

FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS Radyo Okültasyon Tekniği İle Elde Edilen Atmosferik Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Assessment of Atmospheric Parameters Obtained with FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS Radio Occultation Technique

Seldanur Çelik Tunçer^{1*}, Emine Tanır Kayıkcı²

¹Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 19169, Çorum/Türkiye.

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Seldanur Çelik Tunçer
seldanurcelik@hitit.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1489595

Yayın süreci

Geliş tarihi: 24.05.2024
Kabul tarihi: 07.09.2024
Basım tarihi: 26.09.2024

Özet

Küresel Navigasyon Uydu Sistemi - Radyo Okültasyon (GNSS-RO), hava olaylarının tahmin edilmesi ve iklimsel değişimlerin izlenmesi için önemli potansiyele sahip uzay tabanlı bir gözlem tekniğidir. GNSS-RO tekniğinde, yüksek yörüngedeki uydulardan iletilen radyo sinyaller, alçak yörüngedeki uydulara yerleştirilmiş alıcılar tarafından ölçülür. GNSS alıcılarında kaydedilen radyo sinyaller, atmosferik geri kazanım süreçlerine göre işlenerek sıcaklık, basınç, su buharı ve elektron yoğunluğu gibi profiller elde edilir. GNSS-RO tekniği, kalibrasyon gereksinimi olmadan her türlü hava koşulunda çalışabilir. Ayrıca, küresel kapsama alanında yüksek dikey çözünürlükte zengin veriler sağlar. GPS, Galileo ve GLONASS gibi uydulardan sinyal alabilen FORMOSAT-7/COSMIC-2 uyduları, $\pm 45^\circ$ enlem bölgesinde günlük 4000'den fazla yüksek kaliteli RO ölçümü sağlayabilir. 2019 yılında alçak yörüngeye başarıyla fırlatılan bu uydunun ana hedeflerinden biri, alt ve orta troposferde GNSS-RO ölçüm kalitesini artırmak olmuştur. Bu çalışmada, FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO ile elde edilen atmosferik profilleri değerlendirmek ve doğrulamak için radyosonda profillerinden yararlanılmıştır. Karşılaştırmada, 5-25 km arasında değişen irtifalardaki sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırınım profilleri esas alınmıştır. Çalışma sonucunda, RO ve radyosonda profilleri arasında iyi bir uyum gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: GNSS, Radyo okültasyon, COSMIC-2, Radyosonda

Abstract

Global Navigation Satellite System - Radio Occultation (GNSS-RO) is a space-based observation technique with significant potential for predicting weather events and monitoring climatic changes. In GNSS-RO technique, radio signals transmitted from high-orbit satellites are measured by receivers placed on low-orbit satellites. The radio signals recorded in GNSS receivers are processed according to atmospheric retrieval processes to obtain profiles such as temperature, pressure, water vapor, and electron density. The GNSS-RO technique can operate in all weather conditions without the need for calibration and provides rich data with high vertical resolution on a global scale. FORMOSAT-7/COSMIC-2 satellites, which can receive signals from satellites such as GPS, Galileo, and GLONASS, can provide over 4000 high-quality RO measurements daily in the $\pm 45^\circ$ latitude region. Launched into low Earth orbit in 2019, one of the primary goals of this satellite has been to improve GNSS-RO measurement quality in the lower and middle troposphere. In this study, radiosonde profiles were utilized to evaluate and validate atmospheric profiles obtained with FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO. The comparison focused on temperature, water vapor pressure, specific humidity, and refraction profiles at altitudes ranging from 5-25 km. The study found a good agreement between RO and radiosonde profiles.

Keywords: GNSS, Radio occultation, COSMIC-2, Radiosonde

1. Giriş

Hava tahminleri ve iklimsel analizler için sıcaklık, basınç, nem, rüzgar gibi atmosferik gözlemlere gereksinim duyulmaktadır (Fu, 2011; Zhang vd., 2011). Radyosonda balonlarındaki sensörler, atmosferik gözlemlerin toplanmasında uzun süre kullanılan yer tabanlı etkili bir geleneksel yöntemdir. Dünya çapında 1500'den fazla radyosonda istasyonu (Radiosonde Station, RS) bulunmaktadır. Her istasyondan 00:00 Evrensel Zaman (Coordinated Universal Time, UTC) ve 12:00 UTC olmak üzere günde iki kez fırlatılan radyosonda balonları, yeryüzünden yaklaşık 20-30 km yüksekliğe kadar dikey atmosferik profil verileri sağlamaktadır. Sayısal Hava Tahmini (Numerical Weather Prediction, NWP) modellerine girdi sağlayan bu yöntem, üst atmosfer gözlem sisteminin temel bir parçasıdır. Ancak, sınırlı bir kapsama alanına ve düşük bir konumsal-zamansal çözünürlüğe sahiptir. İstasyonların çoğu kuzey yarımkürede bulunmakla birlikte okyanus, çöl ve dağlık bölgelerde sayıları oldukça azdır. Dünyaya homojen şekilde dağılmamış radyosonda istasyonlarının bazı bölgelerde sınırlı sayıda olması, sensörlerin performans ve hassasiyetlerinin hava koşullarından etkilenebilmesi, bakım maliyetlerinin yüksek olması meteorolojik alandaki bilimsel çalışmaları etkilemektedir (Syndergaard, 1999; Fu, 2011; Zhang vd., 2011).

