

Analysis of Tropospheric Precipitable Water Vapor Variations Using GNSS Radio Occultation Data and Radiosonde Observations (Case Study: Iran)

Tayfehrostami, A.¹  | Amerian, Y.¹  

1. Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: amerian@kntu.ac.ir

(Received: 1 June 2025, Revised: 20 July 2025, Accepted: 29 July 2025, Published online: 20 Sep 2025)

Summary

This study investigates the variations of precipitable water vapor (PWV) in Iran using data from the COSMIC satellite mission's radio occultation (RO) events and radiosonde observations over the period 2007–2019. PWV plays a crucial role in atmospheric energy transfer, the water cycle, and climate variability, making its accurate monitoring essential for meteorological and climatic studies. Currently, PWV is measured through ground-based systems like radiosondes, sun photometers, and microwave radiometers, as well as space-based methods such as GNSS RO, MODIS, and AIRS. While radiosondes provide reliable reference data due to their high accuracy, they suffer from limitations such as sparse spatial coverage and low temporal resolution. In contrast, space-based techniques like COSMIC offer a global coverage and high vertical resolution without being affected by clouds or precipitation, making them particularly valuable in regions with limited ground-based infrastructure. This study utilized 2,398 COSMIC RO events within a 150-kilometer radius of 12 radiosonde stations distributed across Iran, spanning latitudes of 24°N to 41°N and longitudes of 43°E to 64°E. Radiosonde data were preprocessed to remove outliers based on predefined criteria, such as excessive altitude differences between consecutive pressure levels or insufficient vertical layers. PWV values were calculated from both datasets using numerical integration of atmospheric parameters, and statistical metrics like RMSE and MAE were employed to evaluate the agreement between the two sources.

Results indicate that COSMIC-derived PWV generally follows similar trends to radiosonde measurements, but the level of agreement varies across stations. Southern stations like Ahwaz and Bandar Abbas, characterized by humid climates, exhibited higher PWV values and greater discrepancies compared to northern and central stations. The RMSE values ranged from 4.69 mm (Kermanshah) to 7.92 mm (Ahwaz), with an overall mean RMSE of 5.65 mm. Similarly, MAE values varied between 3.72 mm (Kermanshah) and 6.30 mm (Ahwaz), yielding an average MAE of 4.48 mm. Correlation analysis revealed positive relationships between the two datasets, but regression slopes were consistently below 1, indicating that radiosonde measurements tend to underestimate PWV at higher values and overestimate it at lower values compared to COSMIC. The intercepts of the regression equations were positive across all stations, further confirming this trend. Spatially, southern stations demonstrated higher errors, likely due to the complex moisture patterns and high humidity levels in these regions. Despite these discrepancies, the findings suggest that COSMIC-derived PWV can serve as a reliable alternative or supplement to radiosonde measurements, especially in regions lacking sufficient ground-based observational networks. This research highlights the potential of COSMIC data to enhance numerical weather prediction (NWP) and climate studies in underserved areas, while also emphasizing the need for further investigation into the factors influencing the accuracy of COSMIC PWV retrievals under varying atmospheric conditions. Future studies should be focused on improving retrieval algorithms and integrating multi-source data to refine PWV estimation accuracy, particularly in challenging environments like Iran. This work provides a foundation for advancing atmospheric research and operational meteorology in regions with limited access to traditional ground-based data.

Keywords: Precipitable Water Vapor, COSMIC, Radiosonde, GNSS Radio Occultation, Space Geodesy, Earth Atmosphere.

Cite this article: Tayfehrostami, A., & Amerian, Y. (2025). Analysis of Tropospheric Precipitable Water Vapor Variations Using GNSS Radio Occultation Data and Radiosonde Observations (Case Study: Iran). *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 499-516. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.396147.1007694>

E-mail: (1) a.tayfehrostami@email.kntu.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.396147.1007694>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تحلیل تغییرات بخار آب بارش شو و ردسپهری با استفاده از داده‌های اختفای رادیویی سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی و مشاهدات رادیوسوند (مطالعه موردی: ایران)

آرش طایفه رستمی^۱ | یزدان عامریان^۱ ✉

۱. گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: amerian@kntu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۳/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۲۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۵/۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۶/۲۹)

