



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TÜRKİYE İÇİN PPP VE RADYOSONDA'DAN  
ELDE EDİLEN YOĞUŞABİLİR SU BUHARI  
DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**Sema Nur AĞAÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Mayıs-2022  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Sema Nur AĞAÇ  
Tarih: 24.05.2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# TÜRKİYE İÇİN PPP VE RADYOSONDA'DAN ELDE EDİLEN YOĞUŞABİLİR SU BUHARI DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sema Nur AĞAÇ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Salih ALÇAY

2022, 56 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Salih ALÇAY  
Doç. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTÇÜ  
Dr. Öğr Üyesi Sercan BÜLBÜL

GNSS sistemleri birçok farklı alana hizmet vermektedir. Jeodezik ölçmeler, araç takip sistemleri, turizm, tarım, askeri, deformasyon ölçmeleri ve arama kurtarma çalışmaları gibi çoğu alan GNSS sistemlerinden yararlanmaktadır. GNSS teknolojileri, sivil uygulamalar için de kullanılmaya başlanmış ve beraberinde güneş aktiviteleri, iyonosfer, troposfer gibi yan dalların da dikkatle incelenmesine olanak sağlamıştır. İyonosfer tabakasındaki etkiyi ortadan kaldırmak için çift frekanslı alıcılar kullanılmaktadır. İyonosferde, günlük, 27 günlük, mevsimlik, altı aylık, yıllık, 11 yıllık olmak üzere bazı düzenli, zamansal ve bölgesel değişimlerin yanı sıra bazı düzensiz değişimler de bulunmaktadır. Bu değişiklikler modellenenilmekte ve etkileri büyük ölçüde belirlenebilmektedir. Troposferik etki kuru bileşen ve ıslak bileşen olarak ayrılmaktadır. Kuru gecikme kuru gazlara bağlı iken ıslak gecikme su buharından oluşmaktadır. Kuru bileşen atmosferik basınçla ilgilidir ve doğal gazlar kanunu ile hesaplanmaktadır ancak ıslak bileşendeki su buharı dağılımının düzensizliğinden dolayı modellenmesi zordur. Bu nedenle troposferik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller kullanılarak troposferin sinyallere etkisi olabildiğince azaltılmaktadır. Tez çalışması kapsamında Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP) yöntemi ile elde edilen troposferik gecikmelerden yararlanarak yoğuşabilir su buharı miktarının (PWV:Precipitable Water Vapor) belirlenmesi ve elde edilen bu değerlerin günümüzde referans olarak kabul gören radyosondadan elde edilen PWV değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma da bölgeden bölgeye değişen iklim özelliklerinin PWV değerleri üzerindeki

etkisini incelemek için farklı coğrafi bölgelerde bulunan istasyonlar seçilmiştir. GNSS değerlendirme servisi olan CSRS-PPP yazılımı kullanılarak rinex verileri işlenmiştir. Mekik ve Deniz (2017)'de detayları verilen Türkiye için geliştirilmiş modeli ( $T_m=48.55+0.80T_s$ ) ile değerlendirme işlemleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda hava sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde PWV'nin daha yüksek değerlere ulaştığı, bundan dolayı Erzurum istasyonunun PWV değerlerinin İstanbul, İzmir ve Samsun istasyonları için hesaplanan PWV değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** CSRS-PPP, İzdüşüm Fonksiyonu, Radyosonda, Yoğuşabilir Su Buharı Miktarı (PWV)



**ABSTRACT  
MS THESIS**

**COMPARISON OF PRECIPITABLE WATER VAPOR VALUES OBTAINED  
FROM PPP AND RADIOSONDE FOR TURKEY**

**Sema Nur AĞAÇ**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN GEOMATICS ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Salih ALCAY**

**2022, 56 Pages**

**Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Salih ALCAY**

**Assoc. Prof. Dr. Salih Sermet OGUTCU**

**Assist. Prof. Dr. Sercan BULBUL**

GNSS systems serve many different areas. Geodetic measurements, vehicle tracking systems, tourism, agriculture, military, search and rescue operations such as field deformation measurements and GNSS systems to benefit from. GNSS technologies have also started to be used for civilian applications and have allowed careful study of side branches such as solar activities, ionosphere, troposphere. To eliminate the effect on the ionosphere layer, dual-frequency receivers are used. In the ionosphere, there are some regular, temporal and regional changes, as well as some irregular changes - daily, 27 day, seasonal, six-month, annual, 11 year. These changes can be modeled and their effects can be determined to a large extent. The tropospheric effect is divided into dry component and wet component. The dry delay is due to dry gases, while the wet delay consists of water vapor. The dry component is related to atmospheric pressure and is calculated by the law of natural gases, but it is difficult to model it due to the unevenness of the water vapor distribution in the wet component. For this reason, tropospheric models have been developed. Using these models, the effect of the troposphere on signals is reduced as much as possible. In the scope of the thesis, the amount of precipitable Water Vapor (PWV) was

determined by using the tropospheric delays obtained by the Precision Point Positioning (PPP) method and these values were compared with the PWV values derived by the radiosonde that are currently as a reference. In the study, stations located in different geographical regions were selected to study the effect of climate characteristics that vary from region to region on PWV values. Rinex data were processed using CSRS-PPP software, which is a GNSS evaluation service. Evaluation procedures were carried out with the model developed for Turkey ( $T_m=48.55+0.80T_s$ ), details of which are given in Mekik and Deniz (2017). As a result of the study, it was seen that PWV reaches higher values during periods of high air temperature, so the PWV values of Erzurum station are lower than the PWV values calculated for Istanbul, Izmir and Samsun stations.

**Keywords:** Amount of Precipitable Water Vapor (PWV), Mapping function, CSRS-PPP, Radiosonde,



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana her zaman destek olan ve yol gösteren, sabırla beni her zaman çalışmaya teşvik eden değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Salih ALÇAY'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Tez süresince bilimsel yaklaşımlarıyla farklı ve pratik yorumlar getirip ilerlemem için gayretini esirgemeyen Arş. Gör. Gökhan GÜRBÜZ'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda sıcaklık verilerini sağladığı için Meteoroloji Genel Müdürlüğüne, veri değerlendirmede kullanılan web tabanlı online CSRS-PPP için Natural Resources Canada (NRCan)'a, çalışmada kullanılan  $T_m$  modeli için Çetin Mekik ve İlke Deniz hocalarıma ve radyosonda istasyonlarına ait verileri erişme imkânı sunan Wyoming Üniversitesi Atmosfer Bilimi Bölümüne teşekkür ederim.

Bu süreçte yanımda olduklarını her zaman hissettiren, beni destekleyen ve motive eden arkadaşlarıma ve tüm hayatım boyunca maddi ve manevi yanımda olan, her zorlukta beni motive eden ve destekleyen daimî destekçilerim annem Güler TAŞCI'ya ve babam Sedat AĞAÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

SEMA NUR AĞAÇ  
KONYA-2022

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR .....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
1.GİRİŞ .....	1
2. ATMOSFERİN GNSS'E ETKİLERİ.....	2
2.1 ATMOSFERİK ETKİLER.....	2
2.2 SİNYAL YOLU EĞRİLİĞİ.....	2
2.3 ATMOSFERİK YAYINIM GECİKMELERİ.....	2
2.3.1 İyonosferik Gecikme.....	3
2.3.2 Troposferik Gecikme .....	4
2.3.2.1 Troposferik Gecikmenin Hesaplanması.....	5
2.3.2.1.1 Troposferik Modeller ve İzdüşüm Fonksiyonları .....	5
2.3.2.1.1.1 Troposferik Modeller .....	6
2.3.2.1.1.1.1 Askne ve Nordius Modeli .....	6
2.3.2.1.1.1.2 Baby Modeli .....	8
2.3.2.1.1.1.3 Black Modeli.....	9
2.3.2.1.1.1.4 Berman Modeli .....	9
2.3.2.1.1.1.5 Chao Modeli .....	10
2.3.2.1.1.1.6 Essen-Froome Diferansiyel Modeli.....	11
2.3.2.1.1.1.7 Egnos Modeli .....	13
2.3.2.1.1.1.8 Goad-Goadman Modeli .....	13
2.3.2.1.1.1.9 Hopfield Modeli.....	15
2.3.2.1.1.1.10 Tropgrid2 Modeli.....	17
2.3.2.1.1.1.11 Niell Modeli .....	17

2.3.2.1.1.1.12 Saastamoinen Modeli.....	18
2.3.2.1.1.1.13 UNB3 Modeli .....	19
2.3.2.1.1.2 İzdüşüm Fonksiyonları .....	21
2.3.2.1.1.2.1 Küresel Basınç ve Sıcaklık İzdüşüm Fonksiyonu (GPT) .....	22
2.3.2.1.1.2.2 Küresel İzdüşüm Fonksiyonu (GMF).....	22
2.3.2.1.1.2.3 Niell İzdüşüm Fonksiyonu (NMF) .....	23
2.3.2.1.1.2.4 İzobarik İzdüşüm Fonksiyonu (IMF).....	23
2.3.2.1.1.2.5 Vienna İzdüşüm Fonksiyonu (VMF).....	23
3. RAVİNSONDE GÖZLEMLERİ VE RADYOSONDA.....	25
4. GNSS METEOROLOJİSİ .....	29
4.1 CSRS-PPP ile ZWD Değerlerinin Elde Edilmesi .....	30
4.2 Yoğuşabilir Su Buharı Değerinin (PWV) Elde Edilmesi .....	32
5. UYGULAMA .....	35
SONUÇLAR.....	46
KAYNAKÇA.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	56

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Kısaltmalar

CSRS-PPP	:Kanada Mekansal Referans Sistemi- Hassas Nokta Konumlandırma
ECMWF	:Avrupa Orta Mesafeli Hava Tahminleri Merkezi
ERP	:Dünya Dönüş Parametreleri
GLONASS	:Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
GNSS	:Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri
GPT/GPT2	:Küresel Basınç ve Sıcaklık
IMF	:İzobarik İzdüşüm Fonksiyonu
Mbar	:Kısmi Buhar Basıncı
NCEP	:Ulusal Çevresel Tahmin Merkezi
NMF	:Niell İzdüşüm Fonksiyonu
NWP	:Sayısal hava tahmini
P	:Atmosferik basınç (mbar)
PWV	:Yoğuşabilir su buharı
STD	:Slant Total Delay
T	:Mutlak Sıcaklık
TEC	:Toplam Elektron İçeriği
UTC	:Eşgüdümlü Evrensel Zaman
VMF	:Viyana Küresel Troposferik Gecikme Modeli
Z	:Uydu Zenit Açısını,
ZTD	:Troposferik toplam gecikmesi
ZHD	:Kuru (hidrostatik) Gecikmesi
ZWD	:Zenit Islak Gecikmesi

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1 Farklı frekansların GNSS sinyalleri üzerindeki etkisi (Akgül, 2017).....	4
Şekil 2. 2 Troposfer gecikmesinin elde edilmesi (Selbesoğlu, 2017) .....	5
Şekil 2. 3 Essen-Froome Diferansiyel Modeli (Kahveci, 1997).....	12
Şekil 2. 4 Troposferik yol gecikmesi için geometri (Atta, 2016).....	14
Şekil 2. 5 Hopfield Model (URL-3) .....	16
Şekil 3. 1 Radyosonda balonu (URL-1) .....	26
Şekil 3. 2 Dünya çapındaki radyosonda gözlemlerinin konum haritası (URL-9) .....	26
Şekil 3. 3 Türk Radyosonda İstasyonları ve WMO Numaraları (URL-5).....	27
Şekil 3. 4 İnternet tabanlı radyosonda çıktısı (URL-6) .....	28
Şekil 3. 5 Radyosonda istasyonuna ait bilgiler (URL-7).....	28
Şekil 4. 1 CSRS-PPP yazılımının giriş sayfası (URL-7).....	31
Şekil 4. 2 CSRS-PPP Çıktı dosyası .....	31
Şekil 4. 3 .tro uzantılı troposfer dosyasının içeriği .....	32
Şekil 5. 1 Çalışmada kullanılan istasyon ve konumları.....	35
Şekil 5. 2 İzmir İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri.....	36
Şekil 5. 3 Samsun İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri.....	38
Şekil 5. 4 İstanbul İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri.....	40
Şekil 5. 5 Erzurum İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri.....	42

## **TABLolar LİSTESİ**

<b>Tablo 2. 1</b> Berman ıslak zirve gecikme modelleri için K değeri (Chen ve ark., 2016) .....	10
<b>Tablo 5. 1</b> Çalışmada kullanılan istasyonların detayları .....	35
<b>Tablo 5. 2</b> İzmir istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler ....	37
<b>Tablo 5. 3</b> Samsun istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler	39
<b>Tablo 5. 4</b> İstanbul istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler	41
<b>Tablo 5. 5</b> Erzurum istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler	43
<b>Tablo 5. 6</b> İzmir istasyonuna ait korelasyon değerleri .....	44
<b>Tablo 5. 7</b> Samsun istasyonuna ait korelasyon değerleri .....	44
<b>Tablo 5. 8</b> İstanbul istasyonuna ait korelasyon değerleri .....	45
<b>Tablo 5. 9</b> Erzurum istasyonuna ait korelasyon değerleri .....	45

## 1.GİRİŞ

Troposfer havanın yeryüzü ile temaslı olan en alt tabakasıdır. Yeryüzü ile yaklaşık 40 km arasında olduğu kabul edilen troposfer tabakasına nötr atmosfer de denilmektedir. Uydu sinyalleri atmosferde ilerlerken iyonosfer ve troposferde gecikmelere maruz kalmaktadır. Troposferik gecikme hidrostatik gecikme (ZHD) ve ıslak gecikme (ZWD) olarak ikiye ayrılmaktadır. ZHD, yüzey basıncı, sıcaklık ve nem gözlemleri ile modellenebilirken, ZWD'nin ise su buharı değişiminden dolayı modellenmesi zor olmaktadır. Su buharı, atmosferik olayların incelenmesinde anahtar parametrelerden biri olup küresel/bölgesel hava ve iklim değişikliklerinde önemli bir rol oynamaktadır. Şiddetli yağışlar, kuraklıklar, tayfunlar ve fırtınalar gibi birçok aşırı hava olayı, su buharındaki hızlı değişimlerle ilgilidir. ZWD'yi doğru bir şekilde modellemek, hava durumu tahmini için çok önemlidir. Hava tahminlerinin ve hidrolojik izlemenin doğruluğunu belirlemek için önde gelen parametrelerden biri olan yoğuşabilir su buharı atmosferik nem içeriğinin değerlendirilmesinde önemlidir. Tez kapsamı 5 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde troposferik gecikmenin tanımı, su buharının önemi ve yapılan çalışmanın genel yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ise troposferik modeller ve izdüşüm fonksiyonları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde radyosonda hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri) Meteorolojisi, CSRS-PPP (Kanada Mekansal Referans Sistemi) yazılımı ve PWV'nin (Yoğuşabilir Su Buharı) elde edilmesine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Beşinci bölümde Türkiye'de bulunan radyosonda istasyonlarının PWV verileri ile bu istasyonların yakın konumunda bulunan TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait gözlemler kullanılarak elde edilen PWV değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu kapsamda TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait gözlem verileri CSRS-PPP yazılımı kullanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen ZWD değerlerinden PWV değerleri kestirilmiştir. Radyosonda-PWV verilerine Wyoming Üniversitesi Atmosfer Bilimleri Bölümü'ne ait web sitesinden elde edilmiştir. Böylece PPP yöntemi ile elde edilen troposferik gecikme değerlerinden türetilen PWV değerlerinin doğruluğu Radyosonda-PWV değerleri dikkate alınarak karşılaştırmalı bir yaklaşımla incelenmiştir.

## **2. ATMOSFERİN GNSS'E ETKİLERİ**

### **2.1 ATMOSFERİK ETKİLER**

Birden fazla noktanın birbirine göre konumlarının belirlenmesinde faz ölçüsünün yüksek doğrulukla elde edilmesi sonuçların da yüksek doğrulukla belirlenmesini sağlamaktadır. Bu amaçla hataya neden olan faktörlere dikkat edilerek değerlendirmenin en doğru şekilde yapılması gerekmektedir (Özüğür ve ark., 2019). Atmosferin tabakalarında gerçekleşen sapmalar iki şekilde olmaktadır. İlki sinyal yolu eğriliği ikincisi ise yayının gecikmesidir. En büyük etkiyi yayının gecikmesi oluşturmaktadır (Özüğür ve ark., 2019).

İyonlaşmanın şiddeti elektron sayısı ile doğru orantılıdır (Yılmaz, 2013). İyonosfer tabakasında sinyalin ilerleme hızı, sinyalin frekansından etkilenmektedir. Eğer çift frekanslı bir alıcı tercih edilirse iyonosfer tabakasının sinyaller üzerindeki etkisi minimum seviyeye ulaşmaktadır (Çolak, 2019).

Sinyalin Dünya atmosferi boyunca yayılırken maruz kaldığı en büyük hata kaynaklarından biri, bu katmanı oluşturan kuru gazlar ve su buharı nedeniyle troposferik etkilerdir (Lima ve ark., 2022). Daha sağlıklı sonuçlara ulaşmak amacıyla bu hataların minimum seviyeye indirgenmesi için troposferik etkiler incelenmektedir (Mutlu, 2019). Troposferik etki kuru (hidrostatik) bileşen ve ıslak bileşen olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hidrostatik gecikme, sıcaklık, basınç ve nem değerlerinin hesaplanması ile elde edilmektedir. Islak bileşen ise su buharı dağılımının düzensizliğinden dolayı modellenmektedir.

### **2.2 SİNYAL YOLU EĞRİLİĞİ**

Elektromanyetik sinyal eğri bir yol üzerinde hareket etmektedir (Mekik, 1999). Sinyalin eğim açısının 15 derecenin altında olduğu durumlar da troposferik gecikme çok büyük boyutlara ulaşmaktadır. 15 derecenin altında yapılan çalışmalar da iyonosferik ve troposferik etkileri modellemek zorlaşmaktadır (Erdönmez, 2008).

### **2.3 ATMOSFERİK YAYINIM GECİKMELERİ**

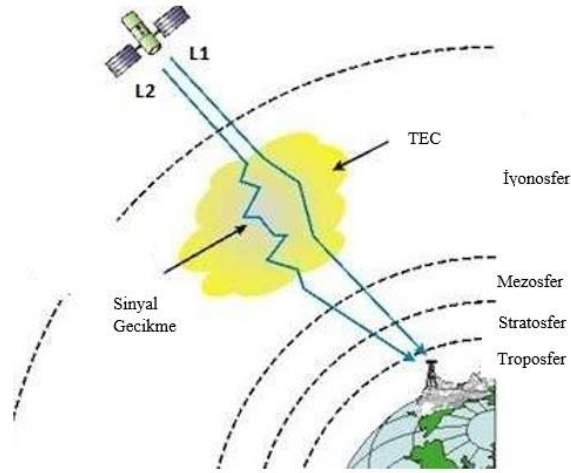
Elektromanyetik sinyallere etki eden atmosferik yayının gecikmeleri hata kaynaklarından bir tanesidir. Atmosferik kırılma, genellikle ışının geometrik yolunun

uzamasına neden olmaktadır. Bu gecikmeler troposferik ve iyonosferik gecikmeler olarak iki şekilde karşımıza çıkmaktadır (Akgül, 2017). GNSS uydularının yeryüzünden olan yükseklikleri dikkate alındığında bu uydulardan gelen sinyaller uzay boşluğundan geçtikten sonra ilk önce iyonosfer tabakasından daha sonra da troposfer tabakasından geçerek yeryüzünde ki GNSS alıcılarına ulaşmaktadır.

### 2.3.1 İyonosferik Gecikme

İyonosfer, yaklaşık 40 ile 2000 km arasında Dünya atmosferinin üst kısmında yer almaktadır. İyonosfer güneş radyasyonu ile iyonize edilmekte olup, bu durum sonucunda bölgede negatif ve pozitif iyonlar oluşmaktadır. İyonosfer, iyonlar ve serbest elektronlardan oluştuğundan GNSS sinyallerinde gecikmeye neden olmaktadır. Gecikme etkisi, sinyalin yolu boyunca yüklü parçacıkların sayısına yani Toplam Elektron İçeriğine (TEC) bağlıdır. İyonosferik gecikmeyi düzeltmek ve uydu navigasyon konumlandırmasının doğruluğunu iyileştirmek için, iyonosferik TEC'in modellenmesinden yararlanılmaktadır (Lin ve ark., 2022). İyonosfer, günlük, yirmi yedi günlük, mevsimlik, altı aylık, yıllık, 11 yıllık olmak üzere düzenli, zamansal ve bölgesel değişimler göstermektedir. Bu değişimler modellenenilmekte ve etkileri büyük ölçüde belirlenebilmektedir. Düzenli değişimlerin yanı sıra, iyonosferdeki beklenmedik düzensiz değişimler de olmaktadır. Uzay iklim koşulları (galaktik kozmik ışınlar, güneş radyasyon fırtınası, iyonosferik parıltı, güneş aşırı ultraviyole (EUV) ışınımı, kutup ışıkları, gezici iyonosferik bozucu etki, taçküre kütle atımı, koronal delikler, jeomanyetik fırtınalar, radyasyon kuşakları, güneş patlamaları, güneş rüzgârı) ve insan kaynaklı olaylar (nükleer patlama, roket fırlatımı) düzensiz varyasyonlara örnek verilebilir (Senturk ve Cepni, 2018).

İyonosferdeki iyonlaşma güneşin hareketleriyle bir değişim göstermekte olup Güneş faaliyetleri iyonosferdeki iyonlaşma miktarını da etkilemektedir. İyonosferdeki kod gözlemlerinde gecikme yaşanırken, taşıyıcı faz aynı miktarda hızlanmaktadır. Kod ve taşıyıcı fazdaki hatanın büyüklüğü, sinyal yolu boyunca 1 m<sup>2</sup>'lik bir silindirdeki TEC ile doğru orantılıdır (Akgül, 2017). Şekil 2.1'de L1 ve L2 frekanslarının iyonosferden geçerken gecikme hatasını farklı şekilde etkilediği görülmektedir.