Uydu çağı ile atmosferin uzaktan algılanması, atmosfer bilimleri ve hava durumu tahminleri için daha iyi bir küresel kapsama alanı sağlamıştır. Uydu uzaktan algılama teknolojileri genel olarak daha yüksek yatay çözünürlük ve yer tabanlı yöntemlere kıyasla daha iyi bir küresel kapsama alanı sağlamasına rağmen en büyük dezavantajı düşük düzey çözünürlüktür (Syndergaard, 1999; Fu, 2011; Li vd., 2015). Son yıllarda geliştirilen Küresel Navigasyon Uydu Sistemi-Radyo Okültasyon (Global Navigation Satellite System - Radio Occultation, GNSS-RO) tekniği, yüksek düzey çözünürlükte ölçümler sağlayarak bu husustaki eksiliği tamamlamıştır. Ayrıca, GNSS-RO tekniği; kalibrasyon gerektirmez, her türlü hava koşulunda çalışabilir, diğer uzaktan algılama standartlarına göre nispeten ucuzdur (Jin, 2012; Awange, 2018). GNSS-RO tekniğinin sağladığı birçok fayda nedeniyle Meteoroloji Ofisi (Meteorological Office, Met Office), Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), Ulusal Çevresel Tahmin Merkezleri (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) gibi birçok NWP merkezi RO verilerini asimilasyon sistemlerine dahil etmeye başlamış ve hava tahminleri üzerinde olumlu etkiler gözlemlemiştir (Healy vd., 2005; Kwon vd., 2014).

GNSS-RO tekniği, Yakın Yörünge (Low Earth Orbit, LEO) uyduları üzerine yerleştirilen alıcıların, GNSS uydularından gelen sinyalleri uzaktan algılama tekniklerine göre ölçerek ve analiz ederek sıcaklık, basınç ve su buharı gibi atmosferik parametrelerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Meteoroloji, İyonosfer ve İklim İçin Gözlem Sistemi Takımı Yıldız-1 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate-1, COSMIC-1)/Formosa Uydusu-3 (Formosa Satellite-3, Formosat-3), Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS)-RO teknolojisini neredeyse gerçek zamanlı olarak sağlayan ilk operasyonel LEO uydusudur. Zorlu Mini Uydu Yüklü (CHALLENGING Minisatellite Payload, CHAMP), Yerçekimi İyileştirme ve İklim Deneyi (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE), Meteorolojik Operasyonel Uydusu (Meteorological Operational Satellite, METOP), Kore Çok Amaçlı Uydu-5 (Korea Multi-Purpose Satellite-5, KOMPSAT-5), Bilimsel Uygulamalar Uydusu-C (Satellite de Aplicaciones Cientificas-C, SAC-C), İletişim/Navigasyon Kesintisi Tahmin Sistemi (Communications/Navigation Outage Forecasting System, C/NOFS), Sentinel gibi çeşitli LEO uyduları da RO gözlemleri sağlamak amacıyla piyasaya sürülmüştür (Beyerle vd., 2005; Anthes vd., 2008; Wickert vd., 2009; Choi vd., 2010; Vryonides & Haralambous, 2013; Yue vd., 2014). Yeni nesil bir LEO uydusu olan ve 2019 yılında göreve başlayan COSMIC-2/ FORMOSAT-7; GPS, GALILEO ve GLONASS'dan gelen sinyalleri alarak yeryüzünden yaklaşık 500-700 km uzaklıkta, 24° eğim açısı ile orta ve düşük enlem bölgeleri için daha fazla sayıda RO gözlem verisi sağlamaktadır (Fong vd., 2012; Cook vd., 2013; Yue vd., 2014; Schreiner vd., 2020).

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. Nitekim, literatürde çeşitli LEO uydu misyonları tarafından gözlenen RO atmosferik profillerin, radyosonda profilleri ile karşılaştırıldığı çeşitli çalışmalar mevcuttur. Rossiter (2003), RO sıcaklık, su buharı basıncı ve kırımım parametrelerinin doğruluğunu geleneksel radyosonda ölçümleriyle karşılaştırarak değerlendirmiştir. Wickert (2004), CHAMP RO ölçümlerini radyosonda ağından elde edilen verilerle karşılaştırmıştır. Kuo vd. (2005), CHAMP RO kırılma profillerini, her biri farklı tipte bir radyosonda kullanan beş coğrafi alandaki radyosonda profillerinden hesaplanan değerler ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırma, RO sondajlarının en doğru olduğu 5-25 km irtifalar arasında yapılmıştır. Zhang vd. (2007), CHAMP uydu misyonundan elde edilen sıcaklık ve su buharı profillerini, Batı Avustralya'daki radyosonda sondajlarından hesaplanan verilerle karşılaştırmıştır. Fu vd. (2009), Avustralya ve Antarktika bölgesinde radyosonda gözlemlerini kullanarak COSMIC atmosferik ürünlerini değerlendiren istatistiksel çalışmalar yapmıştır. Zhang vd. (2011), Avustralya bölgesi için COSMIC ve CHAMP RO sıcaklık profillerini, radyosonda profilleri ile karşılaştırmıştır. Wang vd. (2013), COSMIC RO profillerini radyosonda profilleri karşılaştırmıştır.

Norman vd. (2014), Avustralya bölgesi için FORMOSAT-3/COSMIC-1 RO sıcaklık ve basınç profillerini, radyosonda profilleri ile karşılaştırmıştır. Li vd. (2020), Wegener İklim ve Küresel Değişim Merkezi (Wegener Center, WEGC), Radyo Okültasyon Meteoroloji Uydu Uygulama Tesisi (Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facility, ROM SAF) ve Atmosfer Araştırmaları için Üniversite Kurumu (University Corporation for Atmospheric Research, UCAR) RO veri işleme merkezlerinden alınan sıcaklık ve özgül nem profillerini farklı enlemlerde seçilmiş radyosonda profilleri ile karşılaştırarak değerlendirmiştir. Shao vd. (2021), COSMIC-2 RO nem ve sıcaklık verilerini radyosonda verileri ile karşılaştırmıştır. Ahmed vd. (2022), Mısır bölgesinde COSMIC, GRACE, C/NOFS uydu misyonlarından elde edilen RO atmosferik profillerini; radyosonda basınç, sıcaklık, su buharı basıncı ve kırınım profilleri ile karşılaştırmıştır. RO ve radyosonda verilerinin analizinde 3 ila 25 km arasında değişen irtifalara sahip karşılaştırmalı profiller kullanmıştır. Literatürde yer alan bu çalışmalarda, RO ve radyosonda atmosferik profillerin uyumlu olduğu belirlenmiştir.

