

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ORTA ENLEM KUŞAĞINDA GNSS RADYO OKÜLTASYON
TEKNİĞİ İLE YAĞIŞA DÖNÜŞEBİLİR SU BUHARI DEĞİŞİMLERİNİN
İZLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Seldanur ÇELİK TUNÇER

MART 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ORTA ENLEM KUŞAĞINDA GNSS RADYO OKÜLTASYON
TEKNİĞİ İLE YAĞIŞA DÖNÜŞEBİLİR SU BUHARI DEĞİŞİMLERİNİN
İZLENMESİ**

Seldanur ÇELİK TUNÇER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (HARİTA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 / 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 28 / 03 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Orta Enlem Kuşağında GNSS Radyo Okültasyon Tekniği ile Yağışa Dönüştürülebilir Su Buharı Değişimlerinin İzlenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI’ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Mualla YALÇINKAYA ve Sayın Prof. Dr. Yücel ÖZMEN’e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında yapılan çalışmalar “123Y150 Türkiye Geneline ve Ekstrem Hidrolojik Hava Olaylarına Bağlı Afet Riski Taşıyan Karadeniz Bölgesinde GNSS-Radyo Okültasyon (GNSS-RO) Uydu Tekniği Kullanılarak Yağışa Dönüştürülebilir Su Buharı (PWV) Profillerinin Tahmini ve İzlenmesi” (2023-2026) TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projenin yürütücü kurumu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü’ne ve projeyi destekleyen TÜBİTAK’a teşekkür ederim. Proje yürütücüsü ve tez danışman hocama, proje araştırmacıları değerli hocalarıma ve proje yurtdışı danışmanımıza proje süresince yapıcı ve yol gösterici eleştirileri ve değerli katkıları için, projede birlikte çalıştığım tüm bursiyer arkadaşlarıma işbirlikleri ve katkıları için gönülden teşekkür ederim. GNSS-RO meteorolojik verilerinin temin edilmesi aşamasında Python tabanlı veri indirme arayüzü geliştirilmesinde destek sağlayan Arş. Gör. Ahmet YAVUZDOĞAN’a teşekkür ederim.

Tez çalışma sürecimde bana manevi destek veren değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Hilal ALEMDAĞ ve Arş. Gör. Merve OCAK’a teşekkür ederim. Tez çalışmamın getirdiği yoğun iş yükü ve sorumluluk sürecinde anlayışı, saygı ve sevgisiyle her zaman yanımda olan eşim Öğr. Gör. Uğur TUNÇER’e teşekkür ederim. Son olarak, bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan canım aileme teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Seldanur ÇELİK TUNÇER

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Orta Enlem Kuşağında GNSS Radyo Okültasyon Tekniği ile Yağışa Dönüştürülebilir Su Buharı Değişimlerinin İzlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, analizleri kendim yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/03/2025

Seldanur ÇELİK TUNÇER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Problemin Tanımı ve Motivasyon.....	6
1.3. Çalışmanın Amacı	9
1.4. Literatür Taraması	10
1.5. Atmosferin Yapısı	23
1.6. GNSS-Radyo Okültasyon (RO) Tekniği.....	25
1.6.1. GNSS-RO Uygulama Alanları ve Ölçüm Özellikleri	27
1.6.2. GNSS-RO Tekniğinde Atmosferik Bükülme ve Kırılma	30
1.7. GNSS-RO Veri İşleme Süreci.....	36
1.7.1. Verilerin Kalibrasyonu ve Çıkarımı.....	37
1.7.2. Bükülme Açısının Türetilmesi	39
1.7.3. İyonosferik Düzeltme.....	40
1.7.4. İyonosferik Parametrelerin Türetilmesi	41
1.7.5. Atmosferik Parametrelerin Türetilmesi	41
1.8. Atmosferdeki Su Buharı ve Ölçüm Teknikleri.....	45
1.9. Yer Tabanlı Atmosferik Su Buharı Ölçümleri	46
1.9.1. Yer Tabanlı GNSS Meteorolojisi.....	47
1.9.2. Radyosonda	52
1.9.3. Mikrodalga Radyometrisi	54
1.10. Uzay Tabanlı Atmosferik Su Buharı Ölçümleri.....	56
1.10.1. GNSS-RO Meteorolojisi	57

1.10.2. Orta Çözünürlük Spektrometre Görüntüleme Uydu Sensörü	59
1.11. Sayısal Hava Tahminleri ile Su Buharı Ölçümleri	60
1.11.1. Global Sayısal Hava Tahmin Modelleri.....	61
1.11.2. Sınırlı Alan Sayısal Hava Tahmin Modelleri.....	62
1.11.3. Türkiye’de Kullanılan Sayısal Hava Tahmin Modelleri.....	62
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	66
2.1. Çalışma Alanlarının Belirlenmesi	66
2.2. Veri Temini	68
2.3. Türkiye İçin LEO Uydu ve RO Dağılımlarının Belirlenmesi	71
2.3.1. FORMOSAT 7/COSMIC-2 Uydu Misyonu	71
2.3.2. GRACE Uydu Misyonu	79
2.3.3. CHAMP Uydu Misyonu	80
2.3.4. METOP Uydu Misyonu	82
2.3.5. TERRASAR-X ve TANDEM-X Uydu Misyonları	87
2.4. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO Atmosferik Profillerinin Radyosonda Profilleri ile Karşılaştırılması	90
2.4.1. Sıcaklık Profillerinin Karşılaştırılması.....	92
2.4.2. Su Buharı Basıncı Profillerinin Karşılaştırılması.....	94
2.4.3. Özgül Nem Profillerinin Karşılaştırılması	96
2.4.4. Kırıcılık Profillerinin Karşılaştırılması	98
2.5. GNSS-RO Atmosferik Profillerden PWV Hesabı.....	100
2.6. Radyosonda Atmosferik Profillerinden PWV Hesabı.....	104
2.7. ECMWF ERA5 Atmosferik Profillerinden PWV Hesabı.....	105
2.8. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ECMWF ERA5 Yeniden Analiz Atmosferik Profillerinden Üretilen PWV Değerlerinin Karşılaştırılması.....	106
2.8.1. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ECMWF ERA5 PWV Değerlerinin Günlük Olarak Karşılaştırılması	106
2.8.2. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ECMWF ERA5 PWV Değerlerinin Zaman Serilerinin Karşılaştırılması	116
2.9. GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X GNSS-RO Atmosferik Profillerinden Üretilen PWV Değerlerinin Karşılaştırılması	125
2.10. Karadeniz Bölgesinde Ekstrem Hidrolojik Hava Olaylarının Olduğu Dönemlerde Üretilen GNSS-RO PWV Değerlerinin Radyosonda ERA- İnterim, Yer Tabanlı GNSS Meteorolojisi ile Karşılaştırılması.....	127
3. BULGULAR VE İRDELEME	131

3.1. Türkiye Radyosonda İstasyonları Çevresinde Farklı LEO Uydularınca Gözlenen RO Dağılımlarına İlişkin Bulgular.....	131
3.2. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO ve Radyosonda Atmosferik Profil Karşılaştırma Bulguları	136
3.3. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ERA5 Dikey Atmosferik Profil Karşılaştırma Bulguları	137
3.4. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ERA5 PWV Zaman Serilerinin Karşılaştırma Bulguları	139
3.5. GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X GNSS-RO PWV Değerlerinin Karşılaştırılma Bulguları	145
3.6. Karadeniz Bölgesinde Ekstrem Hidrolojik Hava Olaylarının Olduğu Dönemlerde Üretilen GNSS-RO PWV Değerlerinin Radyosonda, ERA-İnterim, Yer Tabanlı GNSS Meteorolojisi PWV ile Karşılaştırılma Bulguları	145
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	147
5. KAYNAKLAR	150
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

ORTA ENLEM KUŞAĞINDA GNSS RADYO OKÜLTASYON TEKNİĞİ İLE YAĞIŞA DÖNÜŞEBİLİR SU BUHARI DEĞİŞİMLERİNİN İZLENMESİ

Seldanur ÇELİK TUNÇER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI
2025, 162 Sayfa

Dünya'nın iklim sistemindeki değişimlerini analiz etmek, troposfer ve stratosferdeki sıcaklık yapısının ve su buharı yoğunluğunun uzun vadeli gözlemleri ile mümkün olmaktadır. Son yıllarda, Küresel Navigasyon Uydu Sistemi-Radyo Okültasyon (GNSS-RO) tekniği, meteoroloji ve iklim değişikliği araştırmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. GNSS-RO tekniği ile Yağışa Dönüşebilir Su Buharı (PWV) hesabı, iklimsel su buharı analizlerinde yeni kullanılmaya başlanılan bir yöntem olup ülkemizde ise bu alanda henüz bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, orta enlem kuşağında yer alan Türkiye'de ilk kez ve İtalya'da (Trapani/Birgi) GNSS-RO tekniği kullanılarak PWV kestirimi yapan bir yazılım geliştirilmiştir. Bu amaçla, radyosonda istasyonlarının bulunduğu bölgelerde GNSS-RO atmosferik profilleri ile PWV değerleri analiz edilmiş; IGRA profilleri ve ECMWF ERA5 ürünleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. GNSS-RO, Radyosonda ve ERA5 PWV arasındaki ilişki; mutlak hata, karesel ortalama hata, bağıl hata, regresyon, pearson korelasyon ve R^2 belirleyicilik katsayısı ile irdelenmiştir. Ayrıca, GNSS-RO PWV değerleri, Karadeniz Bölgesinde ekstrem hidrolojik afetlerin olduğu dönemlerde üretilen PWV değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda, genellikle iyi bir uyum gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: GNSS-RO, Radyosonda, ECMWF ERA5, PWV

PhD. Thesis

SUMMARY

MONITORING VARIATIONS IN PRECIPITABLE WATER VAPOR IN THE MID-LATITUDE ZONE USING THE GNSS RADIO OCCULTATION TECHNIQUE

Seldanur ÇELİK TUNÇER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geomatics Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI
2025, 162 Pages

Analyzing changes in the Earth's climate system is made possible by long-term observations of the temperature structure and water vapor concentration in the troposphere and stratosphere. In recent years, the Global Navigation Satellite System-Radio Occultation (GNSS-RO) technique has been widely preferred in meteorology and climate change research. PWV calculation with GNSS-RO technique is a method that has recently started to be used in climatic water vapor analysis and there is no study in this field in our country yet. In this study, for the first time in Türkiye, which is located in the mid-latitude zone, and in Italy (Trapani/Birgi), a software that estimates PWV using GNSS-RO technique has been developed. For this purpose, GNSS-RO atmospheric profiles and PWV values were analyzed in the regions where radiosonde stations are located and comparisons were made with IGRA profiles and ECMWF ERA5 products. The relationship between GNSS-RO, Radiosonde, and ERA5 PWV was analyzed with absolute error, squared mean error, relative error, regression, pearson correlation and R^2 coefficient. In addition, GNSS-RO PWV values were compared with PWV values produced during periods of extreme hydrological disasters in the Black Sea region. Generally, a good agreement is observed in results.

Key Words: GNSS-RO, Radiosonde, ECMWF ERA5, PWV

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Su döngüsü	2
Şekil 2. Atmosferin gaz bileşenleri	23
Şekil 3. Atmosferin katmanları	24
Şekil 4. GNSS-RO atmosferik sondaj şeması ve kendi kendine kalibrasyon özelliği	30
Şekil 5. Atmosferin farklı katmanlarından geçen GNSS radyo sinyallerinin bükülme olayı	31
Şekil 6. Yükselen (rising) ve alçalan (setting) okültasyonlar	32
Şekil 7. GNSS-RO geometrisi	33
Şekil 8. Küresel simetriye sahip bir ortamda Bouguer formülünü sağlayan bir ışın yolu	35
Şekil 9. GNSS-RO ölçümlerinden iyonosferik ve atmosferik parametrelerin türetilmesi	37
Şekil 10. Atmosferdeki su buharı (H ₂ O) dağılımı	45
Şekil 11. GNSS sinyalinin atmosferik kırılma olmadığı varsayıldığında izlediği düz (G) yol ile kırılma etkisi altındaki gerçek (S) yol	47
Şekil 12. GNSS sinyal gecikmesi	48
Şekil 13. GNSS çift fark gözlem geometrisi.....	49
Şekil 14. Radyosonda uçuş takımı	52
Şekil 15. IGRA istasyonları	53
Şekil 16. Mikrodalga radyometre cihazı	55
Şekil 17. NWP süreci	60
Şekil 18. Türkiye'deki RS konumları ve WMO numaraları.....	66
Şekil 19. ECMWF ERA5 yeniden analiz verilerinin RS konumlarına göre sınırlandırılması	67
Şekil 20. Radyosonda veri temini	68
Şekil 21. Python tabanlı GNSS-RO veri indirme programı arayüzü	69
Şekil 22. GNSS-RO veri indirme programı iş akış diyagramı.....	70
Şekil 23. ECMWF ERA5 yeniden analiz ürünleri veri temini	71
Şekil 24. Ekim 2019'da FORMOSAT-7/COSMIC-2 coğrafi kapsamı	72
Şekil 25. FORMOSAT-7/COSMIC-2 uydu takımyıldızı	73
Şekil 26. FORMOSAT-7/COSMIC-2 yer istasyonları	74

Şekil 27.	Türkiye RS konumlarına göre gözlenen COSMIC-2 RO dağılımı	78
Şekil 28.	Türkiye RS konumlarına göre gözlenen GRACE RO dağılımı.....	80
Şekil 29.	Türkiye RS konumlarına göre gözlenen CHAMP RO dağılımı.....	82
Şekil 30.	Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-A RO dağılımı.....	84
Şekil 31.	Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-B RO dağılımı.....	85
Şekil 32.	Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-C RO dağılımı.....	86
Şekil 33.	Türkiye RS konumlarına göre gözlenen TerraSAR-X RO dağılımı	88
Şekil 34.	Türkiye RS konumlarına göre gözlenen TanDEM-X RO dağılımı.....	89
Şekil 35.	Atmosferik profillerin karşılaştırılması için seçilen RS ve COSMIC-2 RO konumları	90
Şekil 36.	Radyosonda ve COSMIC-2 RO sıcaklık profillerinin karşılaştırılması	92
Şekil 37.	Radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profillerinin karşılaştırılması.....	95
Şekil 38.	Radyosonda ve COSMIC-2 RO özgül nem profillerinin karşılaştırılması.....	96
Şekil 39.	Radyosonda ve COSMIC-2 RO kırıcılık profillerinin karşılaştırılması	98
Şekil 40.	GNSS-RO PWV kestirimi için hazırlanan yazılım algoritması	101
Şekil 41.	GNSS-RO PWV kestirimi için hazırlanan sınırlandırma kriteri algoritması	103
Şekil 42.	Radyosonda PWV kestirimi için hazırlanan yazılım algoritması.....	104
Şekil 43.	ECMWF ERA5 PWV kestirimi için hazırlanan yazılım algoritması.....	105
Şekil 44.	1000 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen COSMIC-2 RO ve RS konumları.....	107
Şekil 45.	1000 hPa ve üzeri COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması	108
Şekil 46.	925 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen COSMIC-2 RO ve RS konumları.....	110
Şekil 47.	925 hPa ve üzeri COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması	111
Şekil 48.	850 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen COSMIC-2 RO ve RS konumları.....	113
Şekil 49.	850 hPa ve üzeri COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması	114
Şekil 50.	FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serilerinin karşılaştırılması iş-akış şeması	117
Şekil 51.	COSMIC-2 RO wetpf2 ıslak profillerinden (a) basınç değerleri (b) özgül nem değerleri	118

Şekil 52.	COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 (a) PWV dağılımlarının karşılaştırılması (b) PWV farklarının karşılaştırılması.....	120
Şekil 53.	COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV farklarının histogramları	122
Şekil 54.	Basit doğrusal regresyon iş akış şeması.....	125
Şekil 55.	GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımlarının karşılaştırılması	126
Şekil 56.	Kasım –Aralık 2017 Samsun çevresi ekstrem hava olaylarında SAME istasyonu için Radyosonda, ERA-Interim, GNSS-Meteoroloji ve GRACE, MetOp-A, MetOp-B, TerraSAR-X, TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımları.....	128
Şekil 57.	Aralık 2017 Samsun çevresi ekstrem hava olaylarında SOMU istasyonu için Radyosonda, ERA-Interim, GNSS-Meteoroloji ve MetOp-A, MetOp-B, TerraSAR-X, TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımları	128
Şekil 58.	Aralık 2017 Trabzon çevresi (Giresun) ekstrem hava olaylarında TRAB istasyonu için GNSS-Meteoroloji, ERA-Interim ve MetOp-A, MetOp-B, TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımları.....	129
Şekil 59.	Trabzon çevresi (Giresun) ekstrem hava olaylarında MACK istasyonu için GNSS Meteorolojisi, ERA-Interim ve GRACE, MetOp-A, MetOp-B, TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımları.....	130
Şekil 60.	Türkiye’deki RS’ler çevresinde her bir LEO uydusuna ilişkin toplam RO olaylarının yüzde dağılımları	134
Şekil 61.	Samsun RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği	140
Şekil 62.	İstanbul RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği	141
Şekil 63.	İzmir RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği	142
Şekil 64.	Adana RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği	143
Şekil 65.	Isparta RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği	144

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. GNSS-RO tekniğı ile PWV ve diğ er meteorolojik parametrelerin tahmini hakkında literatür araştırma özeti	11
Tablo 2. GNSS-RO gözlemi sağlayan LEO uyduları	27
Tablo 3. GNSS-RO yöntemi özellikleri.....	29
Tablo 4. GNSS-RO veri işleme merkezleri	57
Tablo 5. UCAR CDAAC RO ürünleri.....	58
Tablo 6. NOAA radyosonda veri tabanına göre RS konumları ve her bir RS için belirlenen GNSS-RO enlem ve boylam aralıkları	67
Tablo 7. FORMOSAT-7/COSMIC-2 uydu takımıyıldızı yörünge bilgileri	74
Tablo 8. FORMOSAT-7/COSMIC-2 mevcut ürünleri	76
Tablo 9. FORMOSAT-7/COSMIC-2 level-2 wetPf2 ıslak profiller için veri formatı.....	77
Tablo 10. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen COSMIC-2 RO sayıları.....	78
Tablo 11. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen GRACE RO sayıları	80
Tablo 12. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen CHAMP RO sayıları	81
Tablo 13. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-A RO sayıları.....	84
Tablo 14. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-B RO sayıları	85
Tablo 15. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-C RO sayıları	86
Tablo 16. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen TerraSAR-X RO sayıları.....	88
Tablo 17. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen TanDEM-X RO sayıları	89
Tablo 18. Atmosferik profillerin karşılaştırılması için seçilen RS ve COSMIC-2 RO konumları	91
Tablo 19. Radyosonda ve COSMIC-2 RO sıcaklık profillerinin 5-10 km arasındaki hataları.....	94
Tablo 20. Radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profillerinin 5-10 km arasındaki hataları.....	96
Tablo 21. Radyosonda ve COSMIC-2 RO özgül nem profillerinin 5-10 km arasındaki hataları.....	98
Tablo 22. Radyosonda ve COSMIC-2 RO kırıcılık profillerinin 5-10 km arasındaki hataları.....	100
Tablo 23. 1000 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen istasyonlar	107

Tablo 24.	1000 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için MOH ve KOH değerlerinin karşılaştırılması	109
Tablo 25.	1000 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için BH değerlerinin karşılaştırılması	109
Tablo 26.	925 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen istasyonlar	110
Tablo 27.	925 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için MOH ve KOH değerlerinin karşılaştırılması	112
Tablo 28.	925 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için BH değerlerinin karşılaştırılması	112
Tablo 29.	850 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen istasyonlar	113
Tablo 30.	850 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için MOH ve KOH değerlerinin karşılaştırılması	115
Tablo 31.	850 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için BH değerlerinin karşılaştırılması	115
Tablo 32.	Samsun ve çevresi 2017 ekstrem hava olayları	127
Tablo 33.	Trabzon ve çevresi 2017 ekstrem hava olayları	129
Tablo 34.	Türkiye'deki RS'ler çevresinde her bir LEO uydusuna ilişkin toplam RO olayları	134
Tablo 35.	FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serisi farklarının anlamlılık test bulguları	139
Tablo 36.	Samsun RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları	141
Tablo 37.	İstanbul RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları	142
Tablo 38.	İzmir RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları	143
Tablo 39.	Adana RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları	144
Tablo 40.	Isparta RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları	145

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1D-Var	: One-Dimensional Variational Method-Tek Boyutlu Varyasyonel Analiz
ABL	: Atmospheric Boundary Layer-Atmosferik Sınır Tabaka
AIRS	: Atmospheric Infrared Sounder-Atmosferik Kızılötesi Sensör
BH	: Bağlı Hata
C3S	: Copernicus Climate Change Service-Copernicus İklim Değişikliği Servisi
CALIOP	: Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
CDS	: Copernicus Climate Data Store-Copernicus İklim Veri Deposu
CWB	: Central Weather Bureau-Merkezi Meteoroloji Bürosu
DLR	: Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt-Alman Hava ve Uzay Merkezi
ECMWF	: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-Avrupa Orta Vadeli Hava Durumu Tahmini
EOS	: Earth Observing System-Dünya Gözlem Sistemi
GCOS	: Global Climate Observing System-Küresel İklim Gözlem Sistemi
GFZ	: Geo Forschungs Zentrum-Alman Yer Bilimleri Araştırma Merkezi
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems-Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri
GNSS-RO	: GNSS-Radio Occultation-GNSS Radyo Okültasyon
GTS	: Global Telecommunication System-Global Telekomünikasyon Sistemi
IASI	: Kızılötesi Atmosferik Sondaj Interferometresi
IFS	: Integrated Forecasting System-Entegre Tahmin Sistemi
IGRA	: Integrated Global Radiosonde Archive-Entegre Küresel Radyosonda Arşivi
IGS	: Uluslararası GNSS Servisi
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change-Uluslararası İklim Değişikliği Paneli
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
KOH	: Karesel Ortalama Hata
LEO	: Low Earth Orbit-Alçak Yer Yörünge
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MHO	: Mutlak Hata Ortalaması
MM5	: Fifth-Generation Mesoscale Model-Beşinci Nesil Mezoskala Model

MODIS	:Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer- Orta çözünürlük spektrometre görüntüleme
MWR	: Microwave Radiometer-Mikrodalga Radyometri
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NCAR	: National Center for Atmospheric Research-Ulusal Atmosfer Araştırma Merkezi
NOAA	: Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi
NSPO	: National Space Organization-Ulusal Uzay Organizasyonu
NWP	: Numerical Weather Prediction-Sayısal Hava Tahmini
PBLH	: Planetary Boundary Layer Height-Gezegensel Sınır Tabaka Yükseklik
POD	: Precise Orbit Determination-Hassas Yörünge Belirleme
PPP	: Precise Point Positioning-Hassas Nokta Konumlama
PWV	: Precipitable Water Vapour-Yoğuşabilir Su Buharı
RS	: Radiosonde Station-Radyosonda İstasyonu
SABER	: Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry
SNR	: Signal Noise Ratio-Sinyal Gürültü Oranı
TEC	: Total Electron Content-Toplam Elektron İçeriği
TİD	: Temel İklim Değişkenleri
TPH	: Tropopause Height-Tropopoz Yüksekliği
UCAR	: Atmosfer Araştırmaları için Üniversite Konsorsiyumu
UTLS	: Upper Troposphere and Lower Stratosphere-Üst troposfer ve Alt stratosfer
WEGC	: Wegener Center for Climate and Global Change-Wegener İklim ve Küresel Değişim Merkezi
WMO	: World Meteorological Organization-Dünya Meteoroloji Örgütü
WRF	: Weather Research and Forecasting Model-Hava Araştırma ve Tahmin Modeli
ZHD	: Zenith Hydrostatic Delay-Zenit Hidrostatik Gecikme
ZTD	: Zenith Tropospheric Delay-Zenit Troposferik Gecikme
ZWD	: Zenith Wet Delay-Zenit Islak Gecikme
α	: Bükülme açısı
α_{L1}	: L_1 sinyallerinin iyonosfer kaynaklı bükülme açısı
α_{L2}	: L_2 sinyallerinin iyonosfer kaynaklı bükülme açısı
$\bar{\alpha}_{L1}$	: L_1 sinyalinin yumuşatma işlemine tabi tutulmuş versiyonu
$\bar{\alpha}_{L2}$	: L_2 sinyalinin yumuşatma işlemine tabi tutulmuş versiyonu

a	: Etki parametresi
c	: Işık hızı
r	: Işın yolunun eğrilik merkezine olan mesafesi
r_t	: Teğet yarıçapı
r_{top}	: Atmosferin üst sınırındaki yarıçap
$\vec{r}$	: Işın üzerindeki bir noktanın konum vektörü
n	: Kırılma indisini
N	: Kırıcılık (Refractivity)
$\vec{\nabla}n$	: Kırılma indisi gradyanı
ds	: Işın yolu boyunca alınan diferansiyel uzunluk
$n\vec{s}$	: Kırılma indisiyle ölçeklenmiş yön vektörü
ϕ	: Konum vektörü ile ışın yolunun teğeti arasındaki açı
V	: Verici (GNSS)
A	: Alıcı (LEO)
C^V	: Verici saat hatası
C^A	: Alıcı saat hatası
$\vec{V}_V$	: Verici hız vektörü
$\vec{V}_A$	: Alıcı hız vektörü
ϕ_V	: Verici uydu konumu ile sinyal yönü arasındaki açı
ϕ_A	: Alıcı uydu konumu ile sinyal yönü arasındaki açı
r_V	: Vericinin yerel eğrilik merkezine olan uzaklığı
r_A	: Alıcının yerel eğrilik merkezine olan uzaklığı
$\vec{k}_V$	: Vericideki sinyal yönünü temsil eden birim vektör
$\vec{k}_A$	: Alıcıdaki sinyal yönünü temsil eden birim vektör
L_k^{VA}	: Vericiden alıcıya ölçülen mesafe
ϕ_k^{VA}	: Verici ile alıcı arasındaki faz ölçümü
ρ^{VA}	: Verici ile alıcı arasındaki geometrik mesafe
k	: L_1 ve L_2 taşıyıcı frekansları
Δ_k^{VA}	: Atmosferik faz gecikmesi
Δ_k^{VA}	: İyonosfer ve nötr atmosfer kaynaklı oluşan toplam fazla faz gecikmesi
TEC_k^{VA}	: İyonosferdeki toplam elektron yoğunluğunu

ε_k	: Ölçüm hataları
θ	: Verici ve alıcı vektörleri arasındaki açı
N_e	: Elektron yoğunluğu
$O(f^2)$	: İyonosferin doğrusal olmayan etkileri
P	: Basınç
P_s	: Toplam yüzey basıncı
P_w	: Kısmi su buharı basıncı
T	: Sıcaklık
T_d	: Çiğ sıcaklık
T_m	: Ağırlıklı ortalama sıcaklık
R	: Evrensel gaz sabiti
R_v	: Su buharı için özel gaz sabiti
e_s	: Doymuş buhar basıncı
q	: Özgül nem
ρ	: Hava yoğunluğu
ρ_w	: Sıvı suyun yoğunluğu
g	: Yerçekimi ivmesi
m	: Havanın ortalama moleküler kütlesi
τ	: Zaman biriminde ölçülen gecikme
φ	: Enlem
H	: Elipsoidal yükseklik
M_v	: Su buharının molar kütlesi
M_d	: Kuru havanın molar kütlesi

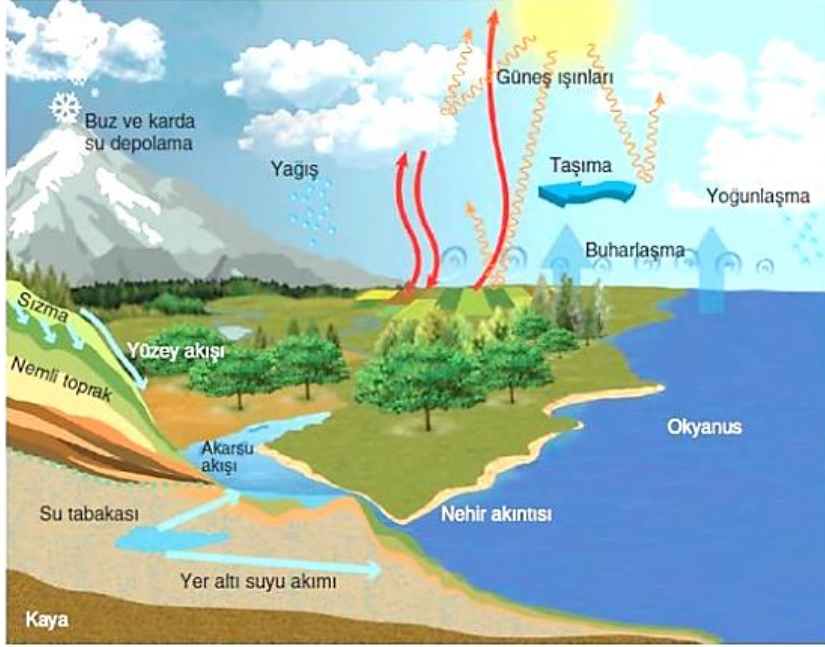
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Hava durumu, belirli yer ve zamanda atmosferdeki anlık durum olarak ifade edilir. Atmosfer basıncı, sıcaklık, nem, bulutluluk, yağmur, rüzgar, güneş gibi meteorolojik parametreler hava durumunun birer unsurudur. Bu unsurlar, günlük, saatlik veya mevsimlik olarak değişerek hava olaylarını meydana getirir (Lamb, 1972; Eken vd., 2005; Ahrens, 2012;). İklim ise bir coğrafi bölgede bir yıl boyunca veya yıllar boyunca yaşanan ortalama hava koşulları olarak ifade edilir. İklim, bir bölgenin hava durumu bakımından karakterini ve bitki örtüsünü belirlerken aynı zamanda ekstrem hava olaylarını da içerir. İklimi etkileyen temel unsurlar, doğal süreçler ve insan faaliyetleri olarak iki şekilde gruplandırılır. Doğal süreçler Güneş, Dünya'nın dönme hareketi, karaların ve okyanusların dağılımları, atmosfer, enlem, yükseklik, bitki örtüsü, büyük tektonik hareketler, volkanik patlamalar gibi faktörlerdir. İnsan faaliyetleri ise fosil yakıtların yakılması, arazi kullanımı değişiklikleri, ormansızlaştırma, enerji kullanımı, sanayi süreçleri, yaşam tarzı gibi etkenlerdir. İklimi etkileyen doğal süreçlerin çoğu genellikle binlerce veya milyonlarca yıl boyunca, insan faaliyetleri ise bu zaman diliminden daha kısa süre içinde gerçekleşir (Lamb, 1972; Eken vd., 2005; Çelik vd., 2008).

Güneş, havanın ısınmasına ve soğumasına etki eden önemli bir enerji kaynağıdır. Güneş ışınlarının küçük bir kısmı atmosfer tarafından geri yansıtılırken, büyük bir kısmı atmosferden geçerek yeryüzüne ulaşır ve yüzeyi ısıtır. Yeryüzüne ulaşan ışınlar, yüzeylerin özelliklerine bağlı olarak farklı oranda geri yansıtılır. Yüzeyden geri yansıyan uzun dalga boylu ışınlar, atmosferde bulunan karbondioksit, metan ve su buharı gibi sera gazları tarafından tutulur ve soğurulur. Böylece, atmosfer ve dünya ısınır. Bu süreç, doğal sera etkisi olarak adlandırılır. Diğer taraftan, Güneş ışınlarının etkisiyle okyanus, deniz ve kara yüzeyindeki su ısınarak buharlaşır ve atmosfere su buharı olarak karışır. Atmosferdeki su buharı, soğuk hava kütleleri ile karşılaştığı zaman yoğunlaşarak bulutları oluşturur. Bulutlar, atmosferde taşınarak karaya doğru sürüklenir ve yeryüzüne yağmur veya kar olarak düşer. Yağmur suları, göllere, nehirlerle veya su tabakalarına akar. Göllerde, nehirlerde ve su tabakalarında bulunan su, buharlaşarak atmosfere tekrar geri döner veya okyanusa geri dönerek döngüyü tamamlar. Bu hidrolojik süreç, dünya genelindeki su kaynaklarının

yenilenmesine ve iklimin düzenlenmesine yardımcı olur (Pachauri vd., 2014; Albaji, 2022; Angermann vd., 2022; URL-1, 2024) (Şekil 1).



Şekil 1. Su döngüsü

Son yıllarda, hava olayları, iklim sisteminin mevcut durumu ve iklim sisteminde yaşanan değişikliklerin kapsamı yüzyıllar boyunca benzeri görülmemiş niteliktedir. Dünya genelinde sıcak hava dalgalarının artması, okyanusların ısınması, buzulların küçülmesi, deniz seviyelerinin yükselmesi, orman yangınlarının çoğalması, şiddetli yağış, sel, fırtına ve kuraklık gibi ekstrem hava olaylarının sıklıkla yaşanması, iklim sisteminin değiştiğinin en belirgin kanıtlarıdır (Karl vd., 1999). Dünyamızda gözlenen bu değişimler, biyoçeşitlilik kaybına yol açarak ekosistemi etkilemekte, insanların maddi ve manevi kayıplar yaşamasına neden olmaktadır. Hava olayları ve iklimsel değişimler, iklim bilimi alanındaki önemli raporlarla da doğrulanmaktadır. Dünya Meteoroloji Örgütü (World Meteorological Organization, WMO) 2021 raporuna göre, 1970-2019 yılları arasında ekstrem hava, iklim ve su ile ilgili olaylar en az 10000 felakete yol açmış, 2 milyon insan hayatını kaybetmiş ve 4 trilyon ABD dolarından fazla olan ekonomik kayıplar yaşanmıştır (WMO, 2021). Uluslararası İklim Değişikliği Panelinin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) AR6 raporuna (Sixth Assessment Report-2023) göre, küresel yüzey sıcaklığı, 2011-2020 yılları arasında, 1850-1900 yıllarına kıyasla 1.1°C artmıştır (IPCC, 2023). Copernicus

İklim Değişikliği Servisi (Copernicus Climate Change Service, C3S) ve WMO tarafından derlenen Avrupa İklim Durumu 2023 yılı raporuna göre, 1880’li yılların sonlarından bu yana en yüksek sıcaklıklar, 2023 yılında kaydedilmiştir (C3S, 2024). Ülkemizde de hava olayları ve iklim değişikliğinin etkileri görülmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) 2023 yılı İklim Değerlendirme Raporu’na göre, 2023 yılı Türkiye ortalama sıcaklığı 15.1°C olarak kaydedilmiş olup, bu değer 1991-2020 dönemi ortalaması olan 13.9°C ’nin 1.2°C üzerindedir. Ayrıca, 2023 yılında Türkiye’nin alansal ortalama yağışı 641.5 mm olarak ölçülmüş, bu değer 1991-2020 dönemi ortalaması olan 573.4 mm’nin 68.1 mm üzerindedir. 2023 yılında Türkiye’de yaşanan ekstrem olayların sayısı 1475’e yükselmiştir. Bunların en tehlikeli olanları, %38 ile şiddetli yağış ve sel, %23 ile fırtına, %16 ile dolu, %6 ile yıldırım düşmesi, %6 ile şiddetli kar, %5 ile heyelan ve %2 ile hortum olmuştur. Çığ, don, orman yangını, sis ve kum fırtınası gibi ekstrem olaylar, toplam olayların %1’ini veya daha azını oluşturmuştur (URL-2, 2024). Hem uluslararası hem de ulusal olarak yayımlanan bu raporlarda küresel sıcaklıkların artması ve iklimin ısınması, özellikle insan faaliyetlerine dayandırılmıştır. İnsan faaliyetleri sonucu atmosfere daha fazla karbondioksit ve metan gazı salınması, sera gazı birikiminin artmasına ve dünya ile okyanusların daha fazla ısınmasına sebep olarak gösterilmiştir. Okyanuslar, denizler ve kara yüzeyindeki sular daha fazla ısındıkça, buharlaşma artmakta ve hava daha fazla su buharı tutmaktadır (Liu vd., 2021). Termodinamik yasalarına göre, her 1°C sıcaklık artışı, atmosferdeki su buharı oranını %7 oranında artırabilmektedir. Hava ne kadar fazla su buharı içerirse, o kadar fazla enerji tutmakta ve bu enerji, karada yoğun fırtınaları beslemektedir. Ancak, yoğun fırtınalardan gelen su, sert ve kuru zemine düştüğünde toprağı nemlendirmek yerine nehirlerle ve akarsulara akarak kuraklık riskini artırmaktadır (Ren vd., 2023; URL-3, 2024). Atmosferdeki su buharı miktarı artmaya devam eder ve karbondioksit, metan gibi sera gazlarının emisyonları yükselirse, küresel ısınma ve iklim bozulmaları ile bunların olumsuz etkileri şiddetlenecektir. Bu kapsamda, Türkiye’de riskli ülkeler arasındadır (Kayhan, 2007). Bilim adamlarına göre, yerkürenin jeolojik geçmişinde olduğu gibi iklim kuşakları da ekvatordan kutuplara doğru yüzlerce kilometre kayabilecektir ve bunun sonucunda Türkiye, bugün Orta Doğu ve Kuzey Afrika’da hâkim olan sıcak ve kurak iklim kuşağının etkisi altına girebilecektir (Öztürk, 2002). Bununla birlikte, Türkiye’nin farklı bölgeleri farklı iklimsel risklerle karşı karşıyadır. Örneğin, Karadeniz Bölgesi, bozulan iklim dengesi, dağlık ve eğimli topoğrafyası sebebiyle aşırı ve düzensiz yağışlardan kaynaklı sel ve taşkın riski taşıyan bölgeler arasındadır.

Son yıllarda, bilim insanları küresel ısınmanın göstergesi olarak atmosferde oluşan su buharı değişimlerini analiz etmek üzere çeşitli ölçüm tekniği ve yöntemler kullanmaktadır. Atmosferdeki toplam su buharının ölçüsü olan Yağışa Dönüşebilir (Yoğuşabilir) Su Buharı (Precipitable Water Vapour, PWV), dikey profil boyunca yoğunlaşarak yağışa dönüşebilen toplam su miktarını ifade eder. PWV, hava durumu tahminleri, yağış olayları ve kuraklık analizleri için temel bir gösterge olması sebebiyle meteoroloji bilimi için önemlidir (Zhao vd., 2022; Wan vd., 2024). Meteorolojik süreçlerin anlaşılmasında ve iklim modellerinde önemli bir parametre olan PWV değişimlerinin analiz edilmesi, atmosfer ve meteoroloji biliminin temel çalışma alanı olmakla birlikte, bu değişimlerin konumsal, zamansal dağılımını ve yeryüzü hareketleriyle ilişkisini anlamak için disiplinler arası bir yaklaşım gereklidir. Jeodezi bilimi de bu kapsamdaki çalışmalar için önemli katkılar sağlar. Uydu ve uzay sistemlerinin ortaya çıkması, yeni ölçüm yöntemleri ve sensör teknolojisinin gelişimiyle birlikte, jeodezinin uygulama alanı büyük ölçüde genişlemiştir. Modern jeodezi, hassas uydu verileriyle Dünya'daki jeodinamik süreçler ve iklim değişikliğinin etkileri hakkında güvenilir bilgiler sağlamaktadır. Bu kapsamda, Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) ile konum belirleme uygulamalarının yanı sıra dünya genelinde sürekli olarak atmosferik koşullar, yüzey sıcaklıkları, deniz seviyesi değişimleri, buzul hacimleri, tektonik plaka hareketleri izlenebilmektedir (Angermann vd., 2022).

Atmosfer yapısı, GNSS sinyal yayılımını etkileyerek çeşitli hatalara neden olur. Bu hataların en önemlisi, uydu sinyalinin Dünya atmosferinden geçerken iyonosferik ve troposferik gecikmelere uğramasıdır. Atmosferdeki gecikmelerin en önemli kaynağı ise su buharıdır (Hofmann-Wellenhof vd., 2008; Böhm vd., 2013). Troposfer kaynaklı GNSS sinyal gecikmesi, su buharı miktarını belirlemek için önemli bir veri kaynağıdır. Su buharındaki dağılım değişimleri bulutlar, fırtınalar ve hava cepheleri gibi meteorolojik olaylarla ilgilidir. Diğer taraftan, atmosferik hata kaynağının belirlenmesine ilişkin atmosfer modelleme araştırmalarının geliştirilmesi jeodezi biliminin temel sonuç ürünlerinden olan konumlandırmanın daha doğru belirlenmesi açısından önemlidir. WMO'nun iklim gözlemleri ile ilgili kuruluşu olan Küresel İklim Gözlem Sistemi (Global Climate Observing System, GCOS) "İklim için Küresel Gözlem İhtiyaçları: Uygulama İhtiyaçları" raporunda PWV'yi "Temel İklim Değişkenleri (TİD)" içerisine dâhil etmiş ve meteoroloji servislerine PWV miktarını izlemelerini tavsiye etmiştir (Kazancı, 2021).

Atmosferik süreçlerin doğru bir şekilde izlenmesi için teknolojinin gelişimine bağlı olarak daha fazla gözlem tekniklerinin kullanılmasına gereksinim duyulmuştur. Günümüzde, PWV tahminleri için kullanılan yöntemler genellikle yer ve uzay tabanlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yer tabanlı yöntemlerin başlıcaları: radyosonda, Güneş fotometrisi, mikrodalga radyometrisi (Microwave Radiometer, MWR) ve GNSS meteorolojisi. Uzay tabanlı yöntemlerin başlıcaları ise atmosferik kızılötesi sensör (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS), orta çözünürlük spektrometre görüntüleme (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS), GNSS-Radyo Okültasyon (Radio Occultation, RO) şeklindedir (Kuleshov vd., 2016; Fonseca vd., 2018; Zhang vd., 2018a; Zhang vd., 2018b; Srivastava ve Kumar 2021). Radyosondalar, atmosferik su buharı ölçümünde kullanılan en etkili gözlem tekniklerinden biridir. Ancak, radyosonda istasyonlarının (Radiosonde Station, RS) sınırlı sayıda olmalarından ötürü birçok meteorolojik ve iklimsel çalışma için radyosonda gözlemleri yetersiz kalmaktadır. GNSS meteorolojisi gibi uydu uzaktan algılama teknolojileri genel olarak daha yüksek yatay çözünürlüklere ve geniş bir küresel kapsama alanına sahiptir. Ancak, GNSS Meteorolojisi düşük düşey çözünürlüğe sahiptir. GNSS sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak son zamanlarda hava tahminlerini iyileştirmek ve iklim değişikliği araştırmaları için GNSS-RO tekniği tercih edilmektedir. GNSS-RO tekniği, RS'lerin sınırlı coğrafi alanı ve GNSS meteorolojisinin düşük düşey çözünürlüğünü tamamlayarak, yüksek düşey çözünürlükte ve küresel ölçekte güvenilir veriler sağlamaktadır (Jin, 2012; Awange, 2018). GNSS-RO tekniği ile PWV hesabı iklimsel su buharı analizlerinde yeni kullanılmaya başlanılan bir yöntem olmasından dolayı uluslararası literatürde bu alanda yapılan çalışma sayısı sınırlıdır. Ülkemizde ise GNSS-RO PWV hesabı ile ilgili 123Y150 kodlu TÜBİTAK 1001 projesi (2023-2026) haricinde bir çalışmaya henüz rastlanmamıştır.

GNSS-RO tekniği, Alçak Yer Yörünge (Low Earth Orbit, LEO) uydularının üzerine yerleştirilen alıcılar ile GNSS uydularından gelen sinyalleri analiz ederek sıcaklık, basınç ve su buharı basıncı gibi atmosferik parametrelerin elde edilmesini sağlamaktadır. GNSS uydularından gelen radyo sinyaller troposferden geçerken saçılmaz, bükülür ve vakum ortama göre gecikir. Diğer taraftan, bu radyo sinyaller iyonosfer ortamında yayılırken saçılma ve bükülmeye uğrar, bu da vakum ortama göre grup gecikmesine ve faz gecikmesine neden olur. Bu gecikmeler, önce bükülme açıları profiline, ardından kırılma indisi profiline dönüştürülür. Kırılma, iyonosferdeki elektron yoğunluğu, sıcaklık, basınç ve atmosferdeki su buharının bir fonksiyonudur. Kırılma indisinin daha fazla işlenmesi, nötr atmosferdeki

sıcaklık, basınç ve su buharı profili ile iyonosferdeki elektron yoğunluğu hakkında değerli bilgiler sağlar. GNSS-RO tekniğinin hava olayları ve iklimsel araştırmalarda kullanılması, sıcaklık, basınç ve su buharı verilerini elde etmede önemli fırsatlar sunmaktadır (Kursinski, 1997; Awange, 2018; Nascimento vd., 2020).

1.2. Problemin Tanımı ve Motivasyon

Su buharı, atmosferdeki en aktif ve en önemli sera gazıdır. Dünya'nın troposfer katmanında bulunan su buharı miktarının konumsal ve zamansal değişimleri, meteorolojik olayların oluşmasında en temel unsurlardan biridir. Troposferdeki ısının yükselmesi, su buharı ve karbondioksit miktarının artışı, karbondioksit miktarının artışı ise tekrar ısının yükselmesini tetikleyerek bir küresel ısınma döngüsü oluşturmaktadır. Yüzey sıcaklıklarının artması, farklı yoğunluk ve sıklıkta ekstrem hava olaylarının yaşanmasına, can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Dünya'nın iklim sistemindeki değişimlerini anlamak için troposfer ve stratosferdeki sıcaklık yapısının ve su buharı yoğunluğunun uzun vadeli gözlemleri gerekmektedir. Atmosferdeki sıcaklık ve su buharı parametrelerinin konumsal ve zamansal olarak yeterli çözünürlükte ve hassasiyette ölçülmesi küresel iklim değişiminin temel süreçleri hakkında bilgi edinmeyi mümkün kılmaktadır (Karl vd., 1999; Ahrens, 2012; Patel ve Kuttippurath 2023; Jin, 2024).

Yer tabanlı radyosonda yöntemi, atmosferik su buharı tahmininde uzun süre kullanılan etkili gözlem tekniklerinden biridir. RS'lerden bir balon yardımıyla atmosfere serbest bırakılan radyosonda, atmosferde yükselirken sıcaklık, basınç ve nem gibi meteorolojik unsurları eş zamanlı olarak ölçmektedir. Radyosonda balonları, yeryüzünden yaklaşık 30-35 km'ye kadar yüksek dikey çözünürlükte atmosferik profil verileri sağlamaktadır. Radyosonda yönteminde, ölçümler doğrudan yapıldığı için özellikle kısa vadeli ve bölgesel hava tahminleri için oldukça güvenilir veriler sunulmaktadır. Ancak, radyosondalar, cihaz maliyeti ve insan gücü kullanımından dolayı genellikle 00:00 UTC ve 12:00 UTC olmak üzere günde iki kez fırlatılmaktadır. Bu zaman aralığı, su buharının, özellikle daha sık ve ayrıntılı ölçümlerini gerektiren durumlarda, değişimleri izlemek için yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte, RS'ler yeryüzünün farklı bölgelerine eşit şekilde dağılmadığından sınırlı bir kapsama alanı söz konusudur. İstasyonların çoğu kuzey yarımkürede bulunmaktadır ve okyanus, çöl ve dağlık bölgelerde sayıları oldukça azdır. RS'lerin seyrek coğrafi dağılımı ve bazı bölgelerde sınırlı sayıda olması birçok meteorolojik ve iklimsel çalışma için yetersiz

kalmaktadır. Ayrıca, radyosonda balonları yükseldikçe sensörlerin performansı ve hassasiyeti hava koşullarından etkilenmektedir. Birçok radyosonda sistemindeki sıcaklık hataları düşük basınçlarda hızla artmaktadır. Uçuş sırasında sensörlerin kirlenmesiyle ilgili sorunlar, troposferde radyosonda bağıl nem ölçümlerinin kullanılabilirliğini sınırlandırmaktadır (Syndergaard, 1999; Zhang vd., 2011; Yadav vd., 2020; Jin, 2024). Yer tabanlı MVR cihazları, atmosferdeki su buharı ve sıvı suyu ölçmek için mikrodalga radyasyon sinyallerini kullanmaktadır. Bu cihazlar, farklı frekanslarda parlaklık sıcaklığını ölçmekte ve bu verileri yerel meteorolojik gözlemlerle birleştirmektedir. Algoritmalar ve modeller kullanılarak, parlaklık sıcaklığı verileri yardımıyla, PWV ve sıvı su miktarı hesaplanmaktadır. Bununla birlikte, MVR cihazları nispeten pahalıdır ve orta ile şiddetli yağmur sırasında ölçüm hassasiyetleri azalır (Billault-Roux ve Berne, 2021; Foth vd., 2024).

Uzay tabanlı yöntemler ile atmosferin uzaktan algılanması okyanuslar, çöller ve dağlar gibi ıssız alanlarda veri elde etmek ve atmosfer hakkında geniş bilgi sağlamak için çok güçlü bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle, GNSS sinyallerinden elde edilen bilgilerin meteorolojik analizlerde kullanılması atmosfer bilimleri ve hava durumu tahminlerine büyük katkılar sağlamıştır. Bevis vd. (1992), atmosferik su buharı tahmini için GNSS sistemine dayalı yeni bir yöntem önermiştir. GNSS meteorolojisinin temelini oluşturan bu öneri ile GNSS uydularından yer tabanlı GNSS alıcılara iletilen sinyallerin atmosferik su buharı tarafından ne ölçüde geciktirildiğini tahmin etmek ve zenit ıslak gecikmeden (Zenith Wet Delay, ZWD) PWV hesaplamak için yöntemler geliştirilmiştir. Uzay tabanlı yöntemler, yer tabanlı yöntemlere göre genel olarak daha yüksek yatay çözünürlük ve daha iyi küresel kapsama alanı sunar. Ancak, atmosferik parametreleri daha düşük dikey çözünürlükle ve dolaylı ölçümler yoluyla sağlar (Syndergaard, 1999; Chuvieco, 2008; Zhang vd., 2011).

GNSS teknolojisindeki hızlı ilerlemeler ile birlikte atmosferik yapının ve süreçlerin doğru bir şekilde analizi için GNSS-RO tekniği geliştirilmiştir. GNSS-RO tekniği, GNSS uydularından yayınlanıp LEO uydularınca alınan radyo sinyallerinin Dünya atmosferinden geçerken maruz kaldığı bükülme açısını ölçerek atmosferik profillerin elde edilmesinde kullanılan, böylece atmosferin farklı katmanları hakkında bilgiler sunan uzay tabanlı bir ölçme tekniğidir (Zhang vd., 2011; Nascimento vd., 2020). Bununla birlikte, GNSS-RO tekniği, ERA-Interim ve ERA5 gibi Avrupa Orta Vadeli Hava Durumu Tahmini (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) yeniden analiz veri setleri için de önemli uygulamalara sahiptir. GNSS-RO tekniği, hem ECMWF sistemindeki tahmin

hatalarını hem de Sayısal Hava Tahmini (Numerical Weather Prediction, NWP) modeli hatalarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Bai vd., 2020).

GNSS-RO tekniği, sahip olduğu birçok benzersiz avantajları sayesinde dünya atmosferinin troposfer ve iyonosfer katmanlarının daha iyi anlaşılması için yeni fırsatlar sunmuştur. Her türlü hava koşulunda çalışabilen GNSS-RO tekniği, küresel kapsama alanı potansiyeline sahiptir ve kalibrasyon gerektirmez. Ayrıca, 10 km ile 40 km düşey aralıktaki RO sıcaklıkları için yüksek hassasiyet (<1 K'ye eşdeğer; ortalama hassasiyet <0.1 K) ve doğruluk (0.02-0.05 K), kara veya okyanus üzerinde de benzer hassasiyetler söz konusudur. Yatay çözünürlük, GNSS ışın yolu boyunca yaklaşık 200-300 km olarak değişmektedir. Bu teknikte, düşey çözünürlük ise stratosferde 1.5 km'den alt troposferde 0.1-0.5 km'ye kadar sınırlanmaktadır. GNSS-RO'nun bu yüksek düşey çözünürlüğü, hava tahminini iyileştirmede önemli katkılar sağlamaktadır (Yen vd., 2010; Kwon vd., 2015; Awange, 2018). GNSS-RO tekniğinin bilim dünyasına sunmuş olduğu bu avantajlar ile hava olayları tahminlerinin iyileştirilmesine, iklim değişimlerinin izlenmesine, iklim modellerinin geliştirilmesine, meteorolojik parametrelerin elde edilmesine, PWV değişimlerinin belirlenmesine yeni bir yön kazandırılmıştır. Bu bağlamda, atmosferik parametrelerin hem jeodezik çalışmalarda önemli olması hem de jeodezik yöntemlerin atmosferik parametrelerin elde edilmesine, hava olayları ve iklim sisteminde önemli rol oynayan PWV değişimlerinin belirlenmesine katkı sağlaması bu doktora tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde temel motivasyon unsuru olmuştur.

Türkiye'de meteorolojik araştırmalar için kullanılan yöntemlerden biri radyosonda sistemleridir. Ancak, ülkemiz çoğunlukla dağlık ve engebeli bir topoğrafyaya sahip olduğundan RS'nin kurulumu yüksek maliyetli altyapı gerektirmektedir. Bu durum, RS'lerin coğrafi dağılımlarını sınırlandırmaktadır. Günümüz teknolojisinde daha ucuz ve küresel kapsamda veri sağlayan GNSS-RO tekniğinin bölgemizde uygulanabilirliğini ve PWV doğruluklarının araştırılması ile ülkemizin meteorolojik analiz yöntemlerine yeni katkılar sağlayabilmek bu doktora tezinin diğer motive edici unsur olmuştur. Ayrıca, Türkiye'de hidrolojik ekstrem olaylar kaynaklı meteorolojik afetlerin tahmini ve izlenmesi için "Meteorolojik Radar Sistemleri ve Ağı" kullanılmaktadır. Meteorolojik Radarların gözlem alanında coğrafi engebeler sebebiyle veri alınamayan bölgeler oluşmaktadır. GNSS-RO tekniği ile PWV'lerin üretilmesi veri alınamayan bölgelerdeki veri eksikliğini tamamlayarak, tahmin ve izleme çalışmalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilme potansiyelinin anlaşılması bu doktora tez çalışmasının diğer motive edici unsuru olmuştur.

Bu bağlamda, gerçekleştirilen bu doktora tezi ve tez konusuyla bağlantılı yürütülen 123Y150 kodlu TÜBİTAK 1001 projesinde, seçilen dönemlerde ve konumlarda Türkiye geneli ve Karadeniz Bölgesi için GNSS-RO tekniği ile PWV dağılımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalar kapsamında GNSS-RO PWV kestirimine ilişkin uluslararası güncel konvansiyonlara uygun modeller kullanılarak, algoritma ve yazılım geliştirilmiş olması yanında Türkiye geneli ve özellikle hidrolojik afetlere gebe Karadeniz Bölgesine özel uygulamalar yapılacak olması bu tezin özgün değerlerini oluşturmaktadır.

GNSS-RO tekniği ölçülerinin analizinden PWV kestirimine ve izlenmesine ilişkin dünyadaki sınırlı sayıda çalışmalardan birinin gerçekleştirilmesi, bu tez çalışmasını önemli kılmaktadır. Ayrıca, bu tez çalışması ülkemizde bu alanda yapılan ilk çalışma olma özelliğine sahiptir. Elde edilecek yüksek konumsal ve zamansal çözünürlüklü PWV değerleri, iklimsel değişimlerin ortaya konulmasında katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, bu veriler küresel NWP modelleri ve Türkiye'ye özgü meteorolojik tahmin modellerinin çalıştırılmasında kullanılabilecektir. Son olarak hidrolojik afet değerlendirmelerinde yeni bir girdi sunması bu doktora tez çalışmasının diğer önemli motivasyon kaynağıdır.

1.3. Çalışmanın Amacı

Orta enlem kuşağında yer alan Türkiye, coğrafi konumu ve topoğrafik yapısı nedeniyle çeşitli iklim tiplerine sahiptir. Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizin Karadeniz kıyılarında Karadeniz iklimi, Ege ve Akdeniz kıyılarında Akdeniz iklimi, iç bölgelerinde ise Karasal iklim hakimdir. Atmosferik PWV, Karasal iklimde yağış miktarı ve kuraklık riski, Karadeniz ikliminde yağış miktarı ve sel riski, Akdeniz ikliminde ise kuraklık ve sıcaklıkları artırma potansiyeline sahiptir. Türkiye'de geleceğe yönelik yapılan iklim değişikliği senaryolarına göre atmosferik PWV'nin meteorolojik amaçlı yorumlanması, konumsal ve zamansal değişimlerinin incelenmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda bu tez çalışmasının amaçları;

- GNSS-RO PWV kestirimine ilişkin uluslararası güncel konvansiyonlara uygun modeller kullanılarak MATLAB tabanlı GNSS-RO PWV yazılımı geliştirmek,
- GNSS-RO PWV kestirimi için, Türkiye genelinde okültasyon sayısı bakımından en elverişli LEO uydusunu belirlemek,
- Türkiye genelinde RS'lerin bulunduğu bölgelerde GNSS-RO ölçülerinin analizi ile PWV kestirimini gerçekleştirmek,

- GNSS-RO PWV değerlerini referans bir yöntem olan radyosonda ile karşılaştırmak ve doğruluklarını analiz etmek,
- GNSS-RO PWV değerlerini ECMWF-ERA5 model verileri ile karşılaştırmak ve doğruluklarını analiz etmek,
- GNSS-RO PWV kestirimlerinin radyosonda ve ECMWF-ERA5 PWV kestirimlerine göre avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymak,
- Karadeniz Bölgesinde ekstrem hidrolojik hava olaylarının olduğu dönemlerde üretilen GNSS-RO PWV değerlerinin, radyosonda, NWP modeli ECMWF ERA-5 PWV değerleri ile karşılaştırması ve doğruluklarının analiz edilmesi,
- Türkiye’de ilk kez GNSS-RO kullanarak PWV kestirimi yapmak ve bu bölgedeki tahmin sonuçlarını ve doğruluklarını ortaya koyarak, uluslararası literatürde sınırlı sayıda bulunan PWV kestirim çalışmalarına katkı sağlamaktır.

1.4. Literatür Taraması

GNSS sistemlerinin operasyonel duruma gelmesiyle, yer tabanlı ve uzay tabanlı GNSS atmosferik uzaktan algılama bilim ve teknolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. 1980’li yıllarda GNSS jeodezisi ile yer tabanlı GNSS atmosferik uzaktan algılama sistemi ortaya çıkmıştır. Dünya genelinde GNSS jeodezik yer ağlarının hızla artmasıyla birlikte, büyük miktarda atmosferik PWV, hava ve iklim modellemesi için NWP’de kullanılmıştır. İlk aşamada, yer tabanlı GPS meteorolojisi sadece yardımcı bir ürün olarak post-process çift fark ağ çözümünden PWV alımına odaklanmıştır. Bu süreçte, ağ çözümünün düşük verimlilik sorununu gidermek için yüksek hassasiyetli uydu yörüngesi ve saat düzeltme ürününe dayanan daha Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) tekniği önerilmiştir. Daha sonra, PPP tekniğini kullanan yer tabanlı GPS meteorolojisi, esneklik ve yüksek verimlilik avantajları nedeniyle büyük gelişmeler yaşamıştır. 1998 yılında, Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS) troposfer çalışma grubu kurulmuş ve post-process network veya PPP çözümünden elde edilen troposferik ürünleri operasyonel olarak yayınlamıştır (NWA, 2007; Jin, 2024).

1960’lı yılların ortalarında Dünya atmosferinin araştırılması için uzay tabanlı RO tekniğinin kullanımı önerilmiştir. 1995-1997 yılları arasında, RO tekniğinin GPS Meteorolojisi deneyi ile ilk kez kullanılması, GNSS-RO teknolojisinin uygulanabilirliğini ve etkinliğini gösteren ilk önemli adım olmuştur (Yunck vd., 2000; Yen vd., 2010; Anthes,

2011; Morton vd., 2021; URL-4, 2024). Bu durum, temel atmosferik değişkenlerin yoğun bir küresel gözlemini sağlayacak LEO uydu takımı yıldızlarının geliştirilmesine yol açmıştır. 2000 yılında ilk olarak Alman Yer Bilimleri Araştırma Merkezi (Geo Forschungs Zentrum, GFZ) tarafından CHAMP ve ardından Arjantin ile ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration, NASA) işbirliği içinde göreve başlatılan SAC-C LEO uyduları yalnızca GPS sinyallerini kullanarak RO verilerini sağlamaya başlamıştır. Bu iki uydu misyonunun göreve başlaması, GNSS-RO tekniğinin geliştirilmesi ve uygulanmasında önemli adımlar olmuştur. 2006 yılında Tayvan'ın Ulusal Uzay Organizasyonu (National Space Organization, NSPO) ve ABD'nin Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) işbirliğiyle fırlatılan FORMOSAT-3/COSMIC-1 LEO uydu misyonu ile daha da önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Bu misyon, altı mikro uydu ile GPS-RO verileri sağlayarak hava durumu tahminleri, iklim çalışmaları ve atmosferik araştırmalar için önemli veriler sunmuştur. 2019 yılında fırlatılan FORMOSAT-7/COSMIC-2 misyonu, GNSS-RO teknolojisinin daha da geliştirilmiş bir versiyonunu sunmuştur. Bu misyon, tropikal bölgelerde daha yoğun gözlemler yapmayı hedeflemiş ve GNSS-RO verilerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmıştır. FORMOSAT-7/COSMIC-2 misyonu, sadece GPS değil, aynı zamanda Galileo ve GLONASS gibi diğer GNSS sistemlerinden de sinyal alabilmektedir. Bu, FORMOSAT-7/COSMIC-2'yi, atmosferik profillerin daha geniş bir GNSS sinyal kaynağı kullanarak elde edilmesini sağlayan daha esnek ve çok yönlü bir misyon yapmaktadır. Uydudan uduya gözlem yapan GNSS-RO gözlemleri, yer tabanlı ve uydu tabanlı yöntemler için önemli bir tamamlayıcı olmuştur (Yen vd., 2010; URL-4, 2024).