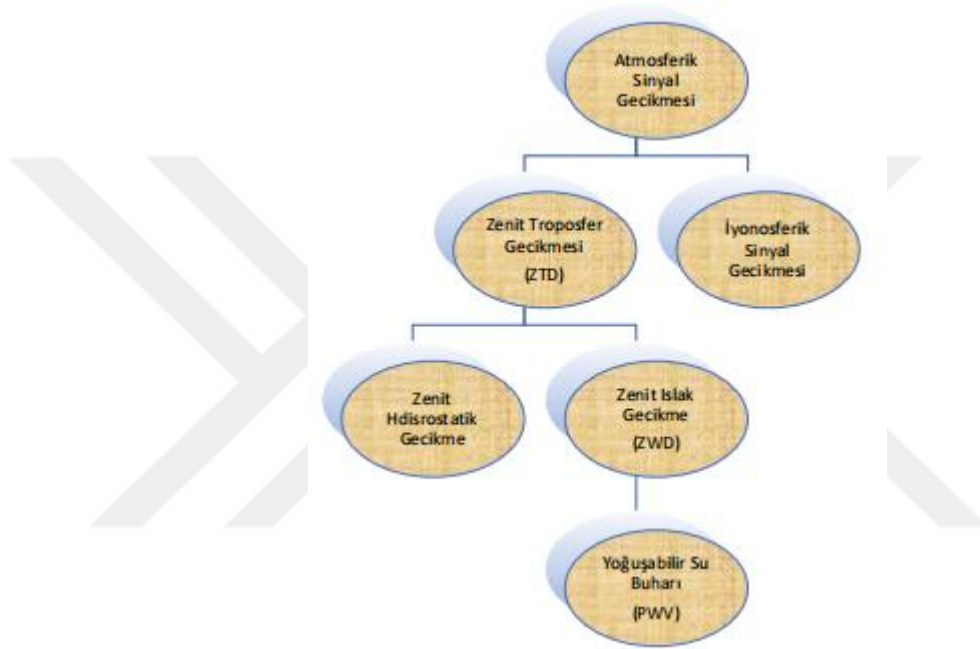
Şekil 2. 1 Farklı frekansların GNSS sinyalleri üzerindeki etkisi (Akgül, 2017)

### 2.3.2 Troposferik Gecikme

Troposfer havanın yeryüzü temaslı olan en alt tabakasıdır. Yeryüzü ile yaklaşık 40 km arasında olduğu kabul edilen troposfer tabakasına nötr atmosfer de denmektedir (Çolak, 2019). Troposferin kalınlığı kutuplarda yaklaşık 8 km'yi bulurken ekvatorunda bu değer yaklaşık 18 km olmaktadır (Erdem, 2011). Bir radyo sinyali nötr atmosferden geçtiğinde, yayılma gecikmesi olarak adlandırılan zaman gecikmesi ve bükülme etkisiyle kırılmaktadır. Sinyal basınca, sıcaklığa ve neme bağlı olan troposferik kırılma indisine duyarlı olduğundan, GNSS sinyalleri troposferden geçerken, uydudan alıcıya optik mesafenin geometrik mesafeden daha büyük hale gelmesi nedeniyle gecikmeye uğramaktadır. Troposferik gecikme uydu ve alıcı arasında bulunan doğru üzerindeki (STD: Slant Total Delay) gecikmedir (Selbesoğlu, 2017). Bu tür gecikmeler, hassas konumlandırmada önemli hata kaynaklarından biri olup GNSS uygulamalarında doğru şekilde ele alınması gerekmektedir (Liu ve ark., 2017). GNSS sinyallerindeki troposferik gecikme, troposfer modellerinde eşzamanlı olarak kaydedilen meteorolojik veriler kullanıldığında bile yükseklikte birkaç santimetre hataya neden olmaktadır.

Troposferik gecikme ZWD ve ZHD olarak ikiye ayrılmakta olup ZWD değerleri kullanılarak yoğunlaşabilir su buharı (PWV) değerleri elde edilmektedir (Şekil 2.2). Gecikmenin hemen hemen %90'ı kuru bileşenden oluşmakta olup, yüzey meteorolojik ölçmelerinden türetilen birçok troposferik gecikme kullanılarak yeterli

doğrulukla belirlenebilmektedir (Özüğür ve ark., 2019; Yılmaz, 2013). Bu durum ıslak bileşen için geçerli değildir. Islak bileşen atmosferdeki su buharı içeriğine bağlı olarak mekânsal ve zamansal değişkenlik göstermekte ve modellenmesi zor olmaktadır. Islak gecikme, GNSS analizlerinde çözüm denklemlerine genellikle bilinmeyen olarak girmekte olup parametre kestirimi sonucunda değeri bulunmaktadır (Tunalı, 2016).



Şekil 2. 2 Troposfer gecikmesinin elde edilmesi (Selbesoğlu, 2017)

### 2.3.2.1 Troposferik Gecikmenin Hesaplanması

#### 2.3.2.1.1 Troposferik Modeller ve İzdüşüm Fonksiyonları

Sinyal yolculuğu üzerindeki troposferik etkiyi azaltmak, jeodezi tekniklerine dayalı uygulamaların doğruluğunu artırmak, uydu yörüngeleri veya Dünya dönüş parametreleri gibi yüksek kaliteli ürünler sağlamak için güvenilir troposferik gecikme modellerinin oluşturulması gerekmektedir (Chen ve ark., 2020). Farklı uygulamalar için, troposferik modellerin gereksinimleri de farklıdır (Liu ve ark., 2013). Bununla birlikte, yanlış seçilmiş bir troposferik model, troposferik gecikme performansını ciddi şekilde düşürebilmektedir. Bu nedenle, pratikte kullanılmadan önce her bir troposferik modelin performansını çeşitli koşullar altında kapsamlı ve sistematik olarak araştırılması gerekmektedir (Chen ve ark., 2016). ZWD'nin elde edilmesinde iki

yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, radyosonda verilerinin matematiksel entegrasyonu, radyo gizleme verileri, sayısal hava tahmini ürünleri ve diğer önemli veriler; ikincisi ise, yüksek hassasiyetli bir ZWD modelinin oluşturulmasıdır (Xia ve ark., 2020).

GNSS verilerinin işlenmesindeki temel varsayımlardan biri, bir GNSS uydusundan bir alıcıya giden sinyaldeki gecikmenin, eşleme işlevi kullanılarak zenit yönünde eşleştirilebilmesidir. Bu nedenle ZTD'yi modellemek yaygın bir yöntemdir. Atmosferik su buharının yüksek zamansal ve uzamsal değişkenliği nedeniyle ZWD'yi değerlendirmek çok zor olduğundan, troposferik gecikmeyi azaltmak ve bununla birlikte konumlandırma doğruluğunu arttırmak için deneysel bir model uygulanmaktadır (Liu ve ark., 2017). Yaygın olarak kullanılan modellere Askne ve Nordius, Baby, Black, Berman, Chao, Essen-Frome, Egnos, Goad and Goadman, Hopfield, Tropgrid2, Niell, Saastamoinen ve UNB3 örnek verilebilir. Doğrulukları birçok akademik çalışmalar ile ispatlanmış bu modeller uzun süreli meteorolojik çalışmalar sonucunda elde edilmiş olup, Dünya çapında ki birçok çalışmaya da katkı sağlamıştır (Gürbüz ve ark., 2020).

Jeodezik uygulamalarda izdüşüm fonksiyonları ile zenit gecikmeler kullanılarak sinyalin gecikme değeri belirlenmektedir (Özlüdemir, 2002). GNSS referans istasyonlarının sayısı son yıllarda önemli ölçüde artmış olup, bu da ZHD ve ZWD tahminleri için çok uygun koşullar sağlamaktadır (Guo ve ark., 2019). Bahsedilen modellerin yanı sıra uygulamalarda kullanılan izdüşüm fonksiyonları da mevcuttur. Bunlar GPT, GMF, GMF3, GPT2, GPT2w, ECMWF, IMF, NMF, VMF1 ve VMF3 'tür.

### **2.3.2.1.1.1 Troposferik Modeller**

#### **2.3.2.1.1.1.1 Askne ve Nordius Modeli**

Askne ve Nordius, atmosferdeki dikey nem dağılımını hesaba katıp yükseklik arttıkça su buharı basıncının azaldığını varsaymaktadır. Model dikey dağılımlar hakkındaki bilgilerle birlikte, kullanıcı konumundaki sıcaklık ve su buharı basıncına ilişkin verileri kullanmaktadır. Yerinde gözlemlenen parametreler modele dahil

edilmesine rağmen dikey dağılım yalnızca meteorolojik verilerden elde edilmektedir. Sıcaklıktaki dikey değişim, atlama oranı  $\beta$  (K/m) ile tanımlanan doğrusal bir modelle yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 2.1’de verilen T ve  $T_0$  (Kelvin) sırasıyla h ve  $h_0$  (m) yüksekliğindeki sıcaklıkları ifade etmektedir (Dousa ve ark., 2014).

$$T = T_0 - \beta (h - h_0) \quad (2.1)$$

Su buharı basıncı, toplam basınç ile aynı şekilde azalmaktadır. 2.2 eşitliğinde kullanılan e kısmi su buharı basıncındaki (hPa) dikey değişimi,  $P_0$  yüzeydeki su buharı basıncını ve P atmosferik basıncı simgelemektedir.  $\lambda$  mevsime ve enleme bağlı bir parametre olarak kabul edilmektedir (Chen ve ark., 2016).

$$\frac{e}{e_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\lambda+1} \quad (2.2)$$

Model, Askne ve Nordius tarafından 2.3 eşitliğinden entegre edilerek geliştirilmiştir. Model yüzeylerdeki kısmi su buharı basıncına, ortalama sıcaklığa ve kısmi su buharı basıncı için  $\lambda$ 'ya bağlıdır. 2.3 ve 2.4 eşitliklerinde kullanılan  $k_2$  ve  $k_3$  kırılma sabitlerini,  $g_m$  ( $m/s^2$ ) ortalama yerçekimi ivmesini ve  $R_d = 287.058$  (J/kg/K) kuru hava için spesifik gaz sabitini simgelemektedir. 2.3 eşitliğinde Askne ve Nordius modelinin ıslak bileşen formülü verilmektedir. 2.4 eşitliği ile yüzey sıcaklığından ortalama sıcaklık elde edilmiştir (Chen ve ark., 2016; Dousa ve ark., 2014).

$$ZWD = 10^{-6} \left( k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \frac{R_d}{(\lambda+1)g_m} .e_s \quad (2.3)$$

$$T_m = T_s \left( 1 - \frac{aR_d}{(\lambda+1)g_m} \right) \quad (2.4)$$

### 2.3.2.1.1.1.2 Baby Modeli

Baby ve arkadaşları yerçekim ivmesinin rakımla azaldığını varsayıp yüzey sıcaklığı ve Dünya'nın merkezinden istasyona olan mesafe değerlerini kullanarak 2.5 eşitliği ile  $g_m$ 'yi tanımlamaktadır. 2.5, 2.6 ve 2.7 eşitliklerinde kullanılan  $T_s$  yüzey sıcaklığını,  $g_s$  istasyondaki yüzey yerçekimi ivmesini ve  $r_s$  Dünya'nın merkezinden istasyona olan mesafeyi ifade etmektedir. 2.6 eşitliği kullanılarak  $\mu$  değeri hesaplanmaktadır (Chen ve ark., 2016).

$$g_m = \frac{g_s}{1 + \frac{2T_s}{r_s a(u+1)}} \quad (2.5)$$

$$\mu = \frac{g_s r_s}{R_d (r_s a - 2T_s)} \quad (2.6)$$

$$\Delta L_h = 0.0223009 \frac{P_s}{g_s} \cdot \left[ 1 + \frac{2T_s \cdot R_d (r_s a - 2T_s)}{r_s a [g_s r_s + R_d (r_s a - 2T_s)]} \right] \quad (2.7)$$

Model, bağıl nemin sabit yüzey değerinin ise  $H_m$  yüksekliğine kadar eşit olduğu ve sıcaklığın azaldığı varsayımlarına dayanmaktadır (Mendes, 1999). Bu varsayıma dayalı olarak, doymuş su buharı basıncı ( $P_{wvs}$ ) 2.8 eşitliği ile hesaplanmaktadır (Chen ve ark., 2016).

$$P_{wvs} = \exp \left( A - \frac{B(T)}{T} \right) \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8'de  $T > 273.15$  K olduğunda  $A=21.3195$  ve  $B(T)=5327.1157$  ve  $T \leq 273.15$  K olduğunda  $A=24.3702$  ve  $B(T)=6162.3496$  değerleri elde edilmiştir.  $T$  sıcaklığının yükseklik ile sabit bir  $\alpha$  oranında azaldığını varsayarak,  $\Delta L_w$  için 2.9 formülünü elde etmiştir (Chen ve ark., 2016).

$$\Delta L_w = 3.81 \frac{RH}{a} \cdot \left[ \frac{P_{wvs}(T_s)}{B(T_s)} - \frac{P_{wvs}(T_m)}{B(T_m)} \right] \quad (2.9)$$

$B(T_s)$ , zemin yüzeyinde ölçülen sıcaklığa karşılık gelen  $B$ 'nin değerini ifade etmektedir.  $B(T_m)$  ise,  $T_m$  olarak belirtilen,  $H$  yüksekliğindeki sıcaklığa karşılık gelen  $B$ 'nin değeridir (Chen ve ark., 2016).

### 2.3.2.1.1.1.3 Black Modeli

Black, Hopfield'ın çalışmasına dayalı uygun bir yöntem olan troposferik bir model geliştirmiştir (Atta, 2016). Yüksekliğe göre atmosferik su buharının değişimini modellemenin zor olduğu gerçeğini göz önünde bulundurarak farklı koşullar altında birkaç ZWD düzeltme değeri bulmuştur. Bu düzeltme değerleri tropik veya orta enlem bölgelerinde yaz için  $\Delta L_w=0.28$  m, orta enlemlerde ilkbahar veya sonbahar için  $\Delta L_w=0.20$  m, deniz orta enlemlerinde kış için  $\Delta L_w=0.12$  m, kıtasal orta enlemlerde kış için  $\Delta L_w = 0.06$  m ve kutup bölgeleri için  $\Delta L_w = 0,05$  m olarak verilmiştir (Chen ve ark., 2016). Modelin kuru ve ıslak bileşeni 2.11 ve 2.12 eşitliklerinde ifade edilmektedir. Kuru ve ıslak bileşen formüllerinde  $P_0$  yer basıncını,  $T_0$  sıcaklığı,  $E$  derece cinsinden yükseklik açısını,  $E_0$  kısmi su buharı basıncını,  $H_d$  hidrostatik gecikme için üst sınır yüksekliğini,  $r$  Dünya merkezinden GNSS antenine radyal mesafeyi ve  $H_T$  ıslak gecikme/tropopoz yüksekliği için üst sınır yüksekliğini simgelemektedir (Atta, 2016; Chen ve ark., 2016).

$$\Delta L_h = 2.315 * 10^{-3} P_s * \frac{T_s - 4.12}{T_s} \quad (2.10)$$

$$B_{dry} = \frac{1.552 * 10^{-5} \left[ \frac{K}{hPa} \right] * \frac{P_0}{T_0} * H_d - \frac{1.92 \left[ \frac{m}{0} \right]}{E^2 + 0.6^0}}{\sqrt{1 - \left( \frac{\cos E}{1 + I_c \cdot \frac{H_d}{r}} \right)^2}} \quad (2.11)$$

$$B_{wet} = \frac{0.07465 \left[ \frac{K^2}{hPa} \right] * \frac{E_0}{T_0^2} * H_T - \frac{1.92 \left[ \frac{m}{0} \right]}{E^2 + 0.6^0}}{\sqrt{1 - \left( \frac{\cos E}{1 + I_c \cdot \frac{H_T}{r}} \right)^2}} \quad (2.12)$$

2.11 ve 2.12 matematiksel eşitliklerde kullanılan  $I_c$ 'nin formülü 2.13 eşitliğinde verilmekte olup burada kullanılan  $t_0$  °C cinsindedir (Atta, 2016).

$$I_c = 0.167 - (0.076 + 0.00015 t_0) \exp \left( -0.3 \left[ \frac{1}{0} \right] E \right) \quad (2.13)$$

### 2.3.2.1.1.1.4 Berman Modeli

Berman modeli ZWD'nin hesaplanmasında ve ıslak zenit gecikme modellerinin türetilmesinde kullanılmaktadır. Berman, 'Tropopozda ıslak kırılmanın

sıfır, sıcaklığın ve bağıl nemin sabit bir oran olduğunu varsaymaktadır. Bu varsayımlar altında Berman, "Berman 70" modelini türetmiştir (Mendes, 1999). Berman 70 ıslak zirve gecikmesi, homojen bağıl nem ve doğrusal sıcaklık kaybı varsayımı altında higrometrik profil boyunca tropopozun yükseklik entegrasyonuna dayanmaktadır. 2.14 ve 2.15 eşitliklerinde A, B ve C higrometrik sabitler olup,  $U_s$  bağıl nem olmak üzere  $A=17.1485$   $B=4684.1$   $C=38.45$  değerini ifade etmektedir (Chen ve ark., 2020).

$$\Delta L_w = \frac{373}{a(B-AC)} \left( 1 - \left( \frac{C}{T_s} \right)^2 \right) e_s \quad (2.14)$$

$$e_s = 0.061 U_s \exp \frac{AT_s - B}{T_s - C} \quad (2.15)$$

2.16 ve 2.17 eşitliklerinde kullanılan K değeri sabit olup değeri 0.3224'tür (Abdel ve ark., 2016; Chen ve ark., 2020).

$$\frac{dz_w}{dz} \approx K \frac{N_w}{N_d}, \quad (2.16)$$

$$dz_w = 10.946 K \frac{es}{T_s} \quad (2.17)$$

Berman 74", "Berman (DIN)" ve "Berman (TMOD)" olarak adlandırılan modeller için K değerleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir. "Berman (DIN)" modelinde biri gündüz profillerine, diğeri gece profillerine uygulanacak iki katsayı belirlenmektedir (Chen ve ark., 2016).

**Tablo 2. 1** Berman ıslak zirve gecikme modelleri için K değeri (Chen ve ark., 2016)

	<b>Berman 74</b>	<b>Berman (D/N)</b>	<b>Berman (TMOD)</b>
K	0.3224	0.2896 (gündüz) 0.3773 (gece)	0.3281

### 2.3.2.1.1.5 Chao Modeli

Chao modeli, hidrostatik kanuna ve su buharı değişkenliğine bağlı olarak geliştirilmiştir. 1971 yılında Chao hidrostatik yasanın suya uygulandığı, ideal gaz

yasasına dayalı bir zirve ıslak gecikme modeli türetmiş olup radyo sinyallerini incelemiştir (Abdel ve ark., 2016). Çalışmalarında sürekli kesir modellerinden Marini fonksiyonundan yararlanmış olup, bulmuş olduğu eşitlik ile troposferik indirgeme fonksiyonunu açıklamıştır (Erdönmez, 2008). 2.18 eşitliği troposferik uzaklık düzeltmesini ifade etmektedir. 2.18 eşitliğinde kullanılan  $C_w$  ve  $C_d$  ıslak ve kuru bileşenleri ifade etmekte olup,  $F_w$  ve  $F_d$  ise ıslak ve kuru bileşenler için projeksiyon fonksiyonlarını göstermektedir (Özüğür ve ark., 2019).

$$\Delta Z_{\text{trop}} = C_w \cdot F_w + C_d \cdot F_d \quad (2.18)$$

$$C_w = 470 \frac{e_{uc}^{1.23}}{TD^2} + 10230 \frac{e_{uc}^{1.23}}{TD^2} \quad (2.19)$$

$$C_d = 0.002276P \quad (2.20)$$

$$e_{uc} = \frac{H_u}{100} * 35.65 * 10^{(7.617 - 2285/TD)} \quad (2.21)$$

Projeksiyon fonksiyonların ıslak ve kuru eşitlikleri sırasıyla 2.22 ve 2.23 eşitliklerinde ifade edilmektedir. 2.22 ve 2.23 eşitliklerinde bulunan  $\tan E$  kuru ve ıslak bileşenler için zenit doğrultusunda 1 olarak kabul edilmektedir (Erdönmez, 2008; Özüğür ve ark., 2019).

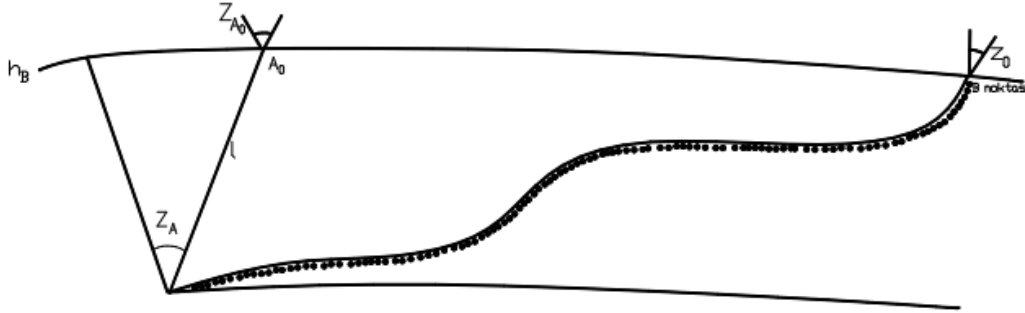
$$F_w = \frac{1}{\sin E + \frac{0.0003 \cdot S}{0.0170 + \tan E}} \quad (2.22)$$

$$F_d = \frac{1}{\sin E + \frac{0.00143 \cdot S}{0.0445 + \tan E}} \quad (2.23)$$

### 2.3.2.1.1.6 Essen-Froome Diferansiyel Modeli

Essen-Froome modeli, nispeten düz arazide kullanıma uygun bir model olup, az engebeli arazide bile  $\pm 6$  cm aralığında hata verebilmektedir. Essen Froome modeli referans noktasından daha düşük nokta yüksekliği için negatif bir hata ve referans noktasının üzerindeki nokta yükseklikleri için pozitif bir hata vermektedir. Ayrıca Saastamoinen veya Hopfield modelleri kullanılarak B noktasının üzerinde kalan bölge

hesaplanmakta olup  $A_0$  nokta yüksekliğinin üzerindeki tüm noktalar için meteorolojik değerlerin aynı olduğu kabul edilmektedir (Şekil 2.3) (Kahveci, 1997).