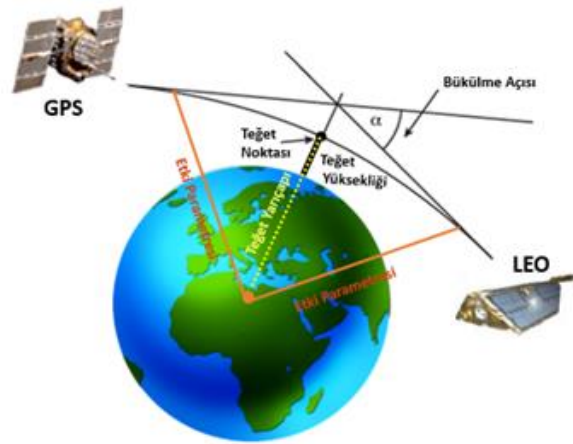
Bu çalışmada, Türkiye ve Avrupa bölgesinden GNSS-RO tekniğinden elde edilen profilleri test etmek ve doğrulamak için radyosonda gözlem profillerinden yararlanılmıştır. Çalışma için İtalya'dan 37.92° kuzey enlemi ve 12.50° doğu boylamındaki Trapani/Birgi (16429) istasyonu ve Türkiye'den 38.69° kuzey enlemi ve 35.50° doğu boylamındaki Kayseri (17196) ve 41.28° kuzey enlemi ve 36.33° doğu boylamındaki Samsun (17030) RS seçilmiştir. 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. COSMIC-2 RO profilleri, 5-25 km arasında değişen irtifalardaki radyosonda sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırınım profilleri ile karşılaştırılmıştır.

2. Yöntem

2.1 GNSS Radyo Okültasyon Tekniği

GNSS-RO, atmosferik profil oluşturma ve meteorolojik uygulamalar için önemli bilgiler sağlayan uzay tabanlı bir Dünya gözlem tekniğidir. GNSS-RO tekniğinde, GNSS uydularından iletilen radyo sinyalleri ölçmek için üzerinde GNSS alıcısı bulunan LEO uydularına gereksinim duyulur. Yüksek yörüngedeki GNSS uydularından iletilen radyo sinyaller LEO uydu alıcılarına ulaşmak için atmosferin farklı katmanlarından geçer. Sinyaller atmosferden geçerken elektron yoğunluğu, sıcaklık, basınç, su buharı gibi içerikler tarafından etkilenir ve gecikerek farklı derecede bükülür (Stupar, 2015; Awange, 2018).

Bir GNSS-RO olayı geometrisinde, uydu cihaz görüş hattının dünya yüzeyine en yakın noktasına teğet nokta ve bu noktanın Dünya jeoidi üzerindeki yüksekliğine teğet yükseklik denir. Teğet yarıçapı, merkezden teğet noktasına olan radyal mesafedir. Bununla birlikte, ışın asimptotları arasında kalan açı, bükülme açısıdır. Dünya'nın merkezi ile GNSS veya LEO uydusundaki ışın asimptotu arasındaki dikey mesafe etki parametresi olarak tanımlanır (Bormann & Healy, 2005; Sioris vd., 2014) (Şekil 1).



Şekil 1. GNSS-RO geometrisi

Atmosferik RO geri kazanım işleminin temel adımları; hassas yörünge belirleme, fazla faz gecikme tahmini, bükülme açısının tahmini ve kırınım bilgilerinden kuru ve nemli hava bilgilerinin elde edilmesini kapsar (Kursinski, 1997). GNSS uydularından iletilen sinyaller atmosferde bükülmeye maruz kaldığı için sinyallerin frekansları ve fazında değişimler meydana gelir. LEO uydularında bulunan alıcılar, sinyallerin fazında ve zamanında meydana gelen gecikmeleri de ölçerler. Alıcılardan gelen faz verileri, GNSS ve LEO uydularının yörünge bilgileri kullanılarak bükülme açıları belirlenir.

Bükülme açısına Abel dönüşümü uygulandığında atmosferik kırılma profili elde edilir. Bükülme açısı ve kırılma indisi arasındaki ilişki,

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

eşitliğindeki gibi ifade edilebilir. Burada α ışının bükülme açısı, a etki parametresi ve r_t ışının teğet noktasının yarıçapıdır. Eşitlik (1), $x=nr$, değişken değişimi ile

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

eşitliğindeki gibi yeniden yazılabilir. Bükülme açısına ters Abel dönüşümü uygulanarak kırılma profili,

$$n(r) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_x^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \right] \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Bu eşitlikler küresel olarak simetrik bir atmosfer varsayımı altında formüle edilir (Lewis, 2008; Wee, 2018). Kırılma ve kırılma indisi arasındaki ilişki,

$$N = (1 - n)10^6 \quad (4)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada; N , kırılma ve n , kırılma indisidir. Nötr atmosferde N ,

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 * 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (5)$$

eşitliğindeki gibi ifade edilir. P , toplam atmosfer basıncı; T , sıcaklık; e , kısmi su buharı basıncıdır. Bu eşitlikte, ilk terim kuru atmosferi, ikinci terim ise su buharı katkısını temsil eder. RO sondajları için genellikle atmosferik saçılma ihmal edilebilir. İyonosferik etkilerin ise bükülme açılarının iyonosferik düzeltmesi gibi ön işleme sırasında ortadan kaldırıldığı varsayılır (Lewis, 2008; Wee, 2018).