Literatürde GNSS-RO tekniği ile PWV ve sıcaklık, nem, basınç gibi diğer meteorolojik parametrelerin elde edilmesi ve bağımsız tekniklerle karşılaştırması üzerine çeşitli bölgeler için yapılmış birçok araştırma bulunmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. GNSS-RO tekniği ile PWV ve diğer meteorolojik parametrelerin tahmini hakkında literatür araştırma özeti

Yayın	Yöntem	Parametre	Çalışma Alanı
Ayorinde vd. (2024)	COSMIC-1, COSMIC-2, MetOp GNSS RO	Yerçekimi dalgaları	Ekvatorial tropikal bölge
Gomaa vd. (2024)	COSMIC GNSS RO, Radyosonda	Sıcaklık, Su buharı basıncı	Mısır
Molina vd.(2023)	COSMIC GNSS RO, Yer tabanlı GNSS, GNSS-Reflektometri	İyonosferik sintilasyon	İspanya, La Palma adası

Tablo 1'in devamı

Yayın	Yöntem	Parametre	Çalışma Alanı
Zhran (2023)	Sentinal-6, MetOp-B ve MetOp-C GNSS-RO, ERA5 ECMWF	Sıcaklık	Ekvatorial, Kutup ve Tropikal bölgeler
Prol vd. (2023)	MetOp-A, COSMIC-2 ,Fengyun 3D, GNSS-RO	Bükülme açısı	Ekvatorial bölge
Wang vd. (2023)	GNSS-RO	Ani stratosferik ısınma olaylarının	30°G -90°K enlem bölgeleri
Shao vd. (2023)	COSMIC GNSS RO, ERA5 ECMWF	Su buharı	Kuzey Yarımküre ve Güney Yarımküre
Vergados vd. (2023)	GNSS-RO, Yer tabanlı GNSS, SABER	Meteotsunami, Gravite dalga aktivitesi	ABD'nin doğu kıyısı, Atlantik okyanusu
Zhran ve Mousa (2022)	GNSS RO, ECMWF	Gezegensel sınır tabaka yüksekliklerini	Mısır
Arras vd. (2022)	GNSS-RO	Sporadik E katman oluşum sıklığı ve yüksekliği	Ekvator Bölgesi
Darrag vd. (2022)	GNSS-RO, ERA5 ECMWF, AIRS, MERRA-2	Tropikal kenar enlemleri	Kuzey Yarımküre ve Güney Yarımküre
Murphy ve Haase, (2022)	COSMIC-2 GNSS RO, ERA5 ECMWF, Dropsonde	Kırılma	Kuzeydoğu Pasifik
Yassien vd. (2022)	COSMIC GNSS RO, Radyosonda	PWV	Mısır
Ahmed vd. (2022)	COSMIC, GRACE, C/NOFS GNSS-RO	Basınç, Sıcaklık, Kırılma, PWV	Mısır
Fu vd. (2022)	GNSS-RO, GNSS meteorolojisi, Radyosonda, ECMWF	Zenit troposferik gecikme	Kuzey Yarımküre ve Güney Yarımküre
Shao vd. (2021)	COSMIC-2 GNSS RO, Radyosonda	Sıcaklık, Nem	Orta Enlem Bölgesi
Srivastava ve Kumar (2021)	COSMIC GNSS-RO AIRS, MERRA2	PWV	Hindistan
Tournigand vd. (2020)	GNSS-RO, Lidar, Kızılötesi Atmosferik Sondaj Interferometresi	Volkanik bulut yüksekliği	Güney Amerika
Healy vd. (2020)	GNSS-RO, Radyosonda, ECMWF	Zonal rüzgar	Singapur
Bai vd.(2020)	GNSS-RO, ECMWF	Tropikal siklon	Kuzey/Güney Yarımküre, Okyanusal Bölge
Lasota vd. (2020)	GNSS-RO	Tropikal siklon, Fırtına	Okyanus Bölgeleri
Li vd. (2020)	GNSS-RO, Radyosonda	Sıcaklık, Özgül nem	Açık, Orta ve Yüksek Enlem Bölgeleri
Nascimento vd. (2020)	CHAMP, GRACE, FORMOSAT-3/COSMIC-1 GNSS-RO, Radyosonda	Tropopoz yüksekliği, Sıcaklık	Güney Amerika
Isioye vd. (2020)	COSMIC GNSS-RO,GNSS Meteorolojisi	PWV	Nijerya
Cigala vd.(2019)	GNSS-RO, Lidar	Volkanik bulut yükseklikleri	Alaska Aleut Adaları

Tablo 1'in devamı

Yayın	Yöntem	Parametre	Çalışma Alanı
Jin vd. (2019)	FY-3C, COSMIC GNSS-RO, Radyosonda	Yerçekimi dalgası potansiyel enerjisi	Kuzey Yarımküre ve Güney Yarımküre
Bonafoni vd. (2019)	GNSS-RO, GNSS meteorolojisi, NWP	Ekstrem hava olayları, İklim	Jamaika'nın Güneyi Orta Enlem Bölgesi Kuzey Atlantik Okyanusu Havzasında
Zhran vd. (2019)	MetOp-A ve MetOp-B GNSS-RO, Radyosonda, ECMWF	Tropopoz yüksekliği	Mısır
Fonseca vd. (2018)	COSMIC, CHAMP, MetOp-A/MetOp-B GNSS-RO, GNSS meteorolojisi	PWV	Okyanus Bölgeleri
Zhang vd. (2018a)	COSMIC GNSS-RO, Radyosonda	PWV	Kutup Bölgeleri Orta ve Alt Enlem Bölgesi
Zhang vd. (2018b)	FY-3C, COSMIC GNSS-RO Radyosonda, GNSS meteoroloji, ERA-Interim, ERA5 ECMWF	PWV	Orta Enlem Bölgesi
Scherllin-Pirscher vd. (2017)	GNSS-RO	Sıcaklık, Basınç	Tropopoz Bölgesi Orta Enlem Bölgesi
Yue vd. (2014)	COSMIC-1, COSMIC-2 GNSS RO	İyonosferik profiller	Düşük Enlem Bölgesi
Wang vd. (2013)	COSMIC GNSS RO, Radyosonda	Sıcaklık, Su buharı basıncı, Özgül nem	Kuzey Yarımküre ve Güney Yarımküre
Steiner vd. (2013)	CHAMP GNSS-RO	Bükülme açısı, Kırılma, Kuru basınç, Kuru jeopotansiyel yükseklik, Kuru sıcaklık	Orta Enlem Bölgesi Yüksek Enlem Bölgesi
Vryonides ve Haralambous (2013)	COSMIC GNSS RO, Uluslararası Referans İyonosfer (IRI-2007) modeli	Elektron yoğunluğu	Doğu Akdeniz Bölgesi
Xie vd. (2012)	COSMIC GNSS-RO, Radyosonda, ECMWF	ABL	Güneydoğu Pasifik
Zhang vd. (2011)	CHAMP, FORMOSAT-3/COSMIC GNSS-RO, Radyosonda	Sıcaklık	Avusturalya
Fu vd. (2009)	COSMIC GNSS-RO, Radyosonda	Atmosferik profil	Avusturalya Antarktika
Basha ve Ratnam (2009)	GNSS-RO, Radyosonda	ABL	Gadanki/Hindistan
Foelsche vd. (2008)	CHAMP, FORMOSAT-3/COSMIC-1, GRACE GNSS-RO, ECMWF	Sıcaklık, Kırılma	Kutup Bölgeleri
Zhang vd. (2007)	CHAMP GNSS-RO, Radyosonda	Sıcaklık, Su buharı basıncı	Batı Avusturalya
Beyerle vd. (2005)	GRACE GNSS-RO, ECMWF	Kırılma	Orta Enlem Bölgesi
Kuo vd. (2005)	CHAMP GNSS RO, Radyosonda	Kırılma	Avustralya, Çin, Hindistan, Japonya Ve Rusya

Tablo 1'in devamı

Yayın	Yöntem	Parametre	Çalışma Alanı
Wickert vd. (2004)	CHAMP GNSS-RO, Radyosonda	Sıcaklık, Kırılma	Avrupa, Avustralya, Çin, Hindistan, Japonya, ABD

Tablo 1’de sunulan literatür özeti, (1) GNSS-RO tekniği atmosferik parametreleri ile ilgili yapılan çalışmalar, (2) GNSS-RO tekniği PWV kestirimleri ile ilgili yapılan çalışmalar, (3) GNSS-RO tekniğinin farklı uygulamalarda kullanımları olmak üzere toplam üç alt bölümde açıklanmıştır.

(1) GNSS-RO tekniği kapsamında farklı LEO uydu misyonlarından elde edilen sıcaklık, basınç, özgül nem, kırıcılık profillerinin yer tabanlı ve uzay tabanlı diğer yöntemler veya ECMWF yeniden analiz ürünleri ile karşılaştırıldığı çeşitli çalışmalar bu bölümde sunulmuştur.

Gomaa vd. (2024), Mısır bölgesinde 2007-2019 yılları arası dönem için COSMIC RO sıcaklık ve su buharı basıncı profillerini, radyosonda profilleri ile karşılaştırarak doğrulamıştır. Çalışmada, RS ile RO olaylarının gerçekleştiği konum arasındaki yatay mesafe 150 km, zaman farkı ise 3 saat olarak sınırlandırılmıştır. Karşılaştırmalar, yalnızca standart basınç seviyelerinde yapılmıştır. Sonuçlarda, COSMIC RO profilleri ile radyosonda profillerinin tutarlı olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık profilleri için ortalama hata ve standart sapma değerleri sırasıyla 0.22°C ve 1.83°C , su buharı basıncı profilleri için ortalama hata ve standart sapma değerleri sırasıyla -0.02 mb ve 0.12 mb olarak bulunmuştur.

Zhran (2023), Sentinel-6 RO sıcaklık profillerini, MetOp-B ve MetOp-C, ECMWF ERA5 sıcaklık profilleri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, atmosferin 10 km ile 35 km yükseklikleri arasında, Sentinel-6 uydusundan elde edilen sıcaklık profillerine ait standart sapma değerlerinin çoğu 2 K ile 4 K arasında bulunmuştur. 10 km’nin altındaki yüksekliklerde ise tropikal bölgelerdeki sıcaklık standart sapma değerleri, kutup bölgelerine kıyasla daha yüksek seviyelerde ölçülmüş ve bu değerlerin kış mevsiminde maksimum düzeye ulaştığı gözlenmiştir.

Prol vd. (2023), MetOp-A RO ölçüleri ile iyonosferik bükülme açısı ve sintilasyon profillerini incelemiştir. Çalışmada, MetOp-A RO ürünleri, Fengyun-3D ve FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO ürünleri ile doğrulanmıştır. Sonuçlarda, MetOp-A ve Fengyun-3D bükülme açıları, oldukça uyumlu bulunmuştur.

Ahmed vd. (2022), Mısır bölgesinde COSMIC, GRACE, C/NOFS RO atmosferik profillerini, radyosonda basınç, sıcaklık, su buharı basıncı ve kırıcılık profilleri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, RO ve radyosonda verilerinin analizi için 3 ile 25 km arasında değişen irtifalara sahip profiller kullanılmıştır. Sonuçlarda, basınç, sıcaklık, su buharı basıncı ve kırılma indisi için ortalama fark değerleri sırasıyla 0.6 mb, 0.79⁰C, 0.1 mb, 0.48; bağıl hata oranları ise sırasıyla %0.3, %1.7, %62 ve %0.7 olarak bulunmuştur.

Murphy ve Haase (2022), Kuzeydoğu Pasifik'te kış aylarında atmosferik nehirlerin içinde ve çevresinde dinamik olarak aktif ortamlarda, FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO ve Spire veri setlerinden elde edilen kırılma profillerini, dropsondeler ve bunları asimile eden ERA5 yeniden analiz ürünleri ile karşılaştırmıştır. Sonuçlarda, troposferin en alt kısımlarında, RO gözlemleri ve diğer veri setleri arasında yüksekliğe bağlı sistematik farklılıkların dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir.

Shao vd. (2021), FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO sıcaklık ve nem profillerini, radyosonda profilleri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, COSMIC-2 RO ve radyosonda profilleri sıcaklık ve nem hatalarının yükseklikle birlikte değişimi ve gece-gündüz bağımlılığı analiz edilmiştir. Sonuçlarda, COSMIC-2 ve radyosonda verilerinin genellikle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Li vd. (2020), Wegener İklim ve Küresel Değişim Merkezi (Wegener Center for Climate and Global Change, WEGC), ROMSAF ve Atmosfer Araştırmaları için Üniversite Konsorsiyumu (University Corporation for Atmospheric Research, UCAR) Boulder GNSS-RO işleme merkezlerinden elde edilen sıcaklık ve özgül nem profillerini, 2007-2010 yılları arasında farklı enlemlerde seçilen 10 RS'den alınan ölçümlerle karşılaştırmıştır. Çalışmada, RO ve radyosonda sıcaklık profillerinin iyi bir uyum sergilediği, kutupsal, orta enlem ve tropikal bölgelerdeki ortalama farkların sırasıyla ± 0.2 K, ± 0.5 K ve -1 K ile 0.2 K arasında değiştiği, standart sapmaların 1 K ile 2 K arasında değiştiği belirlenmiştir.

Nascimento vd. (2020), Güney Amerika üzerindeki tropopoz yükseklikleri (Tropopause Height, TPH) ve sıcaklıkların yıllık değişkenlik modellerini ve bunların küresel telekonneksiyonlarla ilişkisini analiz etmiştir. Çalışmada, 2001-2017 yılları arasında CHAMP, GRACE ve FORMOSAT-3/COSMIC-1 gibi uydu görevlerinden elde edilen 622914 GNSS-RO ölçümü kullanılmıştır. RO ölçümleri, radyosonda profilleri ile doğrulanmıştır. Sonuçlarda, TPH için 10 yılda 13.450 ± 39.577 m'lik bir artış eğilimi ve sıcaklık için 10 yılda -0.021 ± 0.115 K'lik yavaş bir azalma gözlenmiştir. Ancak her iki eğilim de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Scherllin-Pirscher vd. (2017), GNSS-RO atmosferik profillerinin izohipik ve termodinamik koordinatlarda hesaplanmasını, bu hesaplamalardaki hataları ve kullanım alanlarını ele almıştır. Sonuçlarda, RO'dan türetilen tropopoz bölgesindeki sıcaklık, basınç ve potansiyel sıcaklık profillerindeki hataların sırasıyla yaklaşık 0.7 K, %0.15 ve 1.4 K olduğu gözlenmiştir.

Wang vd. (2013), COSMIC RO sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem profillerini radyosonda profilleri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, RS ile RO olayı arasındaki yatay mesafe 100 km, zaman farkı 1 saat olarak sınırlandırılmıştır. Karşılaştırmalar, 925 hPa'dan 10 hPa'ya kadar olan basınç seviyelerinde yapılmıştır. Sonuçlarda, RO ve radyosonda sıcaklık profilleri iyi bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık için ortalama hatalar ve standart sapmalar sırasıyla -0.09 K ve 1.72 K, özgül nem için -0.012 g/kg ve 0.666 g/kg olarak bulunmuştur. Su buharı basıncı için ortalama bağıl hata yaklaşık %33.3 ve standart sapma %107.5 olarak tespit edilmiştir.

Steiner vd. (2013), CHAMP RO verilerini analiz ederek, bükülme açısı, kırılma, kuru basınç, kuru jeopotansiyel yükseklik ve kuru sıcaklık gibi atmosferik parametrelerin doğruluğunu ve tutarlılığını değerlendirmiştir. Çalışmada, bu parametrelerin farklı uluslararası veri işleme merkezlerinden elde edilen sonuçları karşılaştırılmıştır. Tropikal ve orta enlem bölgeleri için elde edilen sonuçların, yüksek oranda uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Zhang vd. (2011), Avusturalya bölgesi için COSMIC ve CHAMP RO sıcaklık profillerini, radyosonda profilleri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, CHAMP ve COSMIC sıcaklık profilleri, 16 farklı basınç seviyesinde değerlendirilmiştir. RO ve radyosonda karşılaştırması için 300 km konumsal ve 3 saatlik zamansal sınırlandırma yapılmıştır. Sonuçlarda, veri setleri arasında iyi bir uyum gözlenmiştir. CHAMP RO ve radyosonda profilleri arasında ortalama fark 0.39°C ve standart sapma 1.20°C olarak, FORMOSAT-3/COSMIC-1 RO ve radyosonda profilleri arasında ortalama fark 0.37°C ve standart sapma 1.24°C olarak bulunmuştur.

Fu vd. (2009), Avustralya ve Antarktika bölgesinde radyosonda gözlemlerini kullanarak COSMIC RO atmosferik ürünlerini değerlendiren istatistiksel çalışmalar yapmıştır. Çalışmada, RS ile RO olayları arasındaki yatay mesafe 100 km ve zaman farkı 2 saat olarak sınırlandırılmıştır. Sonuçlarda, iki veri seti arasında önemli farklar olmadığı gözlenmiştir.

Foelsche vd. (2008), CHAMP, FORMOSAT-3/COSMIC-1 ve GRACE gibi GNSS-RO uydu verilerini kullanarak üst troposfer-alt stratosfer (Upper Troposphere-Lower

Stratosphere, UTLS) klimatolojilerini analiz etmiştir. Çalışmada, kuru sıcaklık, kırılma indisi, jeopotansiyel yükseklik ve basınç gibi parametreler incelenmiş ve ECMWF analizleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda, CHAMP verileri, tropikal tropopoz ve Antarktika bölgelerinde ECMWF analizlerinden farklılıklar göstermiş, bu farklılıkların büyük ölçüde ECMWF hatalarından kaynaklandığı belirtilmiştir. FORMOSAT-3/COSMIC-1 ve CHAMP RO verileri uyumlu bulunmuştur.

Zhang vd. (2007), Batı Avustralya bölgesinde 28 Şubat ile 7 Mart 2005 arasındaki dönem için CHAMP RO uydusundan elde edilen sıcaklık ve su buharı profillerini, radyosonda profilleriyle karşılaştırmıştır. Sonuçlarda, RO ve radyosonda sıcaklık farklarının 14 km altındaki yüksekliklerde 1 K'den az ve tropopoz civarında 3 K'den az olduğu bulunmuştur. Su buharı basıncı profilleri için farkların alt troposferde -0.4 hPa'dan az ve üst troposferde +0.4 hPa'dan az olduğu belirlenmiştir.

Beyerle vd. (2005), GRACE-B RO ölçümlerini analiz etmiştir. Çalışmada, 28-29 Temmuz 2004 tarihlerinde toplanan verilerle, kırılma profilleri hesaplanmış ve bu profiller ECMWF meteorolojik analizleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda, 5-30 km arası yükseklikler için %1'in altında bir kırılma sapma oranı ve %2-3 standart sapma ile iyi bir uyum gözlenmiştir.

Kuo vd. (2005), CHAMP RO kırılma indisi profillerini, her biri farklı tipte bir radyosonda kullanan beş coğrafi alandaki radyosonda profillerinden hesaplanan değerler ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, karşılaştırma, RO sondajlarının en doğru olduğu 5-25 km yükseklikler arasında yapılmıştır. Hindistan, Rusya, Japonya, Çin ve Avustralya bölgesinden seçilen RS ile RO olayı arasındaki yatay mesafe 300 km ve zaman farkı 2 saat olarak sınırlandırılmıştır. CHAMP RO verileri, 2001-2004 dönem aralığı için analiz edilmiştir. Sonuçlarda, farklı coğrafi bölgeler için RO ölçümlerinin kalitesinde önemli bir farklılık bulunmamıştır.

Wickert (2004), CHAMP RO ölçümlerini, radyosonda ve ECMWF verileri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, 162461 kırılma ve kuru sıcaklık profili analiz edilmiştir. RO olayları ve RS arasındaki mesafe 300 km ve zamansal fark 3 saat olarak sınırlandırılmıştır. Sonuçlarda, RO verilerinin genel olarak radyosonda verileri ile uyumlu olduğu, ancak radyosonda türlerine göre farkların olabileceği gözlenmiştir. Ayrıca, konumsal ve zamansal farkların artmasıyla RO ve radyosonda profilleri arasındaki hataların %0.5'ten %0.7'ye yükseldiği, ancak bu farkların ihmal edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

(2) PWV ürününün elde edildiği yöntemlerden biri olan GNSS-RO tekniğinin doğruluğunu araştırmak için yer ve uzay tabanlı yöntemler birbirleri ile veya ECMWF modelleri ile karşılaştırılmaktadır. Literatürde GNSS-RO tekniği ile PWV analizlerinin yapıldığı çeşitli çalışmalar mevcuttur. Ancak, bu çalışmalar oldukça az sayıdadır. Ayrıca, ulusal ve uluslararası literatürde Türkiye'yi ve çevresini kapsayan alan için GNSS-RO uydu tekniği ölçülerinin analizinden PWV kestirimine ilişkin bilimsel ve teknik herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu bölümde PWV kestirimi ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Shao vd. (2023), FORMOSAT-3/COSMIC-1 RO ve ECMWF ERA5 su buharı veri setlerinin tutarlılığını değerlendirmiştir. Çalışmada, 2007-2018 yılları arasında 300 hPa, 500 hPa ve 850 hPa olmak üzere üç farklı basınç seviyesinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçlarda, genel olarak COSMIC RO ve ERA5 verileri arasında hem konumsal hem de zamansal olarak iyi bir uyum gözlenmiştir. COSMIC su buharı verileri 500 hPa ve 850 hPa seviyelerinde ERA5 verilerine göre biraz düşük bulunmuştur.

Yassien vd. (2022), Mısır bölgesinde, 2001-2006 yılları arasındaki COSMIC RO PWV değerlerinin konumsal ve zamansal değişkenliğini incelemiştir. RO PWV değerleri, radyosonda PWV ile doğrulanmış ve ortalama hata 0.18 mm olarak bulunmuştur. Çalışmada, daha düşük enlemlerde PWV değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yıllık PWV değişimleri, 9.23 mm-13.51 mm arasında hesaplanmıştır. Yaz aylarında PWV değerleri, kış aylarına göre daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, PWV değerlerinin gündüz saatlerinde daha yüksek, gece saatlerinde ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Srivastava ve Kumar (2021), Hindistan'daki dört farklı bölge için COSMIC RO, AIRS cihazı ve MERRA2 yeniden analizi ile elde edilen PWV değerlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, COSMIC RO'dan elde edilen PWV değerlerinin, AIRS ve MERRA2'den hesaplanan PWV değerleri ile 0.2 mm - 7 mm arasında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Isioye vd. (2020), Nijerya bölgesinde COSMIC RO ve yer tabanlı GNSS gözlemlerinden elde edilen PWV dağılımını analiz etmiştir. Sonuçlarda, RO PWV değerlerinin, yer tabanlı GNSS ölçümleriyle -0.40 mm ile 5.58 mm aralığında uyumlu olduğu bulunmuştur.

Fonseca vd. (2018), okyanus bölgeleri için yer tabanlı GNSS ve uzay tabanlı GPS-RO verilerinden elde edilen PWV değerlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, yer tabanlı GNSS ve uzay tabanlı GPS-RO'dan hesaplanan PWV değerleri için ortalama fark yaklaşık 1 mm, karesel ortalama hata yaklaşık 5 mm ve korelasyon 0.9 üzerinde bulunmuştur. Ayrıca, bu PWV değerleri, ECMWF PWV değerleriyle doğrulanmış ve sonuçlar uyumlu bulunmuştur.

Zhang vd. (2018a), COSMIC RO ve radyosonda PWV değerlerini karşılaştırmıştır. Sonuçlarda, genel olarak iyi bir uyum gözlenmiştir. Ancak, enlemsel farklılıklar dikkate alındığında tropikal bölgelerde radyosonda PWV değerlerinin, COSMIC RO değerlerine kıyasla en az 5 mm daha büyük olduğu, buna karşın Kuzey Yarımküre'nin orta ve yüksek enlemlerinde COSMIC RO PWV değerlerinin radyosonda değerlerinden yaklaşık 5 mm daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Zhang vd. (2018b), FY-3C ve COSMIC RO, ERA-Interim ve ECMWF ERA5, yer tabanlı GNSS, radyosonda, mikrodalga uydu yöntemlerinden elde edilen PWV değerlerini karşılaştırmıştır. Sonuçlarda, RO ve ECMWF PWV arasında 0.9'un üzerinde yüksek korelasyon gözlenmiştir. Diğer yöntemler arasındaki karşılaştırmalarda ise ortalama hatalar yaklaşık 1 mm, karesel ortalama hatalar ise 2 mm-5 mm arasında bulunmuştur.

(3) GNSS-RO tekniği, NWP'leri, tropikal fırtına tahminleri, atmosferik sınır tabaka (Atmospheric Boundary Layer, ABL) belirlemeleri, iyonosfer ve uzay hava araştırmaları, tropopoz karakteristiklerinin ve UTLS sıcaklık yapısının izlemek gibi birçok bilimsel çalışmada kullanılan güçlü bir teknik olarak gösterilmektedir. Bu bölümde GNSS-RO tekniğinin daha spesifik kullanımlarına yönelik yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Ayorinde vd. (2024), 2011-2021 döneminde COSMIC-1, COSMIC-2 ve METOP uydularından elde edilen sıcaklık ve kırılma GNSS-RO verilerini kullanarak ekvatorial stratosferik yer çekimi dalgalarının oluşumunu ve bu dalgaların tropikal bölgeler arası yakınsama bölgesi ile ilişkisini araştırmıştır.

Molina vd. (2023), 2021 yılında İspanya'nın La Palma adasında meydana gelen volkanik patlamanın neden olduğu sismik aktivite ile ilişkili iyonosferik sintilasyonu araştırmıştır. Çalışmada, iyonosferik genlik sintilasyonlarının ölçülmesi için yer tabanlı GNSS, uzay tabanlı GNSS-Reflektometri ve GNSS-RO teknikleri kullanılmıştır. Sonuçlar, sismik aktive ile iyonosferik sintilasyon arasında en iyi korelasyonun GNSS-RO ve en düşük korelasyonun ise GNSS-Reflektometri ile elde edildiğini göstermiştir.

Wang vd. (2023), 2017-2013 yılları için GNSS-RO verilerini kullanarak ani stratosferik ısınma olaylarının, 30°G - 90°K enlem bölgelerinde, tropopoz üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, 60°K - 90°K ve 20°K - 30°K enlem bölgelerinde ani stratosferik ısınma olaylarının, tropopoz üzerinde güçlü etkilere sahip olduğunu bulunmuştur.

Vergados vd. (2023), ilk kez Dünya atmosferindeki meteotsunamilerin fiziksel bağlantılarını ve tespit edilebilirliğini incelemiştir. Çalışmada, GNSS-RO ölçümleri, Geniş

Bant Emisyon Radyometrisi (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry, SABER) sıcaklıkları ve yer tabanlı GNSS iyonosferik toplam elektron içeriği (Total Electron Content, TEC) gözlemleri kullanılmıştır. Sonuçlar, RO verilerinin, SABER verileri ile birlikte belirgin stratosferik gravite dalga aktivitesi gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, RO ölçümlerinin, meteotsunamilerin anlaşılmasını artırabileceği ve yer tabanlı GNSS TEC gözlemlerini destekleyebileceği gözlenmiştir.

Darrag vd. (2022), tropikal kuşağın olası genişlemesinin yanı sıra Kuzey Yarımküre ve Güney Yarımküre'deki olası itici güçleri ve etkileri araştırmak için Haziran 2001'den Kasım 2020'ye kadar olan bir zaman aralığı için 12 adet GNSS-RO uydu verisi kullanmıştır. Ayrıca, çalışmada ECMWF ERA5, MERRA-2 ve AIRS verilerinden de yararlanılmıştır. Tropikal kenar enlemleri, iki farklı TPH metriği temel alınarak tahmin edilmiştir. Sonuçlarda, GNSS-RO verileri ile Kuzey Yarımküre'de, tropikal kuşağın genişleme eğilimi gösterdiği, Güney Yarımküre'de ise anlamlı bir eğilim olmadığı belirlenmiştir. ERA5 verileri ile her iki yarımkürede de önemli eğilimler gözlenmemiş iken AIRS verileri ile Kuzey Yarımküre'de genişleme ve Güney Yarımküre'de daralma eğilimi belirlenmiştir.

Zhran ve Mousa (2022), Mısır bölgesinde 2006-2019 yıllarını kapsayan zaman aralığı için gezegensel sınır tabaka yüksekliklerini (Planetary Boundary Layer Height, PBLH) analiz etmiştir. Sonuçlarda, GNSS-RO'dan tahmin edilen PBLH'ler, ECMWF modelinden tahmin edilen PBLH'ler ile uyumlu bulunmuştur.

Fu vd. (2022), 2008 ve 2012 tarihleri arasında GNSS-RO ürünlerinden elde edilen zenit troposferik gecikmeleri (Zenith Tropospheric Delay, ZTD), yer tabanlı GNSS, radyosonda ve ECMWF modelinden hesaplanan sonuçlarla karşılaştırmıştır. İstatistiksel sonuçlarda, mutlak hata değerlerinin 5 mm'den az olduğu ve standart sapmaların yaklaşık 20 mm veya daha az olduğu gözlenmiştir.

Arras vd. (2022), GNSS-RO ölçümleri kullanarak ekvator bölgesinde sporadik E katmanlarının oluşum sıklığını ve yüksekliklerini analiz etmiştir. Çalışmada, 90-130 km yükseklik aralığında GNSS L_1 sinyalinin sinyal gürültü oranı (Signal Noise Ratio, SNR) profilleri incelenmiş ve bu profillerde dar bir yükseklik aralığında gözlemlenen sintilasyonlar, sporadik E katmanlarının oluşumu ile ilişkilendirilmiştir.

Bai vd. (2020), COSMIC-2, MetOp ve FY-3 RO verilerinin tropikal siklonların yoğunluğu ve rotası tahminine olan katkılarını detaylandırmıştır. Çalışmada, RO verilerinin tropikal bölgelerde, özellikle 10-20 km yükseklik aralığında, hava tahmini ve veri asimilasyonu alanlarında önemli iyileştirmeler sağladığı gösterilmiştir. Tropikal siklon

tahminlerinde, 6 km'nin altındaki yüksekliklerden elde edilen RO verilerinin kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır. Ayrıca, Güney Yarımkürede geleneksel ölçümlerin sınırlı olması nedeniyle RO verilerinin etkisinin bu bölgelerde daha belirgin olduğu ifade edilmiştir.

Lasota vd. (2020), tropikal ve subtropikal bölgeleri etkileyen tropikal siklonların atmosferik dikey yapısını incelemek için GNSS-RO tekniğini kullanarak kapsamlı bir veri arşivi oluşturmuştur. Çalışmada, 2001-2018 yılları arasında 1822 tropikal siklon iz yolu, yedi uydu görevinden elde edilen 48313 RO profili ile eşleştirilmiş ve fırtınaların oluşumdan dağılımına kadar olan süreçler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. GNSS-RO'nun yüksek dikey çözünürlüğü ve küresel kapsama alanı sayesinde, fırtınaların konumu, şiddeti ve zaman-mekân ilişkileri incelenmiştir. Tüm okyanus havzalarını ve fırtına yoğunluk kategorilerini kapsayan bu arşiv, tropikal siklonların dikey yapısını anlamada önemli bir kaynak sağlamıştır.

Healy vd. (2020), tropikal GNSS-RO zonal rüzgar verilerini, Singapur'daki FUB radyosonda ölçümleri ve ECMWF ERA5 ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, aylık ortalama RO jeopotansiyel yükseklik klimatolojisi kullanılarak, ekvatorial termal rüzgar dengesi yoluyla, tropikal stratosferdeki ortalama zonal rüzgarların gerçekçi bir şekilde elde edilebileceği gösterilmiştir.

Tournigand vd. (2020), 2015 Calbuco patlamasından kaynaklanan volkanik bulut yüksekliğini değerlendirmek için GNSS-RO tekniğini kullanmıştır. Çalışmada, RO verilerine dayalı volkanik bulut yüksekliği tahminlerinin, Dik Polarizasyonlu Bulut-Aerosol Lidar (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP) ve Kızılötesi Atmosferik Sondaj İnterferometresi (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI) verileri ile iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Cigala vd. (2019), Alaska'nın Aleut Adaları'nda 2008 yılında yaşanan Kasatochi patlaması sonucu oluşan volkanik bulut yüksekliğini tespit etmek için GNSS-RO gözlemlerini kullanmıştır. Çalışmada, RO ile tespit edilen volkanik bulut yükseklikleri Ortogonal Polarizasyonlu Bulut-Aerosol Lidar geri saçılım görüntüleriyle yapılan bulut yükseklik tahminleri ile uyumlu bulunmuştur.

Zhran vd. (2019), Mısır bölgesinde TPH'ı analiz etmek için MetOp-A ve MetOp-B uydularının 2016 ve 2017 olmak üzere iki yıllık RO gözlemlerini ROPP yazılım paketinde analiz etmiştir. Çalışmada, ECMWF modeli sonuçları, radyosonda verileri ile doğrulanmıştır. RO TPH sonuçları, ECMWF ve radyosonda TPH ile yüksek korelasyon

içinde bulunmuştur. MetOp verilerinin analiz sonuçlarında, TPH'nin 14 ile 16 km arasında değiştiği gözlenmiştir.

Jin vd. (2019), FY-3C RO sıcaklık ve basınç verilerini analiz etmiş ve iyonosferik gecikmenin atmosferik okültasyon üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Ayrıca, yerçekimi dalgası potansiyel enerjisini tahmin etme üzerine çalışmıştır. Çalışmada, COSMIC RO ve radyosonda gözlemleri karşılaştırılmıştır. İyonosferik gecikmeler için düzeltme işlemlerinden kalan hata miktarlarının faz gecikmesi üzerindeki etkisi, 20 mm'den az olarak bulunmuştur. FY-3C ile COSMIC RO verileri arasındaki sıcaklık farkı 1⁰C içinde, FY-3C RO verileri ile radyosonda verileri arasındaki sıcaklık farkı ise 2⁰C içinde bulunmuştur. Ayrıca, FY-3C ile COSMIC yerçekimi dalgası potansiyel enerji tahmin sonuçlarının, tutarlı bir davranış sergilediği gözlenmiştir.

Bonafoni vd. (2019), GNSS-RO ve yer tabanlı GNSS meteorolojisi tekniklerinin, ekstrem hava olaylarının anlaşılması ve tahmini üzerindeki katkılarını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, GNSS sinyallerinin atmosferin sıcaklık ve su buharı içeriğine duyarlılığı vurgulanarak yoğun yağış, konvektif fırtınalar, tropikal siklonlar, atmosferik nehirler, kuraklıklar ve sıcak hava dalgalarının yapısının incelenmesinde nasıl etkili olduğu detaylandırılmıştır. Ayrıca, GNSS-RO verilerinin, yüksek dikey çözünürlük ve bulutlardan etkilenmemesi özellikleri sayesinde NWP modellerine entegre edilerek, tahmin doğruluğunun artırılmasında önemli bir rol oynayabileceği belirtilmiştir.

Yue vd. (2014), GNSS-RO tekniğinin uzay hava durumu ve iyonosferik analizlerdeki uygulamalarını incelemiştir. Çalışmada, FORMOSAT-3/COSMIC-1 ve FORMOSAT-7/COSMIC-2 görevleri temel alınarak iyonosferin TEC ve elektron yoğunluğu profilleri gibi parametreleri irdelenmiştir.

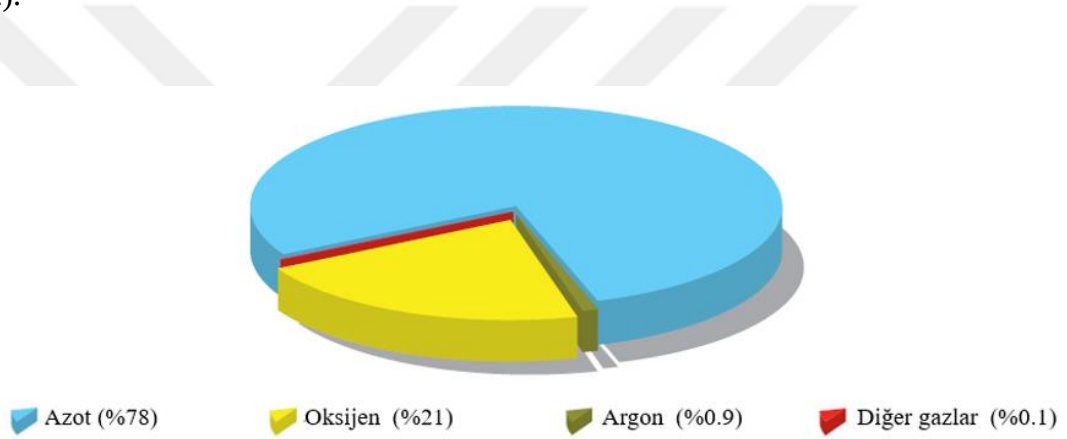
Vryonides ve Haralambous (2013), Doğu Akdeniz bölgesinde IRI-2007 modeli ile FORMOSAT-3/COSMIC-1 RO verilerini karşılaştırarak, iyonosferik özellikler ve elektron yoğunluğu profilleri açısından modelin doğruluğunu değerlendirilmiştir.

Xie vd. (2012), Güneydoğu Pasifik Okyanusu'ndaki ABL özelliklerini GNSS-RO yöntemiyle incelemiştir. Çalışmada, COSMIC RO ölçümleri, radyosondalar ve ECMWF yüksek çözünürlüklü analizleri karşılaştırılarak ABL'nin yüksekliği, nem ve sıcaklık gradyanları değerlendirilmiştir.

Basha ve Ratnam (2009), Hindistan'ın Gadanki bölgesinde radyosonda kırılma profillerini kullanarak tropikal ABL yüksekliğini belirlemiş ve elde edilen sonuçları RO verileriyle karşılaştırarak değerlendirmiştir.

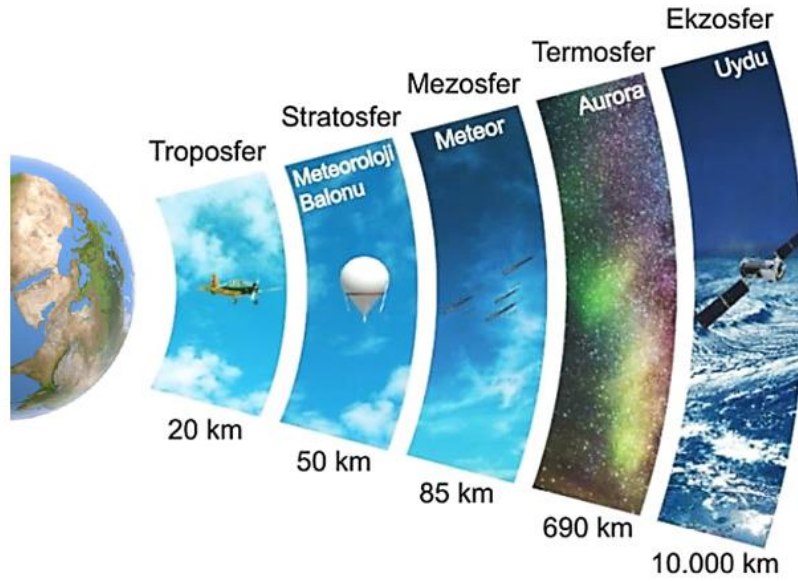
1.5. Atmosferin Yapısı

Dünya’da yaşamın varlığı ve sürdürülebilirliği için atmosfere gereksinim duyulur. Atmosfer, yerküreyi çepeçevre saran bir gaz topluluğudur. Atmosferde, oranları sabit olan gazlar bulunur ve bunlar arasında azot, oksijen ve argon en belirgin olanlardır. Azot, atmosferin yaklaşık %8’ini, oksijen %21’ini ve argon %0.9’unu oluşturur. Geriye kalan %0.1’lik kısmı ise karbondioksit, metan, ozon, su buharı gibi atmosferde değişken miktarlarda bulunan ancak iklim ve hava olayları üzerinde önemli etkileri olan iz gazlar oluşturur. Su buharı ise atmosferin önemli bir bileşenidir ve yüzeye yakın seviyelerde miktarı %0-%4 arasında değişmektedir (Lamb, 1972; Eken vd., 2005; Hansen vd., 2007) (Şekil 2).



Şekil 2. Atmosferin gaz bileşenleri

Atmosferdeki gazların yoğunluğu ve dağılımı yerçekimi tarafından etkilenir. Bu durum, atmosfere sürekli hareket halinde olan dinamik bir özellik kazandırır. Güneş radyasyonu, Dünya’nın dönme hareketi, atmosfer basıncı ve sıcaklık farklılıkları da bu dinamikliği şekillendiren diğer önemli faktörlerdir. Atmosfer, fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre katmanlar oluşturur. Bu katmanlar: troposfer, stratosfer, mezosfer, termosfer ve ekzosfer olarak beş gruba ayrılır (Eken vd., 2005; URL-5, 2024) (Şekil 3).



Şekil 3. Atmosferin katmanları

Troposfer, atmosferin en alt katmanıdır ve deniz seviyesinden yaklaşık 10 km yüksekliğe kadar uzanır. Ancak, troposferin üst kısmının yüksekliği enlem ve mevsime göre değişkenlik gösterir. Bu yükseklik, kış mevsiminde kutuplarda 8 km, yaz mevsiminde ekvatorde 18 km yüksekliğe kadar uzanır. Troposfer, atmosferin en ıslak ve en yoğun tabakasıdır. Atmosfer kütlelerinin yaklaşık %75-%80'i ve su buharının neredeyse tamamı bu katmanda bulunur. Su buharının büyük bir çoğunluğu troposferde bulunduğu için hava olayları da bu katmanda meydana gelir. Troposferde yükseklik arttıkça hava soğur. Troposferin en üst sınırı olan tropopoz, genellikle yükseklikle birlikte sıcaklık azalmasının keskin bir şekilde yavaşladığı veya durduğu sınırdır. Ancak, tropopoz sabit bir sınır değildir. Tropikal yakınsama bölgesinde ve orta enlem kıtalarında yaz aylarında meydana gelen şiddetli fırtınalar, tropopozu sürekli olarak yukarı doğru iter ve troposferi derinleştirir (Mohanakumar, 2008; Barry ve Chorley, 2009).

Stratosfer, tropopozdan başlar ve yaklaşık 50 km yüksekliğe kadar uzanır. Stratosfer, su buharı içeriği açısından düşük ve ozon içeriği açısından zengin bir katmandır. Ozon molekülleri, Güneş'ten gelen ultraviyole ışınları emer. Ultraviyole ışınlarının emilmesi sırasında açığa çıkan enerji, ısı enerjisine dönüşerek stratosferin sıcaklığının artmasına neden olur (Mohanakumar, 2008).

Mezosfer, yeryüzünden yaklaşık 85 km yüksekliğe kadar uzanır. Mezosfer, atmosferin en soğuk katmanıdır ve bu seviyede nefes alacak oksijen yoktur. Mezosferde, gaz yoğunluğunun düşük olması nedeniyle nem miktarı çok azdır ve basınç çok düşüktür.

Mezosfer katmanı, yeryüzünü uzaydan gelen meteorlardan korur ve meteorlar bu tabakaya girdiklerinde yanarlar (Mohanakumar, 2008; Barry ve Chorley, 2009).

Termosfer, yaklaşık 600 km veya daha yüksek irtifalara kadar uzanır. Bu katmanda, özellikle kutup bölgelerinde auroralar görülür. Termosferde yükseklik arttıkça sıcaklık binlerce dereceye kadar çıkabilir. Bu sıcaklık artışı, Güneş'ten gelen yüksek enerjili ultraviyole ışınların ve X-ışınlarının seyrek gaz molekülleri tarafından emilmesinden kaynaklanır. Termosferde basınç ve nem neredeyse sıfırdır. Bu katman, iyonlaşmanın yoğun olduğu bir bölgedir ve iyonosferin bir parçasını oluşturur. İyonosfer, güneşten gelen X-ışınları ve ultraviyole radyasyonlarının gaz moleküllerini iyonize etmesiyle yüksek elektron yoğunluğuna ulaşır. Elektron yoğunluğuna bağlı olarak D tabakası, E tabakası, F tabakası olarak üçe ayrılır (Mohanakumar, 2008; Ahrens, 2012) .

Ekzosfer, atmosferin en dış katmanıdır ve üst sınırı yaklaşık 10000 km yüksekliğe kadar uzanır. Ekzosfer, Dünya'nın atmosferi ile gezegenler arası uzay arasında bir geçiş bölgesidir. Bu katmanda, hava çok seyrek ve gaz molekülleri arasındaki mesafeler oldukça büyüktür. Bu katmanda, sıcaklık hissedilmez, basınç ve nem neredeyse sıfırdır. Ekzosferde iyonlaşma devam eder, ancak gaz yoğunluğunun çok düşük olması nedeniyle etkisi sınırlıdır (Mohanakumar, 2008; Barry ve Chorley, 2009).

1.6. GNSS-Radyo Okültasyon (RO) Tekniği

Okültasyon, bir gök cisminin veya nesnenin, kendisi ile gözlemci arasından geçen başka bir cisim veya nesne tarafından gizlenmesi durumunda meydana gelen olayı ifade etmektedir. Bir okültasyon olayı sırasında, bir gönderici cisimden yayılan sinyal, başka bir gök cisminin atmosferinden geçerken, bu ortamın etkisiyle bozulabilir. Bu durumda sinyaldeki değişiklikler analiz edilerek sinyalin geçtiği gök cisminin atmosferik yapısı ortaya çıkarılabilir. Buna okültasyon tekniği denir (Yen vd., 2010; Jin vd., 2014).

RO, bir uzay aracından yayılan radyo sinyalinin alıcıya ulaşmadan önce bir gezegen atmosferinden geçmesiyle gerçekleştirilen sondaj tekniğidir. Bir radyo sinyali, bir gezegenin atmosferine girer ve atmosferin yoğunluğuna bağlı olarak sinyalin hızı ve yolu değişir. Atmosferden geçerken, sinyalin kırılması ve yayılma hızı, atmosferdeki farklı katmanların özelliklerini ortaya çıkarır (Melbourne, 2004). RO tekniği, 1960'lı yıllarda NASA ve Stanford Üniversitesi'ndeki araştırma grupları tarafından gezegen keşif görevlerinde tanıtılmış ve kullanılmıştır. 1964 yılında fırlatılan Mariner-IV uzay aracı, 1965 yılında

Mars'a yaptığı yakın geçiş sırasında RO tekniğini kullanarak Mars atmosferi üzerinde ilk deneyleri gerçekleştirmiştir. Mariner-IV uzay aracı ile mikrodalga sinyallerinin faz gecikmesi ve genlik değişimi gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, atmosferik ve iyonosferik yoğunluk bilgilerini sağlamak için inversiyon teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu veriler, gezegen atmosferlerinin ve iyonosferlerinin incelenmesine yönelik ilk adımları oluşturmuştur (Yen vd., 2010; Liou, 2010; Jin vd., 2014).

Dünya atmosferini algılamaya yönelik ilk RO deneyi, 1975'te ABD ve Sovyetler Birliği arasında gerçekleştirilen Apollo-Soyuz Test Projesi kapsamında, Apollo ve Soyuz uzay araçları arasındaki radyo bağlantısı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra, ATS-6 ile GEOS-3 uydusu ve Mir uzay istasyonu ile yer sabit uydular arasında kurulan radyo bağlantıları ile genişletilen RO deneyleri, uydudan uyduya izleme bağlantısı kullanılarak Dünya atmosferinin incelenmesine olanak sağlamıştır. 1980'li yıllarda GNSS sistemlerinin geliştirilmesi, Dünya'nın atmosferini ve iyonosferini RO yöntemiyle incelemeyi mümkün kılmıştır. Bu kapsamda, 1995 yılında ABD tarafından Microlab-1 LEO uydusu fırlatılmıştır. 1995-1998 yılları arasında görev yapan Microlab uydusu, yaklaşık 11000 ölçüm kaydı gerçekleştirmiştir. Elde edilen atmosferik sıcaklık ve iyonosferdeki elektron yoğunluğunun dikey profilleri, yer tabanlı ölçümlerin verileriyle karşılaştırılmış ve RO ölçümlerinin yüksek düzeyde doğruluk sağladığı gösterilmiştir (Melbourne, 2004; Liou, 2010; Jin vd., 2014).

GPS/MET (GPS Meteorolojisi) ölçümleri, atmosfer bilimine öncülük ederek ikinci nesil okültasyon alıcıları için yeni tasarımların geliştirilmesine yol açmış ve temel atmosferik değişkenleri küresel ölçekte operasyonel olarak izleyen LEO uydu takımıyıldızlarının oluşturulmasına zemin hazırlamıştır. Bu süreç, 1999'da Ørsted ve SUNSAT uyduları ile başlamış, 2000'de CHAMP ve SAC-C, 2002'de GRACE, 2006'da FORMOSAT-3/COSMIC-1 ve MetOp, 2007'de TerraSAR-X ve TanDEM-X, 2008'de C/NOFS, 2013'de KOMPSAT-5 ve FY-3C, 2018' de GRACE-FO, 2019'da FORMOSAT-7/COSMIC-2, 2020'de Sentinal-6 misyonları ile devam etmiştir (Yen vd., 2010; Liou, 2010; Cook vd., 2013; Jin vd., 2014; Yue vd., 2014; Angerer vd., 2017; Zhnan, 2023). Bu LEO uyduları, atmosferik araştırmalar için gerekli verileri sağlayan RO gözlemlerinin elde edilmesine olanak sunmaktadır. Tablo 2'de GNSS-RO ölçüsü sağlayan birçok LEO uydusu uydu yüksekliklerine göre küçükten büyüğe sıralanmış olarak verilmiştir.

Tablo 2. GNSS-RO gözlemi sağlayan LEO uyduları

No	Misyon	Ülke	Uydu Yükseliği (km)	Eğim Açısı (derece)
1	CHAMP	Almanya	454	87.3
2	C/NOFS	ABD	464	13
3	GRACE	Almanya	485	89
4	GRACE-FO	Almanya	490	89
5	TerraSAR-X	Almanya	514.8	97.5
6	KOMPSAT-5	Kore	550	97.6
7	FORMOSAT-7/COSMIC-2	Tayvan ve ABD	550	24
8	SUNSAT	Güney Afrika	600	96.5
9	Ørsted	Danimarka	655	96.5
10	CanX-2	Kanada	630	97.6
11	SAC-D	Arjantin	657	98
12	SAC-C	Arjantin	702	98
13	OceanSat-2	Hindistan	720	98.2
14	Microlab-1	ABD	735	70
15	ACE	Kanada	750	90
16	EQUARS	Brezilya	750	20
17	FedSat	Avusturalya	800	98.3
18	FORMOSAT 3/COSMIC-1	Tayvan ve ABD	815	72
19	MetOp	ESA	817	98.7
20	NPP	ABD	825	98.7
21	FY-3	Çin	836	98.75
22	MEGHA-TROPIQUES	Hindistan ve Fransa	867	20
23	Sentinel-6	ESA, NASA, EUMETSAT	1339.4-1355.9	66

LEO uydusu GNSS-RO ölçülerinden yapılacak analizlerde, seçilen çalışma bölgesi için veri gözlem sayısı önem arz etmektedir. GNSS-RO tekniği için önemli uydu misyonlarından olan CHAMP, GRACE, METOP, TerraSAR-X, TanDEM-X, FORMOSAT-7/COSMIC-2 LEO uydularının Türkiye coğrafi konumuna uygunluğu tez çalışmasının ikinci bölümünde açıklanmıştır.

1.6.1. GNSS-RO Uygulama Alanları ve Ölçüm Özellikleri

Son yirmi yıldır, GNSS-RO tekniği; NWP, iklimsel değişimlerin izlenmesi, tropikal fırtına tahminleri, iyonosfer ve uzay hava tahminleri, ABL belirleme gibi birçok bilimsel çalışmada güçlü ve yenilikçi bir teknik olarak gösterilmektedir (Anthes vd., 2000; Mannucci vd., 2014; Weiss vd., 2016; Bai vd., 2020). GNSS-RO tekniği,

Sayısal Hava Tahminlerine:

- GNSS-RO verilerinin asimilasyonu ile NWP modellerinin doğruluğunu artırmak,
- Küresel ve bölgesel hassas hava tahmin analizleri yapmak,
- Küresel su buharı dağılımını araştırmak,
- Küresel yüzey basınç alanlarını iyileştirmek,
- Doğru jeopotansiyel yükseklikler sağlamak,
- Tropikal, orta enlem ve kutupsal hava sistemleri ile etkileşimlerini anlamak,
- Okyanuslar, tropikler ve kutup bölgeleri gibi seyrek veri bölgelere ilişkin küresel hava durumu analizlerini iyileştirmek,

İklimsel Değişimlerin İzlenmesine:

- GNSS-RO ürünlerinin sahip olduğu doğruluk ve kararlılık ile iklimsel değişiklikleri yüksek hassasiyetle izlemek,
- GNSS-RO tekniğinin istikrarlı bir şekilde uzun süreli veri kaydı oluşturması ile UTLS bölgesinde trend değişimlerini analiz etmek,
- Küresel iklim modellerini ve analizlerini değerlendirmek,
- Kızılötesi ve mikrodalga sensörlerini kalibre etmek ve algoritmaları güncellemek,
- Tropopoz karakteristiklerini ve UTLS sıcaklık yapısı izlemek,
- El Nino olaylarını araştırmak,

Tropikal Fırtına Tahminlerine:

- Tropik fırtınaların meydana geldiği okyanuslarda nem alanlarını gözlemlemek,
- Tropikal fırtınaların tahminlerini iyileştirmek,

İyonosfer ve Uzay Hava Tahminlerine:

- İyonosferdeki elektron yoğunluk dağılımını gözlemlemek,
- Ekvator plazma kabarcıkları, sporadik E-bulutları gibi sintilasyon olaylarını izlemek ve tahmin etmek,
- Günlük ve mevsimsellik iyonosferik varyasyonları belirlemek,

Atmosferik Sınır Tabaka Belirlemeye:

- ABL'nin alt ve üst bölgesini belirlemek,
- Türbülans karışık katman ve stabil tabakalı katman sınırını analiz etmek,
- Sıcaklık değişim olaylarını ve nem azalmasını gözlemlemek,
- ABL'nin derinliğini hesaplamak,

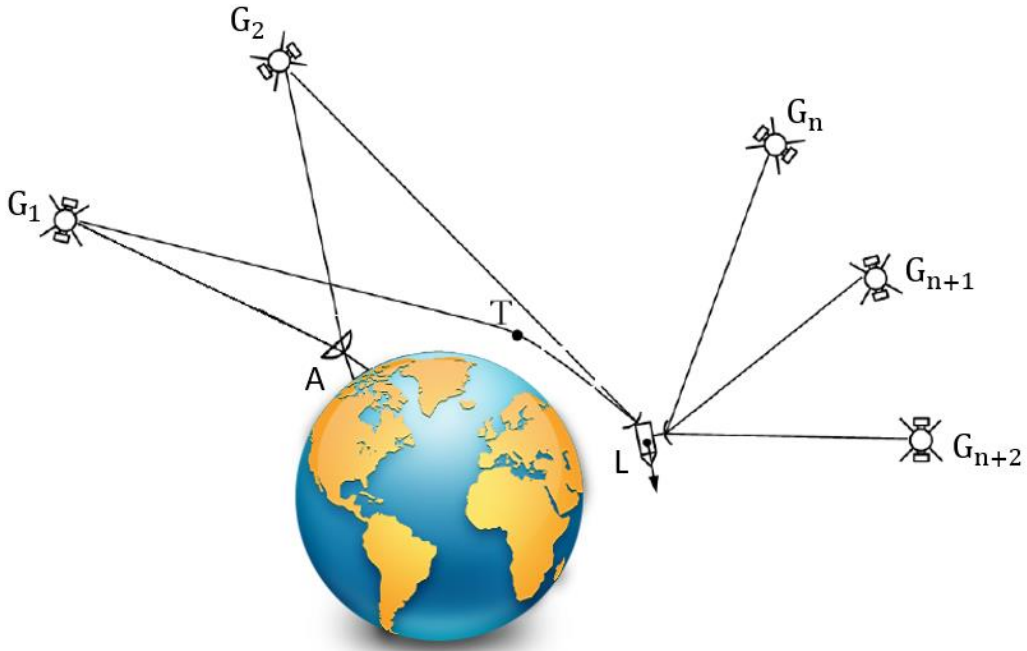
şeklinde katkılar sunmaktadır.

GNSS-RO tekniği, geniş uygulama alanı ve sahip olduğu çeşitli özellikleriyle atmosferik süreçlerin daha iyi anlaşılmasına olanak tanımakta ve bilimsel araştırmalara önemli katkılar sunmaktadır (Tablo 3).

Tablo 3. GNSS-RO yöntemi özellikleri

Yöntem	Uydu tabanlı
Hava Koşulları	Her türlü hava koşulunda çalışabilme
Kapsama Alanı	Küresel kapsama alanı
Yatay Çözünürlük	300 km
Düşey Çözünürlük (Alt Troposfer)	0.1 km
Düşey Çözünürlük (Tropopoz)	1 km
Zamansal Çözünürlük	Günlük olarak düzenli ve sürekli
Sıcaklık Ölçümü Hassasiyeti	1 K'den az
Kalibrasyon Gereksinimi	Kalibrasyon gerektirmez
Bilgi Sağladığı Atmosferik Katmanlar	Troposfer, stratosfer ve iyonosfer
Bilimsel Avantajları	Troposfer ve iyonosferi daha iyi anlama

GNSS-RO tekniği, aerosoller, bulutlar veya yağışlar gibi içeriklerden etkilenmeden her türlü hava koşulunda çalışabilir. GNSS uyduları, yörüngelerinde sürekli hareket ederek Dünya'nın farklı bölgelerinden geçer. Bu sayede, atmosferik veriler günün farklı saatlerinde küresel ölçekte elde edilir (Jin, 2012; Awange, 2018). GNSS-RO ölçümlerinde yatay çözünürlük yaklaşık 300 km'dir (Kaymaklı, 2012; Iacovazzi vd., 2022). Düşey çözünürlük, alt troposferde 0.1 km ve tropopoz seviyesinde 1 km'ye kadar değişebilir. Yüksek hassasiyetli sıcaklık ölçümlerinde doğruluk 1 K'den, ortalama doğruluk ise 0.1 K'den azdır (Yen vd., 2010; Kwon vd., 2015; Weiss vd., 2016). Diğer taraftan, GNSS uydularından iletilen sinyaller, atmosferin dışındaki uzay boşluğunda bozulmaz. Ancak, bu sinyaller, atmosferin stratosfer ve troposfer gibi katmanlarından geçerken kırılma, yavaşlama ve zayıflama gibi etkilere maruz kalır. GNSS-RO tekniğinde, atmosfer dışında bozulmamış referans sinyaller ile atmosfer içinde kırılma ve yayılma nedeniyle etkilenmiş sinyaller karşılaştırılarak normalize edilir. Bu sayede, genlik ve faz yolu ölçümleri atmosferin üstünde zayıflatılmamış sinyallere göre kalibre edilir. Bu yöntem, dış referanslara ihtiyaç duymadan kısa süreli ölçüm kararlılığına dayanarak kendi kendine kalibrasyon yapılmasını sağlar (Şekil 4).



Şekil 4. GNSS-RO atmosferik sondaj şeması ve kendi kendine kalibrasyon özelliği

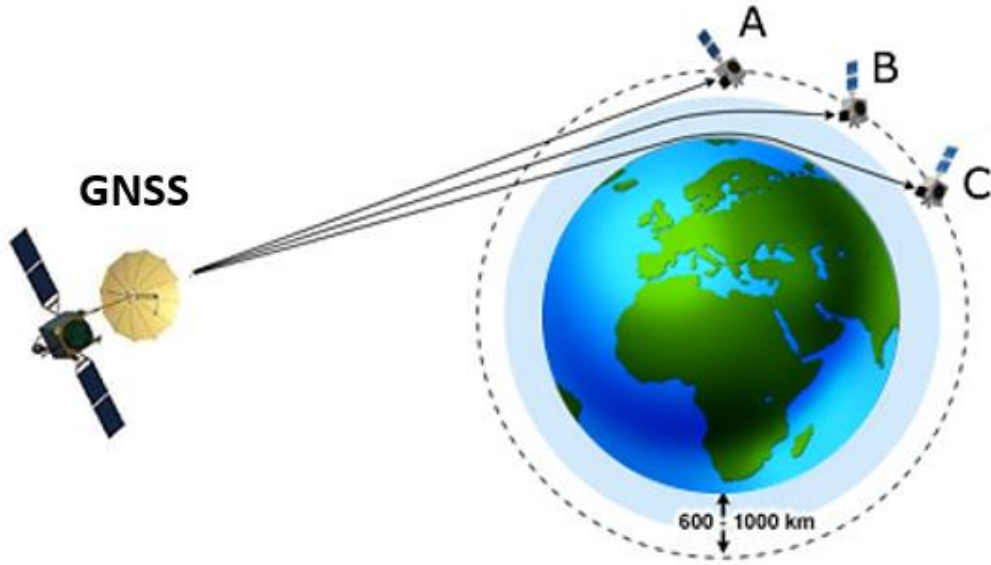
Şekil 4’te, G_1 okültasyon uydusu, G_2 referans uydusu, L LEO uydusu, A yer istasyonu, G_n , G_{n+1} ve G_{n+2} , yüksek yörüngedeki GNSS uydularıdır. Bu uyduların dizisini ifade etmek için kullanılan n ise bir indeks numarasıdır. Referans uydusu, RO sisteminde sinyallerin kalibrasyonu ve atmosferik ölçümlerin doğruluğunu artırmak için kullanılır. LEO uyduları, GNSS uydularından gelen sinyalleri alır ve bu veriler daha sonra atmosferik parametrelerin analiz edilmesi için yer tabanlı istasyonlara iletilir. GNSS uyduları, RO sisteminin küresel olarak çalışmasını sağlar ve atmosferik verilerin toplanmasına katkıda bulunmaktadır (Kirchengast vd., 2004; Liou vd., 2010).

1.6.2. GNSS-RO Tekniğinde Atmosferik Bükülme ve Kırılma

GPS sistemi, ekvator ile 55° eğim yapan 6 yörünge düzlemine yerleştirilmiş 21 esas ve 3 yedek olmak üzere toplam 24 uydudan oluşur. Bu uydular, yeryüzünden yaklaşık 20200 km irtifada bulunur ve 11 saat 58 dakikalık bir periyotta Dünya etrafında döner. Her bir GPS uydusu, yörünge parametrelerine ilişkin bilgileri L_1 , 1575.42 MHz ve L_2 , 1227.60 MHz olmak üzere iki taşıyıcı frekansta yayınlar (Kahveci ve Yıldız, 2018). Başlangıçta yalnızca navigasyon ve konum belirleme amacıyla tasarlanan GPS sistemi, zamanla atmosfer ve meteoroloji gibi bilimsel çalışmalarda da kullanılmaya başlanmıştır. Bu alanlardan biri de

GPS-RO tekniğidir. İlk dönemlerde LEO uyduları yalnızca GPS sinyallerini alabilecek şekilde tasarlanmışken, zamanla GLONASS ve GALILEO gibi diğer küresel uydu navigasyon sistemlerinden de sinyal alabilecek donanım ve yazılımlarla geliştirilmiş; böylece gözlem kapasitesi artmış ve teknik, GNSS-RO olarak anılmaya başlanmıştır.

