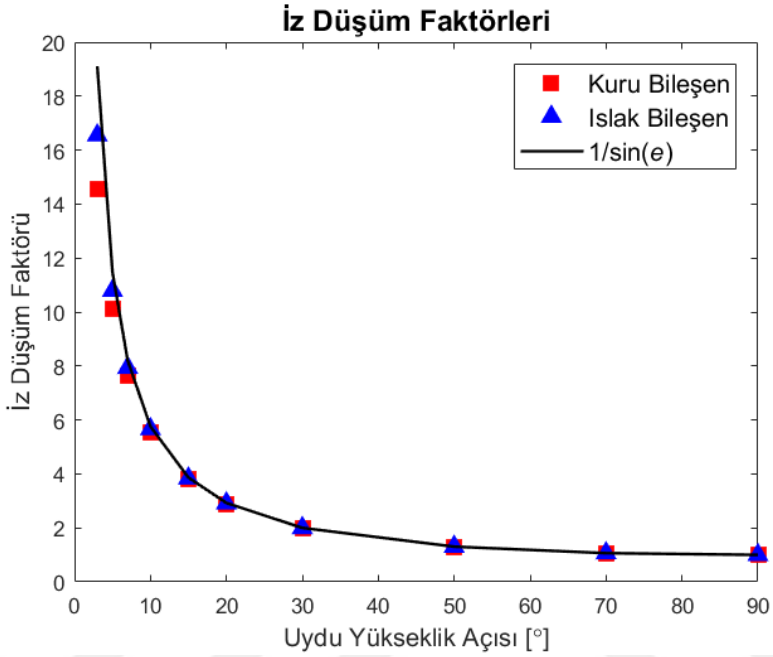
İz düşüm fonksiyonları, belirli uydu yükseklik açıları için hesaplanan iz düşüm faktörleri kullanılarak elde edilmektedir. İz düşüm faktörleri ise eğik gecikmeler ile başucu yönündeki gecikmelerin oranı şeklinde ifade edilebilir. Troposfer katmanında bulunan kuru hava ve su buharı sinyalleri farklı şekilde kırdığından, iz düşüm faktörleri de kuru ve ıslak bileşen için ayrı ayrı hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2).

$$\mathrm{MF_h} = \frac{T_h}{\mathrm{ZHD}} \tag{3.1}$$

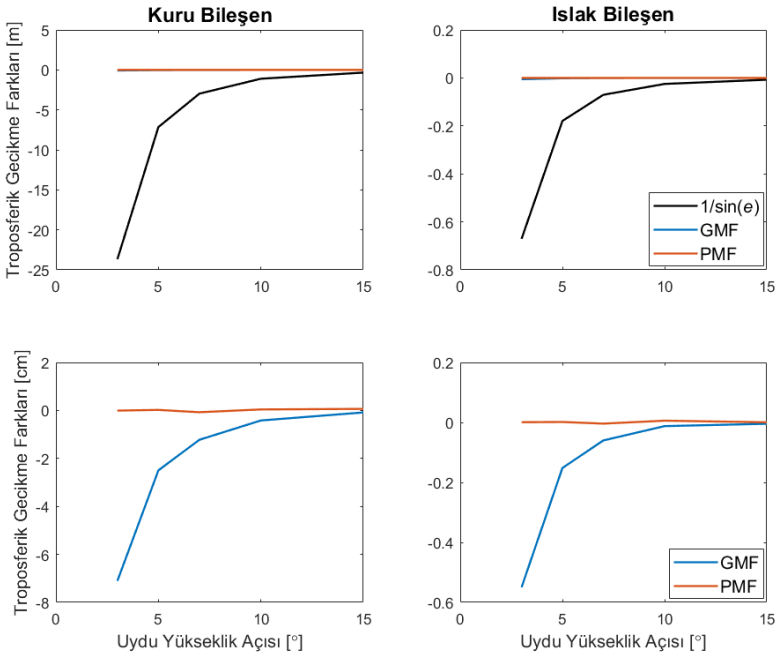
$$\mathrm{MF_w} = \frac{T_w}{\mathrm{ZWD}} \tag{3.2}$$

Burada T_h ve T_w sırasıyla kuru ve ıslak bileşen için eğik gecikmeleri ifade etmektedir. Bu değerler, (2.14) ve (2.15) eşitlikleri yardımıyla elde edilmektedir. Eşitlik 2.14 incelendiğinde T_h'nin kuru gecikme ile birlikte geometrik gecikme değerini de içerdiği görülebilmektedir. Troposferik gecikmelerin, sinyalin atmosferdeki geçirdiği süreye (aldığı toplam yola) bağlı olduğu göz önüne alındığında iz düşüm faktörlerinin de uydu yükseklik açısına bağlı değiştiği ifade edilebilir. Şekil 3.1'de $\varphi = 41°$, $\lambda = 29°$ grid noktasının kuru ve ıslak bileşen için ERA5 verilerinden (1 Temmuz 2021 0 UTC) elde edilen gecikme verileri yardımıyla hesaplanan iz düşüm faktörleri gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, iz düşüm faktörlerinin uydu yükseklik açısı arttıkça azaldığı görülmektedir. Başucu yönünde ($e = 90°$) ise "1" değerini almaktadır. Ayrıca hem kuru hem de ıslak bileşen için iz düşüm faktörlerinin $1/\sin(e)$ eğrisine uyduğu söylenebilir. Literatürdeki birçok çalışmada ise iz düşüm fonksiyonu olarak $1/\sin(e)$ seçilmektedir (Saastamoinen, 1973). Kuru ve ıslak iz düşüm faktörleri incelendiğinde ise, 15°'den daha yüksek uydu yükseklik açılarında değerlerin birbirlerine çok yaklaştığı ve özellikle düşük uydu yükseklik açılarında bu değerlerin bileşenler için ayrı ayrı belirlenmesi gerektiği söylenebilir. $1/\sin(e)$ eğrisi ile iz düşüm faktörleri arasındaki ilişki incelendiğinde ise yine düşük uydu yükseklik açılarında büyük farkların olduğu görülmektedir. Düşük uydu yükseklik açısına sahip gözlemlerin; istasyon yüksekliği, troposferik gecikme ve alıcı

saat hatası arasındaki korelasyonu düşürdüğü göz önüne alındığında (Rothacher vd., 1998; Masoumi vd., 2017), iz düşüm faktörlerindeki hatalar özellikle istasyon yüksekliğinde hatalara neden olabilmektedir. Şekil 3.2'de 15° ve 15°'den daha düşük uydu yükseklik açıları için $1/\sin(e)$ eğrisi, GMF ve PMF'den elde edilen eğik troposferik gecikme farkları gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Uydu yükseklik açısına bağlı iz düşüm faktörleri



Şekil 3.2 İz düşüm fonksiyonlarının karşılaştırılması

Şekil 3.2 incelendiğinde, $1/\sin(e)$ eğrisinin özellikle kuru gecikme için yaklaşık 25 m, ıslak gecikme içinse yaklaşık 80 cm'ye varan hatalara neden olduğu görülmektedir. Küresel ölçekte üretilen ve en sık tercih edilen iz düşüm fonksiyonlarından biri olan GMF ile bu hataların kuru ve ıslak gecikmeler için sırasıyla 8 cm ve 6 mm olduğu görülmektedir. Bu üç yaklaşım arasında en iyi sonuçlar PMF ile elde edilmiştir. Tablo 3.1'den de görülebileceği üzere bu hatalar mm altı seviyededir. Ancak, PMF'nin ERA5 kullanılarak üretildiği not edilmelidir. Yani karşılaştırma yapılan gecikme değerleri ile PMF üretilirken kullanılan gecikme değerleri aynı veri seti kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, karşılaştırma yapılan gecikme değerleri, azimut açısından bağımsız ve atmosferin (troposferin) küresel ve simetrik olduğu varsayımı altında üretilmiştir.

Tablo 3.1 GMF ve PMF ile elde edilen troposferik gecikme hataların karşılaştırılması (mm)

Uydu Yükseklik Açısı (°)	**Kuru Gecikme**		**Islak Gecikme**	
	GMF	**PMF**	**GMF**	**PMF**
3	-31.147	-0.031	-2.411	0.003
5	-10.950	0.097	-0.666	0.007
7	-5.360	-0.324	-0.263	-0.017
10	-1.834	0.182	-0.054	0.026
15	-0.365	0.288	-0.020	0.002

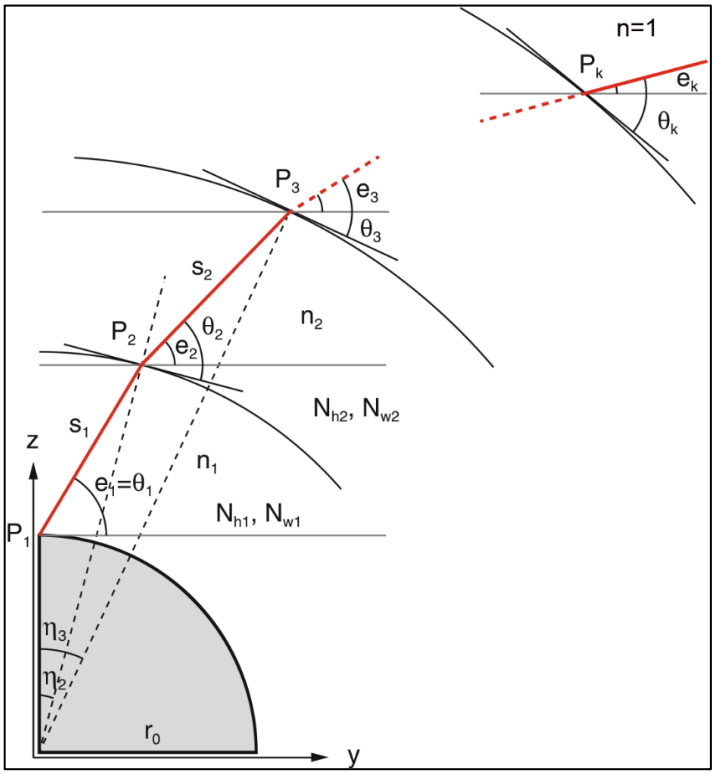
Zus vd. (2015) PMF ile yani direkt iz düşüm yöntemi ile üretilen iz düşüm fonksiyonu ile özellikle istasyon yüksekliklerindeki sistematik hataların azaldığını ve yine özellikle düşük uydu yükseklik açılarında GFZ-VMF1'e göre daha iyi sonuçlar üretildiğini göstermiştir. Bu nedenle bu tez çalışmasında iz düşüm fonksiyonları belirlenirken, istasyon özelinde ve direkt iz düşüm stratejisi tercih edilmiştir. Bu aşamada Zus vd. (2021)'deki adımlar izlenmiştir.

Literatürdeki iz düşüm fonksiyonları incelendiğinde, bu fonksiyonların Herring (1992)'nin sürekli kesir modelinin (Eşitlik 2.16) katsayılarının belirlenmesi prensibine dayandığı görülmektedir. Bu katsayıların belirlenebilmesi için belirli uydu yükseklik açıları için eğik gecikmelerin ve başucu yönündeki gecikme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu gecikmeler ışın izleme (ray-tracing)

yöntemiyle elde edilebilmektedir (Zus vd., 2014). Tez çalışmasının bu bölümünde basit hali ile bir ışın izleme algoritması, atmosferin küresel ve simetrik olduğu varsayımına dayanan iz düşüm fonksiyonunun matematiksel modeli ve bu çalışma kapsamında önerilen modifiye edilmiş iz düşüm fonksiyonu anlatılacaktır.

3.1 Işın İzleme Yöntemi

Işın izleme yöntemi temelde sinyallerin atmosferdeki izleyeceği yolu modellemek için kullanılmaktadır. Jeodezik çalışmalarda ise GNSS ve VLBI gibi uzay jeodezisi teknikleri için sinyallerin farklı sıcaklık, basınç ve nem gibi atmosferik koşullar altında nasıl etkilendiğini belirlemek için tercih edilmektedir. Bu sayede RS veya NWM verileri yardımıyla troposferik gecikme bilgisi elde edilebilmektedir. Ancak RS ölçümleri düşey bir profil boyunca yapıldığından, RS verileri ile 3B nem alanları üretilememektedir. Ayrıca RS gözlemleri günde iki defa gerçekleşmektedir (0 ve 12 UTC). Atmosferdeki su buharının (nem alanının) ani ve düzensiz değişimi göz önüne alındığında RS verileri yerine NWM verileri kullanılarak oluşturulan fonksiyonların daha yüksek doğruluğa sahip olacağı görülebilmektedir. Bu tez çalışmasında ECMWF'nin ERA5 verileri kullanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde basit hali ile ışın izleme yönteminin nasıl gerçekleştirildiği anlatılacaktır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Işın izleme. Nilson vd. (2013)'ten alınarak düzenlenmiştir.