2.2 Radyosonda Tekniği

Radyosonda, bir balon yardımıyla atmosferde yükselen ve sensörler yardımıyla yeryüzünden yaklaşık 20-30 km yüksekliğe kadar dikey çözünürlükte basınç, sıcaklık ve nem bilgilerini eş zamanlı ölçen cihazdır. Radyosonda istasyonlarından 00:00 UTC ve 12:00 UTC olmak üzere günde iki kez radyosonda balonu fırlatır ve veri temini sağlar. Radyosonda balonları doğrudan atmosferde yükselerek ölçüm yapar (Yadav vd., 2020). Atmosferin çeşitli basınç düzeylerinde ölçülen veriler, alıcı yer istasyonlarına gönderilir ve bilgisayarlar tarafından işlenerek meteorolojik parametrelere dönüştürülür (Potter & Colman, 2003). Radyosonda sistemi, su buharının neredeyse tamamını içeren troposfer katmanının verilerini toplamak için kullanılan yüksek hassasiyetli bir yöntemdir.

2.3 Atmosferik Parametrelerin Değerlendirilmesi

GNSS-RO tekniği ve radyosonda tekniği atmosferik profilleri, Mutlak Ortalama Hata (Mean Absolute Error, MAE) ve Karesel Ortalama Hata (Mean Squared Error, MSE) ile değerlendirilmiştir. MAE ve MSE değerleri,

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|x_{GNSS-RO,i} - x_{RS,i}|)}{n} \quad (6)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{GNSS-RO,i} - x_{RS,i})^2}{n}} \quad (7)$$

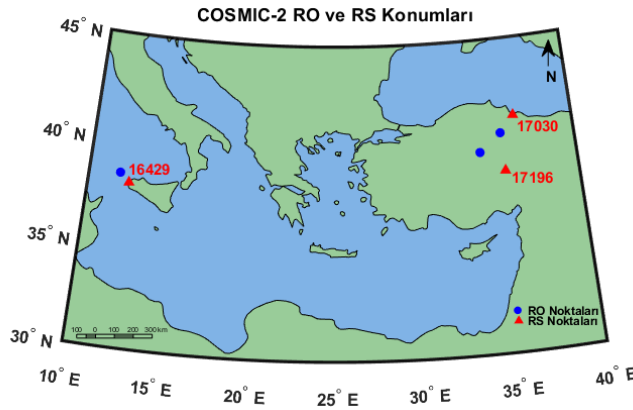
eşitlikleri ile hesaplanmıştır (Zhang vd., 2018). Bu eşitliklerde, $x_{GNSS-RO}$, GNSS-RO atmosferik parametre verileri; x_{RS} , radyosonda atmosferik parametre verileri ve n, ölçü sayısını ifade etmektedir. MAE ve MSE, GNSS-RO verilerinin radyosonda verileri ile ne kadar uyumlu olduğunu değerlendirmek için hesaplanmıştır. MAE ve MSE değerlerinin düşük düzeyde elde edilmesi RO ve radyosonda verileri arasında uyumun iyi olduğunu, her iki yöntemin de doğru ve güvenilir ölçü sağladığını ortaya koymaktadır.

3. Yapılan Çalışmalar

3.1 Çalışma Alanı ve Veri

Çalışma bölgesi olarak Trapani/Birgi, Kayseri, Samsun radyosonda istasyonları seçilmiştir ve bu istasyonların yakınlarında meydana gelen COSMIC-2 RO olayları tespit edilmiştir. 100 km - 1 saat sınırlandırması için Trapani/Birgi RS, 200 km - 2 saat sınırlandırması için Kayseri RS ve 300 km - 3 saat sınırlandırması için Samsun RS seçilmiştir.

Trapani/Birgi RS için 2019 yılının 353'üncü gününe ait wetPf2_C2E2.2019.353.12.42.G08_0001.0001_nc, Kayseri RS için 291'inci gününe ait wetPf2_C2E3.2019.291.13.41.G31_0001.0001_nc, Samsun RS için 281'inci gününe ait wetPf2_C2E3.2019.281.21.36.G10_0001.0001_nc RO dosyaları kullanılmıştır (Şekil 2, Tablo 1).



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

Tablo 1. 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 1'de 2019 yılının 353'üncü gününde 38.34° Kuzey enlemi ve 11.90° Doğu boylamında gözlenen RO olayı, RS noktasından ~70 km uzaklıktadır. 2019 yılının 291'inci gününde 40.49° Kuzey enlemi ve 35.41° Doğu boylamında gözlenen RO olayı, RS noktasından ~200 km uzaklıktadır. 2019 yılının 281'inci gününde 35.390° Kuzey enlemi ve 12.467° Doğu boylamında gözlenen RO olayı, RS noktasından ~265 km uzaklıktadır.