Şekil 2. 3 Essen-Froome Diferansiyel Modeli (Kahveci, 1997)

2.24 eşitliğinde bulunan TD değeri  $i=A,B$  noktaları için değişken olarak kabul edilmektedir (Özüğür ve ark., 2019).

$$n_i = \left( 77.64 * \frac{p}{TD} - 12.96 * \frac{e}{TD} + 371780 \frac{e}{TD^2} \right) * 10^{-6} \quad (2.24)$$

A ve B noktaları arasındaki düzeltme 2.25 eşitliği ile hesaplanmaktadır (Özüğür ve ark., 2019).

$$\Delta S^{A_0} = \frac{n_A + n_B}{2} * I \quad (2.25)$$

Eşitlik 2.26'da  $h_A$  ve  $h_B$  noktaların deniz yüzeyinden olan yüksekliklerini,  $E_A$  en düşük noktadaki uydu zenit açısını ifade etmektedir (Özüğür ve ark., 2019).

$$I = (h_B - h_A) / \sin E_A \quad (2.26)$$

Essen – Froome için toplam troposferik uzaklık düzeltmesi ise 2.27 eşitliğinde verilmektedir (Özüğür ve ark., 2019).

$$\Delta S_{trop}^z = \Delta S_A^{A_0} + S_A^{A_0} \quad (2.27)$$

### 2.3.2.1.1.1.7 Egnos Modeli

Egnos modeli, alıcının yüksekliğine ve mevsimsel değişim verilerinden geliştirilen meteorolojik parametrelerin tahminlerine dayanmaktadır (Penna ve ark., 2001). Egnos'un en büyük avantajlarından biri, gözlemsel meteorolojik verilere ihtiyaç olmamasıdır. Model, hesaplamanın gerektirdiği 5 parametreyi sağlamaktadır. Bu parametreler atmosferik basınç, sıcaklık, su buharı basıncı, sıcaklık gradyanı ve su buharı gradyanıdır (Jing ve ark, 2008).

Egnos modeline ait kuru ve ıslak gecikmeler 2.28 ve 2.29 eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Kuru ve ıslak gecikmeler ( $d_{dry}$ ,  $d_{wet}$ ), ortalama deniz seviyesindeki ( $Z_{dry}$ ,  $Z_{wet}$ ) kuru ve ıslak gecikmelerinden hesaplanmaktadır. 2.28 ve 2.29 eşitliklerinde kullanılan  $g=9.80665$  ( $m/s^2$ ),  $H$ , alıcının yüksekliği ( $m$ )  $T$ , ortalama deniz seviyesindeki sıcaklık ( $K$ ),  $\beta$  sıcaklık atlama hızını,  $\lambda$ , su buharı atlama oranını ve  $R_d=287,054$   $J/kg/K$  şeklinde ifade edilmektedir (Penna ve ark., 2001).

$$d_{dry} = Z_{dry} \left( 1 - \frac{\beta H}{T} \right)^{\frac{g}{R_d \beta}} \quad (2.28)$$

$$d_{wet} = Z_{wet} \left( 1 - \frac{\beta H}{T} \right)^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d \beta} - 1} \quad (2.29)$$

2.30 ve 2.31 eşitliklerinde kullanılan  $k_1=77.604$   $K/mbar$ ,  $g_m=9.784$   $m/s^2$ ,  $p$  ortalama deniz seviyesinin atmosferik basıncını ( $mbar$ ),  $k_2=382000$   $K^2/mbar$  ve  $e$ , ortalama deniz seviyesinin su buharı basıncını ( $mbar$ ) simgelemektedir (Penna ve ark., 2001).

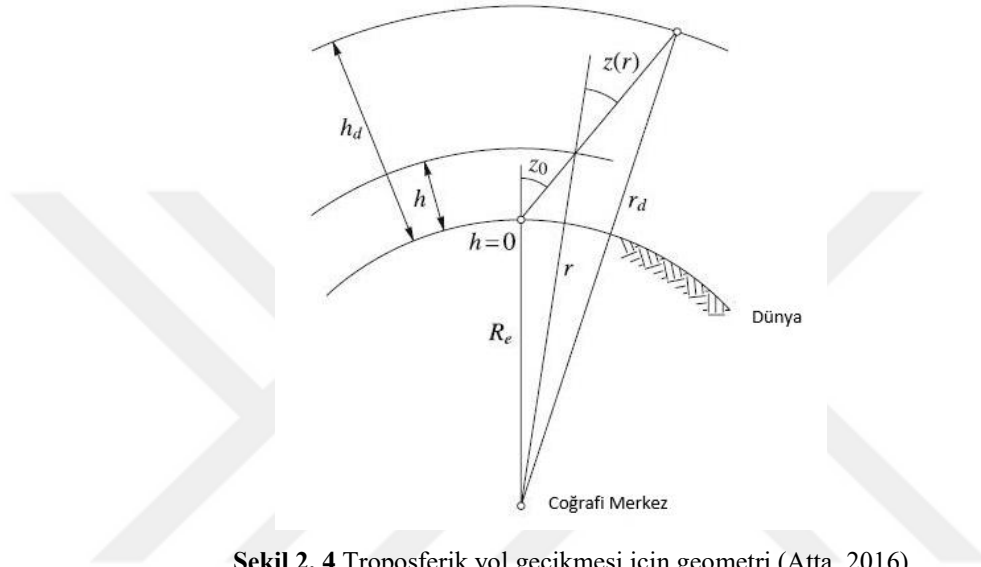
$$Z_{dry} = \frac{(10^{-6} k_1 R_d P)}{g_m} \quad (2.30)$$

$$Z_{wet} = \frac{(10^{-6} k_2 R_d) e}{g_m (\lambda+1) - \beta R_d} \frac{e}{T} \quad (2.31)$$

### 2.3.2.1.1.1.8 Goad-Goadman Modeli

Goad ve Goodman 1974 yılında Hopfield modeline bağlı olarak bu modeli oluşturmuştur (Özüğür ve ark., 2019). Goad ve Goodman modeli genellikle Modifiye Hopfield modeli olarak anılmaktadır (Gürbüz, 2015). Model sıcaklığın troposferde artan yükseklik ile doğrusal olarak azaldığını ancak stratosferde sabit kaldığını

varsayarak, Hopfield modelini değiştirmiştir (şanlıoğlu ve Zeybek, 2012). şekil 2.4'te yeryüzünün üzerindeki yükseklik yerine konum vektörlerinin uzunluklarını kullanarak Goad ve Goodman için troposferik yol gecikmesi hesaplanmaktadır (Atta, 2016).



şekil 2. 4 Troposferik yol gecikmesi için geometri (Atta, 2016)

2.32 eşitliğinde kullanılan  $R_e$  Dünya'nın yarığapını ifade etmektedir.  $R_e$  yarıçapı ile Dünya yüzeyinden belirli yükseklikler kullanılarak yer merkezindeki uzunluklar bulunmaktadır (Atta, 2016).

$$r_d = R_e + h_d \quad r = R_e + h \quad (2.32)$$

Kuru ve ıslak bileşenler 2.33 ve 2.34 eşitlikleri ile ifade edilmiştir. 2.33 ve 2.34 eşitliklerinde kullanılan  $N_d^{\text{trop}}$  ve  $N_w^{\text{trop}}$  sırasıyla Dünya üzerindeki kuru ve ıslak kırılmayı ifade etmektedir (Atta, 2016).

$$N_d^{\text{trop}}(h) = N_{d,0}^{\text{trop}} \left[ \frac{r_d - r}{r - R_e} \right]^4 \quad (2.33)$$

$$N_w^{\text{trop}}(h) = N_{w,0}^{\text{trop}} \left[ \frac{r_w - r}{r_w - R_e} \right]^4 \quad (2.34)$$

2.35 eşitliğinde Goad-Goodman troposferik gecikme formülü verilmektedir. Eşitlikte kullanılan E yükseklik açısını, alt simge de bulunan i, kuru veya ıslak bileşeni ifade etmekte olup, kullanılan a katsayılarının formülleri 2.37 eşitliğinde verilmiştir. Burada kullanılan  $a_i$  ve  $b_i$  katsayıların genel formülü ise E yükseklik açısı ve Dünya'nın yarıçapı  $R_e$  kullanılarak 2.38 eşitliğinde verilmektedir (Hofmann-Wellenhof, 2008; (Atta, 2016).

$$\Delta_i^{\text{trop}}(E) = 10^{-12} N_{i,0}^{\text{trop}} \left[ \sum_{k=1}^9 \frac{a_{k,i}}{k} r_i^k \right] \quad (2.35)$$

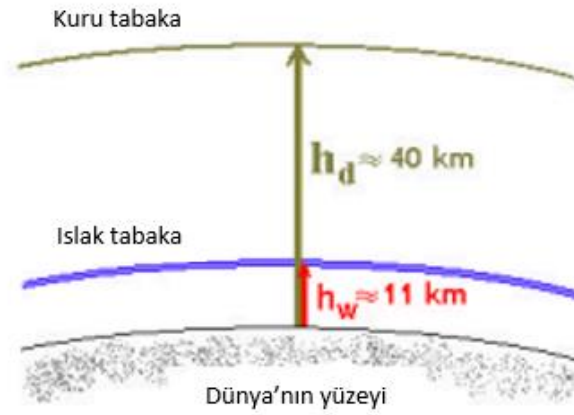
$$r_i = \sqrt{(R_e + h_i)^2 - (R_e + \cos E)^2} \cdot R_e \sin E \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} a_{1,i} &= 1 & a_{6,i} &= 4a_i b_i + (a_i^2 + 3b_i) \\ a_{2,i} &= 4 a_i & a_{7,i} &= b_i^2 (6a_i^2 + 4b_i) \\ a_{3,i} &= 6 a_i^2 + 4b_i & a_{8,i} &= 4a_i b_i^3 \\ a_{4,i} &= 4 a_i (a_i^2 + 3b_i) & a_{9,i} &= b_i^4 \\ a_{5,i} &= a_i^4 + 12a_i^2 b_i + 6 b_i^2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$a_i = -\frac{\sin E}{h_i}, b_i = -\frac{\cos^2 E}{2h_i R_e} \quad (2.38)$$

### 2.3.2.1.1.1.9 Hopfield Modeli

Jeodezik çalışmalar için yüzey modellerinin yüksek doğrulukta olması gerekmektedir. Bununla ilgili ilk çalışmalar Hopfield tarafından geliştirilen Hopfield modelidir (Özlüdemir, 2004). Model, yüzey ile yaklaşık 40 km yüksekliğe kadar tek katmandan oluşan çoklu tropik atmosfer modeline dayanmaktadır (Şekil 2.5) (Gürbüz, 2015).



Şekil 2. 5 Hopfield Model (URL-3)

Hopfield modeli ile ilgili eşitlikler 2.39 ve 2.40'de verilmiştir.  $N_{h,0}$  ve  $N_{w,0}$  ifadeler hidrostatik ve ıslak kırınım parametrelerini,  $h$  kullanıcının referans elipsoidinden olan yüksekliğini,  $h_w$  ve  $h_h$  parametreleri yüzeydeki kırınımları,  $N_{h,0}$  ve  $N_{w,0}$  değerlerinin ölçüldüğü yüzey seviyesinden itibaren ıslak ve hidrostatik ölçek yüksekliklerini ifade etmektedir. 2.41 eşitliğinde  $h_w$  ve  $h_h$  kırınım parametrelerinin genel formülü verilmektedir. 2.41 eşitliğinde kullanılan  $T_0$ , ölçüm yapılan bölgedeki sıcaklık değerini ifade etmektedir (Gürbüz, 2015).

$$N_h(h) = N_{h,0} \left(1 - \frac{h}{h_h}\right)^4 \quad h \leq h_h = 43 \text{ km} \quad (2.39)$$

$$N_w(h) = N_{w,0} \left(1 - \frac{h}{h_w}\right)^4 \quad h \leq h_w = 12 \text{ km} \quad (2.40)$$

$$h_h = 40136 + 148,72 (T_0 - 273,16) \quad h_w = 11000 \quad (2.41)$$

Troposferik gecikme yukarıda verilen formüllerden yararlanılarak 2.42 eşitliğindeki formül elde edilmektedir. Eşitlikte kullanılan  $d_h$  ve  $d_w$  sırasıyla hidrostatik ve ıslak gecikmeyi ifade etmektedir (Gürbüz, 2015).

$$\begin{aligned} d_{tr\ op}^z &= 10^{-6} \int_0^{h_h} N_{h,0} \left(1 - \frac{h}{h_h}\right)^4 dh + 10^{-6} \int_0^{h_w} N_{w,0} \left(1 - \frac{h}{h_w}\right)^4 dh \\ &= \frac{10^{-6}}{5} [N_{h,0}h_h + N_{w,0}h_w] d_{tr\ op}^z = d_h + d_w \end{aligned} \quad (2.42)$$

2.43 ve 2.44 eşitliklerinde E yükseklik açısı kullanılarak  $m_h$  ve  $m_w$  sırasıyla kuru ve ıslak bileşenin fonksiyonlarını ifade etmektedir (Gürbüz, 2015).

$$m_h(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \sqrt{\varepsilon^2 + 6.25}} \quad (2.43)$$

$$m_w(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \sqrt{\varepsilon^2 + 2.25}} \quad (2.44)$$

### 2.3.2.1.1.10 Tropgrid2 Modeli

TropGrid troposfer modeli, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Çevresel Tahmin Merkezi'nden (NCEP) Sayısal Hava Modeli (NWM) ürünü kullanılarak oluşturulmuştur. TropGrid2, klimatolojiye dayalı sıcaklık, basınç ve nem ölçümleri olmaksızın standart konumlandırma kullanıcıları için küresel yayılma gecikmesi düzeltmeleri sağlayan troposferik modelin yeni bir versiyonudur (Schuler, 2014). TropGrid2 modeli tarafından sağlanan troposferik parametreler arasında sıcaklık, hava basıncı, atmosfer ağırlıklı ortalama sıcaklık ve ZWD yer almaktadır. Ayrıca model yıllık ve günlük varyasyonları da dikkate almaktadır (Xu ve ark., 2020).

Model, 2.45 ve 2.46 eşitliklerinde ifade edilmektedir. 2.45 ve 2.46 eşitliklerinde bulunan a troposferik parametreyi,  $a_0$  ortalama yıllık değeri, doy günün saatini, b ve c günlük değişim ögesinin genliğini ve başlangıç aşamasını simgelemektedir. 2.46 eşitliğinde  $a_m$  ortalama yıllık değeri,  $a_A$  ve  $d_w$  ise yıllık varyasyonun genliğini simgelemektedir (Xu ve ark., 2020).

$$a = a_0 + b \cos\left(\frac{\text{doy}-c}{24}\right) 2\pi \quad (2.45)$$

$$a_0 = a_m + a_A \cos\left(\frac{\text{doy}-d_w}{365.25}\right) 2\pi \quad (2.46)$$

### 2.3.2.1.1.11 Niell Modeli

Niell model, troposferik ve iyonosferik gecikmeleri noktanın enlemi, yüksekliği ve zamanına göre modellemektedir (Niell, 1995). Aynı zaman da Niell

Modeli, Saastamoinen zenith yol gecikmesi ve Niell izdüşüm fonksiyonlarının kombinasyonundan elde edilen sonuç olarak da bilinmektedir (Sanlioglu ve Zeybek, 2012). 2.47 ve 2.48 eşitlikleri Niell modelin ıslak ve kuru bileşen formüllerini ifade etmektedir. Formülde kullanılan  $m_d$  ve  $m_w$  sırasıyla kuru ve ıslak bileşeni,  $E$  uydu yükseklik açısını,  $H$  ortometrik yüksekliği,  $a_d$ ,  $b_d$ ,  $c_d$  kuru bileşendeki katsayıları,  $a_w$ ,  $b_w$ ,  $c_w$  ıslak bileşendeki katsayıları,  $a_h$ ,  $b_h$ ,  $c_h$  yükseklik bileşenindeki katsayıları ifade etmektedir. Kuru ve ıslak bileşenlerinde kullanılan parametreler ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), ortalama ve mevsimsel değişim (genlik) değerlerinin enlem fonksiyonları olarak enterpolasyon yöntemiyle hesaplanmaktadır (Dodo ve Idowu, 2010; Atta, 2016).

Kuru bileşen için;

$$m_d (E) = \frac{1 + \frac{ad}{1 + \frac{bd}{1 + cd}}}{\sin E + \frac{bd}{\sin E + cd}} + \frac{1}{\sin E} + \frac{1 + \frac{ah}{1 + \frac{bh}{1 + ch}}}{\sin E + \frac{bh}{\sin E + ch}} * \frac{H}{1000} \quad (2.47)$$

Islak bileşen için;

$$m_w (E) = \frac{1 + \frac{aw}{1 + \frac{bw}{1 + cw}}}{\sin E + \frac{bw}{\sin E + cw}} \quad (2.48)$$

### 2.3.2.1.1.12 Saastamoinen Modeli

Saastamoinen modeli 1972 yılında geliştirilmiş olup günümüzde en çok kullanılan troposferik etki modellerinin başında gelmektedir. Troposferin kalınlığı üzerine yapılan incelemede farklı dönemlerde kalınlık değişimine ya da bölgelere göre değişiklikler üzerinde durulmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucu troposferin 10 km'ye kadar olan kısmında gözlemlenen değişimlere göre sıcaklığın değiştiği dönemler olduğu, özellikle enlemin etkisi ile sıcaklığın azaldığı görülmektedir (Gökdaş, 2014).

Saastamoinen, kutup bölgelerindeki troposfer yüksekliği ile diğer bölgelerdeki troposfer yüksekliğini kıyaslamış olup, kutup bölgelerindeki troposfer yüksekliklerinin daha düşük olduğunu görmüştür (Erdönmez, 2008). Model hidrostatik basınç, troposfer için sabit yüksekliğe bağlı değişim oranı, troposferin üstü

için de hidrostatik izotermal model kullanılarak modellenmektedir. Elde edilen sonuçlar atmosferin hidrostatik denge içinde olması durumunda nemli havanın indirgenebileceğini göstermektedir (Özlüdemir, 2002). Saastamoinen optimum koşullarda troposferin uzunluk düzeltmesi 2.49'daki eşitlik ile verilmektedir. Saastamoinen, metre cinsinden ifade edilen troposferik gecikmeyi  $z$ ,  $p$ ,  $T$  ve  $e$ 'nin bir fonksiyonu olarak modellemektedir.  $Z$  uydunun zenit açısını belirtirken,  $p$  milibar cinsinden atmosferik basıncı,  $T$  sıcaklığı ve  $e$  kısmi buhar basıncını ifade etmektedir (Yılmaz, 2013).

$$\Delta S_{Trop}^Z = 0.00227 \cdot \frac{1}{\cos z} \cdot \left[ P + \left( \frac{1255}{273.15+T} \right) \cdot e - B \cdot \frac{1}{\tan^2 Z} \right] + \delta L \quad (2.49)$$

2.50 eşitliğinde  $T$  °C cinsinden olmak üzere  $TD$  Kelvin biriminde kabul edilmektedir. Saastamoinen modeli için  $e$  kısmi basıncı 2.51 eşitliğinde verilmiştir (Özüğür ve ark., 2019).

$$TD = 273.15 + T \quad (2.50)$$

$$e = \frac{H}{100} \exp(-37.2465 + 0.213166(TD) - 0.000256908 \cdot (TD)^2) \quad (2.51)$$

### 2.3.2.1.1.1.13 UNB3 Modeli

UNB3 modelinde, meteorolojik parametre değerlerini tahmin etmek için beş çıktı parametresi (sıcaklık, dikey sıcaklık gradyanı, basınç, buhar basıncı, buhar dikey değişim indeksi) kullanılmaktadır (Collins ve ark., 1996; Leandro ve ark., 2006). Modelin algoritması Saastamoinen modeli kullanılarak hidrostatik ve hidrostatik olmayan zenit gecikmelerinin meteorolojik parametre değerleri ile hesaplanmaktadır (Farah, 2015). Ayrıca model Niell modellerinin kuru ve ıslak izdüşüm fonksiyonlarını da kullanmaktadır (Tunalı, 2018).