Işın izleme yöntemi hem eğik hem de başucu yönündeki kuru ve ıslak gecikmeleri belirlemek için kullanılmaktadır. Bu gecikme değerlerini belirlemek için atmosfer (troposfer) katmanlara ayrılmaktadır (Böhm ve Schuh, 2003). Her bir katman için kuru ve ıslak kırınım değerleri hesaplanmaktadır (Eşitlik 2.9 ve Eşitlik 2.10). Ayrıca, hesaplanan kırınım değerleri yardımıyla kırınım indisinin belirlenmesi gerekmektedir (Eşitlik 2.2). Atmosferin k adet katmana bölündüğü varsayılırsa, bu durumda $k-1$ tabaka için kırınım değerleri ve kırınım indisi hesaplanır. Daha sonra üst ve alt katmanların kırınım değerlerinin ortalaması alınır. Bu yöntemde hem atmosferin hem de yerin şekli küre olarak düşünülür ve iki boyutlu eğri için her bir katman üzerindeki P_i noktalarının koordinatları ve bu noktalar arasındaki S_i kenar uzunlukları hesaplanır. P_1 ve P_2 noktalarının koordinatları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

Her bir katmanın yarıçap değerini hesaplamak için;

$$r_i = r_0 + h_i \qquad i = 1,2,\dots,k \tag{3.3}$$

eşitliği kullanılır. Burada h_i, tabaka kalınlıklarını ifade etmektedir. Işın izleme yöntemi belirli uydu yükseklik açıları için ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir. Başlangıç uydu yükseklik açısı değeri bilindiğinden;

$$\theta_1 = e_1 \tag{3.4}$$

olur ve ilk iki nokta arasındaki uzaklık kosinüs teoremi yardımıyla (3.5) eşitliği ile hesaplanır. P_1 noktasının z_1 ve y_1 koordinatları bilindiğinden (Eşitlik 3.6), P_2 noktasının koordinatları (3.7) eşitliği ile bulunur.

$$s_1 = -r_1 sin\theta_1 + \sqrt{r_2^2 - r_1^2 cos^2\theta_1} \tag{3.5}$$

$$z_1 = r_1\,, y_1 = 0 \tag{3.6}$$

$$z_2 = z_1 + s_1 sine_1\,, y_2 = y_1 + s_1 cose_1 \tag{3.7}$$

P_1 ve P_2 noktaları için yer merkezindeki açılar (η_i) Eşitlik 3.8'deki gibi elde edilmektedir. θ_2 ve e_2 açılarının elde edilebilmesi için Snell yasalarının uygulanması gerekmektedir (Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.10).

$$\eta_1 = 0\,, \eta_2 = arctan\frac{y_2}{z_2} \tag{3.8}$$

$$\theta_2 = arccos\left(\frac{n_1}{n_2} cos(\theta_1 + \eta_2)\right) \tag{3.9}$$

$$e_2 = \theta_2 - \eta_2 \tag{3.10}$$

İlk iki noktanın z_i ve y_i koordinatları hesaplandıktan sonra diğer noktaların koordinatları ve açı değerleri ile noktalar arasındaki kenar uzunlukları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$s_i = -r_i sin\theta_i + \sqrt{r_{i+1}^2 - r_i^2 cos^2\theta_i} \tag{3.11}$$

$$z_{i+1} = z_i + s_i sine_i \, , y_{i+1} = y_i + s_i cose_i \tag{3.12}$$

$$\eta_{i+1} = arctan\frac{y_{i+1}}{z_{i+1}} \tag{3.13}$$

$$\delta_{i+1} = \eta_{i+1} - \eta_i \tag{3.14}$$

$$\theta_{i+1} = arccos\left(\frac{n_i}{n_{i+1}} cos(\theta_i + \delta_{i+1})\right) \tag{3.15}$$

$$e_{i+1} = \theta_{i+1} - \eta_{i+1} \tag{3.16}$$

Katmanlar üzerindeki noktalar arası mesafeler belirlendikten sonra; kuru ve ıslak bileşenler için eğik gecikme ile başucu yönündeki gecikme değerleri toplama yöntemiyle hesaplanmaktadır.

$$\text{SHD} = \sum_{i=1}^{k-1} s_i N_{hi} \tag{3.17}$$

$$\text{SWD} = \sum_{i=1}^{k-1} s_i N_{wi} \tag{3.18}$$

$$\text{ZHD} = \sum_{i=1}^{k-1} dh_i N_{hi} \tag{3.19}$$

$$\text{ZWD} = \sum_{i=1}^{k-1} dh_i N_{wi} \tag{3.20}$$

Eşitlik 3.19 ve 3.20 'de dh_i tabaka kalınlıklarını ifade etmektedir. İz düşüm faktörlerinin belirlenebilmesi için eğik ve başucu yönündeki gecikmeler dışında,

geometrik gecikme değerinin de hesaba katılması gerekmektedir. Geometrik gecikme değeri (3.21) eşitliği yardımıyla elde edilmektedir.

$$dgeo = \sum_{i=1}^{k-1} [s_i - \cos(e_i - e_k)\, x\, s_i] \tag{3.21}$$

Geometrik gecikme, ıslak ve kuru bileşenler için eğik ve başucu yönündeki gecikme değerleri hesaplandıktan sonra iz düşüm faktörleri belirlenebilmektedir. Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2 yeniden yazılırsa;

$$\mathrm{MF_h} = \frac{\mathrm{SHD} + dgeo}{\mathrm{ZHD}} \tag{3.22}$$

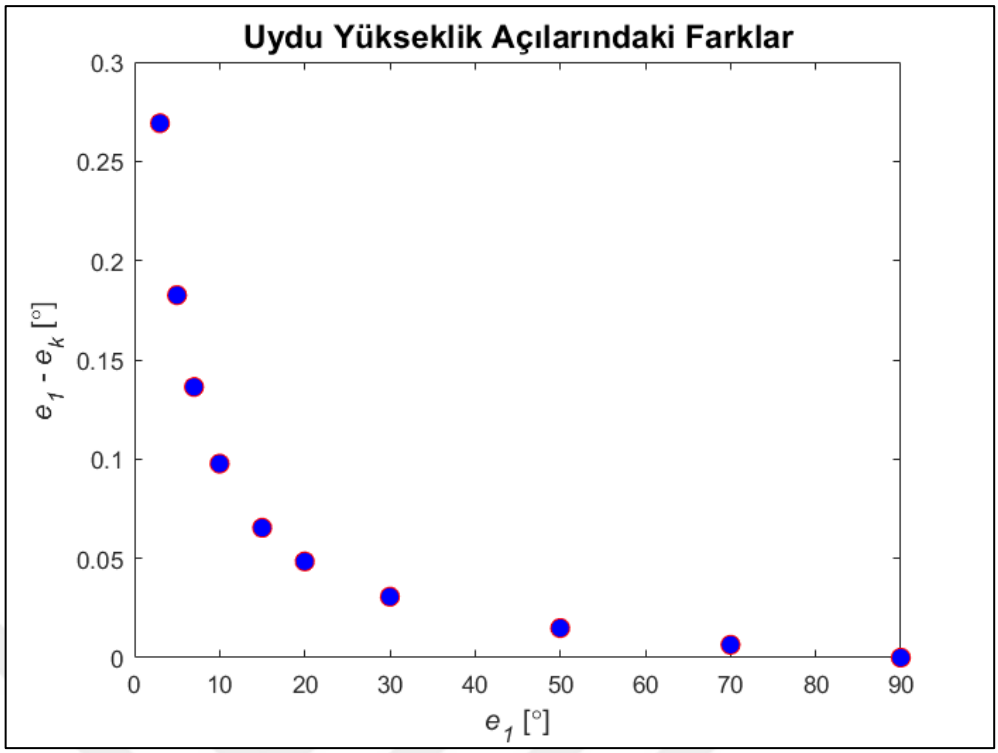
$$\mathrm{MF_w} = \frac{\mathrm{SWD}}{\mathrm{ZWD}} \tag{3.23}$$

elde edilmektedir. Bu aşamada tabaka kalınlıklarının da dikkate alınması gerekmektedir. Örneğin, Rocken vd. (2001) Tablo 3.2'de yer alan kalınlık değerlerini önermektedir.

Tablo 3.2 Tabaka kalınlıkları

Yükseklik	**Kalınlık**
0 km – 2 km	10 m
2 km – 6 km	20 m
6 km – 16 km	50 m
16 km – 36 km	100 m
36 km – 136 km	500 m

Işın izleme yönteminde dikkat edilmesi gereken noktalardan biri de uydu yükseklik açılarıdır. Örneğin algoritmanın başlangıç uydu yükseklik açısı e_1 ile k. katmanındaki uydu yükseklik açısı e_k eşit değildir. Açılar arasındaki farklar özellikle düşük uydu yükseklik açılarında daha büyüktür (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Başlangıç uydu yükseklik açısı ile ***k***. katmanındaki uydu yükseklik açısı arasındaki ilişki

Şekil 2.1 incelendiğinde troposfer katmanından dolayı sinyallerin bükülerek alıcıya ulaştığı görülmektedir. Ancak uydu yükseklik açıları alıcı ile uydu arasındaki geometrik yol göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. GNSS uydularından yayılan sinyallerin atmosfere girmeden izledikleri yolun geometrik yol olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle iz düşüm fonksiyonları belirlenirken uydu yükseklik açısı olarak e_1 açısı yerine e_k açısının dikkate alınması gerekmektedir.

3.2 İz Düşüm Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Türkiye için doğruluğu yüksek bir iz düşüm fonksiyonu belirlemek bu tez çalışmasının ana motivasyonlarından birini oluşturmaktadır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi iz düşüm fonksiyonları belirlenirken ECMWF'nin ERA5 profil veri seti kullanılmıştır. Ayrıca, özellikle istasyonların yükseklik bileşenlerindeki sistematik hataları en aza indirmek için istasyon özelinde ve direkt iz düşüm stratejisi tercih edilmiştir. Yine daha önce belirtildiği gibi ve Eşitlik 2.16'da görülebileceği üzere iz düşüm fonksiyonları sadece uydu yükseklik açısına bağlıdır. Ancak (2.16) eşitliğinin sol tarafında yer alan iz düşüm faktörü, (3.22) ve (3.23) eşitliklerinden de görülebileceği üzere eğik ve başucu yönündeki gecikmelere bağlı

olarak değişmektedir. Bu gecikme değerleri de atmosferik (troposferik) koşullara bağlı olarak değiştiğinden, iz düşüm fonksiyonlarının güncel meteorolojik parametreler dikkate alınarak üretilmesi fonksiyonların doğruluğunu artıracaktır. Bu tez çalışmasında genel olarak Zus vd. (2021)'de yer alan fonksiyon belirleme adımları izlenmiştir. Bu adımlara ek olarak fonksiyon parametrelerinin doğrulanması aşamasında bir iyileştirme gerçekleştirilmiştir.

İz düşüm fonksiyonları, iz düşüm faktörleri yardımıyla belirlenmektedir. Bu faktörler de ışın izleme yöntemi sonucu elde edilen troposferik gecikmeler yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu çalışmada Zus vd. (2014) izlenerek oluşturulan ışın izleme algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma ile;

- Atmosferin (Troposferin) küresel ve simetrik olduğu varsayımı altında üretilen gecikme değerleri ($T(e)$),
- Azimut etkisinin dikkate alındığı gecikme değerleri ($T(e,\alpha)$),

elde edilebilmektedir. Bu çalışmada iz düşüm fonksiyonları Herring (1992)'nin sürekli kesir modeline göre belirleneceğinden (Eşitlik 2.16), iz düşüm faktörlerinin de atmosferin küresel ve simetrik olduğu varsayımı altında üretilen gecikme değerleri yardımıyla elde edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, a, b ve c değerleri, 10 farklı uydu yükseklik açısı için (3°, 5°, 7°, 10°, 15°, 20°, 30°, 50°, 70° ve 90°) hesaplanan iz düşüm faktörleri kullanılarak doğrusal olmayan EKK yöntemiyle elde edilmektedir (Koch, 1999). Fonksiyon parametreleri a, b ve c;

$$\begin{aligned} a &= a_0 + \delta a \\ b &= b_0 + \delta b \\ c &= c_0 + \delta c \end{aligned} \tag{3.24}$$

şeklinde yazılırsa, Eşitlik 2.16 için düzeltme denklemi;

$$V_{\mathrm{MF}} = \frac{\partial \mathrm{MF}}{\partial a}\,\delta a + \frac{\partial \mathrm{MF}}{\partial b}\,\delta b + \frac{\partial \mathrm{MF}}{\partial c}\,\delta c + \mathrm{MF}_0 - \mathrm{MF}_{rt} \tag{3.25}$$

şeklinde elde edilir. Burada; a_0, b_0 ve c_0 yaklaşık değerleri; δa, δb ve δc küçültülmüş bilinmeyenleri; MF_0 yaklaşık değerler kullanılarak hesaplanan iz düşüm faktörünü ve MF_{rt} ışın izleme yöntemi sonucu elde edilen iz düşüm faktörünü ifade etmektedir. 10 farklı uydu yükseklik açısı için **A** katsayılar matrisi;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathrm{MF}(e_1)}{\partial a} & \frac{\partial \mathrm{MF}(e_1)}{\partial b} & \frac{\partial \mathrm{MF}(e_1)}{\partial c} \\ \frac{\partial \mathrm{MF}(e_2)}{\partial a} & \frac{\partial \mathrm{MF}(e_2)}{\partial b} & \frac{\partial \mathrm{MF}(e_2)}{\partial c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \mathrm{MF}(e_{10})}{\partial a} & \frac{\partial \mathrm{MF}(e_{10})}{\partial b} & \frac{\partial \mathrm{MF}(e_{10})}{\partial c} \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