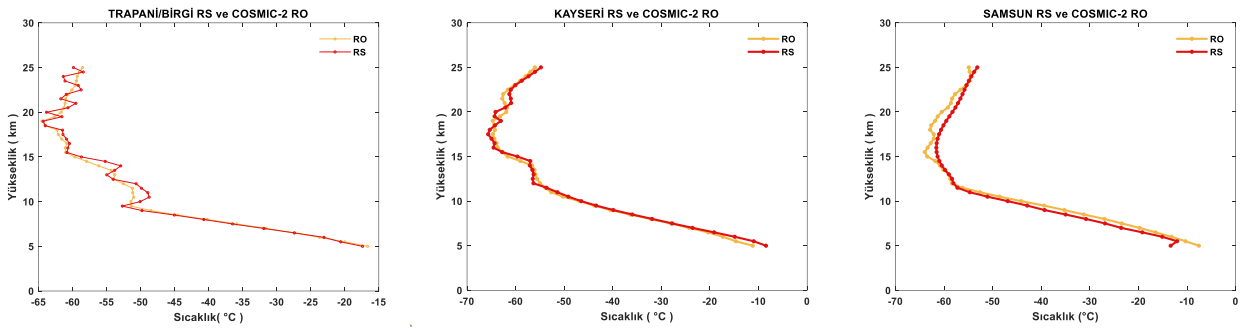
Çalışmada kullanılan COSMIC-2 RO verileri, UCAR COSMIC Program Ofisi tarafından sağlanan wetPrf ıslak profillerdir. Bu veriler için dosyalar netCDF formatında gerçeğe yakın zamanlı olarak işlenmektedir. WetPrf ıslak profilleri; jeopotansiyel yükseklik, sıcaklık, basınç, buhar basıncı, kırılma, özgül nem vb. parametreleri içermektedir. Çalışmada kullanılan radyosonda verileri, Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) tarafından sağlanan Entegre Küresel Radyosonda Arşivi (Integrated Global Radiosonde Archive, IGRA) atmosferik profilleridir. Radyosonda profilleri ise yükseklik, basınç, sıcaklık, çığ sıcaklık verilerini içermektedir.

3.2 FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO ve Radyosonda Atmosferik Profillerinin Karşılaştırılması

Çalışmada kullanılan COSMIC-2 RO profilleri 0-60 km dikey yüksekliğinde ve 50 m dikey örnekleme çözünürlüğündedir. RO 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, COSMIC-2 RO ve radyosonda profillerinin ortak konumlu dikey karşılaştırmasını yapabilmek için veriler üzerinde 500 m aralıklı olacak şekilde spline enterpolasyon yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca, atmosferin yere yakın 10-12 km'sinde önemli meteorolojik olaylar meydana gelmektedir. Bu nedenle, 5-10 km aralığında COSMIC-2 RO ve radyosonda profilleri için MAE ve MSE hesaplanmıştır.

3.2.1 Sıcaklık

Sıcaklık, atmosferin nasıl ısınıp nasıl soğuduğunun anlaşılması için önemli bir parametredir. Atmosferin en alt katmanı olan troposferde sıcaklık, genellikle yükseklikle beraber azalmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Radyosonda ve COSMIC-2 RO sıcaklık profillerinin karşılaştırılması

Şekil 3 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 yaşamaları 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 MAE ve MSE hesaplanmıştır (Tablo 2).

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

İstasyon	Yükseklik	MAE (°C)	MSE (°C)
Trapani/Birgi	5-10 km	0.7162	0.8672
Kayseri	5-10 km	1.1962	1.7323
Samsun	5-10 km	3.3950	3.7313

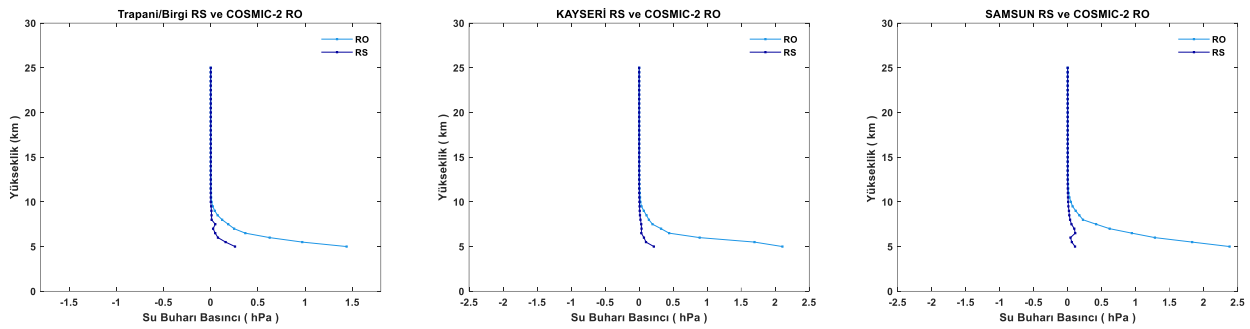
Tablo 2 incelendiğinde, radyosonda ve COSMIC-2 RO sıcaklık profilleri için hesaplanan hata sonuçlarının, 100 km - 1 saat sınırlandırması için seçilen Trapani/Birgi RS'de, Kayseri ve Samsun RS'den daha düşük olduğu gözlenmiştir.

3.2.2 Su Buharı Basıncı

Su buharı basıncı, belirli bir sıcaklık ve nem oranındaki havada bulunan su buharının, atmosfer üzerinde oluşturduğu basıncıdır. Su buharı basıncı, çığ sıcaklığına bağlı olarak

$$e_s = 0.611 * 10^{\left(\frac{7.5 * T_d}{237.30 + T_d}\right)} \quad (8)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada, T_d çığ sıcaklığı, havadaki su buharının yoğuşmaya başlayarak sıvı hale geçtiği sıcaklıktır. Diğer bir ifadeyle, çığ noktası sıcaklığı, havadaki su buharının mevcut kısmi basıncında doygunluğa ulaşmış yoğuşmaya başladığı sıcaklıktır. Troposferde su buharı basıncı genel olarak daha yüksek olma eğilimindedir, ancak bu durum bölgesel iklim, mevsim ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Stratosferde ise su buharı basıncı genellikle daha düşük yoğunluğa sahiptir (Şekil 4).