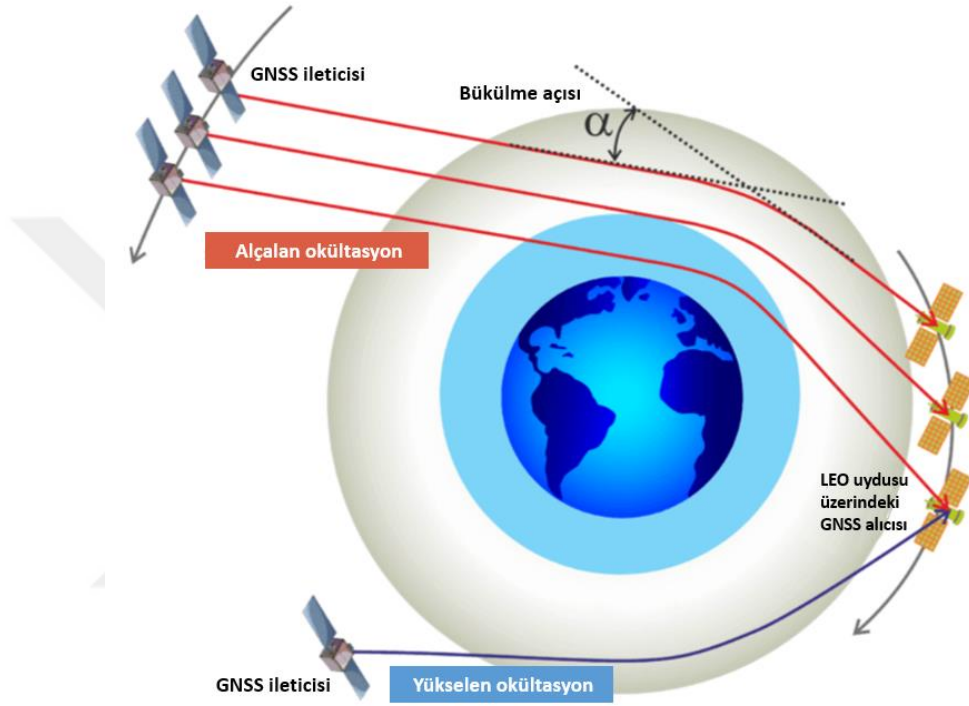
GNSS-RO tekniği, GPS, GLONASS ve GALILEO gibi GNSS uydularından iletilen sinyallerin Dünya atmosferinden geçerken kırılma ve bükülmeye uğraması prensibine dayanır. Bu yöntemde, yüksek yörüngedeki GNSS uydularından iletilen radyo sinyaller, atmosferin farklı katmanlarından geçerek LEO uydu alıcılarına ulaşır. Bu sinyaller, yol boyunca elektron yoğunluğu, sıcaklık, basınç, su buharı gibi çeşitli atmosferik içeriklerden etkilenir ve gecikerek farklı derece kırılma veya bükülmeye maruz kalır (Ignjatovic Stupar, 2015; Awange, 2018) (Şekil 5).



Şekil 5. Atmosferin farklı katmanlarından geçen GNSS radyo sinyallerinin bükülme olayı

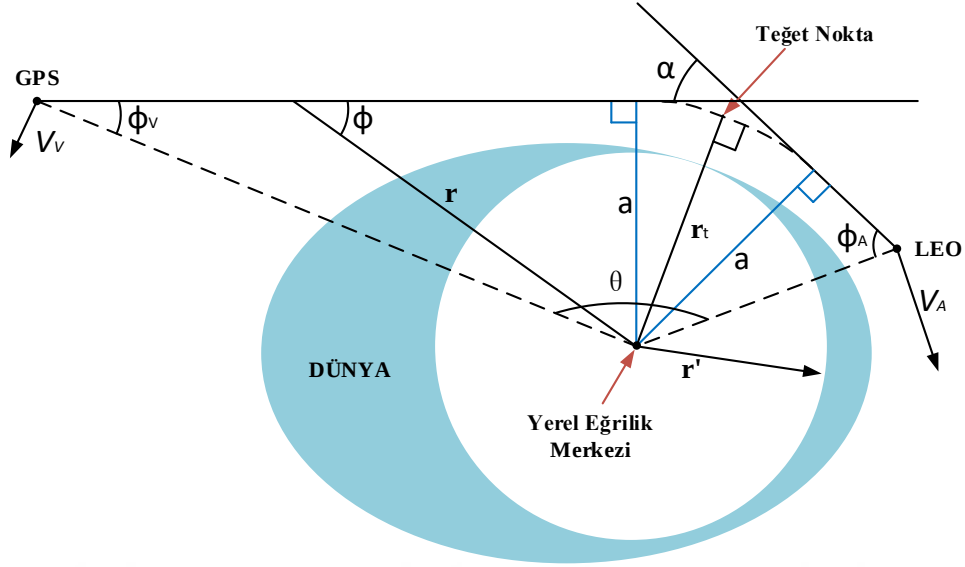
Şekil 5, GNSS uydularından iletilen radyo sinyallerinin, A, B ve C konumlardaki LEO uyduları tarafından nasıl alındığını göstermektedir. Örneğin, GNSS uydularından A konumuna giden sinyal, düz bir çizgide hareket eder ve Dünya atmosferinden geçmediği için radyo dalgaları bükülmez. B konumuna giden sinyal, Dünya atmosferinin üst katmanlarından geçerken hafifçe bükülür. C konumuna giden sinyal ise atmosferin daha yoğun ve düşük irtifadaki katmanlarından geçtiği için daha fazla bükülmeye maruz kalır.

GNSS-RO tekniğinde atmosferde meydana gelen bükülme olayı, LEO alıcısının bakış açısından, GNSS uydusunun Dünya'nın ufkunda yükselmesi veya alçalması sırasında gerçekleşir. Yükselme olayında, sinyal atmosferin alt katmanlarından geçerek yukarı doğru ilerler. Alçalma olayında ise sinyal önce atmosferin daha yüksek katmanlarından geçer ve giderek daha düşük katmanlara ulaşır (URL-6, 2004) (Şekil 6).



Şekil 6. Yükselen (rising) ve alçalan (setting) okültasyonlar

Yükselen ve alçalan GNSS-RO olaylarında temel gözlem, taşıyıcı sinyalin faz kaymasının zaman içindeki değişimidir. GNSS uydularından iletilen sinyaller, atmosferde bükülmeye maruz kaldığı için sinyallerin fazında ve genliğinde değişimler meydana gelir. LEO uydularındaki alıcılar, sinyallerin fazında ve genliğinde meydana gelen bu değişimleri ölçer. Bu ölçümler, bükülme açılarının belirlenmesinde kullanılarak, GNSS-RO tekniğinin limb-sounding geometrisi aracılığıyla atmosferin dikey kırılma indisi profilini ve dolayısıyla termodinamik yapısının detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlar (Ignjatovic Stupar, 2015; Innerkofler vd., 2023) (Şekil 7).



Şekil 7. GNSS-RO geometrisi

GNSS-RO geometrisinde atmosferin sinyaller üzerine etkisi, Şekil 7'de gösterildiği gibi bükülme açısı (α), etki parametresi (a) ve teğet yarıçapı (r_t) ile açıklanır (Kursinski, 1997; Jin, 2014). Bükülme açısı, α , ışınların asimptotları arasında kalan açıdır. Etki parametresi, a , ise GNSS uydusundan gelen ve LEO uydusu tarafından alınan ışının asimptotik (uzaydaki) doğrultusu ile Dünya'nın merkezi arasındaki en kısa dik mesafedir. Teğet nokta, ışının Dünya merkezine en yakın olduğu noktadır. Teğet yarıçapı, r_t , ise merkezden teğet noktasına olan radyal mesafedir (Kursinski, 1997; Jin vd., 2014). GNSS-RO geometrisindeki bu parametreler, atmosferik verilerin türetilmesinde önemli rol oynar ve veri işleme sürecinin temelini oluşturur.

- Atmosferik Kırılma

Atmosfer, GNSS sinyalleri üzerinde kırılma, saçılma, kırıcılık ve soğurma gibi bazı etkiler oluşturur. Bu etkiler arasında en belirgin olan kırılma, kırılma, sinyalin geçtiği ortamın yoğunluğuna bağlı olarak yön değiştirmesine ve faz gecikmesi yaşamasına neden olur (Mannucci vd., 2014). Kırılma indisi, ışının vakumdaki hızı ile belirli bir ortamda yayılma hızı arasındaki oran olarak tanımlanır. GNSS frekanslarında, ortamda soğurmanın ihmal edilebilir olduğu ve bu nedenle kırılma indisinin reel olabileceği varsayılır. Geometrik optik yaklaşımına göre, GNSS sinyalleri, fazın sabit olduğu düzlem üzerinde tanımlanan geometrik dalga cephesine dik doğrultuda yayılır. Bu nedenle, kırılma indisi değişen bir ortamda sinyal ışının yolunu tanımlayan diferansiyel denklem

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \vec{\nabla} n \quad (1)$$

eşitliğindeki eikonal denklemi ile ifade edilir (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017). Burada $\vec{r}$, ışın üzerindeki bir noktanın konum vektörü, n , kırılma indisini ve $\vec{\nabla} n$ ise kırılma indisinin gradyanı olarak tanımlanır. ds ise ışın yolu boyunca alınan diferansiyel uzunluktur ve ışının yolu boyunca konumundaki değişim, ışının yön vektörü ve alınan diferansiyel mesafe ile

$$d\vec{r} = \vec{s} ds \quad (2)$$

eşitliğindeki gibi tanımlanır (Jin vd., 2014). Işının konum vektörü $\vec{r}$ ve kırılma indisiyle ölçeklenmiş yön vektörü $n\vec{s}$ arasındaki dış çarpım $\vec{r} \times (n\vec{s})$, ışının yol boyunca korunması gereken önemli bir fiziksel niceliktir. Bu büyüklüğün nasıl değiştiğini incelemek için türev alınarak

$$\frac{d}{ds} \vec{r} \times (n\vec{s}) = \frac{d\vec{r}}{ds} \times n\vec{s} + \vec{r} \times \frac{d}{ds} (n\vec{s}) \quad (3)$$

eşitlikleri elde edilir. (3) eşitliğinin sağ tarafındaki ilk terim yerine (2) eşitliği yazıldığında sıfır elde edilir. İkinci terim ise (1) eşitliği dikkate alınarak

$$\frac{d}{ds} \vec{r} \times (n\vec{s}) = \vec{r} \times \vec{\nabla} n \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. (4) eşitliği, kırılma indisi gradyanının yalnızca radyal olmayan bileşeninin $\vec{r} \times (n\vec{s})$ değişimine katkıda bulunduğu göstermektedir. Küresel simetri varsayımı altında, kırılma indisi yalnızca radyal yönde değişen bir fonksiyon olarak kabul edilir ve bu durum,

$$n = n(r) \quad (5)$$

eşitliği ile ifade edilir. Başka bir deyişle, ışın yolunun atmosferin dış sınırına yakın bölgelerinde kırılma indisinin değişimi dikey yoğunluk gradyanının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, ışın üzerindeki bir noktanın konum vektörü ile kırılma indisinin gradyanı arasındaki vektörel çarpım

$$\vec{r} \times \vec{\nabla} n = 0 \quad (6)$$

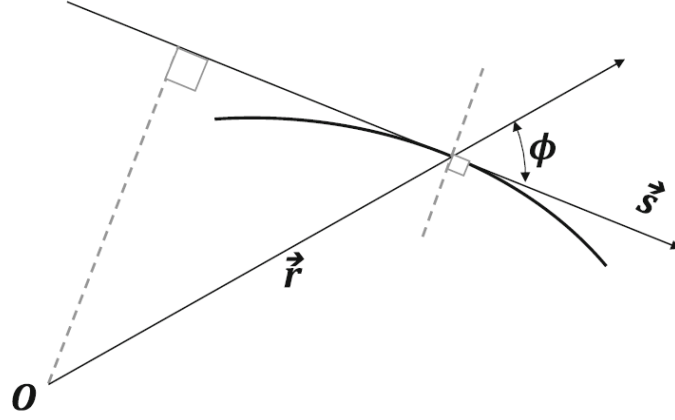
eşitliğinde ifade edildiği gibi sıfır olur. Bu durum,

$$\vec{r} \times (n\vec{s}) = \text{sabit} \quad (7)$$

eşitliğini sağlar ve ışın yollarının belirli bir yasaya göre hareket ettiğini ifade eder. Bu kapsamda, Bouguer yasasına göre

$$nr \sin \phi = a \quad (8)$$

eşitliği elde edilir. Bu yasa, küresel olarak simetrik bir ortamda Snell yasasını temsil eder. Burada, ϕ , konum vektörü $\vec{r}$ ile ışın yolunun teğeti arasındaki açıdır (Şekil 8). Küresel olarak simetrik bir atmosferde a sabiti, etki parametresi olarak adlandırılır (Jin vd., 2014).



Şekil 8. Küresel simetriye sahip bir ortamda Bouguer formülünü sağlayan bir ışın yolu

- Bükülme Açısı ve Kırılma İndisi

Bir ışının atmosferdeki yolu boyunca yönünde meydana gelen birikimli değişim bükülme açısı olarak ifade edilir. Küresel simetri varsayımı altında, toplam bükülme açısı,

$$\alpha(a) = 2 \int_{r_t}^{\infty} d\alpha = -2a \int_{r_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad (9)$$

eşitliği ile ifade edilir (Lewis, 2008; Jin vd., 2014). Burada r , ışın yolunun eğrilik merkezine olan mesafesidir. İntegral, r_t üzerinde, yani ışın yolunun Dünya'nın merkezine en yakın olduğu teğet noktası üzerindeki atmosfer bölgesi için alınmaktadır. (9) eşitliğinde $x=nr$ değişken değişimi yapılırsa,

$$\alpha(a) = -2a \int_a^{\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dx} dx \quad (10)$$

eşitliği elde edilir. (10) eşitliğine Abel dönüşümü uygulandığında $n(r)$ değeri, α ve a 'nın bir fonksiyonu olarak

$$n(r) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_a^{\infty} \frac{\alpha(x) dx}{\sqrt{x^2 - a^2}} \right] \quad (11)$$

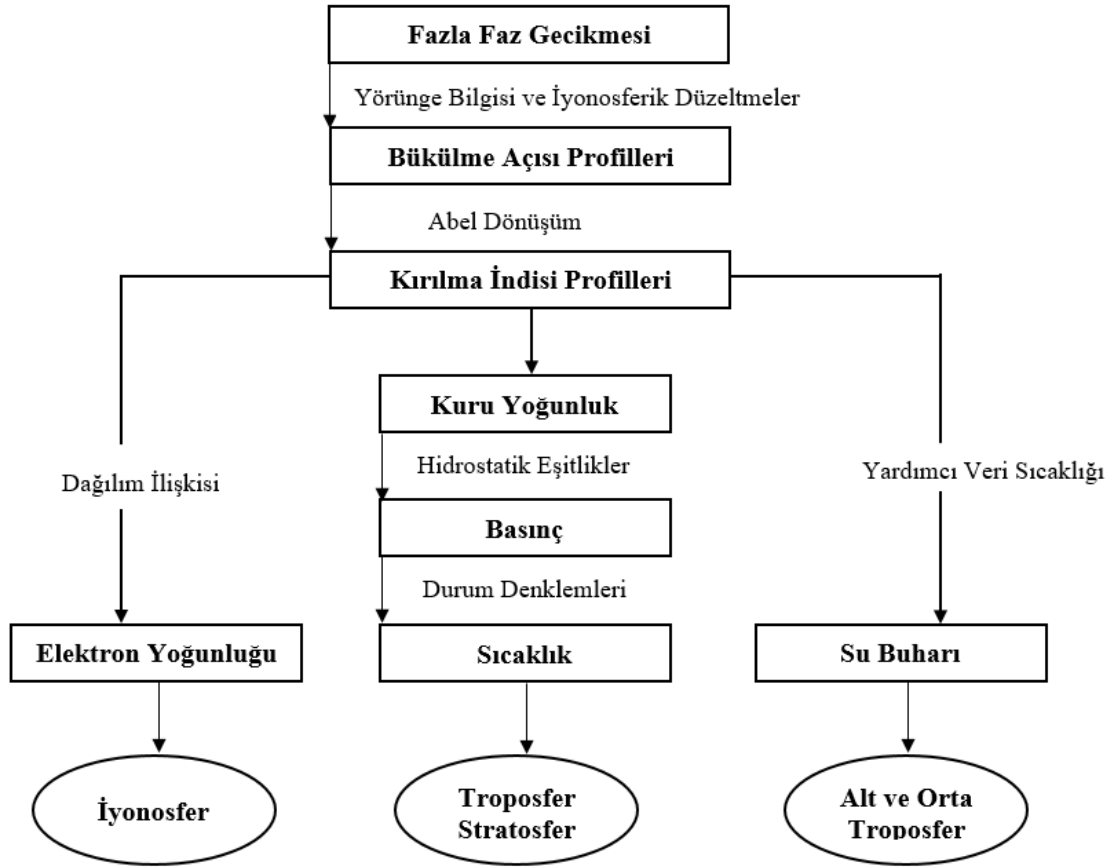
eşitliği ile ifade edilebilir. Etki parametresi a ve kırılma indisi n verildiğinde, her bir teğet noktasındaki yarıçap r , Bouguer formülüne göre,

$$r = \frac{a}{n(r)} \quad (12)$$

eşitliği ile ifade edilir. (12) eşitliğine göre Bouguer yasası, ışının her noktada yerel kırılma indisi tarafından nasıl etkilendiğini açıklar (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

1.7. GNSS-RO Veri İşleme Süreci

Atmosferden geçen GNSS sinyalleri, Snell yasasına bağlı olarak ışının dikey yoğunluk gradyanları nedeniyle kırılır. GNSS-RO tekniği kullanılarak, GNSS sinyallerinin fazı ve genliği hassas bir şekilde ölçülebilir ve böylece atmosferik dikey profiller ve kırılma indisi elde edilebilir. Kırılma indisi bilgisi kullanılarak hava yoğunluğu, basınç, sıcaklık ve su buharı gibi atmosferik parametreler türetilebilir (Kursinski vd., 1997; Steiner vd., 2001; Najmafshar, 2017) (Şekil 9).



Şekil 9. GNSS-RO ölçümlerinden iyonosferik ve atmosferik parametrelerin türetilmesi

GNSS-RO geri kazanım süreci üç temel adımda gerçekleşir. İlk adımda, GNSS sinyalinin faz ve genlik ölçümleri kalibre edilerek okültasyon olayının hassas geometrisi belirlenir. Bu süreçte, GNSS ve LEO uydularının hassas konumları ve hızları hesaplanarak atmosferik kırılmadan kaynaklanan fazla faz gecikmesi belirlenir. İkinci adımda, bükülme açısı ve dikey kırılma indisi profilleri, GNSS-RO tekniğinin fiziksel prensiplerine dayanarak belirlenir. Üçüncü adımda ise sırasıyla iyonosfer ve nötr atmosferin jeofiziksel parametreleri elde edilir (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

1.7.1. Verilerin Kalibrasyonu ve Çıkarımı

GNSS sinyalleri iyonosfer ve nötr atmosfer katmanlarından geçerken gecikmeye uğrar. Bu gecikme, atmosferin neden olduğu faz kayması sonucu oluşan fazla faz gecikmesi olarak tanımlanır. Bununla birlikte, GNSS ve LEO uydularının bağıl hareketi nedeniyle sinyal frekansında değişim meydana gelir ve bu değişim, Doppler kayması olarak

adlandırılır. Fazla faz gecikmesinin zaman türevi, fazla Doppler kaymasını verir. Fazla faz gecikmesi ve Doppler kaymalarının hassas şekilde ölçülmesi ile bükülme açısı belirlenebilir ve bu sayede, atmosferin dikey kırılma indisi profili elde edilebilir (Healy vd., 2002; Jin vd., 2014; Ignjatovic Stupar, 2015).

LEO uydusundaki alıcı, GNSS sinyalinin fazını ve genliğini ölçer. GNSS sinyallerinin L_1 ve L_2 frekanslarındaki faz ölçümleri, LEO alıcısı ile GNSS uydusu arasındaki mesafe değişimlerini belirlemek için kullanılır. Bu ölçümler, atmosferin sinyal üzerindeki etkisini hesaba katarak mesafe cinsinden modellenenebilir. Bu kapsamda, LEO alıcısı ile GNSS uydusu arasındaki ham faz gözlemi

$$L_k^{VA} = -\frac{c}{f_k} \Phi_k^{VA} = \rho^{VA} + \Delta_k^{VA} + C^V + C^A + \varepsilon_k \quad (13)$$

$$\Delta_k^{VA} = \Delta_k^{n\text{ötr}} + \Delta_k^{i\text{yonosfer}} = \Delta_k^{n\text{ötr}} + \left(d \frac{TEC_k^{VA}}{f_k^2} + O(f^2) \right) \quad (14)$$

eşitlikleri ile modellenenebilir. (13) ve (14) eşitliklerinde, V, GNSS vericisini, A ise LEO alıcısını ifade etmektedir. L_k^{VA} , vericiden alıcıya ölçülen mesafeyi, Φ_k^{VA} , verici ile alıcı arasındaki faz ölçümünü, $\frac{c}{f_k}$, ışık hızının frekansa bölümünü, ρ^{VA} , verici ile alıcı arasındaki geometrik mesafeyi, Δ_k^{VA} , atmosferik faz gecikmesini, C^V ve C^A , verici ve alıcı saat hatalarını, ε_k ise ölçüm hatalarını ifade eden terimlerdir. k indisi, L_1 ve L_2 frekanslarını temsil eder. Δ_k^{VA} ise nötr atmosfer ve iyonosfer kaynaklı oluşan toplam fazla faz gecikmeleridir. d, ölçek faktörü olup sabit bir katsayıdır. TEC_k^{VA} , iyonosferdeki toplam elektron yoğunluğunu ve $O(f^2)$ ise iyonosferin doğrusal olmayan etkilerini temsil etmek için kullanılır. (13) eşitliğinde yer alan ρ^{VA} , GNSS ve LEO uydularının Hassas Yörünge Belirleme yönteminden yüksek doğrulukla elde edilen konum ve hız bilgileri kullanılarak hesaplanır. C^V ve C^A saat hataları ise GNSS ve LEO uydularına ait anten verileri kullanılarak fark alma yöntemleriyle giderilir. Böylece L_k^{VA} , yalnızca atmosfer ve iyonosfer kaynaklı etkileri içeren bir mesafe olarak elde edilir ve atmosferin kırılma indisi ilişkisi olmasından dolayı önemlidir (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

1.7.2. Bükülme Açısının Türetilmesi

GNSS-RO faz ölçümünde, geometrik mesafe ve saat hataları giderildikten sonra, iyonosfer ve nötr atmosfer kaynaklı fazla faz gecikmesi ortaya çıkar. Fazın türevi alınarak ortam tarafından oluşturulan fazla Doppler kayması elde edilir. Fazla Doppler kayması, sinyalin bükülme açısını (α), etki parametresinin (a) bir fonksiyonu olarak türetmek için kullanılabilir (Hajj ve Romans, 1998). Şekil 7’de verilen geometrik yapı incelendiğinde, fazla Doppler kayması f_D , sinyal frekansının ve verici ile alıcı uyduların yönünün bir fonksiyonu olarak

$$f_D = \frac{f_V}{c} (\vec{V}_V \vec{k}_V + \vec{V}_A \vec{k}_A) \quad (15)$$

$$f_D = -\frac{f_V}{c} (V_V^r \cos \phi_V + V_V^\theta \sin \phi_V + V_A^r \cos \phi_A + V_A^\theta \sin \phi_A) \quad (16)$$

eşitliği ile ifade edilir (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017). Burada, $\vec{V}_V$ ve $\vec{V}_A$, sırasıyla verici GNSS ve alıcı LEO uydularının hız vektörleridir. $\vec{k}_V$ ve $\vec{k}_A$, ise sırasıyla verici ve alıcıdaki sinyallerin yönünü temsil eden birim vektörlerdir. r ve θ üst indisleri, hız vektörlerinin radyal ve teğetsel bileşenlerini oluşturur. ϕ_V ve ϕ_A , Şekil 7’ye göre sırasıyla GNSS ve LEO uydularının konumları ile sinyal yönü arasındaki açıdır. Şekil 7 ve (8) eşitliği kullanılarak

$$a = n(r_V)r_V \sin \phi_V = n(r_A)r_A \sin \phi_A = n(r_t)r_t \quad (17)$$

eşitliği elde edilir. Burada, r_V ve r_A , GNSS ve LEO uydularının yerel eğrilik merkezine olan uzaklıklarıdır. GNSS ve LEO uyduları kabul edilebilir derecede yüksek irtifalarda bulunduğu, kırılma indisinin her iki noktada da bire eşit olduğu kabul edilirse

$$a = r_V \sin \phi_V = r_A \sin \phi_A \quad (18)$$

eşitliği elde edilir. Bu durumda, Şekil 7’ye göre, toplam bükülme açısı

$$\alpha = \phi_V + \phi_A + \theta - \pi \quad (19)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, θ , verici ve alıcı vektörleri arasındaki açıdır. GNSS ve LEO uydularının hassas konumları ve hızları ile fazla Doppler kayması belirlendiğinde, bükülme açısı, (16), (18) ve (19) eşitlikleri ile iteratif olarak türetilir (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

1.7.3. İyonosferik Düzeltme

Her bir GNSS sinyalinden elde edilen bükülme açısı, iyonosfer ve atmosferin birikmiş etkilerini içerir. İyonosfer dağıtıcı bir ortam olduğundan, iki farklı frekanstaki ölçümler, iyonosferik etkiyi tahmin etmek ve ortadan kaldırmak için kullanılabilir. Atmosferik bükülme, irtifa arttıkça azaldığından, iyonosferden kaynaklı bükülme etkisi yaklaşık 20 km'nin üzerindeki irtifalarda baskın hale gelebilir. GNSS-RO tekniğinde, bükülme açısındaki iyonosferik etkiyi gidermek için yaygın olarak kullanılan yöntem, L_1 ve L_2 frekanslarından elde edilen bükülme açılarının, ortak bir etki parametresinde lineer kombinasyonunun oluşturulmasıdır (Mannucci vd., 2014). L_1 ve L_2 sinyallerinin doğrusal kombinasyonu ile,

$$\alpha_{\text{nötr}}(a) = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \alpha_{L1}(a) - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \alpha_{L2}(a) \quad (20)$$

eşitliğinden nötr atmosferin neden olduğu bükülme açısı hesaplanabilir. Burada, α_{L1} ve α_{L2} , L_1 ve L_2 sinyallerinin iyonosfer kaynaklı bükülme açılarıdır. Bu işlem, iyonosferin etkisini elimine eder ve yalnızca nötr atmosferin neden olduğu bükülmeyi izole eder (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

L_2 sinyali, L_1 sinyaline göre daha düşük frekansta çalıştığı için iyonosferik sintilasyona daha duyarlıdır ve daha düşük SNR'ye sahiptir. Bu nedenle, L_2 faz ölçümleri, daha gürültülü olup L_1 'e kıyasla daha az doğrudur. İyonosferik düzeltme yaparken L_2 'nin neden olduğu daha yüksek gürültü etkisini azaltmak için (20) eşitliği geliştirilerek

$$\alpha_{\text{nötr}}(a) = \alpha_{L1}(a) + \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} [\bar{\alpha}_{L1}(a) - \bar{\alpha}_{L2}(a)] \quad (21)$$

eşitliği elde edilir. Burada $\bar{\alpha}_{L1}$ ve $\bar{\alpha}_{L2}$, L_1 ve L_2 sinyallerinin daha uzun süreli yumuşatma işlemine tabi tutulmuş versiyonlarıdır (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

1.7.4. İyonosferik Parametrelerin Türetilmesi

GNSS sinyallerinin farklı frekanslarındaki yayılım özelliklerinden yararlanılarak iyonosferik etkiler giderilirken, aynı zamanda TEC ve elektron yoğunluğu bilgileri de türetilir. Diğer bir ifadeyle, iyonosferik düzeltme sürecinde yalnızca iyonosferik etki ortadan kaldırılmaz, aynı zaman da iyonosfer hakkında bilgi sağlayan parametreler de üretilir. İyonosferik sinyal gecikmesi, okültasyon ışın yolu boyunca TEC ile orantılıdır. Kırılma indisi cinsinden elektron yoğunluğu N_e ve TEC,

$$N_e(r) = \frac{f_k^2}{40.3} (1 - n(r)) \quad (22)$$

$$TEC = \int N_e \, dl \quad (23)$$

eşitliklerinden elde edilir. Ancak, üst iyonosferde, iyonosferik kırılmadan kaynaklanan bükülme açısı çok küçük olduğundan iyonosferik inversiyon işlemi karmaşık ve hatalara duyarlıdır (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

1.7.5. Atmosferik Parametrelerin Türetilmesi

GNSS-RO tekniğinde, sinyallerde iyonosferik düzeltme sonucunda elde edilen bükülme açısı profilleri yalnızca nötr atmosfer etkisini içerir. Bu profillere, Abel dönüşümü uygulanarak kırılma indisi profilleri elde edilir. Daha sonra, bu kırılma indisi profillerinden hava yoğunluğu, sıcaklık, basınç, su buharı basıncı gibi fiziksel parametreler türetilir. n , kırılma indisi ile N , kırıcılık (refractivity) arasındaki ilişki,

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (24)$$

eşitliği ile ifade edilir. Stratosfer ve troposferi içeren nötr atmosferde N , kuru atmosfer ve su buharına bağlıdır. Bu kapsamda, r farklı teğet yarıçaplarındaki kırıcılık $N(r)$,

$$N(r) = c_1 \frac{P(r)}{T(r)} + c_2 \frac{P_w(r)}{T^2(r)} \quad (25)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, $P(r)$, $P_w(r)$, $T(r)$ sırasıyla farklı teğet yarıçaplarındaki toplam hava basıncı (hPa), kısmi su buharı basıncı (hPa), sıcaklık (K) parametreleridir. c_1 ve c_2 katsayıları ise sırasıyla 77.6 K hPa^{-1} ve $3.73 \times 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ değerindedir.

(25) numaralı eşitliğin ilk terimi, kuru terim olarak, ikinci terim ise su buharı katkısını içeren nemli terim olarak adlandırılır. Kuru terim, nötr atmosfer boyunca baskın rol oynar. Ancak, nemli terim, kuru terimden daha küçük olmasına rağmen orta ve alt troposferde oldukça önemli hale gelir (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017). Bu nedenle, bu bölümde, nötr atmosfer için fiziksel parametrelerin türetilmesi, kuru atmosfer ve nemli atmosfer için iki şekilde açıklanmıştır.

- Kuru Atmosfer

Stratosfer ve üst troposferde sıcaklık özellikle 250 K seviyelerinin altına düştüğünde, atmosferdeki su buharı basıncı P_w , hızla azalır. Bu koşullarda, (25) eşitliğinin ikinci terimi ihmal edilebilir ve atmosferin yoğunluğu yalnızca kuru havanın basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak belirlenir. Kuru atmosfer şartları altında havanın yoğunluğu ideal gaz yasasına göre

$$P = \rho \frac{R}{m} T \quad (26)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, ρ hava yoğunluğu, m havanın ortalama moleküler kütlesi, R evrensel gaz sabiti olarak ifade edilir. (25) eşitliğinin kuru terimi ile (26) eşitliği birleştirildiğinde, $\rho(r)$,

$$\rho(r) = \frac{N(r) m_d}{c_1 R} = \frac{P(r) m_d}{T(r) R} \quad (27)$$

şeklinde ifade edilen eşitlikten türetilir. Burada, m_d kuru havanın ortalama moleküler kütlesi (kg/mol) olarak tanımlanır. $\rho(r)$ (kg/m³) elde edildikten sonra, $P(r)$ atmosfer basıncı hesaplanabilir. Bu kapsamda basınç değişiminin, yalnızca hava yoğunluğu ve yerçekimi kuvveti ile ilişkili olduğu hidrostatik denge durumundaki denklem,

$$\frac{\partial P(r)}{\partial r} = -\rho(r)g \quad (28)$$

eşitliğinden yararlanılır. Burada, g yerçekimi ivmesidir. (28) eşitliğindeki hidrostatik denklem entegrasyonundan $P(r)$,

$$P(r) = P(r_{\text{top}}) + \int_r^{r_{\text{top}}} \rho(r) g \, dr \quad (29)$$

$$P(r) = \frac{1}{c_1} N(r_{\text{top}}) T(r_{\text{top}}) + \frac{m_d}{c_1 R} \int_r^{r_{\text{top}}} N(r) g(r) dr$$

şeklinde ifade edilen eşitlikten türetilir. Burada, r_{top} , atmosferin üst sınırındaki yarıçap ve $P(r_{\text{top}})$, atmosferin üst sınırındaki basınç değerini ifade eder. Atmosferin üst sınırında basınç sıfıra yaklaştığı için $r \rightarrow \infty$ olduğunda $P=0$ olarak kabul edilir. Pratikte, üst stratosfer gibi yüksek irtifalarda sıcaklık, genellikle sayısal hava modeli analizleri veya klimatolojik verilerden elde edilen yaklaşık sıcaklık tahminleri kullanılarak belirlenir. Bu tahminler, $P(r_{\text{top}})$ değerini belirlemek için kullanılır. $N(r)$ ve $P(r)$ profilleri elde edildiğinde, (27) eşitliğinden yararlanarak $T(r)$ sıcaklık profilleri,

$$T(r) = c_1 \frac{P(r)}{N(r)} \quad (30)$$

şeklinde ifade edilen bağıntıdan türetililebilir (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

- Nemli Atmosfer

Orta ve alt troposferde, su buharının önemli hale geldiği bölgelerde, atmosferik parametrelerin türetilmesi giderek daha karmaşık hale gelir. Nemli atmosfer için P , T ve P_w olmak üzere üç parametreden birinin yaklaşık değeri bilinirse, diğer ikisi çözümlenebilir. Bu durumda, kuru atmosferde olduğu gibi (25) ve (26) eşitliklerinden yararlanılabilir. Ancak elde edilen sonuçların güvenilirliği azalmaktadır. Bu nedenle, orta ve alt troposfer için atmosferik parametrelerin türetilmesi için kullanılan diğer bir yaklaşım, Tek Boyutlu Varyasyonel Analiz (One-Dimensional Variational Method, 1D-Var) yöntemidir. Bu bölümde her iki yaklaşımda açıklanmıştır.

Nemli atmosfer koşullarında atmosferik parametrelerin türetilmesine yönelik kullanılan ilk yaklaşımda, (25) eşitliği ve (26) eşitliğindeki ideal gaz yasasından yararlanarak hava yoğunluğu profilleri $\rho(r)$,

$$\rho(r) = \frac{m_v}{c_1 R} \left(N(r) - \frac{c_2 P_w(r)}{T^2(r)} \right) \quad (31)$$

eşitliğinden türetilir. Burada, m_v , nemli havanın ortalama moleküler kütlesidir. NWP modellerinden elde edilen yaklaşık sıcaklık değeri bağımsız olarak bilinirse (25) eşitliği yeniden düzenlenerek kısmi su buharı basıncı profilleri $P_w(r)$,

$$P_w(r) = \frac{N(r)T^2(r) - c_1 P(r)T(r)}{c_2} \quad (32)$$

eşitliğinden türetilir. Pratikte, $P(r)$, $T(r)$ ve $P_w(r)$ değerleri, yaklaşık sıcaklık tahminleri ile (29), (30) ve (31) eşitliklerinden iteratif şekilde türetilir (Jin vd., 2014; Najmafshar, 2017).

Nemli atmosfer koşullarında atmosferik parametrelerin türetilmesine yönelik kullanılan ikinci yaklaşım 1D-Var yöntemi, jeodezik uygulamalarda kullanılan Kollokasyon yöntemine benzerlik gösterir. Kollokasyon yöntemi, jeodezik amaçlı fonksiyonel modellerin çözümünde ilişkin dengeleme, filtreleme, enterpolasyon ve ekstrapolasyon işlemlerini birlikte uygulayarak En Küçük Kareler ilkesine göre çözüm üretir. Bu yöntemde, ölçü hatasının yanı sıra fonksiyonel modelin sinyal adı verilen hata bileşeni de dikkate alınarak ölçülerin genel eğilimi belirlenir, deneysel kovaryans hesaplanır ve bilinmeyen noktalardaki sinyal bileşenleri tahmin edilir. Benzer şekilde, 1D-Var yaklaşımı da atmosferik parametrelerin türetilmesini sağlamak için ölçüler, NWP modellerinden sağlanan yaklaşık değerler ve atmosferdeki kırılmayı modelleyen fizik yasaları ve bunların tahmin hatalarını birlikte optimize eder. Her iki yöntemde de En Küçük Kareler ilkesi temel alınmakla birlikte 1D-Var yöntemi genellikle doğrusal olmayan problemlerin çözümüne yönelik iteratif yöntemlere gereksinim duyar ve bilinmeyenler tahmin edilir (Healy ve Eyre, 2000; Rabier ve Liu, 2003; Şişman ve Elevli 2018; Xue vd., 2022).

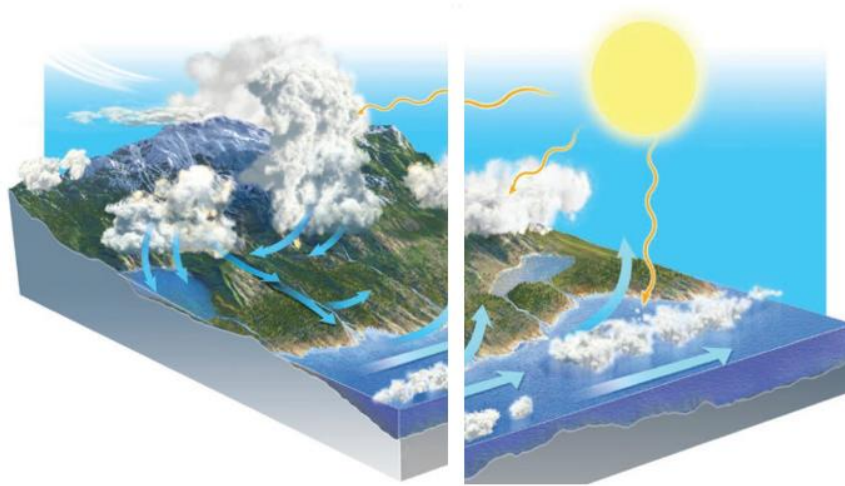
Nemli atmosfer için 1D-Var yöntemi, GNSS-RO tekniğinde Abel dönüşümü ile (11) eşitliğinde elde edilen kırılma indisi n , ve dolayısıyla (25) eşitliğinde ifade edilen kırıcılık bilgisi N , gibi okültasyon ölçümleri, öncül atmosferik bilgiler ile istatistiksel olarak en uygun şekilde birleştirilerek P , T ve P_w için optimal tahmini elde etmeyi amaçlar (Healy ve Eyre, 2000; Jin vd., 2014). Ölçülerin normal dağılıma uygun olduğu varsayıldığında, P , T ve P_w profilleri için en optimal tahmin,

$$J(x) = \frac{1}{2} (x-x^0)^T (Q_{xx})^{-1} (x-x^0) + \frac{1}{2} (l-Ax)^T (Q_{ll}+AQ_{xx}A^T)^{-1} (l-Ax) \quad (33)$$

eşitliğinde ifade edilen $J(x)$ amaç fonksiyonunun minimum olması koşulu altında elde edilir. Burada, x bilinmeyen, x^0 bilinmeyeninin yaklaşık değeri, Q_{xx} bilinmeyeninin kovaryans matrisi, l ölçüler, Ax ölçüler ile bilinmeyen parametreler arasındaki fonksiyonel modelden üretilen tahminler, Q_{ll} ölçülerin kovaryans matrisi, $AQ_{xx}A^T$ dengeli ölçüler için kovaryans matrisidir. T ve -1 üst simgeler, sırasıyla matris transpozunu ve tersini ifade eder. (33) eşitliğinde bilinmeyen parametreler P , T ve P_w olan fiziksel değişkenler için yaklaşık değerler NWP modellerinden elde edilen bilgiler ile sağlanır. $J(x)$ amaç fonksiyonunun çözümü iteratif bir yöntem gerektirir. Bu kapsamda, Levenberg-Marquardt, Newton metodu gibi yöntemler kullanılabilir (Healy ve Eyre, 2000; Lewis, 2008; Wee vd., 2022).

1.8. Atmosferdeki Su Buharı ve Ölçüm Teknikleri

Su buharı, hidrolojik döngünün ana unsuru ve atmosferik olayları yönlendiren temel faktördür. Su buharının dünya üzerindeki dağılımı, sıcaklık, basınç ve coğrafi koşullar nedeniyle homojen değildir. Bu dağılım, hem yatay hem de dikey yönde farklılık gösterir. Atmosferdeki suyun yaklaşık %50'si deniz seviyesi ile deniz seviyesinin 1.5 km üstü arasında bulunurken, %5'ten azı 5 ile 12 km arasında, %1'den azı ise stratosferde yer alır. Yatay dağılım açısından su buharı, kutuplara yakın yerlerde 5 mm, ekvatora yakın yerlerde ise 50 mm civarındadır. Atmosferdeki su buharının dağılımı, hava olaylarının oluşumu ve şiddeti arasında güçlü bir şekilde ilişki vardır. Su buharının yoğunlaşması, çığ, kırağı, bulut ve yağmur oluşumuna neden olur (Quante ve Matthias, 2006; URL-7, 2024) (Şekil 10).



Şekil 10. Atmosferdeki su buharı (H_2O) dağılımı

Atmosferik su buharı ölçümleri, su buharının yoğunlaşıp sıvı hale dönüştüğü PWV miktarının belirlenmesine dayanmaktadır. PWV, belirli bir bölgenin üzerindeki toplam su buharı miktarı olarak tanımlanır. Diğer bir ifadeyle, PWV, Dünya yüzeyinden atmosferin tepesine kadar uzanan dikey bir birim alan sütunundaki toplam atmosferik su buharı miktarını temsil eder. PWV'nin birimi ise atmosferdeki su buharının tamamen yoğunlaşıp sıvı hale geçtiğinde yüzeyde oluşturacağı su tabakasının yüksekliği dikkate alınarak tanımlanır. Bu yükseklik, genellikle mm cinsinden ifade edilir. Teknik olarak, atmosfer sütunundaki toplam su buharı miktarı kg/m^2 cinsinden hesaplanır. Suyun yoğunluğunun yaklaşık 1000 kg/m^3 olduğu kabul edildiğinde, 1 kg/m^2 su buharı, sıvı hale geçtiğinde yaklaşık 1 mm su yüksekliğine karşılık gelir. Bu nedenle, PWV değeri hem kg/m^2 hem de mm birimleriyle ifade edilebilse de meteorolojik ve klimatolojik çalışmalarda, pratikliği ve anlaşılabilirliği nedeniyle genellikle mm birimi tercih edilir. PWV, yağış ve ekstrem hava olayları tahminleri, küresel ısınma araştırmaları, hidrolojik döngü süreçleri ve NWP'ler için temel bir parametredir. Ayrıca, kara yüzeyinin uzaktan algılanmasını etkileyen temel jeofiziksel parametrelerden biridir (Zhang vd., 2018b; Zhou vd., 2019; URL-8, 2024).

Atmosferik PWV ölçümleri için günümüzde kullanılan yöntemler yer tabanlı ve uzay tabanlı olmak üzere gruplandırılmaktadır (Kuleshov vd., 2016; Fonseca vd., 2018; Zhang vd., 2018a; Zhang vd., 2018b; Srivastava ve Kumar 2021). Bununla birlikte, NWP atmosferdeki su buharının konumsal ve zamansal dağılımını modelleyerek hava olayları ve iklim analizlerinde önemli bir rol oynar. Yer ve uzay tabanlı yöntemlerden elde edilen su buharı ölçümleri, bu modellerin doğruluğunu artırmak ve tahminlerin güvenilirliğini değerlendirmek için temel veri kaynağıdır. Bu çalışmada, 1.9 başlıklı bölümde yer tabanlı yöntemler, 1.10 başlıklı bölümde uzay tabanlı yöntemler ve 1.11 başlıklı bölümde NWP modelleri açıklanmıştır.

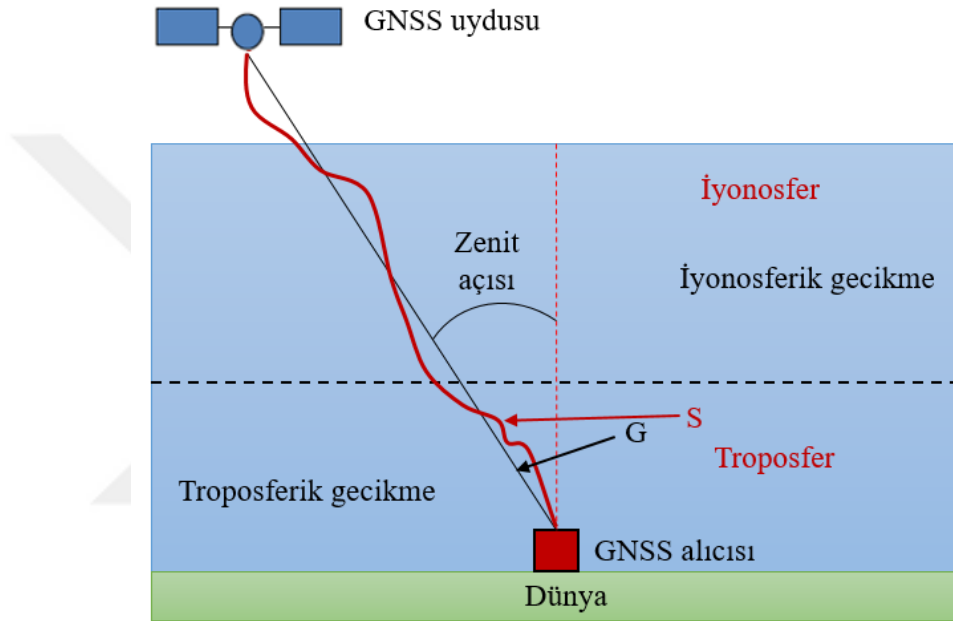
1.9. Yer Tabanlı Atmosferik Su Buharı Ölçümleri

Yer tabanlı yöntemler, istasyonlarda kurulan çeşitli cihazlar ve sensörler aracılığıyla doğrudan atmosfer örnekleme veya dolaylı veriler elde edilmesi prensibine dayanır. Yer tabanlı yöntemler sayesinde belirli bir bölgenin su buharı dağılımı ve zaman içindeki değişimleri yüksek çözünürlükle izlenebilir. Aynı zamanda yer tabanlı ölçümlerde elde edilen verilerin kalibre edilmesi ve çeşitli analizlerde kullanılabilmesi nispeten kolaydır; ancak kapsadığı coğrafi alanın sınırlı olması ve kurulum maliyetlerinin yüksekliği gibi

dezavantajlar da söz konusudur (Jin, 2024). Bu bölümün alt başlıklarında, yer tabanlı başlıca yöntemlerden GNSS meteorolojisi, Radyosonda ve MWR açıklanmıştır.

1.9.1. Yer Tabanlı GNSS Meteorolojisi

GNSS sinyalleri iyonosfer ve troposferde, iyonize parçacıklar ile kuru gaz ve su buharının etkisiyle gecikmeye uğrar ve sinyal yolu uzar (Jin vd., 2014) (Şekil 11).

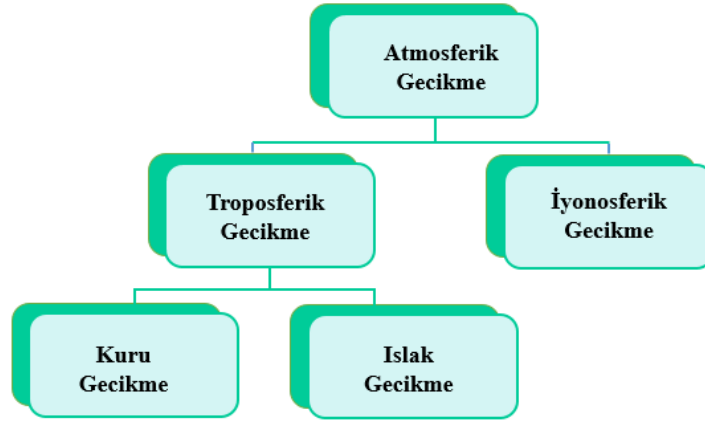


Şekil 11. GNSS sinyalinin atmosferik kırılma olmadığı varsayıldığında izlediği düz (G) yol ile kırılma etkisi altındaki gerçek (S) yol

Kuru gazların etkisiyle meydana gelen gecikme zenit hidrostatik gecikme veya kuru gecikme (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD), su buharının etkisiyle oluşan gecikme ise ZWD olarak adlandırılır. ZHD ve ZWD'nin toplamı ise ZTD olarak adlandırılır. ZTD,

$$ZTD=ZHD+ZWD \quad (34)$$

eşitliği ile ifade edilir (Jin vd., 2014; Jin, 2024) (Şekil 12).



Şekil 12. GNSS sinyal gecikmesi

Yer tabanlı GNSS meteorolojisinde sırasıyla, ZTD, ZHD ve ZWD parametrelerinin tahmini yapılır.

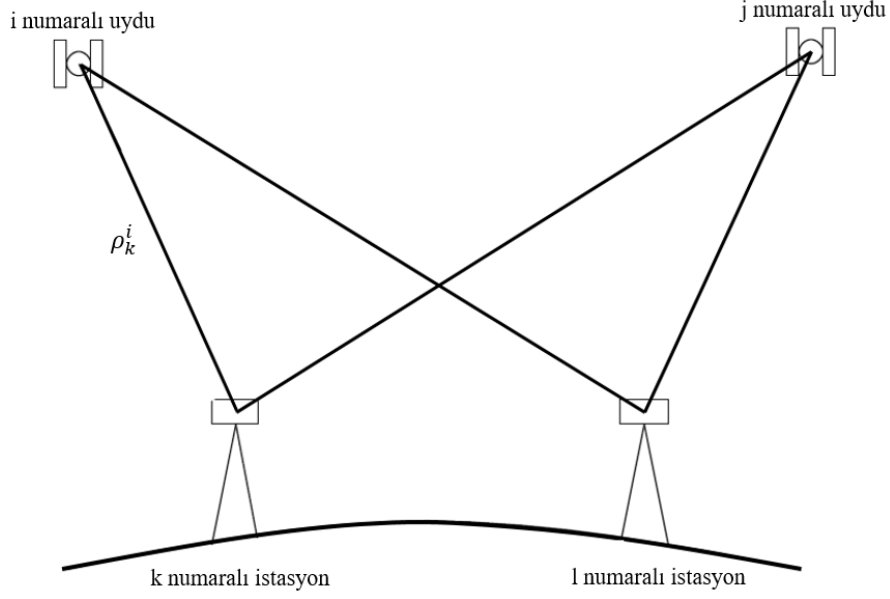
- Zenit Toplam Gecikme, ZTD

ZTD, nötr atmosfer boyunca dikey bir yol boyunca entegre kırıcılıktır ve

$$ZTD = c\tau = 10^{-6} \int_0^{\infty} N(s) ds \quad (35)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada c , vakumdaki ışık hızı; τ , zaman biriminde ölçülen gecikme ve N , nötr atmosferik kırıcılıktır. ZTD, GNSS ölçümleri kullanılarak çift fark ve PPP olmak üzere iki temel yöntemle çözümlenebilir. Ayrıca, izdüşüm fonksiyonları (mapping functions), troposferik gecikmenin farklı yükseklik açılarına göre nasıl değiştiğini modelleyerek ZTD hesaplamalarına katkıda bulunur (Jin vd., 2014).

Çift fark yöntemi, çift frekanslı GNSS gözlemlerinde uydu ve alıcı saat hataları gibi ortak hata kaynaklarını ortadan kaldırır (Jin vd., 2014) (Şekil 13).



Şekil 13. GNSS çift fark gözlem geometrisi

Bir çift GNSS gözlem istasyonu ve uydu için, iyonosferden arındırılmış doğrusal kombinasyon (LC) denklemi çift fark faz ve kod gözlemleri için

$$\begin{aligned}
 LC_{kl}^{ij} &= \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L1_{kl}^{ij} - f_2^2 L2_{kl}^{ij}) \\
 &= \rho_{kl}^{ij} + ZTD_k(t) (m(z_k^i) - m(z_k^j)) - ZTD_l(t) (m(z_l^i) - m(z_l^j)) \\
 &\quad + \frac{c}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 N1_{kl}^{ij} - f_2^2 N2_{kl}^{ij}) + \epsilon_{kl}^{ij}
 \end{aligned} \tag{36}$$

eşitliği yazılabilir. Burada, f_1 ve f_2 , frekanslar, i ve j uydu ve istasyon indeksleri, $L1_{kl}^{ij}$ ve $L2_{kl}^{ij}$ çift fark faz gözlemleri, ρ_{kl}^{ij} , çift farklanmış yalancı mesafe, $m(z_k)$ ve $m(z_l)$, k ve l istasyonlarının zenit açısına bağlı olarak izdüşüm fonksiyon değerleri, z_k ve z_l , k ve l istasyonlarının zenit açıları, c , ışık hızı, $N1_{kl}^{ij}$ ve $N2_{kl}^{ij}$, çift fark faz belirsizliği, ϵ_{kl}^{ij} gürültüyü ifade eder. En Küçük Kareler yöntemi kullanılarak, ZTD, koordinatlar ve belirsizlik gibi bilinmeyen parametreler tahmin edilebilir. Çift fark yöntemi, GNSS işleme tekniği ile troposferik gecikmelerin elde edilmesini sağlar, ancak bu süreçte bazı bilgiler kaybedilebilir (Jin vd., 2014).

PPP yöntemi ile ZTD, uydu-alıcı konumları, saat hataları gibi parametrelerin yüksek hassasiyetle tahmin edilmesi sağlanır. Bu yöntemde, kesin yörünge ve uydu saat bilgileri,

genellikle IGS gibi ağırlar tarafından sağlanır. Yer tabanlı GNSS Meteorolojisinde temel amaç, GNSS istasyon ağılarından kestirilen ZTD'den PWV belirlemektir (Jin vd., 2014; Jin, 2024).

GNSS alıcıları, GNSS uydularından gelen taşıyıcı sinyallerin fazını ölçerek interferometrik faz ölçümleri gerçekleştirir. Bu ölçümler, uydu ile alıcı arasındaki mesafeyi belirlemek için kullanılır. Ancak bu mesafenin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için, gözlemleri işleyen GAMIT, Bernese gibi yazılımların bir dizi karmaşık görevi yerine getirmesi gerekir. Bu yazılımlar; uyduların yörünge parametrelerini çözmeli veya modellemeli, verici ve alıcı konumlarını çözmeli, iyonosferik gecikmeleri hesaba katmalı, faz döngüsü belirsizliklerini ve saat kaymalarını çözmeli ve ayrıca ilgilenilen troposferik gecikme parametrelerini çözmelidir (Jin vd., 2014; Jin, 2024).

ZTD, uydu zenit açısına bağlı izdüşüm fonksiyonları kullanılarak da belirlenir. Bu kapsamda, jeodezici ve meteorologlar tarafından farklı izdüşüm fonksiyonları geliştirilmiştir. İlk olarak, geliştirilen Herring İzdüşüm Fonksiyonu; enlem, yükseklik ve yüzey sıcaklığı gibi parametrelere dayalı olarak hidrostatik ve ıslak bileşenler için uygulanabilir bir yapı sunar (Marini, 1972; Herring, 1992). Daha sonra geliştirilen Niell İzdüşüm Fonksiyonu, bir yıl boyunca yapılan radyosonda gözlemlerine dayanarak deneysel bir model sağlar. Bu model; gözlem yerinin yılı, enlemi ve deniz seviyesinden yüksekliği gibi parametrelere bağlıdır. Islak bileşenler ise yalnızca enleme bağlı olarak tanımlanır (Niell, 1996). Viyana İzdüşüm Fonksiyonları ise ECMWF'nin 40 yıllık yeniden analiz verilerinden türetilmiş katsayılara dayanır ve ıslak bileşenler için Niell modeliyle uyumludur (Boehm ve Schuh, 2004). Global İzdüşüm Fonksiyonu, yılın günü ve yer koordinatlarına bağlı giriş parametreleri kullanılarak geliştirilmiştir ve Viyana Haritalama Fonksiyonları ile tutarlı bir yapı sunar (Boehm vd., 2006). Tüm bu modeller, atmosferik etkilerin daha doğru bir şekilde modellenmesi ve ZTD'nin hassas bir şekilde belirlenmesi için önemli bir rol oynar (Jin vd., 2014; Jin, 2024).

- Zenit Hidrostatik Gecikme, ZHD

ZTD çözümlemesinden sonra ZHD elde edilir. ZHD yüzeydeki atmosfer basıncıyla ilişkilidir ve

$$ZHD = 0.002277 \frac{P_s}{f(\phi, H)} \quad (37)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada P_s , toplam yüzey basıncı (hPa) ve $f(\varphi, H)$, yerel yerçekimini düzeltmek için kullanılan bir faktördür. Bu faktör,

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.00028H \quad (38)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada, φ enlem (radyan) ve H ise elipsoidal yükseklik (km) olarak ifade edilir (Baltink vd., 2002; Jin 2024).

- Zenit Islak Gecikme, ZWD

ZWD'nin elde edilmesi için ZTD değerinden ZHD değeri

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (39)$$

eşitliğinde ifade edildiği gibi çıkarılır. ZWD değeri elde edildiğinde, PWV tahmini,

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (40)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v [(k_3/T_m) + k'_2]}$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada, ρ_w sıvı suyun yoğunluğu (kg/m^3), R_v su buharı için özel gaz sabiti (J/kgK), k_3 (K^2/hPa) ve k'_2 fiziksel sabit değerler (K/hPa), T_m atmosferin ağırlıklı ortalama sıcaklığı (K) olarak ifade edilir. (31) eşitliğindeki k'_2

$$k'_2 = k_2 - mk_1 \quad (41)$$

şeklinde ifade edilir (Bevis vd., 1994; Lutz, 2008). Burada, m değeri

$$m = \frac{M_v}{M_d} \quad (42)$$

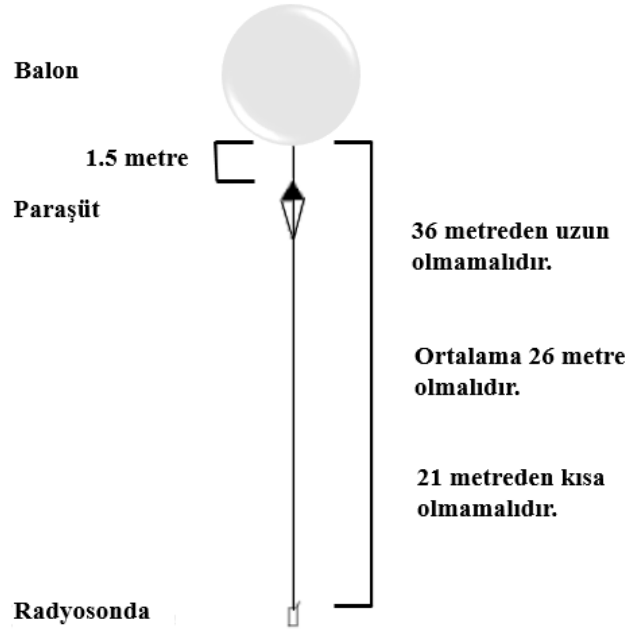
eşitliğinde verilen M_v , su buharının molar kütesinin, M_d kuru havanın molar kütesine oranıdır. T_m ise

$$T_m = \frac{\int (P_w/T) dh}{\int (P_w/T^2) dh} \quad (43)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, P_w kısmi su buharı basıncı (hPa) ve T sıcaklık (K) olarak tanımlanır. Yerel yüzey sıcaklığı ve basınç verilerinin eksik olduğu durumlarda NWP modellerinin yeniden analiz ürünleri kullanılarak P_s ve T_m hesaplanmaktadır (Lutz, 2008; Jin vd., 2014).

1.9.2. Radyosonda

Radyosonda, basınç, sıcaklık, nem gibi meteorolojik değişkenlerin dikey profilini ölçen ve bu verileri yer tabanlı bir alıcı ve işleme istasyonuna ileten, balonla taşınan bir cihazdır. Küçük ve hafif yapıdaki bu cihaz, hava durumu ölçüm cihazları ve bir radyo vericisi ile donatılmıştır. Cihazın ucunda, helyum gazı ile şişirilmiş bir balon ve ona bağlı bir paraşüt bulunur (WMO, 2008; URL-9, 2024) (Şekil 14).

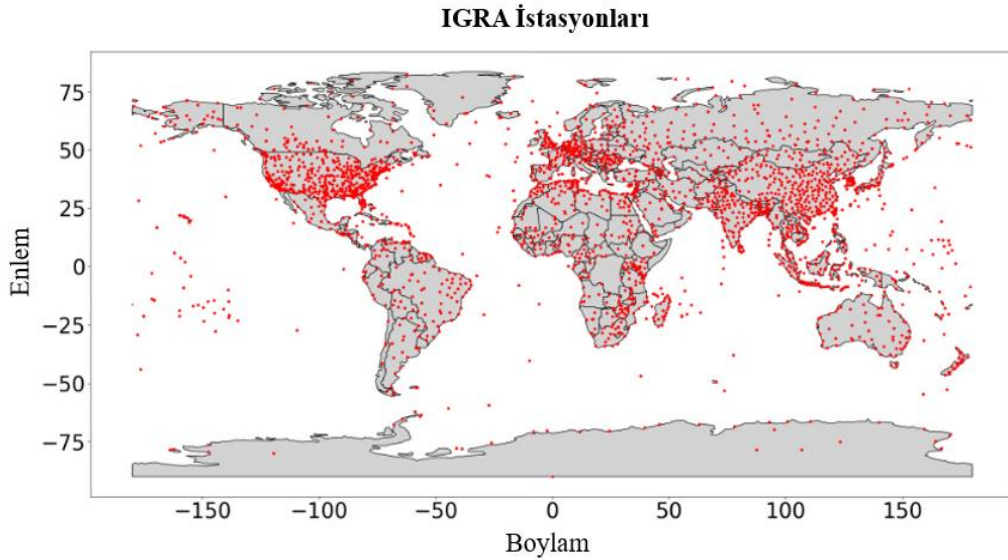


Şekil 14. Radyosonda uçuş takımı

Radyosonda ölçüm sisteminde balon yükseldikçe, radyosonda kutusundaki termometre ile sıcaklık, karbon kaplı bir plaka üzerinden geçen elektrik akımı ile nem ve barometre ile hava basıncı ölçülür. Bu veriler, radyo vericisi aracılığıyla yer istasyonuna

iletilir ve bir bilgisayar tarafından hızla meteorolojik verilerine dönüştürülür. Eğer cihazın yükselme sırasında konum değişiminden elde edilen açı değerleri kullanılarak rüzgar hızı ve yönü de hesaplanırsa, bu ölçüm sistemi ravinsonde olarak adlandırılır. Radyosonda veya ravinsonde gözlemleri, yeryüzünden yaklaşık 30-35 km yüksekliğe kadar atmosferik verilerin toplanmasında yaygın olarak kullanılır. Balon, yükseldikçe basıncın azalmasıyla genişler ve patlar, ardından kontrollü şekilde paraşütle yeryüzüne iner (Ahrens, 2012; URL-9, 2024).