şeklinde yazılır. **A** katsayılar matrisinin elemanları;

$$\frac{\partial \mathrm{MF}(e)}{\partial a} = \frac{1}{\left(1+\frac{b}{c+1}\right)\left(\sin(e)+\frac{a}{\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}}\right)} - \frac{1+\frac{a}{1+\frac{b}{1+c}}}{\left(\sin(e)+\frac{a}{\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}}\right)^2\left(\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}\right)} \tag{3.27}$$

$$\frac{\partial \mathrm{MF}(e)}{\partial b} = \frac{a\left(1+\frac{a}{1+\frac{b}{1+c}}\right)}{\left(\sin(e)+\frac{a}{\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}}\right)^2(c+\sin(e))\left(\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}\right)^2} - \frac{a}{\left(1+\frac{b}{1+c}\right)^2(c+1)\left(\sin(e)+\frac{a}{\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}}\right)} \tag{3.28}$$

$$\frac{\partial \mathrm{MF}(e)}{\partial c} = \frac{ab}{\left(1+\frac{b}{1+c}\right)^2\left(\sin(e)+\frac{a}{\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}}\right)(c+1)^2} - \frac{ab\left(1+\frac{a}{1+\frac{b}{1+c}}\right)}{\left(\sin(e)+\frac{a}{\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}}\right)^2(c+\sin(e))^2\left(\sin(e)+\frac{b}{\sin(e)+c}\right)^2} \tag{3.29}$$

şeklinde hesaplanır. **l** küçültülmüş ölçü vektörü ise aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \mathrm{MF}_{rt}(e_1) - \mathrm{MF}_0(e_1) \\ \mathrm{MF}_{rt}(e_2) - \mathrm{MF}_0(e_2) \\ \vdots \\ \mathrm{MF}_{rt}(e_{10}) - \mathrm{MF}_0(e_{10}) \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

Eşitlik 2.16 ve (3.27-29) eşitliklerinden görülebileceği üzere Herring (1992)'nin sürekli kesir modeli doğrusal bir model değildir. Bu nedenle a, b ve c parametreleri iteratif çözüm sonucunda elde edilmelidir. Bu çalışmada nihai parametre değerleri dört iterasyon sonucunda elde edilmiştir (Zus vd., 2021). Her bir iterasyon için küçültülmüş bilinmeyenler;

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A^T A})^{-1}\mathbf{A^T l} \tag{3.31}$$

şeklinde elde edilir. **x** bilinmeyenler vektörü sırasıyla δa, δb ve δc değerlerini içermektedir. Bu değerler (3.24) eşitliğinde yerine konularak bir sonraki iterasyon için yaklaşık değerlerin hesaplanmasında kullanılmıştır. İlk iterasyon için yaklaşık değerler Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Doğrusal olmayan EKK için yaklaşık değerler

Parametre	Kuru Bileşen	Islak Bileşen
a	0.0010	0.0005
b	0.0029	0.0015
c	0.0620	0.0440

Daha önce de ifade edildiği gibi a, b ve c parametreleri elde edilirken Zus vd. (2021)'in yaklaşımına ek olarak bu parametrelerinin doğrulanması aşamasında bir iyileştirme gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama adımını gerçekleştirmek için dört iterasyon sonucunda elde edilen parametreler yardımıyla elde edilen iz düşüm fonksiyonu ve başucu yönündeki gecikmeler kullanılarak eğik gecikme değerleri hesaplanmıştır. Kestirilen fonksiyon yardımıyla hesaplanan gecikmeler ile ışın izleme yönteminden elde edilen gecikme farkları incelenmiştir. Eğer bu farkların herhangi biri mutlak anlamda 1 mm ve 1mm'den büyük değilse kestirilen parametreler nihai değer olarak kabul edilmiştir. Eğer herhangi bir fark değeri 1 mm'den büyükse Tablo 3.3'te yer alan b ve c değerleri sabit kabul edilmiş ve sadece

a parametresi kestirilmiştir. Bu durumda oluşturulması gereken **A** katsayılar matrisi;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathrm{MF}(e_1)}{\partial a} \\ \frac{\partial \mathrm{MF}(e_2)}{\partial a} \\ \vdots \\ \frac{\partial \mathrm{MF}(e_{10})}{\partial a} \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

şeklinde elde edilmektedir. Ayrıca, a parametresi yine dört iterasyon sonucunda belirlenmektedir.

Oluşturulan iz düşüm fonksiyonlarının doğruluğunu test edebilmek için 20°-50° doğu boylamları ve 30°-50° kuzey enlemleri arasında kalan bölgede 1°'lik grid noktalarının 12 Temmuz 2021 0, 6, 12 ve 18 UTC verilerini kullanarak a, b ve c parametreleri kestirilmiştir. Bu parametreler yardımıyla her bir uydu yükseklik açısı için genel karesel ortalama hata (Root Mean Square, RMS) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 3.4). Genel RMS değerleri her bir grid noktası için hesaplanan RMS değerleri yardımıyla elde edilmektedir.

Tablo 3.4 İz düşüm fonksiyonlarının doğruluk değerleri (mm)

$e°$	**0 UTC**		**6 UTC**		**12 UTC**		**18 UTC**	
	Kuru	**Islak**	**Kuru**	**Islak**	**Kuru**	**Islak**	**Kuru**	**Islak**
3	0.01	0	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0
5	0.11	0.01	0.11	0.01	0.11	0.02	0.11	0.01
7	0.32	0.04	0.32	0.04	0.32	0.05	0.32	0.04
10	0.19	0.04	0.19	0.04	0.19	0.04	0.19	0.04
15	0.29	0.03	0.29	0.02	0.29	0.03	0.29	0.02
20	0.19	0.01	0.19	0.01	0.19	0.01	0.19	0.01
30	0.07	0	0.07	0	0.07	0	0.07	0
50	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3.4 incelendiğinde, her iki bileşen için de tüm uydu yükseklik açılarında model doğruluklarının mm altı mertebede olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, oluşturulan iz düşüm fonksiyonlarının yani a, b ve c parametrelerinin yeterince doğru kestirildiği söylenebilir.

3.3 Modifiye Edilmiş İz Düşüm Fonksiyonunun Belirlenmesi

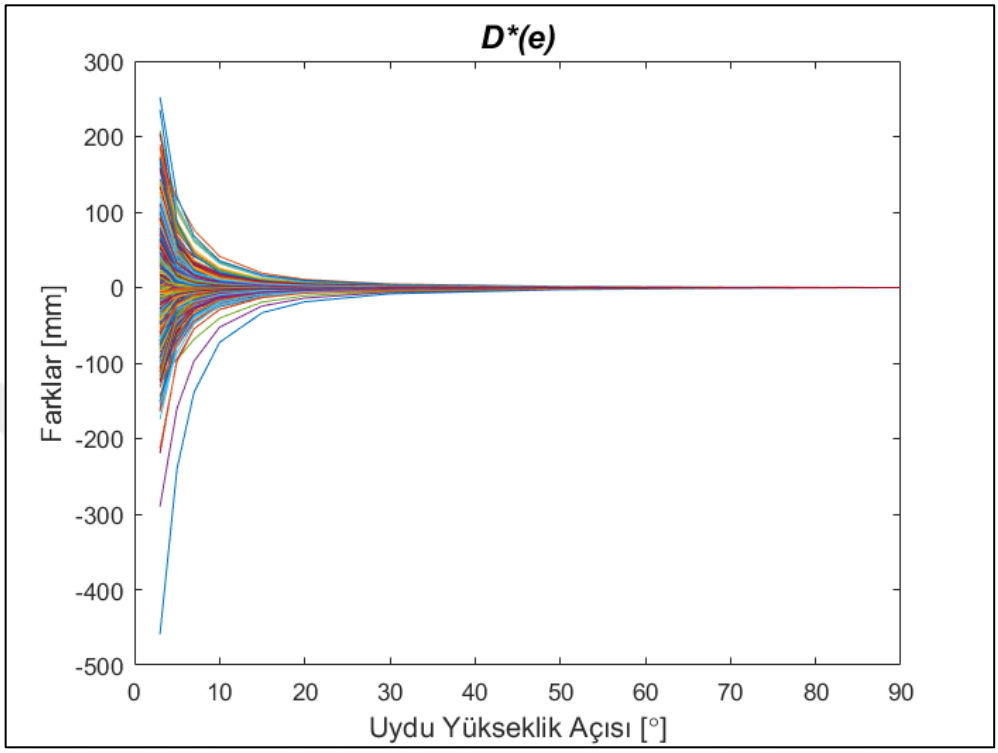
Tez çalışmasının bu bölümünde farklı azimut altındaki atmosfer koşullarının dikkate alındığı durumdaki troposferik gecikme $T(e,\alpha)$ değerinin nasıl daha iyi modellenebileceği üzerine durulmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi iz düşüm fonksiyonlarının belirlenmesinde tercih edilen Herring (1992)'nin sürekli kesir modeli sadece uydu yükseklik açısına bağlıdır. Bu nedenle iz düşüm fonksiyonları yardımıyla atmosferin (troposferin) sadece simetrik etkileri modellenebilmektedir (Eşitlik 2.18). Ancak, atmosferde bulunan su buharının (nem alanının) zamansal ve konumsal olarak ani ve düzensiz değişiminden dolayı, azimut açısına bağlı asimetrik etkilerin de troposferik gecikme modeline dahil edilmesi gerekmektedir (Eşitlik 2.19). Zus vd. (2021), (2.19) eşitliğinin kullanıldığı durumda hem yükseklik bileşeninde hem de başucu yönündeki gecikme değerlerindeki hataların büyük olduğunu ve bu hataların iz düşüm fonksiyonlarının modifiye edilmesiyle giderilebileceğini göstermiştir.

Tablo 3.4 incelendiğinde iz düşüm fonksiyonları ile $T(e)$ gecikme değerinin yeterince doğru bir şekilde modellenebildiği görülmektedir. Çalışmanın bu bölümünde öncelikle 20°-50° doğu boylamları ve 30°-50° kuzey enlemleri arasında kalan bölgede 1°'lik grid noktalarının 12 Temmuz 2021 0, 6, 12 ve 18 UTC verilerini kullanarak ışın izleme algoritmasıyla 10 farklı uydu yükseklik açısı (3°, 5°, 7°, 10°, 15°, 20°, 30°, 50°, 70° ve 90°) ve 12 farklı azimut (0°'den 330°'ye kadar 30° aralıkla) için $T(e,\alpha)$ ve $T(e)$ gecikme değerleri elde edilmiştir. Daha sonraki aşamada ise (3.33) eşitliğinde yer alan fark değerleri incelenmiştir.

$$D(e,\alpha) = T(e,\alpha) - T(e) \tag{3.33}$$

Eşitlikten de görülebileceği üzere $D(e,\alpha)$ farkları azimut açısına bağlıdır. Ancak troposferik gradyentler yardımıyla azimuta bağlı etkilerin giderildiği varsayıldığından, her bir azimut için belirlenen farklarının ortalaması alınarak $D^*(e)$ farkları hesaplanmıştır. Troposferik gecikmelerin hem uydu yükseklik açısı

hem de azimuta bağlı olduğu göz önüne alındığında $D^*(e)$ fark değerleri hesaplanırken $T(e,\alpha)$ gecikmelerinin referans değer kabul edilebileceği görülmektedir. Şekil 3.5'te her bir grid noktası için 0 UTC için hesaplanan farklar gösterilmiştir. Tablo 3.5'te ise genel RMS değerleri verilmiştir.



Şekil 3.5 0 UTC için $\boldsymbol{D^*(e)}$ farkları

Tablo 3.5 0 UTC için RMS değerleri (mm)

$e°$	**0 UTC**	**6 UTC**	**12 UTC**	**18 UTC**
3	69.07	63.99	89.11	74.66
5	31.34	28.43	39.11	32.58
7	17.44	15.71	21.36	17.78
10	9.02	8.12	10.94	9.13
15	4.14	3.72	5.00	4.18
20	2.34	2.10	2.83	2.36
30	1.03	0.92	1.24	1.03
50	0.33	0.29	0.40	0.33
70	0.12	0.10	0.14	0.12
90	0	0	0	0

Şekil 3.5 ve Tablo 3.5 incelendiğinde bu farkların uydu yükseklik açısına bağlı olarak değiştiği görülebilmektedir. Özellikle 10°'den daha düşük uydu yükseklik açılarında fark değerleri cm mertebesindedir. Özellikle düşük uydu yükseklik açısına sahip gözlemlerin; istasyon yüksekliği, troposferik gecikme ve alıcı saat hatası arasındaki korelasyonu düşürdüğü göz önüne alındığında (Rothacher vd., 1998; Masoumi vd., 2017), bu hataların düşürülmesinin yüksek doğruluk gerektiren çalışmalar için önem arz ettiği görülebilmektedir. Zus vd. (2021) ise bu farkların Eşitlik 2.19'un düzenlenerek Eşitlik 3.34'teki gibi modellenebileceğini ifade etmektedir.

$$T(e,\alpha) = T(e) + m_g(e)[N\cos\alpha + E\sin\alpha] + m_g(e)Z + \cdots \quad (3.34)$$

Burada Z, ek model parametresini temsil etmektedir. Z değeri Eşitlik 2.20'de verilen gradyent iz düşüm fonksiyonu yardımı ile uydu yükseklik açısına bağlı olarak eğik gecikmelere dönüştürülmektedir. Eşitlik 3.34 göz önüne alınarak gerçekleştirilen modelleme ile elde edilen RMS değerleri Tablo 3.6'daki gibidir.