Şekil 4. Radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profillerinin karşılaştırılması

Şekil 4 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 MAE ve MSE hesaplanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profillerinin 5-10 km arasındaki hataları

İstasyon	Yükseklik	MAE (hpa)	MSE (hpa)
Trapani/Birgi	5-10 km	0.1076	0.4826
Kayseri	5-10 km	0.1718	0.8028
Samsun	5-10 km	0.2065	0.9998

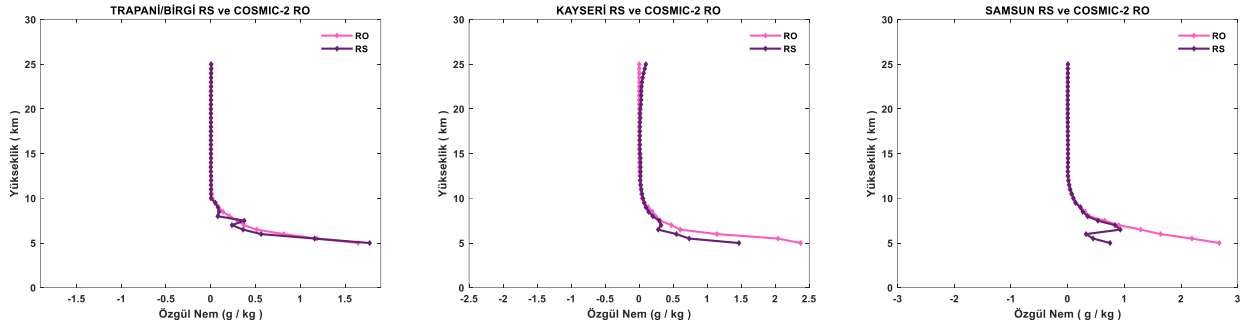
Tablo 3 incelendiğinde, radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profilleri için hesaplanan hata sonuçlarının, 100 km - 1 saat sınırlandırması için seçilen Trapani/Birgi RS'de, Kayseri ve Samsun RS'den daha düşük olduğu gözlenmiştir.

3.2.3 Özgül Nem

Özgül nem; sıcaklık, basınç ve su buharı değişimleriyle birlikte atmosferik koşulları tanımlamak için kullanılan önemli bir parametredir. Bu parametre, birim ağırlıktaki kuru hava içinde bulunan su buharının ağırlığını ifade eder ve kilogram başına düşen gram (g/kg) biriminde ölçülür. Karışım oranı olarak da adlandırılan özgül nem,

$$q = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \cong 0.622 \frac{e}{p} \quad (9)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada, P toplam basınç, P_v ise kısmi su buharı basıncıdır. Su buharı ağırlığının, aynı sıcaklık ve basınçta hava moleküllerinin ağırlığına oranı 0.622 dir. Özgül nemdeki değişiklikler konum ve mevsime bağlı olarak farklılık gösterebilir. Yüksekliğin artmasına bağlı olarak özgül nemde azalır (Şekil 5).



Şekil 5. Radyosonda ve COSMIC-2 RO özgül nem profillerinin karşılaştırılması

Şekil 5 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 MAE ve MSE hesaplanmıştır (Tablo 4).

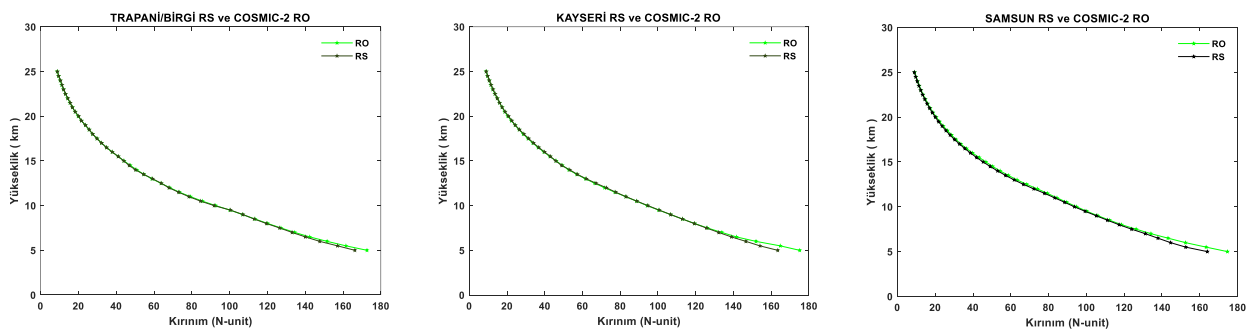
Tablo 4. Radyosonda ve COSMIC-2 RO özgül nem profillerinin 5-10 km arasındaki hataları

İstasyon	Yükseklik	MAE (g/kg)	MSE (g/kg)
Trapani/Birgi	5-10 km	0.0118	0.1163
Kayseri	5-10 km	0.0825	0.5239
Samsun	5-10 km	0.1751	0.8860

Tablo 4 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.

3.2.4 Kırınım

Kırınım, 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 (Şekil 6).



Şekil 6. Radyosonda ve COSMIC-2 RO kırınım profillerinin karşılaştırılması

Şekil 6 incelendiğinde radyosonda ile COSMIC-2 RO kırınım 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 kırınım profilleri arasındaki fark, en az Trapani/Birgi'de, en fazla ise Samsun'da gözlenmiştir. Tüm istasyonlarda, hem radyosonda hem de COSMIC-2 RO gözlemlerinde, kırınım değerlerinin 5 km civarında 160 ile 180 N-unit arasında değiştiği gözlenmiştir. 5-10 km arasında kırınım değerleri arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak yorumlamak için MAE ve MSE hesaplanmıştır (Tablo 5).