UNB3 modeli barometrik basınç, sıcaklık, sıcaklık atlatma oranı, su buharı basıncı ve su buharı azaltma faktörü gibi beş atmosferik parametreden oluşmakla beraber bu parametreler, yıllık varyasyon hesaplaması için bir kosinüs fonksiyonu ve enlem hesaplaması için doğrusal enterpolasyon kullanılarak belirli bir enlem ve yılın

günü için hesaplanmaktadır (Mao ve ark., 2021). Yıllık varyasyonun kaynağı yılın 28 günü olmakla birlikte enlemler arasındaki enterpolasyon doğrusal bir fonksiyon ile hesaplanmaktadır. Belirli bir parametrenin yıllık ortalaması Eşitlik 2.52 ile verilmektedir (Farah, 2015).

$$\begin{aligned} & Av_{15}, \text{ if } \phi \leq 15 \\ Avg_{\phi} &= Av_{75}, \text{ if } \phi \geq 75 \\ & Avg_i + \frac{(Avg_{i+1} - Avg_i)}{15} (\phi - Lat_i), \text{ if } 15 < \phi < 75 \end{aligned} \quad (2.52)$$

Yıllık genlik benzer şekilde 2.53 eşitliği ile hesaplanmaktadır. 2.53 eşitliğinde kullanılan  $Amp_{\phi}$  hesaplanan genliği,  $Lat$  ise enlemi ifade etmektedir (Farah, 2015).

$$\begin{aligned} & Amp_{15}, \text{ if } \phi \leq 15 \\ Amp_{\phi} &= Amp_{75}, \text{ if } \phi \geq 75 \\ & Amp_i + \frac{(Amp_{i+1} - Amp_i)}{15} (\phi - Lat_i), \text{ if } 15 < \phi < 75 \end{aligned} \quad (2.53)$$

Eşitlik 2.54'te verilen enlem kullanılarak parametre değerleri yılın istenen günü için tahmin edilebilmektedir. 2.54 eşitliğinde  $x_{\phi, doy}$ , enlem ve yılın günü için hesaplanan parametre değerini ifade etmektedir. Gerekli üç parametrenin her biri için izlendikten sonra verilen enlem ve yılın günü için tüm parametreler belirlenmektedir. Hidrostatik gecikme 2.55 eşitliği ile hesaplanmaktadır (Farah, 2015).

$$x_{\phi, doy} = Avg_{\phi} - Amp_{\phi} * \cos \left( (doy - 28) * \frac{2\pi}{365.25} \right) \quad (2.54)$$

$$ZHD = \frac{10^{-6} k_1 R}{g_m} P_0 \cdot 1 - \frac{\beta h}{T_0} \wedge \frac{g}{R\beta} \quad (2.55)$$

2.55 eşitliğinde kullanılan  $T_0$ ,  $P_0$ ,  $\beta$  meteorolojik parametreleri,  $k_1=77.60$   $Kmbar^{-1}$ ,  $R$  kuru hava için gaz sabitini ( $287.054$   $JKg^{-1}K^{-1}$ ),  $g$  yerçekiminin yüzey

ivmesini ve  $g_m$  ivme atmosferik sütun ağırlık merkezindeki yerçekimi ifade etmektedir. Ağırlık merkezindeki yerçekimi 2.56 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Formülde kullanılan H metre cinsinden ortometrik yüksekliği ifade etmektedir (Farah, 2015).

$$g_m = 9.784 ( 1 - 2.66 * 10^{-3} \cos (2 \phi) - 2.8 * 10^{-7} H ) \quad (2.56)$$

Leandro (2006), tahmin edilen meteorolojik parametre değerlerinin bir fonksiyonu olarak, Dünya yüzeyindeki istasyon için ıslak troposferik kırılmayı 2.57 eşitliği ile ifade etmiştir. Eşitlik 2.57'de kullanılan  $T_0$ ,  $e_0$ ,  $\lambda$  ve  $\beta$  hesaplanan meteorolojik parametreler olup  $k'_2 = 16.60 \text{ Kmbar}^{-1}$ ,  $\lambda' = \lambda + 1$  (birimsiz),  $T_m$  ise sıcaklığı simgelemektedir (Farah, 2015).

$$ZWD = \frac{10^{-6}(T_m k'_2 + k_3) R e_0}{g_m \lambda' - \beta R} \frac{1}{T_0} \left( 1 - \frac{\beta H}{T_0} \right)^{\left( \frac{\lambda' g}{R \beta} \right) - 1} \quad (2.57)$$

$$T_m = ( T_0 - \beta H ) \left( 1 - \frac{\beta H}{g_m \lambda'} \right) \quad (2.58)$$

### 2.3.2.1.1.2 İzdüşüm Fonksiyonları

Radyo dalgaları nötr atmosferden geçişleri sırasında, kuru gazlar ve su partikülleri ile etkileşim sonucunda gecikmekte ve bükülmektedir. Bu gecikmeleri yeterli doğrulukla doğrudan ölçme şansı olmadığından, modellenmeleri gerekmektedir. Bu nedenle zenit yönündeki gecikmeyi belirlemek ve bunu gözlemin yükseklik açısına ölçeklendirmeyi amaçlayan bir izdüşüm fonksiyonu gerekmektedir (Landskron ve ark., 2018). İzdüşüm fonksiyonları en yüksek gecikmeleri bir radyo kaynağının yönüne veya tam tersine yansıtma ve gecikmeyi zenit yönünden sinyalin yükselme açısına ölçeklemek için kullanılmaktadır (Putri ve ark., 2020; Kof, 2020). Günümüzde kullanılan GPT, GMF, GMF3, GPT2, GPT2w, IMF, NMF, VMF1 ve VMF3 gibi izdüşüm fonksiyonları yaygın olarak kullanılmaktadır. GMF ve VMF gibi izdüşüm fonksiyonlarında troposferik

modellerdeki gibi atmosferik parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır (Gürbüz ve ark., 2014). Niell İzdüşüm Fonksiyonu (NMF), Küresel İzdüşüm Fonksiyonu (GMF), Viyana İzdüşüm Fonksiyonu 1 (VMF1/VMF3), Küresel Basınç ve Sıcaklık (GPT) jeodezik uzay teknolojisi için en sık kullanılan izdüşüm fonksiyonlarıdır (Nistor, 2020).

#### **2.3.2.1.1.2.1 Küresel Basınç ve Sıcaklık İzdüşüm Fonksiyonu (GPT)**

Küresel Basınç ve Sıcaklık GPT modeli 3 yıllık ECMWF ERA-40 ürünlerine dayalı olarak geliştirilmiştir. GPT fonksiyonu konumu ve gözlem tarihine sahip olan bir istasyonun ihtiyaç duyduğu sıcaklık, basınç, nem, su buharı basıncı ve izdüşüm fonksiyon katsayılarını kullanıcılara sağlamaktadır (Tunalı,2018; Liu ve ark., 2020). GPT'ye göre gelişmiş olan GPT2 yatay grid çözünürlüğünü artırarak bir bölgenin yağışlı veya kuru bölgelere ait meteorolojik verilerin yarıyıllık ortalama değerlerini ve genliklerini hesaplamaktadır (Tunalı, 2018). GPT2'de sadece ortalama ve yıllık varyasyonlar dikkate alınmamaktadır. Aynı zamanda çok yağışlı veya çok kurak dönemlerin hakim olduğu bölgeleri daha iyi hesaba katmak için yarı yıllık harmonikleri de içermektedir (Lagler ve ark., 2013). GPT2w modeli, tarih ve yaklaşık istasyon koordinatlarını girdi olarak kullanarak, Dünya yüzeyine yakın yerlerde eğimli hidrostatik ve ıslak gecikmeleri 3 dereceye kadar hesaplamak için uygun bir fonksiyondur (Liu ve ark., 2017). Küresel basınç ve sıcaklık 3 (GPT3) modeli, GPT serisinin en güncel sürümüdür. GPT3, jeodezik, meteorolojik ve klimatolojik amaçlar için kullanılan çok kapsamlı bir troposfer model olarak ifade edilmektedir. Ortalama değerleri önceki versiyonlarla tutarlı meteorolojik büyüklüklerin yıllık ve altı aylık genliklerini sağlamaktadır (Yang ve ark., 2021).

#### **2.3.2.1.1.2.2 Küresel İzdüşüm Fonksiyonu (GMF)**

GMF, GPT ve GPT2'ye katkıda bulunmak için geliştirilen bir izdüşüm fonksiyonudur (Tunalı, 2018). GMF'nin amacı, sayısal hava durumu modeli (NWM) ile senkronize bir fonksiyon oluşturmaktır. Jeodezik veri analizi yazılımlarında kolaylıkla uygulanabilen GMF, VMF parametrelerinden yararlanılarak türetilmiştir. Sonuç olarak GMF, VMF 'nın küresel bir harmonik mevsimsel yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır (Kof, 2020).

### **2.3.2.1.1.2.3 Niell İzdüşüm Fonksiyonu (NMF)**

Niell (1996), NMF'yi meteorolojik parametreleri kullanmak yerine istasyonların koordinatlarını ve zamansal değişiklikleri kullanarak geliştirmiştir (Nistor, 2020). Noktanın enlemine ve yılın gününe bağlı olan NMF, yüksek konumsal ve zamansal çözünürlüğe sahip değildir (Erkan, 2008). Farklı enlemlerde ki standart atmosferik verilerin kuru ve ıslak izdüşüm fonksiyonlarını belirlemek için NMF kullanılmaktadır (Kop, 2020). Niell, kuru izdüşüm fonksiyonunun güneş ışımlarından dolayı değişken olduğunu aynı zamanda atmosfer kalınlık oranının eğrilik yarıçapı yükseldikçe azaldığını varsayarak gözlem noktasının geotitten olan yüksekliğine bağlı olduğunu belirtmiştir (Niell 1996).

### **2.3.2.1.1.2.4 İzobarik İzdüşüm Fonksiyonu (IMF)**

IMF, sayısal hava modelinin 6 saatlik profillerine göre izdüşüm fonksiyonlarının katsayılarını belirleyen ilk modeldir. IMF, 2,5 derece boylam ile 2,0 derece enlemde olan meteorolojik parametrelerin yeniden değerlendirilmesi için ampirik fonksiyonlar kullanmaktadır. IMF, doğrudan sayısal hava alanlarından türetilmiş olup sayısal hava tahmini modelleri, atmosferik durumun oldukça doğru bir tanımını sağlamaktadır. IMF'nin zamansal ve uzaysal çözünürlüğü ve doğruluğu, hava durumu modeline bağlıdır. IMF gibi meteorolojik verilere dayalı izdüşüm fonksiyonları, yüksek zamansal ve uzamsal çözünürlük sağlamaktadır (Vey ve ark., 2006). Hidrostatik IMF 200 hPa basınç yükseklik verileri kullanmakta olup basınç seviyesi birçok modelde kolayca bulunabilmektedir. (Niell, 2000). Bu nedenle, izobarik izdüşüm fonksiyonu (IMF) olarak adlandırılmaktadır.

### **2.3.2.1.1.2.5 Vienna İzdüşüm Fonksiyonu (VMF)**

VMF'in içeriğinde kuru ve ıslak izdüşüm fonksiyonlarının parametreleri bulunmaktadır. Grid noktaları için ZHD ve ZWD değerlerini içermektedir. VMF1, gerçeğe en yakın troposferik tahminleri sağlamaktadır (Tunalı, 2017). Sayısal bir hava modelinden alınan verileri kullanmakta olup, bu nedenle atmosferin kısa vadeli değişkenliğini yakalamaktadır (Zus ve ark., 2014). VMF'nin ani hava değişimlerine karşı duyarlı olmasının sebebi 6 saatlik ECMWF verilerini girdi olarak kullanmasıdır.

ECMWF verilerini girdi olarak kullanmasından dolayı GNSS yazılımlarına uygulanması zordur. Daha çok yakın gerçek zaman uygulamalarına katkı veren VMF1 belli bir gecikme ile PPP çözümünde de kullanılmaktadır (Tunalı, 2017; URL-4). VMF2, istasyon yükseklikleri, yörünge yükseklikleri ve VMF1 modelinde 3 derece EA'daki (yükseklik kesme açısı) değerlerin belirlenmesi gibi eksikliklerin üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. Ancak, VMF2 VMF1'den elde edilen verileri istenilen ölçüde iyileştiremediği için yeni bir model geliştirilmiştir. Bu model VMF1'in geliştirilmiş versiyonu olan VMF3'tür (Niston, 2020). Troposferik gecikme büyük hatalara neden olduğundan dolayı gözlem için bu nedenle seçilen modelin kalitesi hata payını en aza indirmek için önemlidir (Putri ve ark., 2020). Bu nedenle VMF3, ampirik fonksiyonlar kullanılarak elde edilen katsayılardaki eksikliklere çözüm getirmiştir (Kop, 2020).

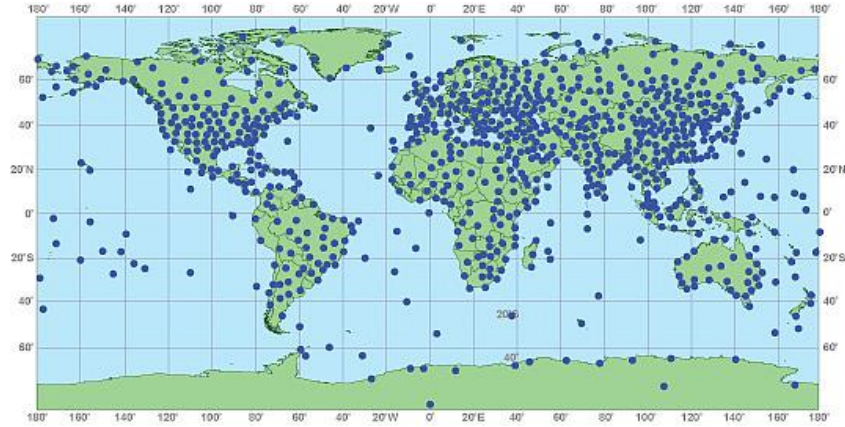
### 3. RAVINSONDE GÖZLEMLERİ VE RADYOSONDA

Radyosonda yüksek seviyelerdeki basınç, sıcaklık, rüzgar ve nem gibi parametrelerin değerlerini belirlemede kullanılan aletlerle donatılmış, elde ettiği bilgileri radyo sinyalleri aracılığıyla yer istasyonuna ileten alettir. Radyosondalar bir balon yardımıyla atmosferin yaklaşık 15 ile 18. kilometresine kadar yükselmektedir. Balon atmosferin üst seviyelerinde patladıktan sonra alet bir paraşüt yardımıyla yere düşmektedir. Uçuş boyunca ölçülen basınç, sıcaklık, rüzgar ve bağıl nem gibi meteorolojik değerler yer istasyonuna radyo sinyalleri aracılığıyla gönderilmektedir. Yer istasyonunda toplanan bilgiler radyosonda gözlemi (RAOB) olarak kodlanmaktadır. Ayrıca GNSS, radar veya diğer araçlar aracılığıyla radyosondaların konumu, rüzgarların hızı ve yönü hakkında bilgi alınabilmektedir. Böylece radyosonda fırlatıldığı alanda hava parametrelerinin dikey bir profilini üretmektedir. Uçuş sistemleri bir balon, paraşüt, ışıklandırma birimi ve radyosonda cihazından oluşmaktadır. Balon, radyosonda cihazını serbest atmosferde 360 metre/dakika ortalama yükselme hızında, istenilen yüksekliğe çıkarmak için kullanılmaktadır. Radyosonda cihazını balona bağlayan sistem paraşüt, ışıklandırma birimi, reflektörler ve uçuşa yardımcı birimler olarak adlandırılmaktadır. Radyosonda ise, istenilen meteorolojik değişkenleri ölçebilecek birimlerden ve elde edilen bu bilgileri istasyona gönderecek vericilerden oluşmaktadır. Helyum ya da hidrojen gazı ile şişirilmiş hava balonu veya sondaj balonları ile ölçüm yapılmaktadır. Saniyede 4-5 metre yükselen hava durumu balonlarında ölçümler radyosonda isimli cihaz tarafından yapılmaktadır (Şekil 3.1).



**Şekil 3. 1** Radyosonda balonu (URL-1)

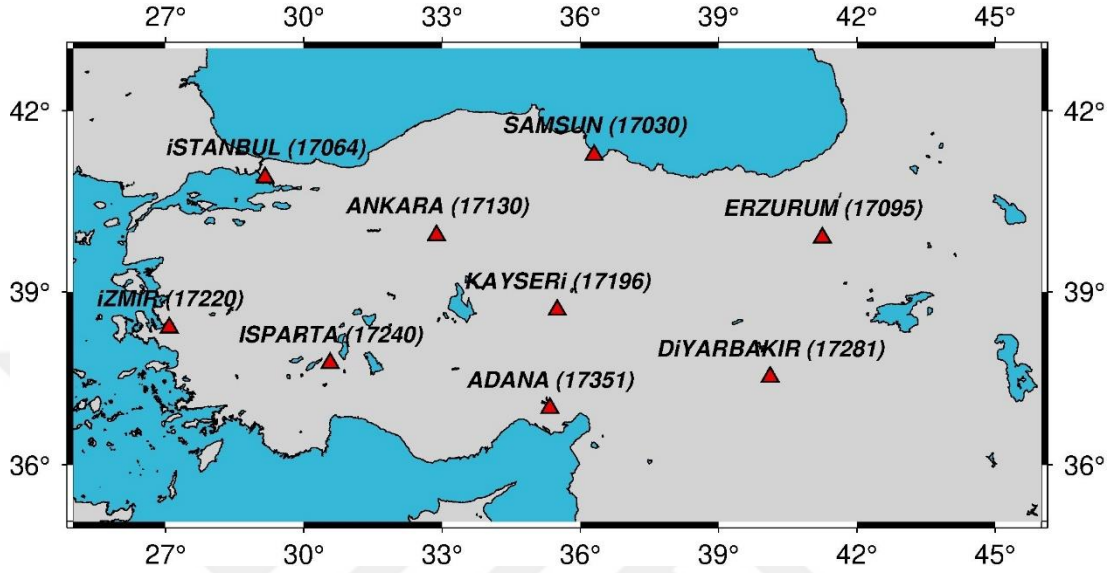
Radyosonda gözlemleri şiddetli fırtına, havacılık ve deniz tahminlerinde, bilgisayar tabanlı hava tahmini modellerinde, iklim değişikliği ve hava kirliliği araştırmalarında kullanılmaktadır. Dünya genelinde yaklaşık bin farklı noktadan hava durumu personeli tarafından balonlar her gün aynı saatte gökyüzüne bırakılmaktadır (Şekil 3.2).



**Şekil 3. 2** Dünya çapındaki radyosonda gözlemlerinin konum haritası (URL-9)

Türkiye bulunduğu konumdan dolayı farklı hava olaylarına maruz kalmaktadır. Meteorolojik olayların daha iyi analiz edilebilmesi için yer noktalarına, ek olarak radyosonda istasyonlarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizde bulunan 9 radyosonda istasyonunda günde iki kez (00:00, 12:00 UTC) ölçüm yapılmaktadır (Şekil 3.3). Bu tez kapsamında 2016-2020 yılları arasında coğrafi konumlarına göre farklı bölgeler de

bulunan İstanbul, Samsun, İzmir ve Erzurum istasyonları tercih edilmiş olup, bu istasyonlara ait radyosonda verileri kullanılmıştır.



Şekil 3. 3 Türk Radyosonda İstasyonları ve WMO Numaraları (URL-5)

Radyosonda verilerine Wyoming Üniversitesi Atmosfer Bilimleri Bölümü'nün web sitesinden ulaşılmıştır (URL-6). Şekil 3.4'te Wyoming Üniversitesi web sitesi üzerinden alınan Samsun (17030) istasyonuna ait örnek bir radyosonda verisi verilmektedir. Şekildeki parametrelere bakıldığında PRES atmosferik basıncı, HGHT jeopotansiyel yüksekliği, TEMP hava sıcaklığını, DWPT çığ noktası sıcaklığını, FRPT donma noktası sıcaklığını, RELH bağıl nemi, RELI buza göre bağıl nemi, MIXR karışım oranını, DRCT rüzgar yönünü, SKNT rüzgar hızını, THTA potansiyel sıcaklığı, THTE eşdeğer potansiyel sıcaklığı ve THTV sanal potansiyel sıcaklığı ifade etmektedir. İstasyona ait meteoroloji istasyon numarası, enlem ve boylam değerleri, istasyon yüksekliği, sıcaklığı, gözlem zamanı, PWV değeri ve birçok meteorolojik parametre bilgileri Şekil 3.5'te bulunmaktadır. Şekil 3.5'teki hesaplama tekniklerine URL-8 adresinden ulaşılabilir.

17030 Samsun Observations at 00Z 01 Jan 2016										
PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1022.0	4	-1.3	-6.3	69	2.35	235	3	270.2	276.7	270.6
1000.0	177	-1.3	-8.3	59	2.05	300	11	271.9	277.7	272.2
966.0	450	-3.9	-8.9	68	2.02	320	12	271.9	277.7	272.3
925.0	792	-7.1	-9.7	82	1.99	330	12	272.0	277.7	272.4
917.0	860	-7.7	-9.2	89	2.09	331	12	272.1	278.0	272.4
901.0	996	-8.7	-9.1	97	2.14	332	11	272.4	278.5	272.8
893.0	1065	-9.3	-9.5	98	2.09	333	11	272.5	278.4	272.9
884.0	1143	-9.5	-12.1	81	1.72	334	11	273.1	278.0	273.4
871.0	1257	-10.3	-13.8	76	1.52	335	10	273.4	277.8	273.7
865.0	1310	-10.7	-14.6	73	1.43	335	10	273.6	277.7	273.8
850.0	1444	-12.1	-15.1	78	1.40	335	9	273.5	277.5	273.7
821.0	1708	-14.1	-14.9	94	1.47	331	7	274.1	278.4	274.3
817.0	1744	-14.3	-15.3	92	1.43	330	7	274.2	278.4	274.4
791.0	1988	-15.9	-18.3	82	1.15	321	5	275.1	278.5	275.3
748.0	2402	-19.2	-21.2	84	0.94	305	2	275.9	278.8	276.1
742.0	2462	-19.7	-21.6	84	0.92	300	2	276.0	278.8	276.2
735.0	2532	-20.2	-22.1	85	0.89	290	2	276.2	278.9	276.3
728.0	2603	-20.8	-22.6	85	0.86	255	1	276.3	278.9	276.5
718.0	2705	-21.6	-23.4	86	0.81	220	2	276.5	279.0	276.7
706.0	2830	-22.6	-24.2	86	0.77	205	3	276.8	279.1	276.9
700.0	2893	-23.1	-24.7	87	0.74	200	3	276.9	279.1	277.0
673.0	3179	-25.2	-26.6	88	0.65	200	5	277.7	279.7	277.8
637.0	3579	-28.1	-29.2	90	0.54	213	7	278.8	280.4	278.8
590.0	4126	-32.1	-33.2	90	0.40	230	9	280.2	281.5	280.3
588.0	4150	-32.3	-33.4	90	0.39	231	9	280.3	281.6	280.4
575.0	4309	-31.7	-36.7	61	0.29	234	10	282.8	283.8	282.9
570.0	4370	-32.1	-40.1	45	0.21	236	11	283.1	283.7	283.1
558.0	4521	-32.7	-42.7	36	0.16	239	11	284.1	284.6	284.1
539.0	4764	-34.0	-41.7	46	0.18	245	13	285.4	286.0	285.4
525.0	4949	-34.9	-40.9	54	0.21	243	14	286.4	287.1	286.4
500.0	5290	-36.1	-45.1	39	0.14	240	17	289.0	289.5	289.0
419.0	6491	-43.1	-60.1	14	0.03	232	26	295.0	295.1	295.0
400.0	6800	-44.7	-61.7	13	0.02	230	28	296.8	296.9	296.8
387.0	7021	-46.5	-61.5	17	0.03	229	28	297.3	297.4	297.3
377.0	7196	-46.1	-63.1	13	0.02	228	28	300.0	300.1	300.0
347.0	7743	-48.7	-68.1	9	0.01	225	29	303.7	303.7	303.7
328.0	8116	-50.5	-71.5	7	0.01	225	29	306.2	306.2	306.2
300.0	8700	-50.1	-73.1	5	0.01	225	29	314.6	314.7	314.6
294.0	8831	-49.7	-72.7	5	0.01	227	30	317.0	317.1	317.0
250.0	9890	-47.7	-74.7	3	0.01	240	34	335.0	335.1	335.0
223.0	10648	-46.6	-75.1	2	0.01	245	38	347.9	347.9	347.9
200.0	11370	-45.5	-75.5	2	0.01	255	35	360.6	360.6	360.6
197.0	11471	-44.7	-75.7	2	0.01	255	35	363.4	363.4	363.4
191.0	11678	-44.9	-76.1	2	0.01	255	35	366.2	366.3	366.2
155.0	13072	-46.5	-78.5	1	0.01	250	36	386.1	386.1	386.1
152.0	13202	-46.6	-78.6	1	0.01	250	36	388.1	388.1	388.1
150.0	13290	-46.7	-78.7	1	0.01	250	36	389.4	389.4	389.4
133.0	14089	-44.3	-77.3	1	0.01	256	33	407.3	407.3	407.3
109.0	15400	-50.7	-82.7	1	0.00	265	28	419.0	419.1	419.0
100.0	15960	-49.9	-82.9	1	0.00	260	28	431.0	431.1	431.0
87.5	16834	-49.5	-82.5	1	0.01	275	31	448.6	448.6	448.6
84.0	17099	-50.7	-83.7	1	0.00	280	32	451.4	451.4	451.4
76.9	17672	-53.3	-86.3	1	0.00	280	26	457.5	457.6	457.6

Şekil 3. 4 İnternet tabanlı radyosonda çıktısı (URL-6)

Station information and sounding indices	
Station number:	17030
Observation time:	160101/0000
Station latitude:	41.28
Station longitude:	36.30
Station elevation:	4.0
Showalter index:	9.73
Lifted index:	9.78
LIFT computed using virtual temperature:	9.78
SWEAT index:	34.98
K index:	7.30
Cross totals index:	21.00
Vertical totals index:	24.00
Totals totals index:	45.00
Convective Available Potential Energy:	0.00
CAPE using virtual temperature:	0.00
Convective Inhibition:	0.00
CINS using virtual temperature:	0.00
Bulk Richardson Number:	0.00
Bulk Richardson Number using CAPV:	0.00
Temp [K] of the Lifted Condensation Level:	263.77
Pres [hPa] of the Lifted Condensation Level:	902.91
Equivalent potential temp [K] of the LCL:	277.47
Mean mixed layer potential temperature:	271.59
Mean mixed layer mixing ratio:	2.09
1000 hPa to 500 hPa thickness:	5113.00
Precipitable water [mm] for entire sounding:	6.05

Şekil 3. 5 Radyosonda istasyonuna ait bilgiler (URL-7)

#### 4. GNSS METEOROLOJİSİ

Yoğuşabilir su buharı miktarının GNSS verilerinden belirlenmesi tekniği “GNSS Meteorolojisi” olarak adlandırılmaktadır. GNSS meteorolojisi, günümüzde şiddetli hava olaylarını izlemek için gelişen teknolojilerden biridir. GNSS meteorolojisi radyosonda ve su buharı radyometresi (WVR) gibi geleneksel yöntemlerin yerini alabilecek yeni bir tekniktir. GNSS meteorolojisinin en önemli çıktısı atmosferde bulunan su buharı miktarıdır. GNSS meteorolojisi, troposfer gecikmesi ve PWV'yi modellemek için uygun bir zamansal ve uzaysal çözünürlüğe sahiptir (Razin ve ark., 2022). GNSS ölçümlerinden türetilen troposferik gecikme, su buharı içeriğinin değişimini izlemek için önemli bir veri kaynağı olduğundan GNSS bu sorunun üstesinden gelmede önemli bir rol oynamaktadır. Doğru hava tahmini ve küresel iklim modelleri geliştirmek için su buharını mümkün olduğunca doğru bir şekilde izlemek önemlidir. Meteorologlar tarafından, atmosferik su buharı miktarını ifade etmek için birkaç farklı terim kullanılmakta olup, en yaygın olanlarından biri yoğuşabilir su buharıdır (Li ve ark., 2003). GNSS uydu sinyalleri, tüm hava koşullarında kullanılabilen yüksek uzaysal-zamansal çözünürlüğe sahip PWV değerleri elde etmek için kullanılmaktadır. Bir ağıdaki her bir GNSS alıcısında gözlemlenen ve zamanla değişen zenit ıslak gecikmesi, yoğuşabilir su buharının bir tahmini haline dönüşebilmektedir.