Tablo 3.6 Eşitlik 3.34 ile elde edilen RMS değerleri (mm)

$e°$	**0 UTC**	**6 UTC**	**12 UTC**	**18 UTC**
3	16.32	16.00	22.04	18.12
5	1.94	1.90	2.54	2.16
7	3.14	3.08	4.24	3.45
10	2.37	2.33	3.22	2.67
15	1.24	1.23	1.71	1.44
20	0.73	0.72	1.01	0.85
30	0.32	0.32	0.45	0.39
50	0.11	0.10	0.15	0.13
70	0.04	0.04	0.05	0.05
90	0	0	0	0

Tablo 3.6'daki değerler incelendiğinde özellikle düşük uydu yükseklik açısında 9 cm'ye varan farkların 2.2 cm'ye kadar düştüğü görülmektedir. (3.34) eşitliği incelendiğinde ek model parametresi olan Z, gradyent iz düşüm fonksiyonu ile çarpım durumundadır. Bu durumda önerilen yaklaşım da sadece uydu yükseklik açısına bağlıdır. Ancak ilgili çalışmada $m_g(e)$ fonksiyonunda yer alan C katsayısı 0.0031 olarak seçilmiştir. Atmosferin ıslak bileşeninin daha düzensiz değiştiği göz

önüne alındığında bu değerin 0.0006 olarak seçilmesinin parametre kestiriminin doğruluğunu artırabileceği söylenebilir.

Bu durumda troposferik gecikme modeli;

$$T(e,\alpha) = T(e) + m_g(e)[N\cos\alpha + E\sin\alpha] + m_g'(e)Z + \cdots \quad (3.35)$$

şeklinde yazılır. Burada m_g' fonksiyonunda C katsayısı 0.0006 olarak seçilmiştir. (3.35) eşitliği göz önüne alınarak gerçekleştirilen modelleme ile elde edilen RMS değerleri Tablo 3.7'deki gibidir.

Tablo 3.7 Eşitlik 3.35 ile elde edilen RMS değerleri (mm)

$e°$	**0 UTC**	**6 UTC**	**12 UTC**	**18 UTC**
3	12.37	11.44	14.66	11.66
5	2.96	2.71	3.54	2.81
7	3.50	3.25	4.18	3.30
10	2.41	2.27	2.91	2.38
15	1.24	1.17	1.51	1.27
20	0.73	0.68	0.89	0.75
30	0.33	0.31	0.40	0.34
50	0.11	0.10	0.13	0.11
70	0.04	0.04	0.05	0.04
90	0	0	0	0

Tablo 3.7'deki değerler incelendiğinde özellikle 3°'lik uydu yükseklik açısında 8 mm'ye varan iyileşmeler olduğu görülebilmektedir. Ancak 5°'lik uydu yükseklik açısında ise 1 mm'lik farklar ile daha kötü sonuçlar elde edilmiştir. Diğer açılarda ise faklar mm altı seviyededir. (3.34) ve (3.35) eşitliklerine ek olarak her iki yaklaşımın kullanılması durumunda atmosferdeki hem kuru hem de ıslak bileşen kaynaklı gecikmeler daha da iyi modellenebilir. Bu durumda da eşitlik aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$T(e,\alpha) = T(e) + m_g(e)[N\cos\alpha + E\sin\alpha] + m_g(e)Z_1 + m_g{}'(e)Z_2 + \cdots \quad (3.36)$$

Eşitlik 3.36 göz önüne alınarak gerçekleştirilen modelleme ile elde edilen RMS değerleri Tablo 3.8'deki gibidir.

Tablo 3.8 Eşitlik 3.36 ile elde edilen RMS değerleri (mm)

$e°$	**0 UTC**	**6 UTC**	**12 UTC**	**18 UTC**
3	0.90	0.90	1.24	1.12
5	1.53	1.53	2.11	1.86
7	0.42	0.39	0.57	0.49
10	0.39	0.37	0.53	0.45
15	0.30	0.29	0.41	0.38
20	0.19	0.20	0.27	0.25
30	0.10	0.10	0.13	0.12
50	0.03	0.03	0.05	0.04
70	0.01	0.01	0.02	0.02
90	0	0	0	0

Tablo 3.8 incelendiğinde 5°'lik uydu yükseklik açısı hariç neredeyse tüm uydu yüksekliği açılarında farkların mm altı seviye de olduğu görülebilmektedir. Tüm uydu yüksekliği açılarında mm ve mm altı seviyede hataların elde edilmesi, (3.36) eşitliği ile yüksek doğruluk gerektiren çalışmalarda daha iyi sonuçların alınabileceğini göstermektedir.

Zus vd. (2021), standart yaklaşıma eklenen ek parametrelerin de uydu yükseklik açısına bağlı olduğunu ve bu parametrelerin ıslak bileşene ait iz düşüm fonksiyonunun modifiye edilmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Bunun için (3.34), (3.35) ve (3.36) eşitliklerindeki ek parametrelerin ZWD değeri ile çarpılıp bölünmesi gerekmektedir. Örneğin Eşitlik 3.34 için modifiye edilmiş iz düşüm fonksiyonu;

$$z' = \frac{Z}{\mathrm{ZWD}} \tag{3.37}$$

$$\mathrm{MF}_{\mathrm{w}}^{*}(e) = \mathrm{MF}_{\mathrm{w}}(e) + m_g(e)z' \tag{3.38}$$

şeklinde elde edilir. (3.38) eşitliğinden de görülebileceği üzere modifiye edilmiş iz düşüm fonksiyonu $\mathrm{MF}_{\mathrm{w}}^{*}$ yine sadece uydu yükseklik açısına bağlıdır. Bu tez çalışması kapsamında iz düşüm fonksiyonlarının modifiye edilmesi için önerilen ve test edilen yaklaşımlar Tablo 3.9'da özetlenmiştir.

Tablo 3.9 İz düşüm fonksiyonlarının modifiye edilmesi için önerilen yaklaşımlar

Yaklaşım	Açıklama	Gözlem Modeli	Modifiye Edilmiş İz Düşüm Fonksiyonu
(i)	Zus vd. (2021) tarafından önerilen yaklaşım	$D^*(e) \cong m_g(e)Z$	$\mathrm{MF_w^i} = \mathrm{MF_w} + m_g \dfrac{Z}{\mathrm{ZWD}}$
(ii)	(i) ile aynı ve farklı C değeri ile	$D^*(e) \cong m_g{}'(e)Z$	$\mathrm{MF_w^{ii}} = \mathrm{MF_w} + m_g{}' \dfrac{Z}{\mathrm{ZWD}}$
(iii)	(i) ve (ii)'nin kombinasyonu	$D^*(e) \cong m_g(e)z_1 + m_g'(e)z_2$	$\mathrm{MF_w^{iii}} = \mathrm{MF_w} + m_g \dfrac{Z_1}{\mathrm{ZWD}} + m_g{}' \dfrac{Z_2}{\mathrm{ZWD}}$

Tablo 3.9'da özetlenen ve bu tez çalışması kapsamında önerilen yaklaşımların kullanılabilmesi için ek Z_i parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu parametreler EKK yöntemi ile belirlenmektedir. Bu aşamada **A** katsayılar matrisi;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} m_g(e_1) & m_g{}'(e_1) \\ m_g(e_2) & m_g{}'(e_2) \\ \vdots & \vdots \\ m_g(e_{10}) & m_g{}'(e_{10}) \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

şeklinde oluşturulur. Burada (i) için **A** katsayılar matrisinin sadece ilk sütunu, (ii) için sadece ikinci sütunu ve (iii) için her iki sütunun da dikkate alınması gerekmektedir. Ölçü vektörü aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} D^*(e_1) \\ D^*(e_2) \\ \vdots \\ D^*(e_{10}) \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus ise, iz düşüm fonksiyonu katsayıları olan a, b ve c parametreleri elde edilirken ölçülerin eşit ağırlıklı olduğu varsayılmıştır. Ancak, Z_i parametreleri kestirilirken uydu yükseklik açısına bağlı olarak ağırlıklandırma gerçekleştirilmiştir. Her bir $D^*(e)$ için ağırlıklar;

$$P_i = \sin^2 e_i \tag{3.41}$$

şeklinde elde edilmiştir.

4
UYGULAMA

Tez çalışmasının bu bölümünde çalışma kapsamında üretilen model ve fonksiyonlar için gerçekleştirilen analizlerden ve analiz sonuçlarından bahsedilecektir. Bu bağlamda öncelikle troposfer modeli oluşturulmadan önce gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler ve nihai troposfer modeline ait sonuçlar sunulacaktır. Daha sonra ise hem klasik yaklaşım ile üretilen hem de bu çalışma kapsamında önerilen modifiye edilmiş iz düşüm fonksiyonlarına ait analizlerden bahsedilecektir.

4.1 Farklı Veri Setleri ile Oluşturulan Troposfer Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi

Bu çalışma kapsamında Türkiye için doğruluğu yüksek troposfer modelinin oluşturulma aşamasında, hangi veri setinin kullanılması gerektiği karşılaştırmalı bir analiz sonucunda belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalara göre NWM'ler kullanılarak daha yüksek doğruluğa sahip modellerin oluşturulabileceği Bölüm 2'de belirtilmişti. Ayrıca, yine bu çalışma kapsamında ECMWF'nin ERA5 veri seti kullanılarak model ve fonksiyonların belirleneceği de ifade edilmişti. ERA5 hem günlük hem de aylık ortalama verilerini 1 saatlik çözünürlükte sunmaktadır. Nihai modelin 1979-2019 yılları arasındaki veriler kullanılarak oluşturulması planlanmıştır. Günlük veriler ile her güne ve her saate ait verilerin kullanılması gerekeceğinden ortaya çıkacak olan hesap yükü görülebilmektedir. Bu nedenle günlük veriler yerine aylık ortalama verileri kullanmak için 2015-2019 yılları arasındaki 5 yıllık veriler kullanılarak her iki veri seti için de modeller belirlenmiş ve sonuçlar ERA5'in 2020 verilerine dayalı olarak test edilmiştir. Bu test aşamasında; sıcaklık, basınç ve su buharı basıncı değerlerinin doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 2.2'de de belirtildiği gibi modelleme aşaması her bir grid noktası için ayrı ayrı gerçekleştirildiğinden; doğruluk analizleri minimum, maksimum ve genel doğruluk değerleri ile ifade edilecektir. Genel doğruluk;

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{j} \mathrm{RMS}_i^2 \times n_i}{\sum_{i=1}^{j} n_i}} \tag{3.41}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada j grid noktası sayısını, $n\ i$. grid noktası için ölçü sayısını ifade etmektedir. Tablo 4.1'de her iki veri setinin model doğrulukları gösterilmektedir. Tablo incelendiğinde aylık ortalama veriler ile daha yüksek model doğruluk değerlerinin elde edildiği görülebilmektedir. Ancak bu durum, günlük verilerin ortalama değerden farklı gözlemler içereceği gerçeği göz önüne alındığında, beklenen bir durum olarak ifade edilebilir.

Tablo 4.1 Test çalışması için model doğrulukları

	Günlük			**Aylık Ortalama**		
	Min.	**Mak.**	**Genel**	**Min.**	**Mak.**	**Genel**
Basınç (mbar)	2.23	8.27	5.37	0.95	3.52	2.08
Sıcaklık (K)	1.24	5.15	3.35	0.65	2.51	1.64
Su Buharı Basıncı (mbar)	1.12	5.24	2.59	0.45	2.32	1.16

Tablo 4.2'de her iki veri seti için 2020 yılına ait günlük veriler kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizine ait sonuçlar verilmiştir. Tabloda doğruluk değerleri RMS değerleri ile ifade edilmektedir. Ayrıca, doğruluk değerlerine ek olarak ortalama hata (mean error, ME) değerleri de verilmiştir.

Tablo 4.2 Günlük veriler kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizi

		Günlük			**Aylık Ortalama**		
		Min.	**Mak.**	**Genel**	**Min.**	**Mak.**	**Genel**
Basınç (mbar)	RMS	2.34	8.92	5.23	2.63	8.91	5.39
	ME	-1.28	0.48	-0.42	-1.26	0.49	-0.41
Sıcaklık (K)	RMS	1.11	5.59	3.25	1.71	5.68	4.08
	ME	-1.15	1.46	-0.25	-1.17	1.44	-0.25
Su Buharı Basıncı (mbar)	RMS	1.14	6.17	2.64	1.55	6.27	3.06
	ME	-0.94	0.98	0.11	-1.59	0.75	-0.12

Tablo 4.2 incelendiğinde, günlük veriler kullanılarak oluşturulan model ile her üç meteorolojik parametre içinde daha yüksek doğruluğa ulaşıldığı görülmektedir. Ancak genel doğruluk değerleri arasındaki farklar sıcaklık için 1 K'nin ve diğer parametreler için 1 mbar'ın altındadır. Ayrıca, ortalama hata değerlerinin de mutlak anlamda neredeyse eşit olduğu görülebilmektedir. Tablo 4.3'te ise her iki veri seti için 2020 yılına ait aylık ortalama veriler kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizine ait sonuçlar verilmiştir. Tablo incelendiğinde, beklendiği üzere aylık ortalama veriler kullanılarak oluşturulan model ile her üç meteorolojik parametre için de daha yüksek doğruluğa ulaşıldığı görülmektedir. Ancak yine genel doğruluk değerleri arasındaki farkların sıcaklık için 1 K'nin, diğer parametreler için 1 mbar'ın altında ve yine ortalama hata değerlerinin de mutlak anlamda neredeyse eşit olduğu görülebilmektedir.