Radyosonda gözlemleri, genellikle 00:00 UTC ve 12:00 UTC olmak üzere her gün iki kez alınır (TOB, 2021). WMO'nun Dünya Hava Durumu İzleme Programı'na üye ülkeler bu verileri birbirleriyle serbestçe paylaşır. Bir operasyonel üst atmosfer ölçümü tamamlandıktan kısa bir süre sonra, standart bir veri mesajı hazırlanır ve Global Telekomünikasyon Sistemi (Global Telecommunication System, GTS) aracılığıyla tüm ülkelere sunulur. Entegre Küresel Radyosonda Arşivi (Integrated Global Radiosonde Archive, IGRA), dünya genelinde gerçekleştirilen radyosonda gözlemlerini bir araya getiren bir veri tabanıdır. Bu arşiv, 1905 yılından itibaren ölçüm yapan yaklaşık 2800 RS ile pilot balon gözlemlerini içermektedir (URL-10, 2024) (Şekil 15).



Şekil 15. IGRA istasyonları

Radyosonda gözlemleri, PWV hesaplamada temel bir veri kaynağıdır. Bu gözlemler, havanın nem taşıma kapasitesini ve yoğunlaşma süreçlerini analiz etmeye olanak tanır. Sıcaklık arttıkça, havanın taşıyabileceği maksimum su buharı miktarı da artar. Yeryüzünden

buharlaşarak atmosfere karışan su buharı, havanın taşıma kapasitesini aştığında yoğuşma süreci başlar. Bu yoğuşma, havadaki su buharının mevcut kısmi basıncında doymunluğa ulaşmasıyla gerçekleşir. Bu noktada su buharı, çiğlenme sıcaklığı veya çiğlenme noktası olarak adlandırılan bir sıcaklıkta yoğuşmaya başlar. Çiğ sıcaklık ile

$$e_s = 6.11 \cdot 10^{\left(\frac{7.5 \cdot T_d}{237.3 + T_d}\right)} \quad (44)$$

$$e_s(T_d) = P_w$$

eşitliğinden doymuş buhar basıncı hesaplanabilir (Gürbüz, 2015). Hava kütlesi doymun hale geldiğinde, su buharının kütlesi kuru hava kütlesine oranı ile özgül nem değeri hesaplanabilir. Özgül nem değeri, karışım oranı olarak da adlandırılabilir ve

$$q = \frac{m_v}{m_d} = \frac{0.622 P_w}{P - P_w} \cong 0.622 \frac{P_w}{P} \quad (45)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, P toplam basınç, P_w kısmi su buharı basıncı olarak ifade edilir. Özgül nem değerine bağlı olarak, P_0 ve P basınçlarıyla sınırlandırılan bir tabaka içinde bulunan PWV

$$PWV = \frac{1}{g} \int_p^{P_0} q \, dp = \frac{1}{g} \int_p^{P_0} 0.622 \frac{P_w}{P} \, dp = \frac{0.622}{g} \int_p^{P_0} P_w \, d(\ln p) \quad (46)$$

eşitliğinden hesaplanabilir (Raudkivi, 2013).

1.9.3. Mikrodalga Radyometrisi

MWR, dalga boyu bir milimetreden bir metreye kadar uzanan mikrodalgaları ölçen bir cihazdır. 0.3 ile 300 GHz arasındaki geniş bir frekans aralığında çalışan bu cihazlar, termal olarak yayılan elektromanyetik radyasyonu yüksek hassasiyetle algılamak için tasarlanmıştır. Genellikle birden fazla alıcı kanala sahip olan MWR'ler, gezegen atmosferlerinin, yüzeylerin veya dünya dışı nesnelerin kendine özgü emisyon spektrumlarını analiz etmekte kullanılır (Mavrovic vd., 2023; URL-11, 2024) (Şekil 16).



Şekil 16. Mikrodalga radyometre cihazı

MWR'ler uzaktan algılama, hava tahmini, iklim değişikliğinin izlenmesi, radyo astronomisi ve radyo dalga yayılımı gibi pek çok alanda geniş uygulama alanı bulmaktadır. Bu cihazlar ile ölçülen radyasyon, parlaklık sıcaklığına dönüştürülür. Parlaklık sıcaklığı, atmosferdeki su buharı miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Atmosferdeki su buharı, belirli mikrodalga frekanslarında elektromanyetik radyasyon yayar. Yaklaşık 22 GHz civarındaki emilim hattı ise, su buharı miktarını belirlemede en yaygın kullanılan aralıktır. Bununla birlikte, 183 GHz gibi daha yüksek frekanslarda çalışan radyometreler, özellikle kuru atmosfer koşullarında su buharı profilini ölçmek için tercih edilir (Karmakar, 2014; Bell vd., 2025; URL-11, 2024).

MWR sistemi yer ve uydu tabanlı olmak üzere iki farklı şekilde tasarlanmıştır. Yer tabanlı MWR sisteminde, yeryüzünde sabit istasyonlara kurulan radyometreler bulunur. Bu cihazlar, atmosferin alt katmanlarındaki su buharı ve diğer parametreleri sürekli olarak izler. Elde edilen veriler, doğrudan bağlı oldukları veri toplama sistemlerine aktarılır. Yer tabanlı MWR sistemleri genellikle pasif ölçüm yaparak doğal olarak yayılan mikrodalga radyasyonu algılar. Özellikle bölgesel gözlemler için bu ölçümler, frekans bağımlılığı ve yerel meteorolojik veriler yardımıyla PWV miktarına dönüştürülür. Bununla birlikte, cihazlar nispeten pahalıdır ve orta veya şiddetli yağmur sırasında ölçüm kalitesi büyük ölçüde azalır (Chiswell vd., 1994; Ning, 2012; Jin, 2024; Bell vd., 2025).

Uydu tabanlı MWR sisteminde, atmosferik su buharı, nem profilleri, bulut sıvı su içeriği ve yağış gibi parametrelerin belirlenmesi için çeşitli MWR sensörleri farklı uydu platformlarına entegre edilmiştir. AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit), NOAA ile MetOp serisi uydularında bulunmaktadır. SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) ise ABD'nin Savunma Meteoroloji Uydusu Programı (DMSP) kapsamındaki uydularında bulunmaktadır. AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), Japonya'nın GCOM-W1 uydusunda konumlandırılmıştır. MWHS (Microwave Humidity Sounder), Çin'in FY-3 uydularında kullanılmaktadır. SAPHIR (Sondeur Atmospherique du Profil d'Humidite Intertropicale par Radiometrie), Hindistan ve Fransa'nın ortak misyonu olan Megha-Tropiques uydusunda yer almaktadır. TMI (TRMM Microwave Imager) ise NASA ve Japonya'nın ortak geliştirdiği TRMM uydusuna entegre edilmiştir (Weng, 2007; Alsweiss vd., 2015; Dai vd., 2015; URL-11, 2024; URL-12, 2024; URL-13, 2024).

Uydu tabanlı MWR sisteminde, genellikle pasif ölçüm yöntemi kullanılır. MWR sensörleri, atmosferin farklı seviyelerinden gelen mikrodalga radyasyonu algılar ve su buharı tarafından yayılan, yeryüzünden ve bulutlardan yansıyan, atmosferdeki gazlar tarafından emilip tekrar yayılan sinyalleri ölçer. Uydu sensörleri tarafından ölçülen parlaklık sıcaklığı değerleri, radyatif transfer modelleri ve inversiyon algoritmaları kullanılarak su buharı miktarı, nem profili ve bulut sıvı su içeriği gibi atmosferik parametrelere dönüştürülür. Uydu tabanlı MVR'ler ile küresel ölçekte gözlemler yapılır. Bu sistem, okyanuslar üzerinde etkili sonuçlar verir (Simmer, 1999).

1.10. Uzay Tabanlı Atmosferik Su Buharı Ölçümleri

Uzay veya uydu tabanlı yöntemler, küresel ölçekte atmosferik su buharı dağılımını analiz edebilmek için güçlü bir araç sunar. Dünya'nın farklı yörüngelerinde hareket eden meteoroloji ve araştırma uyduları, pasif ve aktif algılama teknikleriyle elde ettikleri verilerle atmosferin farklı katmanlarındaki su buharı miktarını sürekli olarak ölçebilir. Bu sayede küresel ölçekli hava tahmin modellerine veri sağlanmasının yanı sıra iklim değişikliğiyle ilgili uzun dönemli gözlem ve analizler de gerçekleştirilebilir. Uydu tabanlı ölçümlerin en büyük avantajı, yeryüzünün büyük bir kısmına hızlı ve düzenli erişim imkânı sunmasıdır. Ancak, ölçümlerin hassasiyetini hava koşullarından etkilenebilir. Bu bölümün alt başlıklarında, uzay veya uydu tabanlı başlıca yöntemlerden GNSS-RO ve MODIS açıklanmıştır.

1.10.1. GNSS-RO Meteorolojisi

GNSS-RO tekniğinin detaylı açıklamaları 1.6 ve 1.7 başlıklı bölümlerde verilmiştir. Bu bölümde, GNSS-RO atmosferik profillerden PWV ölçülerinin türetilmesi açıklanmıştır. GNSS-RO tekniği veri işleme süreci sonunda nemli atmosfer için türetilen P_w profillerinden yararlanarak PWV hesaplanabilir. Bu kapsamda, P ve P_w profillerinden

$$q = \frac{\varepsilon * P_w}{P - P_w * (1 - \varepsilon)} \quad (47)$$

eşitliği ile ifade edilen q , özgül nem profilleri türetilir. Burada, ε değeri 0.622 g/kg'a eşittir. Atmosfer, yüzeyden üst irtifalara kadar çeşitli katmanlara ayrılır. Bu nedende, basınca bağlı olarak PWV,

$$PWV = -\frac{1}{g} \int_{P(Z_0=0)}^{P(Z)} q_h(p) dz \cong -\frac{1}{g} \sum_{i=1}^N \overline{q_{h,i}} \Delta p \quad (48)$$

eşitliği ile ifade edilebilir ve hesaplanabilir. Burada, Z_0 , başlangıç seviyesi olarak seçilen yüzey irtifasıdır ve genellikle 0 olarak kabul edilir. Z ise genellikle troposferin üst sınırı veya atmosferin üst sınır irtifadır (Zhang vd., 2018a, 2018b; Fonseca vd., 2018; Srivastava ve Kumar 2021). (48) eşitliğindeki ortalama özgül nem $\overline{q_{h,i}}$,

$$\overline{q_{h,i}} = \frac{q_{h,i-1} + q_{h,i}}{2} \quad (49)$$

eşitliği ile hesaplanır (Zhang vd., 2018b).

GNSS-RO tekniği ile PWV hesaplanmasında kullanılan atmosferik profiller, veri işleme merkezleri tarafından kullanıcılara sunulmaktadır. Bu kapsamda, dünya genelinde faaliyet gösteren ve önde gelen çeşitli veri işleme merkezleri bulunmaktadır (Tablo 4).

Tablo 4. GNSS-RO veri işleme merkezleri

Veri İşleme Merkezi	Kısaltma	Ülke
Danimarka Meteoroloji Enstitüsü	DMI	Danimarka
Avrupa Meteorolojik Uyduları İşletme Teşkilatı	EUMETSAT	Almanya
Alman Yerbilimleri Araştırma Merkezi	GFZ	Almanya

Tablo 4'ün devamı

Veri İşleme Merkezi	Kısaltma	Ülke
Jet Propulsion Laboratuvarı	JPL	Amerika
Atmosferik Araştırma Üniversite Kurumu	UCAR	Amerika
Wegener Merkezi / Graz Üniversitesi	WEGC	Avusturya

UCAR veri işleme merkezi, özellikle tarihsel öncülüğü ve modern GNSS-RO veri işleme süreçlerindeki liderliğiyle öne çıkmaktadır. GNSS-RO tekniğinin ilk deneysel projesi olan GPS/MET, 1996 yılında UCAR liderliğinde ve JPL (Jet Propulsion Laboratory) iş birliğiyle Microlab-1 uydusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. UCAR'ın, geniş veri kapasitesi ve deneysel projelerdeki liderliği, GNSS-RO tekniğinin gelişiminde ve yaygınlaşmasında önemli bir rol oynamıştır.

UCAR CDAAC, RO ürünlerini level 0, level 1a, level 1b, level 2 olmak üzere dört ayrı seviyede sunmaktadır. Veriler, ABD ve Tayvan veri işleme merkezleri tarafından yayınlanır. Level 0, işlenmemiş verileri içerir. Level 1a, ham verilerden elde edilen ve uydu pozisyonu, yönelim gibi temel bilgilerle ilgilidir. Level 1b, daha ileri işlenmiş verileri içerir ve yörünge bilgileri ile atmosferik faz değişikliklerini sağlar. Level 2, atmosferik verilerin daha ileri analiz ve yorumlama için işlenmiş hallerini içerir. Bu seviyelerin dosya türleri de çeşitli şekilde sınıflandırılır (URL-4, 2024) (Tablo 5).

Tablo 5. UCAR CDAAC RO ürünleri

Dosyalar	Veriler	Dosya Formatı
Level 0	Ham veriler	binary
Level 1a	Uydu konum bilgileri	leoAtt
	Hassas yörünge belirleme anteni izleme verileri	podCrx
	RO anten izleme verileri	opnGns
Level 1b	Hassas yörünge belirleme çözümleri	sp3
	Mutlak toplam elektron içerikleri verileri	podTc2
	Atmosferik faz bilgileri	conPhs
Level 2	Atmosferik profil bilgileri	atmPrf
	Atmosferik profil bilgileri	wetPf2
	Atmosferik profil bilgileri	bfrPrf

Tablo 5'te Level 2 atmPrf formatlı atmosferik profil bilgileri, sıcaklık, basınç, kırıcılık, etki parametresi, bükülme açısı, teğet nokta konumu, perigee noktasının ortalama deniz seviyesinden yükseklik bilgilerini içermektedir. Level 2 wetpf2 formatlı atmosferik profiller, geometrik yükseklik, enlem, boylam, jeopotansiyel yükseklik, sıcaklık, basınç, su buharı

basıncı, özgül nem, bağıl nem, kırıcılık, kuru sıcaklık ve kuru basınç profillerini içermektedir (URL-4, 2024). GNSS-RO PWV hesabı için Level 2 wetpf2 ıslak profiller kullanılır.

1.10.2. Orta Çözünürlük Spektrometre Görüntüleme Uydu Sensörü

MODIS, Dünya ve iklim ile ilgili ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılan uydu tabanlı bir sensördür. NASA tarafından geliştirilen MODIS sensörleri, 1999 yılında fırlatılan Terra ve 2002 yılında fırlatılan Aqua uydularında yer almıştır. Terra ve Aqua uydularındaki MODIS sensörleri, Güneş ile senkronize çalışan, kutuplar üzerinde dönen bir yörüngeye sahiptir ve ölçümlerini yalnızca güneş radyasyonundan faydalanarak gerçekleştirir. Bu sistem, 0.4 mikrometre ile 14.4 mikrometre arasındaki dalga boylarını kapsayan toplamda 36 spektral banta sahiptir. MODIS sensörünün konumsal çözünürlüğü, farklı bantlara göre değişiklik göstermektedir. Bant 1 ve Bant 2, 250 metre çözünürlük sunarak yüzeydeki detayların yüksek hassasiyetle gözlemlenmesine olanak tanır. Bant 3 ile Bant 7 arasında bu çözünürlük 500 metre olarak sağlanırken, Bant 8'den Bant 36'ya kadar olan bantlar için çözünürlük 1000 metre seviyesindedir. Zamansal çözünürlük ise 1 gün veya 2 günde bir olacak şekilde değişmektedir. MODIS, yakın kızılötesi bantları kullanarak atmosferdeki su buharını ölçme yeteneğine sahiptir. Bant 17 (905 nm), Bant 18 (936 nm) ve Bant 19 (940 nm), su buharı emiliminin yoğun olduğu spektral bölgelerde çalışarak su buharının hassas bir şekilde tespit edilmesine olanak tanır (Cao, 2020; URL-14, 2024; URL-15, 2024).

MODIS verilerinin en önemli özelliklerinden biri, gerçek zamanlı ve gerçek zamana yakın formatlarda erişilebilir olmasıdır. Dünya genelindeki doğrudan yayın istasyonları, MODIS sensörlerinden gelen ham verileri, uydudan gerçek zamanlı olarak indirir ve işlemler. Buna ek olarak, NASA'nın Dünya Gözlem Sistemi (Earth Observing System, EOS) kapsamında geliştirdiği LANCE sistemi, uydu gözlemlerinden itibaren üç saat içinde çeşitli MODIS veri ürünlerini araştırmacılara sunar. Bu yaklaşım, özellikle hızlı yanıt gerektiren durumlarda, örneğin afet yönetimi, hava durumu tahminleri ve çevresel olayların izlenmesi gibi alanlarda büyük bir avantaj sağlar (URL-15, 2024).

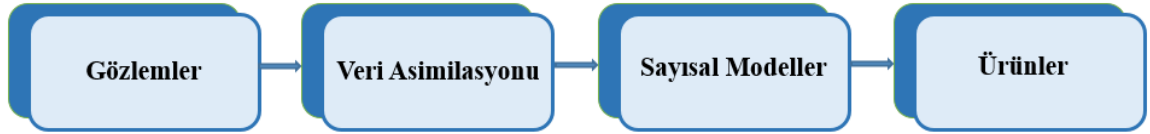
MODIS tarafından sağlanan veri ürünleri, NASA'nın EOS kapsamında geliştirdiği Veri ve Bilgi Sistemi (EOSDIS) aracılığıyla araştırmacıların kullanımına sunulmaktadır. Bu veri ürünleri, atmosferik ve çevresel çalışmalarda kullanılmak üzere beş ana kategoriye ayrılmıştır. Bunlardan; MOD04 aerosol ürünleri, MOD05 toplam su buharı ürünü, MOD06

bulut ürünleri, MOD07 sıcaklık, basınç, nem profilleri gibi atmosferik ürünleri, MOD35 bulut maskesi ürünleri ile ilgilidir (URL-15, 2024).

MODIS sensörleri, uzun yıllar boyunca Dünya'nın atmosfer, kara ve okyanus sistemlerini izlemek için kullanılmıştır. Ancak, bu sensörlerin yerini 2011 yılında Suomi NPP uydusuyla birlikte fırlatılan VIIRS almıştır. MODIS sensörleri hâlâ aktif durumdadır ve veri sağlamaktadır. Ancak VIIRS sensörleri, MODIS'in ana gözlem görevlerini büyük ölçüde devralmıştır (URL-14, 2024).

1.11. Sayısal Hava Tahminleri ile Su Buharı Ölçümleri

NWP, atmosferin basınç, sıcaklık, rüzgâr ve su buharı gibi durumunu belirleyen değişkenlerin matematiksel ve fiziksel denklemlerle ifade edilmesi ve bu denklemlerin çözümleriyle gelecekteki hava koşullarının öngörülmesi sürecidir. Dünyanın dönüş hareketi ve güneşten gelen ışınların etkisiyle, atmosfer, kara ve denizler arasında gün boyunca oldukça karmaşık etkileşimler meydana gelir. Kısa zaman aralıklarında ve yüksek konumsal çözünürlükte bu karmaşık süreçleri analiz ederek hava hareketlerini tahmin etmek için geliştirilen ve atmosferdeki fiziksel süreçleri simüle eden özel yazılımlar model olarak adlandırılmaktadır. Modeller ile hava tahmini süreci, dört gruba ayrılabilir (Abualkishik, 2018; TOB, 2021) (Şekil 17).



Şekil 17. NWP süreci

Yer istasyonları, radyosondalar, uydular, radarlar, deniz şamandıraları gibi çeşitli araçlar kullanılarak yapılan meteorolojik gözlemler, NWP modellerinin başlangıç verisi olarak kullanılır. Ancak, bu gözlemler genellikle hatalı veya eksik olabileceği için model tahminlerini doğrudan bu verilere dayanarak başlatmak mümkün değildir. Bu nedenle, gözlemler, modelin önceki çıktıları veya başka güvenilir veri kaynaklarıyla birleştirilir ve analiz süreciyle güncellenir. Veri asimilasyonu olarak adlandırılan bu süreç, tahminlerin doğruluğunu artırmada kritik rol oynar. Atmosferin fiziksel süreçlerini simüle eden sayısal modeller, bu analizlere dayanarak gelecekteki hava hareketlerini ve koşullarını hesaplar.

Elde edilen sonuçlar, kısa ve orta vadeli hava tahminlerinin hazırlanmasında kullanılır (TOB, 2021).

NWP modelleri, atmosferin farklı seviyelerinde sıcaklık, basınç, nem gibi parametreleri simüle ederek PWV değerlerini hesaplayabilir. Modelin başlangıç koşullarının veri asimilasyonu ile güncellenmesi, PWV tahminlerinin güvenilirliğini artırarak eksik veya hatalı gözlemlerden kaynaklanan belirsizlikleri minimize eder. Özellikle, geniş alanlarda ve kısa zaman aralıklarında PWV tahmini sunabilen NWP modelleri, atmosferde PWV dağılımının konumsal ve zamansal değişimlerini izlemeye olanak sağlar. Bunla birlikte, gerçek zamanlı PWV tahminleri, hava durumu tahminlerinden iklim modellerine ve afet yönetimine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bununla birlikte, ekstrem hava olaylarının önceden tahmin edilmesi, kuraklık ve nem dengesinin izlenmesi gibi kritik konularda, NWP modelleri tarafından türetilen PWV verileri önemli bir analiz aracı olarak değerlendirilmektedir.

NWP modelleri genellikle üç boyutlu bir grid kullanılarak çözülür ve global ve sınırlı alan tahmin modelleri olarak iki grupta incelenebilir (TOB, 2021; Kazancı, 2021; URL-16, 2024).

1.11.1. Global Sayısal Hava Tahmin Modelleri

Tüm dünya için hava tahmin yapan global modellerde yatay çözünürlük, spektral ve grid olarak çözümlenir. Spektral yöntemde, yatay çözünürlük dalga sayısı ile orantılı iken grid yöntemde, yatay çözünürlük iki grid noktası arasındaki mesafeyle orantılıdır. Global modellerde, basit hidrostatik denge eşitliği kullanılır ve düşey ivme hesaplamaları ihmal edilir. Dünyada yaygın olarak kullanılan global modeller ve geliştirildiği ülkeler;

- IFS (ECMWF)
- UM (İngiltere)
- ICON (Almanya)
- ARPAGE (Fransa)
- GFS (ABD)
- GEM (Kanada)
- JMA (Japonya)

olarak sunulabilir (TOB, 2021; Kazancı, 2021; URL-16, 2024).

1.11.2. Sınırlı Alan Sayısal Hava Tahmin Modelleri

Sınırlı alan modelleri, belirli bir alanda, daha ince grid aralığında diğer bir ifadeyle daha yüksek çözünürlükte çalıştırılan ve lokal olayların tespitinde kullanılan modellerdir. Bu sayede daha küçük ölçekli meteorolojik olayları daha ayrıntılı şekilde çözümleyebilir. Sınırlı alan modellerinin bazıları hidrostatik dengeyi kabul ederken, bazıları bu dengeyi kabul etmez. Dünyada yaygın olarak kullanılan sınırlı alan modelleri ve geliştirildiği ülkeler;

- ALADIN/ALARO/AROME (ACCORD Konsorsiyumu)
- ETA, MM5, WRF (ABD)
- LM (Almanya ve COSMO Konsorsiyumu)
- HIRLAM (HIRLAM Konsorsiyumu)

olarak sunulabilir (TOB, 2021; Kazancı, 2021; URL-16, 2024).

1.11.3. Türkiye’de Kullanılan Sayısal Hava Tahmin Modelleri

Türkiye’de NWP çalışmaları kapsamında, kısa vadeli tahminler için ALADIN, WRF ve MM5 modelleri, orta ve uzun vadeli tahminler için ECMWF-IFS modelleri, denizcilik ve dalga tahminleri için ise METU-3, WW3 ve SWAN dalga modelleri kullanılmaktadır. Bu modeller, çeşitli ölçeklerde hava olaylarının ve denizcilik parametrelerinin hassas bir şekilde öngörülmesine olanak sağlar.

- ALADIN

ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International), AROME ve ALARO modellerini barındıran ve bu modellerin başlangıç ile sonuç verilerini işlemek için gerekli olan araçları da kapsayan entegre bir sistemdir. ALADIN, yaklaşık 10 km yatay çözünürlüğe sahip, kartezyen grid yapısında, sınırlı bir alan üzerinde çalışan, bi-periyodik ve hidrostatik bir hava tahmin modelidir. AROME ve ALARO, ALADIN modelinin non-hidrostatik versiyonlarıdır. ALARO-1 ve AROME, ARPEGE modelinden sağlanan başlangıç ve sınır koşullarıyla çalışan, günlük dört kez güncellenen ve saatlik hava tahminleri üretebilen modellerdir. ALARO-1, 4.5 km yatay çözünürlükte 72 saate kadar tahminler sunarken, AROME 1.7 km yatay çözünürlükte ve 48 saate kadar tahmin yapma kapasitesine sahiptir (TOB, 2021; URL-16, 2024).

- WRF

Hava Araştırma ve Tahmin Modeli (Weather Research and Forecasting Model, WRF), Pennsylvania State Üniversitesi ve ABD'nin Ulusal Atmosfer Araştırma Merkezi (National Center for Atmospheric Research, NCAR) tarafından geliştirilmiştir. WRF modeli, yüksek çözünürlük kapasitesi, güçlü fiziksel parametризasyonlar ve detaylı topoğrafya seti sayesinde oldukça başarılı sonuçlar sunmaktadır. Model, geniş bir alanı düşük çözünürlükle simüle etme yeteneğinin yanı sıra, belirli alt bölgeleri daha yüksek çözünürlükle analiz edebilmek için iç içe geçmiş çoklu bölge yapılarını desteklemektedir. Özellikle 10 km ve daha küçük ölçeklerde (hidrostatik olmayan) çalışma kabiliyeti, yerel atmosferik süreçlerin daha hassas bir şekilde modellenmesini mümkün kılmaktadır. MGM tarafından 3 km çözünürlükte ve 72 saate kadar saatlik tahmin üretecek şekilde çalıştırılan WRF modeli, günde dört kez güncellenmektedir (Abualkishik, 2018; TOB, 2021).

- MM5

Beşinci Nesil Mezoskala Model (Fifth-Generation Mesoscale Model, MM5), NCAR tarafından geliştirilmiş olup, dünya genelinde birçok meteoroloji kuruluşu ve özellikle üniversiteler tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrostatik olmayan yapısıyla 10 km ve altındaki çözünürlüklerde etkili tahminler sunan bu model, Türkiye'de her gün 00:00, 06:00, 12:00 ve 18:00 UTC saatlerinde iki ayrı alanda, iki farklı çözünürlükte eşzamanlı olarak çalıştırılmaktadır. Kara bölgeleri için 21 km, denizler için ise 7 km çözünürlükle yapılan tahminler, 48 saate kadar uzanmaktadır (Abualkishik, 2018; TOB, 2021).

- ECMWF

ECMWF, 1975 yılında kurulmuş bağımsız bir uluslararası kuruluştur ve Türkiye'nin de dahil olduğu toplam 35 ülkenin üyelik ve iş birliği desteğiyle faaliyet göstermektedir. ECMWF, dünyanın en doğru küresel tahmin modeli olarak bilinir. Aynı zamanda dünyanın en büyük süper bilgisayarlarından birine ve geniş bir meteorolojik veri arşivine sahiptir. Bu modelin temelinde, Entegre Tahmin Sistemi (Integrated Forecasting System, IFS) adı verilen sayısal model ve veri asimilasyon sistemi yer alır. IFS, birbirine çeşitli şekillerde entegre edilen birkaç temel alt sistemden oluşmaktadır. Bu alt sistemler arasında tahminlerin çözünürlüğünü belirleyen küresel atmosfer modeli, okyanus dalga modeli, dinamik okyanus modeli, atmosfer modeli veri kaynakları, model veri asimilasyonu ve sürekli analiz dizisi bulunmaktadır (Abualkishik, 2018; URL-17, 2024). IFS sistemi, HRES (High Resolution Forecast) ve ENS (Ensemble Forecasts System) olmak üzere iki ana konfigürasyonla çalışır.

HRES, 9 km çözünürlükle yatay çözünürlükle 10 güne kadar, ENS ise 9 km yatay çözünürlükle 15 güne kadar tahmin üretir (URL-17, 2024).

ECMWF, küresel atmosferik tahminlerin geliştirilmesinin yanı sıra, geçmiş verilerin yeniden analizi alanında da önemli çalışmalar gerçekleştirmektedir. Yeniden analiz süreçlerinde, tahmin modelleri ve veri asimilasyon sistemleri kullanılarak arşivlenen gözlemler detaylı bir şekilde incelenir. Yeniden analiz veri setlerinden bazıları ERA5 (1940'dan günümüze), ERA-Interim (1979-31 Ağustos 2019), CERA-SAT (2008-2016), ERA-20C (1900-2010) ve ERA-40 (1957-2002) olarak sıralanabilir. Günümüzde ERA5, hem kapsamlı zaman dilimi, hem yüksek çözünürlüğü, hem de sunduğu detaylarla ECMWF'nin en önemli ve yaygın kullanılan yeniden analiz veri setidir. ERA-Interim ise özellikle ERA5 öncesinde yapılan çalışmalarda çok önemli bir yere sahiptir ve uzun dönem analizleri ve model doğrulama çalışmaları için hâlâ önemli bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Kazancı, 2021).

ERA5, ECMWF'nin beşinci nesil küresel yeniden analiz veri setidir ve Ocak 1940'tan günümüze kadar olan dönemi kapsamaktadır. Bu veri seti, Copernicus İklim Değişikliği Hizmeti tarafından üretilmiştir. ERA5, atmosferik, kara ve okyanus iklim değişkenlerinin saatlik tahminlerini sağlar ve Dünya genelini 31 km'lik bir yatay çözünürlük ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) ile kapsar. Atmosferde 137 basınç seviyesi sunar ve bu seviyeler 1000 hPa'dan 1 hPa'ya kadar uzanır. Yüzeyden 80 km yüksekliğe kadar atmosferik koşulları çözümleyebilen ERA5, tarihsel gözlemleri gelişmiş modelleme ve veri asimilasyon sistemleriyle birleştirerek küresel ve tutarlı bir veri kümesi oluşturur. ERA5, ERA-Interim'in yerini almıştır ve daha geniş bir zaman dilimi ile daha yüksek çözünürlük sunmaktadır (Kazancı, 2021; URL-17, 2024).

ERA-Interim, 1979'dan 31 Ağustos 2019'a kadar olan dönemi kapsayan bir küresel yeniden analiz veri setidir. Bu veri seti, yüzey parametreleri, okyanus dalgaları ve kara yüzeyi koşulları gibi çok çeşitli verileri içerir. Ayrıca, troposfer ve stratosferi kapsayan parametrelerle birlikte, yüzeyden 0.1 hPa'ya kadar 60 basınç seviyesinde atmosferik koşulları detaylı bir şekilde sunar. Yatay çözünürlüğü 79 km ($0.75^\circ \times 0.75^\circ$) olan ERA-Interim, gerçek zamanlı olarak güncellenmiş, ancak 31 Ağustos 2019'da üretimi durdurulmuştur (Kazancı, 2021; URL-17, 2024).

- METU-3 Yerel Dalga Tahmin Modeli

METU-3 Yerel Dalga Tahmin Modeli, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kıyı ve Liman Mühendisliği tarafından NATO'nun (Science for Stability) Programı kapsamında geliştirilen

bir projedir. Üçüncü nesil bir model olan METU-3, rüzgârların oluşturduğu dalgaların tahmini için kullanılmakta olup, hem sığ sularda hem de derin denizlerde herhangi bir modifikasyona ihtiyaç duymadan başarılı sonuçlar sağlamaktadır. Karadeniz, Akdeniz, Ege, Marmara Denizi, Van Gölü ve Hazar Denizi gibi bölgelerde kullanılan model, rüzgâr ve dalga değerlendirmelerine yönelik ekonomik ve bilimsel ihtiyaçları karşılamaktadır. ECMWF'den alınan 10 metre rüzgâr hızı verileriyle çalışan METU-3, yaklaşık 25 km çözünürlükte, 72 saatlik tahmin periyodu ve 3 saatlik tahmin aralığı ile dalga yüksekliği, yönü ve ortalama dalga periyodu gibi çıktılar sunmaktadır (TOB, 2021; URL-16, 2024).

- WW3 Dalga Tahmin Modeli

WW3 (WaveWatch III) Dalga Tahmin Modeli, NOAA tarafından geliştirilmiş olup, hem açık denizlerde hem de sığ sularda etkili bir şekilde kullanılabilir. Bu model, Türkiye'de MGM tarafından Şubat 2019'da kullanılmaya başlanmıştır ve her gün 00:00 ve 12:00 UTC saatlerinde çalıştırılmakta olup, başlangıç ve sınır koşulları ECMWF tarafından sağlanmaktadır. Model, Cebelitarık Boğazı'ndan Hazar Denizi'ne kadar uzanan tüm deniz alanlarını kapsamakta ve 3 km çözünürlükte, 5 günlük periyotlar için tahminler üretmektedir (TOB, 2021).

- SWAN

SWAN Kıyı Dalga Tahmin Modeli; kıyısız alanlar, koylar, körfezler, haliçler ve göller için geliştirilmiş üçüncü nesil spektral bir dalga tahmin modelidir. 00:00 ve 12:00 UTC olmak üzere günde iki kez çalıştırılan model, üçer saatlik aralıklarla 1 km çözünürlükte rüzgâr hızı ve yönü, belirgin dalga yüksekliği ve yönü, ayrıca dalga periyodu tahminleri üretmektedir. Tüm kıyı bölgelerimiz ve Van Gölü'nü kapsayan model, saniyede 160 trilyon işlem kapasitesine sahip 4032 çekirdekli bir bilgisayar sistemi üzerinden çalıştırılmaktadır. Bu altyapı, Karayolları Tahmin Sistemi, Deniz Yolu Tahmin Sistemi, Marina Tahmin Sistemi ve Hezarfen Havacılık Sayfaları gibi çeşitli uygulamalara destek sağlamaktadır. MGM'nin internet sitesinde sunulan bu uygulamalar, sınırlı alan tahmin modellerini kullanarak detaylı ve kapsamlı analizler sunmaktadır (TOB, 2021).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Alanlarının Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında, orta enlem kuşağında yer alan Türkiye’de bulunan 9 RS’den oluşan ağ, temel uygulama bölgesi olarak seçilmiştir. WMO, karasal bölgelerde RS’lerin 250 km, sık nüfuslu olmayan alanlarda ve okyanuslarda ise 1000 km aralıklarla kurulmasını önermektedir. Türkiye’deki, RS’ler ortalama 500 km mesafeyle bu standartlara uygun şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Türkiye’deki RS konumları ve WMO numaraları

Türkiye’deki RS’ler, kuzey enlemleri (K) ve doğu boylamlarında (D) yer almaktadır. Bu kapsamda RS’ler, Samsun (41.28°K , 36.33°D), İstanbul (40.90°K , 29.15°D), Ankara (39.95°K , 32.88°D), İzmir (38.43°K , 27.17°D), Isparta (37.75°K , 30.55°D), Diyarbakır (37.88°K , 40.18°D), Adana (37.00°K , 35.35°D), Erzurum (39.90°K , 41.28°D) ve Kayseri’de (38.69°K , 35.50°D) konumlanmıştır.

Bu tez çalışmasında yapılacak uygulamalar için uluslararası bir karşılaştırma da sağlayabilmek için orta enlem kuşağında yer alan Trapani/Birgi RS’de kullanılmıştır. İtalya’da tesis edilmiş olan Trapani/Birgi RS, 37.92°K ve 12.50°D konumunda bulunmaktadır.

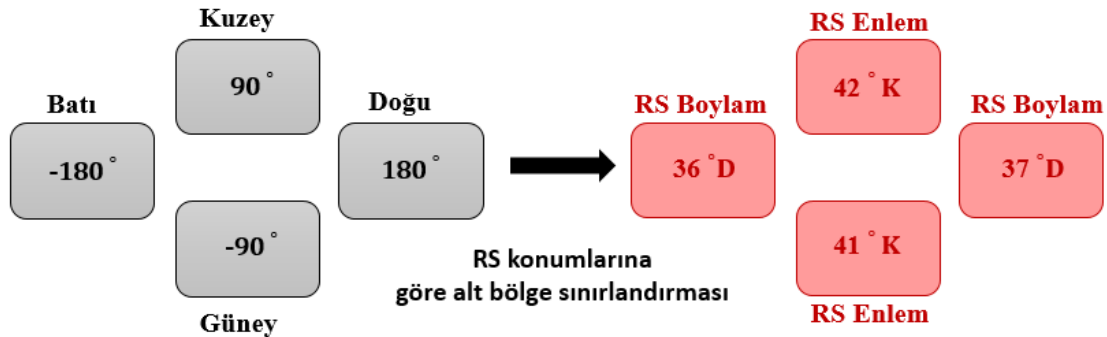
GNSS-RO verileri ile yapılacak uygulamalar için çalışma alanının belirlenmesi aşamasında, RS konumları referans alınmıştır. RO olaylarının meydana geldiği konumlar, RS konumlarının enlem ve boylamlarına göre yaklaşık olarak en fazla $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ konumsal fark içinde sınırlandırılmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. NOAA radyosonda veri tabanına göre RS konumları ve her bir RS için belirlenen GNSS-RO enlem ve boylam aralıkları

RS	RS Enlem (derece)	RS Boylam (derece)	RO Enlem (derece)	RO Boylam (derece)
Samsun	41.28 K	36.33 D	38 - 44	33 - 39
İstanbul	40.90 K	29.15 D	37 - 43	26 - 32
Ankara	39.95 K	32.88 D	36 - 42	29 - 35
İzmir	38.43 K	27.17 D	35 - 41	24 - 30
Isparta	37.75 K	30.55 D	34 - 40	27 - 33
Diyarbakır	37.78 K	40.18 D	34 - 40	37 - 43
Adana	37.00 K	35.35 D	34 - 40	32 - 38
Erzurum	39.90 K	41.28 D	36 - 42	38 - 44
Kayseri	38.69 K	35.50 D	35 - 41	32 - 38

ECMWF ERA5 yeniden analiz ürünleriyle yapılacak uygulamalar için çalışma alanı, RS konumlarının enlem ve boylam bilgilerine göre ilk aşamada yaklaşık bir yakınlıkta tanımlanmıştır. Bu kapsamda, Copernicus İklim Veri Deposu (Copernicus Climate Data Store, CDS) üzerinden global bölge baz alınarak, Türkiye için RS tabanlı alt bölge sınırlandırması yapılmıştır (Şekil 19).

ECMWF ERA5 Global ve Türkiye için RS Tabanlı Alt Bölge Sınırlandırması



(a) Global Bölge

(b) Samsun RS için Sınırlandırılmış Alt Bölge Örneği

Şekil 19. ECMWF ERA5 yeniden analiz verilerinin RS konumlarına göre sınırlandırılması

Şekil 19’da (a) kısmında global bölge sınırları belirtilmiş, (b) kısmında ise Samsun RS için örnek bir alt bölge sınırlandırması gösterilmiştir. Bu örnekte, Samsun RS’e en yakın olan 36°D - 37°D boylamları ve 41°K - 42°K enlemleri dikkate alınmıştır. ERA5 yeniden analiz verileri, $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ grid çözünürlüğüne sahip olduğu için ilk aşamada Şekil 19’da RS konumlarına yaklaşık olarak yapılan sınırlandırma, analizlerde hassasiyeti sağlamak amacıyla RS enlem ve boylamlarına en yakın farkı içeren konumda olacak şekilde belirlenmiştir.

2.2. Veri Temini

Radyosonda rasatları, genellikle balonun serbest bırakılmasıyla başlar ve uçuş süresince devam eder. Basınç, sıcaklık, nem ve rüzgar gibi meteorolojik parametreler, radyosondadan alınan ölçümlerle kaydedilir ve gelişmiş yazılımlar aracılığıyla meteorolojik verilere dönüştürülür. GTS’ye aktarılan bu veriler, MGM ve NOAA gibi kuruluşların arşivlerinde saklanır. Özellikle NOAA’nın IGRA sistemi, radyosonda verilerinin küresel ölçekte erişimini sağlayan önemli bir kaynaktır. WMO, radyosondaların günde dört kez rasat yapmasını tavsiye etse de ülkemizde bu rasatlar genellikle 00:00 UTC ve 12:00 UTC saatlerinde, günde iki kez yapılmaktadır. Bu çalışmada, radyosonda verilerinin temini için NOAA/ESRL veritabanı kullanılmıştır. Türkiye’deki radyosonda rasatlarına ait 00:00 UTC ve 12:00 UTC zamanlı meteorolojik veriler, <https://ruc.noaa.gov/raobs> web adresinden WMO numaraları girilerek ASCII formatında indirilmiştir. İndirilen radyosonda verileri, basınç, sıcaklık, çığ sıcaklık ve rüzgar bilgilerini içermektedir (Şekil 20).



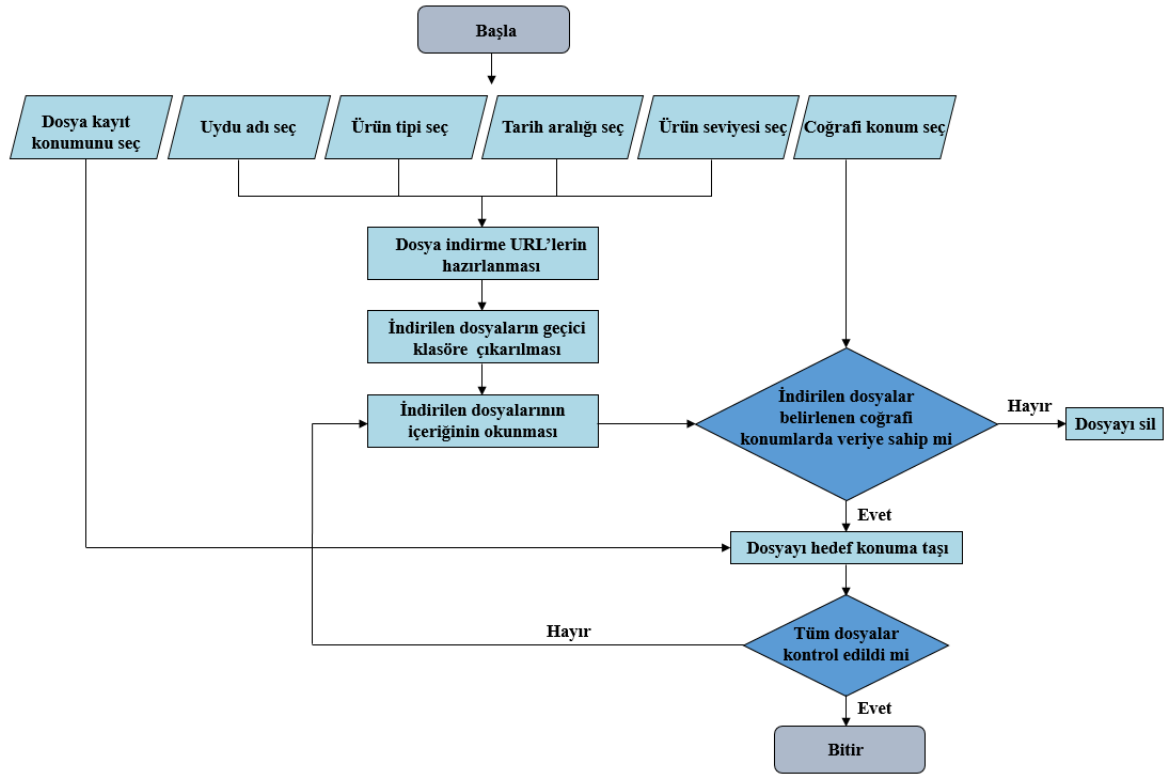
Şekil 20. Radyosonda veri temini

GNSS-RO verilerinin çeşitli uydu misyonlarından indirilmesi ve RS konumlarına göre coğrafi sorgulamaların yapılabilmesi için Python tabanlı bir veri indirme ve analiz programı

geliştirilmiştir. Bu program, PyQt5 tabanlı grafiksel kullanıcı arayüzüne sahip bir araçtır ve CHAMP, GRACE, METOP, TerraSAR-X, TanDEM-X, FORMOSAT-7/COSMIC-2 gibi farklı uydu misyonlarından Tablo 6’da belirlenen konumlarda RO veri indirme işlemini gerçekleştirmektedir. Programın ana işlevlerinden biri, kullanıcıların ilgilendikleri coğrafi bölgelerden veri çekmelerini sağlamaktır. Kullanıcılar, belirli bir başlangıç ve bitiş yılı ile başlangıç ve bitiş günlerini girerek ilgili tarihlerdeki GNSS-RO verilerini indirebilir. Ayrıca, program belirli bir uydu için varsayılan tarih aralıklarını da kullanarak veri indirme işlemi gerçekleştirebilir. İndirilen veriler, NetCDF formatında olup içerdiği enlem ve boylam bilgileri, kullanıcının belirlediği coğrafi sınırlarla karşılaştırılır. Eğer veriler bu sınırlar dahilindeyse, ilgili dosyalar kullanıcı tarafından seçilen hedef dizine taşınır (Şekil 21).

Şekil 21. Python tabanlı GNSS-RO veri indirme programı arayüzü

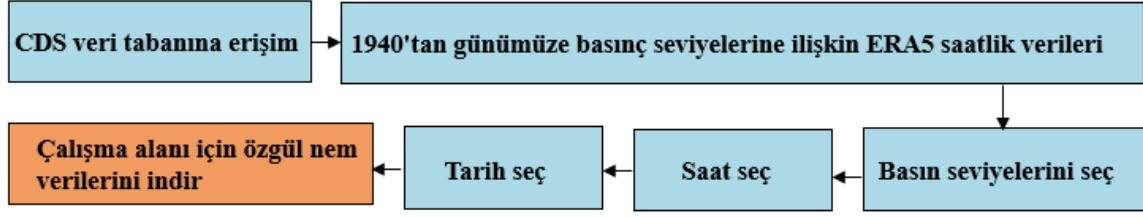
Programın çalışma prensibi, kullanıcının yaptığı seçimlere göre dinamik bir şekilde veri erişim bağlantıları oluşturarak başlar. Bu bağlantılar, GNSS-RO verilerini sağlayan sunuculardan (<https://data.cosmic.ucar.edu/gnss-ro>) veri indirir. Daha sonra, indirilen sıkıştırılmış dosyalar otomatik olarak çıkarılır ve içindeki NetCDF dosyaları analiz edilir. Program, NetCDF dosyalarının içerdiği koordinatları kontrol eder ve eğer kullanıcı tarafından belirlenen sınırlar içerisindeyse, bu dosyaları hedef klasöre taşır. Aksi takdirde dosyalar, işlem yapılmadan silinir. Bununla birlikte, program, iş akışını kolaylaştıran bir durum çubuğuna sahiptir ve kullanıcıya her adımda hangi işlemlerin yapıldığını gösterir. Kullanıcı dostu bir arayüz ile işlemler basit ve hızlı bir şekilde tamamlanabilir. Bu özellikler, büyük veri setleri ile çalışan bilim insanları ve mühendisler için verimli bir çözüm sunar. Programın veri indirme ve çalışma prensibi iş akış şeması olarak Şekil 22’de sunulmuştur.



Şekil 22. GNSS-RO veri indirme programı iş akış diyagramı

GNSS-RO veri indirme programı ile temin edilen profiller, UCAR COSMIC Program Ofisi tarafından sağlanmıştır. <https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html> web adresinden verilerin temini ücretsiz şekilde gerçekleşmiştir. GNSS-RO atmosferik profillerin irdelenmesi ve PWV analizleri için Level 2 klasörlerinde yer alan wetPf2 ıslak profilleri kullanılmıştır. WetPf2 ıslak profilleri, jeopotansiyel yükseklik, sıcaklık, basınç, buhar basıncı, kırıcılık, özgül nem vb. parametreleri içermektedir. Ancak, farklı LEO uydu veri setlerinde bu parametrelerin her birinin mevcudiyeti değişiklik gösterebilmektedir. Türkiye bölgesine yönelik LEO uydularından elde edilen veri setlerinin incelendiği 2.3 başlıklı bölümde bu durum detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

ECMWF ERA5 yeniden analiz verilerinde ise CDS'nin sağladığı 1940'dan günümüze basınç seviyelerine ilişkin ERA5 saatlik verilerden (ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present) yararlanılmıştır. Şekil 19'da yapılan sınırlandırma dahilinde basınç ve özgül nem profilleri <https://cds.climate.copernicus.eu/> web adresinden NetCDF formatında temin edilmiştir (Şekil 23).



Şekil 23. ECMWF ERA5 yeniden analiz ürünleri veri temini

ECMWF ERA5 yeniden analiz ürünleri 00:00 UTC ve 12:00 UTC zamanları için indirilmiştir. Temin edilen verilerde basınçlar: 1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, 400 hPa, 300 hPa, 250 hPa, 200 hPa, 150 hPa, 100 hPa, 70 hPa, 50 hPa, 30 hPa, 20 hPa, 10 hPa olmak üzere 16 basınç seviyesi için seçilmiştir.

2.3. Türkiye İçin LEO Uydu ve RO Dağılımlarının Belirlenmesi

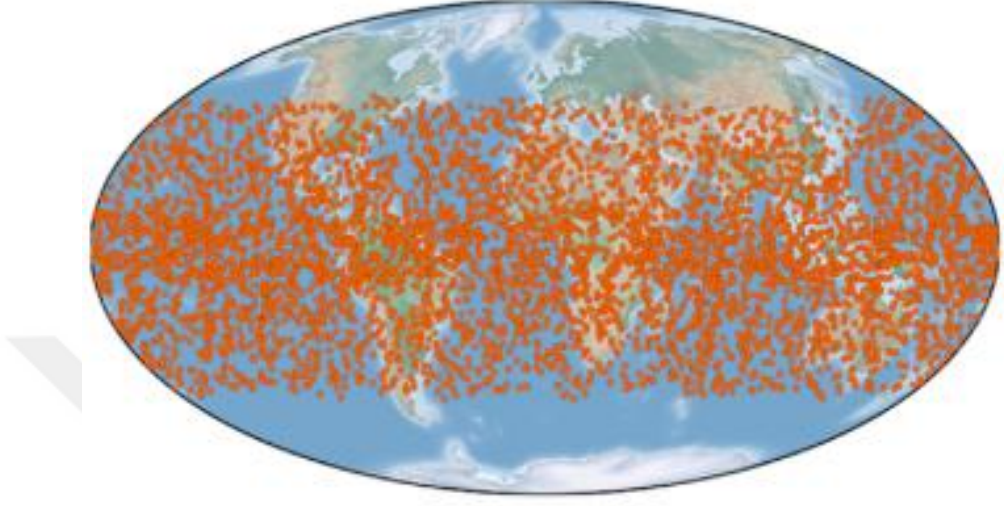
GNSS-RO tekniğinde okültasyon olaylarının sayısı, kullanılan uyduya bağlı olarak uydunun yörünge eğimi, yüksekliği, tekrar periyodu, taşıdığı GNSS alıcısının teknik özellikleri, GNSS sistemleriyle uyumluluğu, görev süresi ve veri iletim kapasitesi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Ayrıca, okültasyonların konumsal ve zamansal dağılımı, hem LEO hem de GNSS uydularının konumlarına bağlı olarak bölgesel düzeyde farklılık gösterebilir.

GNSS-RO tekniği ölçümlerinden yapılacak analizler için çalışma alanına yönelik uygun LEO uydularının belirlenmesi önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında, GNSS-RO tekniği uygulamaları için CHAMP, GRACE, METOP, TerraSAR-X, TanDEM-X, FORMOSAT-7/COSMIC-2 LEO uydularının Türkiye'ye yönelik veri sağlama kapasitesi incelenmiş ve bu veriler kullanılarak atmosferik analizler gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. FORMOSAT 7/COSMIC-2 Uydu Misyonu

FORMOSAT-7/COSMIC-2 uydusu, ABD ve Tayvan'ın ortak projesi olarak geliştirilmiş ve 25 Haziran 2019 tarihinde uzaya fırlatılmıştır. 2006-2020 yılları arasında faaliyet gösteren FORMOSAT-3/COSMIC-1 misyonunun devamı olarak geliştirilen bu misyonun amacı operasyonel hava tahmini, uzay hava durumunun izlenmesi, meteorolojik, iklim, iyonosferik ve jeodezik araştırmalar için daha fazla veri toplamak ve RO gözlem

sayısını arttırmak olmuştur. FORMOSAT-7/COSMIC-2 uydu verileri, sürekli ve düzenli bir şekilde günlük neredeyse gerçek zamanlı olarak toplanmaktadır (Weiss vd., 2022; URL-4, 2024) (Şekil 24).



Şekil 24. Ekim 2019'da FORMOSAT-7/COSMIC-2 coğrafi kapsamı

FORMOSAT-7/COSMIC-2, LEO uydu misyonu özellikleri,

- 45° Kuzey ve 45° Güney enlemleri arasında yoğun örnekleme sunmaktadır.
- Gelişmiş teknolojiye sahip ekipmanlar kullanmaktadır.
- FORMOSAT-3/COSMIC-1 uydularına kıyasla daha büyük ve ağırdır. Bu sayede, uzayda daha kararlı bir yönelim sağlayarak sinyalleri daha hassas algılayabilmekte ve daha büyük faydalı yük kapasitesi ile ek bilimsel donanımları taşıyabilmektedir.
- Hassas yörünge belirleme (Precise Orbit Determination, POD) antenleri, GNSS sinyallerinde multipath etkilerini azaltmak için geliştirilmiş anten tasarımına sahiptir.
- Antenleri, faz dizili yapıya sahiptir ve sinyal kazancını nötr atmosfer okültasyon yönüne yönlendirerek SNR'yi artırmaktadır. Bu sayede, troposfer daha derinlere kadar izlenebilmektedir.
- TriG (Tri-GNSS) RO Sistemi (TGRS) alıcısı ile hem GPS hem de GLONASS sinyallerini izleyebilmektedir.
- GNSS sinyallerini kullanarak iyonosferin TEC ve sintilasyon olaylarını hassas bir şekilde gözlemlemektedir.

- Veri ürünleri, geniş bir veri indirme istasyon ağı sayesinde önemli ölçüde daha düşük gecikmeyle sağlanmaktadır.
- Veri setleri, kullanıcı erişimine ücretsiz olarak sunulmaktadır.
- GNSS-RO verileri, NWP merkezleri tarafından atmosferik sıcaklık, nem ve rüzgar bileşenleri için tahmin doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

FORMOSAT-7/COSMIC-2 takımıyıldızı, 550 km yükseklikte ve 24° eğim açısıyla, 97 dakikalık periyotlarda yörüngede faaliyet gösteren 6 uydudan oluşmaktadır. Bu altı uydu, başlangıçta 720 km yükseklikteki tek bir yörünge düzlemine fırlatılmış ve ardından her biri yaklaşık 550 km olan nihai operasyonel irtifalarına indirilmiştir. Bu alçaltma işlemi ile uyduların yörünge düzlemleri birbirlerine göre yavaşça kaymış (presesyon) ve böylece her bir uydunun yörüngesinin başlangıç noktasının diğer uydularla arasındaki mesafesi eşitlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, uydular Dünya etrafında eşit aralıklarla dağıtılmıştır (Weiss vd., 2022) (Şekil 25).



Şekil 25. FORMOSAT-7/COSMIC-2 uydu takımıyıldızı

Şekil 25'te yer alan uydu dağılımları, uyduların birlikte çalışarak Dünya'nın farklı bölgelerini daha etkili ve düzenli bir şekilde gözlemlemesini sağlamaktadır. Şekil 25'teki FORMOSAT-7/COSMIC-2 uydu takımıyıldızı için yörünge bilgileri tablo olarak sunulmuştur (Tablo 7).

Tablo 7. FORMOSAT-7/COSMIC-2 uydu takımı yıldızı yörünge bilgileri

Uçuş Modeli	Yükseklik (km)	Eğim açısı (°)
1	546	24
2	547	24
3	545	24
4	542	24
5	543	24
6	539	24

Avustralya, Brezilya, Fransız Polinezyası, Gana, Guam, Hawaii, Honduras, Kuveyt, Mauritius ve Tayvan'da bulunan 10 telemetri toplama istasyonundan oluşan bir ağ, FORMOSAT-7/COSMIC-2 uydularından gelen verileri alır ve bu verileri NSPO ile UCAR veri işleme merkezlerine iletir. Tayvan, Avustralya ve Mauritius'taki istasyonlar, sadece veri almakla kalmayıp aynı zamanda uydulara komut gönderebilme ve operasyonları yönetebilme yeteneklerine sahiptir (Weiss vd., 2022; URL-4, 2024) (Şekil 26).



Şekil 26. FORMOSAT-7/COSMIC-2 yer istasyonları

Şekil 26'da çember işaretleri sadece veri indirme (downlink) istasyonlarını, elmas işaretleri ise hem veri indirme hem de yukarı bağlantı (uplink) yeteneğine sahip istasyonları göstermektedir. FORMOSAT-7/COSMIC-2 yer istasyonları, altı uydu tarafından yapılan gözlem sonrasında verilerin hızlı bir şekilde indirilmesine olanak tanır. Bir yer istasyonu verileri aldığı anda, bu veriler ABD ve Tayvan'daki veri işleme merkezlerine aktarılır. İşlenmiş veriler daha sonra WMO'nun GTS'sine aktarılır ve bu sistem, veri ürünlerini dünya genelindeki meteoroloji ajanslarına ve hava tahmin merkezlerine dağıtır. Nötr atmosfer verileri için ortalama gecikme süresi 45 dakika, iyonosfer verileri için ise 30 dakika olarak

belirlenmiştir. Bu gecikme süreleri, veri işleme merkezlerinin verileri zamanında kullanabilmesi için gereken hız ve verimliliği sağlar (Weiss vd., 2022).

UCAR'ın COSMIC Programı ve Tayvan'ın Merkezi Meteoroloji Bürosu (Central Weather Bureau, CWB) tarafından işletilen iki veri işleme merkezi bulunmaktadır. Her iki merkez de ham verileri alır ve COSMIC CDAAC yazılım çerçevesi kullanarak işleme yapar. Bununla birlikte, CWB, Tayvan RO İşleme Sistemi (Taiwan RO Processing System, TROPS) sistemini çalıştırmaktadır. COSMIC Programı'na benzer şekilde, TROPS'da okültasyon verilerini alır ve işlem yapar (Weiss vd., 2022).

UCAR veri işleme merkezi tarafından dört seviyede ürün sağlanmaktadır. Birinci seviyede (bilimsel gereksinimler) misyonun bilimsel hedefleri ve gerekli ölçümleri tanımlanır. Örneğin, atmosferik sıcaklık, nem, basınç profillerinin veya iyonosferik elektron yoğunluğu gibi parametrelerin hassasiyet ve doğruluk gereksinimleri belirlenir. Bu gereksinimler, misyonun temel başarısını garanti altına almak için tanımlanmış eşik değerlerdir. İkinci seviye (sistem gereksinimleri) bilimsel hedefleri yerine getirmek için uydu ve yer sistemlerinin karşılaması gereken teknik performans gereksinimlerini içerir. Bu, GNSS sinyallerinin toplanması, işlem gücü, iletişim hızı ve veri çözünürlüğü gibi detayları kapsar. Üçüncü seviye, alt sistem gereksinimlerini içerir. Örneğin, sinyal alıcıları, işlemciler ve antenlerin performans özellikleri bu seviyede doğrulanır. Ayrıca, veri işleme algoritmalarının performansını da içerir. Dördüncü seviye (bileşen gereksinimleri), en alt düzeyde, belirli cihazların veya yazılım bileşenlerinin tasarım ve üretim gereksinimlerini içerir. Bu, örneğin veri işleme yazılımlarının her bir bileşeninin nasıl çalışması gerektiğini, veri iletim hızlarını, enerji gereksinimlerini ve hassasiyetlerini içerebilir (Weiss vd., 2022). Bu kapsamda, birinci seviye için bilimsel eşik gereksinimleri ve karşılanma durumları aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Günlük olarak kalite kontrolünden geçen nötr atmosfer profilleri için hedef, 4000'den fazla profil üretmek iken, sistem genellikle 5000'in üzerinde profil üreterek bu gereksinimi başarıyla karşılamıştır.
- Nötr atmosfer profili ortalama ürün gecikmesinin 45 dakikanın altında olması hedeflenmiş; sistem bu hedefi yaklaşık 28 dakikalık gecikme ile yerine getirmiştir.
- Bükülme açısı belirsizliği için belirlenen sınır 2 mikroradyan olup, elde edilen değer 1.6 mikroradyan olarak ölçülmüştür.
- Kırılma indisi belirsizliği ise 0.1 N birimi olarak hedeflenmiş ve bu değer 0.076 N birimi olarak doğrulanmıştır.

- TEC okültasyonları için günlük hedef, 6000 okültasyonun üzerinde bir sayıya ulaşmak iken, Ocak-Mayıs 2022 dönemi ortalaması 5797, Mayıs 2022 ortalaması ise 5870 olarak gerçekleşmiş ve bu durum için uyumluluğun %91.5'ine ulaşılarak istisna tanınmıştır. Benzer şekilde, günlük kombine TEC yayları ve okültasyonların sayısı için hedef 12000'den fazla olmasına rağmen, bazı günlerde tam olarak karşılanamamış, ancak %91.5 uyumluluk sağlanarak bu gereksinim için de istisna tanınmıştır.
- Mutlak TEC belirsizliği için belirlenen sınır 3 TECU iken, GPS için yaklaşık 2.5 TECU ve GLONASS için 2.6 TECU değerleri elde edilmiştir. TEC ürün ortalama gecikmesi süresinin 30 dakikanın altında olması hedeflenmiş ve bu hedef 28 dakikalık gecikme ile karşılanmıştır.

FORMOSAT-7/COSMIC-2 veri ürünleri, NOAA'nın Çevresel Modelleme Merkezi, Uzun Hava Tahmin Merkezi, ABD Hava Kuvvetleri 557. Hava Filosu, Filo Sayısal Meteoroloji ve Oşinografi Merkezi, Tayvan'ın CWB'si, ECMWF ve dünya genelindeki diğer operasyonel merkezlere WMO GTS aracılığıyla teslim edilir (Tablo 8).