Atmosferik su buharının yüksek zamansal ve uzamsal değişkenliği nedeniyle ıslak ve troposferik gecikmeyi değerlendirmek ve bununla birlikte konumlandırma doğruluğunu arttırmak için birçok yazılım ve online servisin çıktı ürünlerinden yararlanılmaktadır (Liu ve ark., 2017). Bu yazılım ve servislere CSRS-PPP, GAMIT/GlobK, GYPSY, BERNESE, GAPS, Magic-GNSS ve APSS örnek verilebilir (Bezicioğlu ve ark., 2019). Ayrıca atmosferik su buharının bulunduğu troposfer ve stratosfer nedeniyle sinyal üzerindeki gecikmelerin boyutunu ölçmek için PPP yöntemi de kullanılmaktadır. PPP, dünya çapında doğru konumlandırmayı sağlamak için küresel bir referans istasyonları ağından türetilen hassas uydu yörüngelerini, saat düzeltmelerini kullanmakta olup, bu teknik sonuçları cm mertebesinde doğruluk ile elde etmektedir. Çalışma kapsamında sadece SAM1, ERZR, ISTN ve IZMI

istasyonlarına ait GPS gözlemleri kullanılarak değerlendirilme işlemleri yapılmıştır. Samsun, Erzurum, İstanbul ve İzmir radyosonda istasyonlarına yakın konumda bulunan SAM1, ERZR, ISTN ve IZMI CORS-TR istasyonlarına ait 30 saniye epok aralıklı gözlem verileri CSRS-PPP servisine gönderilerek statik değerlendirme sonucunda ZWD değerleri elde edilmiştir. PWV değerleri ise ZWD değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen PPP tabanlı PWV değerleri referans olarak kullanılan Radyosonda-PWV değerleri ile karşılaştırmalı bir yaklaşımla verilmiştir.

#### **4.1 CSRS-PPP ile ZWD Değerlerinin Elde Edilmesi**

NRCan (Natural Resources Canada) kuruluşunun sağladığı internet tabanlı Mutlak GNSS değerlendirme servisi olan CSRS-PPP tek veya çift frekanslı alıcılarda toplanmış gözlem verilerini RINEX formatında olmak üzere GPS, GLONASS gibi farklı uydu seçenekleriyle değerlendirmektedir. Yazılımda statik ve kinematik seçenekleri olmakla birlikte NAD83 veya ITRF referansı seçenekleri de kullanıcıya sunulmaktadır. Sistem Günümüzde yapılan akademik çalışmalarda sıkça kullanılan CSRS-PPP servisi 1 Hz ve daha yüksek frekanslı çözüme olanak sağlamaktadır. Uydu yörünge ve saat ürünleri dosyanın CSRS-PPP servisine yüklendiği zamana ve RINEX dosyasındaki en son toplanan epok zamanına göre belirlenmektedir. Ayrıca 2018 yılından itibaren faz başlangıç belirsizliğinin kesirli bir sayı olarak kestirilmesinden, PPP-AR algoritmasına geçiş yapılmıştır. Bu durum faz başlangıç belirsizliğinin tam sayı olarak kestirilmesine olanak sağlamıştır. PPP-AR algoritması, RINEX v3 veri formatını desteklemekte olup, kod ve faz ölçüleri için geliştirilen tek frekanslı konum bilgisini de elde etmektedir (Bezcioglu ve ark., 2019). CSRS-PPP servisi VMF1 fonksiyonunu kullanarak ZHD'yi belirlemektedir. Ayrıca CSRS-PPP VMF1 fonksiyonunu ZWD için bir ön bilgi olarak kullanmaktadır (Gratton ve ark., 2021).



Şekil 4. 1 CSRS-PPP yazılımının giriş sayfası (URL-7)

Şekil 4.1’de CSRS-PPP yazılımına ait giriş sayfası verilmiştir. RINEX formatındaki gözlem verileri yazılıma gönderildikten sonra yazılım tarafından kullanıcının mail adresine gelen dosya içerisinde .sum, .pos, .csv, .tro, .clk ve .pdf uzantılı çözüm dosyaları gönderilmektedir. .tro dosyası troposfer dosyası olup, kuru gecikme, ıslak gecikme ve troposferik gradyan verilerini içermektedir. Şekil 4.2’de troposfer dosyasının içeriği verilmiştir.

İsim	Boyut	Paket	Tür	Değişme	CRC32
...			Yerel Disk		
SAM10310.tro	196,075	12,138	TRO Dosyası	16.04.2022 10:09	A9FB2F0B
SAM10310.sum	9,511	2,548	SUM Dosyası	16.04.2022 10:09	6A990B34
SAM10310.pos	584,339	51,349	POS Dosyası	16.04.2022 10:09	BB65AA67
SAM10310.pdf	1,876,016	1,484,051	Microsoft Edge PD...	16.04.2022 10:09	ACC260A6
SAM10310.csv	197,369	23,653	XLS Worksheet	16.04.2022 10:09	ABE40813
SAM10310.clk	230,702	53,335	CLK Dosyası	16.04.2022 10:09	BC0E64E3

Şekil 4. 2 CSRS-PPP Çıktı dosyası

Troposfer dosyasında bulunan TRODRY sütunu kuru bileşeni, TROWET sütunu ise ıslak bileşeni ifade etmektedir. Bu tez kapsamında Radyosonda verilerinin elde edildiği zamanlar (00.00 ve 12.00 UTC) dikkate alınarak TROWET sütununda bu sürelerle karşılık gelen değerler dikkate alınmış olup, 7.5 derece uydu yükseklik açısı kullanılmıştır (Şekil 4.3).

```

%-TRO 0.01 EMR 22:106:50712 EMR 20:001:00000 20:001:86370 P SAM1
+TROPDESCRIPTION
*      KEYWORD      VALUE(S)
ELEVATION CUTOFF ANGLE 7.5
SAMPLING INTERVAL 30
TROP MAPPING FUNCTION VMF1_HT
SOLUTION_FIELDS_1 TRODRY TROWET STDDEV TGN TOT STDDEV TGETOT STDDEV
-TROPDESCRIPTION
+TROPSTA_COORDINATES
*SITE PT SOLN T STA_X STA_Y STA_Z SYSTEM REMRK
SAM1 A 1 P 3865237.411 2842807.786 4188254.579 IGS14 CSRS-PPP
-TROPSTA_COORDINATES
+TROP/SOLUTION
*SITE EPOCH TRODRY TROWET STDDEV TGN TOT STDDEV TGETOT STDDEV
SAM1 20:001:00000 2295.1 121.8 13.8 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00030 2295.1 121.8 13.7 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00060 2295.3 121.8 13.6 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00090 2295.1 121.8 13.4 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00120 2295.1 121.8 13.3 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00150 2295.0 121.8 13.2 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00180 2295.0 121.8 13.1 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00210 2295.0 121.8 13.0 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00240 2295.0 121.8 12.9 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00270 2295.0 121.8 12.8 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00300 2295.0 121.8 12.7 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00330 2295.0 121.8 12.6 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00360 2295.0 121.8 12.5 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00390 2295.0 121.8 12.4 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00420 2295.0 121.8 12.3 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00450 2295.0 121.8 12.2 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00480 2295.0 121.8 12.2 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00510 2295.0 121.8 12.1 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00540 2295.0 121.8 12.0 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00570 2295.0 121.8 12.0 -0.7 1.2 0.7 1.2
SAM1 20:001:00600 2295.0 121.8 11.9 -0.7 1.2 0.7 1.1
SAM1 20:001:00630 2295.0 121.8 11.8 -0.7 1.2 0.7 1.1
SAM1 20:001:00660 2295.0 121.8 11.8 -0.7 1.2 0.7 1.1
SAM1 20:001:00690 2295.0 121.8 11.7 -0.7 1.2 0.7 1.1

```

Şekil 4.3 .tro uzantılı troposfer dosyasının içeriği

## 4.2 Yoğuşabilir Su Buharı Değerinin (PWV) Elde Edilmesi

Atmosferdeki nem oranından dolayı zamansal ve mekânsal değişim gösteren, modellenmesi zor ve atmosferik olayların oluşum ve gelişim süreçlerinin yorumlanması için önemli bir parametre olan ZWD miktarını tahmin etmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler, doğrudan yöntemler ve matematiksel modele dayalı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğrudan yöntemler arasında radyosonda, su buharı radyometrisi (WVR) ve uzaktan algılama uyduları bulunmakta olup sahip olduğu zamansal ve mekânsal değişkenlik göstermesinden

dolayı doğrudan modellerde istenilen doğruluk elde edilememektedir. İkincisi ise doğrudan modellere alternatif olarak türetilen matematiksel modeller ve izdüşüm fonksiyonlarıdır. Bu modeller ve fonksiyonlara Saastamoinen, Hopfield, Baby, Berman, Callahan, Chao, Askne-Nordius, VMF1, GMF, Niell örnek verilebilir. Islak gecikme ile PWV arasındaki ilişki, Eşitlik 4.1’de gösterildiği gibi, toplam gecikmeden hidrostatik gecikme çıkarılarak elde edilmektedir (Pang ve ark. 2021).

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (4.1)$$

Yoğuşabilir su buharı miktarı (mm), doğrusal olarak PWV değeri ile orantılı olan ıslak zenit gecikmesi değeri temel alınan GNSS verileri ile elde edilebilmektedir (Bevis ve ark., 1994). 4.2 eşitliğindeki  $T_m$  değeri ortalama atmosferik sıcaklık değerini ifade etmektedir (Davis ve ark., 1985)

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} d\delta}{\int \frac{e}{T^2} d\delta} \quad (4.2)$$

Tez kapsamında Mekik ve Deniz (2017)’de detayları verilen Türkiye için geliştirilmiş modele ilişkin parametreler dikkate alınmıştır. Bu amaçla  $T_m = 48.55 + 0.80T_s$  modeli kullanılmıştır. Bağlantıda kullanılan  $T_m$  ağırlıklı ortalama sıcaklığı ve  $T_s$  yüzey sıcaklığını ifade etmektedir.  $T_s$  yüzey sıcaklık değerleri İstanbul, İzmir, Samsun ve Erzurum istasyonları için Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Değerler her istasyon için günde iki kez olmak üzere hesaplanmıştır.

$$\pi(T_m) = [10^{-6} \left( \frac{k_3}{T_m} + k_2 \right) \rho_v R_v]^{-1} \quad (4.3)$$

$$PWV_{GNSS} = \pi(T_m) * ZWD_{GNSS} \quad (4.4)$$

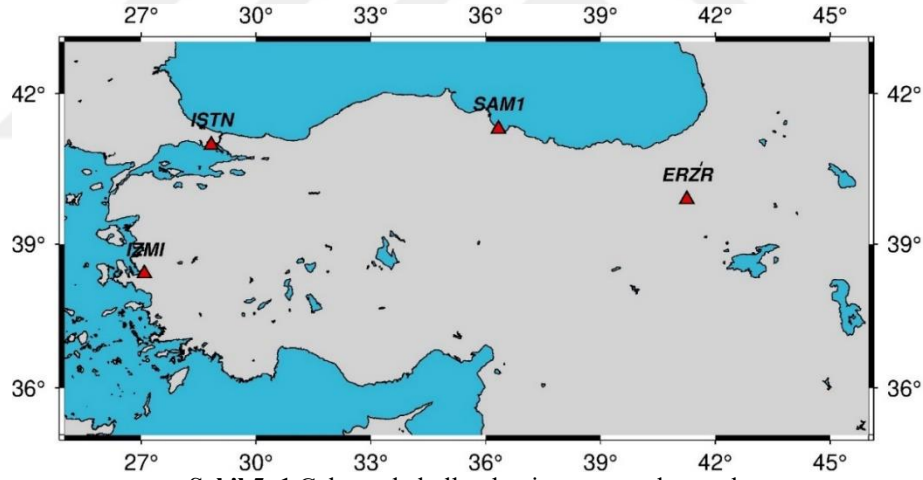
Hesaplanan  $T_m$  değerleri 4.3 eşitliğinde kullanılarak  $\pi(T_m)$  değerleri elde edilmiştir. 4.4 eşitliğinde kullanılan  $\pi(T_m)$  ile PWV değerleri hesaplanmıştır. 4.3 ve 4.4

eşitliklerinde kullanılan  $\Pi$ , su buharı dönüşüm faktörünü ifade etmektedir. Eşitlik 4.3'te kullanılan  $\rho_v$  sıvı suyun yoğunluğunu ( $1000 \text{ kgm}^{-3}$ ),  $R_v$  orijinal gaz sabitini ( $461.524 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ) ve  $k_3 = 377 \text{ 600 K}^2\text{hPa}$  ve  $k_2=22.1 \text{ KhPa}^{-1}$  ifade etmektedir (Mekik ve Deniz, 2017).



## 5. UYGULAMA

Çalışma kapsamında PPP yöntemi ile elde edilen ZWD değerlerinden türetilen PWV değerlerinin doğruluğu test edilmiştir. Bu amaçla PPP yönteminden elde edilen PWV değerleri ile Radyasondadan elde edilen PWV değerleri karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Test işlemi için Türkiye’de bulunan Samsun, Erzurum, İstanbul ve İzmir radyasonda istasyonları ve yakın konumlarında bulunan SAM1, ERZR, ISTN ve IZMI TUSAGA-Aktif istasyonları kullanılmıştır (Şekil 5.1). İstasyonlarda 2016-2020 yıllarına ait veriler kullanılmıştır. Bu istasyonlara ait enlem ve boylam bilgileri Tablo 5.1’de verilmiştir. İlgili yıllarda her bir istasyonda 00.00 UTC ve 12.00 UTC’de elde edilen PPP-PWV değerleri ve Radyosonda-PWV değerlerine ilişkin detaylar Şekil 5.2-5.5’te verilmiştir. Ayrıca mutlak minimum, mutlak maksimum, ortalama ve karesel ortalama hata (RMS) gibi temel istatistiki değerler hesaplanmış ve Tablo 5.2-5.5’te verilmiştir.

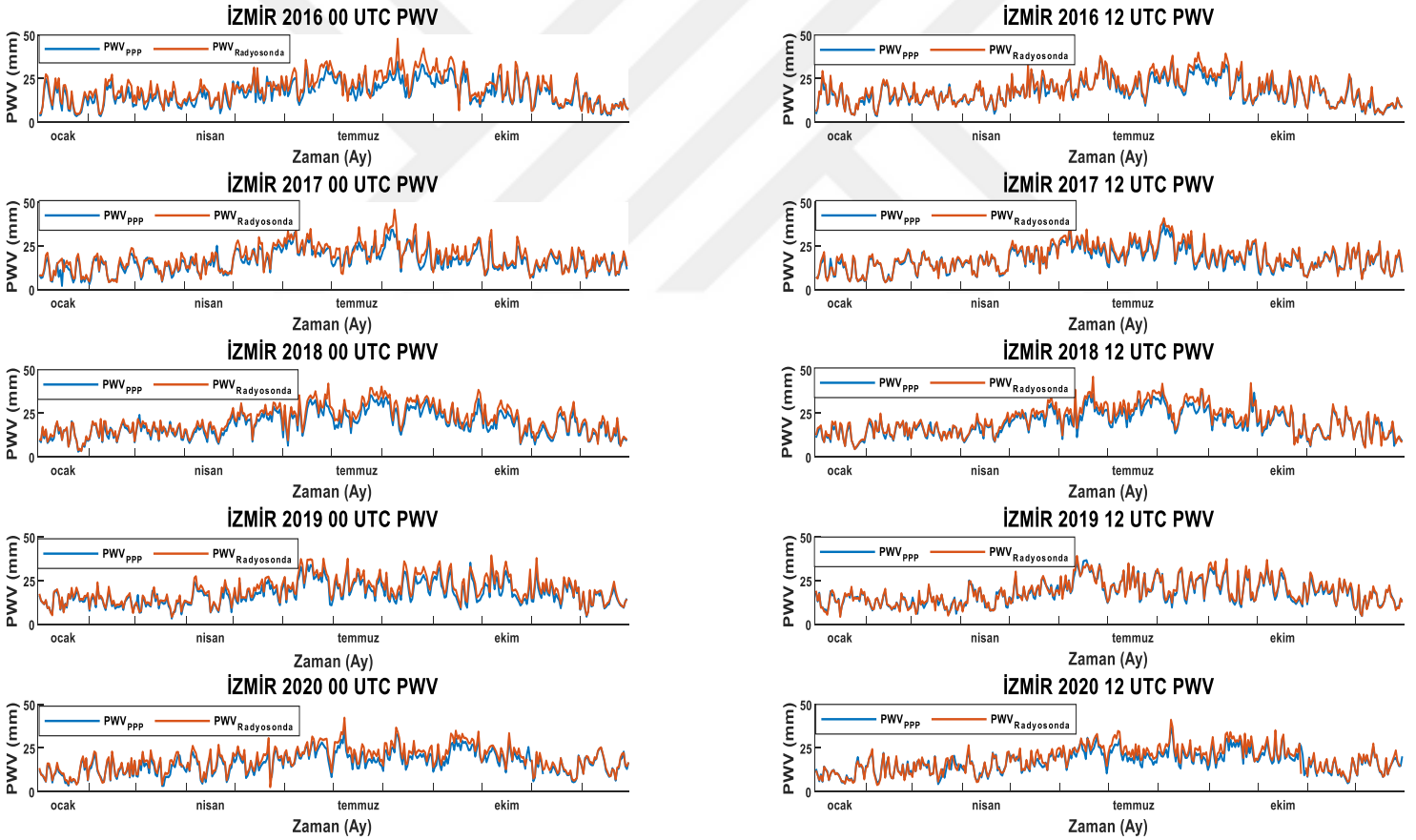


Şekil 5. 1 Çalışmada kullanılan istasyon ve konumları

Tablo 5. 1 Çalışmada kullanılan istasyonların detayları

	İSTASYON	ENLEM	BOYLAM
Radyosonda İstasyonları	İzmir (17220)	38.39	27.08
	Samsun (17030)	41.28	36.30
	İstanbul (17064)	40.91	29.16
	Erzurum (17095)	39.91	41.25
CORS-TR İstasyonları	IZMI (İzmir)	38.39	27.08
	SAM1 (Samsun)	41.31	36.33
	ISTN (İstanbul)	40.99	28.83
	ERZR (Erzurum)	39.91	41.26

Şekil 5.2’de İzmir istasyonunun 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC’deki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. İzmir istasyonuna ait tüm grafikler de görüldüğü gibi PWV’nin en yüksek değerlerine Haziran-Eylül döneminde ulaşılmış olup, en düşük değerlerine ise kış mevsimlerinde (Aralık-Ocak-Şubat) ulaşılmıştır. PWV değerleri öğle ve gece saatlerinde 0-50 mm arasında değişmiş olup, en yüksek değer 2018 yılı Ağustos ayında (37.47 mm), en düşük değere ise 2017 yılı Ocak ayında (2.08 mm) gözlenmiştir. Tüm yıllardaki PPP ve Radyosondadan elde edilen PWV değerleri incelendiğinde benzer trend gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 5. 2 İzmir İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri

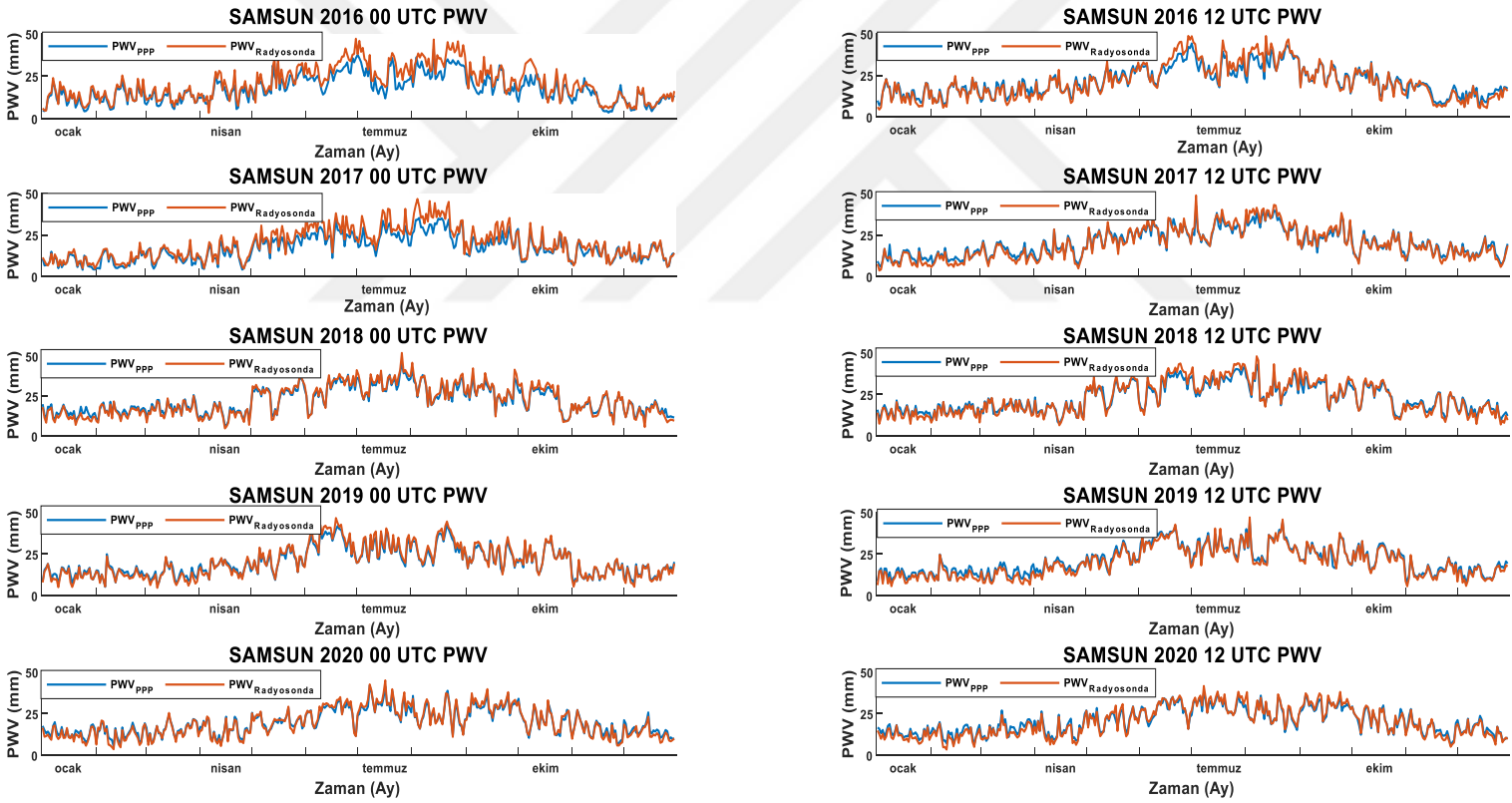
İzmir istasyonuna ait Tablo 5.2 incelendiğinde en düşük değer 2016 yılı Mart ayı ve 2017 yılı Aralık (0.001 mm) ayında görüldüğü, en yüksek değer ise 2017 yılı Ağustos ayında (15.682 mm) olduğu görülmüştür. RMS değerleri incelendiğinde en

düşük değerin 2017 yılı Kasım ayına ( $\pm 0.614$  mm) ait olduğu, en yüksek değerin ise 2016 yılı Ağustos ayına ( $\pm 6.565$  mm) ait olduğu görülmüştür. Farklara ilişkin ortalamalar incelendiğinde ise  $-0.086$  ile  $5.863$  mm aralığında değişmektedir.

**Tablo 5. 2** İzmir istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler

		UTC	2016	2017	2018	2019	2020			UTC	2016	2017	2018	2019	2020
Ocak	Min. (mm)	0	0.133	0.070	0.016	0.019	0.145	Temmuz	Min. (mm)	0	0.187	0.589	1.954	0.021	1.798
		12	0.010	0.054	0.003	0.007	0.024			12	0.095	0.049	1.050	0.016	1.697
	Max. (mm)	0	4.012	15.635	2.364	3.126	1.614		Max. (mm)	0	9.952	8.768	4.954	5.290	5.834
		12	4.005	5.006	3.064	2.868	2.336			12	5.221	6.281	6.355	3.213	8.194
	Ort. (mm)	0	2.002	1.990	0.665	0.692	0.747		Ort. (mm)	0	3.407	1.937	3.785	2.574	3.949
		12	0.968	0.560	1.027	0.162	-0.212			12	2.235	2.318	3.351	0.294	3.640
Rms (mm)	0	2.319	3.959	0.980	1.166	0.933	Rms (mm)	0	4.945	3.870	3.862	2.786	4.095		
	12	1.422	1.501	1.416	0.985	0.646		12	2.531	2.622	3.525	1.102	3.913		
Şubat	Min. (mm)	0	0.328	0.030	0.075	0.202	0.052	Ağustos	Min. (mm)	0	0.423	0.145	1.776	1.341	0.004
		12	0.046	0.034	0.153	0.025	0.010			12	0.255	0.715	0.619	0.008	0.586
	Max. (mm)	0	8.757	4.077	5.199	2.104	3.838		Max. (mm)	0	13.196	15.682	6.486	5.878	5.639
		12	2.858	2.368	3.322	2.836	2.026			12	6.751	5.274	8.187	3.594	6.401
	Ort. (mm)	0	2.807	1.059	1.096	1.033	0.926		Ort. (mm)	0	5.863	4.070	3.839	3.522	3.002
		12	0.954	0.696	0.882	0.266	-0.320			12	2.787	2.863	3.370	1.461	2.864
Rms (mm)	0	3.328	1.782	1.670	1.308	1.316	Rms (mm)	0	6.565	5.400	3.969	3.685	3.187		
	12	1.432	1.075	1.300	0.937	0.957		12	3.127	3.056	3.789	1.789	3.143		
Mart	Min. (mm)	0	0.270	0.046	0.115	0.064	0.088	Eylül	Min. (mm)	0	0.086	0.149	1.016	1.161	1.648
		12	0.001	0.038	0.008	0.073	0.031			12	0.309	0.054	0.351	0.267	0.047
	Max. (mm)	0	7.384	4.405	4.739	6.968	8.141		Max. (mm)	0	9.403	7.238	8.825	4.438	6.115
		12	3.313	8.328	5.222	4.991	7.047			12	6.369	5.649	7.252	5.534	5.097
	Ort. (mm)	0	2.163	1.443	0.886	0.749	2.132		Ort. (mm)	0	3.940	2.511	3.026	2.892	3.601
		12	0.166	-0.086	0.527	0.345	0.501			12	2.566	2.001	2.609	1.898	3.365
Rms (mm)	0	2.621	1.903	4.568	1.848	3.021	Rms (mm)	0	5.101	3.286	3.627	3.245	3.734		
	12	0.925	1.732	1.513	1.998	2.939		12	3.036	2.375	3.394	2.394	3.575		
Nisan	Min. (mm)	0	0.051	0.300	0.593	0.072	0.219	Ekim	Min. (mm)	0	0.190	0.088	0.728	0.439	0.144
		12	0.004	0.008	0.042	0.018	0.000			12	0.188	0.010	0.056	0.281	0.237
	Max. (mm)	0	5.758	8.037	3.115	4.989	4.228		Max. (mm)	0	9.807	9.915	8.639	6.963	4.630
		12	2.970	2.028	5.145	3.428	3.443			12	7.428	5.232	5.367	5.041	5.014
	Ort. (mm)	0	2.107	0.266	2.026	1.739	1.769		Ort. (mm)	0	2.664	1.961	3.487	3.669	2.374
		12	0.532	0.209	1.510	-0.034	0.423			12	1.582	1.260	1.494	1.648	2.076
Rms (mm)	0	2.618	2.505	2.139	2.093	2.024	Rms (mm)	0	3.851	2.940	3.787	3.870	2.579		
	12	1.015	0.876	1.908	1.666	1.216		12	2.318	1.736	2.029	2.033	2.441		
Mayıs	Min. (mm)	0	0.369	0.108	0.907	0.194	0.038	Kasım	Min. (mm)	0	0.004	0.071	0.618	0.155	0.051
		12	0.110	0.018	0.521	0.122	0.106			12	0.055	0.025	0.014	0.057	0.136
	Max. (mm)	0	7.044	5.261	4.551	5.537	5.057		Max. (mm)	0	5.925	4.327	4.280	5.948	2.453
		12	8.376	3.968	4.656	2.896	5.922			12	4.310	4.139	2.344	5.256	2.562
	Ort. (mm)	0	1.974	2.246	2.470	2.395	2.071		Ort. (mm)	0	1.795	1.369	2.503	2.388	1.174
		12	1.388	1.381	2.229	0.438	1.416			12	0.668	0.412	0.472	1.208	1.028
Rms (mm)	0	3.195	2.869	2.654	2.746	2.667	Rms (mm)	0	2.536	0.614	2.700	2.760	1.395		
	12	2.695	1.820	2.676	1.310	2.379		12	1.525	1.255	1.048	1.672	1.229		
Haziran	Min. (mm)	0	1.991	0.011	1.441	0.637	0.355	Aralık	Min. (mm)	0	0.080	0.021	0.194	0.064	0.028
		12	0.015	0.473	0.444	0.163	0.422			12	0.031	0.001	0.010	0.028	0.050
	Max. (mm)	0	8.214	6.274	13.207	6.522	5.748		Max. (mm)	0	3.480	3.743	6.502	2.761	2.509
		12	7.517	4.406	9.953	4.965	4.823			12	3.847	3.441	13.457	2.410	4.305
	Ort. (mm)	0	4.351	2.263	3.596	2.826	2.174		Ort. (mm)	0	0.189	1.014	1.526	0.837	0.587
		12	1.079	2.150	3.491	0.745	2.143			12	0.670	0.627	0.180	0.020	0.722
Rms (mm)	0	4.816	3.120	4.124	3.148	2.622	Rms (mm)	0	1.136	1.639	2.025	1.195	0.947		
	12	2.007	2.499	3.959	2.312	2.735		12	1.278	1.270	2.984	0.936	1.160		

Şekil 5.3'te Samsun istasyonunun 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC'deki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri verilmiştir. Samsun istasyonuna ait tüm grafiklerde PWV'nin en yüksek değerlerinin yaz mevsimlerinde (Temmuz-Ağustos-Eylül) olduğu en düşük değerlerinin ise kış mevsimlerinde (Aralık-Ocak-Şubat) olduğu görülmüştür. En yüksek PWV değerine 2018 yılı Temmuz ayında (45.81 mm) ulaşılmış olup, en düşük değerine ise 2017 yılı Ocak ayında (4.01 mm) ulaşılmıştır. Grafikler incelendiğinde PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerlerinin 2016 yılı hariç çoğunlukla uyumlu olduğu 2016 yılında ise yaz aylarında farkların diğer yıllara göre bir miktar fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 3 Samsun İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri

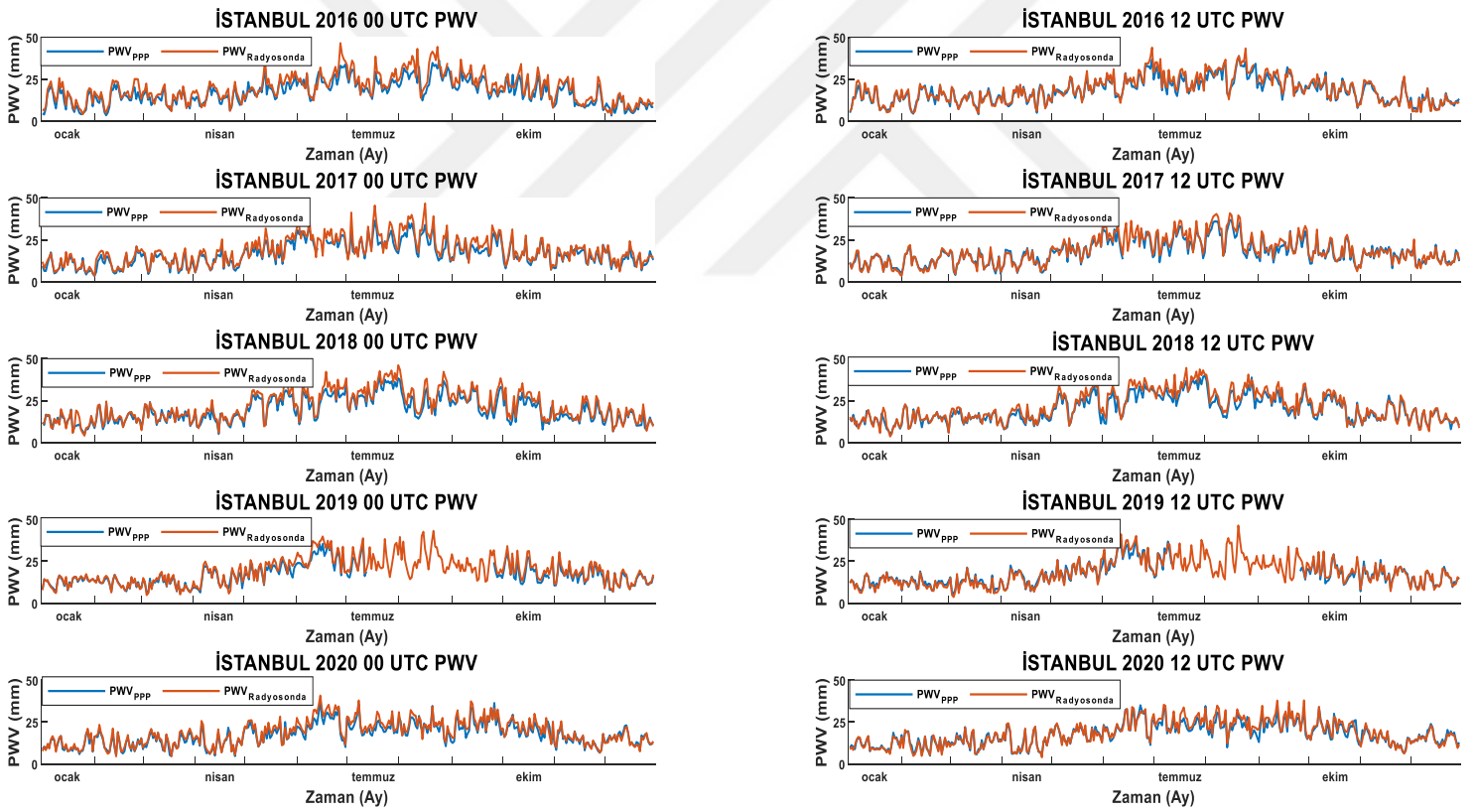
Tablo 5.3'te Samsun istasyonunun 2016-2017 yılları arasındaki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri arasındaki farklara ilişkin minimum, maksimum, ortalama ve RMS değerleri verilmiştir. En düşük fark 0.001 mm ile Aralık/2016, Ekim-Aralık/2018 ve Temmuz/2020'de elde edilmiştir. En yüksek değer ise 15.502

mm ile Temmuz/2016'ya aittir. Farklara ilişkin ortalama değerler incelendiğinde (-2.532 ile 6.907 mm) aralığında değiştiği görülmektedir. En düşük RMS değerine 2019 yılı Kasım ayında ( $\pm 0.854$  mm) ulaşılmış olup, en yüksek RMS değerine ise 2016 yılı Ağustos ayında ( $\pm 7.539$  mm) ulaşılmıştır.

**Tablo 5. 3** Samsun istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler

		UTC	2016	2017	2018	2019	2020			UTC	2016	2017	2018	2019	2020
Ocak	Min. (mm)	0	0.134	0.098	0.766	0.061	0.218	Temmuz	Min. (mm)	0	0.378	0.785	0.241	0.059	0.029
		12	0.061	0.054	0.212	0.240	0.168			12	0.063	0.103	0.025	0.051	0.001
	Max. (mm)	0	3.103	3.761	7.605	4.652	3.971		Max. (mm)	0	15.502	12.706	6.196	3.825	4.337
		12	4.708	7.239	3.297	3.592	3.623			12	7.108	6.633	5.131	3.139	3.719
	Ort. (mm)	0	1.639	1.005	-2.247	-1.231	-1.580		Ort. (mm)	0	6.186	4.858	1.806	1.500	1.642
		12	-1.154	-1.826	-1.791	-1.666	-2.067			12	3.272	1.493	2.453	-0.973	1.396
Rms (mm)	0	1.942	1.574	2.601	1.608	1.828	Rms (mm)	0	7.064	5.851	2.415	1.796	2.055		
	12	1.971	2.523	2.000	1.889	2.252		12	4.294	2.580	2.843	1.678	1.971		
Şubat	Min. (mm)	0	0.101	0.004	0.217	0.087	0.305	Ağustos	Min. (mm)	0	1.300	0.615	0.106	0.155	0.092
		12	0.017	0.274	0.083	0.083	0.026			12	0.056	0.294	0.135	0.029	0.204
	Max. (mm)	0	5.278	6.071	2.751	2.811	4.371		Max. (mm)	0	12.731	13.980	4.113	4.339	4.220
		12	3.447	6.953	2.660	3.910	4.042			12	9.439	7.232	6.402	2.592	11.365
	Ort. (mm)	0	1.579	1.702	-1.092	-1.148	-1.138		Ort. (mm)	0	6.907	6.700	1.282	1.721	0.539
		12	-0.680	-1.907	-1.165	-2.017	-2.175			12	3.581	2.350	1.743	-0.782	1.036
Rms (mm)	0	2.211	2.236	1.475	1.388	2.048	Rms (mm)	0	7.539	7.572	1.910	1.989	1.634		
	12	1.390	2.434	1.346	2.304	2.483		12	4.601	2.981	2.584	1.589	2.549		
Mart	Min. (mm)	0	0.013	0.152	0.053	0.013	0.010	Eylül	Min. (mm)	0	0.014	0.102	0.025	0.164	0.147
		12	0.153	0.541	0.052	0.038	0.087			12	0.056	0.073	0.138	0.021	0.043
	Max. (mm)	0	4.164	4.925	3.137	4.201	2.287		Max. (mm)	0	13.759	9.192	5.507	5.180	3.853
		12	4.075	3.297	4.566	4.160	4.090			12	3.520	3.671	5.359	8.255	3.674
	Ort. (mm)	0	1.495	1.340	-1.122	-1.437	-0.612		Ort. (mm)	0	3.955	3.814	1.471	0.795	1.521
		12	-1.753	-1.817	-0.727	-2.532	-1.878			12	-0.331	1.249	1.799	0.117	1.641
Rms (mm)	0	2.123	2.123	1.657	1.863	1.071	Rms (mm)	0	5.469	4.861	2.108	1.699	1.946		
	12	2.326	1.997	1.794	2.673	2.346		12	1.457	1.885	2.368	2.074	1.990		
	0	0.198	0.190	0.314	0.095	0.058		0	0.599	0.074	0.037	0.018	0.089		
	12	0.174	0.089	0.047	0.234	0.092		12	0.019	0.027	0.001	0.030	0.021		
Nisan	Min. (mm)	0	9.011	3.910	2.455	2.613	2.450	Ekim	Min. (mm)	0	14.999	7.602	4.820	3.984	2.930
		12	4.535	4.831	2.540	4.230	3.645			12	4.101	3.429	4.006	2.287	4.756
	Max. (mm)	0	2.245	1.727	-1.082	-0.617	-0.915		Max. (mm)	0	4.519	1.263	1.734	0.346	0.424
		12	-0.874	-1.466	-0.815	-1.697	-1.720			12	-0.445	-0.524	0.546	-0.986	0.339
	Ort. (mm)	0	3.662	2.201	1.279	1.400	1.300		Ort. (mm)	0	6.168	2.551	2.435	1.034	1.348
		12	1.765	1.872	1.212	2.000	1.967			12	1.721	1.332	1.706	1.252	1.525
Rms (mm)	0	0.091	0.181	0.102	0.011	0.187	Rms (mm)	0	6.146	0.044	0.003	0.023	0.050		
	12	0.054	0.002	0.066	0.053	0.139		12	0.044	0.079	0.119	0.128	0.408		
Mayıs	Min. (mm)	0	10.716	6.916	3.996	3.264	3.954	Kasım	Min. (mm)	0	10.484	5.974	2.141	2.386	3.377
		12	3.353	3.673	5.250	4.543	8.954			12	8.543	3.637	3.153	3.051	3.577
	Max. (mm)	0	2.313	3.138	0.426	0.821	-0.099		Max. (mm)	0	2.041	1.129	-0.206	-0.023	-1.164
		12	-0.841	-0.567	0.411	-1.089	-0.147			12	-0.772	-1.065	-1.369	-0.973	-1.420
	Ort. (mm)	0	4.139	3.669	1.572	1.248	1.447		Ort. (mm)	0	3.603	2.261	1.147	0.854	1.563
		12	1.647	1.564	1.653	1.682	2.257			12	2.361	1.612	1.739	1.316	1.805
Rms (mm)	0	0.242	0.691	0.076	0.041	0.023	Rms (mm)	0	0.079	0.076	0.022	0.083	0.002		
	12	0.088	0.128	0.210	0.009	0.085		12	0.001	0.194	0.001	0.052	0.084		
Haziran	Min. (mm)	0	11.423	11.475	3.037	6.941	6.038	Aralık	Min. (mm)	0	2.603	6.403	6.100	2.590	4.041
		12	7.655	7.519	5.700	4.823	3.611			12	5.373	3.305	5.085	2.537	2.722
	Max. (mm)	0	5.049	4.983	0.917	2.096	1.128		Max. (mm)	0	0.720	0.442	-1.222	-0.950	-1.597
		12	2.917	0.263	1.966	-1.096	0.790			12	-2.126	-1.207	-1.684	-1.343	-1.135
	Ort. (mm)	0	5.812	5.737	1.734	2.747	1.836		Ort. (mm)	0	1.283	1.662	1.866	1.218	2.064
		12	4.114	2.129	2.639	1.764	1.609			12	2.502	1.602	2.040	1.573	1.402
Rms (mm)	0	0.242	0.691	0.076	0.041	0.023	Rms (mm)	0	0.079	0.076	0.022	0.083	0.002		
	12	0.088	0.128	0.210	0.009	0.085		12	0.001	0.194	0.001	0.052	0.084		

Şekil 5.4'te İstanbul istasyonunun 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC'deki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri verilmiştir. İstanbul istasyonuna ait tüm grafiklerde görüldüğü gibi yaz mevsimlerinde (Temmuz-Ağustos-Eylül) PWV değerlerinin kış mevsimlerine (Aralık-Ocak-Şubat) göre daha yüksek olduğu görülmüştür. PWV değerleri öğle ve gece saatlerinde 0-50 mm arasında değişmiş olup, en yüksek değeri 2018 yılı Ağustos ayına (39.85 mm) en düşük değeri ise 2016 yılı Şubat ayına (3.37 mm) ait olduğu görülmüştür. 14 Temmuz 2019 ile 26 Eylül 2019 tarihleri arasında RINEX verisi olmadığından PPP-PWV değerleri hesaplanamamıştır. İki yöntemle elde edilen PWV değerlerinin benzer trend gösterdiği söylenebilir.