Tablo 4.3 Aylık ortalama verileri kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizi

		Günlük			**Aylık Ortalama**		
		Min.	**Mak.**	**Genel**	**Min.**	**Mak.**	**Genel**
Basınç (mbar)	RMS	0.91	5.28	2.30	1.02	4.92	2.26
	ME	-1.26	0.47	-0.41	-1.24	0.48	-0.41
Sıcaklık (K)	RMS	0.52	5.74	2.27	0.48	3.93	1.74
	ME	-1.15	1.46	-0.24	-1.17	1.44	-0.25
Su Buharı Basıncı (mbar)	RMS	0.75	3.29	1.44	0.58	2.83	1.36
	ME	-0.73	1.17	0.33	-0.98	0.94	0.10

Tablo 4.2 ve 4.3'e göre ERA5'in her iki veri seti içinde benzer doğruluk ve ortalama hata değerlerinin elde edildiği göz önüne alındığında, nihai troposfer modelinin günlük veriler yerine aylık ortalama veriler ile de oluşturulabileceği ve bu sayede büyük bir hesap yükünün ortadan kaldırılabileceği ifade edilebilir.

4.2 Nihai Troposfer Modeli

Bölüm 2.2'de de belirtildiği gibi Türkiye için oluşturulan troposfer modeli için sıcaklık ve basınç gibi parametreler her bir grid noktası için ayrı ayrı modellenmiştir. Bölüm 4.1'de görülebileceği üzere troposfer modelinin aylık ortalama veriler yardımıyla da oluşturulabilmektedir. Bu bağlamda Türkiye için

oluşturulan troposfer modeli ERA5'in 1° konumsal çözünürlükteki günün her saati için üretilen aylık ortalama verileri yardımıyla oluşturulmuştur. Bu aşamada 1979 ile 2019 yılları arasındaki 41 yıllık veri seti kullanılmıştır. Oluşturulan nihai model 20°-50° doğu boylamları ve 30°-50° kuzey enlemleri arasında kalan bölge için geçerlidir.

Tablo 4.4'te nihai model için model doğrulukları gösterilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi troposfer modeli her bir grid noktası için ayrı ayrı oluşturulduğu için aşağıdaki tablo minimum, maksimum ve genel doğruluk değerlerini içermektedir.

Tablo 4.4 Nihai model için model doğrulukları

	Min.	**Mak.**	**Genel**
Basınç (mbar)	1.05	3.74	2.22
Sıcaklık (°C)	0.74	2.96	1.93
Su Buharı Basıncı (mbar)	0.55	2.27	1.20
Sıcaklık Değişim Oranı (°C/km)	0.0004	0.0011	0.0007
Su Buharı Değişim Faktörü	0.26	0.66	0.45
Nem (kg kg-1)	0.0005	0.0014	0.0008
Ağırlıklı Ortalama Sıcaklık (K)	1.04	1.97	1.59

Tablo 4.4 incelendiğinde model doğruluklarının, test çalışmasında elde edilen model doğruluklarına yakın olduğu görülmektedir. Örneğin sıcaklık için WGTEM'in 2.85 °C olduğu göz önüne alındığında nihai modelin yeterli doğrulukta olduğu söylenebilmektedir. Ancak model doğrulukları bir anlamda model kestirim hatasını ifade etmektedir. Bu nedenle, test çalışmasında olduğu gibi farklı bir periyoda ait veriler veya farklı teknikler yardımıyla elde edilen veri setleri ile doğruluk analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Nihai modelin doğruluk analizleri üç farklı veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

- ERA5 veri setinin 2020 yılı verileri
- Yersel meteorolojik istasyon verileri
- IGS hassas troposfer ürünleri

Tablo 4.5'te ERA5'in 2020 yılına ait hem günlük hem de aylık ortalama veri setleri kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizine ait sonuçlar verilmiştir.

Tablo 4.5 Nihai modelin ERA5 verileri ile doğruluk analizi

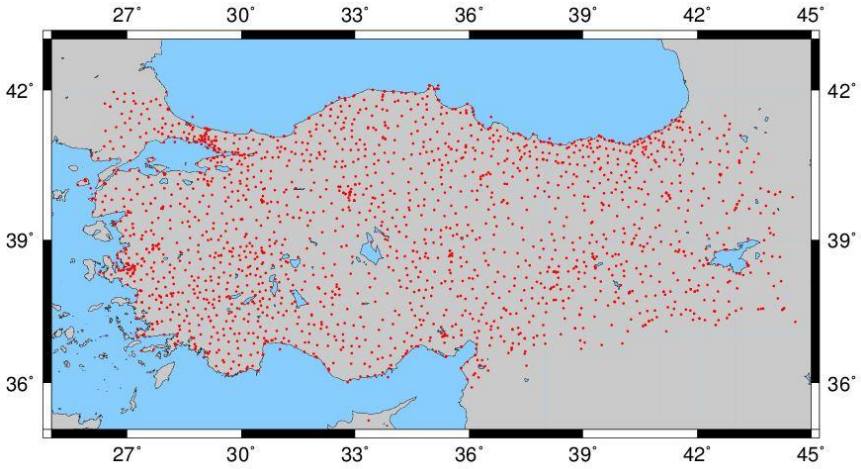
		Günlük			**Aylık Ortalama**		
		Min.	**Mak.**	**Genel**	**Min.**	**Mak.**	**Genel**
Basınç (mbar)	RMS	2.61	8.54	5.45	1.10	4.01	2.22
	ME	-1.34	0.15	-0.44	-1.33	0.14	-0.45
Sıcaklık (K)	RMS	1.80	6.17	4.23	0.83	3.63	2.08
	ME	-2.63	-0.26	-1.14	-2.62	-0.26	-1.13
Su Buharı Basıncı (mbar)	RMS	1.48	6.16	3.01	0.56	2.93	1.37
	ME	-1.78	0.56	-0.49	-1.34	0.78	-0.25

Tablo 4.5 incelendiğinde; aylık ortalamalar kullanılarak gerçekleştirilen analiz ile model doğruluklarına (Tablo 4.4) yakın sonuçların elde edildiği görülebilmektedir. Bu durum aslında beklenen bir durumdur çünkü modelin oluşturulduğu veri ile doğrulama verisi aynı doğruluğa sahiptir. Ancak günlük veriler kullanılarak gerçekleştirilen analizde doğruluğun düştüğü buna karşın basınç ve sıcaklık için ortalama hataların değişmediği gözlemlenmiştir. Tablo 4.6'da yersel meteorolojik istasyon verileri kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizi gösterilmektedir. Şekil 4.1'de ise analiz aşamasında kullanılan meteorolojik istasyonlar gösterilmektedir.

Tablo 4.6 Nihai modelin yersel meteorolojik veriler ile doğruluk analizi

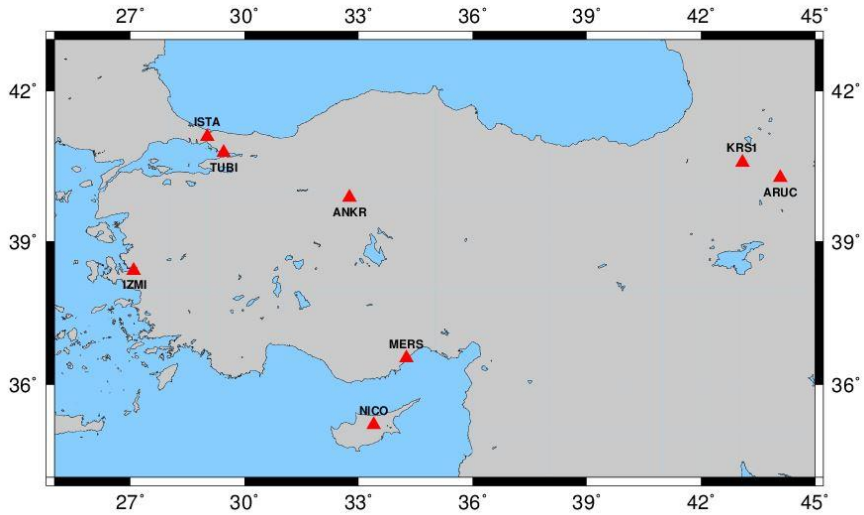
		Min.	**Mak.**	**Genel**
Basınç (mbar)	RMS	3.38	13.83	5.05
	ME	-10.98	7.92	0.00
Sıcaklık (K)	RMS	2.64	7.14	4.47
	ME	-2.50	5.69	0.00
Su Buharı Basıncı (mbar)	RMS	1.26	8.51	3.26
	ME	-5.81	5.79	0.00

Tablo 4.6 incelendiğinde elde edilen ortalama hataların neredeyse sıfır olduğu görülebilmektedir. Xu vd. (2020)'de de meteorolojik istasyon verileri kullanarak doğruluk analizleri gerçekleştirmiştir. İlgili çalışmada basınç için doğruluğun 5.9 mbar, sıcaklıklar için ortalama hataların ise -0.26 °C olduğu belirtilmiştir. Bu değerler Tablo 4.6 ile karşılaştırıldığında, bu tez çalışması kapsamında oluşturulan troposfer modelinin doğruluğu artırdığı görülebilmektedir.



Şekil 4.1 Yersel meteorolojik istasyonlar

Nihai modelin doğruluk analizleri, NWM ve yersel meteorolojik veriler dışında IGS tarafından üretilen hassas troposfer ürünleri kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada çalışma bölgesi içinde yer alan 8 IGS istasyona ait 2020 yılı verileri kullanılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 IGS istasyonları

Tablo 4.7'de IGS ürünlerine dayalı doğruluk analizi sonuçları gösterilmektedir. Bu aşamada, öncelikle her bir istasyon için ZTD farklarından yararlanarak günlük RMS değerleri elde edilmiştir. Daha sonra (4.1) eşitliğindeki gibi istasyonlara ait genel RMS değerleri elde edilmiştir. Tablo incelendiğinde MERS istasyonu hariç tüm istasyonlarda doğruluğun 4 cm'nin altında ve genel ortalama hatanın mm altı seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca 3.15 cm olan genel doğruluk değerinin de en güncel modellerden biri olan WGTEM'in 3.82 cm'lik genel doğruluk değerinden daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.7 Nihai modelin IGS ürünlerine dayalı doğruluk analizi

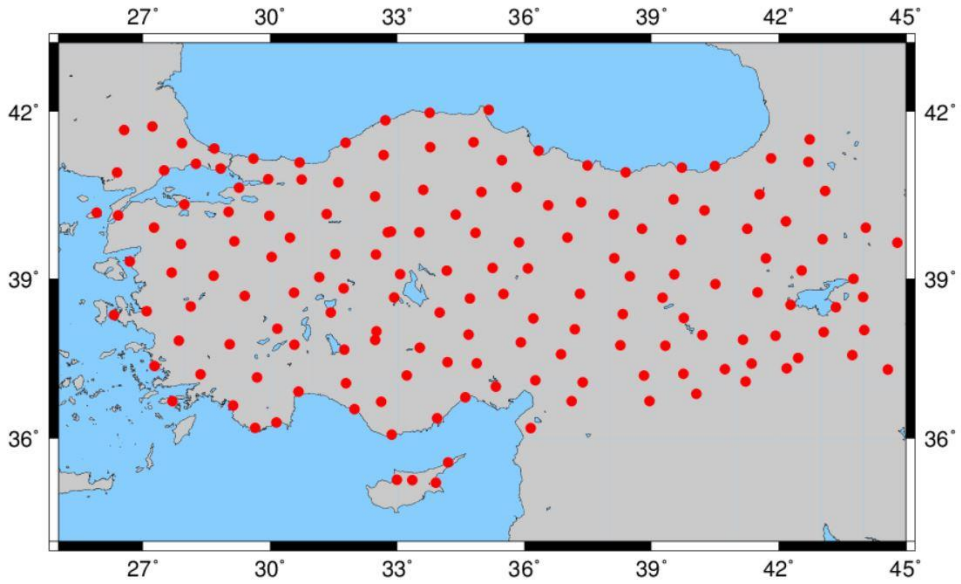
	RMS (cm)			**ME (cm)**		
İstasyon	**Min.**	**Mak.**	**Genel**	**Min.**	**Mak.**	**Genel**
ANKR	0.60	7.11	3.00	-7.00	3.75	-1.23
ARUC	0.40	7.71	2.63	-4.80	7.58	0.33
ISTA	0.36	11.84	3.23	-11.76	9.39	-0.31
IZMI	0.64	9.02	3.42	-8.42	8.82	0.03
KRS1	0.39	6.37	2.47	-5.43	6.27	-0.34
MERS	0.65	11.07	4.01	-7.52	11.01	1.33
NICO	0.65	7.07	2.89	-5.87	6.98	-0.06
TUBI	0.47	12.97	3.43	-12.94	9.80	-0.39
Genel			**3.15**			**-0.05**