Tablo 8. FORMOSAT-7/COSMIC-2 mevcut ürünleri

Tür	Dosya Formatı
Seviye 0 verisi	trgLv0
Uydu durumu	leoAtt
RO anten gözlemleri	opnGns
POD anten gözlemleri	podCrx (RINEX)
POD tahminleri	leoOrb (SP3)
Yüksek oranlı RO gözlemleri	opnGns (binary)
Faz fazlalığı	conPhs
Nötr atmosfer sonuçları	atmPrf
Nötr atmosfer model profilleri	avnPrf, echPrf
1D değişken geri alımı	wetPf2
Nötr atmosfer BUFR	BUFR (binary)
Elektron yoğunluğu profilleri	ionPrf
Mutlak TEC	podTc2
Sintilasyon genliği	scn1c2
Sintilasyon izleme POD anten gözlemleri	scnPhs
Sintilasyon genliği, faz frekansı paraziti indeksleri	scnLv2

Türkiye için Tablo 6'ya göre belirlenen bölgelerde, UCAR COSMIC Program Ofisi tarafından sağlanan ve Level 2 dosyalarında yer alan, 1D-Var yöntemine dayalı türetilen

atmosferik profilleri içeren FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO wetPf2 verileri Python ortamında hazırlanan veri indirme programı ile temin edilmiştir. FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO verileri 2019 yılının 274. gününden itibaren mevcuttur. Bu kapsamda, 2019 yılının 274. gününden 2023 yılının 365. gününe kadar gerçek zamanlıya yakın operasyonel veri setleri indirilmiştir ve veri dosya formatları irdelenmiştir (Tablo 9).

Tablo 9. FORMOSAT-7/COSMIC-2 level-2 wetPf2 ıslak profiller için veri formatı

Adı	wetPf2/IILL.YYYY.DDD.HH.MM.GGG_SSS.VVVV_nc
PUB	Pub Hiyerarşisi için Temel Dizin
II	Görev Kimliği (C2-COSMIC-2)
LL	LEO number (1-6 for COSMIC)
YYYY	Yıl
DDD	Yılın günü
HH	Saat
MM	Dakika
GGG	GNSS Kimliği (G28 = GPS Uydu 28)
SSSS	Alt tür (0001)
VVVV	Sürüm (0001)
nc	netCDF formatı

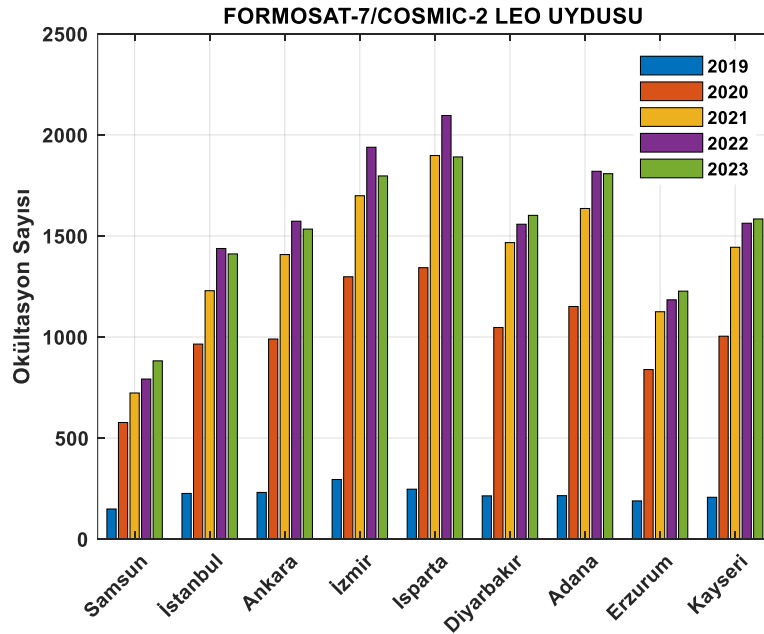
Temin edilen FORMOSAT-7/COSMIC-2 wetPf2 netCDF dosyaları MATLAB yazılımında okutularak, okültasyonların global özellikleri ve profil verileri incelenmiştir. Bu dosyaların global özellikleri verilerin işlenmesi, yapılandırılması ve kalite kontrolü hakkında önemli bilgiler sunar. Bu özellikler, her bir profilin hangi algoritmalarla işlendiğini, kullanılan yazılım sürümünü, sinyal izleme modunu, verinin gerçek zamanlı olup olmadığını ve okültasyon olayının coğrafi konumunu içerir. Ayrıca, kırılma indisi hesaplamaları ve modelleme detaylarına dair bilgiler de bu global özellikler arasında yer alır. FORMOSAT-7/COSMIC-2 wetpf2 verileri ise geometrik yükseklik, enlem, boylam, jeopotansiyel yükseklik, sıcaklık, basınç, su buharı basıncı, özgül nem, bağıl nem, kırılcılık, kuru sıcaklık ve kuru basınç profillerini içermektedir. FORMOSAT-7/COSMIC-2 misyonunun sağladığı bu kapsamlı veri setlerinin konumsal bilgilerinden yararlanarak Türkiye bölgesinde gözlenen okültasyon olayları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, Türkiye bölgesinde

yer alan RS konumlarına göre temin edilen FORMOSAT-7/COSMIC-2 misyonu okültasyon dosyalarının sayısal dağılımı yıllara göre tablo olarak sunulmuştur (Tablo 10).

Tablo 10. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen COSMIC-2 RO sayıları

RS	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam RO
Samsun	149	577	723	792	882	3123
İstanbul	226	965	1229	1438	1411	5269
Ankara	231	990	1408	1573	1534	5736
İzmir	295	1298	1699	1939	1797	7028
Isparta	247	1343	1898	2096	1891	7475
Diyarbakır	214	1047	1467	1558	1602	5888
Adana	215	1151	1636	1820	1808	6630
Erzurum	189	839	1125	1184	1227	4564
Kayseri	207	1004	1444	1563	1584	5802

Tablo 10 incelendiğinde, İzmir ve Isparta RS çevresindeki okültasyon sayılarının diğer istasyonlara kıyasla daha fazla olduğu, Samsun RS çevresinde ise daha az olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, Isparta RS çevresinde diğer istasyonlara göre her yıl yüksek sayıda, Samsun RS çevresinde ise düşük sayıda okültasyon kaydedilmiştir (Şekil 27).



Şekil 27. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen COSMIC-2 RO dağılımı

2.3.2. GRACE Uydu Misyonu

GRACE misyonu, NASA ve Alman Hava ve Uzay Merkezi (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)'nin ortak projesi olarak geliştirilmiştir. İkiz uydu sistemi olarak tasarlanan GRACE uyduları, yörüngede birbirlerinden yaklaşık 220 km uzaklıkta hareket etmiştir. Bu uydular, GRACE-A ve GRACE-B olarak isimlendirilmiştir. Ekvatora 89° eğik açı ile yerleştirilen GRACE uyduları, görevlerine ilk olarak yeryüzünden yaklaşık 500 km yükseklikte başlamıştır. Ancak, bu yükseklik, hava sürtünmesi gibi çeşitli etkenler nedeniyle görev süresinin sonunda yaklaşık 300 km'ye kadar düşmüştür (Case vd., 2010). 17 Mart 2002 tarihinde uzaya fırlatılan bu uydu takımı, hem yakıt hem de pil sorunları nedeniyle 27 Ekim 2017 yılında görevini tamamlamıştır. 2018 yılında ise GRACE misyonunun devamı niteliğinde GRACE-FO uydu sistemi göreve başlamıştır.

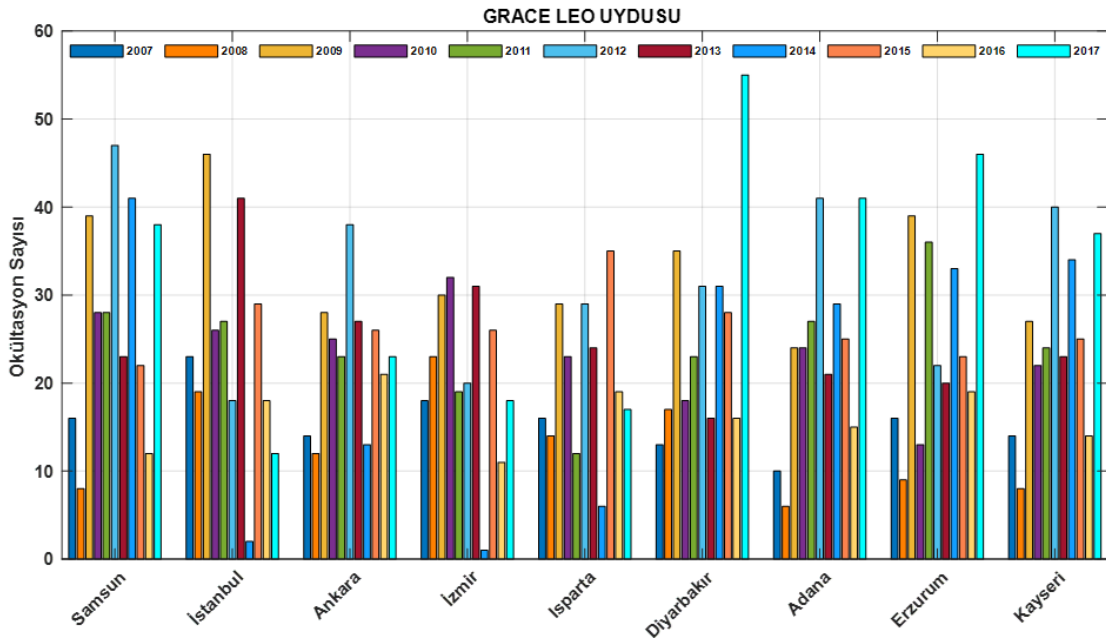
GRACE misyonu, Dünya'nın yerçekimi alanını ve zaman içindeki değişimlerini hassas bir şekilde belirlemeyi amaçlamıştır. Bunun yanı sıra, RO tekniği sayesinde Dünya'nın iyonosferi ve nötr atmosferinin dikey profilleri de ölçülerek önemli katkılar sağlanmıştır. Bu katkılar, hava durumu ve iklim uygulamaları için kullanılan GRACE-FO RO ölçümleri ile devam ettirilmiştir. İlk RO kayıtları, 28-29 Haziran 2004 tarihlerinde GRACE-B uydusu ile gerçekleştirilmiştir. GRACE-A uydusu ise 22 Mayıs 2006 tarihinden itibaren RO ölçümleri sağlamaya başlamıştır. GRACE-FO misyonu kapsamında ise 2019 yılının ortalarından itibaren düzenli RO ölçümleri elde edilmektedir (Wickert vd., 2005).

GRACE ve GRACE-FO misyonu için gerekli tüm veri işlemleri, JPL, Texas Üniversitesi Uzay Araştırmaları Merkezi ve GFZ tarafından yürütülmektedir. Bu merkezler, veri sağlayıcı sistemlerinden UCAR gibi platformlara ürünleri aktararak bilim dünyasına katkıda bulunur. UCAR programı GRACE RO verilerini post-process Level-2 klasör için kullanıcılara 2007-2017 yılları için sunmaktadır. Bu veriler, Python ortamında hazırlanan veri indirme programı ile temin edilmiştir. Temin edilen GRACE wetpf2 verileri, enlem, boylam, ortalama deniz seviyesi geometrik yükseklik, sıcaklık, basınç, su buharı basıncı, kırıcılık profillerini içermektedir. GRACE wetpf2 verilerinin konumsal bilgilerinden yararlanarak Türkiye bölgesinde gözlenen okültasyon olayları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, Türkiye bölgesinde yer alan RS konumlarına göre temin edilen GRACE misyonu okültasyon dosyalarının sayısal dağılımı yıllara göre tablo olarak sunulmuştur (Tablo 11).

Tablo 11. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen GRACE RO sayıları

RS	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Toplam RO
Samsun	16	8	39	28	28	47	23	41	22	12	38	302
İstanbul	23	19	46	26	27	18	41	2	29	18	12	261
Ankara	14	12	28	25	23	38	27	13	26	21	23	250
İzmir	18	23	30	32	19	20	31	1	26	11	18	229
Isparta	16	14	29	23	12	29	24	6	35	19	17	224
Diyarbakır	13	17	35	18	23	31	16	31	28	16	55	283
Adana	10	6	24	24	27	41	21	29	25	15	41	263
Erzurum	16	9	39	13	36	22	20	33	23	19	46	276
Kayseri	14	8	27	22	24	40	23	34	25	14	37	268

Tablo 11 incelendiğinde, genel olarak tüm RS çevresindeki okültasyon sayıları hemen hemen aynı düzeydedir. Bununla birlikte, en fazla RO olayının Samsun RS çevresinde en az RO olayının Isparta RS çevresinde meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 28).



Şekil 28. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen GRACE RO dağılımı

2.3.3. CHAMP Uydu Misyonu

CHAMP uydusu, ESA ve GFZ tarafından geliştirilmiş ve 15 Temmuz 2000 tarihinde uzaya fırlatılmıştır. Tasarım ömrü 5 yıl olarak planlanan bu uydu, 10 yıl boyunca veri

toplamiş ve 19 Eylül 2010 tarihinde görevini tamamlamıştır. CHAMP uydusu, yerçekimi ve Dünya'nın manyetik alanının belirlenmesi, atmosferik ve iyonosferik araştırmalar ile GNSS-RO tekniği gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Bu misyon, atmosferdeki sıcaklık, nem ve basınç profillerini yüksek hassasiyetle belirlemenin yanı sıra iyonosferdeki elektron yoğunluğunu ölçerek iklim değişikliği ve hava tahminlerine önemli katkılar sağlamıştır (Jakowski, 2005; Wickert vd., 2005).

CHAMP uydusu, yaklaşık 454 km irtifada bulunan bir uydudur ve yörünge periyodu yaklaşık 96 dakikadır. 87.2° eğik açı ile dairesel ve kutupsal yörüngeye yerleştirilen bu uydu, Dünya'nın neredeyse tamamını kapsayan ölçümler yapabilmektedir. GFZ, uydu tarafından toplanan ham verileri işleyerek kullanılabilir duruma getirmiştir. NASA ile çalışan GFZ tarafından manyetik alan ölçümleri, yerçekimi verileri ve işlenmiş GNSS-RO atmosferik ile iyonosferik veriler araştırmacılara sunulmuştur. CHAMP uydusundaki GPS-RO ölçümleri ise ilk kez 11 Şubat 2001'de etkinleştirilmiştir (Wickert vd., 2005). CHAMP RO ölçümleri, atmosferik profillerin, özellikle sıcaklık, basınç ve su buharı dağılımlarının yüksek hassasiyetle belirlenmesine olanak sağlamıştır. Ancak bu görev, yaklaşık 7 yıl boyunca sürdürüldükten sonra Ekim 2008'de sona ermiştir. Çalışma kapsamında, 2001-2008 zaman aralığındaki UCAR programı CHAMP wetPf2 uydu verileri, Python ortamında hazırlanan veri indirme programı ile temin edilmiştir. Temin edilen CHAMP wetpf2 verileri, geometrik yükseklik, enlem, boylam, jeopotansiyel yükseklik, sıcaklık, basınç, su buharı basıncı, özgül nem, bağıl nem, kırılcılık, kuru sıcaklık ve kuru basınç profillerini içermektedir. CHAMP wetpf2 verilerinin konumsal bilgilerinden yararlanarak Türkiye bölgesinde gözlenen okültasyon olayları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, Türkiye bölgesinde yer alan RS konumlarına göre temin edilen CHAMP misyonu okültasyon dosyalarının sayısal dağılımı yıllara göre tablo olarak sunulmuştur (Tablo 12).

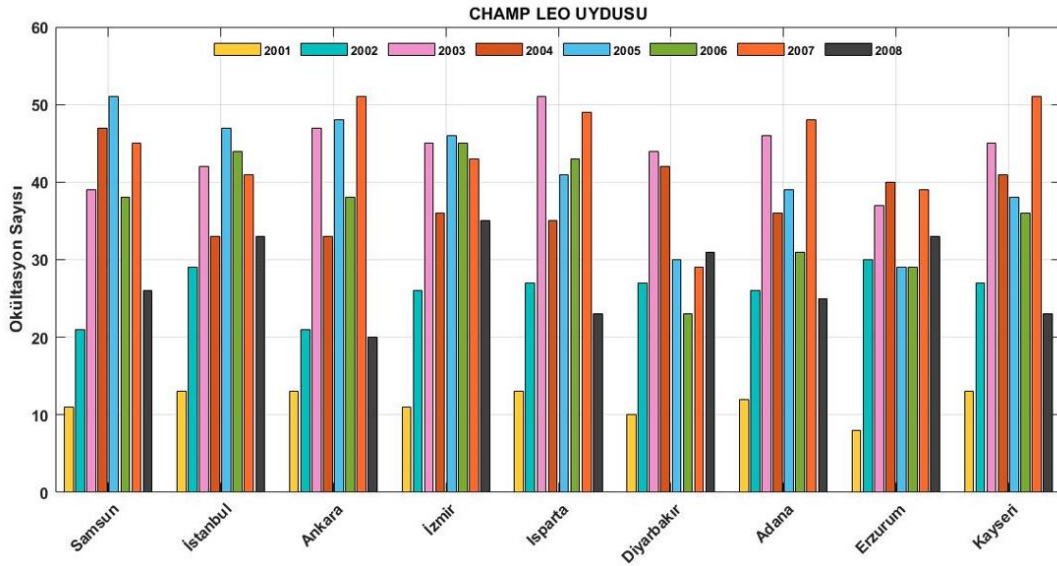
Tablo 12. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen CHAMP RO sayıları

RS	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Toplam RO
Samsun	11	21	39	47	51	38	45	26	278
İstanbul	13	29	42	33	47	44	41	33	282
Ankara	13	21	47	33	48	38	51	20	271
İzmir	11	26	45	36	46	45	43	35	287
Isparta	13	27	51	35	41	43	49	23	282

Tablo 12'nin devamı

RS	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Toplam RO
Diyarbakır	10	27	44	42	30	23	29	31	236
Adana	12	26	46	36	39	31	48	25	263
Erzurum	8	30	37	40	29	29	39	33	245
Kayseri	13	27	45	41	38	36	51	23	274

Tablo 12 incelendiğinde, genel olarak tüm RS çevresindeki okültasyon sayıları hemen hemen aynı düzeydedir. Bununla birlikte, en fazla RO olayının İzmir RS çevresinde en az RO olayının Diyarbakır RS çevresinde meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 29).



Şekil 29. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen CHAMP RO dağılımı

2.3.4. METOP Uydu Misyonu

MetOp uydu serisi, ESA ve EUMETSAT iş birliğiyle geliştirilen Avrupa'nın ilk kutupsal yörüngede dönen operasyonel meteoroloji uydu serisidir. Bu uydular, atmosferin, denizlerin ve kara yüzeylerinin detaylı gözlemlerini sağlayarak, hava tahminlerinin iyileştirilmesi ve iklim değişikliği analizlerinin güçlendirilmesi amacıyla tasarlanmıştır. MetOp uyduları; dünya genelinde sıcaklık, nem, bulut örtüsü, rüzgar hızı ve yönü gibi

meteorolojik parametreleri yüksek çözünürlükte ölçmektedir. Bu veriler, modern NWP sistemlerine önemli katkılar sağlamaktadır (Joo vd., 2013).

MetOp uyduları, NOAA'nın kutupsal yörüngeli uyduları ile entegre çalışmaktadır. Bu iş birliği sayesinde, dünya üzerindeki meteorolojik ve çevresel veriler hem sabah hem de akşam geçişlerinde düzenli olarak toplanmaktadır. Uydular, güneş eşzamanlı bir kutupsal yörüngede hareket etmekte ve her gün yeryüzündeki tüm bölgelerin iki kez gözlemlenmesini sağlamaktadır. MetOp serisi uydular, diğer uydularla kıyaslandığında yer yüzeyine daha yakın bir yörüngede bulunduğundan, çok daha yüksek çözünürlüklü ve detaylı veriler sunabilmektedir.

MetOp serinin ilk uydusu ve aynı zamanda Avrupa'nın ilk kutupsal yörüngede dönen operasyonel meteoroloji uydusu olan MetOp-A, 19 Ekim 2006 tarihinde uzaya başarıyla fırlatılmıştır. MetOp-A uydusu, tasarlandığı beş yıllık görev süresini aşarak 15 yıl boyunca hizmet vermiş ve 2021 yılında devre dışı bırakılmıştır. Görev süresi boyunca, atmosferin detaylı gözlemlerini sağlayarak hava tahminlerinin iyileştirilmesine ve iklim değişikliği çalışmalarına büyük katkılar sağlamıştır. MetOp-A, gelişmiş cihazları sayesinde atmosferdeki sıcaklık, nem, rüzgar hızı, okyanus yüzeyi sıcaklıkları ve sera gazları gibi parametrelerin ölçülmesine imkan tanımıştır. MetOp serisinin ikinci uydusu olan MetOp-B, 17 Eylül 2012 tarihinde uzaya fırlatılmış ve MetOp-A'nın yerini alarak görevine devam etmiştir. Benzer bir yapıya sahip olan MetOp-C ise 7 Kasım 2018 tarihinde uzaya fırlatılmıştır. Her iki uydu da, yaklaşık 817 km yükseklikte 98.704° eğim açısıyla güneş eşzamanlı bir kutupsal yörüngede yer almakta olup, dünya çevresinde her 100 dakikada bir tur atarak kapsamlı veri toplamaktadır. Bu uydular, MetOp-A ile aynı temel enstrümanları taşısa da, cihaz performansları ve veri işleme kapasitesi açısından bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Özellikle MetOp-C, teknolojik gelişmelerin ışığında daha gelişmiş cihazlara sahip olmasına rağmen, görev kapsamı ve veri sağlama işlevi büyük ölçüde aynıdır.

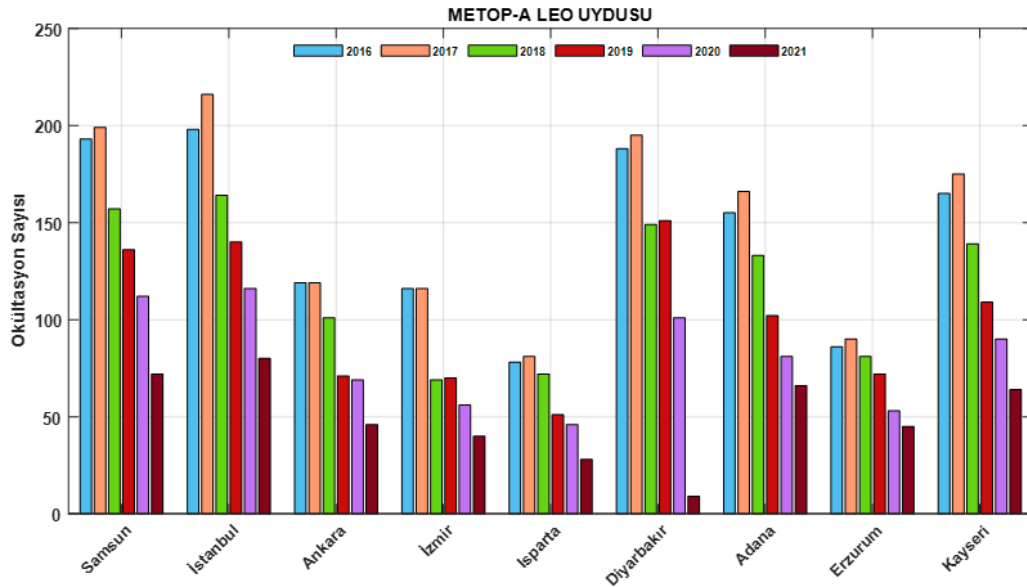
UCAR veri tabanında sonradan işlenmiş RO wetPf2 verileri, MetOp-A için 2016-2021 yıllarında, MetOp-B için 2016-2024 yıllarında, MetOp-C için 2019-2024 yıllarında mevcuttur. Bu uydu verileri, Python ortamında hazırlanan veri indirme programı ile temin edilmiştir. Temin edilen MetOp wetpf2 verileri; geometrik yükseklik, enlem, boylam, sıcaklık, basınç, su buharı basıncı ve kırıcılık profillerini içermektedir. MetOp wetpf2 verilerinin konumsal bilgilerinden yararlanarak Türkiye bölgesinde gözlenen okültasyon olayları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak Türkiye bölgesinde yer alan

RS konumlarına göre temin edilen MetOp-A okültasyon dosyalarının sayısal dağılımı yıllara göre tablo olarak sunulmuştur (Tablo 13).

Tablo 13. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-A RO sayıları

RS	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Toplam RO
Samsun	193	199	157	136	112	72	766
İstanbul	198	216	164	140	116	80	914
Ankara	119	119	101	71	69	46	495
İzmir	116	116	69	70	56	40	367
Isparta	78	81	72	51	46	28	356
Diyarbakır	188	195	149	151	101	9	593
Adana	155	166	133	102	81	66	703
Erzurum	86	90	81	72	53	45	427
Kayseri	165	175	139	109	90	64	742

Tablo 13 incelendiğinde, MetOp-A uydusu için en fazla RO olayının İstanbul RS çevresinde en az RO olayının Isparta RS çevresinde meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca, 2016-2017 yıllarında yüksek olan ölçüm sayılarının, 2018'den itibaren belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir (Şekil 30).



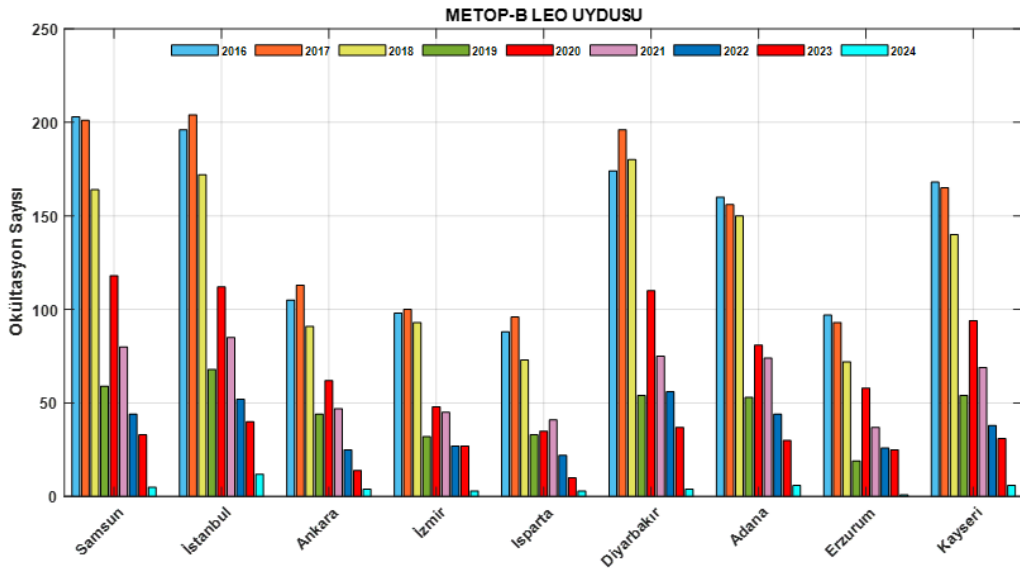
Şekil 30. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-A RO dağılımı

MetOp uydu serisi için ikinci olarak Türkiye bölgesinde yer alan RS konumlarına göre temin edilen MetOp-B okültasyon dosyalarının sayısal dağılımı yıllara göre tablo olarak sunulmuştur (Tablo 14).

Tablo 14. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-B RO sayıları

RS	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Toplam RO
Samsun	203	201	164	59	118	80	44	33	5	907
İstanbul	196	204	172	68	112	85	52	40	12	941
Ankara	105	113	91	44	62	47	25	14	4	505
İzmir	98	100	93	32	48	45	27	27	3	473
Isparta	88	96	73	33	35	41	22	10	3	401
Diyarbakır	174	196	180	54	110	75	56	37	4	886
Adana	160	156	150	53	81	74	44	30	6	754
Erzurum	97	93	72	19	58	37	26	25	1	428
Kayseri	168	165	140	54	94	69	38	31	6	765

Tablo 14 incelendiğinde, MetOp-B uydusu için en fazla RO olayının İstanbul RS çevresinde en az RO olayının Isparta RS çevresinde meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca, 2016 yılından 2024 yılına doğru genel olarak MetOp-B RO sayılarında belirgin bir azalma gözlenmiştir (Şekil 31).



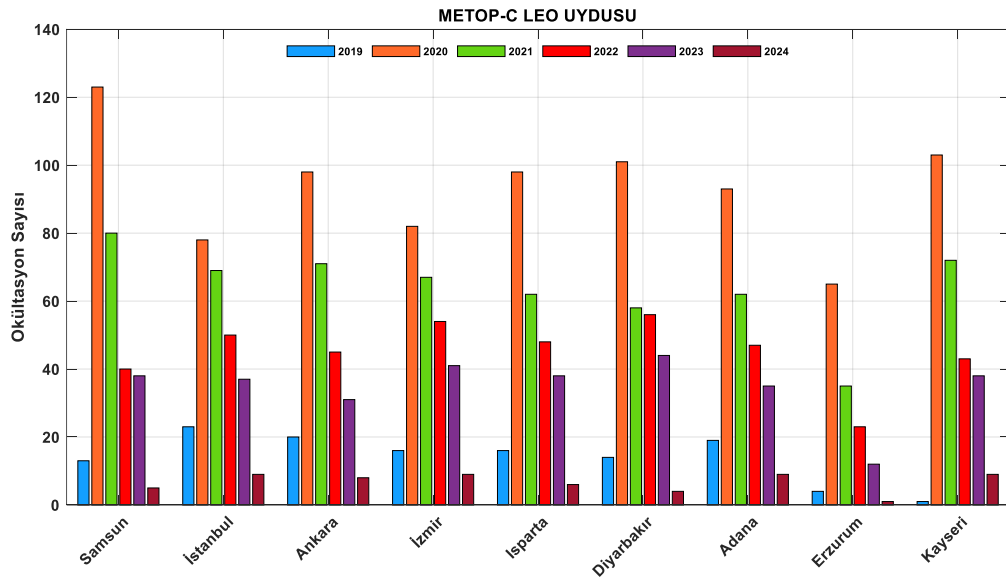
Şekil 31. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-B RO dağılımı

MetOp uydu serisi için son olarak Türkiye bölgesinde yer alan RS konumlarına göre temin edilen MetOp-C okültasyon dosyalarının sayısal dağılımı yıllara göre tablo olarak sunulmuştur (Tablo 15).

Tablo 15. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-C RO sayıları

RS	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Toplam RO
Samsun	13	123	80	40	38	5	317
İstanbul	23	78	69	50	37	9	266
Ankara	20	98	71	45	31	8	273
İzmir	16	82	67	54	41	9	269
Isparta	16	98	62	48	38	6	268
Diyarbakır	14	101	58	56	44	4	277
Adana	19	93	62	47	35	9	365
Erzurum	4	65	35	23	12	1	140
Kayseri	1	103	72	43	38	9	266

Tablo 15 incelendiğinde, MetOp-C uydusu için en fazla RO olayının Samsun ve Adana RS çevresinde en az RO olayının Erzurum RS çevresinde meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca, MetOp-C uydusunun Türkiye RS istasyonları çevresindeki RO olay sayıları, 2020 yılında en yüksek seviyede iken sonrasında giderek azalmıştır (Şekil 32).



Şekil 32. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen MetOp-C RO dağılımı

2.3.5. TERRASAR-X ve TANDEM-X Uydu Misyonları

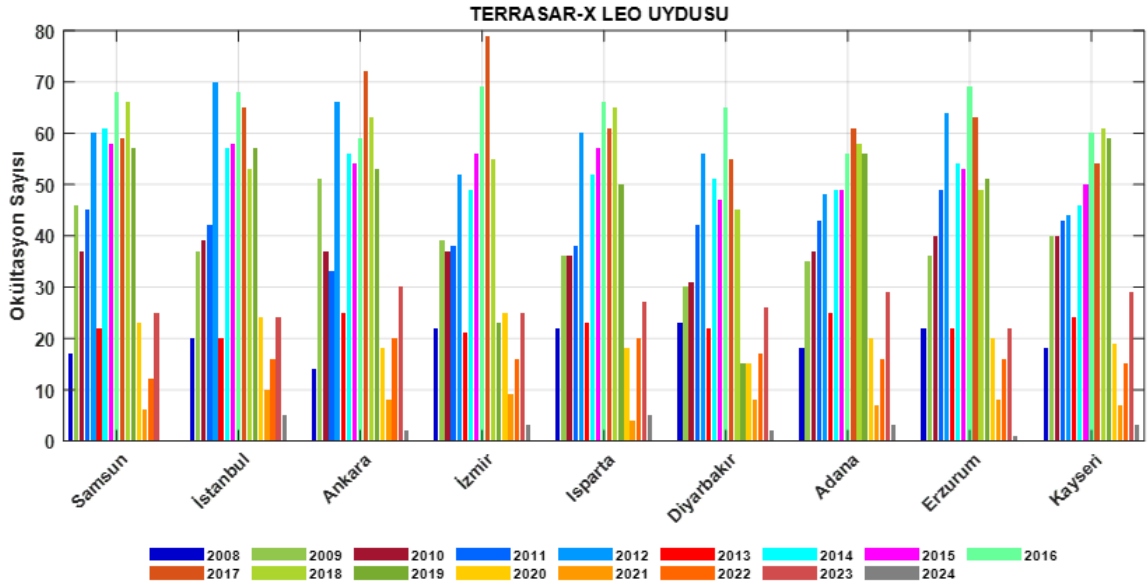
TerraSAR-X uydusu, bilimsel ve ticari uygulamalar için tasarlanmış ve 15 Haziran 2007 tarihinde uzaya fırlatılmıştır. Uydu, yaklaşık 514 km yükseklikte ve 97.4° eğikliğe sahip güneş eşzamanlı alçak yer yörüngesine yerleştirilmiştir. Bu uydu, DLR ile EADS Astrium GmbH ortaklığıyla geliştirilmiştir ve Almanya'nın ilk ulusal radar uzaktan algılama uydusudur. TerraSAR-X uydusu, test aşamasını başarıyla tamamladıktan sonra 7 Ocak 2008 tarihinde operasyonel duruma geçmiştir. Ana yükü, X-band sentetik açıklıklı radar sistemi ile dünya yüzeyinin bir metreye kadar yüksek çözünürlükte görüntülenmesini sağlamaktadır. TerraSAR-X X-band radar uydusunun bir eşi olarak TanDEM-X uydusu 2010 yılında göreve başlamıştır. Bu uydu, daha yüksek enlemlere uzanarak ve daha yüksek çözünürlükte veri sağlamıştır. TerraSAR-X uydusunda yalnızca yazılımsal değişiklikler, TanDEM-X uydusunda ise kısmi donanım değişiklikleri yapılarak, bu iki uydunun formasyon uçuşu gerçekleştirmesi sağlanmıştır. TanDEM-X uydusu, formasyon uçuşu sırasında göreceli konumunun ince ayarını sağlamak için yüksek basınçlı nitrojen gazı ile çalıştırılır. Ayrıca, TerraSAR-X tarafından gönderilen durum ve konum bilgilerini almak için ek bir S-bant alıcısı gibi küçük değişikliklerle TerraSAR-X tasarımını takip eder (Beyerle vd., 2011).

TanDEM-X ve TerraSAR-X birlikte, uzaydaki ilk yapılandırılabilir sentetik açıklıklı radar interferometresini oluştururlar. Bu birincil hedefin yanı sıra, görevin gerçekleştirilmesi sürecinde, interferometri, polarimetrik sentetik açıklıklı radar interferometrisi, dijital ışın oluşturma ve bistatik radar gibi yeni ve yenilikçi yöntemlerin de test edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu uydular, Entegre GPS Okültasyon Alıcısı (IGOR-Integrated GPS Occultation Receiver) ile RO gözlemleri yapabilmektedir (Beyerle vd., 2011). UCAR veri tabanında post-process RO wetPf2 verileri, TanDEM-X için 2016-2024 yıllarında, TerraSAR-X için 2008-2024 yıllarında mevcuttur. Bu uydu verileri, Python ortamında hazırlanan veri indirme programı ile temin edilmiştir. Temin edilen wetpf2 verileri, geometrik yükseklik, enlem, boylam, sıcaklık, basınç, su buharı basıncı ve kırıcılık profillerini içermektedir. TerraSAR-X ve TanDEM-X wetpf2 verilerinin konumsal bilgilerinden yararlanarak Türkiye bölgesinde gözlenen okültasyon olayları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak Türkiye bölgesinde yer alan RS konumlarına göre temin edilen TerraSAR-X okültasyon dosyalarının sayısal dağılımı yıllara göre tablo olarak sunulmuştur (Tablo 16).

Tablo 16. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen TerraSAR-X RO sayıları

RS	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Toplam RO
Samsun	17	46	37	45	60	22	61	58	68	59	66	57	23	6	12	25	0	662
İstanbul	20	37	39	42	70	20	57	58	68	65	53	57	24	10	16	24	5	665
Ankara	14	51	37	33	66	25	56	54	59	72	63	53	18	8	20	30	2	661
İzmir	22	39	37	38	52	21	49	56	69	79	55	53	25	9	16	25	3	648
Isparta	22	36	36	38	60	23	52	57	66	61	65	50	18	4	20	27	5	640
Diyarbakır	23	30	31	42	56	22	51	47	65	55	45	55	15	8	17	26	2	590
Adana	18	35	37	43	48	25	49	49	56	61	58	56	20	7	16	29	3	610
Erzurum	22	36	40	49	64	22	54	53	69	63	49	51	20	8	16	22	1	639
Kayseri	18	40	40	43	44	24	46	50	60	54	61	59	19	7	15	29	3	612

Tablo 16 incelendiğinde, genel olarak tüm RS çevresindeki okültasyon sayıları hemen hemen aynı düzeydedir. Bununla birlikte TerraSAR-X uydusu için en fazla RO olayı İstanbul RS çevresinde, en az RO olayı Diyarbakır RS çevresinde gözlenmiştir. Ayrıca, 2008, 2021 ve 2024 yıllarında oldukça az okültasyon gözlenmiştir. (Şekil 33).



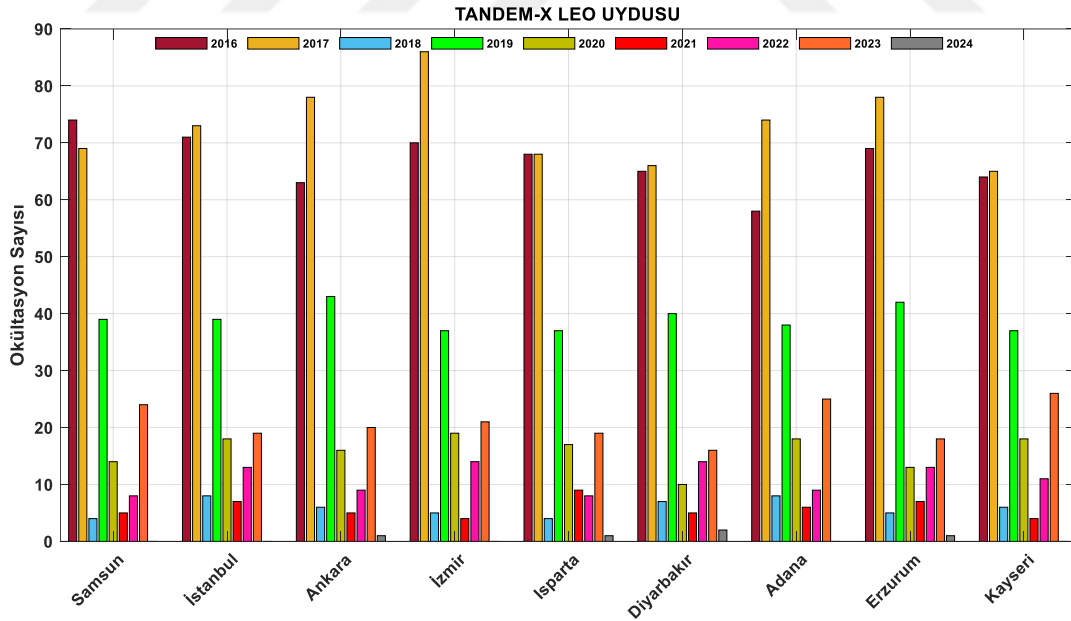
Şekil 33. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen TerraSAR-X RO dağılımı

Son olarak TanDEM-X uydusu için Türkiye bölgesinde yer alan RS konumlarına göre temin edilen dosyalarının sayısal dağılımı yıllara göre tablo olarak sunulmuştur (Tablo 17).

Tablo 17. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen TanDEM-X RO sayıları

RS	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Toplam RO
Samsun	74	69	4	39	14	5	8	24	0	237
İstanbul	71	73	8	39	18	7	13	19	0	248
Ankara	63	78	6	43	16	5	9	20	1	241
İzmir	70	86	5	37	19	4	14	21	0	256
Isparta	68	68	4	37	17	9	8	19	1	231
Diyarbakır	65	66	7	40	10	5	14	16	2	225
Adana	58	74	8	38	18	6	9	25	0	236
Erzurum	69	78	5	42	13	7	13	18	1	246
Kayseri	64	65	6	37	18	4	11	26	0	231

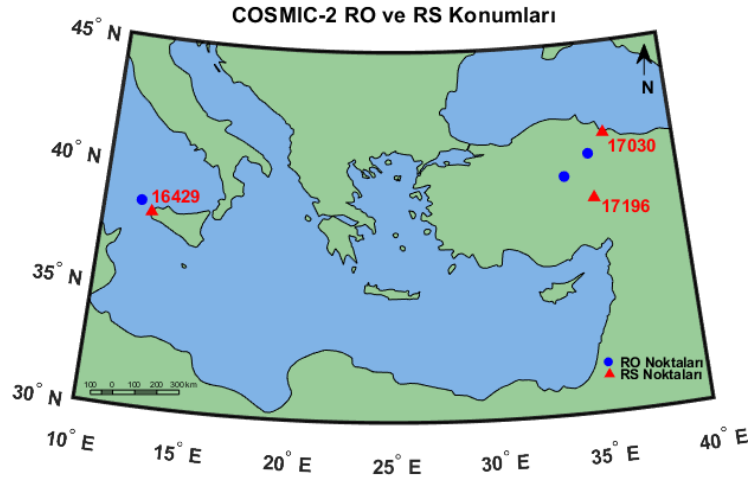
Tablo 17 incelendiğinde, genel olarak tüm RS çevresindeki okültasyon sayıları hemen hemen aynı düzeydedir. Bununla birlikte TanDEM-X uydusu için en fazla RO olayı İzmir RS çevresinde, en az RO olayı Diyarbakır RS çevresinde gözlenmiştir. Ayrıca, 2018, 2022 ve 2023 yıllarında oldukça az okültasyon gözlenmiştir (Şekil 34).



Şekil 34. Türkiye RS konumlarına göre gözlenen TanDEM-X RO dağılımı

2.4. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO Atmosferik Profillerinin Radyosonda Profilleri ile Karşılaştırılması

GNSS-RO gözlem profillerini doğrulamak için genellikle radyosonda atmosferik profillerinden yararlanılmaktadır. Çünkü, radyosonda verileri, doğrudan atmosferin belirli yüksekliklerinde yapılan ölçümlerle elde edilmektedir (Yadav vd., 2020). Ayrıca, radyosonda verilerinin atmosferik çalışmalarda uzun yıllardır kullanılması, bu verilerin iyi anlaşılmasını ve kalibrasyon süreçleriyle ilgili güçlü bir deneyim kazanılmasını sağlamıştır. Dolayısıyla radyosonda verileri, GNSS-RO tekniği verilerinin kalitesini değerlendirmek için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Bu çalışmada, FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO profillerini doğrulamak amacıyla Türkiye bölgesinden Kayseri (17196) ve Samsun RS (17030) seçilmiştir. Farklı coğrafi bölge ve atmosferik koşullar altında RO ürünlerinin doğruluğunda değişimler gözlenebileceğinden, çalışmanın bu bölümünde uluslararası bir karşılaştırma da sağlayabilmek amacıyla orta enlem kuşağında yer alan İtalya bölgesinden 37.92^0 kuzey enlemi ve 12.50^0 doğu boylamındaki Trapani/Birgi (16429) radyosonda profilleri de değerlendirmeye dahil edilmiştir. FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO profilleri, 5-25 km arasında değişen irtifalardaki radyosonda sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık profilleri ile karşılaştırılmıştır. Trapani/Birgi RS için yaklaşık 100 km-1 saat, Kayseri RS için yaklaşık 200 km-2 saat ve Samsun RS için yaklaşık 300 km-3 saat konumsal ve zamansal fark içerisinde bulunan RO gözlem dosyaları analiz edilmiştir. Analizde RS'ler için 2019 yılının farklı günlerine ait wetpf2 verileri kullanılmıştır (Şekil 35, Tablo 18).



Şekil 35. Atmosferik profillerin karşılaştırılması için seçilen RS ve COSMIC-2 RO konumları

Tablo 18. Atmosferik profillerin karşılaştırılması için seçilen RS ve COSMIC-2 RO konumları

RS	RS Enlem	RS Boylam	RS Zaman	RO Enlem	RO Boylam	RO Zaman
(16429) Trapani	37.92°	12.50°	12:00-UTC	38.34°	11.90°	12:39:19
(17196) Kayseri	38.65°	35.50°	12:00-UTC	40.49°	35.41°	13:38:00
(17030) Samsun	41.28°	36.33°	00:00-UTC	39.65°	34.02°	21:36:44

Tablo 18’de 2019 yılının 353’üncü gününde 38.34°K ve 11.90°D konumunda gözlenen RO olayı, RS noktasından ~70 km uzaklıktadır. 2019 yılının 291’inci gününde 40.49°K ve 35.41°D konumunda gözlenen RO olayı, RS noktasından ~200 km uzaklıktadır. 2019 yılının 281’ inci gününde 39.65°K ve 34.02°D konumunda gözlenen RO olayı, RS noktasından ~265 km uzaklıktadır.

Çalışmada kullanılan FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO profilleri 0-60 km dikey yüksekliğinde ve 50 m dikey örnekleme çözünürlüğündedir. Radyosonda profilleri 0-30 km dikey yüksekliğindedir. Radyosonda profillerinin dikey örnekleme çözünürlüğü ise alt seviyelerde yaklaşık 100 m iken üst seviyelerde 500 m’ye kadar değişebilmektedir. GNSS-RO ve radyosonda teknikleri farklı yöntemler olduğu için bu yöntemler sonucunda temin edilen verilerin yükseklikleri de farklıdır. Bu nedenle, FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO ve radyosonda profillerinin ortak konumlu dikey karşılaştırmasını yapabilmek için veriler üzerinde 500 m aralıklı olacak şekilde spline enterpolasyon yöntemi uygulanmıştır. FORMOSAT-7/COSMIC-2 ve radyosonda tekniği atmosferik profilleri, Mutlak Ortalama Hata (MOH), Karesel Ortalama Hata (KOH) ve Oransal Hata olarak da bilinen Bağlı Hata (BH) ile değerlendirilmiştir. MHO, KOH ve BH değerleri

$$MOH = \frac{\sum_{i=1}^n (|x_{GNSS-RO,i} - x_{Radyosonda,i}|)}{n} \quad (50)$$

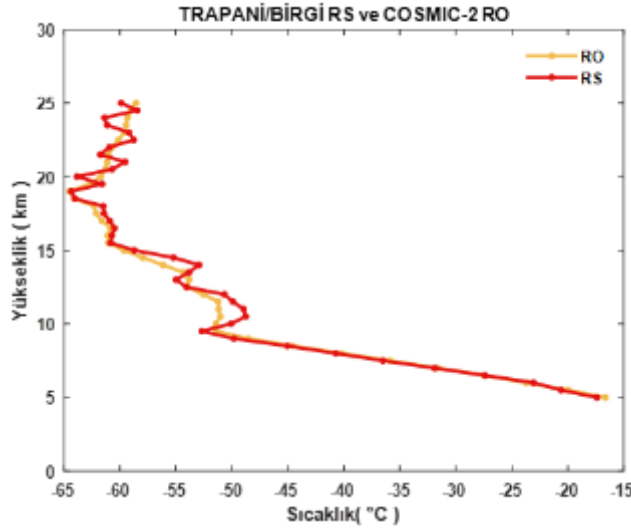
$$KOH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{GNSS-RO,i} - x_{Radyosonda,i})^2}{n}} \quad (51)$$

$$BH = \frac{MOH}{|\bar{x}_{Radyosonda}|} \quad (52)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır (Zhang vd., 2018). Bu eşitliklerde, $x_{\text{GNSS-RO}}$ GNSS-RO atmosferik parametre verileri, $x_{\text{Radyosonda}}$ radyosonda atmosferik parametre verileri ve n , ölçü sayısını, $\bar{x}_{\text{Radyosonda}}$ ise radyosonda atmosferik verilerin ortalamasını ifade etmektedir. MOH ve KOH, GNSS-RO verilerinin radyosonda verileri ile ne kadar uyumlu olduğunu değerlendirmek için hesaplanmıştır. MOH ve KOH değerlerinin düşük düzeyde elde edilmesi RO ve radyosonda verileri arasında uyumun iyi olduğunu, her iki yöntemin de doğru ve güvenilir ölçü sağladığını ortaya koymaktadır. BH ise MOH büyüklüğünün radyosonda ölçümlerinin ortalama değerine oranı olarak tanımlanır ve ölçülen farkın bağlam içindeki anlamlılığını ortaya koyar. BH'nin düşük çıkması, MOH değeri büyük olsa bile, GNSS-RO verilerinin radyosonda verilere görece yakınlığını gösterir ve yöntemin güvenilirliğini destekler.

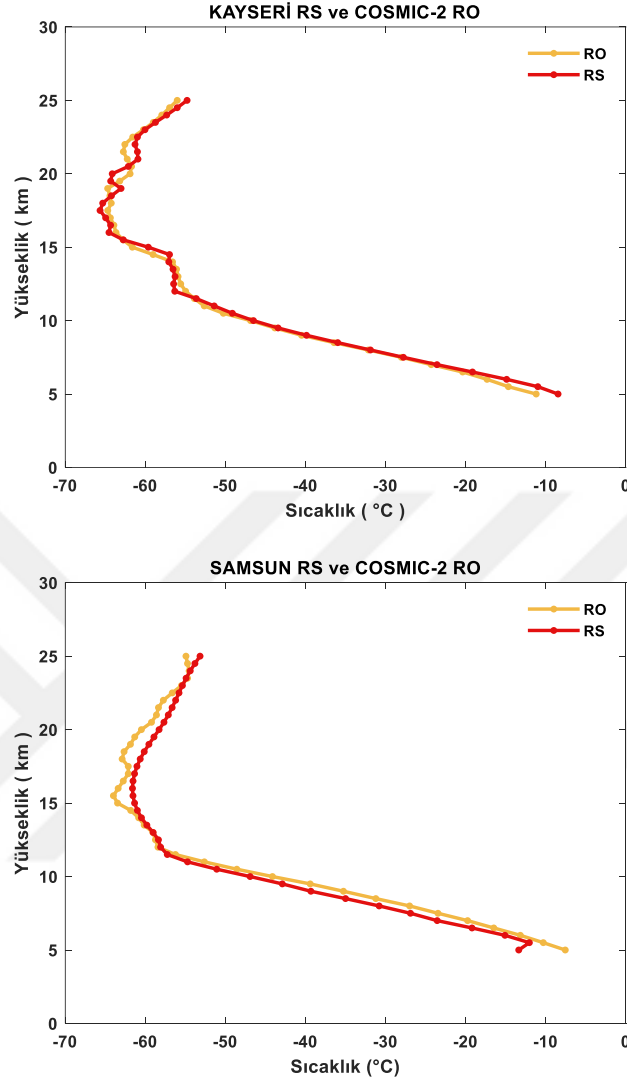
2.4.1. Sıcaklık Profillerinin Karşılaştırılması

Sıcaklık, atmosferin nasıl ısınıp nasıl soğuduğunun anlaşılması için önemli bir parametredir. Atmosferin en alt katmanı olan troposferde sıcaklık, genellikle yükseklikle beraber azalmaktadır (Şekil 36).



Şekil 36. Radyosonda ve COSMIC-2 RO sıcaklık profillerinin karşılaştırılması

Şekil 36'nın devamı



Şekil 36 incelendiğinde genel olarak atmosfer içerisindeki sıcaklığın 5 km'den 10-12 km ye kadar azaldığı, 15 km'den sonra arttığı gözlenmiştir. Trapani/Birgi RS için radyosonda sıcaklık profillerinin, 5-10 km arasında COSMIC-2 RO sıcaklık profilleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. COSMIC-2 RO sıcaklıkları, 10-18 km arasında genel olarak radyosonda sıcaklıklarından daha düşüktür. COSMIC-2 RO ve radyosonda sıcaklıkları, 18 km üzerinde birbiriyle uyumlu değildir. 18 km üzerinde yükseklik arttıkça bazen COSMIC-2 RO sıcaklıkları radyosonda sıcaklıklarından daha düşük bazen de radyosonda sıcaklıkları COSMIC-2 RO sıcaklıklarından daha düşüktür. Kayseri RS için radyosonda sıcaklık profillerinin 7-12 km arasında COSMIC-2 RO sıcaklık profilleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Radyosonda ve COSMIC-2 RO sıcaklık farklarının 13-25 km arasında belirginleştiği gözlenmiştir. Samsun RS için 5-12 km arasında sıcaklık farklarının belirgin

olduğu ve radyosonda sıcaklıklarının COSMIC-2 RO sıcaklıklarından daha düşük olduğu gözlenmiştir. 15 km üzerinde ise COSMIC-2 RO sıcaklıkları radyosonda sıcaklıklarından daha düşüktür. Ayrıca, 10 km yüksekliğinde sıcaklıkların Trapani/Birgi RS için -55°C ile -50°C arasında, Kayseri RS için -50°C ile -40°C arasında, ve Samsun RS için ise -50°C ile -40°C arasında değiştiği gözlenmiştir. Kayseri ve Samsun RS için benzer sıcaklık aralıklarının olması, her iki bölgenin birbirine yakın enlem ve boylamlarda yer alması ve benzer güneşlenme süreleri, atmosferik radyasyon etkileri yaşaması gibi çeşitli meteorolojik koşullara sahip olmasından, Trapani/Birgi RS için gözlenen farklılıklar ise coğrafi konumundan kaynaklanabilir. Sıcaklık profilleri için 5-10 km arasında istatistiksel yorumlama yapabilmek için MOH, KOH ve BH hesaplanmıştır (Tablo 19).

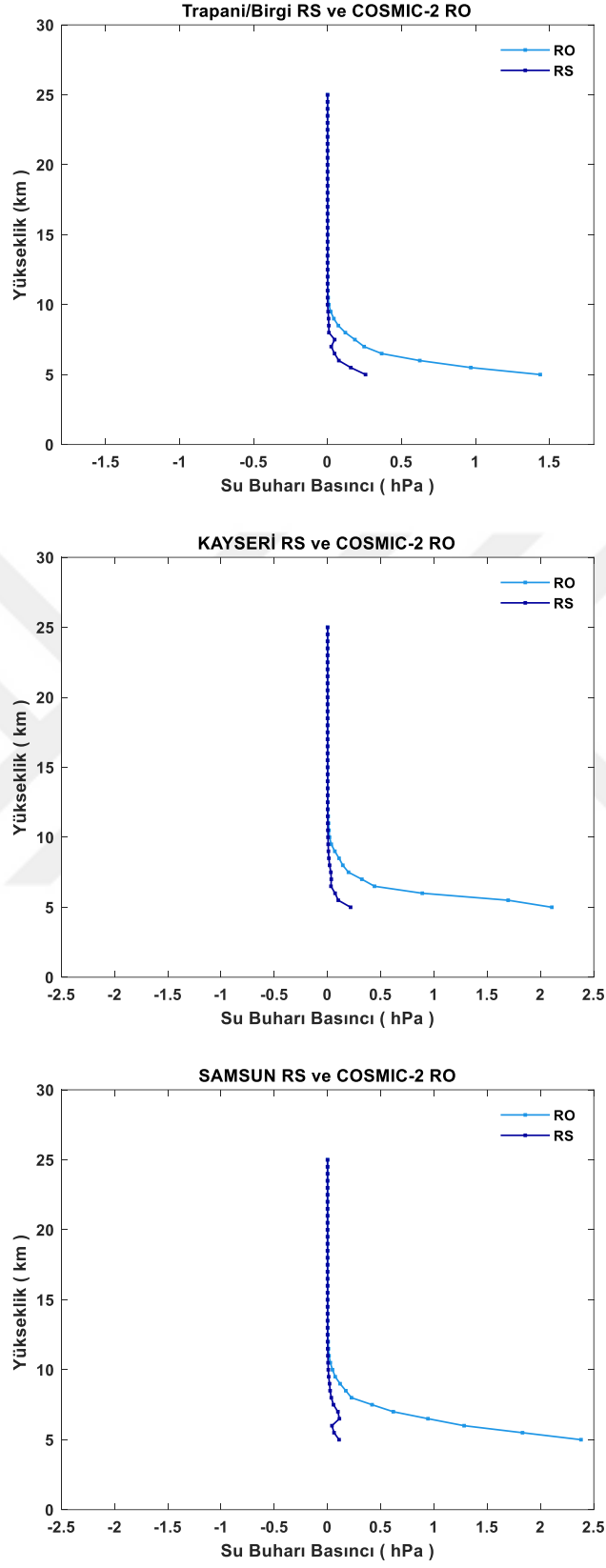
Tablo 19. Radyosonda ve COSMIC-2 RO sıcaklık profillerinin 5-10 km arasındaki hataları

İstasyon	Yükseklik	MOH ($^{\circ}\text{C}$)	KOH ($^{\circ}\text{C}$)	BH
Trapani/Birgi	5-10 km	0.7162	0.8672	0.0199
Kayseri	5-10 km	1.1962	1.7323	0.0435
Samsun	5-10 km	3.3950	3.7313	0.1223

Tablo 19 incelendiğinde, radyosonda ve COSMIC-2 RO sıcaklık profilleri için hesaplanan hata sonuçlarının, 100 km-1 saat sınırlandırması için seçilen Trapani/Birgi RS’de, Kayseri ve Samsun RS’den daha düşük olduğu gözlenmiştir.

2.4.2. Su Buharı Basıncı Profillerinin Karşılaştırılması

Su buharı basıncı, belirli bir sıcaklık ve nem oranındaki havada bulunan su buharının, atmosfer üzerinde oluşturduğu basınçtır. Radyosonda profilleri için su buharı basıncı, çığ sıcaklığına bağlı olarak üretilmiştir. Çığ sıcaklığı, havadaki su buharının yoğunlaşmaya başlayarak sıvı hale geçtiği sıcaklıktır. Diğer bir ifadeyle, çığ noktası sıcaklığı, havadaki su buharının mevcut kısmi basıncında doymunluğa ulaşip yoğunlaşmaya başladığı sıcaklıktır. Troposferde su buharı basıncı genel olarak daha yüksek olma eğilimindedir, ancak bu durum bölgesel iklim, mevsim ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir (Şekil 37).



Şekil 37. Radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profillerinin karşılaştırılması

Şekil 37 incelendiğinde 5-10 km arasında radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profillerinin belirgin bir farklılık gösterdiği, 10 km üzerinde oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla, su buharı basıncı değerleri arasındaki belirgin farkı istatistiksel olarak yorumlamak için MOH, KOH ve BH hesaplanmıştır (Tablo 20).

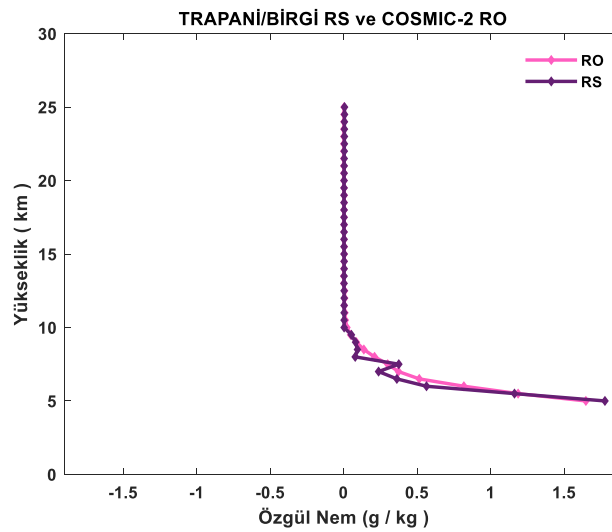
Tablo 20. Radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profillerinin 5-10 km arasındaki hataları

İstasyon	Yükseklik	MOH (hpa)	KOH (hpa)	BH
Trapani/Birgi	5-10 km	0.1076	0.4826	1.9359
Kayseri	5-10 km	0.1718	0.8028	3.5240
Samsun	5-10 km	0.2065	0.9998	3.9735

Tablo 20 incelendiğinde, radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profilleri için hesaplanan hata sonuçlarının, 100 km-1 saat sınırlandırması için seçilen Trapani/Birgi RS’de, Kayseri ve Samsun RS’den daha düşük olduğu gözlenmiştir.

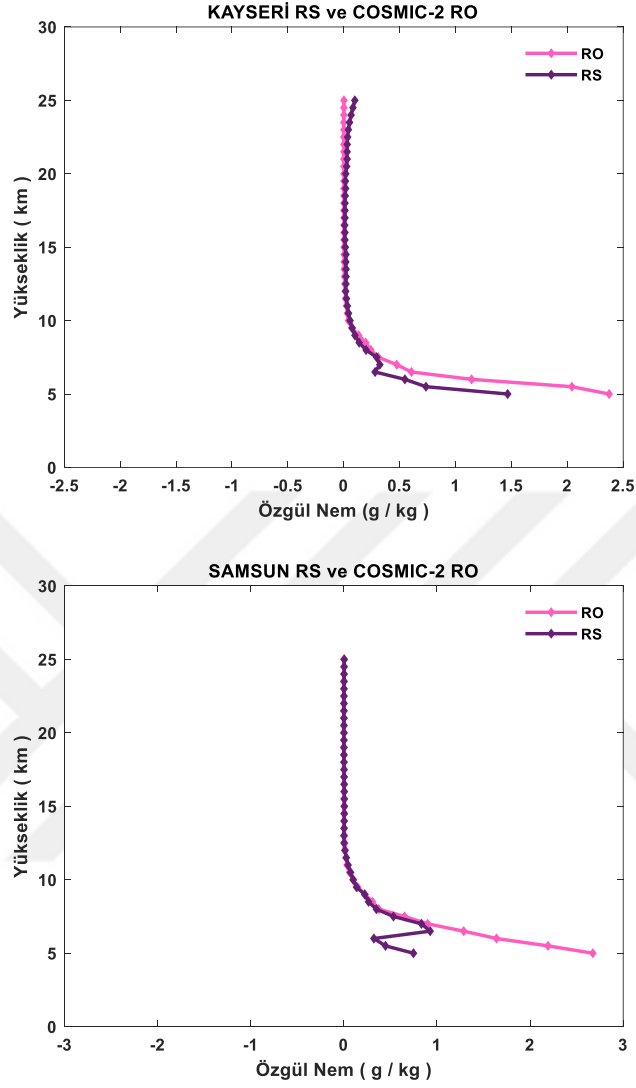
2.4.3. Özgül Nem Profillerinin Karşılaştırılması

Özgül nem, atmosferik koşulları tanımlamak için kullanılan önemli bir parametredir ve birim ağırlıktaki kuru hava içinde bulunan su buharının ağırlığını ifade eder. Özgül nem, radyosonda profilleri için basınç ve su buharı basıncından hesaplanmıştır (Şekil 38).