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

İstasyon	Yükseklik	MAE (N-unit)	MSE (N-unit)
Trapani/Birgi	5-10 km	0.5833	2.7858
Kayseri	5-10 km	1.0581	5.1377
Samsun	5-10 km	0.9661	5.5690

Tablo 5 incelendiğinde, radyosonda ve COSMIC-2 RO kırınım 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.

4. Sonuç

Hava olaylarının büyük bölümü atmosferin yere yakın 10-12 kilometresinde meydana gelir. Çalışmada kullanılan radyosonda profilleri 0-30 km, COSMIC-2 RO profilleri ise 0-60 km dikey yükseklikte temin edilmiştir. Atmosferik profiller 5 km altında ters Abel dönüşümü işleminin çok yollu sinyal ve izleme problemlerine bağlı olarak etkilenmektedir. Bu nedenle daha hassas analiz yapabilmek için çalışmada 5-25 km arası dikey atmosferde radyosonda ve COSMIC-2 RO profilleri 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, kırınım profillerinde 7 km üzerinde genellikle iyi bir uyum gözlenmiştir. 5-10 km arasında radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basınçları arasında genel olarak farkların fazla olmasının sebeplerinden biri radyosonda nem ölçülerinin düşük sıcaklıklardan etkilenmesi olabilir. Radyosondalar, suyun donma noktasının altındaki sıcaklıklarda bulutların arasından uçtuğunda, nem sensörlerinde buzlanma en büyük sorun olarak ortaya çıkabilir. Ayrıca, alt troposferde atmosferik yansıma ve çok yollu etkilerden kaynaklanan GPS problemleri, radyosonda ve COSMIC-2 RO su buharı basıncı profilleri arasındaki farkların meydana gelmesine sebep gösterilebilir. Radyosonda ve COSMIC-2 RO kırınım profilleri arasındaki fark, COSMIC-2 LEO uydu alıcılarındaki sinyal izleme hataları, çok yollu yayılmadan kaynaklı olabilir.

Konumsal ve zamansal olarak birbirine en yakın mesafede ve zamanda bulunan ve dolayısıyla en iyi karşılaşma beklenen Trapani/Birgi RS için Kayseri ve Samsun RS’den daha hassas sonuç elde edilmiştir. Trapani/Birgi RS için elde edilen MAE değerleri sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırınım içi sırasıyla 0.7162 °C, 0.1076 hPa, 0.0118 g/kg ve 0.5833 N-unit düzeyindedir. MSE değerleri ise sıcaklık, su buharı basıncı, özgül nem ve kırınım içi sırasıyla 0.8672 °C, 0.4826 hPa, 0.1163 g/kg ve 2.7858 N-unit düzeyindedir.

Radyosonda ve COSMIC-2 RO atmosferik profil farklılıklarının temel nedeni gözlem yöntemleridir. RO tekniğinde sıcaklık, basınç gibi parametreler yeryüzüne yakın yörüngede hareket eden COSMIC-2 uydusundan sağlanırken, radyosonda tekniğinde balon ile yükselen cihazdan sağlanmaktadır. Bu durumda; uydu, alıcı veya sensör özellikleri oldukça önemlidir. Radyosonda gözlemlerinde ise veri kalitesi cihazda kullanılan sensör tipine bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. Günümüzde dünya çapında birçok farklı sensör türü kullanılmaktadır. Bu sensörlerin kendine özgü bilinen ve bilinmeyen hataları da mevcuttur. Ayrıca, farklı konumlardaki sensör tiplerinin zamanla değişmesi verilerde gerçek olmayan eğilimlerin veya sıçramaların gözlenmesine yol açabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK-ÇAYDAG tarafından desteklenen 123Y150 numaralı, “Türkiye Genelinde 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 proje kapsamında yapılmıştır. Çalışmada kullanılan COSMIC-2 RO ve radyosonda verileri sırasıyla <https://data.cosmic.ucar.edu/> ve <https://ruc.noaa.gov/raobs/> web adreslerinden ücretsiz olarak temin edilmiştir.

Kaynaklar

- Ahmed, I. F., Abd El-Fatah, M. A., Mousa, A. E. K., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.02.006>
- Anthes, R. A., Bernhardt, P. A., Chen, Y., Cucurull, L., Dymond, K. F., Ector, D., & Zeng, Z. (2008). The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 313-334. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-313>