Şekil 5. 4 İstanbul İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri

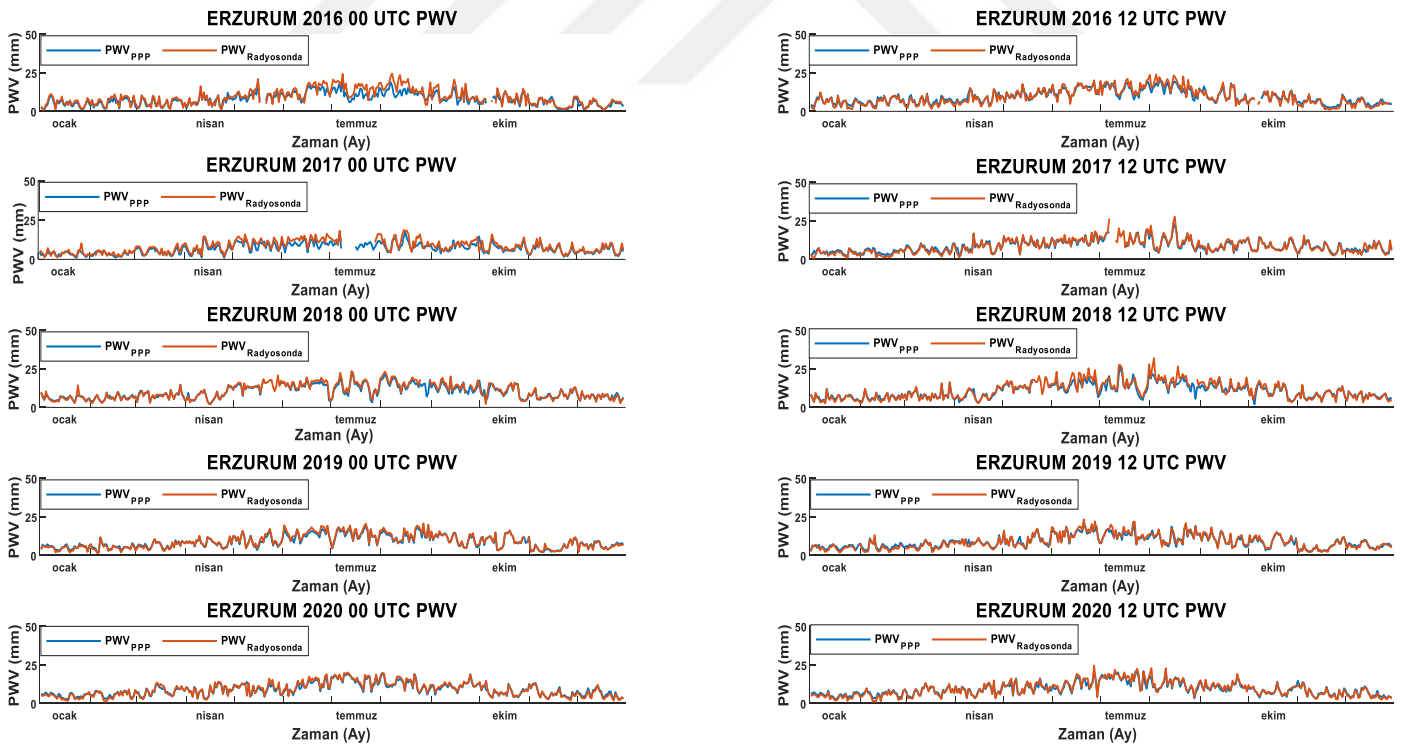
İstanbul istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri arasındaki farklar ilişkin temel istatistiki değerler hesaplanıp Tablo 5.4'te verilmiştir. Tablo 5.4 incelendiğinde en düşük farkın 0.001 mm ile 2020 yılı

Ekim ayına ait olduğu, en yüksek farkın ise 13.446 mm ile 2016 Haziran ayına ait olduğu görülmüştür. Farklara ilişkin ortalama değerler incelendiğinde (-1.043 ile 4.727 mm) aralığında değiştiği görülmektedir. RMS'ler incelendiğinde ise en düşük değere 2019 yılı Şubat ayında ( $\pm 0.602$  mm), en yüksek değere ise ( $\pm 5.591$  mm) 2016 yılı Ağustos ayında ulaşıldığı görülmüştür.

**Tablo 5. 4** İstanbul istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistikî değerler

		UTC	2016	2017	2018	2019	2020			UTC	2016	2017	2018	2019	2020
Ocak	Min. (mm)	0	0.153	0.031	0.015	0.011	0.013	Temmuz	Min. (mm)	0	0.066	0.049	0.336	0.333	0.355
		12	0.017	0.022	0.008	0.037	0.087			12	0.386	0.165	0.056	0.120	0.011
	Max. (mm)	0	5.263	3.961	9.103	1.828	2.882		Max. (mm)	0	9.110	10.543	6.491	6.350	5.960
		12	6.064	3.109	6.910	2.639	2.319			12	6.115	7.748	9.404	4.038	6.456
	Ort. (mm)	0	2.182	0.872	0.643	0.143	0.478		Ort. (mm)	0	3.324	2.380	2.997	2.225	2.565
		12	0.643	-0.288	0.206	-0.676	-0.255			12	2.442	2.430	3.328	0.216	2.709
Rms (mm)	0	2.608	1.542	2.477	0.716	1.042	Rms (mm)	0	4.093	4.258	3.473	1.863	3.010		
	12	1.620	1.067	2.155	1.053	0.999		12	3.251	2.987	4.129	1.266	3.278		
Şubat	Min. (mm)	0	0.151	0.034	0.018	0.018	0.039	Ağustos	Min. (mm)	0	0.710	0.310	0.537		0.223
		12	0.002	0.010	0.085	0.126	0.015			12	0.031	0.296	0.206		0.017
	Max. (mm)	0	11.857	7.581	3.345	1.412	3.127		Max. (mm)	0	10.811	12.825	9.784		6.141
		12	4.962	1.827	4.462	2.578	3.553			12	7.981	6.999	7.652		7.998
	Ort. (mm)	0	2.623	1.754	0.822	0.195	0.594		Ort. (mm)	0	4.727	4.554	4.451		1.284
		12	0.218	-0.216	0.407	-0.782	-0.685			12	2.102	3.035	3.346		2.037
Rms (mm)	0	3.671	2.533	1.357	0.602	1.289	Rms (mm)	0	5.591	5.519	5.132		2.773		
	12	1.479	0.942	1.259	1.164	1.331		12	3.184	3.342	4.015		3.186		
Mart	Min. (mm)	0	0.282	0.604	0.139	0.006	0.027	Eylül	Min. (mm)	0	0.084	0.205	0.115	0.987	0.630
		12	0.004	0.057	0.007	0.026	0.127			12	0.117	0.075	0.065	0.836	0.025
	Max. (mm)	0	7.138	4.372	3.233	2.694	4.130		Max. (mm)	0	7.187	7.481	6.268	7.166	5.571
		12	2.557	3.260	4.746	2.473	2.385			12	5.876	6.322	6.329	7.618	7.571
	Ort. (mm)	0	1.535	1.163	0.614	0.208	1.260		Ort. (mm)	0	3.162	2.652	2.857	3.542	2.253
		12	-0.325	0.007	0.863	-1.043	-0.241			12	1.548	1.807	2.581	3.368	2.622
Rms (mm)	0	2.374	1.844	1.362	1.055	1.661	Rms (mm)	0	3.836	3.700	3.378	1.538	2.792		
	12	1.045	1.129	1.725	1.432	1.034		12	2.857	2.687	3.128	1.569	3.483		
Nisan	Min. (mm)	0	0.059	0.054	0.232	0.008	0.029	Ekim	Min. (mm)	0	0.045	0.043	0.071	0.394	0.001
		12	0.014	0.097	0.055	0.026	0.056			12	0.082	0.064	0.031	0.101	0.030
	Max. (mm)	0	5.086	6.145	4.680	6.872	5.009		Max. (mm)	0	11.305	4.286	5.532	5.027	5.255
		12	3.011	3.780	4.797	2.280	2.204			12	10.211	4.955	6.198	3.680	7.295
	Ort. (mm)	0	1.476	1.422	1.393	0.915	0.741		Ort. (mm)	0	2.562	1.330	3.052	2.793	1.732
		12	-0.102	-0.378	1.618	-0.578	0.179			12	0.821	1.055	1.241	1.197	0.963
Rms (mm)	0	2.359	2.315	1.935	2.313	1.634	Rms (mm)	0	4.039	2.242	3.683	3.018	2.728		
	12	1.134	1.527	2.122	1.189	0.937		12	2.228	1.723	2.219	1.771	2.423		
Mayıs	Min. (mm)	0	0.626	0.208	0.167	0.054	0.005	Kasım	Min. (mm)	0	0.017	0.088	0.288	0.285	0.036
		12	0.004	0.070	0.267	0.016	0.009			12	0.012	0.042	0.079	0.064	0.016
	Max. (mm)	0	8.069	7.400	6.196	6.920	4.323		Max. (mm)	0	5.801	4.703	6.414	3.719	6.494
		12	4.533	3.426	6.255	6.047	4.289			12	4.549	2.054	2.722	2.876	5.617
	Ort. (mm)	0	2.238	2.254	2.461	1.978	1.477		Ort. (mm)	0	2.433	1.260	2.150	1.606	0.777
		12	0.516	0.594	2.340	0.083	-0.112			12	0.187	-0.401	0.350	-0.227	0.361
Rms (mm)	0	3.516	3.331	2.925	2.850	2.178	Rms (mm)	0	2.931	2.113	2.726	1.906	1.627		
	12	1.315	1.528	3.146	1.682	1.420		12	1.388	1.069	1.324	1.305	1.643		
Haziran	Min. (mm)	0	0.117	0.222	0.243	0.418	0.499	Aralık	Min. (mm)	0	0.027	0.096	0.024	0.012	0.006
		12	0.041	0.296	0.089	0.108	0.114			12	0.024	0.009	0.027	0.106	0.034
	Max. (mm)	0	13.446	7.955	10.037	7.716	6.699		Max. (mm)	0	4.040	4.128	6.385	4.132	2.505
		12	7.057	6.068	8.326	5.562	6.194			12	2.833	5.354	4.490	4.604	2.496
	Ort. (mm)	0	2.121	2.341	3.664	2.969	3.268		Ort. (mm)	0	1.209	1.263	1.221	0.662	-0.523
		12	1.662	2.109	3.099	1.573	0.136			12	-0.642	-0.143	0.058	-0.035	-0.700
Rms (mm)	0	4.319	3.760	4.390	3.872	3.646	Rms (mm)	0	2.029	2.089	2.282	1.205	1.124		
	12	2.720	2.910	4.049	2.578	1.858		12	1.129	1.627	1.295	1.354	1.070		

Şekil 5.5'te Erzurum istasyonunun 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC'deki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri verilmiştir. Erzurum istasyonuna ait tüm grafikler de görüldüğü gibi tüm yıllar da PWV'nin en yüksek değerlerine Temmuz ve Ağustos aylarında ulaşılmış olup, en düşük değerlerine ise Aralık ve Ocak aylarında ulaşılmıştır. Erzurum istasyonu karasal bir iklim yapısına sahip olduğundan su buharını etkileyen nem değerlerine denize kıyısı olan istasyonlar (İstanbul, İzmir, Samsun) kadar maruz kalmamaktadır. Bu durum PWV değerlerine etki etmekte olup öğle ve gece saatlerindeki PWV değerleri 0-30 mm arasında değişim göstermiştir. Ayrıca mevsimler arası geçişlerde (Ör: Ocak ayından Temmuz ayına) PWV değerlerinin arasındaki farkların İzmir, İstanbul ve Samsun istasyonları arasındaki farklar kadar büyük olmadığı görülmüştür. En yüksek PWV değerinin 2018 yılı Temmuz ayına (26.35 mm) en düşük değeri ise 2017 yılı Ocak ayına (0.98 mm) ait olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 5 Erzurum İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri

Erzurum istasyonu 2016-2020 yıllarına ait PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri arasındaki farklara ilişkin temel istatistiki değerler Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5 incelendiğinde en düşük farkın 0.000 mm ile 2019 yılı Aralık ayına (Bu ayda ki PPP-PWV değeri 12.059 bulunmuşken aynı güne ait Radyosonda-PWV değeri 12.06'dır. ) ait olduğu, en yüksek farkın ise 9.669 mm ile 2016 yılı Ağustos ayına ait olduğu görülmüştür. Ortalama farklar incelendiğinde -1.024 ile 4.122 arasında değiştiği görülmektedir. RMS değerleri incelendiğinde en düşük değere 2019 yılı Kasım ayında ( $\pm 0.442$  mm) ulaşıldığı, en yüksek değerine ise ( $\pm 4.87$  mm) 2016 yılı Aralık ayında ulaşılmıştır.

**Tablo 5. 5** Erzurum istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler

		UTC	2016	2017	2018	2019	2020			UTC	2016	2017	2018	2019	2020		
Ocak	Min. (mm)	0	0.259	0.059	0.020	0.058	0.122	Temmuz	Min. (mm)	0	0.581	1.135	0.009	0.091	0.026		
		12	0.040	0.007	0.085	0.083	0.344			12	0.060	0.080	0.078	0.014	0.179		
	Max (mm)	0	2.054	5.667	6.575	1.913	1.540		Max (mm)	0	7.884	4.523	2.913	2.633	2.160		
		12	3.070	4.861	1.303	4.924	1.636			12	5.392	8.494	6.593	6.211	5.522		
	Ort. (mm)	0	0.727	0.535	-0.059	-0.568	-0.668		Ort. (mm)	0	4.122	2.408	1.262	1.022	0.763		
		12	-0.664	-0.747	-0.486	-0.852	-0.966			12	1.289	0.910	1.488	1.040	0.916		
	Rms (mm)	0	1.156	1.356	1.383	0.765	0.810		Rms (mm)	0	4.701	3.060	1.519	1.371	0.973		
		12	1.291	1.254	0.748	1.295	1.018			12	2.282	2.125	2.438	1.903	1.771		
	Şubat	Min. (mm)	0	0.074	0.066	0.019	0.038		0.041	Ağustos	Min. (mm)	0	0.235	0.016	0.666	0.194	0.005
			12	0.019	0.050	0.088	0.229		0.031			12	0.334	0.014	0.421	0.020	0.047
Max (mm)		0	3.690	2.588	1.626	1.841	2.068	Max (mm)	0		9.669	6.060	2.991	2.723	2.496		
		12	1.375	2.239	3.196	5.360	2.186		12		8.417	4.963	11.480	2.930	7.181		
Ort. (mm)		0	0.923	0.376	-0.358	-0.445	-0.588	Ort. (mm)	0		3.623	2.021	1.510	1.172	0.741		
		12	-0.590	-0.971	-0.498	-0.848	-0.897		12		2.683	1.147	2.623	0.324	0.816		
Rms (mm)		0	1.592	0.986	0.586	0.631	0.874	Rms (mm)	0		4.870	3.115	1.640	1.343	1.002		
		12	0.820	1.194	0.789	1.535	1.073		12		3.369	1.795	3.835	1.295	1.614		
Mart		Min. (mm)	0	0.014	0.086	0.031	0.012	0.013	Eylül		Min. (mm)	0	0.002	0.005	0.469	0.006	0.080
			12	0.131	0.146	0.023	0.136	0.080				12	0.011	0.040	0.067	0.014	0.007
	Max (mm)	0	2.668	3.439	1.820	1.439	2.553	Max (mm)		0	7.860	4.683	2.710	1.485	2.132		
		12	3.185	1.992	1.645	1.684	1.283			12	5.809	2.996	4.802	3.437	2.367		
	Ort. (mm)	0	0.475	0.853	-0.067	-0.415	0.210	Ort. (mm)		0	1.933	1.472	1.258	0.386	0.633		
		12	-1.024	-0.942	-0.201	-0.846	-0.284			12	-0.166	0.701	1.224	0.400	0.854		
	Rms (mm)	0	1.277	1.234	0.561	0.668	0.889	Rms (mm)		0	2.989	2.114	2.131	0.666	0.862		
		12	1.325	1.031	0.848	1.006	0.659			12	1.534	1.051	2.154	1.128	1.208		
	Nisan	Min. (mm)	0	0.069	0.074	0.006	0.023	0.030		Ekim	Min. (mm)	0	0.016	0.141	0.028	0.015	0.016
			12	0.004	0.049	0.001	0.003	0.014				12	0.068	0.063	0.006	0.150	0.051
Max (mm)		0	3.927	2.723	1.927	1.084	1.931	Max (mm)	0		4.748	9.905	3.892	1.515	5.764		
		12	5.832	3.927	3.683	4.309	3.215		12		5.524	1.675	4.404	1.552	1.675		
Ort. (mm)		0	0.139	1.494	-0.095	0.133	0.101	Ort. (mm)	0		0.274	0.939	0.224	0.175	0.305		
		12	-0.962	-0.543	0.167	-0.525	0.086		12		-0.605	-0.164	0.708	0.452	0.300		
Rms (mm)		0	1.604	1.666	0.504	0.383	0.525	Rms (mm)	0		2.260	2.519	1.726	0.487	1.176		
		12	1.492	1.127	1.021	0.986	0.989		12		1.522	0.642	1.689	0.698	0.596		
Mayıs		Min. (mm)	0	0.565	0.036	0.113	0.013	0.027	Kasım		Min. (mm)	0	0.029	0.021	0.001	0.004	0.011
			12	0.023	0.001	0.018	0.022	0.021				12	0.125	0.028	0.003	0.002	0.017
	Max (mm)	0	5.207	4.643	2.058	3.601	8.808	Max (mm)		0	2.431	3.738	1.754	4.062	1.238		
		12	4.580	3.092	2.335	4.434	3.303			12	2.972	2.182	1.188	0.873	3.566		
	Ort. (mm)	0	0.900	1.587	0.555	0.703	0.383	Ort. (mm)		0	0.191	0.759	0.036	0.155	-0.294		
		12	0.370	0.290	0.580	-0.086	0.633			12	-0.899	-0.320	-0.376	-0.249	-0.465		
	Rms (mm)	0	2.251	2.248	0.869	1.125	1.903	Rms (mm)		0	1.058	1.250	0.616	0.817	0.560		
		12	1.465	0.988	0.980	1.410	1.363			12	1.154	0.765	0.575	0.442	0.886		
	Haziran	Min. (mm)	0	0.019	0.535	0.009	0.048	0.056		Aralık	Min. (mm)	0	0.090	0.125	0.006	0.059	0.049
			12	0.002	0.014	0.200	0.021	0.042				12	0.007	0.019	0.028	0.000	0.068
Max (mm)		0	7.987	6.152	3.100	4.271	3.328	Max (mm)	0		3.900	3.104	2.171	1.358	1.691		
		12	3.504	3.624	6.098	5.979	4.524		12		3.283	4.683	1.663	1.675	1.869		
Ort. (mm)		0	1.295	2.806	1.055	1.490	0.986	Ort. (mm)	0		0.747	0.675	-0.180	-0.410	-0.921		
		12	0.024	0.718	2.412	0.877	0.830		12		-0.944	-0.207	-0.493	-0.420	-0.672		
Rms (mm)		0	2.552	3.135	1.357	1.735	1.379	Rms (mm)	0		1.181	1.017	0.777	0.609	1.057		
		12	1.569	1.168	3.049	1.869	1.673		12		1.233	1.570	0.723	0.757	0.903		

Tüm istasyonlara ait PPP-PWV ve Radyasonda-PWV arasındaki farklara ilişkin temel istatistik değerlerin (Maksimum, Minimum, Ortalama ve RMS) yanı sıra korelasyon katsayıları hesaplanarak Tablo 5.6-5.9’da verilmiştir. Tablo 5.6 incelendiğinde İzmir istasyonuna ait korelasyon katsayılarının 0.741-0.993 arasında değiştiği, Samsun istasyonuna ait korelasyon katsayılarının 0.791-0.992 arasında olduğu (Tablo 5.7), İstanbul ve Erzurum istasyonlarında ise sırasıyla 0.780-0.991 (Tablo 5.8) ve 0.661-0.992 (Tablo 5.9) arasında değiştiği görülmüştür. Her bir istasyon için ortalama korelasyon katsayıları incelendiğinde iki yöntem arasındaki en yüksek uyumun 0.975 ile Samsun istasyonunda, en düşük uyumun ise 0.817 ile Erzurum istasyonunda elde edildiği görülmüştür.