Şekil 38. Radyosonda ve COSMIC-2 RO özgül nem profillerinin karşılaştırılması

Şekil 38'in devamı



Şekil 38 incelendiğinde radyosonda özgül nem profilleri, 10 km üzerinde COSMIC-2 RO profilleri ile oldukça uyumludur. Trapani/Birgi RS için 5-10 km arasında radyosonda ve COSMIC-2 RO özgül nem profilleri, Kayseri ve Samsun RS'e göre daha uyumludur. 5-10 km arasında özgül nem değerleri arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak yorumlamak için MOH, KOH ve BH hesaplanmıştır (Tablo 21).

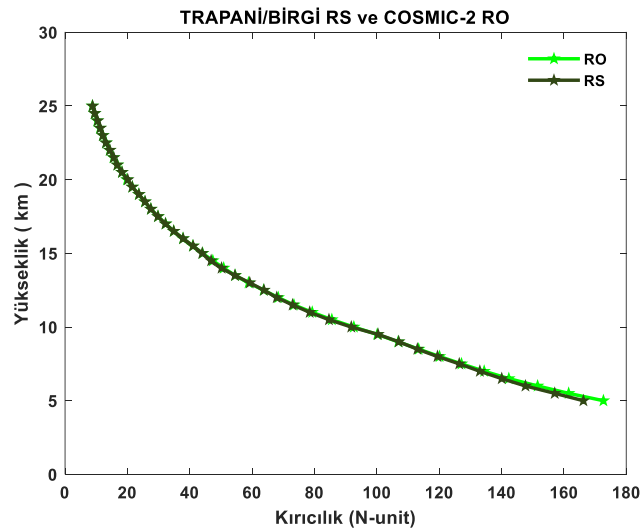
Tablo 21. Radyosonda ve COSMIC-2 RO özgül nem profillerinin 5-10 km arasındaki hataları

İstasyon	Yükseklik	MOH (g/kg)	KOH (g/kg)	BH
Trapani/Birgi	5-10 km	0.0118	0.1163	0.0271
Kayseri	5-10 km	0.0825	0.5239	0.2154
Samsun	5-10 km	0.1751	0.8860	0.3935

Tablo 21 incelendiğinde, radyosonda ve COSMIC-2 RO özgül nem profilleri için hesaplanan hata sonuçlarının, 100 km-1 saat sınırlandırması için seçilen Trapani/Birgi RS'de, Kayseri ve Samsun RS'den daha düşük olduğu gözlenmiştir.

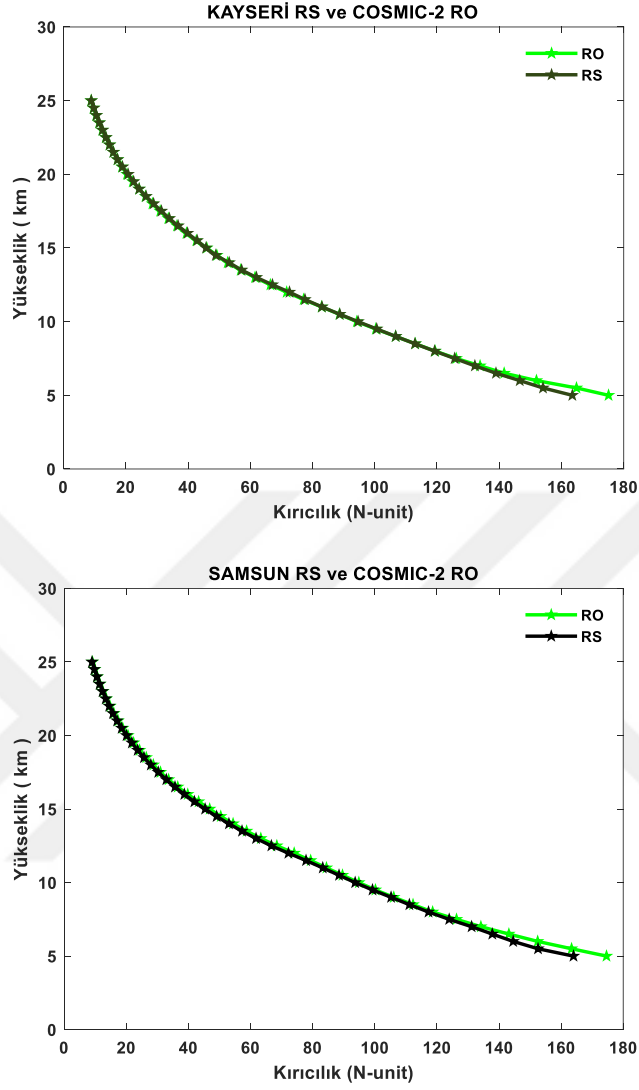
2.4.4. Kırıcılık Profillerinin Karşılaştırılması

Kırıcılık, elektromanyetik dalgaların atmosferden geçerken hava yoğunluğundaki değişiklikler nedeniyle düz bir çizgiden sapmasıdır. Yükseklik arttıkça hava yoğunluğu azalır. Bu durum, kırılma indisinin de azalmasına sebep olur. Dolayısıyla, kırılma indisi, yüzeye yakın bölgelerde daha yüksektir ve elektromanyetik dalgalar troposferde daha belirgin şekilde kırılmaya maruz kalır. Radyosonda profilleri için kırıcılık değeri hesaplanmış ve COSMIC-2 RO kırıcılık profilleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 39).



Şekil 39. Radyosonda ve COSMIC-2 RO kırıcılık profillerinin karşılaştırılması

Şekil 39'un devamı



Şekil 39 incelendiğinde radyosonda ile COSMIC-2 RO kırıcılık profilleri arasında Trapani/Birgi RS için 6 km, Kayseri RS için 6.5 km ve Samsun RS için 7 km üzerinde oldukça iyi bir uyum gözlenmiştir. İstasyonlar arasında radyosonda ve COSMIC-2 RO kırıcılık profilleri arasındaki fark, en az Trapani/Birgi’de, en fazla ise Samsun’da gözlenmiştir. Tüm istasyonlarda, hem radyosonda hem de COSMIC-2 RO gözlemlerinde, kırıcılık değerlerinin 5 km civarında 160 ile 180 N-unit arasında değiştiği gözlenmiştir. 5-10 km arasında kırıcılık değerleri arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak yorumlamak için MOH, KOH ve BH hesaplanmıştır (Tablo 22).

Tablo 22. Radyosonda ve COSMIC-2 RO kırıcılık profillerinin 5-10 km arasındaki hataları

İstasyon	Yükseklik	MOH (N-unit)	KOH (N-unit)	BH
Trapani/Birgi	5-10 km	0.5833	2.7858	0.0046
Kayseri	5-10 km	1.0581	5.1377	0.0083
Samsun	5-10 km	0.9661	5.5690	0.0077

Tablo 22 incelendiğinde, radyosonda ve COSMIC-2 RO kırıcılık profilleri için hesaplanan hata sonuçlarının, 100 km-1 saat sınırlandırması için seçilen Trapani/Birgi RS’de, Kayseri ve Samsun RS’den daha düşük olduğu gözlenmiştir.

2.5. GNSS-RO Atmosferik Profillerden PWV Hesabı

Atmosferin farklı katmanlarındaki hava durumunu anlamak için zorunlu ya da standart basınç seviyeleri kritik öneme sahiptir. Bu basınç seviyeleri: 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa olmak üzere 16 adettir. Bu basınç seviyeleri, hava tahmini ve iklim analizi için önemli olayların gerçekleştiği basınç seviyeleridir. Genel olarak, su buharının kütle yoğunluğu, basınca doğrudan orantılı yarı üssel bir şekilde azalır ve yüzeye yakın alanlarda daha yüksektir. Basınç azaldıkça nem içeriği de azalır. Önceki araştırmalar, deniz seviyesindeki PWV miktarının %40 ile %60’ının 1000 ila 850 hPa basınç katmanında bulunduğunu ve yaklaşık %90’ının yüzey ile 500 hPa arasında yer aldığını göstermiştir (Raj vd., 2004, Kelsey vd., 2022, Shao vd., 2023).

GNSS-RO wetPf2 profillerinde standart basınç seviyelerindeki özgül nem değişimleri yer almamaktadır. Bu nedenle, RO verileri standart basınç katmanlarına göre enterpole edilmiştir. RO wetPf2 verilerinin interpolasyonu için başlangıçta α ve β parametreleri

$$\alpha = \frac{\ln P - \ln P_2}{\ln P_1 - \ln P_2} \quad (53)$$

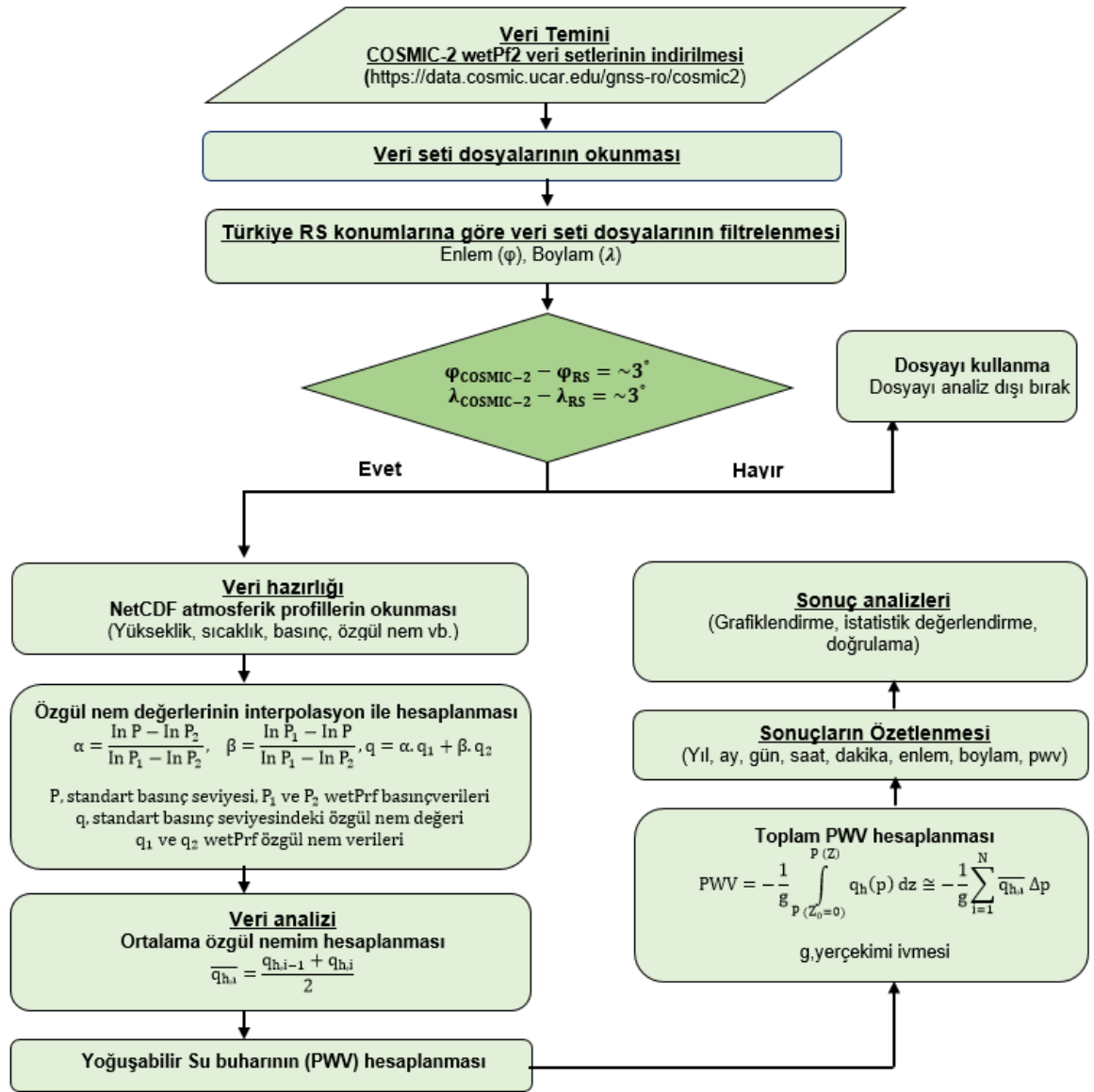
$$\beta = \frac{\ln P_1 - \ln P}{\ln P_1 - \ln P_2} \quad (54)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır. Burada P standart basınç seviyesinin basıncıdır, P_1 ve P_2 wetPf2 verileridir. Gerekli standart basınç seviyeleri için özgül nem değerleri, α ve β parametreleri kullanılarak

$$q = \alpha \cdot q_1 + \beta \cdot q_2 \quad (55)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır. Burada, q standart basınç seviyesindeki özgül nem değeridir, q_1 ve q_2 wetpf2 verilerindeki özgül nem değerleridir (Wang vd., 2013).

GNSS-RO tekniği ile PWV değerlerinin üretilmesi MATLAB yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, GNSS-RO tekniği ile PWV kestirimi için yazılım algoritmasının geliştirilmesi kapsamında yapılan açıklama ve denklemlere bağlı olarak özet niteliğinde bir iş akış şeması sunulmuştur (Şekil 40).



Şekil 40. GNSS-RO PWV kestirimi için hazırlanan yazılım algoritması

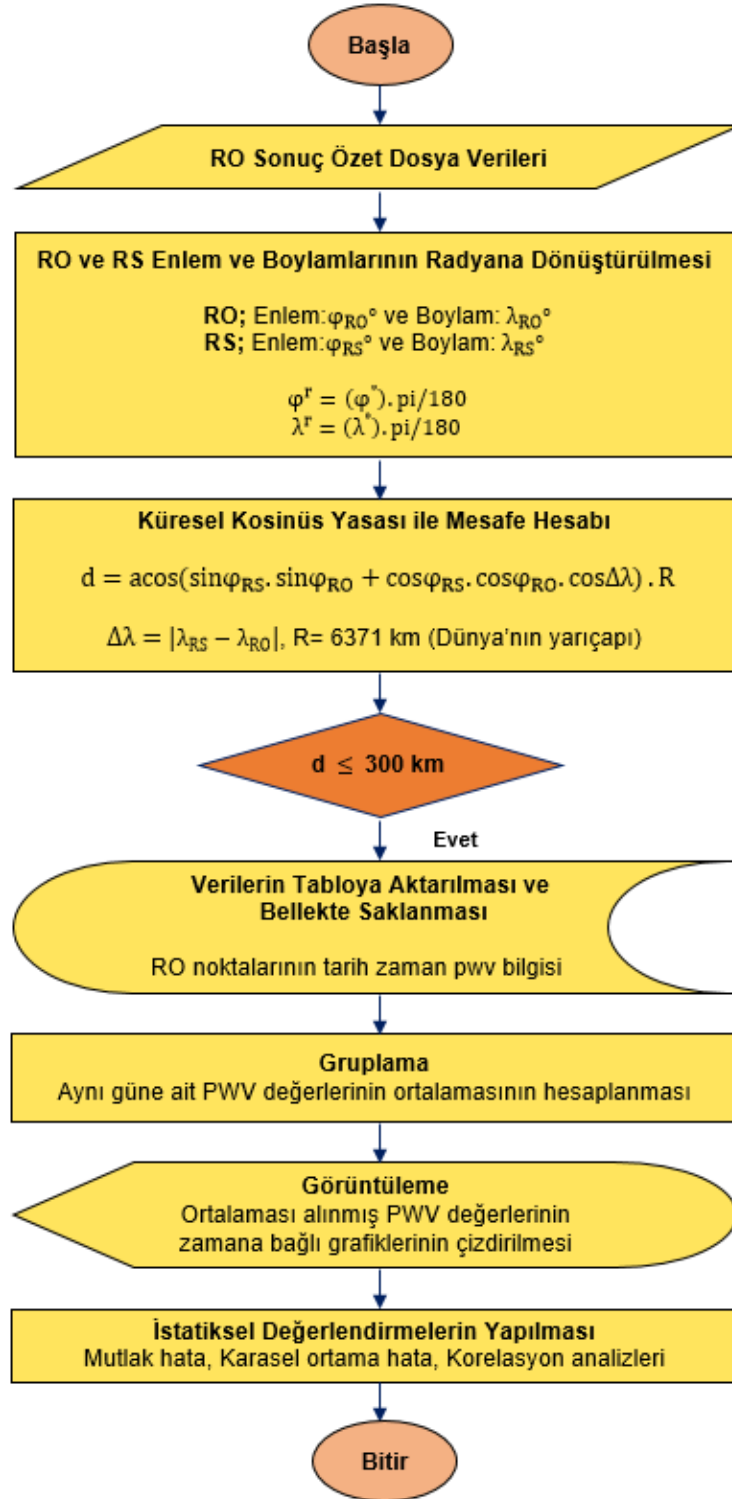
Şekil 40’da özetlenen sonuçlar için, netCDF dosyalarından elde edilen yıl, ay, gün, saat, dakika, enlem, boylam ve PWV verileri metin dosyalarına aktarılmıştır. Başlangıçta $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ farkla sağlanan bu netCDF dosyaları mesafe bazında daha hassas incelenmiştir. Bu kapsamda, GNSS-RO tekniğinin ~ 300 km yatay çözünürlüğü göz önünde bulundurularak RS ve RO noktaları arasındaki mesafe 300 km ile sınırlandırılmıştır. RS ve RO enlem ve boylamlarından iki nokta arası mesafe, Küresel Kosinüs Yasası’na göre

$$d = \arccos(\sin\varphi_1 \cdot \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \cos\Delta\lambda) \cdot R \quad (56)$$

eşitliğinden hesaplanabilir (URL-18, 2024). Burada d, mesafe, φ_1 ve λ_1 RS noktasının enlem ve boylamı, φ_2 ve λ_2 RO noktasının enlem ve boylamı, $\Delta\lambda$, boylamlar arasındaki fark, R ise dünyanın yarıçapıdır. $\Delta\lambda$,

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 \quad (57)$$

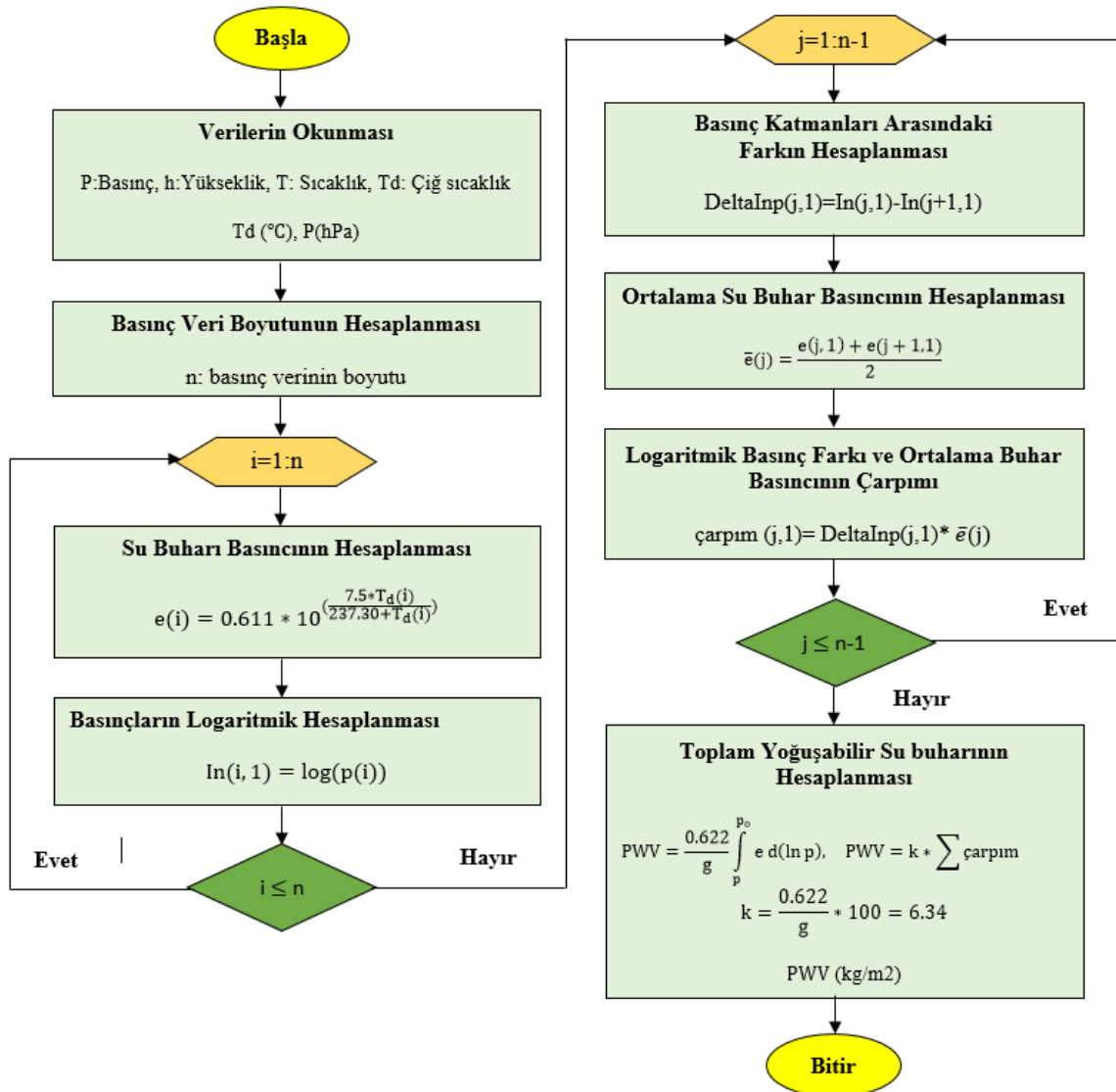
şeklinde ifade edilebilir. RS ve RO noktaları arasındaki mesafesi 300 km’yi aşan dosyalar, grafiklendirme ve istatistiksel değerlendirme gibi analizlere dahil edilmemiş ve tüm bu işlemlerin planlaması bir iş akış şeması olarak sunulmuştur (Şekil 41).



Şekil 41. GNSS-RO PWV kestirimi için hazırlanan sınırlandırma kriteri algoritması

2.6. Radyosonda Atmosferik Profillerinden PWV Hesabı

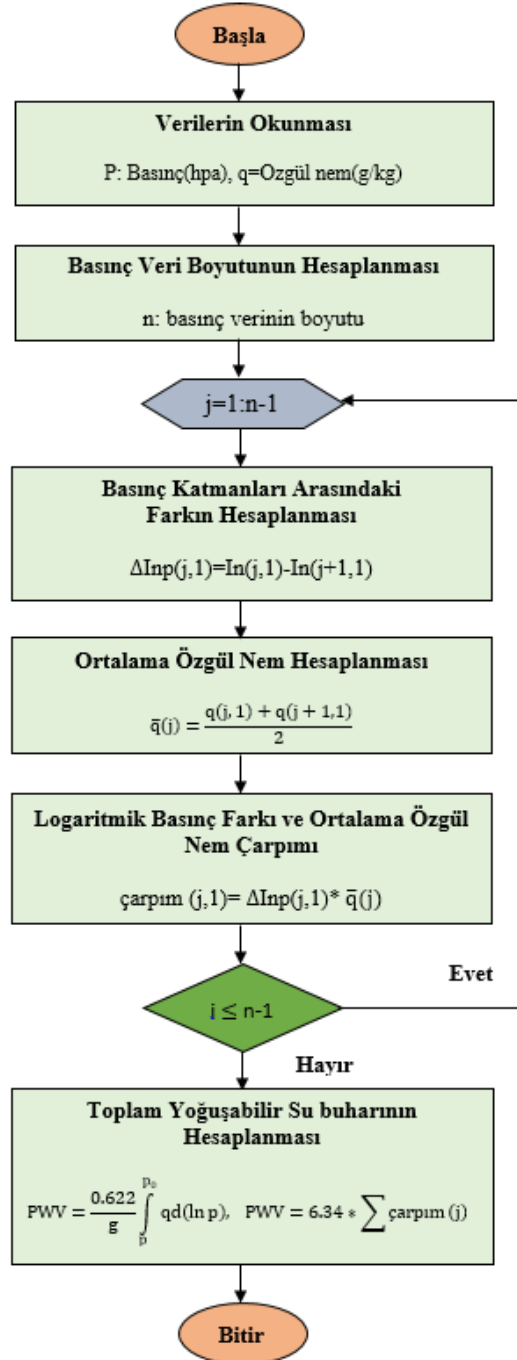
Radyosonda rasatlarından PWV doğrudan ölçülemediği için ölçülen meteorolojik verilerle hesaplanmıştır. Bunun için radyosonda balonun yükselmesine bağlı olarak her bir zorunlu yüzey katmanındaki standart basınç profilleri içerisinde gözlemlenen sıcaklık değerlerinden yararlanılmıştır. MATLAB yazılım ortamında geliştirilen radyosonda PWV hesabı iş akış şeması olarak sunulmuştur (Şekil 42).



Şekil 42. Radyosonda PWV kestirimi için hazırlanan yazılım algoritması

2.7. ECMWF ERA5 Atmosferik Profillerinden PWV Hesabı

ECMWF ERA5 yeniden analiz ürünlerinden özgül nem ve basınç profilleri kullanılarak MATLAB ortamında geliştirilen yazılım algoritması iş akış şeması olarak sunulmuştur (Şekil 43).



Şekil 43. ECMWF ERA5 PWV kestirimi için hazırlanan yazılım algoritması

2.8. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ECMWF ERA5 Yeniden Analiz Atmosferik Profillerinden Üretilen PWV Değerlerinin Karşılaştırılması

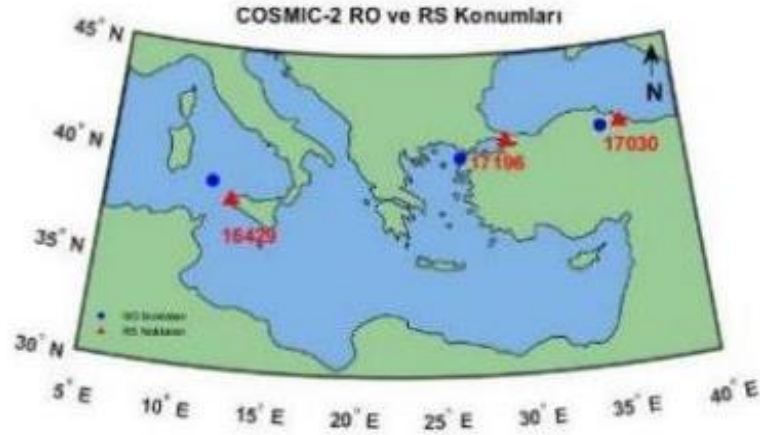
FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO wetPf2 profillerinden PWV kestirim yazılımı elde edilen sonuçlar, Radyosonda ve ECMWF ERA5 yeniden analiz ürünlerinden ilgili PWV kestirim yazılımlarına göre elde edilen sonuçlara göre hem günlük olarak hem de zaman serisi olarak karşılaştırılmıştır.

2.8.1. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ECMWF ERA5 PWV Değerlerinin Günlük Olarak Karşılaştırılması

FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO wetPf2 profilleri, genellikle 850 hPa'dan daha yüksek basınç seviyelerinde mevcut değildir. Ancak bu çalışmada, bu seviyelerde nadiren elde edilebilen FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO profillerinin PWV sonuçlarına etkisini incelemek amacıyla üç farklı kriter uygulanmıştır. İlk kriterde, 1000 hPa'dan daha yüksek basınç seviyelerindeki; ikinci kriterde 925 hPa'dan daha yüksek basınç seviyelerindeki; üçüncü kriterde ise 850 hPa'dan daha yüksek basınç seviyelerindeki FORMOSAT-7/COSMIC-2 wetPf2 profillerini içeren netCDF dosyaları seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kriterlere göre, Türkiye'deki (Samsun, İstanbul, İzmir) ve İtalya'daki (Trapani/Birgi) bölgelerden seçilen RS'lerin farklı kombinasyonları ile çalışma alanları oluşturulmuştur. FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO verilerinde yapılan enterpolasyon sonucunda, standart basınç seviyeleri ve bu seviyeler için özgül nem değerleri elde edilmiştir. Ardından, bu başlık altında uygulama için belirlenen kriterler kapsamında eşleşen standart basınç seviyelerine göre hesaplanan RO atmosferik PWV dikey profilleri, RS ve ERA5 verilerinden hesaplanan PWV profilleri ile gün bazında karşılaştırılmıştır.

- 1000 hPa ve Üzeri Dikey Atmosferik PWV Profillerinin Karşılaştırılması

1000 hPa'dan daha yüksek basınç seviyelerindeki RO wetPf2 profillerinden hesaplanan PWV dikey profillerini Radyosonda ve ERA5 ile karşılaştırmak için ilk kriter kapsamında Samsun, Trapani ve İstanbul RS seçilmiştir (Şekil 44).

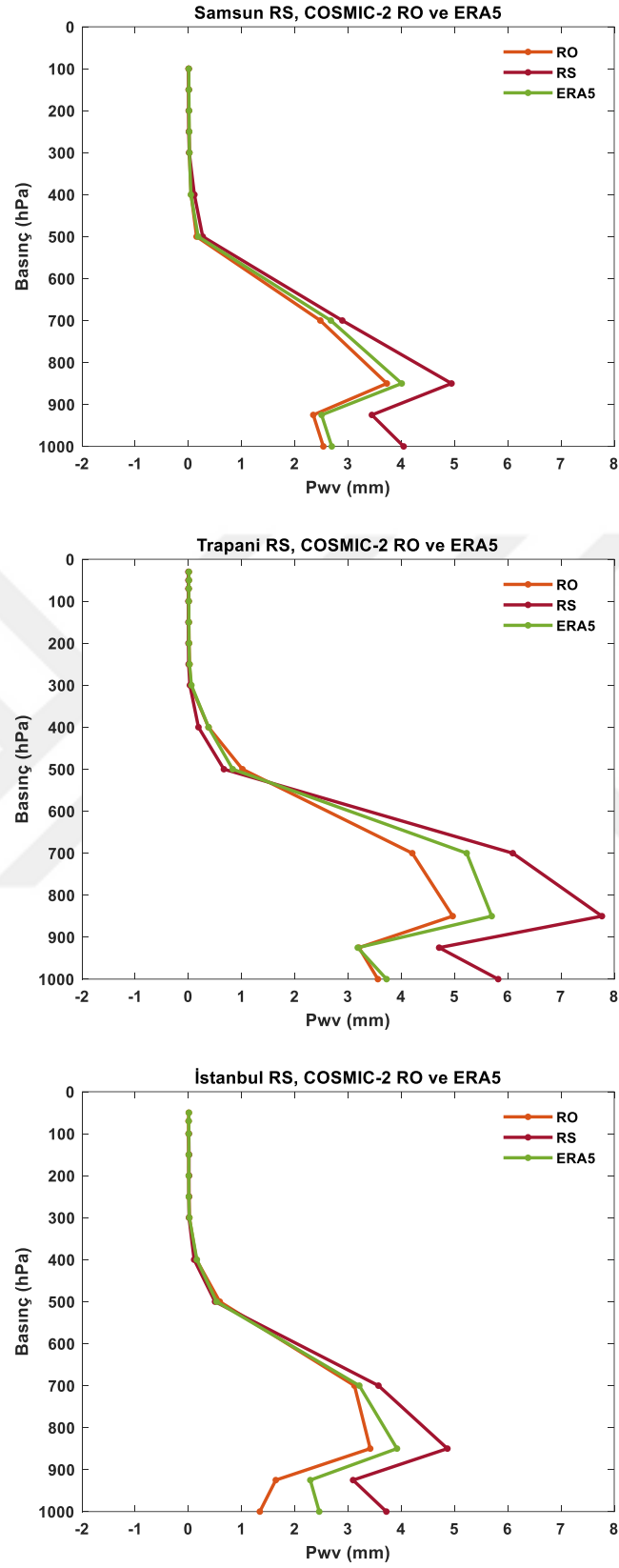


Şekil 44. 1000 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen COSMIC-2 RO ve RS konumları

Tablo 23. 1000 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen istasyonlar

RS	RS Enlem	RS Boylam	RS Zaman	RO Enlem	RO Boylam	RO Zaman
(17030) Samsun	41.28°	36.33°	00:00-UTC	41.202°	35.128°	00:09
(16429) Trapani	37.92°	12.50°	12:00-UTC	38.719°	11.279°	10:10
(17196) İstanbul	40.90°	29.15°	00:00-UTC	40.169°	26.302°	03:01

Şekil 44 ve Tablo 23'te gözlenen RO olayları, Samsun RS için yaklaşık 100 km, Trapani/Birgi RS için yaklaşık 140 km ve İstanbul RS için yaklaşık 255 km uzaklıkta gerçekleşmiştir. Bu tabloya göre birinci kriter için ERA5 verileri ise, RS enlem ve boylamlarına en yakın olacak şekilde Samsun, Trapani, İstanbul için sırasıyla, 41.25° K ve 36.25° D, 38.00° K ve 12.50° D, 41.00° K ve 29.25° D konumlarına karşılık gelen zamanlarda seçilmiştir (Şekil 45).



Şekil 45. 1000 hPa ve üzeri COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması

Şekil 45 incelendiğinde PWV değerlerinin sırasıyla RO için 0-3 mm, ERA5 için 0-4 mm ve RS için 0-5 mm aralığında olduğu gözlenmiştir. Samsun, Trapani ve İstanbul RS istasyonları için PWV değişimlerinin istatistiksel analizi için MOH ve KOH değerleri hesaplanmıştır (Tablo 24).

Tablo 24. 1000 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için MOH ve KOH değerlerinin karşılaştırılması

RS	MOH (mm)			KOH (mm)		
	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS
Samsun	0.4020	0.0766	0.3284	0.7179	0.1296	0.6040
Trapani	0.6429	0.1531	0.5004	1.2076	0.3555	0.9542
İstanbul	0.5346	0.2215	0.3153	1.0038	0.4394	0.5716

Tablo 24 incelendiğinde, Samsun, Trapani ve İstanbul için MOH'nin sırasıyla 0.0-0.4 mm, 0.1-0.6 mm ve 0.2-0.5 mm arasında değiştiği gözlenmiştir. İstasyonlar için KOH değerlerinin ise sırasıyla 0.1-0.7 mm, 0.3-1.2 mm ve 0.4-1.0 mm arasında olduğu bulunmuştur.

Samsun, Trapani ve İstanbul RS istasyonları için PWV değişimlerinin istatistiksel analizi için MOH ve KOH değerlerinin yanı sıra BH değerleri de hesaplanmıştır (Tablo 25).

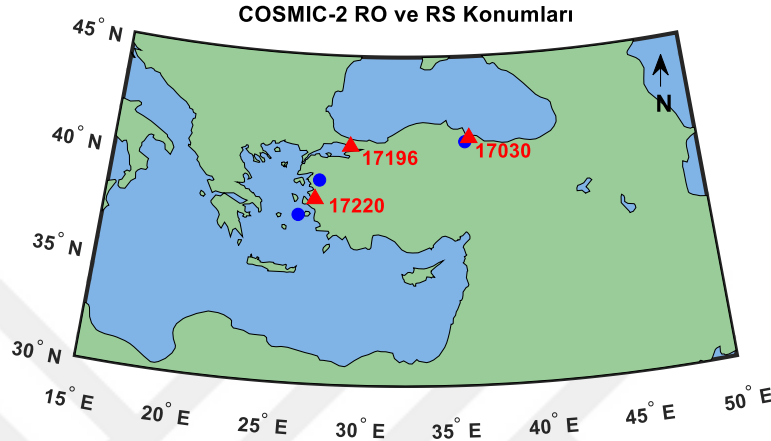
Tablo 25. 1000 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için BH değerlerinin karşılaştırılması

RS	BH		
	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS
Samsun	0.2808	0.0692	0.2293
Trapani	0.3587	0.1119	0.2771
İstanbul	0.3696	0.1932	0.2180

Tablo 25 incelendiğinde, Samsun, Trapani ve İstanbul için BH değerlerinin sırasıyla 0.06-0.28, 0.11-0.36 ve 0.19-0.37 arasında değiştiği gözlenmiştir. Bununla birlikte her bir istasyon için en düşük BH değeri RO ve ERA5 PWV değerleri arasında, en yüksek BH değeri ise RO ve RS PWV değerleri arasında gözlenmiştir.

- 925 hPa ve Üzeri Dikey Atmosferik PWV Profillerinin Karşılaştırılması

925 hPa'dan daha yüksek basınç seviyelerindeki RO wetPf2 profillerinden hesaplanan PWV dikey profillerini RS ve ERA5 ile karşılaştırmak için ikinci kriter kapsamında Samsun, İzmir ve İstanbul RS seçilmiştir (Şekil 46).

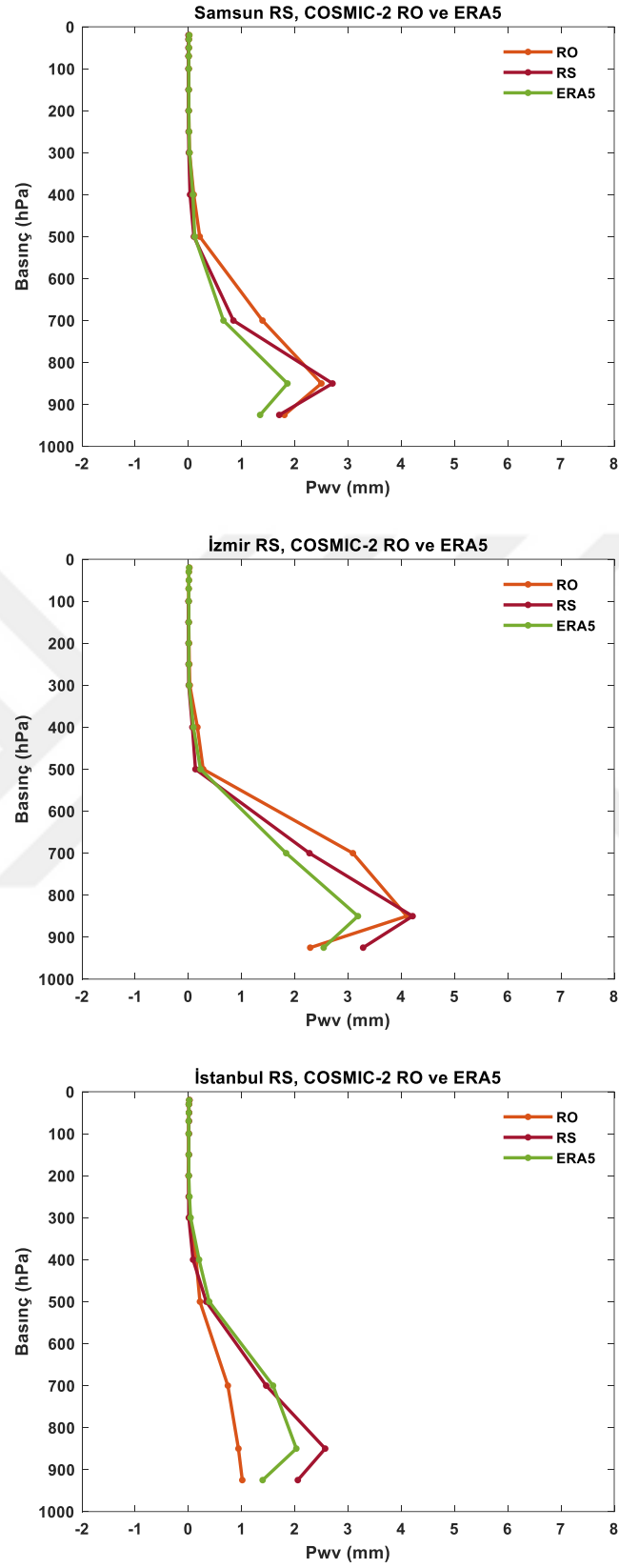


Şekil 46. 925 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen COSMIC-2 RO ve RS konumları

Tablo 26. 925 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen istasyonlar

RS	RS Enlem	RS Boylam	RS Zaman	RO Enlem	RO Boylam	RO Zaman
(17030) Samsun	41.28°	36.33°	12:00-UTC	41.109°	36.078°	11:07
(17220) İzmir	38.43°	27.17°	12:00-UTC	37.675°	26.240°	10:21
(17196) İstanbul	40.90°	29.15°	12:00-UTC	39.302°	27.377°	14:36

Şekil 46 ve Tablo 26'da gözlenen RO olayları, Samsun RS için yaklaşık 28 km, İzmir RS için yaklaşık 117 km ve İstanbul RS için yaklaşık 233 km uzaklıkta gerçekleşmiştir. Bu tabloya göre ikinci kriter için ERA5 verileri ise, RS enlem ve boylamlarına en yakın olacak şekilde Samsun, İzmir, İstanbul için sırasıyla, 41.25°K ve 36.25°D, 38.50°K ve 27.25°D, 41.00°K ve 29.25°D konumlarına karşılık gelen zamanlarda seçilmiştir (Şekil 47).



Şekil 47. 925 hPa ve üzeri COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması

Şekil 47 incelendiğinde Samsun ve İstanbul RS için tüm yöntemlerle elde edilen PWV değerlerinin genellikle 0-3 mm, İzmir RS için ise 0-4 mm arasında olduğu gözlenmiştir. Genel olarak, Samsun istasyonunda RS, RO ve ERA5 PWV değişimlerinin MOH ve KOH değerlerinin İzmir ve İstanbul istasyonlarına kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir (Tablo 27).

Tablo 27. 925 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için MOH ve KOH değerlerinin karşılaştırılması

RS	MOH (mm)			KOH (mm)		
	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS
Samsun	0.0793	0.1390	0.1090	0.1686	0.2991	0.2609
İzmir	0.2208	0.2579	0.2347	0.4341	0.5255	0.4480
İstanbul	0.2582	0.1845	0.1117	0.5738	0.4003	0.2424

Tablo 27 incelendiğinde en yakın konum ve zaman sınırında bulunan Samsun, İzmir ve İstanbul için MOH'nin sırasıyla 0.0-0.1 mm, 0.2 mm ve 0.1-0.2 mm arasında değiştiğini göstermektedir. İstasyonlar için KOH değerlerinin sırasıyla 0.2-0.3 mm, 0.4-0.5 mm ve 0.2-0.6 mm arasında olduğu bulunmuştur.

Samsun, İzmir ve İstanbul RS istasyonları için PWV değişimlerinin istatistiksel analizi için MOH ve KOH değerlerinin yanı sıra BH değerleri de hesaplanmıştır (Tablo 28).

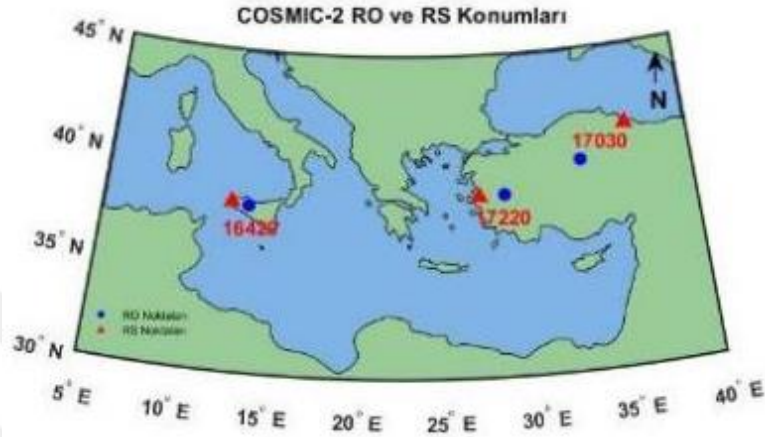
Tablo 28. 925 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için BH değerlerinin karşılaştırılması

RS	BH		
	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS
Samsun	0.2051	0.4681	0.2832
İzmir	0.2209	0.3253	0.2348
İstanbul	0.5484	0.4513	0.2372

Tablo 28 incelendiğinde, Samsun, İzmir ve İstanbul için BH değerlerinin sırasıyla 0.20-0.47, 0.22-0.32 ve 0.24-0.55 arasında değiştiği gözlenmiştir. Bununla birlikte Samsun ve İzmir için en düşük BH değeri RO ve RS PWV değerleri arasında, en yüksek BH değeri ise RO ve ERA5 PWV değerleri arasında gözlenmiştir. İstanbul için en düşük BH değeri ise ERA5 ve RS PWV değerleri arasında, en yüksek BH değeri ise RO ve RS PWV değerleri arasında gözlenmiştir.

- 850 hPa ve Üzeri Dikey Atmosferik PWV Profillerinin Karşılaştırılması

850 hPa'dan daha yüksek basınç seviyelerindeki RO wetPf2 profillerinden hesaplanan PWV dikey profillerini RS ve ERA5 ile karşılaştırmak için ikinci kriter kapsamında Trapani, İzmir ve Samsun RS seçilmiştir (Şekil 48).

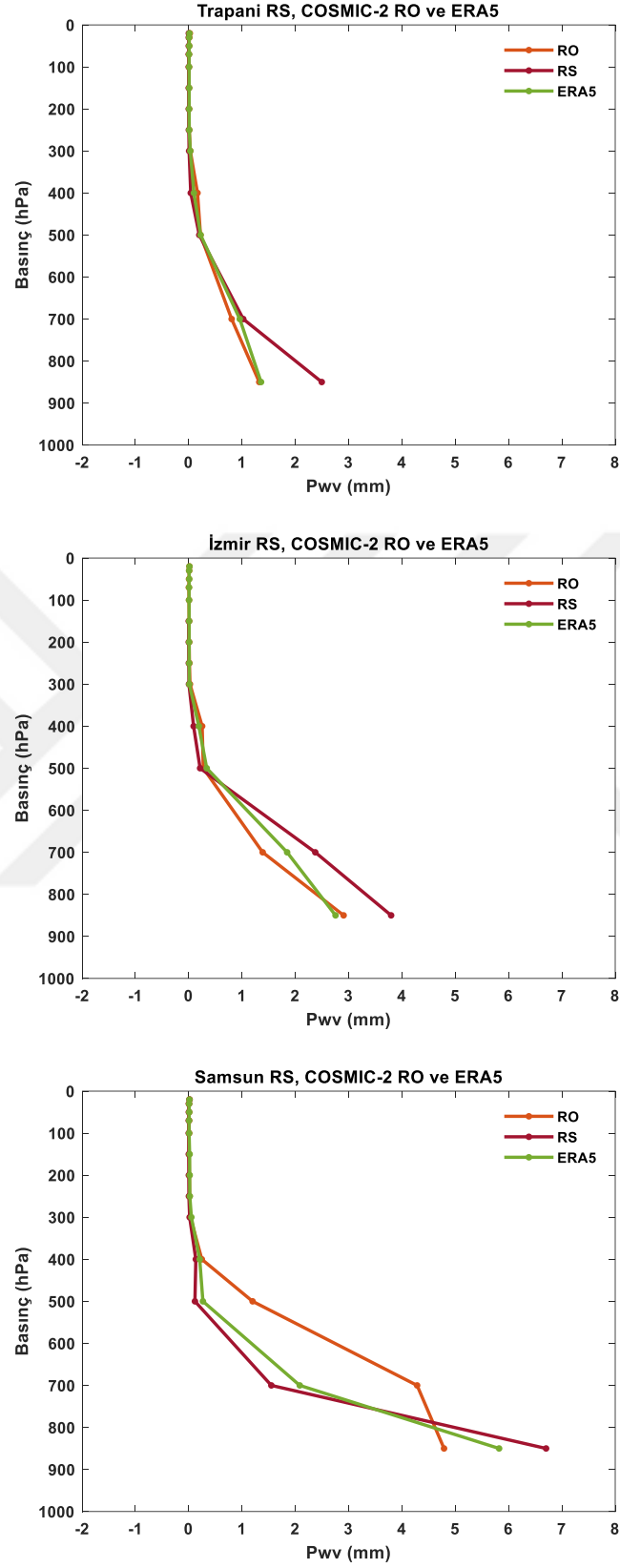


Şekil 48. 850 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen COSMIC-2 RO ve RS konumları

Tablo 29. 850 hPa ve üzeri dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması için seçilen istasyonlar

RS	RS Enlem	RS Boylam	RS Zaman	RO Enlem	RO Boylam	RO Zaman
(17429) Trapani	37.92°	12.50°	00:00-UTC	37.802°	13.509°	00:16
(17220) İzmir	38.43°	27.17°	00:00-UTC	38.482°	28.680°	22:16
(17030) Samsun	41.28°	36.33°	12:00-UTC	39.825°	33.383°	09:04

Şekil 48 ve Tablo 29'da gözlenen RO olayları, Trapani RS için yaklaşık 89 km, İzmir RS için yaklaşık 131 km ve Samsun RS için yaklaşık 296 km uzaklıkta gerçekleşmiştir. Bu tabloya göre ikinci kriter için ERA5 verileri ise, RS enlem ve boylamlarına en yakın olacak şekilde Trapani, İzmir, Samsun için sırasıyla, 38.00°K ve 12.50°D, 38.50°K ve 27.25°D, 41.25°K ve 36.25°D konumlarına karşılık gelen zamanlarda seçilmiştir (Şekil 49).



Şekil 49. 850 hPa ve üzeri COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması

Şekil 49 incelendiğinde Trapani, İzmir ve Samsun RS için tüm yöntemlerle elde edilen PWV değerlerinin sırasıyla genellikle 0-3 mm, 0-4 mm ve 0-7 mm arasında olduğunu gözlenmiştir. Genel olarak, RS, RO ve ERA5 PWV değişimlerinin MOH ve KOH değerlerinin Trapani istasyonunda, İzmir ve Samsun istasyonlarına kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir (Tablo 30).

Tablo 30. 850 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için MOH ve KOH değerlerinin karşılaştırılması

RS	MOH (mm)			KOH (mm)		
	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS
Trapani	0.1248	0.0212	0.1052	0.3463	0.0492	0.3299
İzmir	0.2678	0.0942	0.2276	0.5066	0.1856	0.4458
Samsun	0.4545	0.3266	0.1339	1.0133	0.7517	0.3015

Tablo 30 incelendiğinde en yakın konum ve zaman sınırında bulunan Trapani, İzmir ve Samsun için MOH'nin sırasıyla 0.0-0.1 mm, 0.0-0.3 mm ve 0.1-0.4 mm arasında değiştiğini göstermektedir. İstasyonlar için KOH değerlerinin sırasıyla 0.0-0.3 mm, 0.1-0.5 mm ve 0.3-1.0 mm arasında olduğu bulunmuştur.

Trapani, İzmir ve Samsun RS istasyonları için PWV değişimlerinin istatistiksel analizi için MOH ve KOH değerlerinin yanı sıra BH değerleri de hesaplanmıştır (Tablo 31).

Tablo 31. 850 hPa ve üzeri dikey atmosferik COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV profilleri için BH değerlerinin karşılaştırılması

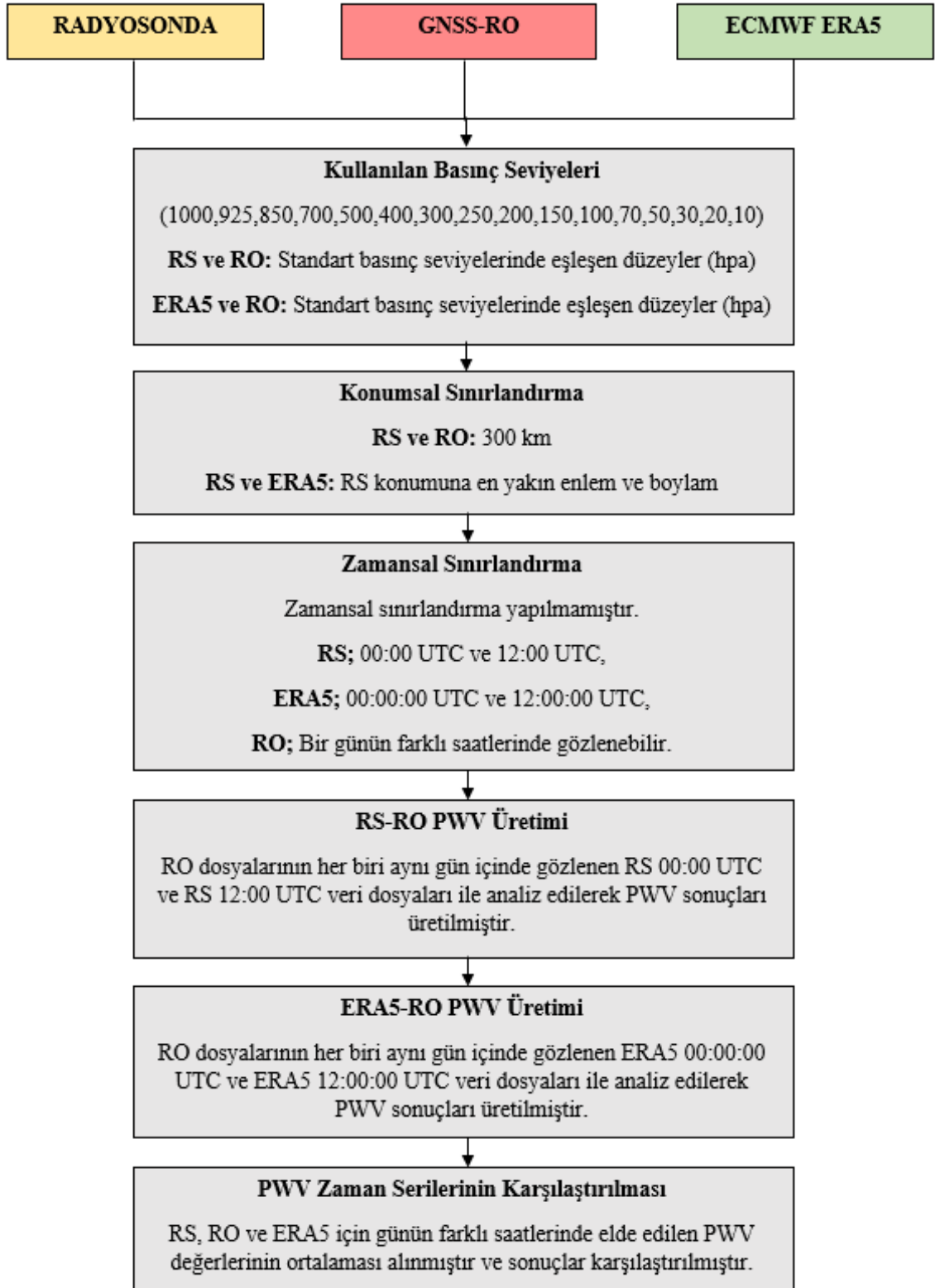
RS	BH		
	RO-RS	RO-ERA5	ERA5-RS
Trapani	0.4303	0.1007	0.3628
İzmir	0.3305	0.1460	0.2808
Samsun	0.6909	0.4979	0.2036

Tablo 31 incelendiğinde, Trapani, İzmir ve Samsun için BH değerlerinin sırasıyla 0.10-0.43, 0.15-0.33 ve 0.20-0.69 arasında değiştiği gözlenmiştir. Bununla birlikte Trapani ve İzmir için en düşük BH değeri RO ve ERA5 PWV değerleri arasında, en yüksek BH değerleri ise RO ve RS PWV değerleri arasında gözlenmiştir. Samsun için en düşük BH değeri ise ERA5 ve RS PWV değerleri arasında, en yüksek BH değeri ise RO ve RS PWV değerleri arasında gözlenmiştir.

2.8.2. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ECMWF ERA5 PWV Değerlerinin Zaman Serilerinin Karşılaştırılması

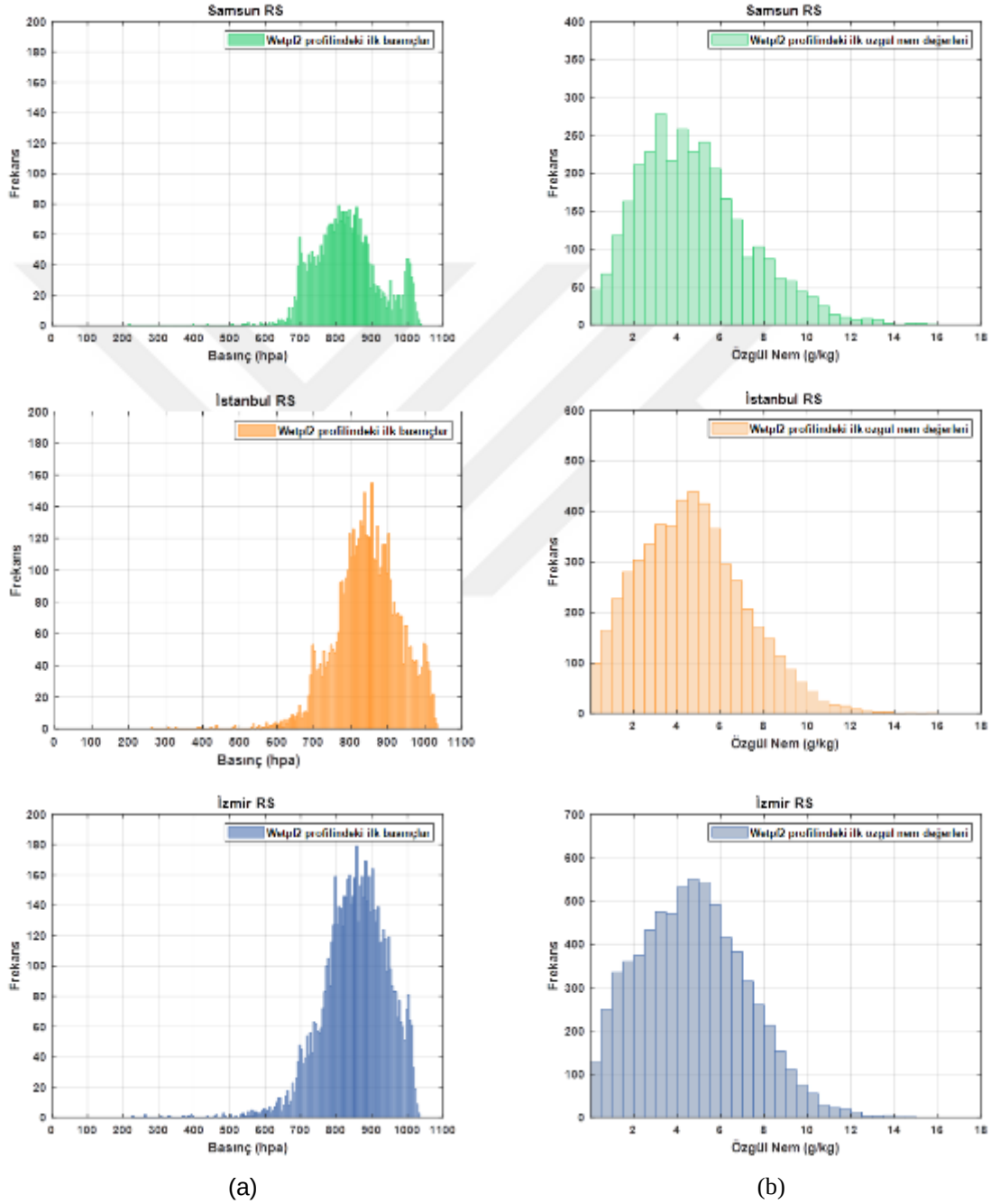
FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ECMWF ERA5 ürünlerinden PWV zaman serilerinin karşılaştırması Türkiye'deki 5 adet RS için yapılmıştır. Bu kapsamda, Samsun, İstanbul, İzmir, Isparta ve Adana RS için uygulama yapılmıştır. 2020-2023 yılları arasında PWV zaman serisi değişimleri karşılaştırılmıştır.

Radyosonda ve ERA5 PWV'leri, FORMOSAT-7/COSMIC-2 verilerinden standart basınç seviyelerine göre enterpolasyon yapılan ve eşleşen basınçlardaki özgül nemlerden hesaplanan PWV'lerle karşılaştırılmıştır. FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO olayları, RS noktalarından en fazla 300 km uzaklıkta olacak şekilde sınırlandırılmış ve ERA5 konumları RS konumların en yakın enlem ve boylamda olacak şekilde belirlenmiştir. FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO olayları günün farklı saatlerinde farklı yerlerde gerçekleşebilir. Bu nedenle, bir gün içinde birden fazla farklı zamanda gözlemlenen RO dosyalarından hesaplanan PWV'ler için ortalama değerler hesaplanmıştır. Bu aşamada, her bir RO dosyası ayrı ayrı karşılaştırılarak Radyosonda ve ERA5 PWV sonuçları da üretilmiş ve ardından ilgili gün için PWV'nin ortalama değeri hesaplanmıştır. Son olarak, ortalaması alınmış PWV değerlerinin zaman serileri karşılaştırılmıştır. Bu aşama için yapılan açıklamalar iş akış şemasında özet olarak sunulmuştur (Şekil 50).