4.3 İz Düşüm Fonksiyonları için Gerçekleştirilen Analizler

Tez çalışmasının bu bölümünde Tablo 3.9'da özetlenen üç yaklaşım için gerçekleştirilen çalışmalar ve doğruluk analizleri hakkında bilgiler verilecektir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi bu çalışmada troposferik gecikmeler, iz düşüm fonksiyonlarına ait katsayılar ve ek parametreler ECMWF'nin 2021 Temmuz ayına ait ERA5 veri seti kullanılarak elde edilmiştir. Her bir parametre ve katsayının istasyon özelinde belirlenmesi ile doğruluk arttığından direkt iz düşüm yöntemi tercih edilmiştir. Bu bağlamda Türkiye'de yer alan TUSAGA-Aktif ağına ait istasyonlar için (Şekil 4.3) troposferik gecikmeler, iz düşüm fonksiyonlarına ait katsayılar ve ek parametre değerleri elde edilmiş, fonksiyon ve yaklaşımların model

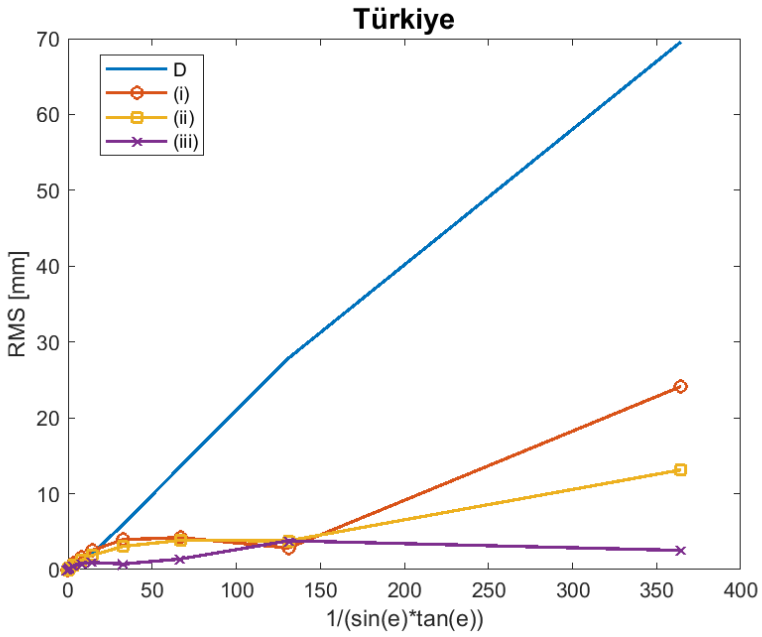
doğrulukları belirlenmiştir. Model doğruluklarına ek olarak üç farklı test çalışması gerçekleştirilmiştir:

- PPP simülasyonu (Zus vd., 2021)
- Bernese PPP simülasyonu
- Gerçek GPS gözlemlerine dayalı analiz.



Şekil 4.3 TUSAGA-Aktif istasyonları

Şekil 4.4'te standart yaklaşım (Eşitlik 2.21) ve önerilen yaklaşımlar (Eşitlik 3.34-36) için genel RMS değerleri gösterilmektedir. Bu aşamada öncelikle her bir TUSAGA-Aktif istasyonu için ilgili eşitlikler dikkate alınarak troposferik gecikme değerleri elde edilmiş ve istasyonlar için RMS değerleri hesaplanmıştır. RMS değerleri hesaplanırken ışın izleme yöntemiyle elde edilen farklı azimut altındaki atmosferik koşulların dikkate alındığı durumdaki $T(e,\alpha)$ değerleri referans olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.4'te D standart yaklaşımı ifade etmektedir.



Şekil 4.4 Yaklaşımlara ait model doğrulukları

Şekil 4.4 incelendiğinde önerilen yaklaşımların, standart yaklaşıma göre hataları azalttığı görülebilmektedir. Özellikle düşük uydu yükseklik açılarında 3-6 kat arası iyileşmelerin olduğu ve (iii) yaklaşımı ile mm mertebesinde doğrulukların elde edildiği ifade edilebilir.

Model doğrulukları incelendiğinde Tablo 3.9'da özetlenen önerilen yaklaşımlar ile özellikle düşük uydu yükseklik açılarında daha iyi sonuçların elde edilebileceği söylenebilir. Ancak, yeni yaklaşımların farklı yöntemlerle de test edilmesi gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi yeni yaklaşımlar, iki farklı simülasyon çalışması ve gerçek verilere dayalı olarak da test edilmiştir. Bu bağlamda ilk simülasyon çalışması için Zus vd. (2021)'de önerilen PPP simülasyonu tercih edilmiştir. Bu simülasyonda istasyon koordinatları, alıcı saat hatası, troposferik gecikmeler ve rasgele hatalar dışında tüm hata kaynaklarının çözülmüş olduğu varsayılmaktadır.

Simülasyon çalışması beş farklı senaryo altında incelenmiştir (Tablo 4.8). Senaryolar incelendiğinde birinci senaryonun tamamen ampirik model ve fonksiyona dayalı olarak gerçekleştirildiği görülebilmektedir. Diğer senaryolarda ise hem önsel gecikme değerleri hem de iz düşüm fonksiyonları NWM verilerine dayalı olarak elde edilmiştir. Tablo 4.8'de yer alan birinci ve ikinci senaryoların klasik yaklaşımı temsil ettiği ifade edilebilir. Burada birinci ve ikinci senaryonun

kendi aralarında karşılaştırılması gerekmektedir. Bu şekilde NWM verilerine dayalı olarak istasyon özelinde üretilen fonksiyonların katkısı görülecektir. Ayrıca; üçüncü, dördüncü ve beşinci senaryonun da ikinci senaryo ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu sayede önerilen yaklaşımlar ile klasik yaklaşım arasındaki farklar belirlenmiş olacaktır.

Tablo 4.8 Simülasyon çalışmalarında kullanılan senaryolar

Senaryo	**ZHD**	**MF_h**	**MF_w**
1	GPT	GMF	GMF
2	NWM	PMF	PMF
3	NWM	PMF	$PMF_{(i)}$
4	NWM	PMF	$PMF_{(ii)}$
5	NWM	PMF	$PMF_{(iii)}$

Tablo 4.9'da ilk simülasyon çalışmasına ait doğruluk analizleri yer almaktadır. Troposferik gecikmenin istasyon yüksekliği ile ilişkili olduğu ve ZTD değerinin PWV'nin elde edilmesinde önemli bir rol oynadığı göz önüne alınarak sadece yükseklik ve ZTD bileşenlerine ait sonuçlar yorumlanmıştır.

Tablo 4.9 İlk simülasyon çalışmasına ait doğruluk analizi (mm)

Senaryo	**ZTD**	**Yükseklik**
1	2.5	5.2
2	2.0	4.0
3	0.5	1.4
4	0.5	1.2
5	0.4	1.2

Tablo 4.9 incelendiğinde önerilen yaklaşımların birinci ve ikinci senaryoya göre daha iyi sonuç verdiği ve özellikle ZTD bileşeninde mm altı mertebede doğruluk değerleri elde edildiği görülmektedir. Yükseklik bileşeninde ise önerilen yaklaşımların birinci senaryoya göre 4-5 kat, ikinci senaryoya göre 2-3 kat daha iyi doğruluğa sahip olduğu görülebilmektedir. İkinci senaryo ise birinci senaryoya göre yükseklik bileşeni için 1.2 mm daha doğru sonuç vermiştir.

Daha önce de ifade edildiği gibi ilk simülasyon çalışmasında sadece troposferik gecikmeler dikkate alınmış ve iyonosferik etkiler, uydu yörünge ve saat hataları gibi diğer GNSS hata kaynakları ihmal edilmiştir. İkinci simülasyon çalışmasında ise daha gerçekçi analizler gerçekleştirebilmek için bu hata kaynakları da dikkate alınarak GPS gözlemleri simüle edilmiş ve PPP çözümleri gerçekleştirilmiştir. Hem gözlemlerin simülasyonu hem de PPP analizleri Bernese v5.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Dach vd., 2015). İkinci simülasyon çalışması sadece İstanbul'da bulanan ISTN istasyonu için gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada yine 2021 yılının Temmuz ayı için gerçek uydu geometrisine dayalı olarak L1 ve L2 sinyalleri için hem kod hem de faz gözlemleri simüle edilmiştir. Sadece GPS uydularına dayalı olarak simüle edilen gözlemlere; kod ölçüleri için 50 cm, faz ölçüleri için 2 mm'lik standart sapma değerlerine göre normal dağılımlı rasgele hatalar eklenmiştir. Simüle edilen gözlemler atmosfer ve okyanus yüklemeleri dışında, yer dönüklük parametreleri diferansiyel kod hatalarını da içermektedir. İyonosferik etkiler içinse CODE'nin (Center for Orbit Determination in Europe) global iyonosfer haritalarından yararlanılmıştır. Her ne kadar NWM verilerinin atmosferin (troposferin) koşullarını yansıttığı varsayılsa da, NWM verilerinin doğruluğu bölgesel olarak farklılaşmaktadır (Jiao vd., 2021; Velikou vd., 2022). Bu nedenle ERA5'in atmosferi tam olarak yansıtabilmesi için; troposferik gecikmeler, ışın izleme algoritması sonucunda elde edilen gecikmeler yardımıyla gözlemlere dahil edilmiştir.

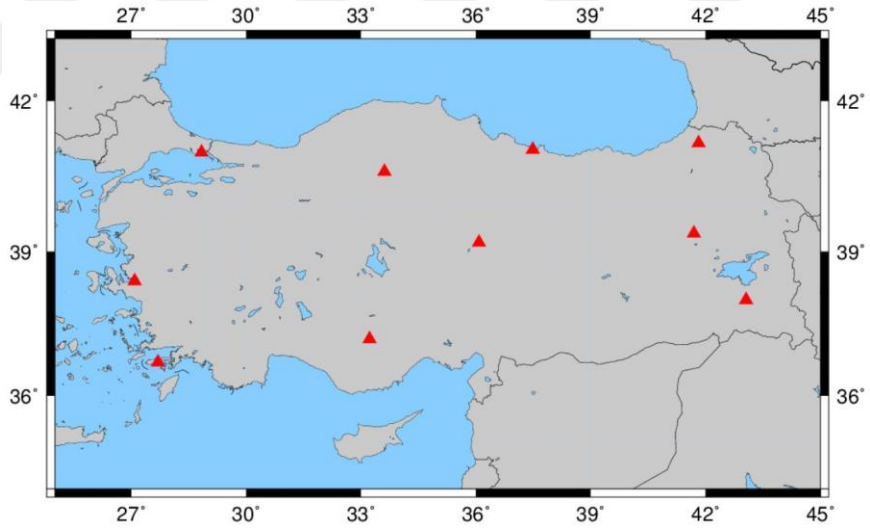
Simüle edilen GPS gözlemleri yine Bernese v5.2 yazılımı kullanılarak PPP tekniği ile değerlendirilmiştir. Değerlendirme aşamasında, önsel gecikmeler ve iz düşüm fonksiyonları Tablo 4.8 dikkate alınarak değiştirilmiştir. Tablo 4.10'da ikinci simülasyon çalışmasına ait doğruluk analizleri yer almaktadır.

Tablo 4.10 İkinci simülasyon çalışmasına ait doğruluk analizi (mm)

Senaryo	ZTD	Yükseklik
1	4.9	4.4
2	4.9	4.2
3	4.7	4.0
4	4.7	4.0
5	4.7	4.0

Birinci ve ikinci simülasyon çalışmaları karşılaştırıldığında, bu çalışma kapsamında önerilen yaklaşımların etkisinin ilk simülasyon çalışmasında daha fazla olduğu ve RMS değerlerinin daha küçük olduğu görülmektedir. İlk simülasyon çalışmasında birçok GNSS hata kaynağının dikkate alınmaması nedeniyle bu aslında beklenen bir durumdur. Bunun dışında, her ne kadar senaryolar arasındaki farklar çok büyük olmasa da yine en iyi sonuçların önerilen yaklaşımlar ile elde edildiği görülebilmektedir. Ayrıca, önerilen yaklaşımlar ZTD ve Yükseklik bileşenini birinci senaryoya göre sırasıyla %4 ve %9 oranında iyileştirmiştir.

Model doğrulukları ve simülasyon çalışmaları sonuçları incelendiğinde önerilen yaklaşımlar ile yani modifiye edilmiş iz düşüm fonksiyonları ile doğruluğu daha yüksek bilinmeyenlerin elde edilebileceği görülmektedir. Ancak yine de önerilen yaklaşımların gerçek verilere dayalı olarak da test edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda TUSAGA-Aktif ağına ait 10 istasyon seçilmiş (Şekil 4.5) ve bu istasyonların 2021 yılının Temmuz ayına ait gerçek verileri kullanılarak PPP analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5 Gerçek verilere dayalı çalışmada kullanılan istasyonlar

TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait gerçek GPS verileri yine Bernese v5.2 yazılımı kullanılarak Tablo 4.8'de yer alan her bir senaryo için PPP tekniği ile değerlendirilmiş ve veri değerlendirme stratejisi Tablo 4.11'de özetlenmiştir. Her bir senaryo için yine ZTD ve Yükseklik bileşenleri incelenmiştir. Bernese yazılımından elde edilen ZTD değerleri ERA5 verilerine dayalı olarak test edilmiştir. Yükseklik bileşeni için ise her bir senaryo sonucu elde edilen yükseklik değerlerinin

ortalaması referans değer olarak kabul edilmiştir. Ayrıca hem ZTD hem de Yükseklik bileşeni için zaman serilerine Medyan analizi uygulanmış ve kaba hatalı olan düzeltme değerleri zaman serisinden çıkarılmıştır.