- Awange, J. (2018). *GNSS environmental sensing*. Springer International Publishers.
- 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), Article L13806. <https://doi.org/10.1029/2005GL023109>
- Bormann, N., & Healy, S. B. (2005). New observations in the ECMWF assimilation system: Satellite limb measurements. *ECMWF Newsletter*, 105, 13-17.
- Choi, M. S., Lee, W. K., Cho, S. K., & Park, J. U. (2010). Operation of the Radio Occultation Mission in KOMPSAT-5. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 27(4), 345-352. <https://doi.org/10.5140/JASS.2010.27.4.345>
- Cook, K., Fong, C. J., Wenkel, M. J., Wilczynski, P., Yen, N., & Chang, G. S. (2013, March 2-9). FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS radio occultation constellation mission for global weather Monitoring [Conference presentation]. 2013 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA. <https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6497317>
- Fong, C. J., Chu, V., Yen, N. L., Ling, J., Liu, J. Y., & Chang, G. S. (2012, March 28-April 3). FORMOSAT-7/COSMIC-2 radio occultation mission: From research to operations [Conference presentation]. International Radio Occultation Working Group (IROWG) 2nd Workshop, Estes Park, CO, USA.
- Fu, E. J., Zhang, K. F., 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. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.162>
- Fu, E. (2011). *An investigation of GNSS radio occultation atmospheric sounding technique for Australian meteorology* [Doctoral thesis, RMIT University]. <https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/>
- Healy, S. B., Jupp, A. M., & Marquardt, C. (2005). Forecast impact experiment with GPS radio occultation measurements. *Geophysical Research Letters*, 32(3), Article L03804. <https://doi.org/10.1029/2004GL020806>
- Jin, S. Ed. (2012). *Global navigation satellite systems: signal, theory and applications*. BoD–Books on Demand.
- 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), Article L05817. <https://doi.org/10.1029/2004GL021443>
- Kursinski, E. R. (1997). *The GPS radio occultation concept: Theoretical performance and initial results* [Doctoral thesis, California Institute of Technology]. <https://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:01282013-095417825>
- Kwon, H., Kang, J. S., Jo, Y., & Kang, J. H. (2014). Implementation of a GPS-RO data processing system for the KIAPS-LETKF data assimilation system. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3), 1259–1273. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1259-2015>
- Lewis, H. (2008). *Abel integral calculations in ROPP* (GRAS SAF Report 07). Met Office. https://rom-saf.eumetsat.int/general-documents/gsr/gsr_07.pdf
- Li, X., Dick, G., Lu, C., Ge, M., Nilsson, T., Ning, T., & Schuh, H. (2015). Multi-GNSS meteorology: real-time retrieving of atmospheric water vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS, and GPS observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(12), 6385-6393. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2438395>
- 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), Article 2717. <https://doi.org/10.3390/rs12172717>
- Norman, R., Le Marshall, J., Zhang, K., Wang, C. S., Carter, B. A., Rohm, W., Manning, T., Gordon, S., & Li, Y. (2014). Comparing GPS radio occultation observations with radiosonde measurements in the Australian region. In C. Rizos & P. Willis (Eds.), *Earth on the edge: Science for a sustainable planet* (Vol. 139, pp. 51–57). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3_7
- Potter, T. D., & Colman, B. R. (2003). Handbook of weather, climate, and water: dynamics, climate, physical meteorology, weather systems, and measurements. *John Wiley and Sons*.
- Rossiter, D. (2003). *Comparison between GPS radio occultation and radiosonde sounding data*. OpenSky. <http://dx.doi.org/10.5065/vrwy-w970>
- Schreiner, W. S., Weiss, J. P., Anthes, R. A., Braun, J., Chu, V., Fong, J., & Zeng, Z. (2020). COSMIC-2 radio occultation constellation: First results. *Geophysical Research Letters*, 47(4), Article e2019GL086841. <https://doi.org/10.1029/2019GL086841>
- Shao, X., Ho, S. P., Zhang, B., Zhou, X. S., Kireev, S., Chen, Y., & Cao, C. (2021). Comparison of COSMIC-2 radio occultation retrieval products with Vaisala RS41 and RS92 radiosonde water vapor and upper-air temperature measurements. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 32(6), 1015-1032.
- Sioris, C., Piekutowski, T., Nilsson, C., Degenstein, D., Murtagh, D., Solheim, B., von Schéele, F., McLinden, C., Rochon, Y. J., Deblonde, G., Aparicio, J. M., & Adamovic, M. (2014, September 29 – October 3). *The atmospheric limb sounding satellite (ALISS)* [Congress presentation]. 65th International Astronautical Congress, Toronto, Canada.
- Stupar, D. I. (2015). *QB50 GNSS radio occultation* [Master thesis, International Space University]. https://isulibrary.isunet.edu/doc_num.php?explnum_id=1128

- Syndergaard, S. (1999). *Retrieval analysis and methodologies in atmospheric limb sounding using the GNSS radio occultation technique* (Scientific Report No. 99-6). Danish Meteorological Institute. <https://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/SR/sr99-6.pdf>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2012.09.006>
- 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. <https://doi.org/10.5194/amt-6-1073-2013>
- Wee, T. K. (2018). A variational regularization of Abel transform for GPS radio occultation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(4), 1947-1969. <https://doi.org/10.5194/amt-11-1947-2018>
- Wickert, J. (2004). *Comparison of vertical refractivity and temperature profiles from CHAMP with radiosonde measurements* (Scientific Report No. 04-9). Danish Meteorological Institute. <https://d-nb.info/974103632/34>
- Wickert, J., Schmidt, T., Michalak, G., Heise, S., Arras, C., Beyerle, G., Falck, C., König, R., Pingel, D., & Rothacher, M. (2009). GPS radio occultation with CHAMP, GRACE-A, SAC-C, TerraSAR-X, and FORMOSAT-3/COSMIC: Brief review of results from GFZ. In A. Steiner, B. Pirscher, U. Foelsche, & G. Kirchengast (Eds.), *New horizons in occultation research: Studies in atmosphere and climate* (pp. 3-15). Springer.
- Yadav, G., Kalak, S., Deep, A., & Purohit, K. D. (2020). Radiosonde: A tool to monitor atmospheric profiles. *Applied Innovative Research*, 2, 103-106.
- 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 radio occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2. *Space Weather*, 12(11), 616-621. <https://doi.org/10.1002/2014SW001133>
- Zhang, K., Biadegigne, B., Wu, F., Kuleshov, Y., Rea, A., Hodet, G., & Fu, E. (2007). A comparison of atmospheric temperature and moisture profiles derived from GPS radio occultation and radiosonde in Australia. *IEICE Technical Report*, 107(2), 7-12.
- 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. <https://doi.org/10.5194/amt-4-2087-2011>
- Zhang, Q., Ye, J., Zhang, S., & Han, F. (2018). 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(1), Article 3428303. <https://doi.org/10.1155/2018/3428303>