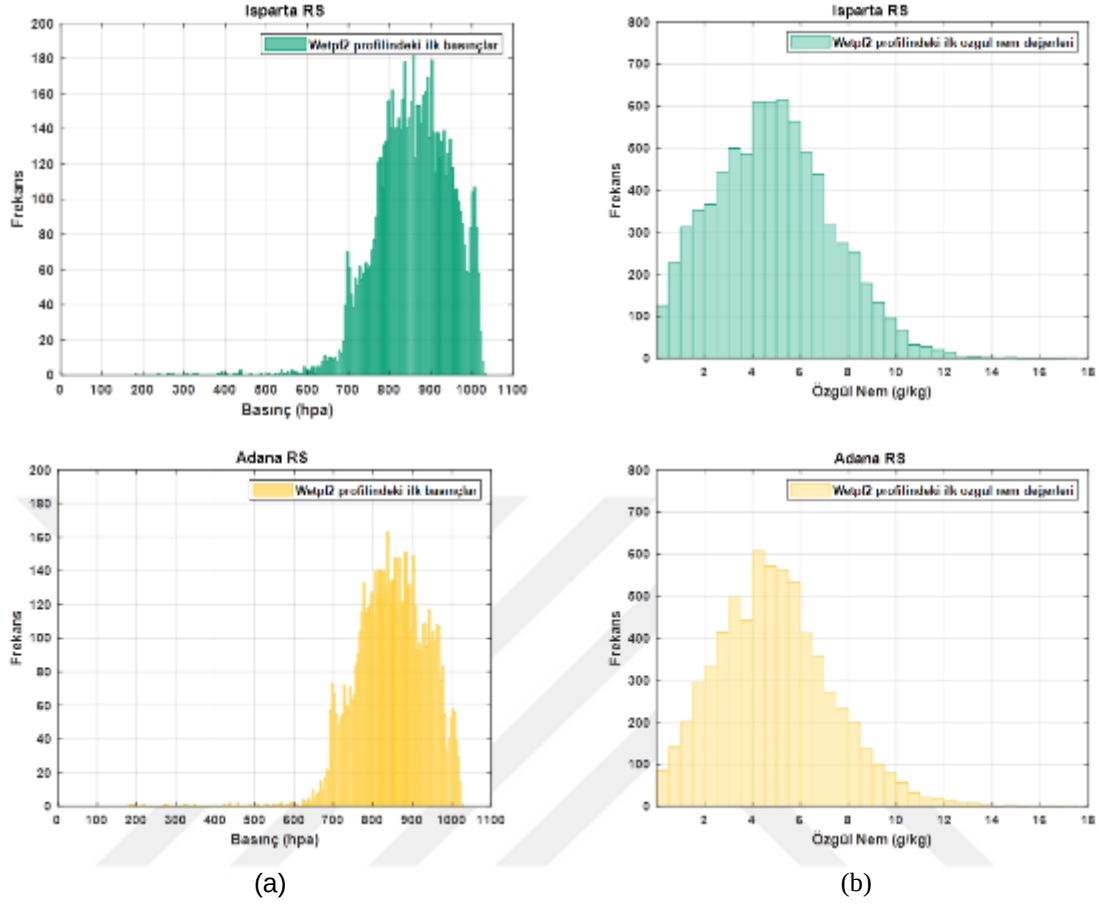
Şekil 50. FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serilerinin karşılaştırılması iş-akış şeması

PWV dağılımları, troposferin özellikle alt katmanında daha yoğundur. Dolayısıyla, öncelikle su buharının atmosferdeki dinamiklerini anlamada kritik bir rol oynayan wetpf2 ıslak profillerindeki en alt seviye basınç ve özgül nem başlangıç değerleri frekans boyutunda irdelenmiştir (Şekil 51).



Şekil 51. COSMIC-2 RO wetpf2 ıslak profillerinden (a) basınç değerleri (b) özgül nem değerleri

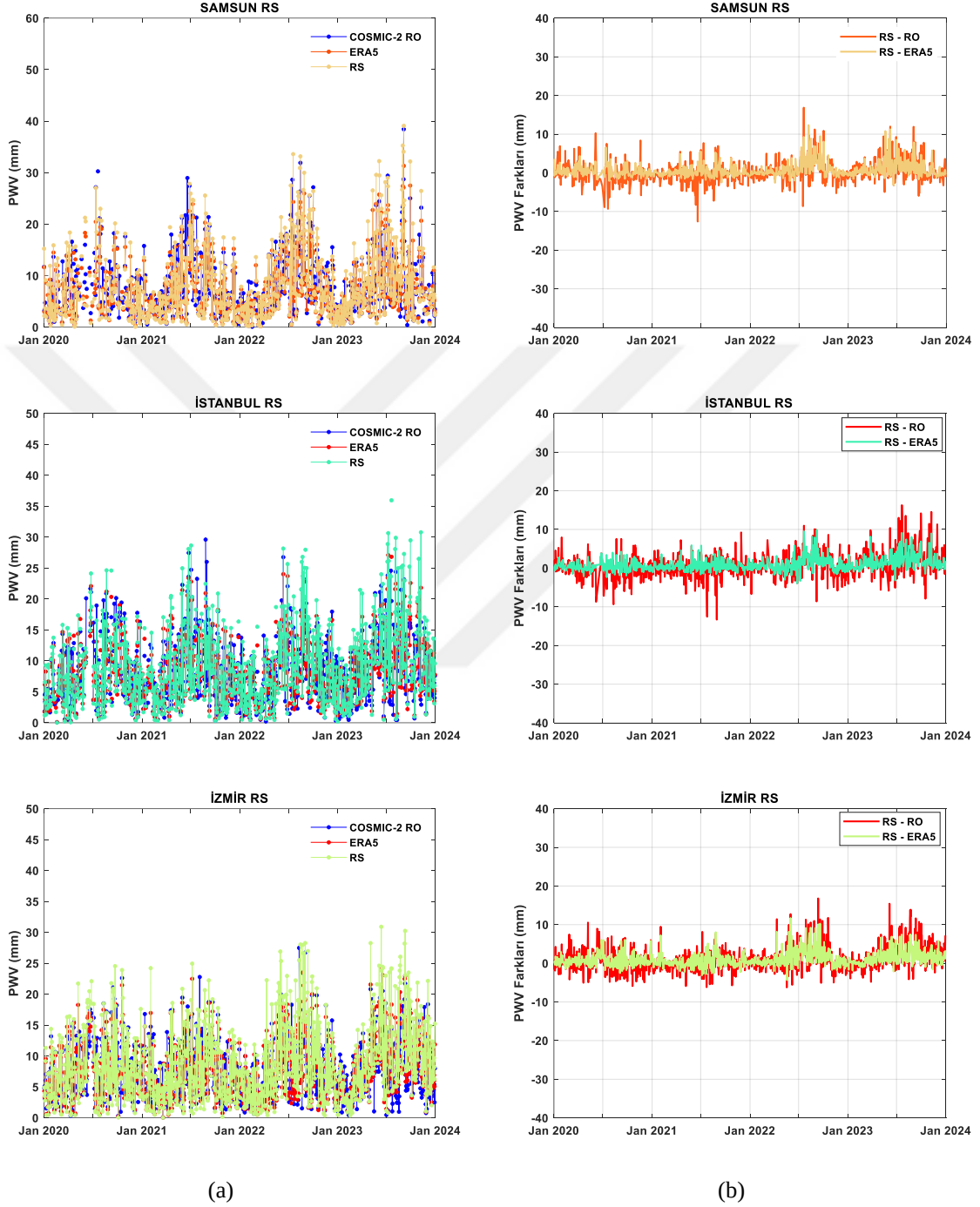
Şekil 51'in devamı



Şekil 51 (a) bölümünde, Samsun, İstanbul, İzmir, Isparta, Adana RS için troposferin en alt seviyesinde basınç profillerinin genellikle 800 hpa-900 hpa arasında yoğunlaştığı gözlenmiştir. Tüm istasyonlarda genel olarak düşük basınç, diğer bir ifadeyle daha yüksek irtifa değerlerinde çok daha az frekans gözlenmiştir. Yüzeye daha yakın olan 1000 hPa civarında ise genellikle belirgin bir veri yoğunluğu gözlemlenmemektedir. Bu durum, COSMIC-2 wetpf2 ıslak profillerde, yer seviyesine yakın ölçümlerin daha sınırlı olduğunu veya verilerin çoğunlukla daha yüksek seviyelerde alındığını göstermektedir.

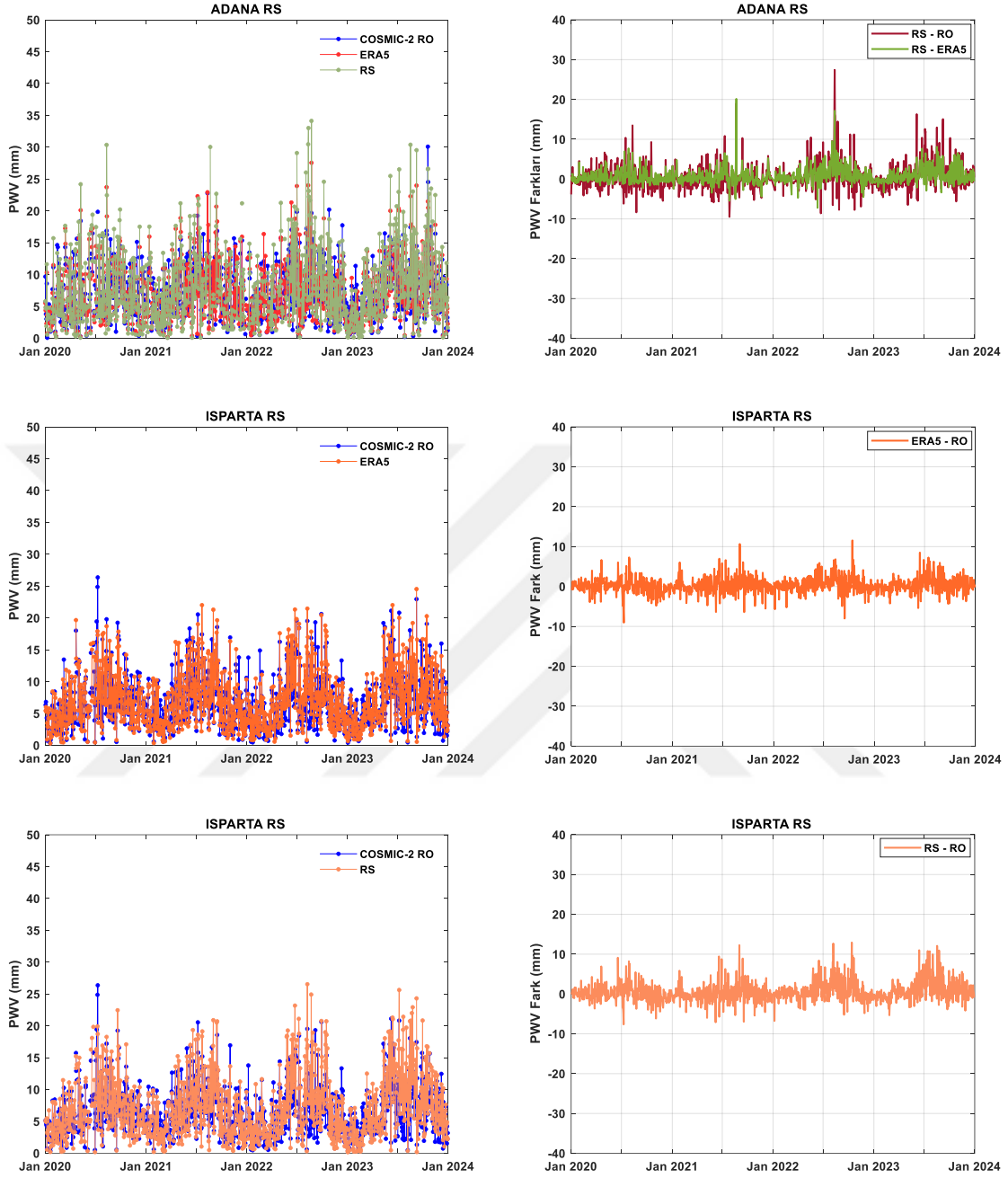
Şekil 51 (b) bölümünde, RS konumları için temin edilen wetpf2 profillerinin yeryüzüne en yakın seviyedeki basınçlara karşılık gelen özgül nem değerlerinin dağılımları gözlenmektedir. Özgül nem dağılım grafiklerinde frekansların, Samsun, İstanbul, Adana, için genellikle 3 g/kg-6 g/kg, İzmir ve Isparta RS için genellikle 3 g/kg-7 g/kg arasında yoğunlaştığı gözlenmektedir. Bununla birlikte, diğer istasyonlara kıyasla 8 g/kg-10 g/kg aralığındaki frekans dağılımları İzmir, Isparta, Adana RS için daha yüksek düzeyde gözlenmiştir. Basınç ve özgül nem değerleri frekans boyutunda incelendikten sonra RS'ler

için COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV sonuçları karşılaştırılmıştır. PWV karşılaştırması yapılırken aynı zamanda farklar da analiz edilmiştir (Şekil 52).



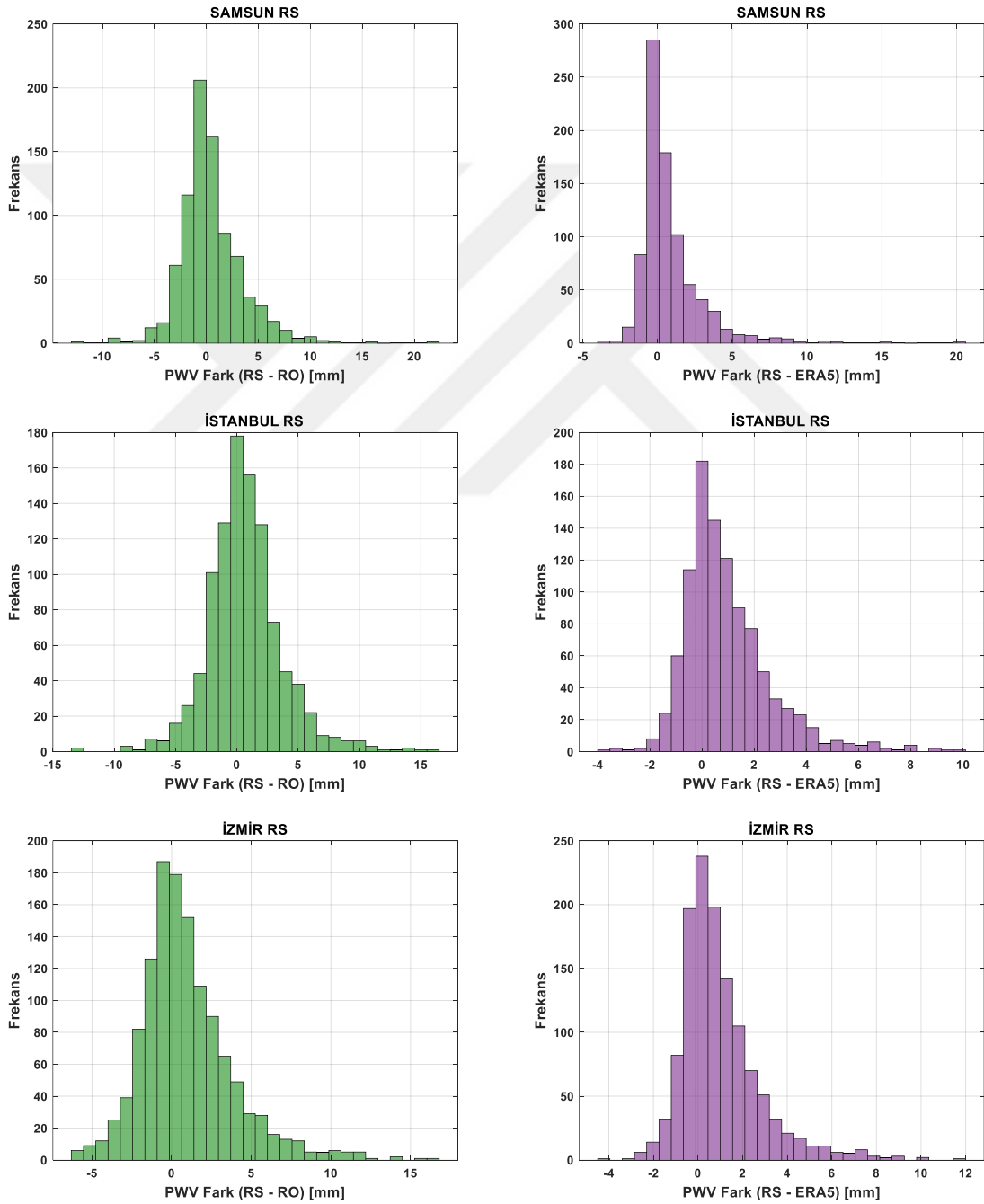
Şekil 52. COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 (a) PWV dağılımlarının karşılaştırılması (b) PWV farklarının karşılaştırılması

Şekil 52'nin devamı



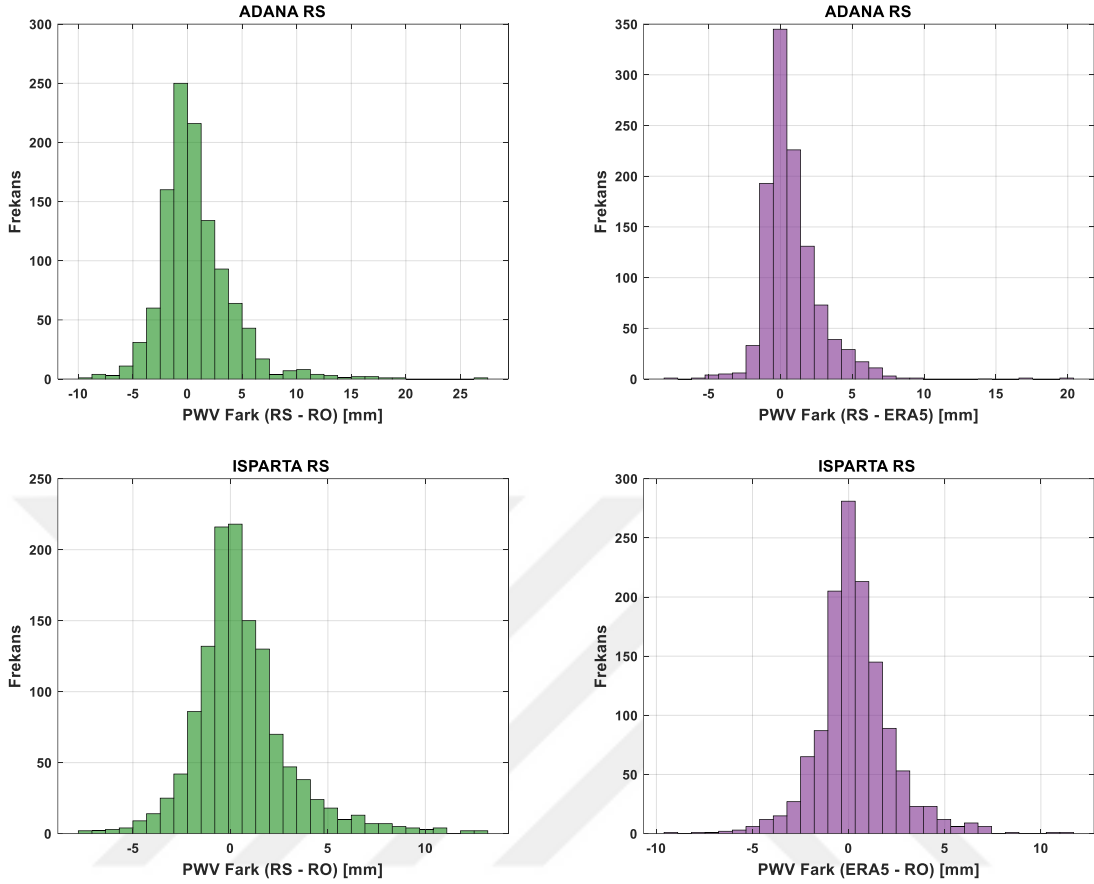
Şekil 52 (a) bölümü incelendiğinde /COSMIC-2 RO, radyosonda ve ERA5 PWV dağılımlarının genel olarak Samsun RS için 0-30 mm aralığında, İstanbul RS için 0-25 mm aralığında, İzmir RS için 0-25 mm aralığında, Adana RS için 0-20 mm aralığında, Isparta RS için 0-20 mm aralığında olduğu gözlenmiştir.

Şekil 52 (b) bölümü incelendiğinde genel olarak Radyosonda ve COSMIC-2 RO arasındaki PWV farklarının, Radyosonda ve ERA5 arasındaki PWV farklarından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, yöntemler arasındaki farklar genellikle 0-6 mm düzeyinde gözlenmiştir. Ancak bazı günlerde belirgin farklar oluşarak 10 mm düzeylerine sıçrayan durumlar gözlenmiştir. PWV farklarının dağılım özelliklerini incelemek için histogramlar ile görsel bir değerlendirme yapılmıştır (Şekil 53).



Şekil 53. COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV farklarının histogramları

Şekil 53'ün devamı



Şekil 53'te /COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV farklarının histogram grafiklerinde, büyük ölçüde simetrik ve çan eğrisi formuna yakın bir dağılım gözlemlenmiştir. Bu durum, PWV farklarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla, normal dağılım varsayımına dayalı testlerin uygulanmasını mümkün kılmıştır. Diğer taraftan, Radyosonda ve ERA5 PWV farklarının histogramlarında sağa çarpık bir dağılım özelliği gözlenmiştir. Ancak, örneklem sayısının yüksek olması nedeniyle, bu tür sapmalar eşleştirilmiş t-testi gibi parametrik testler açısından tolere edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, PWV farklarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla, normal dağılım varsayımına dayanan eşleştirilmiş t-testi yöntemi kullanılmıştır.

Eşleştirilmiş t-testi iki bağımlı ölçüm seti arasındaki farkların ortalamasının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test eder. Her bir gözlem çifti için farklar

$$D_i = X_{1i} - X_{2i}, \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (58)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, D_i , i. güne ait fark, X_{1i} , i. gün için radyosonda ölçümü, X_{2i} ise i. gün için radyosonda ölçümü RO veya ERA5 ölçümü olarak tanımlanır. Test edilen teorik fark, Δ_0 olmak üzere sırasıyla sıfır hipotez ve seçenek hipotezi

$$H_0: \Delta_0 = 0, \text{ (Sıfır hipotez)}$$

$$H_s: \Delta_0 \neq 0, \text{ (Seçenek hipotezi)} \quad (59)$$

eşitlikleri ile ifade edilebilir. Burada, H_0 hipotezi ölçümler arasında fark olmadığını ve H_s hipotezi ölçümler arasında fark olduğunu gösterir. Eğer fark ortalaması anlamlı şekilde sıfırdan farklı çıkarsa H_0 hipotezi reddedilir ve H_s kabul edilir. PWV farklarının ortalaması ve standart sapması ile test değeri

$$T_0 = \frac{\bar{D}}{m_D} \quad (60)$$

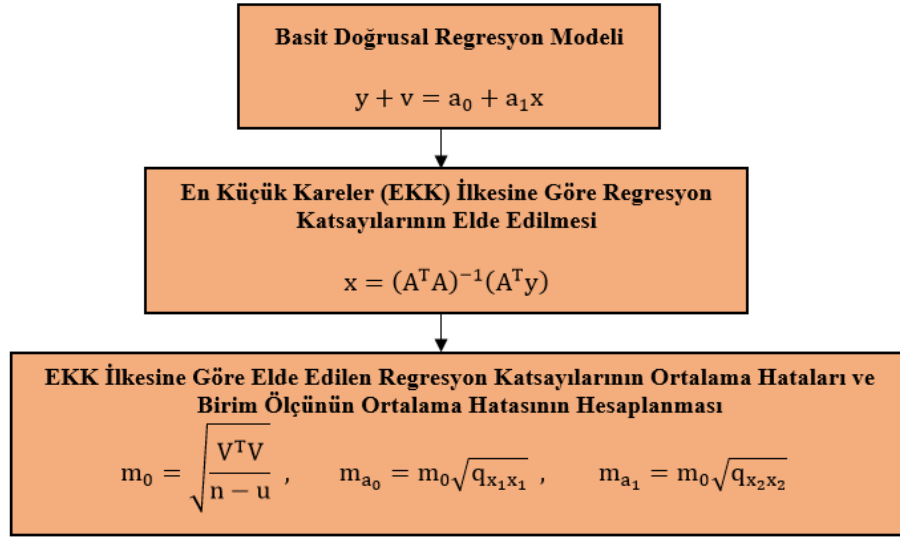
eşitliği ile hesaplanır. Burada, $\bar{D}$ farkların aritmetik ortalaması, m_D farkların ortalama hatası ve n, eşleştirilmiş gözlem sayısını ifade eder. $\alpha=0.05$ yanılma olasılığı ve $f=n-1$ serbestlik derecesi olmak üzere test değeri tablo değerinden büyük olursa

$$|T_0| > t_{(1-\alpha/2, f)} \quad (61)$$

H_0 hipotezi reddedilir, farkın “anlamlı” olduğu kararı verilir (Montgomery ve Runger 2010).

Radyosonda ve COSMIC-2 RO ile Radyosonda ve ERA5 PWV farklarının anlamlı olup olmadığı t-testi ile analiz edilmiş, elde edilen sonuçlar ise bulgular ve irdelemeler bölümünde değerlendirilmiştir.

COSMIC-2 RO, radyosonda ve ERA5 PWV zaman serileri arasındaki ilişkiyi daha iyi ortaya koyabilmek pearson korelasyon ve basit doğrusal regresyon uygulanmıştır. Ayrıca R^2 belirleyicilik katsayıları hesaplanmıştır. Basit doğrusal regresyon modeline ilişkin iş akış şeması Şekil 54’te sunulmuştur.



Şekil 54. Basit doğrusal regresyon iş akış şeması

Pearson korelasyon katsayısı ise

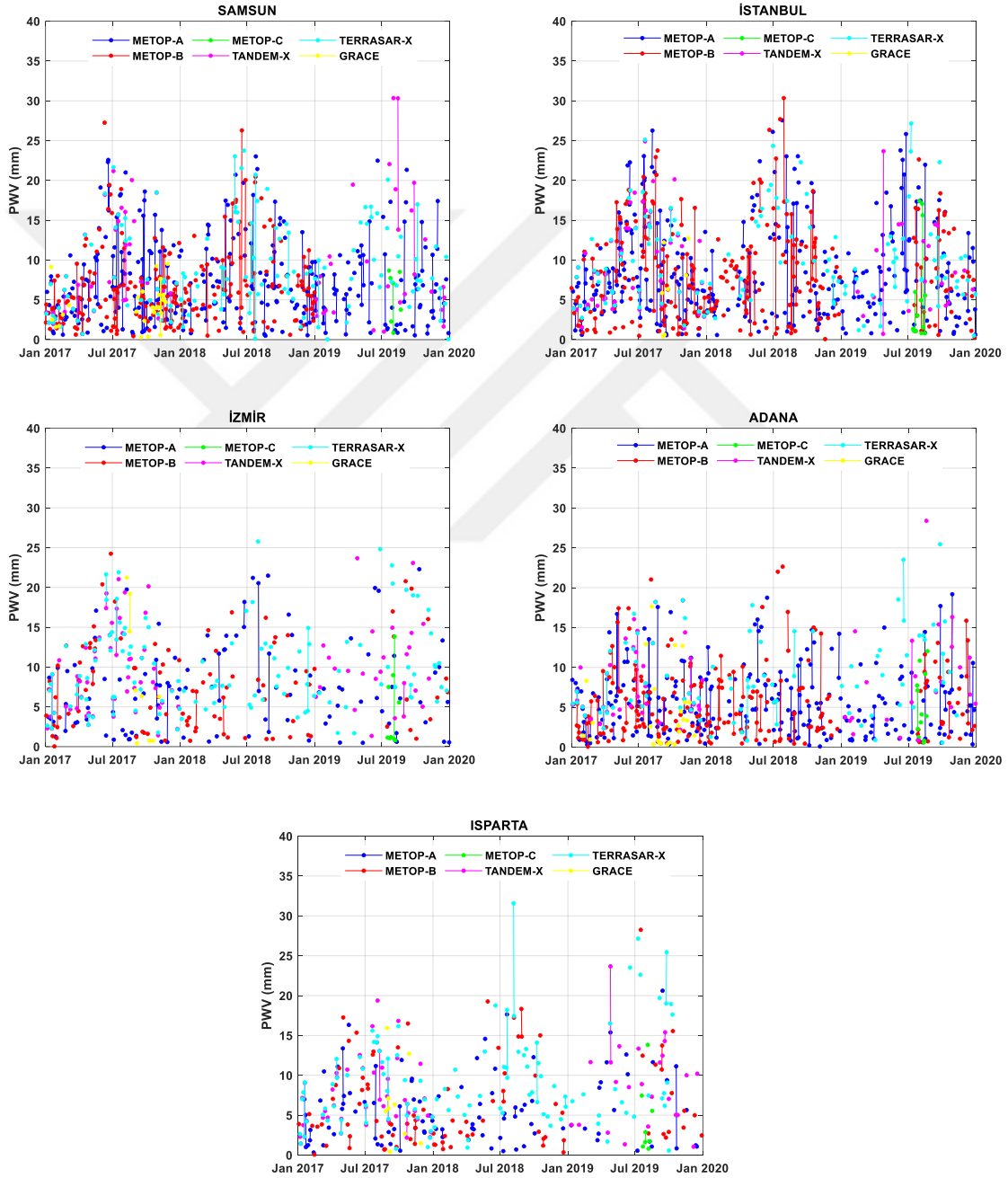
$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n - 1) \sigma_x \sigma_y} \quad (62)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır. Burada, n , x_i ve y_i veri çiftlerini, $\bar{x}$ ve $\bar{y}$, değişkenlerin ortalamalarını, σ_x ve σ_y ise değişkenlerin standart sapmalarını ifade etmektedir. PWV zaman serileri için yapılan bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, bulgular ve irdelemeler bölümünde değerlendirilmiştir.

2.9. GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X GNSS-RO Atmosferik Profillerinden Üretilen PWV Değerlerinin Karşılaştırılması

FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO verileri 2019 yılının Ekim ayından itibaren mevcut iken GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X RO verileri yoğun olarak 2019 yılı öncesinde mevcuttur. Ayrıca, bir sonraki 2.10 başlıklı bölümde, Karadeniz Bölgesi'nde 2017 yılında meydana gelen ekstrem hava olayları analiz edilmiştir. Bu nedenle, bu bölümde GRACE, MetOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularının ortak zaman dilimlerine ait 2017-2019 yılları için PWV değerleri üretilmiş ve karşılaştırılmıştır. CHAMP uydusu ise 2001-2008 yılları arasında veri sağladığı için bu karşılaştırmaya dahil edilmemiştir.

GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X RO atmosferik profillerinde özgül nem doğrudan bulunmadığından öncelikle kısmi su buharı basıncından özgül nem profilleri hesaplanmış ve ardından PWV türetilmiştir. Bu kapsamda, Samsun, İstanbul, İzmir, Adana ve Isparta RS için hesaplanan GRACE, MetOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X RO PWV değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 55).



Şekil 55. GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımlarının karşılaştırılması

Şekil 55 incelendiğinde GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından hesaplanan PWV dağılımlarının genel olarak Samsun ve İstanbul için 0 mm-25 mm arasında değiştiği, İzmir, Isparta ve Adana için 0 mm-20 mm arasında değiştiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, özellikle İzmir ve Isparta için GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından diğer istasyonlara kıyasla daha az PWV sonucu üretildiği gözlenmiştir.

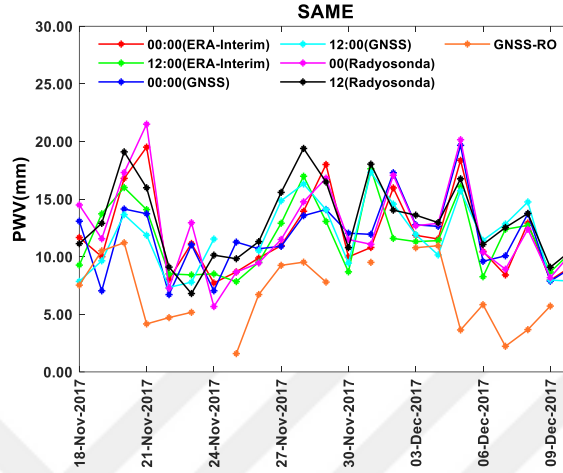
2.10. Karadeniz Bölgesinde Ekstrem Hidrolojik Hava Olaylarının Olduğu Dönemlerde Üretilen GNSS-RO PWV Değerlerinin Radyosonda ERA-İnterim, Yer Tabanlı GNSS Meteorolojisi ile Karşılaştırılması

GRACE, MetOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen PWV-RO değerleri, 2017 yılında Samsun ve Trabzon çevresinde meydana gelen ekstrem hava olaylarına ilişkin PWV dağılımları ile karşılaştırılmıştır. CHAMP ve FORMOSAT-7/COSMIC-2 uyduları, 2017 yılında veri sağlamadığından karşılaştırmaya dahil edilmemiştir. Analiz, 116Y186 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında Samsun’da tesis edilen SAME ve SOMU, Trabzon’da tesis edilen TRAB ve MACK istasyonları referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Ekstrem hava olaylarına ilişkin PWV dağılımları, bu istasyonlar için Radyosonda, ERA5, ERA-İnterim ve Yer Tabanlı GNSS Meteorolojisi yöntemleri ile üretilmiştir. Samsun ve Trabzon çevresinde meydana gelen ekstrem hava olayları, <http://www.eswd.eu/> web adresinde yer alan meteorolojik kayıtlara göre belirlenmiştir. Bu kapsamda, Samsun çevresinde belirlenen iki önemli ekstrem hava olayı ve bu olaylara ilişkin PWV inceleme tarihleri Tablo 32’de sunulmuştur.

Tablo 32. Samsun ve çevresi 2017 ekstrem hava olayları

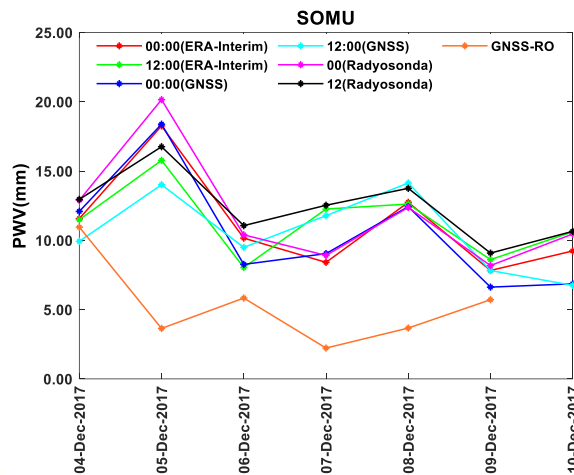
Ekstrem Hava Olayı Zamanı	Şehir	Yaşanan Ekstrem Hava Olayı	PWV İnceleme Zaman Aralığı	PWV Kaynak Veri
21 Kasım 2017	Sinop	Fırtına	18-24 Kasım 2017	Radyosonda Era-Interim GNSS-Meteoroljisi GNSS-RO
21 Kasım 2017	Samsun	Fırtına	18-24 Kasım 2017	Radyosonda Era-Interim GNSS-Meteoroljisi GNSS-RO
7 Aralık 2017	Samsun	Şiddetli Rüzgar	04-10 Aralık 2017	Radyosonda Era-Interim GNSS-Meteoroljisi GNSS-RO

Tablo 32’de Sinop ve Samsun’da meydana gelen ekstrem hava olaylarının zamanları dikkate alınarak SAME ve SOMU istasyonları için elde edilen PWV dağılımları 18 Kasım 2017 ile 10 Aralık 2017 zaman aralığı için incelenmiştir (Şekil 56, Şekil 57).



Şekil 56. Kasım –Aralık 2017 Samsun çevresi ekstrem hava olaylarında SAME istasyonu için Radyosonda, ERA-Interim, GNSS-Meteoroloji ve GRACE, MetOp-A, MetOp-B, TerraSAR-X, TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımları

Şekil 56 incelendiğinde SAME istasyonunda PWV dağılımlarının genel olarak 5 mm - 25mm arasında değiştiği gözlenmiştir. Ancak bazı günlerde GNSS-RO PWV değerlerinin 5 mm altında kaldığı gözlenmiştir.



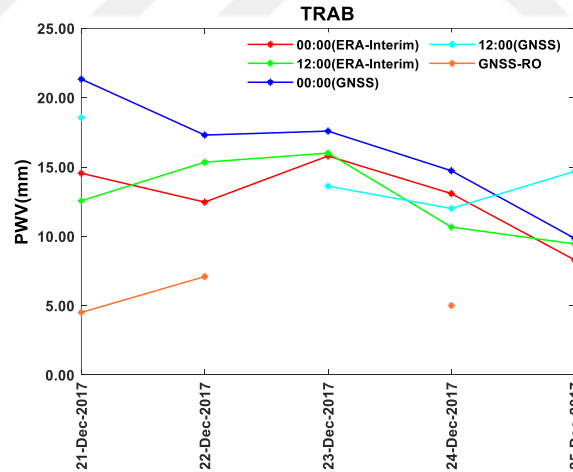
Şekil 57. Aralık 2017 Samsun çevresi ekstrem hava olaylarında SOMU istasyonu için Radyosonda, ERA-Interim, GNSS-Meteoroloji ve MetOp-A, MetOp-B, TerraSAR-X, TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımları

Şekil 57 incelendiğinde 04-10 Aralık 2017 zaman aralığı için SOMU istasyonlarında su buharı dağılımlarının 5 mm - 20 mm arasında değiştiği gözlenmiştir. Ancak, 5, 7 ve 8 Aralık 2017 tarihinde GNSS-RO PWV değerlerinin 5 mm altında kalarak diğer tekniklerden elde edilen PWV değerlerinden oldukça farklılaştığı gözlenmiştir. Trabzon çevresinde ise belirlene önemli bir ekstrem hava olayı ve bu olaya ilişkin PWV inceleme tarihleri Tablo 33'te sunulmuştur.

Tablo 33. Trabzon ve çevresi 2017 ekstrem hava olayları

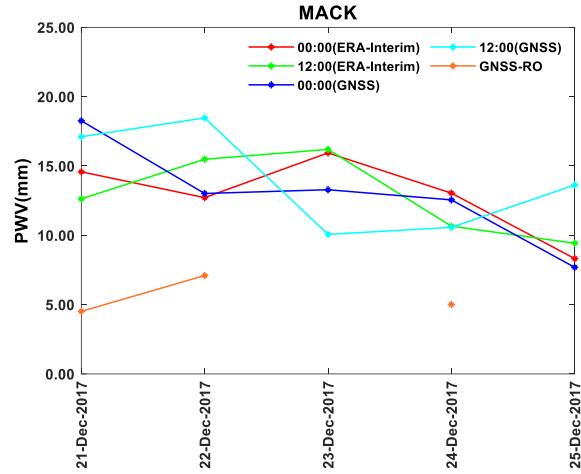
Ekstrem Hava Olayı Zamanı	Şehir	Yaşanan Ekstrem Hava Olayı	PWV İnceleme Zaman Aralığı	PWV Kaynak Veri
23 Aralık 2017	Giresun	Şiddetli yağış/sel ve fırtına-hortum	21-25 Kasım 2017	Era-Interim GNSS-Meteoroljisi GNSS-RO

Tablo 33'te Giresun'da meydana gelen ekstrem hava olayı zamanı dikkate alınarak TRAB ve MACK istasyonları ERA-Interim ve GNSS meteorolojisinden elde edilen PWV dağılımları 21-25 Aralık 2017 zaman aralığı için incelenmiştir (Şekil 58, Şekil 59).



Şekil 58. Aralık 2017 Trabzon çevresi (Giresun) ekstrem hava olaylarında TRAB istasyonu için GNSS-Meteoroloji, ERA-Interim ve MetOp-A, MetOp-B, TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımları

Şekil 58'de TRAB istasyonu için 21-25 Aralık 2017 zaman aralığında ERA-Interim ve GNSS PWV dağılımlarının 5 mm-20 mm arasında değiştiği gözlenmiştir. Ancak GNSS-RO PWV dağılımlarının özellikle 5 mm düzeyinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 59. Trabzon çevresi (Giresun) ekstrem hava olaylarında MACK istasyonu için GNSS Meteorolojisi, ERA-Interim ve GRACE, MetOp-A, MetOp-B, TanDEM-X GNSS-RO PWV dağılımları

Şekil 59 incelendiğinde MACK istasyonu için 21-25 Aralık 2017 zaman aralığında ERA-Interim ve GNSS PWV dağılımlarının 8 mm-18 mm arasında değiştiği gözlenmiştir. Ancak GNSS-RO PWV dağılımlarının özellikle 5 mm düzeyinde olduğu gözlenmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde, tez çalışması boyunca gerçekleştirilen tüm çalışmaların bulguları değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Bu kapsamda sırasıyla (1) Türkiye'deki RS'lerin çevresinde farklı LEO uyduları tarafından gözlenen RO dağılımlarına yönelik bulgular, (2) FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO tekniği ile Radyosonda tekniğinden elde edilen atmosferik profillerinin karşılaştırılmasına dayalı bulgular, (3) FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO tekniği, Radyosonda tekniği ve ECMWF ERA5 yeniden analiz ürünlerinden elde edilen dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılmasına dayalı bulgular, ve (4) GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X GNSS-RO tekniği PWV değerlerinin karşılaştırılmasına dayalı bulgular sunulmuştur. Ayrıca (5) Karadeniz Bölgesinde ekstrem hidrolojik hava olaylarının olduğu dönemlerde üretilen GNSS-RO PWV değerlerinin, Radyosonda, ECMWF ERA5 ve ERA-İnterim, Yer tabanlı GNSS meteorolojisi PWV değerleri ile irdelemesi yapılarak elde edilen bulgular sunulmuştur.

3.1. Türkiye Radyosonda İstasyonları Çevresinde Farklı LEO Uydularınca Gözlenen RO Dağılımlarına İlişkin Bulgular

Çalışmada, öncelikle Samsun, İstanbul, Ankara, İzmir, Isparta, Diyarbakır, Adana, Erzurum ve Kayseri'de tesis edilmiş 9 adet RS için FORMOSAT-7/COSMIC-2, GRACE, CHAMP, METOP, TERRASAR-X ve TANDEM-X LEO uydularına ait RO sayıları ve dağılımları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen bulgular;

- FORMOSAT-7/COSMIC-2 LEO uydusuna ait 2019-2023 dönemi RO verileri değerlendirildiğinde; istasyonlar çevresinde gözlem sayılarının 3000-7000 arasında değiştiği belirlenmiştir. İstasyonlar için toplam RO sayıları küçükten büyüğe doğru sırasıyla Samsun, Erzurum, İstanbul, Ankara, Kayseri, Diyarbakır, Adana, İzmir ve Isparta olacak şekilde belirlenmiştir. Samsun ve Erzurum gibi istasyonlarda gözlem sayısı nispeten düşük kalırken, özellikle İzmir ve Isparta'da önemli ölçüde yüksek değerler kaydedilmiştir. Bu bulgu, COSMIC-2 RO olaylarının daha düşük enlemlerde artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. 2019-2023 yılları arasında genel olarak tüm istasyonlarda bir artış eğilimi gözlenmiştir. Ancak 2019-2020'de, uydunun tam operasyonel hâle gelme süreci ve sınırlı veri erişimi gibi etkenler nedeniyle daha düşük sayıda gözlem kaydedilmiştir. 2021 ve 2022 yılları

ise uydunun operasyonel kapasitesinin oturması ve veri toplama politikasındaki iyileşmeler sayesinde RO gözlem sayılarında belirgin bir yükselişin yaşandığı dönemler olarak öne çıkmaktadır. 2023 yılında ise İzmir ve Isparta gibi bazı istasyonlarda hafif bir düşüş eğilimi görülmesi, uydu geçiş frekansındaki farklılıklar ya da veri toplama stratejilerindeki değişikliklerden kaynaklanabilir.

- GRACE LEO uydusuna ait 2007-2017 yılları arası gözlenen toplam RO olayları değerlendirildiğinde; her bir istasyon için gözlem sayılarının hemen hemen 220-300 arasında değiştiği belirlenmiştir. GRACE uydularının kutba yakın yörüngede hareket etmesi, neredeyse tüm enlem bantlarını tarayabilecek bir geometrik kapsama alanı sağlamaktadır. Ancak, bu küresel kapsama farklı bölgelerde aynı yoğunlukta veri üretmeyebilir. Bununla birlikte, GRACE uydularının asıl önceliği yerçekimi ölçümlerine odaklanmak olduğundan, RO verileri coğrafi veya zamansal kapsama bakımından bazı bölgelerde sınırlı kalabilir. Nitekim, Türkiye RS çevresinde 10 yıllık süre kapmasında gözlenen RO olayı bulgusu düşük düzeyde belirlenmiştir.
- CHAMP LEO uydusunun 2001-2008 yılları arası gözlenen toplam RO olayları değerlendirildiğinde; her bir istasyon için gözlem sayılarının hemen hemen 240-290 arasında değiştiği belirlenmiştir. CHAMP uydusunun Türkiye'deki RO etkinliği, hem operasyonel koşullar hem de istasyonların coğrafi konumu doğrultusunda yıllar içinde değişkenlik göstermiştir. Genel olarak çalışma alanındaki tüm stasyonlar için 2001 ve 2002 yıllarında, diğer yıllara kıyasla nispeten daha düşük düzeyde RO olayı belirlenmiştir. 2003 yılından itibaren RO olay sayılarında artış gözlense de 2008 yılında uydunun operasyonel süresinin sonlarına yaklaşması nedeniyle RO sayılarında düşüş eğilimi gözlenmiştir.
- MetOp-A LEO uydusunun 2016-2021 yılları arası gözlenen toplam RO olayları değerlendirildiğinde; istasyonlar için gözlem sayıları arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. En yüksek toplam RO sayısı 914 olarak İstanbul'da, en düşük toplam RO sayısı ise 356 olarak Isparta'da tespit edilmiştir. 2016 ve 2017 yıllarında diğer yıllara kıyasla daha yüksek düzeyde gözlenen RO olayları, 2018 yılından itibaren genel olarak giderek azalmış ve 2021 yılında belirgin bir düşüş eğilimi sergilemiştir.
- MetOp-B LEO uydusunun 2016-2024 yılları arası gözlenen toplam RO olayları değerlendirildiğinde; istasyonlar için gözlem sayıları arasında belirgin farklılıklar

gözlenmiştir. En yüksek toplam RO sayısı 941 olarak İstanbul’da, en düşük toplam RO sayısı ise 401 olarak Isparta’da tespit edilmiştir. 2016 ve 2017 yıllarında diğer yıllara kıyasla daha yüksek düzeyde gözlenen RO olayları, 2018 yılından itibaren genel olarak giderek azalmış ve 2024 yılında neredeyse minimum seviyelere inmiştir.

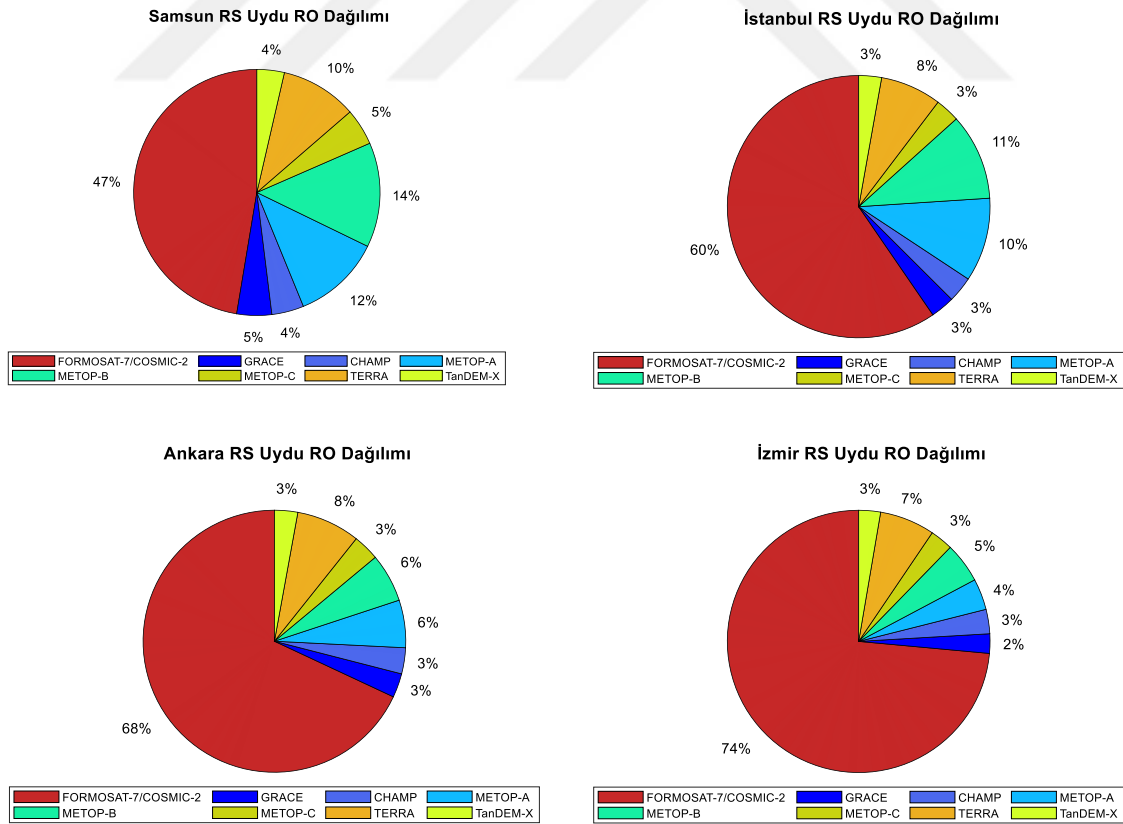
- MetOp-C LEO uydusunun 2019-2024 yılları arası gözlenen toplam RO olayları değerlendirildiğinde; Erzurum hariç her bir istasyon için gözlem sayılarının hemen hemen 260-365 arasında değiştiği belirlenmiştir. En düşük toplam RO sayısı Erzurum istasyonunda 140 olarak belirlenmiştir. 2019 yılında genel olarak tüm istasyon çevresinde oldukça düşük düzeyde gözlenen RO sayıları, 2020 yılında artış gösterse de 2021 yılından itibaren giderek azalmış ve 2024 yılında neredeyse minimum seviyelere inmiştir.
- TerraSAR-X LEO uydusuna ait 2008-2024 yılları arası gözlenen toplam RO olayları değerlendirildiğinde; her bir istasyon için gözlem sayılarının hemen hemen 600-670 arasında değiştiği belirlenmiştir. 2008 yılında her istasyon için genel olarak yaklaşık 15-20 arası gözlenen RO olayları, 2009-2019 yıllarında 30-70 arası belirlenmiştir. 2019 yılından itibaren ciddi bir düşüş gözlenen RO sayıları, 2024 yılında ise minimum seviyelere inmiştir. Bu durum, TerraSAR-X uydusunun operasyonel sürecinin sona yaklaşmasıyla ilişkilendirilebilir.
- TanDEM-X LEO uydusuna ait 2016-2024 yılları arası gözlenen toplam RO olayları değerlendirildiğinde; her bir istasyon için gözlem sayılarının hemen hemen 225-250 arasında değiştiği belirlenmiştir. 2016 ve 2017 yıllarında diğer yıllara kıyasla daha fazla sayıda gözlenen RO olayları her istasyon için yaklaşık 50-80 arasında belirlenmiştir. Bu sayılarda, 2018 yılından itibaren daha düşük düzeyde yıllık belirgin artış azalış şeklinde dalgalanmalar gözlenmiştir. Ancak 2024 yılında çoğu istasyonda neredeyse hiç RO olayı gözlenememiştir.

Türkiye’deki RS’ler çevresinde her bir LEO uydusuna ilişkin farklı yıllarda ve farklı sayılarda meydana gelen toplam RO olayları tablo olarak sunulmuştur (Tablo 34).

Tablo 34. Türkiye’deki RS’ler çevresinde her bir LEO uydusuna ilişkin toplam RO olayları

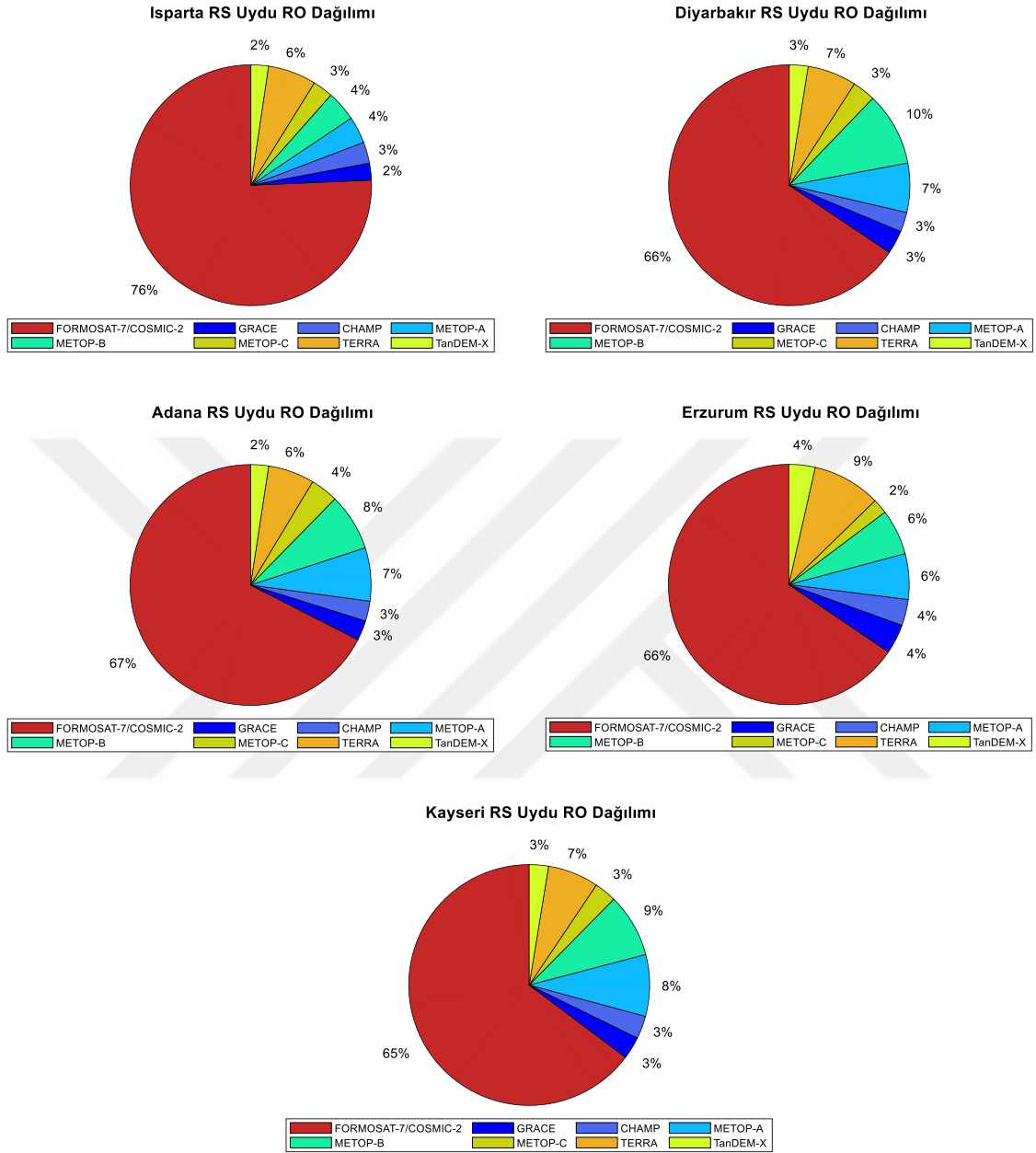
RS	COSMIC-2 (2019-2023)	GRACE (2007-2017)	CHAMP (2001-2008)	MetOp-A (2016-2021)	MetOp-B (2016-2024)	MetOp-C (2019-2024)	TerraSAR-X (2008-2024)	TanDEM-X (2016-2024)
Samsun	3123	302	278	766	907	317	662	237
İstanbul	5269	261	282	914	941	266	665	248
Ankara	5736	250	271	495	505	273	661	241
İzmir	7028	229	287	367	473	269	648	256
Isparta	7475	224	282	356	401	268	640	231
Diyarbakır	5888	283	236	593	886	277	590	225
Adana	6630	263	263	703	754	365	610	236
Erzurum	4564	276	245	427	428	140	639	246
Kayseri	5802	268	274	742	765	266	612	231

Tablo 34’te yer alan her bir istasyon için ilgili yıllarına göre elde edilen toplam RO olayları yüzdelik olarak ayrıca irdelenmiştir (Şekil 60).



Şekil 60. Türkiye’deki RS’ler çevresinde her bir LEO uydusuna ilişkin toplam RO olaylarının yüzde dağılımları

Şekil 60'ın devamı



Şekil 60 incelendiğinde, ülkemizdeki RS'ler çevresinde kaydedilen RO olaylarının en düşük ve en yüksek olarak sırasıyla yaklaşık %47-%76'sının FORMOSAT-7/COSMIC-2 LEO uydusundan elde edilebildiği gözlenmiştir. Bu durum, FORMOSAT-7/COSMIC-2'nin daha yoğun veri üretme kapasitesine veya uydunun yörüngesel avantajlarına işaret etmektedir.

3.2. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO ve Radyosonda Atmosferik Profil Karşılaştırma Bulguları

GNSS-RO ve radyosonda atmosferik profillerinin karşılaştırılması amacıyla, ulusal ve uluslararası kapsamda üç RS seçilmiştir. Bu kapsamda, Türkiye’den Samsun, Kayseri ve İtalya’dan Trapani/Birgi istasyonları seçilmiştir. Bu istasyonlar GNSS-RO ölçüsü sağlanan konumlar ve ölçü sağlanan zamanlara göre sınıflandırılmıştır. Buna göre,

- Trapani/Birgi, yaklaşık 70 km mesafe ve 40 dakika zaman farkı,
- Kayseri, yaklaşık 200 km mesafe ve 100 dakika zaman farkı,
- Samsun ise yaklaşık 265 km mesafe ve 145 dakika zaman farkı,

içinde kalacak şekilde sınıflandırılmıştır. Sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık profilleri için RO ve radyosonda verileri, 500 m aralıklarla spline yöntemiyle enterpole edilerek 5-25 km arasında karşılaştırılmıştır. 5-25 km arası dikey atmosfer için karşılaştırılan radyosonda ve COSMIC-2 RO;

- sıcaklık profillerinde, 12 km üzerinde,
- su buharı basıncı profillerinde 10 km üzerinde,
- özgül nem profillerinde 10 km üzerinde,
- kırıcılık profillerinde 7 km üzerinde,

genellikle iyi bir uyum gözlenmiştir. Troposferin alt ve orta katmanlarını kapsayan 5-10 km aralığı, atmosferik değişkenliğin en yoğun olduğu ve RO ile RS uyumunun en hassas şekilde değerlendirilmesi gereken bölge olarak öne çıktığı için bu aralıktaki belirgin değişimler MOH, KOH ve BH değerleri ile irdelenmiştir. Elde edilen bulgular,

- Trapani/Birgi RS için elde edilen MOH değerleri sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık içi sırasıyla 0.7162 °C, 0.1076 hPa, 0.0118 g/kg ve 0.5833 N-unit düzeyindedir. KOH değerleri sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık için sırasıyla 0.8672 °C, 0.4826 hPa, 0.1163 g/kg ve 2.7858 N-unit düzeyindedir. BH değerleri ise sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık için sırasıyla 0.0199, 1.9359, 0.0271 ve 0.0046 düzeyinde belirlenmiştir.
- Kayseri RS için elde edilen MOH değerleri sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık içi sırasıyla 1.1962 °C, 0.1718 hPa, 0.0825 g/kg ve 1.0581 N-unit düzeyindedir. KOH değerleri ise sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık içi sırasıyla 1.7353 °C, 0.8028 hPa, 0.5239 g/kg ve 5.1377 N-unit düzeyindedir. BH

değerleri ise sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık için sırasıyla 0.0435, 3.5240, 0.2154 ve 0.0083 düzeyinde belirlenmiştir.

- Samsun RS için elde edilen MOH değerleri sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık için sırasıyla 3.3950 °C, 0.2065 hPa, 0.1751 g/kg ve 0.9661 N-unit düzeyindedir. KOH değerleri ise sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık için sırasıyla 3.7313 °C, 0.9998 hPa, 0.8860 g/kg ve 5.5690 N-unit düzeyindedir. BH değerleri ise sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırıcılık için sırasıyla 0.1223, 3.9735, 0.3935 ve 0.077 düzeyinde belirlenmiştir.

Bulgularda, zaman ve konum farkı arttıkça hataların da artabileceği gözlenmiştir. Özellikle Kayseri ve Samsun istasyonlarında elde edilen MOH, KOH ve BH değerlerinin, daha küçük mesafe ve zaman farklarına sahip Trapani/Birgi RS'e kıyasla daha büyük olduğu tespit edilmiştir. COSMIC-2 RO ve radyosonda profillerinin 5-10 km arasındaki değişimlerine yönelik elde edilen bulguların irdelenmesinde sadece ölçü sağlayan tekniklerin konumları ve ölçü sağlanan zamanlar arası farklar açısından değil tekniklere özgü farklı özelliklere göre de üç açıdan irdelenmiştir. Buna göre; radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basınçları arasında genel olarak farkların fazla olması sebeplerinden biri (1) radyosonda nem ölçülerinin düşük sıcaklıklardan etkilenmesi olabilir. Radyosondalar, suyun donma noktasının altındaki sıcaklıklarda bulutların arasından uçtuğunda, nem sensörlerinde buzlanma en büyük sorun olarak meydana gelebilmektedir. Ayrıca, (2) alt troposferik bölgedeki atmosferik yansıma ve çok yollu etkilerden kaynaklanan GNSS problemleri ile ilişki olması radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profilleri arasında farkların meydana gelmesine sebep gösterilebilir. (3) Radyosonda ve COSMIC-2 RO kırıcılık profilleri arasındaki fark, COSMIC-2 LEO uydu alıcılarındaki sinyal izleme hataları, çok yollu yayılımdan kaynaklı olabilir.

3.3. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ERA5 Dikey Atmosferik Profil Karşılaştırma Bulguları

GNSS-RO, radyosonda ve ERA5 dikey atmosferik PWV profillerinin karşılaştırılması amacıyla, ulusal ve uluslararası kapsamda üç RS belirlenmiştir. Bu kapsamda Türkiye'den Samsun, İstanbul, İzmir ve İtalya'dan Trapani/Birgi istasyonları seçilmiştir. Seçilen RS çevresinde meydana gelen COSMIC-2 RO olaylarının wetPf2 profillerinin çoğunda 850 hPa'dan daha yüksek basınç seviyelerinde özgül nem verileri eksik gözlemlenmiştir.

Halbuki, 1000 hPa ve 925 hPa gibi basınç seviyeleri, atmosferdeki toplam su buharı içeriğinin büyük bir kısmını temsil etmektedir. Bu durumun karşılaştırma sonuçlarına etkisini değerlendirebilmek için, RO profillerinden interpolasyonla 1000 hPa, 925 hPa ve 850 hPa seviyelerinde özgül nem değerlerinin sağlanabildiği dosyalar ile analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kullanılan istasyonlar kapsamında, 1 saat-100 km, 2 saat-200 km ve 3 saat-300 km sınırlamalarına uygun çalışma alanı kombinasyonları oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular,

- 1000 hPa-10 hPa arasında karşılaştırılan PWV dikey profilleri için hesaplanan MOH değerleri; RO-RS için 0.4-0.6 mm, RO-ERA5 için 0.1 ile 0.2 mm, ERA5-RS için 0.3-0.5 mm arasında bulunmuştur. KOH değerleri, RO-RS için 0.7-1.2 mm, RO-ERA5 için 0.1-0.4 mm, ERA5-RS için 0.6-0.9 mm arasında bulunmuştur. BH değerleri ise RO-RS için 0.28-0.37, RO-ERA5 için 0.07-0.19, ERA5-RS için 0.22-0.28 arasında bulunmuştur.
- 925 hPa-10 hPa arasında karşılaştırılan PWV dikey profilleri için hesaplanan MOH değerleri; RO-RS için 0.1-0.2 mm, RO-ERA5 için 0.1 ile 0.2 mm, ERA5-RS için 0.1-0.2 mm arasında bulunmuştur. KOH değerleri RO-RS için 0.2-0.6 mm, RO-ERA5 için 0.3-0.5 mm, ERA5-RS için 0.3-0.4 mm arasında bulunmuştur. BH değerleri ise RO-RS için 0.20-0.55, RO-ERA5 için 0.32-0.47, ERA5-RS için 0.23-0.28 arasında bulunmuştur.
- 850 hPa-10 hPa arasında karşılaştırılan PWV dikey profilleri için hesaplanan MOH değerleri; RO-RS için 0.1-0.4 mm, RO-ERA5 için 0.0 ile 0.3 mm, ERA5-RS için 0.1-0.2 mm arasında bulunmuştur. KOH değerleri ise RO-RS için 0.3-1.01 mm, RO-ERA5 için 0.1-0.7 mm, ERA5-RS için 0.3-0.4 mm arasında bulunmuştur. BH değerleri ise RO-RS için 0.33-0.69, RO-ERA5 için 0.15-0.50, ERA5-RS için 0.20-0.36 arasında bulunmuştur.