Tablo 4.11 Veri değerlendirme stratejisi

Parametre	**Açıklama**
Hassas uydu yörünge ve saat bilgisi	CODE ürünleri kullanılmıştır.
Uydu sistemi	GPS
Uydu yükseklik açısı	3°
Veri aralığı	Gözlemler için 300 sn ZTD kestirimi için 1 sa Gradyent kestirimi için 24 sa
Ölçülerin ağırlıklandırılması	Uydu yüksekli açısına bağlı ağırlıklandırma $\sin^2 e$
İkinci mertebeden iyonosferik etkiler	CODE ürünleri kullanılmıştır.
Tamsayı belirsizliği	Yaklaşık
Önsel troposferik gecikme (ZHD)	Tablo 4.8'e göre değiştirilmiştir.
İz Düşüm Fonksiyonu	
Atmosfer ve okyanus yüklemeleri	Dikkate alınmıştır.

Tablo 4.12'de gerçek verilere dayalı gerçekleştirilen çalışmaya ait doğruluk analizleri yer almaktadır. Tabloda parantez içinde yer alan değerler Medyan analizi sonucunda elde edilen değerleri ifade etmektedir. Tablo 4.12 incelendiğinde, Medyan analizi sonrasında elde edilen sonuçların az da olsa iyileştiği ancak senaryolar arasındaki farkların 1 mm'nin altında olduğu görülmektedir. Tabloya göre en iyi sonuçlar birinci senaryo ile elde edilmiştir. Bu durum GPS verilerinin değerlendirme stratejisi ile açıklanabilir. Çünkü Steigenberger vd. (2009), karasal olmayan atmosferik yüklemelerin dikkate alınmadığı durumda troposfer modelleri

kullanılarak elde edilen önsel gecikme değerlerinin kullanılması gerektiğini belirtmektedir. Birinci senaryoda ZHD değeri GPT modeli ile elde edilmektedir. Ayrıca, PPP çözümlerinde karasal olmayan atmosferik yüklemeler dikkate alınmamıştır. Tablo 4.12'ye göre, bu tez çalışmasında önerilen yaklaşımlar ile her ne kadar ZTD doğrulukları görece iyileşmiş olsa da, Yükseklik bileşeninde doğruluk düşmektedir. Önerilen yaklaşımların model doğrulukları ve simülasyon çalışmalarındaki katkısı göz önüne alındığında, gerçek verilerde özellikle Yükseklik bileşenine katkı sağlayamaması ERA5 veri setinin doğruluğu ile açıklanabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, her ne kadar NWM verileri kullanılarak oluşturulan model ve fonksiyonlar ile daha doğru sonuçlar elde edilebilse de NWM verileri gerçek atmosfer (troposfer) koşullarını tam olarak yansıtamamaktadır.

Tablo 4.12 Gerçek verilere dayalı gerçekleştirilen çalışmaya ait doğruluk analizi (mm)

Senaryo	ZTD	Yükseklik
1	15.9 (14.5)	9.6 (9.2)
2	15.9 (14.5)	9.7 (9.2)
3	15.6 (14.2)	9.9 (9.5)
4	15.7 (14.2)	9.9 (9.5)
5	15.7 (14.3)	9.9 (9.4)

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

İklim değişikliğinin küresel ölçekte sıcaklık artışına ve buna bağlı olarak buzulların erimesine ve deniz seviyesinin yükselmesine neden olduğu bilinmektedir. Doğruluğu yüksek meteorolojik parametreler de aşırı ve ani yağışların önceden belirlenmesi gibi iklim çalışmalarında kilit rol oynamaktadır. Bu nedenle özellikle atmosferdeki su buharı bilgisi gibi meteorolojik parametrelerin gerçek zamanlı olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda GNSS, su buharı bilgisinin elde edilmesinde özellikle günün her saatinde ve her türlü hava koşulunda gözlem yapabilmesi nedeniyle önemli bir rol oynamaktadır. GNSS ile doğruluğu yüksek su buharı bilgisinin elde edilebilmesi için hem önsel gecikme değerinin hem de eğik gecikme ile başucu yönündeki gecikme arasındaki ilişkiyi sağlayan iz düşüm fonksiyonunun seçimine dikkat edilmesi gerekmektedir.

Literatürdeki iz düşüm fonksiyonları ve önsel gecikme değerlerinin elde edilmesini sağlayan troposfer modelleri incelendiğinde, gerek zamansal ve konumsal çözünürlükleri gerek de doğrulukları bakımından farklılıklar görülmektedir. VMF1 ve PMF gibi güncel meteorolojik parametreler kullanılarak üretilen iz düşüm fonksiyonları ile daha yüksek doğruluğa sahip sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca, zamansal ve konumsal çözünürlüğü yüksek NWM verileri ile yıllık, yarı yıllık ve günlük değişimlerin dikkate alınarak oluşturulan troposfer modelleri ile doğruluğu daha yüksek meteorolojik parametreler elde edilebilmektedir. Bu bağlamda bu tez çalışmasında, hem troposfer ve troposferik gecikme modellerinin hem de iz düşüm fonksiyonlarının GNSS çözümlerinden elde edilen konum doğruluklarını ve başucu ıslak gecikme değerini ve buna bağlı olarak su buharı bilgisini etkilediği göz önüne alınarak Türkiye için doğruluğu yüksek bir troposfer modelinin ve iz düşüm fonksiyonun belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada model ve fonksiyonlar, ECMWF tarafından üretilen ERA5 veri setinin 1 saatlik zamansal ve 0.25°'lik konumsal çözünürlüğe sahip yüzey ve profil verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Troposfer modelleri özellikle karasal olmayan atmosferik yüklemelerin dikkate alınmadığı durumda NWM verilerine göre daha yüksek doğruluğa sahiptir. Bu bağlamda Türkiye için oluşturulan troposfer

modelinde yıllık ve yarı yıllık etkilerin yanı sıra günlük etkiler de dikkate alınmıştır. Ayrıca, model doğruluğunu artırmak için sıcaklık, basınç ve su buharı gibi her bir parametre, 20°-50° doğu boylamları ve 30°-50° kuzey enlemleri arasında kalan bölgede yer alan 1° konumsal çözünürlükteki her bir grid noktası için ayrı ayrı modellenmiştir.

ERA5 ile hem günlük hem de günün her saati için aylık ortalama verileri elde edilebilmektedir. Bu nedenle öncelikle bu çalışma kapsamında oluşturulacak model için hangi veri setinin kullanılması gerektiği bir karşılaştırmalı analiz sonucunda belirlenmiştir. Karşılaştırmalı analiz için ERA5'in 2015-2019 yılları arasındaki 5 yıllık verileri kullanılarak her iki veri seti için de modeller belirlenmiş ve sonuçlar ERA5'in 2020 verilerine dayalı olarak test edilmiştir. Analiz sonucunda her iki veri seti için elde edilen genel doğruluklar arasındaki farkların sıcaklık için 1 K'nin, diğer parametreler için 1 mbar'ın altında olduğu ve ortalama hata değerlerinin de mutlak anlamda neredeyse eşit olduğu görülmüştür. Bu nedenle hesap yükünü azaltmak için nihai troposfer modelinin günün her saati için üretilen aylık ortalama veriler yardımıyla oluşturulmasına karar verilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen nihai troposfer modeli için ERA5'in 1979 ile 2019 yılları arasındaki 41 yıllık veri seti kullanılmıştır. Nihai troposfer modelinin doğruluk analizleri; NWM verileri, yersel meteorolojik gözlem verileri ve IGS hassas troposfer ürünleri olmak üzere üç farklı veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. NWM verilerine dayalı doğruluk analizleri incelendiğinde ortalama hataların sıcaklık için yaklaşık 1 K, basınç ve su buharı basıncı için ise 1mbar'ın altında olduğu görülmüştür. Yersel meteorolojik istasyon verilerine dayalı analizler de ise ortalama hatalar her üç parametre için de neredeyse sıfırdır. Ayrıca, basınç için elde edilen doğruluk 5.05 mbar seviyesindedir. En güncel troposfer modellerinden biri olan WGTEM'in basınç için doğruluğunun 5.9 mbar ve sıcaklık için ortalama hatasının -0.26 °C olduğu göz önüne alındığında bu çalışma kapsamında üretilen nihai model ile doğruluğun arttığı söylenebilir. Çalışma bölgesinde yer alan 8 IGS istasyonuna ait hassas troposfer ürünleri kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizleri ile genel ZTD doğruluğu 3.15 cm elde edilmiştir. Yine bu değer WGTEM'in aynı strateji ile elde edilen 3.82 cm'lik doğruluk değeri ile karşılaştırıldığında bu çalışma kapsamında üretilen nihai modelin doğruluğunun arttığı ifade edilebilir.

Tezde üretilen troposfer modelinin yanı sıra ayrıca doğruluğu yüksek bir iz düşüm fonksiyonun belirlenmesi de amaçlanmıştır. Literatürdeki iz düşüm fonksiyonları ve bu fonksiyonlarının karşılaştırıldığı çalışmalar incelendiğinde VMF1 gibi güncel meteorolojik parametreler dikkate alınarak oluşturulan fonksiyonlar ile daha yüksek doğruluğa sahip bilinmeyenlerin elde edildiği görülmektedir. Ancak istasyon özelinde ve direkt iz düşüm yöntemiyle elde edilen PMF ile karşılaştırıldığında, VMF1 özellikle istasyon yüksekliklerinde sistematik hatalara neden olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada PMF'nin üretilme stratejisi izlenmiştir. Ancak, iz düşüm fonksiyonları Herring'in sürekli kesir modeline göre oluşturulduğundan ve bu model sadece uydu yükseklik açısına bağlı olduğundan atmosferin (troposferin) asimetrik etkileri iz düşüm fonksiyonları ile dikkate alınamamaktadır. Bu asimetrik etkiler troposferik gradyentler yardımıyla dikkate alınsa da Eşitlik 2.21'de verilen klasik yaklaşım ile tam olarak giderilememektedir. Atmosferdeki su buharının ani ve düzensiz değişimi göz önüne alındığında asimetrik etkilere troposferin ıslak bileşeninin neden olduğu söylenebilir. Bu bağlamda bu çalışmada, ıslak iz düşüm fonksiyonunun modifiye edilmesi için üç farklı yaklaşım önerilmiştir. Bu sayede troposferik gecikme modelinin iyileştirilmesi de amaçlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında öncelikle önerilen yaklaşımların model doğrulukları karşılaştırılmıştır. Model doğrulukları incelendiğinde önerilen yaklaşımlarda standart yaklaşıma göre hataların azaldığı ve özellikle düşük uydu yükseklik açılarında 3-6 kat arası iyileşmelerin olduğu görülmüştür. Daha sonra üretilen iz düşüm fonksiyonları ve yeni yaklaşımlar; iki farklı simülasyon çalışması ve gerçek GPS verilerine dayalı olarak 5 farklı senaryo altında test edilmiştir. Birinci senaryo tamamen ampirik model ve fonksiyona dayalıdır. Diğer senaryolarda ise hem önsel gecikme değerleri hem de iz düşüm fonksiyonları NWM verilerine dayalı olarak elde edilmiştir. Ayrıca ikinci senaryo klasik yaklaşımı ve diğer senaryolar ise yeni yaklaşımları ifade etmektedir.

Birinci simülasyon çalışmasında; istasyon koordinatları, alıcı saat hatası, troposferik gecikmeler ve rasgele hatalar dışında tüm hata kaynaklarının çözülmüş olduğu varsayılmıştır. Sonuçlara göre özellikle ZTD bileşeninde mm altı mertebede doğruluk değerleri elde edildiği, yükseklik bileşeninde ise önerilen yaklaşımların birinci senaryoya göre 4-5 kat, ikinci senaryoya göre 2-3 kat daha iyi doğruluğa

sahip olduğu görülmüştür. İkinci simülasyon çalışmasında ise daha gerçekçi analizler yapabilmek için iyonosferik etkiler ve uydu yörünge ve saat hataları gibi diğer GNSS hata kaynakları da dikkate alınarak GPS gözlemleri simüle edilmiş ve PPP çözümleri gerçekleştirilmiştir. İkinci simülasyon çalışmasına ait sonuçlar incelendiğinde, önerilen yaklaşımların etkisinin daha az olduğu ancak yine de ZTD ve Yükseklik bileşeninde birinci senaryoya göre sırasıyla %4 ve %9 oranında iyileşmeler olduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında önerilen modifiye edilmiş iz düşüm fonksiyonlarının gerçek verilere dayalı olarak da test edilmesi için TUSAGA-Aktif ağına ait 10 istasyon seçilmiş ve bu istasyonların 2021 yılının Temmuz ayına ait verileri değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda elde edilen ZTD ve Yükseklik bileşenine ait zaman serilerine Medyan analizi uygulanmış ve kaba hatalar elimine edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her ne kadar senaryolar arasındaki farklar 1 mm'nin altında olsa da en iyi sonuçlar Yükseklik bileşeni için ampirik model ve fonksiyona dayalı olan birinci senaryo ile elde edilmiştir. Ancak önerilen yaklaşımlar ile ZTD doğrulukları görece iyileşmiştir. Önerilen yaklaşımların model doğrulukları ve simülasyon çalışmalarındaki katkısı göz önüne alındığında troposferik gecikme modelini iyileştirdiği ve klasik yaklaşıma göre daha doğru sonuçların elde edilebileceği görülmektedir. Ancak önerilen yaklaşımları, gerçek veriler kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde özellikle Yükseklik bileşenine katkı sağlayamaması ERA5 veri setinin doğruluğu ile de açıklanabilir. Her ne kadar NWM verileri kullanılarak oluşturulan model ve fonksiyonlar ile daha doğru sonuçlar elde edilebilse de NWM verileri gerçek atmosfer koşullarını tam olarak yansıtamamaktadır. Ancak önerilen yaklaşımların, simülasyon çalışmalarına ait sonuçları göz önüne alındığında troposferik gecikme modelini iyileştirdiği görülebilmektedir. Bu bağlamda önerilen yaklaşımların örneğin aşırı ve ani yağışların etkili olduğu sert hava koşulları altında GNSS çözüm doğruluklarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, daha yüksek doğruluğa sahip NWM verileri kullanıldığında, önerilen yaklaşımların GNSS çözümlerine katkı sağlayacağı görülebilmektedir.