**Tablo 5. 6** İzmir istasyonuna ait korelasyon değerleri

İZMİR	Korelasyon									
	2016		2017		2018		2019		2020	
	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC
<b>Ocak</b>	0.991	0.990	0.741	0.969	0.988	0.987	0.978	0.979	0.993	0.987
<b>Şubat</b>	0.953	0.979	0.975	0.993	0.939	0.967	0.978	0.962	0.990	0.990
<b>Mart</b>	0.943	0.965	0.949	0.973	0.915	0.896	0.893	0.861	0.899	0.747
<b>Nisan</b>	0.932	0.981	0.823	0.977	0.984	0.966	0.984	0.944	0.987	0.976
<b>Mayıs</b>	0.826	0.901	0.937	0.972	0.974	0.927	0.948	0.948	0.962	0.873
<b>Haziran</b>	0.954	0.966	0.857	0.948	0.965	0.963	0.979	0.940	0.962	0.933
<b>Temmuz</b>	0.743	0.983	0.817	0.971	0.992	0.980	0.981	0.983	0.985	0.958
<b>Ağustos</b>	0.919	0.975	0.892	0.992	0.985	0.961	0.990	0.988	0.976	0.970
<b>Eylül</b>	0.933	0.986	0.888	0.959	0.936	0.921	0.984	0.989	0.987	0.976
<b>Ekim</b>	0.887	0.951	0.954	0.971	0.982	0.979	0.989	0.985	0.986	0.987
<b>Kasım</b>	0.962	0.975	0.962	0.976	0.988	0.988	0.974	0.965	0.987	0.988
<b>Aralık</b>	0.948	0.965	0.960	0.983	0.965	0.852	0.985	0.984	0.987	0.986

**Tablo 5. 7** Samsun istasyonuna ait korelasyon değerleri

SAMSUN	Korelasyon									
	2016		2017		2018		2019		2020	
	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC
<b>Ocak</b>	0.979	0.962	0.920	0.865	0.899	0.961	0.956	0.947	0.957	0.950
<b>Şubat</b>	0.952	0.973	0.929	0.883	0.956	0.976	0.977	0.950	0.945	0.951
<b>Mart</b>	0.900	0.928	0.893	0.975	0.949	0.890	0.958	0.939	0.982	0.944
<b>Nisan</b>	0.889	0.949	0.971	0.976	0.985	0.973	0.952	0.952	0.985	0.983
<b>Mayıs</b>	0.855	0.959	0.913	0.958	0.980	0.967	0.985	0.961	0.935	0.917
<b>Haziran</b>	0.901	0.973	0.866	0.890	0.982	0.992	0.979	0.960	0.972	0.964
<b>Temmuz</b>	0.886	0.924	0.887	0.955	0.968	0.970	0.988	0.978	0.974	0.952

<b>Ağustos</b>	0.850	0.865	0.825	0.944	0.978	0.980	0.991	0.990	0.974	0.922
<b>Eylül</b>	0.791	0.967	0.864	0.961	0.974	0.969	0.968	0.923	0.964	0.964
<b>Ekim</b>	0.850	0.957	0.927	0.971	0.990	0.988	0.985	0.985	0.980	0.963
<b>Kasım</b>	0.854	0.915	0.912	0.962	0.986	0.980	0.983	0.979	0.981	0.978
<b>Aralık</b>	0.958	0.936	0.920	0.964	0.977	0.980	0.982	0.973	0.935	0.978

**Tablo 5. 8** İstanbul istasyonuna ait korelasyon değerleri

İSTANBUL	Korelasyon									
	2016		2017		2018		2019		2020	
	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC
<b>Ocak</b>	0.972	0.979	0.938	0.975	0.823	0.845	0.977	0.971	0.97	0.949
<b>Şubat</b>	0.881	0.947	0.925	0.991	0.962	0.945	0.979	0.943	0.973	0.968
<b>Mart</b>	0.902	0.965	0.950	0.967	0.948	0.900	0.971	0.972	0.966	0.967
<b>Nisan</b>	0.915	0.967	0.924	0.955	0.939	0.954	0.925	0.968	0.958	0.989
<b>Mayıs</b>	0.863	0.959	0.890	0.936	0.975	0.953	0.880	0.927	0.940	0.935
<b>Haziran</b>	0.882	0.960	0.780	0.916	0.957	0.939	0.931	0.951	0.974	0.958
<b>Temmuz</b>	0.934	0.927	0.929	0.958	0.975	0.888	0.964	0.953	0.933	0.921
<b>Ağustos</b>	0.929	0.922	0.927	0.987	0.951	0.942			0.875	0.893
<b>Eylül</b>	0.912	0.872	0.901	0.929	0.956	0.957	0.991	0.861	0.963	0.903
<b>Ekim</b>	0.823	0.897	0.956	0.976	0.966	0.966	0.974	0.965	0.864	0.883
<b>Kasım</b>	0.966	0.971	0.907	0.961	0.941	0.961	0.981	0.951	0.953	0.934
<b>Aralık</b>	0.858	0.963	0.915	0.901	0.903	0.948	0.970	0.940	0.956	0.970

**Tablo 5. 9** Erzurum istasyonuna ait korelasyon değerleri

ERZURUM	Korelasyon									
	2016		2017		2018		2019		2020	
	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC	0 UTC	12 UTC
<b>Ocak</b>	0.946	0.935	0.743	0.767	0.798	0.962	0.934	0.908	0.954	0.978
<b>Şubat</b>	0.888	0.972	0.738	0.918	0.965	0.957	0.978	0.879	0.975	0.987
<b>Mart</b>	0.915	0.936	0.918	0.979	0.969	0.968	0.971	0.967	0.963	0.984
<b>Nisan</b>	0.866	0.934	0.979	0.955	0.989	0.944	0.986	0.907	0.991	0.956
<b>Mayıs</b>	0.820	0.856	0.818	0.942	0.958	0.936	0.963	0.909	0.802	0.922
<b>Haziran</b>	0.867	0.905	0.795	0.924	0.949	0.947	0.949	0.893	0.964	0.937
<b>Temmuz</b>	0.811	0.852	0.691	0.897	0.984	0.926	0.974	0.906	0.984	0.891
<b>Ağustos</b>	0.767	0.875	0.848	0.972	0.978	0.793	0.984	0.949	0.983	0.945
<b>Eylül</b>	0.860	0.922	0.727	0.958	0.960	0.813	0.985	0.956	0.969	0.938
<b>Ekim</b>	0.733	0.890	0.661	0.983	0.909	0.943	0.992	0.985	0.921	0.974
<b>Kasım</b>	0.929	0.962	0.947	0.974	0.963	0.992	0.958	0.992	0.988	0.971
<b>Aralık</b>	0.928	0.912	0.947	0.807	0.941	0.980	0.977	0.947	0.976	0.967

## SONUÇLAR

Son yıllarda yaygın olarak kullanılan PPP tekniği ile yüksek doğrulukla konum bilgisi elde edilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen troposferik bilginin de doğruluğu önem arz etmektedir. Özellikle uydu bazlı tekniklerle yapılan çalışmalarda troposfer yapısının iyi bir şekilde analiz edilmesi ve modellenmesi gerekmektedir.

Çalışmada son yıllarda yaygın olarak kullanılan yüksek doğrulukta konum bilgisi veren PPP tekniği ile troposferik gecikme değerleri türetilmiştir. Bu kapsamda sadece GNSS gözlem verileri kullanılarak, 30 saniye epok aralıklı CORS-TR verileri CSRS-PPP yazılımına gönderilerek ZWD değerleri elde edilmiştir. Hesaplama Mekik ve Deniz (2017)'de detayları verilen Türkiye için geliştirilmiş modeli ( $T_m=48.55+0.80T_s$ ) kullanılmış olup, PWV değerleri elde edilmiştir. Radyosonda-PWV değerleri Wyoming Üniversitesi web sitesinden alınarak PPP-PWV değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde iki yöntemle elde edilen PWV değerlerinin uyum içerisinde olduğu, çoğunlukla benzer trend gösterdiği görülmüştür. PPP-PWV ve Radyosonda-PWV farklarına ilişkin mutlak maksimum, mutlak minimum, ortalama ve RMS gibi temel istatistiki değerleri hesaplanmıştır. Su buharını etkileyen nem değerlerinin denize kıyısı olan istasyonlarda (İstanbul, İzmir, Samsun) daha fazla etkili olduğu görülmüştür. Erzurum istasyonunun PWV değerlerinin 30 mm'ye kadar İstanbul, İzmir ve Samsun istasyonlarının PWV değerlerinin ise 50 mm'ye kadar ulaşıldığı gözlemlenmiştir. İzmir ve İstanbul istasyonlarına ait 00.00 UTC ve 12 UTC zaman dilimleri için PWV değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı zaman 2018 yılı Ağustos ayına ait olup, en düşük PWV değerleri ise sırasıyla Ocak/2017 ve Şubat/2016 aylarına aittir. Samsun ve Erzurum istasyonları için ise PWV değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı zaman ise 2018 yılı Temmuz ayı olup, en düşük PWV değerleri ise 2017 yılı Ocak ayında görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre nemli ve denize kıyısı olan İstanbul, İzmir ve Samsun illerinin yaz ve kış mevsimlerinde hesaplanan PWV değerlerinin arasındaki farkların karasal bir iklim yapısına sahip Erzurum istasyonundaki yaz ve kış mevsimi arasındaki farklardan daha büyük olduğu görülmüştür. İki yöntemle elde edilen farklar dikkate alındığında İzmir istasyonu için değerler -0.086 ile 5.863 mm aralığında, Samsun

istasyonu için -2.532 ile 6.907 mm aralığında değişmektedir. İstanbul ve Erzurum istasyonu için değerler ise sırasıyla -1.043 ile 4.727 mm ve -1.024 ile 4.122 mm aralığında değişmektedir. Ayrıca hava sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde PWV değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri arasındaki korelasyon değerleri incelendiğinde İzmir istasyonuna ait ortalama korelasyon değerlerinin 0.896-0.975 arasında değiştiği, Samsun istasyonuna ait ortalama korelasyon değerlerinin ise 0.889-0.975 arasında değiştiği görülmüştür. İstanbul ve Erzurum istasyonlarının ortalama korelasyon değerleri ise sırasıyla 0.903-0.958 ve 0.817-0.971 arasında değiştiği görülmüştür.

Bu değerlendirmeler sonucunda CSRS-PPP yazılımı ile elde edilen değerlerin gerçek meteorolojik verilerle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı gözlem teknikleriyle elde edilen veri kümeleri arasında daha ileri araştırmalar ve karşılaştırmalar, GNSS'ten türetilen PWV ile radyosondan türetilen PWV arasındaki farkı azaltmak için faydalı olacaktır. Referans olarak alınan radyosonda istasyonlarının da bir hassasiyetinin olduğu göz ardı edilmemelidir. Ayrıca dengeleme aşamasında koordinat kestirimi çıkartılarak daha duyarlı troposferik zenit gecikmesi elde edilebilir.

**KAYNAKÇA**

- Abdel, S., & Younes, M. (2016). Modeling investigation of wet tropospheric delay error and precipitable water vapor content in Egypt. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.05.002>
- Akgül, V. (2017). High-Order Ionospheric Effects on GPS Tropospheric and Coordinate Estimations. Zonguldak: Yüksek Lisans Tezi. <https://doi.org/10.3390/rs12213569>
- Atta, E. (2016). The Impact of Different Tropospheric Models On GPS Baselines in Ghana . : Kwame Nkrumah University.
- Başpınar, S. Başpınar, S.(2012). Cors-Tr Verileriyle İyonosfer Modellerinin İncelenmesi.Doktora Tezi. İstanbul: İstanbul Kültür Üniversitesi.
- Bevis, M., Businger, S., Chris, S., Well, T., Herring, A., Anthes, R., . . . Ware, R. (1994). GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water.
- Bezcioglu, M., Yiğit, C., & Bodur, M. (2019). Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antartika Yarımadası Örneği. Kocaeli: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.467336>
- Chen, B., & Liu, Z. (2016). A Comprehensive Evaluation and Analysis of the Performance of Multiple Tropospheric Models in China Region. Doi: 10.1109/TGRS.2015.2456099
- Chen, P., Ma, Y., Liu, H., & Zheng, N. (2020). A New Global Tropospheric Delay Model Considering the Spatiotemporal Variation Characteristics of ZTD With Altitude Coefficient. Xi'an: College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology; China. <https://doi.org/10.1029/2019EA000888>

- Collins, J., & Langley, R. (1996). A tropospheric delay model for the user of the Wide Area Augmentation System. Fredericton: NB, Kanada için Hazırlanan Nihai Sözleşmesi, New Brunswick Üniversitesi.
- Çolak, M. (2019). GPS Tarihçesi ve Çalışma Prensipleri. Karabük : Karabük Üniversitesi.
- Davis, J., Herring, T., & Shapiro, I. (1985). Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>
- Dodo, J., & Idowu, T. (2010). Regional Assessment of the GPS Tropospheric Delay Models on the African GNSS Network. Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS).
- Dousa, J., & Michal, E. (2014). An improved model for calculating tropospheric wet delay. <https://doi.org/10.1002/2014GL060271>
- Erdem, R. (2011). Orman Mühendisliğinde Gps (Küresel Yer Belirleme Sistemi) Ölçmeleri. İstanbul: Yüksek Lisans Tezi: İstanbul Üniversitesi.
- Erdönmez, O. (2008). Troposferik Gecikmelerin GPS Ölçülerine Olan Etkilerinin Araştırılması. İstanbul.
- Erkan, Y. (2008). Troposferik Gecikme Modellerinin GPS Nokta Konumlarına Etkisi. Zonguldak: Yüksek Lisans Tezi.
- Farah, A. (2015). Accuracy Assessment Study of UNB3M Neutral Atmosphere Model For Global Tropospheric Delay Mitigation. Egypt: Aswan University. doi:10.1515/arsa-2015-0016
- Gökdaş, Ö. (2014). GPS Meteorolojisi: İstanbul İçin Bir Uygulama. İstanbul: Yüksek Lisans Tezi: İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Gratton P., Banville S., Lachapelle G., O'Keefe K., (2021) Kinematic Zenith Tropospheric Delay Estimation with GNSS PPP in Mountainous Areas  
<https://doi.org/10.3390/s21175709>
- Guo, Q., & Wu., X. (2019). A global assessment of ray-traced and blind tropospheric models in the retrieval of tropospheric parameters from ground-based GPS observations. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.009>
- Gürbüz, G. (2015). GNSS ve Radyosonda'dan Elde Edilen Yoğuşabilir Su Buharı Miktarlarının Karşılaştırılması. Zonguldak: Yüksek Lisans Tezi ; Bülent Ecevit Üniversitesi.
- Gürbüz, G., Görmüş , K., & Altan, U. (2020). Atmosferdeki Partikül Madde (PM10) Miktarındaki Değişimin GNSS ile Kestirilen Islak Zenit Gecikmesi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. Zonguldak: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.705455>
- Gürbüz, G., Mekik, Ç., Deniz, İ., & Rozsa, S. (2014). Radyosonda ve GPS Verileri ile Elde Edilen Yoğuşabilir Su Buharı. Zonguldak,: Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 67100 .
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). GNSS – Global Navigation Satellite Systems (GPS, GLONASS, Galileo, and more). Austria: SpringerWienNewYork.
- Hopfield, H. (1969). Two Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data. *Journal of Geophysical Research* 74(18):4487-4499. <https://doi.org/10.1029/JC074i018p04487>
- Jing, W., Yao, Z., & Li, S. (2008). Evaluation of the Precision of Three Tropospheric Delay Correction Models. CHINESE. <https://doi.org/10.1016/j.chinastron.2008.10.010>

- Kahveci, M. (1997). Türkiye Koşullarında Yapılan Gps Gözlemlerinde Ortam Etkilerinin Araştırılması:Doktora Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kof, B. (2020). Effects Of The Troposphere Delay Mapping Functions And The Elevation Cut Off Angles On The Time Series Of Station And Radio Source Coordinates As Well As Earth Orientation Parameters As Estimated From The Observations Of The Vlb1 Technique.
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., & Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. <https://doi.org/10.1002/grl.50288>
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions.
- Leandro, R., Santos, M., & Langley, R. (2006). UNB neutral atmosphere models, development and performance. Institute of Navigation, Monterey, California, USA,.
- Li, Z., Muller, J., & Cross, P. (2003). Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements. <https://doi.org/10.1029/2003JD003372>
- Lima, T., Santos, M., Alves, D., Nikolaidou, T., & Gouveia, T. (2022). Assessing ZWD models in delay and height domains using data from stations in different climate regions.
- Lin, X., Wang, H., Zhang, Q., Yao, C., Chen, C., Cheng, L., & Li, Z. (2022). A Spatiotemporal Network Model for Global Ionospheric TEC Forecasting. <https://doi.org/10.3390/rs14071717>
- Liu, J., Chen, X., Sun, J., & Liu, Q. (2017). An analysis of GPT2/GPT2w+Saastamoinen models for estimating zenith tropospheric delay over Asian area. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.09.019>

- Liu, Y., Wang, R., Gao, J., & Zhu, P. (2020). The Impact of Different Mapping Function Models and Meteorological Parameter Calculation Methods on the Calculation Results of Single-Frequency Precise Point Positioning with Increased Tropospheric Gradient.
- Liu, Z., Wong, M., Nichol, J., & Chan, P. (2013). A multi-sensor study of water vapour from radiosonde MODIS and AERONET: A case study of Hong Kong. *Int. J. Climatol.*, vol. 33, no. 1, pp. 109-120, Jan. DOI:10.1002/joc.3412
- Mao, J., Wang, Q., Liang, Y., & Tiejun, C. (2021). A new simplified zenith tropospheric delay model for real-time GNSS applications. *GPS Solutions*.
- Mekik, Ç. (1999). GPS te Atmosferin Etkileri. *HKMO Dergisi*.
- Mekik, Ç., & Deniz, İ. (2017). Modelling and validation of the weighted mean temperature for Turkey. <https://doi.org/10.1002/met.1608>
- Mendes, V. (1999). Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. Canada: University of New Brunswick.
- Mutlu, İ. (2019). GNSS Uydu Dağılımının Statik GNSS Ölçülerinde ve Gerçek Zamanlı Konum Belirlemedeki Önemi. Konya: Konya Teknik Üniversitesi; Harita Mühendisliği.
- Niell, A. (1996). Global Mapping Functions For The Atmospheric Delay at Radio Wavelengths. <https://doi.org/10.1029/95JB03048>
- Niell, A. (2000). Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. *Planets Space*, 52, 699–702.
- Nistor, S. (2020). The impact of tropospheric mapping function on PPP determination for one month period, University of Oradea.

- Özlüdemir, M.T (2004). The Stochastic Modeling of GPS Observations. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Özlüdemir, M.T. (2002). Sinyal Kalitesine Dayalı Stokastik Modellerin GPS İle Konum Belirleme Üzerindeki Etkilerine İlişkin Bir İnceleme:Doktora Tezi: İstanbul Teknik Üniversitesi,İstanbul. İstanbul: Doktora Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Özüğür, İ., & Yurt, K. (2019). Ticari GPS Yazılımlarında Kullanılan Troposfer Modellerinin Karşılaştırılması. Aksaray: Yüksek Lisans Tezi ; Aksaray Üniversitesi.
- Pang, S., Yeh, T., Honh, J., & Chen, C. (2021). Variability and climatology of precipitable water vapor from 12-year GPS observations in Taiwan. Chine,Wuhan.
- Penna, N., Dodson, A., & Chen, W. (2001). Assessment of EGNOS Tropospheric Correction of Model. (IESSG, University of Nottingham. <https://doi.org/10.1017/S0373463300001107>
- Putri, N., Landskron, D., & Böhm, J. (2020). Assessing the performance of Vienna Mapping Functions 3 for GNSS stations in Indonesia using Precise Point Positioning. Austria: Technische Universität Wien. 10.5194/adgeo-50-77-2020
- Razin, M., & Voosoghi, B. (2022). Modeling of precipitable water vapor from GPS observations using machine learning and tomography methods. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.01.003>
- Sanlioglu, İ., & Zeybek, M. (2012). Investigation on GPS Heighting Accuracy with Use of Tropospheric Models in Commercial GPS Software for Different Heights. Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage.

Schuler, T. (2014). The TropGrid2 standard tropospheric correction model, GPS solutions.

Selbesoğlu, M. (2017). Global Navigasyon Uydu Sistemleri (Gnss) Gzlemlerinden Elde Edilen Islak Troposfer Gecikmesinin Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi. İstanbul: Doktora Tezi.

Senturk, E., & Cepni, M. (2018). Ionospheric temporal variations over the region of Turkey: a study based on long-time TEC observations.

Tuka, A., & El-Mowafy, A. (2013). Performance evaluation of different troposphere delay models and mapping functions.

Tunalı, E. (2016). Hassas Konum Belirlemede (PPP) Farklı Atmosfer Modelleri Kullanarak Troposfer Kaynaklı Gecikmelerin Karşılaştırılması. Hacettepe Üniversitesi. Doi:10.5578/fmbd.66259

Tunalı, E. (2018). PPP ve IGS Gerçek Zaman Servisi ile Su Buharı Hareketlerinin İzlenmesi. Afyon: Afyon Kocatepe Üniversitesi.

URL-1. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00962>. (Erişim tarihi: 30.03.2022)

URL-2. <https://www.ecmwf.int/en/about/what-we-do> adresinden alındı (Erişim tarihi: 25.03.2022)

URL-3. [https://www.researchgate.net/figure/1-Hopfield-single-layer-polytropic-model-atmosphere\\_fig7\\_34767912](https://www.researchgate.net/figure/1-Hopfield-single-layer-polytropic-model-atmosphere_fig7_34767912). (Erişim tarihi: 20.03.2022)

URL-4. <https://www.ecmwf.int/en/about/what-we-do>. (Erişim tarihi: 15.03.2022)

URL-5. [www.mgm.gov.tr](http://www.mgm.gov.tr). (Erişim tarihi: 15.03.2022)

URL-6. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. (Erişim tarihi: 23.03.2021)

- URL-7. <https://webapp.csrscs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.  
(Erişim tarihi: 14.03.2022)
- URL-8. <http://weather.gladstonefamily.net/site/search?site=17062&Get+>. (Erişim tarihi: 18.04.2022)
- URL-9. <https://www.weather.gov/jetstream/radiosondes>. (Erişim tarihi: 10.05.2022)
- Vey,, S., Dietrich, R., Fritsche, M., Rothacher, M., & Steigenberger, P. (2006). Influence of mapping function parameters on global GPS network analyses: Comparisons between NMF and IMF.
- Xia, P., Xia, J., Ye, S., & Xu, C. (2020). A New Method for Estimating Tropospheric Zenith. Wuhan University,China.doi: 10.6038/cjg2021O0322
- Xu , C., Yao, Y., Shi, J., Zhang, Q., & Peng, W. (2020). Development of Global Tropospheric Empirical. Wuhan: Wuhan University,China.
- Yang, F., Guo, J., Zhang, C., Li, Y., & Li, J. (2021). A Regional Zenith Tropospheric Delay (ZTD) Model Based on GPT3 and ANN. Beijing;Wuhan;Columbus: China University of Mining and Technology;Wuhan University;The Ohio State University;State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research.
- Yılmaz, S. (2013). GNSS Verilerinden Hesaplanan Elipsoid Yüksekliklerinin Atmosferik Verilerle İyileştirilmesi. Konya: Doktora Tezi Selçuk Üniversitesi.
- Zus, F., Dick, G., Dousa, J., & Wickert, J. (2014). Systematic errors of mapping functions which are based on the VMF1 concept.