1000 hPa-10 hPa, 925 hPa-10 hPa ve 850 hPa-10 hPa arasında elde edilen MOH ve KOH bulguları genellikle düşük düzeyde tespit edilmiştir. Ancak, 1000 hPa-10 hPa arasında, KOH değerlerinin 925 hPa-10 hPa ve 850 hPa-10 hPa seviyelerine göre biraz daha yüksek olması dikkat çekmiştir. Bu kapsamda 1000 hPa-10 hPa karşılaştırması için Samsun, Trapani/Birgi ve İstanbul istasyonlarına göre seçilen dosyalar irdelenmiştir. Bu irdeleme sonucunda,

- Samsun istasyonu için kullanılan RO ve RS dosyalarında 1000 hPa basınç seviyelerinde özgül nem değerleri benzer düzeyde gözlenmiştir.

- Trapani istasyonu için kullanılan RO dosyasında 1000 hpa basınç seviyelerinde özgül nem değeri 3.4 g/kg iken RS dosyasında aynı basınç seviyesinde özgül nem değeri 8.36 g/kg olduğu gözlenmiştir.
- İstanbul istasyonunda ise 1000 hPa basınç seviyelerinde özgül nem değeri RO dosyasında 2.62 g/kg iken RS dosyasında 5.46g/kg olduğu gözlenmiştir.

Bu durum, RO profillerinin deniz seviyesine yakın basınç seviyelerinde özgül nem ölçümlerinde sınırlamalar yaşadığını ortaya koyabilir. Dolayısıyla, alt seviyelerde yapılan karşılaştırmalarda RO ölçüleri, hata oranlarının artmasına neden olabilir. Bununla birlikte, Samsun istasyonu için konumsal ve zamansal olarak daha yakın bir sınırlama yapılması, RO ve RS dosyalarında 1000 hPa basınç seviyelerinde benzer özgül nem değerlerinin elde edilmesini sağlamış olabilir.

3.4. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO, Radyosonda ve ERA5 PWV Zaman Serilerinin Karşılaştırma Bulguları

FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serilerinin karşılaştırmalarında, her bir ölçüm çifti için hesaplanan farkların ortalamasının sıfırdan anlamlı bir şekilde farklı olup olmadığı, eşleştirilmiş t-testi (paired t-test) ile analiz edilmiştir. Test kararları, elde edilen test değerinin $\alpha = 0.05$ yanılma olasılığı ile hesaplanan kritik t-değeri ile karşılaştırılması yoluyla verilmiştir. Test istatistiği kritik değeri aştığında, farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmiştir (Tablo 35).

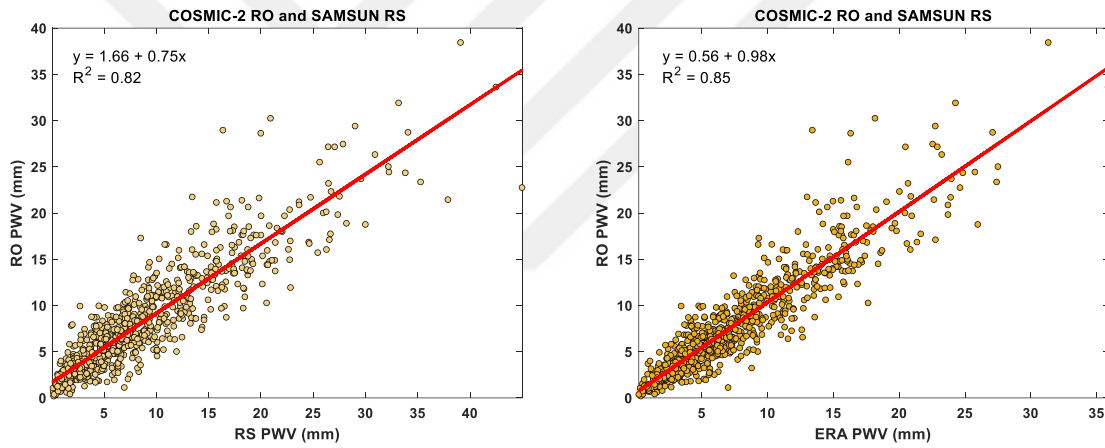
Tablo 35. FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serisi farklarının anlamlılık test bulguları

RS	Karşılaştırma	Test Değeri (T_0)	Serbestlik Derecesi (f)	T-Tablo Değeri	Karar
Samsun	RS-RO	4.21	840	1.963	Anlamlı
	RS-ERA5	11.68	840	1.963	Anlamlı
İstanbul	RS-RO	7.06	1012	1.962	Anlamlı
	RS-ERA5	17.75	1012	1.962	Anlamlı
İzmir	RS-RO	11.58	1258	1.962	Anlamlı
	RS-ERA5	19.40	1258	1.962	Anlamlı
Adana	RS-RO	7.56	1120	1.962	Anlamlı
	RS-ERA5	12.96	1120	1.962	Anlamlı
Isparta	RS-RO	8.42	1286	1.962	Anlamlı
	ERA5-RO	5.83	1287	1.962	Anlamlı

Tablo 35’te tüm istasyonlarda elde edilen test istatistikleri, $\alpha = 0.05$ yanılma olasılığı ile hesaplanan test değerleri, tablo değerlerinden büyük bulunmuştur. Bu durum, hem RO hem de ERA5 kaynaklı PWV değerlerinin Radyosonda ölçümleriyle arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermektedir.

FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS-RO verilerinden hesaplanan PWV değişimleri ile radyosonda ve ERA5 verilerinden elde edilen PWV değişimleri arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Pearson korelasyon katsayısı, doğrusal regresyon yöntemi ile hesaplanan eğim ve R^2 belirleyicilik katsayısı sonuçları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda,

- Samsun RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV ile COSMIC-RO ve ERA5 PWV zaman serilerinin dağılım grafikleri Şekil 61’de sunulmuştur.



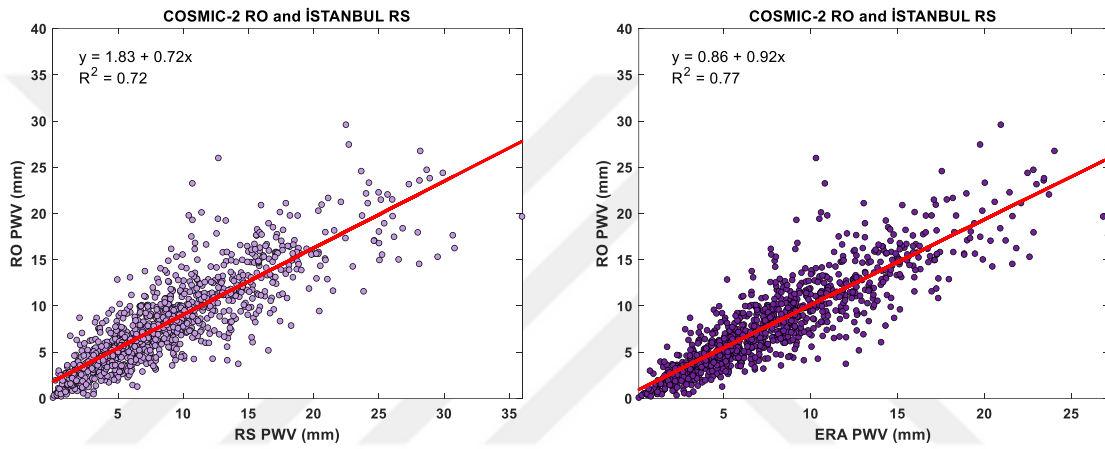
Şekil 61. Samsun RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği

Şekil 61’de Samsun RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV arasındaki doğrusal regresyon eğim değeri 0.75 olarak hesaplanmış ve R^2 değeri 0.82 bulunmuştur. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV arasındaki ilişki incelendiğinde ise doğrusal regresyon eğim değeri 0.98, R^2 değeri ise 0.85 olarak bulunmuştur. COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV için KOH değeri 2.45 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.90; COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV için KOH değeri 2.19 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.92 olarak bulunmuştur. COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serilerinin istatistiksel karşılaştırma bulguları Tablo 36’da sunulmuştur.

Tablo 36. Samsun RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları

Samsun RS	COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV	COSMIC-2 RO-ERA PWV
KOH (mm)	2.45	2.19
Korelasyon	0.90	0.92
Eğim	0.75	0.98
R ²	0.82	0.85

- İstanbul RS için COSMIC-2 RO ve radyosonda PWV ile COSMIC-RO ve ERA5 PWV zaman serilerinin dağılım grafikleri Şekil 62’de sunulmuştur.



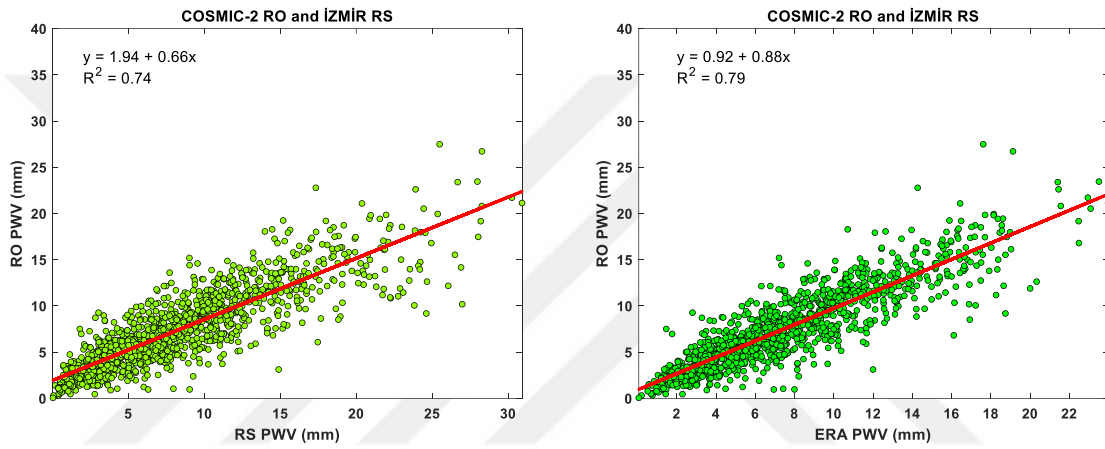
Şekil 62. İstanbul RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği

Şekil 62’de İstanbul RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV arasındaki doğrusal regresyon eğim değeri 0.72 olarak hesaplanmış ve R² değeri 0.72 bulunmuştur. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV arasındaki ilişki incelendiğinde ise doğrusal regresyon eğim değeri 0.92, R² değeri ise 0.77 olarak bulunmuştur. COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV için KOH değeri 2.64 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.85 olarak hesaplanmıştır. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV için ise KOH değeri 2.40 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.88 olarak bulunmuştur. COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serilerinin istatistiksel karşılaştırma bulguları Tablo 37’de sunulmuştur.

Tablo 37. İstanbul RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları

İstanbul RS	COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV	COSMIC-2 RO-ERA PWV
KOH (mm)	2.64	2.40
Korelasyon	0.85	0.88
Eğim	0.72	0.92
R ²	0.72	0.77

- İzmir RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV ile COSMIC-RO ve ERA5 PWV zaman serilerinin dağılım grafikleri Şekil 63'te sunulmuştur.



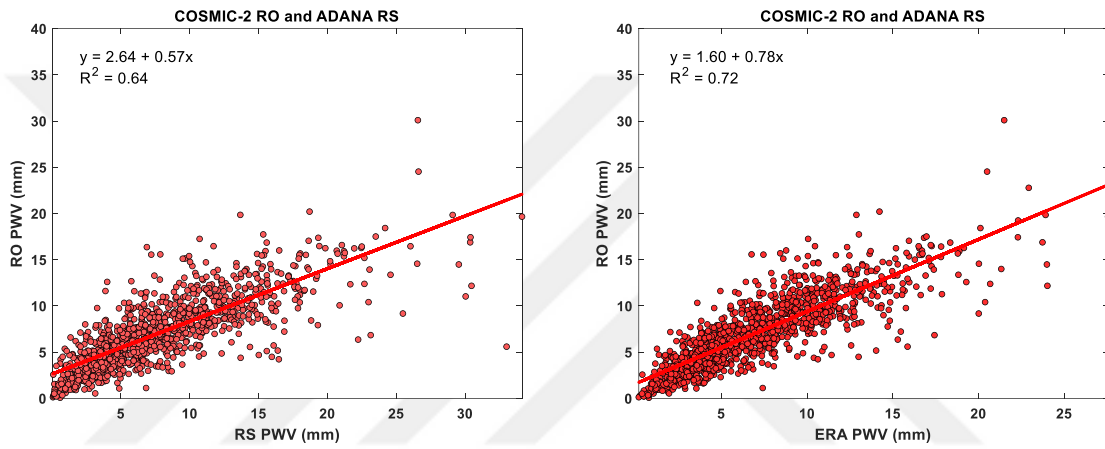
Şekil 63. İzmir RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği

Şekil 63'te İzmir RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV arasındaki doğrusal regresyon eğim değeri 0.66 olarak hesaplanmış ve R² değeri 0.74 bulunmuştur. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV arasındaki ilişki incelendiğinde ise doğrusal regresyon eğim değeri 0.88, R² değeri ise 0.79 olarak hesaplanmıştır. COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV için KOH değeri 2.23 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.86 olarak hesaplanmıştır. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV için ise KOH değeri 2.01 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.89 olarak bulunmuştur. COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serilerinin istatistiksel karşılaştırma bulguları Tablo 38'de sunulmuştur.

Tablo 38. İzmir RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları

İzmir RS	COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV	COSMIC-2 RO-ERA PWV
KOH (mm)	2.23	2.01
Korelasyon	0.86	0.89
Eğim	0.66	0.88
R ²	0.74	0.79

- Adana RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV ile COSMIC-RO ve ERA5 PWV zaman serilerinin dağılım grafikleri Şekil 64'te sunulmuştur.



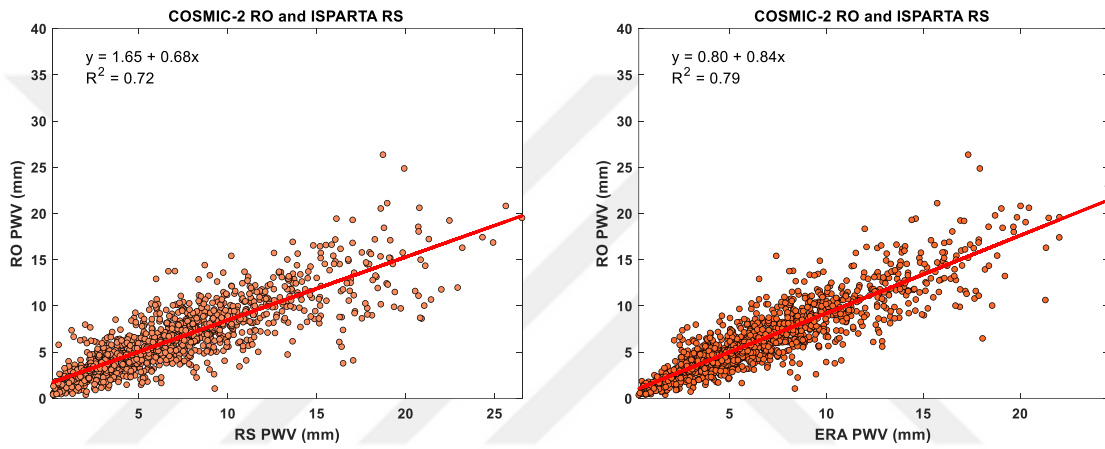
Şekil 64. Adana RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği

Şekil 64'te Adana RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV arasındaki doğrusal regresyon eğim değeri 0.57 olarak hesaplanmış ve R² değeri 0.64 bulunmuştur. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV arasındaki ilişki incelendiğinde ise doğrusal regresyon eğim değeri 0.78, R² değeri ise 0.72 olarak hesaplanmıştır. COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV için KOH değeri 2.35 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.80 olarak hesaplanmıştır. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV için ise KOH değeri 2.08 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.85 olarak bulunmuştur. COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serilerinin istatistiksel karşılaştırma bulguları Tablo 39'da sunulmuştur.

Tablo 39. Adana RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları

Adana RS	COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV	COSMIC-2 RO-ERA PWV
KOH (mm)	2.35	2.08
Korelasyon	0.80	0.85
Eğim	0.57	0.78
R ²	0.64	0.72

- Isparta RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV ile COSMIC-RO ve ERA5 PWV zaman serilerinin dağılım grafikleri Şekil 65'te sunulmuştur.



Şekil 65. Isparta RS için COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV ve COSMIC-2 RO-ERA5 PWV arasındaki dağılım grafiği

Şekil 65'te Isparta RS için COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV arasındaki doğrusal regresyon eğim değeri 0.68 olarak hesaplanmış ve R² değeri 0.72 bulunmuştur. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV arasındaki ilişki incelendiğinde ise doğrusal regresyon eğim değeri 0.84, R² değeri ise 0.79 olarak hesaplanmıştır. COSMIC-2 RO ve Radyosonda PWV için KOH değeri 2.01 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.85 olarak hesaplanmıştır. COSMIC-2 RO ve ERA5 PWV için ise KOH değeri 1.84 mm, pearson korelasyon katsayısı 0.89 olarak bulunmuştur. /COSMIC-2 RO, Radyosonda ve ERA5 PWV zaman serilerinin istatistiksel karşılaştırma bulguları Tablo 40'da sunulmuştur.

Tablo 40. Isparta RS için PWV zaman serisi karşılaştırma bulguları

Isparta RS	COSMIC-2 RO-Radyosonda PWV	COSMIC-2 RO-ERA PWV
KOH (mm)	2.01	1.84
Korelasyon	0.85	0.89
Eğim	0.68	0.84
R ²	0.72	0.79

3.5. GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X GNSS-RO PWV Değerlerinin Karşılaştırılma Bulguları

GRACE, MetOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X LEO uydularından elde edilen PWV değerleri, 2017-2019 yılları arasında Samsun, İstanbul, İzmir, Adana ve Isparta RS için hesaplanarak karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular;

- Samsun ve İstanbul RS için PWV değerleri 0 mm-25 mm arasında,
- İzmir, Isparta ve Adana RS için PWV değerleri 0 mm-20 mm arasında,

gözlenmiştir. Bununla birlikte, özellikle İzmir ve Isparta için GRACE, METOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından diğer istasyonlara kıyasla daha az PWV sonucu üretildiği belirlenmiştir. Bu durum, LEO uydularının yörünge dinamikleri ve RO olaylarının bölgesel dağılımı ile ilişkilendirilmiştir.

3.6. Karadeniz Bölgesinde Ekstrem Hidrolojik Hava Olaylarının Olduğu Dönemlerde Üretilen GNSS-RO PWV Değerlerinin Radyosonda, ERA-İnterim, Yer Tabanlı GNSS Meteorolojisi PWV ile Karşılaştırılma Bulguları

21 Kasım 2017 tarihinde Sinop ve Samsun çevresinde gerçekleşen hortum ve fırtına ile 7 Aralık 2017 tarihinde Samsun çevresinde gerçekleşen şiddetli rüzgar meteorolojik ekstrem hava olayları Radyosonda, ERA-İnterim, GNSS Meteorolojisi ve GNSS-RO PWV dağılımları ile incelenmiştir. Elde edilen bulgular;

- SAME için Radyosonda, ERA-İnterim, GNSS Meteorolojisi PWV dağılımları genel olarak 5 mm-20 mm arasında birbiriyle uyumlu iken GNSS-RO PWV dağılımları bazı günlerde bu sonuçlarla daha uyumlu bazı günlerde ise uyumsuz tespit edilmiştir.
- SOMU için Radyosonda, ERA-İnterim, GNSS Meteorolojisi dağılımları genel olarak 5 mm-20 mm arasında birbiriyle uyumlu gözlenmiştir. GNSS-RO PWV

dağılımları ise genellikle 5 mm düzeyinde bazı günlerde ise 5 mm düzeyinin altında da tespit edilmiştir.

23 Aralık 2017 tarihinde Trabzon çevresinde gerçekleşen şiddetli yağış, sel, fırtına ve hortum meteorolojik ekstrem hava olayları ERA-Interim, GNSS Meteorolojisi ve GNSS-RO PWV dağılımları ile incelenmiştir.

- TRAB istasyonu için ERA-Interim ve GNSS PWV dağılımları 5 mm-20 mm arasında iken GNSS-RO PWV dağılımlarının özellikle 5 mm düzeyinde olduğu gözlenmiştir.
- MACK istasyonu için ERA-Interim ve GNSS PWV dağılımları 8 mm-18 mm arasında iken GNSS-RO PWV dağılımlarının özellikle 5 mm düzeyinde olduğu gözlenmiştir.

Kazancı (2021) tarafından yapılan çalışmada, 20-22 Kasım 2017 tarihlerinde Karadeniz Bölgesi'nin Samsun çevresindeki PWV dağılım haritalarına göre, değerlerin 6 mm ile 24 mm arasında değiştiği, yağış haritalarına göre ise 2 mm ile 14 mm arasında değişebileceği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, 21-24 Aralık 2017 tarihlerinde Trabzon çevresindeki PWV dağılım haritalarında değerler 8 mm ile 22 mm arasında değişirken, yağış haritalarında bu aralık 0 mm ile 45 mm olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, GNSS-RO PWV bulguları incelendiğinde, elde edilen sonuçların bu değerler arasında kalabildiği görülmektedir. Ancak, alt troposferde GNSS-RO profillerinin zayıf yönlerinin iyileştirilmesi durumunda, daha verimli ve güvenilir karşılaştırmalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizdeki RS'ler çevresinde gözlemlenen RO olaylarının büyük bir kısmı yaklaşık %47-%76 oranla FORMOSAT-7/COSMIC-2 LEO uydusu tarafından kaydedilmiştir. Bu durum, FORMOSAT-7/COSMIC-2'nin GNSS-RO verileri sağlamadaki yüksek etkinliğini ve Türkiye'nin coğrafi konumu açısından sağladığı belirgin avantajı ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, FORMOSAT-7/COSMIC-2 verileri, ülkemizdeki hava olayları ve iklim değişikliği araştırmalarında GRACE, CHAMP, MetOp-A, MetOp-B, MetOp-C, TerraSAR-X ve TanDEM-X gibi diğer LEO uydularına kıyasla daha öncelikli bir tercih olabilir.

FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırılcılık profillerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla radyosonda atmosferik profilleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler, 5-25 km irtifa aralığında grafiksel sonuçların genel olarak uyumlu olduğunu göstermektedir. Özellikle 5-10 km aralığında daha belirgin farklılıkların gözlemlendiği tespit edilmiş ve bu durum için istatistiksel değerlendirme yapılmıştır. Konumsal ve zamansal olarak birbirine yakın mesafede bulunan karşılaştırmalarında daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Bu kapsam elde edilen en düşük MOH değerleri sırasıyla sıcaklık için 0.7162 °C, su buharı basıncı için 0.1076 hPa, özgül nem için 0.0118 g/kg ve kırılcılık için 0.5833 birim olarak hesaplanmıştır. KOH değerleri sıcaklık için 0.8672 °C, su buharı basıncı için 0.4826 hPa, özgül nem için 0.1163 g/kg ve kırılcılık için 2.7858 N-unit olarak bulunmuştur. BH değerleri ise sıcaklık için 0.02, su buharı basıncı için 1.93 hPa, özgül nem için 0.03 ve kırılcılık için 0.00 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, GNSS-RO ve radyosonda atmosferik profillerin karşılaştırılması için olabildiğince birbirine yakın konumda ve zamanda sınırlandırma yapılabilir ve böylece hava olayları ve iklimsel değişimlerin analizleri için daha hassas sonuçlar üretilebilir.

FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO, radyosonda ve ERA5 verileri kullanılarak 1000 hPa-10 hPa, 925 hPa-10 hPa ve 850 hPa-10 hPa basınç seviyelerine ait günlük dikey atmosferik PWV değişimleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, MOH değerlerinin genelde 0.1-0.6 mm aralığında, KOH değerlerinin 0.1-1.2 mm aralığında, BH değerlerinin ise 0.06-0.69 aralığında seyrettiğini göstermiştir. Her ne kadar genel olarak büyük bir fark gözlenmese de en yüksek MOH ve KOH değerleri, 1000 hPa-10 hPa basınç seviyeleri arasındaki karşılaştırmalarda ortaya çıkmıştır. Bu durum, özellikle düşük basınç seviyelerinde hataların artma eğiliminin var olabileceğine işaret etmektedir. Söz konusu artış eğilimi, GNSS-RO tekniğinin troposferin alt katmanlarında ölçüm hassasiyetinin zayıflamasından

kaynaklanıyor olabilir. Bu kapsamda farklı coğrafi konumlarda daha fazla istasyonun veri seti değerlendirilebilir. Nitekim, su buharının dinamik yapısı, bölgesel ve mevsimsel farklılıklara karşı oldukça duyarlıdır. Dolayısıyla daha yoğun ve yaygın bir istasyon ağı, hem troposferik alt seviyelerin ölçüm belirsizliklerini ortaya koymada hem de farklı coğrafi bölgelerdeki su buharı dağılımını daha ayrıntılı bir şekilde incelemede önemli katkılar sağlayabilir.

FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO verilerinden hesaplanan PWV değişimleri ile radyosonda ve ERA5 verilerinden elde edilen PWV değişimlerin zaman serileri 2020-2023 zaman aralığı için karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, PWV analizleri için önemli olan 1000 hpa-10 hpa arasındaki standart basınç seviyelerinden eşleşen düzeylerde yapılmıştır. Grafikselleştirilmiş sonuçlarda PWV değişimleri genellikle 0 mm-25 mm gözlenmiştir. RO, radyosonda ve ERA5 PWV değişimleri arasındaki ilişki pearson korelasyon katsayısı, doğrusal regresyon yöntemi ile hesaplanan eğim ve R^2 belirleyicilik katsayısı sonuçları ile değerlendirilmiştir. RO-RS PWV arasındaki KOH değerleri 2.01 mm-2.64 mm arasında, korelasyon katsayıları 0.80-0.90 arasında, eğim değerleri 0.57-0.75 arasında, R^2 değerleri 0.64-0.82 arasında bulunmuştur. RO-ERA5 PWV arasındaki KOH değerleri 1.84 mm-2.40 mm arasında, korelasyon katsayıları 0.85-0.92 arasında, eğim değerleri 0.78-0.98 arasında, R^2 değerleri 0.72-0.85 arasında bulunmuştur. Ayrıca, PWV zaman serilerinin karşılaştırmalarından elde edilen farklar, t-testine göre anlamlı bulunmuştur.

GRACE, MetOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen PWV RO değerleri, Karadeniz bölgesinde 2017 yılı için ekstrem hidrolojik hava olaylarının olduğu dönemler için 116Y186 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında üretilen Radyosonda, ERA-İnterim, Yer Tabanlı GNSS Meteorolojisi PWV değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan karşılaştırmalar, Samsun ve çevresinde meydana ekstrem hava olayları için Samsun'da tesis edilen SAME ve SOMU, Trabzon ve çevresinde meydana ekstrem hava olayları için Trabzon'da tesis edilen TRAB ve MACK istasyonları referans alınarak gerçekleştirilmiştir. SAME, SOMU, TRAB ve MACK istasyonları için PWV sonuçları genel olarak 5 mm-20 mm arasındadır. Ancak GNSS-RO PWV sonuçları bazı günler için 5 mm düzeyinin altında da gözlenmiştir. Bu durum, GNSS-RO tekniğinin ekstrem hava olayları süresince alt troposferde yetersiz kalma nedenleri ve GRACE, MetOP, TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularının Karadeniz bölgesi için kapsama alanının kısıtlı olması ve bu katmandaki nem profiline dair algılamanın güçlüğünden kaynaklı olabilir. Ancak yeni nesil LEO uyduları, daha gelişmiş veri işleme yöntemleri ile GNSS-RO kaynaklı PWV

analizlerinin doğruluğunun artması, bu tekniğin ekstrem meteorolojik olayların belirlenmesi ve tahminine önemli katkılar sağlayacağı beklenmektedir.

Hava olayları ve iklimsel araştırmalar için Radyosonda tekniği yüksek doğruluk sağlamasına karşın ülkemizde Erzurum gibi coğrafi, iklimsel veya teknik zorlukların bulunduğu bölgelerde verilerin eksik veya tutarsız olduğu durumlar yaşanabilmektedir. Böyle durumlar için GNSS-RO tekniği ile LEO uyduları aracılığıyla geniş bölgelerde ve daha sık zaman aralıklarında veri üretebilir. Bu sayede, radyosonda ölçümlerindeki boşluklar giderilebilir ve bölgesel nem profilleri zenginleştirilebilir.

Hava olayları ve iklimsel araştırmalar için radyosonda cihazlarının kurulum ve işletim maliyetleri yüksektir. Bu araştırmalar için ülkemiz coğrafi konumu açısından etkin veri sağlayabilecek GNSS-RO LEO uydu verileri ile analizler daha ekonomik düzeyde gerçekleştirilebilir. Ayrıca, GNSS-RO veri işleme merkezleri tarafından çok daha hassas veri işleme algoritmalarının geliştirilmesi durumunda sağlanabilecek atmosferik ürünleri ile PWV analizleri çok daha güvenilir elde edilebilir. Bu durum, ülkemizde yaşanabilecek sel, hortum, fırtına gibi afet durumlarının önceden tahmin etme ve maddi manevi kayıpları minimum düzeye indirme noktasında önemli bir yere sahip olabilecektir.

Bu tez çalışmasında GNSS-RO, Radyosonda ve ERA5 yeniden analiz ürünler ile yapılan karşılaştırma sonuçlarında genellikle iyi bir uyum gözlenmiştir. Sonuçlarda gözlenen farklılıkların ise temel nedeni gözlem yöntemleridir. Örneğin, GNSS-RO yönteminde veriler yeryüzüne yakın yörüngede hareket eden LEO uydularından sağlanırken Radyosonda tekniğinde balon ile yükselen cihazdan sağlanmaktadır. Bu yöntemlerin farklı güçlü ve zayıf yönleri sahip olması, aslında birbirini tamamlayıcı bir avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla farklı tekniklerin bir arada kullanılması, daha bütüncül ve güvenilir analizlere ulaşmada önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Son yıllarda yapay zeka tabanlı tahmin modelleri, jeodezi ve atmosfer bilimlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Crocetti vd. (2024) tarafından geliştirilen ZWDX modeli, GNSS ölçümlerinden ZWD tahmini yaparak yapay zeka tahmin modellerinin bu alandaki potansiyelini göstermiştir. Bu tez çalışmasında, GNSS-RO, Radyosonda, Yer tabanlı GNSS meteorolojisi, NWP modelleri gibi farklı veri kaynakları kullanılarak PWV hesabı gerçekleştirilmiştir. Gelecekte, bu verileri birleştiren yapay zeka tabanlı hibrit modeller geliştirilebilir ve PWV tahminlerinin doğruluğu daha artırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abualkishik, A. Z. (2018). A comparative study on the software architecture of WRF and other numerical weather prediction models. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 96(24), 8244-8254.
- Ahmed, I. F., Abd El-Fatah, M. A., Mousa, A. E., & El-Fiky, G. (2022). Analysis of the differences between GPS radio occultation and radiosonde atmosphere profiles in Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(2), 491-500.
- Ahrens, C. D. (2012). *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere* (6th ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Albaji, M. (2022). *Introduction to Water Engineering, Hydrology, and Irrigation* (1st ed.). CRC Press.
- Alsweiss, S. O., Jelenak, Z., Chang, P. S., Dong Park, J., & Meyers, P. (2015). Inter-calibration results of the Advanced Microwave Scanning Radiometer-2 over ocean. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(9), 4230-4238.
- Angerer, B., Ladstädter, F., Scherllin-Pirscher, B., Schwärz, M., Steiner, A. K., Foelsche, U., & Kirchengast, G. (2017). Quality aspects of the Wegener Center multi-satellite GPS radio occultation record OPSv5.6. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(12), 4845–4863.
- Angermann, D., Pail, R., Seitz, F., & Hugentobler, U. (2022). *Mission Earth Geodynamics and Climate Change Observed Through Satellite Geodesy*. Springer Nature.
- Anthes, R. A. (2011). Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: Contributions to weather, climate and space weather. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(6), 1077-1103.
- Anthes, R. A., Rocken, C., & Kuo, Y.-H. (2000). Applications of COSMIC to meteorology and climate. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11(1), 115-156.
- Arras, C., Resende, L. C., Kepkar, A., Senevirathna, G., & Wickert, J. (2022). Sporadic E layer characteristics at equatorial latitudes as observed by GNSS radio occultation measurements. *Earth, Planets and Space*, 74, 163.
- Awange, J. (2018). *GNSS environmental sensing*. Springer International Publishers.
- Ayorinde, T. T., Wrasse, C. M., Takahashi, H., Sapucci, L. F., Figueiredo, C. A., Barros, D., & Essien, P. (2024). The relationship between ITCZ and the Equatorial Stratospheric Gravity Waves inferred from Radio Occultation Measurements. Available at SSRN 4489217.
- Bai, W., Deng, N., Sun, Y., Du, Q., Xia, J., Wang, X., . . . Liu, X. (2020). Applications of GNSS-RO to Numerical Weather Prediction and Tropical Cyclone Forecast. *Atmosphere*, 11(11), 1204.

- Baltink, H. K., van der Marel, H., & van der Hoeven, A. G. (2002). Integrated atmospheric water vapor estimates from a regional GPS network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D3), ACL 3-1–ACL 3-8.
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.
- Basha, G., & Ratnam, M. V. (2009). Identification of atmospheric boundary Layer height over a tropical station using high-resolution radiosonde refractivity profiles: Comparison with GPS radio occultation measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D16).
- Bell, A., Sauvageat, E., Stober, G., Hocke, K., & Murk, A. (2025). Developments on a 22 GHz microwave radiometer and reprocessing of 13-year time series for water vapour studies. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18(2), 555-567.
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., & Ware, R. H. (1994). GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 33(3), 379-386.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15787-15801.
- Beyerle, G., Grunwaldt, L., Heise, S., Köhler, W., König, R., Michalak, G., . . . Giesinger, B. (2011). First results from the GPS atmosphere sounding experiment TOR aboard the TerraSAR-X satellite. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6687–6699.
- Beyerle, G., Schmidt, T., Michalak, G., Heise, S., Wickert, J., & Reigber, C. (2005). GPS radio occultation with GRACE: Atmospheric profiling utilizing the zero difference technique. *Geophysical Research Letters*, 32(13).
- Billault-Roux, A. C., & Berne, A. (2021). Integrated water vapor and liquid water path retrieval using a single-channel radiometer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(4), 2749-2769.
- Boehm, J., & Schuh, H. (2004). Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31(1).
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7).
- Bonafoni, S., Biondi, R., Brenot, H., & Anthes, R. (2019). Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review. *Atmospheric research*, 230, 104624.
- Böhm, J., & Schuh, H. (2013). *Atmospheric effects in space geodesy*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- Cao, Z. (2020). Assessment methods for air pollution exposure. *Spatiotemporal analysis of air pollution and its application in public health* (s. 197-206). içinde Elsevier.
- Case, K., Kruizinga, G., & Wu, S.-C. (2010). *GRACE Level 1B data product user handbook (JPL D-22027)*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/GRACE-L1B-Handbook-v1.3.pdf> adresinden alındı
- Chiswell, S. R., Businger, S., Bevis, M., Solheim, F., Rocken, C., & Ware, R. (1994). Improved retrieval of integrated water vapor from water vapor radiometer measurements using numerical weather prediction models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(5), 1253-1261.
- Chuvieco, E. S. (2008). *Earth observation of global change : the role of satellite remote sensing in monitoring the global environment*. Springer.
- Cigala, V., Biondi, R., Prata, A. J., Steiner, A. K., Kirchengast, G., & Brenot, H. (2019). GNSS Radio Occultation Advances the Monitoring of Volcanic Clouds: The Case of the 2008 Kasatochi Eruption. *Remote Sensing*, 11(19), 2199.
- Cook, K., Fong, C.-J., Wenkel, M. J., Wilczynski, P., Yen, N., & Chang, G. S. (2013). FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS radio occultation constellation mission for global weather monitoring. *2013 IEEE Aerospace Conference*, (s. 1-8). Big Sky, MT, USA.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2024). European state of the climate – Summary 2023. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).
- Crocetti, L., Schartner, M., Wareyka-Glaner, M. F., Schindler, K., & Soja, B. (2024). ZWDX: A global zenith wet delay forecasting model using XGBoost. *Earth, Planets and Space*, 76, 163.
- Çelik, S., H. B., & Görgeç, H. (2008). *Küresel İklim Değişikliği ve İnsan Sağlığına Etkileri*. Telekomünikasyon Şube Müdürlüğü: https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/makale/11_kureseliklimdegisikligietkileri.pdf adresinden alındı
- Dai, L., Che, T., & Ding, Y. (2015). Inter-Calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S Data to Improve the Consistency of Snow-Depth Products in China. *Remote Sensing*, 7(6), 7212-7230.
- Darrag, M., Jin, S., Calabria, A., & Samy, A. (2022). Determination of tropical belt widening using multiple GNSS radio occultation measurements. *Annales Geophysicae*, 40(3), 359-377.
- Eken, M., Ceylan, A., Taştekin, A. T., Şahin, H., & Şensoy, S. (2005). *Klimatoloji II*. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü: <https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/kitaplar/klimatoloji2.pdf> adresinden alındı
- Foelsche, U., Borsche, M., Steiner, A. K., Gobiet, A., Pirscher, B., Kirchengast, G., . . . Schmidt, T. (2008). Observing upper troposphere–lower stratosphere climate with radio occultation data from the CHAMP satellite. *Climate Dynamics*, 31, 49-65.

- Fonseca, Y. B., Alexander, P., de la Torre, A., Hierro, R., LLamedo, P., & Calori, A. (2018). Comparison between GNSS ground-based and GPS radio Occultation precipitable water observations over ocean-dominated regions. *Atmospheric Research*, 209, 155-122.
- Foth, A., Lochmann, M., Garfias, S. P., & Kalesse-Los, H. (2024). Determination of low-level temperature profiles from microwave Radiometer observations during rain. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(24), 7169-7181.
- Fu, E.-J., Zhang, K., Marion, K.-Y., Xu, X.-H., Marshall, J., Rea, A., . . . Kuleshov, Y. (2009). Assessing COSMIC GPS radio occultation derived atmospheric parameters using Australian radiosonde network data. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 1054-1059.
- Fu, N., Jiang, M., Li, F., Guo, P., Hou, C., Wu, M., . . . Kan, L. (2022). Assessment of ZTD Derived from COSMIC Occultation Data with ECWMF, Radiosondes, and GNSS. *Sensors*, 22(14), 5209.
- Gomaa, H. E., Mousa, A., Yousef, M., & Mahrous, A. (2024). Statistical Validation of GNSS Radio Occultation data over Egypt. *Advances in Basic and Applied Sciences*, 2(1), 29-45.
- Gürbüz, G. (2015). *GNSS ve radyosonda'dan elde edilen yoğunlaşabilir su buharı miktarlarının karşılaştırılması*. Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.
- Hajj, G. A., & Romans, L. J. (1998). Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment. *Radio Science*, 33(1), 175-190.
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Russell, G., Lea, D. W., & Siddall, M. (2007). Climate change and trace gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1856), 1925-1954.
- Healy, S. B., & Eyre, J. R. (2000). Retrieving temperature, water vapour and surface pressure information from refractive-index profiles derived by radio occultation: A simulation study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(566), 1661-1683.
- Healy, S. B., Haase, J., & Lesne, O. (2002). Abel transform inversion of radio occultation measurements made with a receiver inside the Earth's atmosphere. *Annales Geophysicae*, 20(8), 1253-1256.
- Healy, S. B., Polichtchouk, I., & Horányi, A. (2020). Monthly and zonally averaged zonal wind information in the equatorial stratosphere provided by GNSS radio occultation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(732), 3612-3621.
- Herring, T. A. (1992). Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. *Proceedings of Refraction of Transatmospheric signals in Geodesy*, eds. JC De Munck and TA Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy, 36(4), 157-164.

- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*. Springer, Vienna.
- Iacovazzi, R., Liu, Q., Zhou, X., Kireev, S., Sun, N., & Ho, S.-p. (2022). COSMIC-2 soundings impacts on a RO-based NOAA microwave satellite data quality monitoring system. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 33, 9.
- Ignjatovic Stupar, D. (2015). *QB50 GNSS Radio Occultation*. ISU., International Space University, Master's Thesis, Illkirch-Graffenstaden, France.
- Innerkofler, J., Kirchengast, G., Schwärz, M., Marquardt, C., & Andres, Y. (2023). GNSS radio occultation excess-phase processing for climate applications including uncertainty estimation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(21), 5217-5247.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H. Lee & J. Romero, Eds.)*. IPCC.
- Isioye, O. A., Moses, M., Sai, I. U., & Akomolafe, E. A. (2020). Precipitable water vapour retrieval and analysis over Nigeria from ground and spaced-based GNSS observations. *Intercontinental Geoinformation Days*, (s. 181-185). Mersin.
- Jakowski, N. (2005). Ionospheric GPS radio occultation measurements on board CHAMP. *GPS Solutions*, 88–95.
- Jin, S. (2012). *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications*. London, UK: IntechOpen.
- Jin, S. (2024). *3S technology applications in meteorology: Observations, methods, and modelling*. CRC Press.
- Jin, S., Cardellach, E., & Xie, F. (2014). *GNSS remote sensing: Theory, methods, and applications*. Springer.
- Jin, S., Gao, C., & Li, J. (2019). Atmospheric sounding from FY-3C GPS radio occultation observations: First results and validation. *Advances in Meteorology*, 2019(1).
- Joo, S., Eyre, J., & Marriott, R. (2013). The Impact of MetOp and Other Satellite Data within the Met Office Global NWP System Using an Adjoint-Based Sensitivity Method. *American Meteorological Society*, 3331–3342.
- Kahveci, M., & Yıldız, F. (2018). *GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. (1999). *Weather and climate extremes: Changes, variations and a perspective from the insurance industry*. Springer Science & Business Media.
- Karmakar, P. K. (2014). *Ground-Based Microwave Radiometry and Remote Sensing: Methods and Applications*. CRC Press.

- Kayhan, M. (2007). Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye. *I. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi Bildiri Kitapçığı*, (s. 81-83). İstanbul.
- Kaymaklı, B. (2012). *Atmosferdeki yağışa dönüşebilir su buharı miktarının küresel konumlandırma sistemiyle ölçümünün değerlendirilmesi*. İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Kazancı, S. Z. (2021). *GNSS meteorolojisi ve tomografisi uygulamaları ile Karadeniz Bölgesi'ndeki ekstrem hava olayları tahmininin güçlendirilmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Trabzon.
- Kelsey, V., Riley, S., & Minschwaner, K. (2022). Atmospheric precipitable water vapor and its correlation with clear-sky infrared temperature observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(5), 1563-1576.
- Kirchengast, G., Foelsche, U., & Steiner, A. K. (2004). *Occultations for probing atmosphere and climate*. Springer.
- Kuleshov, Y., Choy, S., Fu, E. F., Chane-Ming, F., Liou, Y. A., & Pavelyev, A. G. (2016). Analysis of meteorological variables in the Australasian region using ground and space-based GPS techniques. *Atmospheric Research*, 176, 276-289.
- Kuo, Y.-H., Schreiner, W. S., Wang, J., Rossiter, D. L., & Zhang, Y. (2005). Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes. *Geophysical Research Letters*, 32(5).
- Kursinski, E. R. (1997). *The GPS radio occultation concept: theoretical performance and initial results*. California Institute of Technology, Doctoral Thesis, Pasadena.
- Kwon, H., Kang, J. S., Jo, Y., & Kang, J. H. (2015). Implementation of a GPS-RO data processing system for the KIAPS-LETKF data assimilation system. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3), 1259-1273.
- Lamb, H. H. (1972). *Climate: Present, Past and Future Volume 1: Fundamentals and Climate Now*. Routledge.
- Lasota, E., Steiner, A. K., Kirchengast, G., & Biondi, R. (2020). Tropical cyclones vertical structure from GNSS radio occultation: An archive covering the period 2001-2018. *Earth System Science Data*, 12(4), 2679-2693.
- Lewis, H. (2008). *Abel integral calculations in ROPP*. GRAS SAF Report 07, Met Office, UK.
- Lewis, H. (2008). *Levenberg-Marquardt minimisation in ROPP*. GRAS SAF Report 06, Met Office, UK.
- Li, Y., Yuan, Y., & Wang, X. (2020). Assessments of the Retrieval of Atmospheric Profiles from GNSS Radio Occultation Data in Moist Tropospheric Conditions Using Radiosonde Data. *Remote Sensing*, 12(17), 2717.

- Liou, Y.-A., Pavelyev, A., Matyugov, S., Yakovlev, O., & Wickert, J. (2010). *Radio occultation method for remote sensing of the atmosphere and ionosphere*. IntechOpen.
- Liu, M., Vecchi, G., Soden, B., Yang, W., & Zhang, B. (2021). Enhanced hydrological cycle increases ocean heat uptake and moderates transient climate change. *Nature Climate Change*, 11, 848-853.
- Lutz, S. L. (2008). *High-resolution GPS tomography in view of hydrological hazard Assessment*. Doctoral thesis, ETH Zürich, Switzerland.
- Mannucci, A. J., Ao, C. O., Young, L. E., & Meehan, T. K. (2014). Studying the atmosphere using global navigation satellites. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95(43), 389-391.
- Marini, J. W. (1972). Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Science*, 7(2), 223-231.
- Mavrovic, A., Sonntag, O., Lemmetyinen, J., Baltzer, J. L., Kinnaird, C., & Roy, A. (2023). Reviews and syntheses: Recent advances in microwave remote sensing in support of terrestrial carbon cycle science in Arctic–boreal regions. *Biogeosciences*, 20(14), 2941-2970.
- Melbourne, W. G. (2004). *Radio Occultations Using Earth Satellites: A Wave Theory Treatment*. Monograph 6, Deep Space Communications and Navigation Series, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- Mohanakumar, K. (2008). *Stratosphere troposphere interactions: An introduction*. Springer.
- Molina, C., Semlali, B.-E. B., González-Casado, G., Park, H., & Camps, A. (2023). The 2021 La Palma volcanic eruption and its impact on ionospheric scintillation as measured from GNSS reference stations, GNSS-R and GNSS-RO. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(12), 3671-3684.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2010). *Applied Statistics And Probability For Engineers*. Wiley.
- Morton, Y. J., van Diggelen, F., Spilker Jr, J. J., Parkinson, B. W., Lo, S., & Gao, G. (2021). *Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications, volume 1*. John Wiley.
- Murphy, M. J., & Haase, J. S. (2022). Evaluation of GNSS Radio Occultation Profiles in the Vicinity of Atmospheric Rivers. *Atmosphere*, 13(9), 1495.
- Najmafshar, M. (2017). *Modeling High-Latitude Ionospheric Scintillations for Radio Occultation GPS Receiver Performance Analysis*. University of Calgary, Doctoral Thesis, Calgary, Canada.
- Nascimento, A. A., Awange, J. L., Gonçalves, R. M., & Khandu. (2020). South America's tropopause variability in relation to global teleconnection (2001–2017): A GNSS-

- radio occultation assessment. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 209, 105379.
- National Weather Association (NWA). (2007). Letter of support for an operational GPS meteorology network. National Weather Association.
- Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2), 3227-3246.
- Ning, T. (2012). *GPS meteorology: With focus on climate applications*. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Department of Earth and Space Sciences, Gothenburg, Sweden.
- Organization, W. M., & (WMO). (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8, 7th ed.)*. Technical Report; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.
- Öztürk, K. (2002). Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye'ye Olası Etkileri. *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22(1), 47-65.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., . . . Dasgupta, P. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Patel, V. K., & Kuttippurath, J. (2003). Increase in tropospheric water vapor amplifies global warming and climate change. *Ocean-Land-Atmosphere Research*, 2, 0015.
- Prol, F. S., Hoque, M. M., Hernández-Pajares, M., Yuan, L., Olivares-Pulido, G., von Engel, A., . . . Notarpietro, R. (2023). Study of Ionospheric Bending Angle and Scintillation Profiles Derived by GNSS Radio-Occultation with MetOp-A Satellite. *Remote Sensing*, 15(6), 1663.
- Quante, M., & Matthias, V. (2006). Water in the Earth's atmosphere. *Journal de Physique IV*, 139, 37-61.
- Rabier, F., & Liu, Z. (2003). *Variational Data Assimilation: Theory and Overview*. ECMWF Seminar on Recent Developments in Data Assimilation for Atmosphere and Ocean, Reading, UK.
- Raj, P. E., Devara, P. C., Mahes Kumar, R. S., Pandithurai, G., Dani, K. K., Saha, S. K., . . . Tiwari, Y. K. (2004). Results of sun photometer-derived precipitable water content over a tropical Indian station. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43(10), 1452-1459.
- Raudkivi, A. J. (2013). *Hydrology: An advanced introduction to hydrological processes and modelling (Revised ed.)*. Elsevier.
- Ren, D., Wang, Y., Wang, G., & Liu, L. (2023). Rising trends of global Precipitable Water vapor and its correlation with flood frequency. *Geodesy and Geodynamics*, 14(4), 355-367.

- Scherllin-Pirscher, B., Steiner, A. K., Kirchengast, G., Schwärz, M., & Leroy, S. S. (2017). The power of vertical geolocation of atmospheric profiles from GNSS radio occultation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3), 1595-1616.
- Shao, X., Ho, S. P., Jing, X., Zhou, X., Chen, Y., Liu, T. C., . . . Dong, J. (2023). Characterizing the tropospheric water vapor spatial variation and trend using 2007-2018 COSMIC radio occultation and ECMWF reanalysis data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(22), 14187-14218.
- Shao, X., Ho, S. P., Zhang, B., Zhou, X., Kireev, S., Chen, Y., & Cao, C. (2021). Comparison of COSMIC-2 radio occultation retrievals with RS41 and RS92 radiosonde humidity and temperature measurements. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 32, 1015-1032.
- Simmer, C. (1999). Contribution of microwave remote sensing from satellites to studies on the Earth energy budget and the hydrological cycle. *Advances in Space Research*, 24(7), 897-905.
- Srivastava, A., & Kumar, A. (2021). Retrieval of total columnar precipitable Water vapour using radio occultation technique over the Indian region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 219, 105652.
- Steiner, A. K., Hunt, D., Ho, S.-P., Kirchengast, G., Mannucci, A. J., Scherllin-Pirscher, B., . . . Wickert, J. (2013). Quantification of structural uncertainty in climate data records from GPS radio occultation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1469-1484.
- Steiner, A. K., Kirchengast, G., Foelsche, U., Kornblueh, L., Manzini, E., & Bengtsson, L. (2001). GNSS occultation sounding for climate monitoring. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(3), 113-124.
- Syndergaard, S. (1999). *Retrieval analysis and methodologies in atmospheric limb sounding using the GNSS radio occultation technique*. Danish Meteorological Institute, Doctoral Thesis, Copenhagen.
- Şişman, Y., & Elevation, B. (2018). En Küçük Kareler Kollokasyon ve Kriging Yöntemleri ile Lokal Jeoid Belirleme. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 106-118.
- Tarım ve Orman Bakanlığı (TOB). (2021). Su, Orman ve Meteoroloji Grubu Çalışma Raporu, 1.Su Şurası: <https://susurasi.tarimorman.gov.tr/Sayfa/Detay/1497> adresinden alındı
- Tournigand, P.-Y., Cigala, V., Prata, A. J., Steiner, A. K., Kirchengast, G., Brenot, H., . . . Biondi, R. (2020). The 2015 Calbuco Volcanic Cloud Detection Using GNSS Radio Occultation and Satellite Lidar. *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, (s. 6834-6837). Waikoloa, HI, USA.
- URL-1. (2024, Nisan 10). Buharlaşıma: <https://www.mgm.gov.tr/arastirma/buharlasma.aspx> adresinden alındı

- URL-10. (2024, Ağustos 15). Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA): <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/integrated-global-radiosonde-archive-igra> adresinden alındı
- URL-11. (2024, Ağustos 15). Microwave radiometer: https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_radiometer adresinden alındı
- URL-12. (2024, Ağustos 17). NOAA Operational GCOM-W1 AMSR-2 Products System: <https://www.ospo.noaa.gov/products/atmosphere/gpds/> adresinden alındı
- URL-13. (2024, Ağustos 20). Microwave Remote Sensing Of Atmospheric Water Parameters: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/1988/10413-microwave-remote-sensing-atmospheric-water-parameters.pdf> adresinden alındı
- URL-14. (2024, Eylül 7). Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: https://en.wikipedia.org/wiki/Moderate_Resolution_Imaging_Spectroradiometer adresinden alındı
- URL-15. (2024, Eylül 7). MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/modis> adresinden alındı
- URL-16. (2024, Eylül 15). Sayısal Hava Tahmini: <https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/ss/sayisalnedir.pdf> adresinden alındı
- URL-17. (2024, Eylül 23). Advancing global NWP through international: <https://www.ecmwf.int/> adresinden alındı
- URL-18. (2024, Mart 1). Calculate distance, bearing and more between: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.htm> adresinden alındı
- URL-2. (2024, Mayıs 1). MGM 2023 Yılı İklim Değerlendirmesi: <https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2023-iklim-raporu.pdf> adresinden alındı
- URL-3. (2024, Mayıs 23). Steamy Relationships: How Atmospheric Water Vapor: <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect/> adresinden alındı
- URL-4. (2024, Haziran 7). Developing Innovative Global Navigation Satellite Systems Observational Techniques for the Earth Science Community: <https://www.cosmic.ucar.edu> adresinden alındı
- URL-5. (2024, Haziran 5). Hava ve Bileşenleri: <https://egethm.csb.gov.tr/hava-ve-bilesenleri-i-96567> adresinden alındı
- URL-6. (2024, Temmuz 1). GNSS Radio Occultation: <https://ggos.org/item/gnss-radio-occultation/> adresinden alındı
- URL-7. (2024, Temmuz 18). Water Vapor in the Climate System: <https://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/espas/pwv/mockler.html?> adresinden alındı

- URL-8. (2024, Ağustos 10). Atmospheric Moisture: <https://geography.name/atmospheric-moisture/> adresinden alındı
- URL-9. (2024, Ağustos 15). Ravinsonde Rasatları: <https://www.mgm.gov.tr/genel/ss.aspx?s=ravinsonde> adresinden alındı
- Vergados, P., Krishnamoorthy, S., Martire, L., Mrak, S., Komjáthy, A., Morton, Y. T., & Vilibić, I. (2023). Prospects for meteotsunami detection in earth's atmosphere using GNSS observations. *GPS solutions*, 27, 169.
- Vryonides, P., & Haralambous, H. (2013). Comparison of COSMIC measurements with the IRI-2007 model over the eastern Mediterranean region. *Journal of Advanced Research*, 4(3), 297–301.
- Wan, N., Lin, X., Pielke Sr, R. A., Zeng, X., & Nelson, A. M. (2024). Global total precipitable water variations and trends over the period 1958–2021. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(9), 2123-2137.
- Wang, B. R., Liu, X. Y., & Wang, J. K. (2013). Assessment of COSMIC radio occultation retrieval product using global radiosonde data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(4), 1073-1083.
- Wang, Y., Li, Y., Wang, G., Yuan, Y., & Geng, H. (2023). Influences of Sudden Stratospheric Warming Events on Tropopause Based on GNSS Radio Occultation Data. *Atmosphere*, 14(10), 1553.
- Wee, T.-K., Anthes, R. A., Hunt, D. C., Schreiner, W. S., & Kuo, Y.-H. (2022). Atmospheric GNSS RO 1D-Var in Use at UCAR: Description and Validation. *Remote Sensing*, 14(21), 5614.
- Weiss, J., Anthes, R., Braun, J., Kuo, B., Schreiner, B., & Sokolovskiy, S. (2016). GNSS radio occultation science and applications. UCAR COSMIC Program, IGS Workshop.
- Weiss, J.-P., Schreiner, W. S., Braun, J. J., Xia-Serafino, W., & Huang, C.-Y. (2022). COSMIC-2 Mission Summary at Three Years in Orbit. *Atmosphere*, 13(9), 1409.
- Weng, F. (2007). Advances in radiative transfer modeling in support of satellite data assimilation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(11), 3799-3807.
- Wickert, J. (2004). *Comparison of vertical refractivity and temperature profiles from CHAMP with radiosonde measurements*. Copenhagen: Scientific Report 04-09, Danish Meteorological Institute.
- Wickert, J., Beyerle, G., König, R., Heise, S., Grunwaldt, L., Michalak, G., . . . Schmidt, T. (2005). GPS radio occultation with CHAMP and GRACE: A first look at a new and promising satellite configuration for global atmospheric sounding. *Annales Geophysicae*, 653–658.

- World Meteorological Organization (WMO). (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8, 7th ed.). Technical Report; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). *WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019)*. WMO-No.
- Xie, F., Wu, D. L., Ao, C. O., Mannucci, A. J., & Kursinski, E. R. (2012). Advances and limitations of atmospheric boundary layer observations with GPS occultation over southeast Pacific Ocean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(2), 903–918.
- Xue, Q., Guan, L., & Shi, X. (2022). One-dimensional variational retrieval of temperature and humidity profiles from the FY4A GIIRS. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39, 471-486.
- Yadav, G., Kala, S., Deep, A., & Purohit, K. D. (2020). Radiosonde: A tool to monitor atmospheric profiles. *Applied Innovative Research*, 2, 103-106.
- Yassien, A., El-Kutb Mousa, A., Rabah, M., Saber, A., & Zhran, M. (2022). Analysis of spatial and temporal variation of precipitable water vapor using COSMIC radio Occultation observations over Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(3), 751-764.
- Yen, N. L., Chu, C. H., Miao, J. J., Liou, Y. A., & Kuo, Y. H. (2010). Global GNSS Radio Occultation Mission for Meteorology, Ionosphere & Climate. *Aerospace Technologies Advancements* (s. 241-258). içinde IntechOpen.
- Yue, X., Schreiner, W. S., Pedatella, N., Anthes, R. A., Mannucci, A. J., Straus, P. R., & Liu, J.-Y. (2014). Space Weather Observations by GNSS RadioOccultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2. *Space Weather*, 12(11), 616-621.
- Yunck, T. P., Liu, C. H., & Ware, R. (2000). A history of GPS sounding. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11, 1-20.
- Zhang, K., Biadeglne, B., Wu, F., Kuleshov, Y., Rea, A., Hodet, G. D., & Fu, E. (2007). A comparison of atmospheric temperature and moisture profiles derived from GPS radio occultation and radiosone in Australia. 12. Perth, Australia: In Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics.
- Zhang, K., Fu, E., Silcock, D., Wang, Y., & Kuleshov, Y. (2011). An investigation of atmospheric temperature profiles in the Australian region using collocated GPS radio occultation and radiosonde data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(10), 2087-2092.
- Zhang, Q., Ye, J., Zhang, S., & Han, F. (2018b). Precipitable water vapor retrieval and analysis by multiple data sources: Ground-based GNSS, radio occultation, radiosonde, microwave satellite, and NWP reanalysis data. *Journal of Sensors*, 2018, 3428303.

- Zhang, Y., Xu, J., Yang, N., & Lan, P. (2018a). Variability and trends in global precipitable water vapor retrieved from COSMIC radio occultation and radiosonde observations. *Atmosphere*, 9(5), 174.
- Zhao, Q., Zhang, X., Wu, K., Liu, Y., Li, Z., & Shi, Y. (2022). Comprehensive precipitable water vapor retrieval and application platform based on various Water vapor detection techniques. *Remote Sensing*, 14(10), 2507.
- Zhou, Q., Liu, H., Zhang, S., & Deng, X. (2019). Sensitivity analyses of precipitable water vapor retrieval from the ground-based infrared measurements in clear sky conditions. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(4), 044513.
- Zhran, M. (2023). An evaluation of GNSS radio occultation atmospheric profiles from Sentinel-6. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(3), 654-665.
- Zhran, M., & Mousa, A. (2022). Planetary boundary layer height retrieval using GNSS Radio Occultation over Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(2), 551-559.
- Zhran, M., Mousa, A., Rabah, M., & Zeidan, Z. (2019). Utility of GNSS Radio Occultation technique for tropopause height investigation over Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 8(1), 45-54.

ÖZGEÇMİŞ

Seldanur ÇELİK TUNÇER, 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2015 yılında mezun oldu. Aynı yıl, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Anabilim Dalında, tezli yüksek lisans programına başladı. 2018 yılında “IGS Koordinat Zaman Serilerinde Trend ve Mevsimsellik Analizinin Farklı Yöntemlerle İrdelenmesi” başlıklı yüksek lisans tez çalışmasını tamamlayarak mezun oldu. 2017-2019 yılları arasında, 116Y186 numaralı “Bölgesel GNSS Ağı ile Ekstrem Hava Olayları Tahmininin Güçlendirilmesi” başlıklı TÜBİTAK 1001 projesinde bursiyer olarak görev yaptı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Anabilim Dalında doktora programına kabul edildi ve 2019 yılında ise Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Harita ve Kadastro Programında öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2023-2026 yılları arası için desteklenen, “Türkiye Geneline ve Ekstrem Hidrolojik Hava Olaylarına Bağlı Afet Riski Taşıyan Karadeniz Bölgesinde GNSS-Radyo Okültasyon (GNSS-RO) Uydu Tekniği Kullanılarak Yağışa Dönüştürülebilir Su Buharı (PWV) Profillerinin Tahmini ve İzlenmesi” başlıklı 123Y150 numaralı TÜBİTAK 1001 projesinde doktora bursiyeri olarak görev aldı. Yabancı dili İngilizcedir.