KAYNAKÇA

Askne, J., & Nordius, H. (1987). Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science, 22*(03), 379-386.

Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 97*(D14), 15787-15801.

Bosy, J., Kaplon, J., Rohm, W., Sierny, J., & Hadas, T. (2012). Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data. *Annales Geophysicae*, *30*, No. 9, 1379-1391.

Böhm, J., & Schuh, H. (2003). Vienna mapping functions. *16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 131-143.

Böhm, J., & Schuh, H. (2004). Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters, 31*(1).

Böhm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006a). 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: Solid Earth, 111*(B2).

Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. (2006b). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters, 33*(7).

Böhm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2007). Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy, 81*(10), 679-683.

Böhm, J., Salstein, D., Alizadeh, M.M., & Wijaya, D.D. (2013). Geodetic and atmospheric background. *Atmospheric effects in space Geodesy*, 1-33. Springer, Berlin, Heidelberg.

Böhm, J., Möller, G., Schindelegger, M., Pain, G., & Weber, R. (2015). Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions, 19*(3), 433-441.

Champollion, C., Masson, F., Van Baelen, J., Walpersdorf, A., Chéry, J., & Doerflinger, E. (2004). GPS monitoring of the tropospheric water vapor distribution and variation during the 9 September 2002 torrential precipitation episode in the Cévennes (southern France). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109*(D24).

Chen, G., & Herring, T. (1997). Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102*(B9), 20489-20502.

Choy, S., Wang, C., Zhang, K., & Kuleshov, Y. (2013). GPS sensing of precipitable water vapour during the March 2010 Melbourne storm. *Advances in Space Research, 52*(9), 1688-1699.

Collins, J. P., & Langley, R. (1998). The residual tropospheric propagation delay: How bad can it get?. *Proceedings of ION GPS*, *(11)*, 729-738.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home, (Erişim Tarihi: 26 Ekim 2021).

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS software version 5.2*.

Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio science, 20*(6), 1593-1607.

Deo, M., & El-Mowafy, A. (2019). Comparison of advanced troposphere models for aiding reduction of PPP convergence time in Australia. *Journal of Spatial Science, 64*(3), 381-403.

Du, Z., Zhao, Q., Yao, W., & Yao, Y. (2020). Improved GPT2w (IGPT2w) model for site specific zenith tropospheric delay estimation in China. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 198*, 105202.

Hampel, F. R., Ronchetti, E. M., Rousseeuw, P. J., & Stahel, W. A. (2011). *Robust statistics: the approach based on influence functions*. John Wiley & Sons.

Herring, T. A. (1992). Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. *Proceedings of Refraction of Transatmospheric simals in Geodesy, eds. JC De Munck and TA Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy, 36*(4).

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146*(730), 1999-2049.

Hobiger, T., Ichikawa, R., Koyama, Y., & Kondo, T. (2008). Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113*(D20).

Jiao, D., Xu, N., Yang, F., & Xu, K. (2021). Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. *Scientific Reports, 11*(1), 1-13.

Karabatić, A., Weber, R., & Haiden, T. (2011). Near real-time estimation of tropospheric water vapour content from ground based GNSS data and its potential contribution to weather now-casting in Austria. *Advances in Space Research, 47*(10), 1691-1703.

Koch, K. R. (1999). *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*. Springer Science & Business Media.

Kraus, H. (2001). *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie*. Springer-Verlag.

Krüger, E., Schueler, T., Hein, G. W., Martellucci, A., & Blarzino, G. (2004). Galileo tropospheric correction approaches developed within GSTB-V1. *Proceedings of ENC-GNSS, 1619*.

Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., & Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical research letters, 40*(6), 1069-1073.

Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy, 92*(4), 349-360.

Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E., Bilich, A., Axelrad, P., & Braun, J. (2008). Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results. *GPS Solutions, 12*(3), 173-177.

Larson, K. M., Gutmann, E. D., Zavorotny, V. U., Braun, J. J., Williams, M. W., & Nievinski, F. G. (2009). Can we measure snow depth with GPS receivers?. *Geophysical Research Letters, 36*(17).

Leandro, R., Santos, M. C., & Langley, R. B. (2006). UNB neutral atmosphere models: development and performance. *Proceedings of ION NTM*, *52*, No. 1, 564-573.

Leandro, R. F., Langley, R. B., & Santos, M. C. (2008). UNB3m_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques. *GPS Solutions, 12*(1), 65-70.

Li, W., Yuan, Y., Ou, J., Li, H., & Li, Z. (2012). A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. *Chinese science bulletin, 57*(17), 2132-2139.

Marini, J. W. (1972). Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Science, 7*(2), 223-231.

Masoumi, S., McClusky, S., Koulali, A., & Tregoning, P. (2017). A directional model of tropospheric horizontal gradients in Global Positioning System and its application for particular weather scenarios. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122*(8), 4401-4425.

Mendes, V. (1999). *Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques* (Doktora Tezi). Department of Geodesy and Geomatics Engineering., University of New Brunswick, Kanada.

Mohammed, A. N., Abdelfatah, M. A., Mousa, A. E. K., & El-Fiky, G. S. (2018). Regional Egypt tropospheric mapping function model. *Alexandria Engineering Journal, 57*(4), 4157-4165.

Nafisi, V., Madzak, M., Böhm, J., Ardalan, A. A., & Schuh, H. (2012). Ray-traced tropospheric delays in VLBI analysis*. Radio Science, 47*(02), 1-17.

Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 101*(B2), 3227-3246.

Nievinski, F. G. (2009). *Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS* (Doktora Tezi). Department of Geodesy and Geomatics Engineering., University of New Brunswick, Kanada.

Nikolaidou, T., Balidakis, K., Nievinski, F., Santos, M., & Schuh, H. (2018). Impact of different NWM-derived mapping functions on VLBI and GPS analysis. *Earth, Planets and Space, 70*(1), 95.

Nilsson, T., Böhm, J., Wijaya, D. D., Tresch, A., Nafisi, V., & Schuh, H. (2013). Path delays in the neutral atmosphere. *Atmospheric effects in space geodesy*, 73-136. Springer, Berlin, Heidelberg.

Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of geophysical research: solid earth, 117*(B4).

Penna, N., Dodson, A., & Chen, W. (2001). Assessment of EGNOS tropospheric correction model. *Journal of Navigation, 54*(1), 37-55.

Rocken, C., Hove, T. V., Johnson, J., Solheim, F., Ware, R., Bevis, M., ... & Businger, S. (1995). GPS/STORM—GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 12*(3), 468-478.

Rocken, C., Sokolovskiy, S., Johnson, J. M., & Hunt, D. (2001). Improved mapping of tropospheric delays. *Journal of atmospheric and Oceanic Technology, 18*(7), 1205-1213.

Rohm, W., Yuan, Y., Biadeglgne, B., Zhang, K., & Le Marshall, J. (2014). Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions. *Atmospheric Research, 138*, 414-426.

Rothacher, M., Springer, T. A., Schaer, S., & Beutler, G. (1998). Processing Strategies for Regional GPS Networks. F. K. Brunner (Ed.), *Advances in Positioning and Reference Frames*, 93–100. Springer , Berlin, Heidelberg.

Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *The use of artificial satellites for geodesy, 15*, 247-251.

Saastamoinen, J. (1973). Contributions to the theory of atmospheric refraction: Part II. Refraction corrections in satellite geodesy. *Bulletin Géodésique (1946-1975), 107*, 13-34.

Santos, M. C., McAdam, M., & Böhm, J. (2012). Implementation status of the UNB-VMF1. *European Geosciences Union General Assembly 2012*, Viyana, 22-27 Nisan 2012.

Scaife, A. A., Spangehl, T., Fereday, D. R., Cubasch, U., Langematz, U., Akiyoshi, H., ... & Gettelman, A. (2012). Climate change projections and stratosphere–troposphere interaction. *Climate Dynamics, 38*(9-10), 2089-2097.

Schüler, T. (2014). The TropGrid2 standard tropospheric correction model. *GPS Solutions, 18*(1), 123-131.

Sezer, G., Dogan, A. H., & Erdogan, B. (2022). Effects of different mapping functions on GPS network solutions. *Acta Geodaetica et Geophysica, 57*(4), 609-624.

Showman, A. P., & Dowling, T. E. (2014). Earth as a Planet: Atmosphere and Oceans. *Encyclopedia of the Solar System*, 423-444. Elsevier.

Solomon, S. (2007). IPCC (2007): Climate change the physical science basis. *AGU Fall Meeting Abstracts*.

Steigenberger, P., Boehm, J., & Tesmer, V. (2009). Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading. *Journal of Geodesy, 83*, 943-951.

Tesmer, V., Boehm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2007). Effect of different tropospheric mapping functions on the TRF, CRF and position time-series estimated from VLBI. *Journal of Geodesy, 81*(6), 409-421.

Teunissen, P. J., & Montenbruck, O. (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. New York, NY, ABD: Springer.

Thayer, G. D. (1974). An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Science, 9*(10), 803-807.

Tunalı, E., & Özlüdemir, M. T. (2019). GNSS PPP with different troposphere models during severe weather conditions. *GPS Solutions, 23*(3), 82.

Tunalıoğlu, N., Doğan, A. H., & Durdağ, U. M. (2019). GPS sinyal gürültü oranı verileri ile kar kalınlığının belirlenmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 6*(1), 1-9.

Urquhart, L., Nievinski, F. G., & Santos, M. C. (2014). Assessment of troposphere mapping functions using three-dimensional ray-tracing. *GPS Solutions, 18*(3), 345-354.

Velikou, K., Lazoglou, G., Tolika, K., & Anagnostopoulou, C. (2022). Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe. *Water, 14*(4), 543.

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric thermodynamics. *Atmospheric Science: an Introductory Survey*. Elsevier.

Xu, C., Yao, Y., Shi, J., Zhang, Q., & Peng, W. (2020). Development of Global Tropospheric Empirical Correction Model with High Temporal Resolution. *Remote Sensing, 12*(4), 721.

Yao, Y., Xu, C., Shi, J., Cao, N., Zhang, B., & Yang, J. (2015). ITG: A new global GNSS tropospheric correction model. *Scientific reports, 5*(1), 1-9.

Zhang, W., Zhang, H., Liang, H., Lou, Y., Cai, Y., Cao, Y., ... & Liu, W. (2019a). On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China. *Journal of Geodesy, 93*(10), 1897-1909.

Zhang, W., Lou, Y., Cao, Y., Liang, H., Shi, C., Huang, J., ... & Fan, B. (2019b). Corrections of radiosonde-based precipitable water using ground-based GPS and applications on historical radiosonde data over China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124*(6), 3208-3222.

Zhou, Y., Lou, Y., Zhang, W., Kuang, C., Liu, W., & Bai, J. (2020). Improved performance of ERA5 in global tropospheric delay retrieval. *Journal of Geodesy, 94*(10), 1-14.

Zus, F., Dick, G., Douša, J., Heise, S., & Wickert, J. (2014). The rapid and precise computation of GPS slant total delays and mapping factors utilizing a numerical weather model. *Radio Science, 49*(3), 207-216.

Zus, F., Dick, G., Dousa, J., & Wickert, J. (2015). Systematic errors of mapping functions which are based on the VMF1 concept. *GPS Solutions, 19*(2), 277-286.

Zus, F., Balidakis, K., Dick, G., Wilgan, K., & Wickert, J. (2021). Impact of tropospheric mismodelling in GNSS precise point positioning: a simulation study utilizing ray-traced tropospheric delays from a high-resolution NWM. *Remote Sensing, 13*(19), 3944.

URL-1: https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=216496294&utm_medium=chatbot&utm_source=cds (Erişim Tarihi: 26 Ekim 2021)

URL-2: https://earth-info.nga.mil/index.php?dir=wgs84&action=wgs84 (Erişim Tarihi: 26 Ekim 2021)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Doğan, A., & Erdoğan, B. (2022) Farklı Veri Setleri ile Oluşturulan Troposfer Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi, *2. International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies*, Ankara, Türkiye.

Makaleler

1. Dogan, A. H., & Erdogan, B. (2022). A new empirical troposphere model using ERA5's monthly averaged hourly dataset. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 232*, 105865.

2. Dogan, A. H., Zus, F., Dick, G., Wickert, J., Schuh, H., Durdag, U. M., & Erdogan, B. (2023). Improving the Wet Mapping Function by Numerical Weather Models. *Advances in Space Research*, (Değerlendirme Sürecinde).