چکیده

این مطالعه به بررسی تغییرات بخار آب بارش شو (PWV) در مناطق مختلف ایران با استفاده از داده‌های اختفای رادیویی سامانه COSMIC و مشاهدات رادیوسوند طی بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۹ می‌پردازد. هدف اصلی پژوهش، ارزیابی دقت مقادیر PWV حاصل از COSMIC در مقایسه با داده‌های مرجع رادیوسوند و تعیین میزان خطا در ایستگاه‌های مختلف است. در این راستا، از ۲۳۹۸ رخداد COSMIC در شعاع ۱۵۰ کیلومتری ۱۲ ایستگاه رادیوسوند استفاده شده است. نتایج نشان داد که مقادیر PWV حاصل از COSMIC الگوهای تغییرات مشابهی با داده‌های رادیوسوند دنبال می‌کنند، اما میزان انطباق در مناطق مختلف متفاوت است. میانگین خطای مطلق (MAE)، متوسط ریشه‌میانگین مربعات (RMSE)، و بایاس به ترتیب حدود ۴،۴۸، ۵،۶۵ و ۳،۴۴ میلی‌متر محاسبه شدند. ایستگاه اهواز با RMSE برابر با ۷،۹۲ میلی‌متر بیشترین خطا و ایستگاه کرمانشاه با RMSE برابر با ۴،۶۹ میلی‌متر کمترین خطا را نشان دادند. تحلیل همبستگی نشان داد که شیب خط رگرسیون در اکثر ایستگاه‌ها کمتر از ۱ است، که بیانگر این است که مقادیر PWV حاصل از رادیوسوند در مقادیر بالا کمتر از COSMIC است. علاوه بر این، عرض از مبدأ مثبت در تمام معادلات نشان داد که در مقادیر پایین PWV، اندازه‌گیری‌های رادیوسوند تمایل به بیشتر بودن نسبت به مقادیر COSMIC دارند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، داده‌های COSMIC قابلیت ارائه برآوردی از PWV در مناطق فاقد داده‌های زمینی را دارند، اما میزان دقت این داده‌ها بسته به موقعیت جغرافیایی و شرایط مختلف متغیر است و نیازمند ارزیابی موردی برای هر منطقه و کاربرد خاص می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بخار آب بارش شو، COSMIC، رادیوسوند، اختفای رادیویی GNSS، ژئودزی فضایی، جو زمین.

۱. مقدمه

رادیومتر مایکروویو هستند. از سوی دیگر، روش‌های فضایی مانند رخداد‌های اختفای رادیویی سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (Global Navigation Satellite Systems) (Radio Occultation)، طیف‌سنجی تصویربرداری با توان تفکیک متوسط (MODIS)، دستگاه SCIAMACHY و سنش مادون قرمز جوی (AIRS) نیز قادر به اندازه‌گیری PWV هستند. به‌عنوان مثال، داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط MODIS محصولات مربوط به میزان بخار آب را در طول روز و شب، هم در مناطق خشکی و هم در اقیانوس‌ها ارائه می‌دهد (بوک و نورت، ۲۰۰۹؛ کیشور و همکاران،

تغییر میزان بخار آب بارش شو (PWV) جو نقش کلیدی در انتقال آب در جو، تبدیل انرژی و تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. بنابراین، پایش و درک دقیق وضعیت و سازوکار این تغییرات از اهمیت بالایی برخوردار است (محمدی آهوئی و سام‌خانیانی، ۲۰۲۴؛ سام‌خانیانی و نایجیان، ۲۰۲۴؛ شریفی و همکاران، ۲۰۱۶؛ شی و همکاران، ۲۰۱۴؛ یائو و همکاران، ۲۰۱۷). در حال حاضر، روش‌ها و ابزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری PWV وجود دارد که به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: سامانه‌های زمینی و فضایی. روش‌های زمینی شامل رادیوسوند، فوتومتر خورشیدی و

استناد: طایفه رستمی، آرش و عامریان، یزدان (۱۴۰۴). تحلیل تغییرات بخار آب بارش شو و ردسپهری با استفاده از داده‌های اختفای رادیویی سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی و مشاهدات رادیوسوند (مطالعه موردی: ایران). مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱ (۲)، ۴۹۹-۵۱۶. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.396147.1007694>

رایانامه: (۱) a.tayfehrostami@email.kntu.ac.ir

آب در مناطق مختلف استفاده کرد و نتایج آن با مشاهدات ماهواره‌ای مقایسه شد.

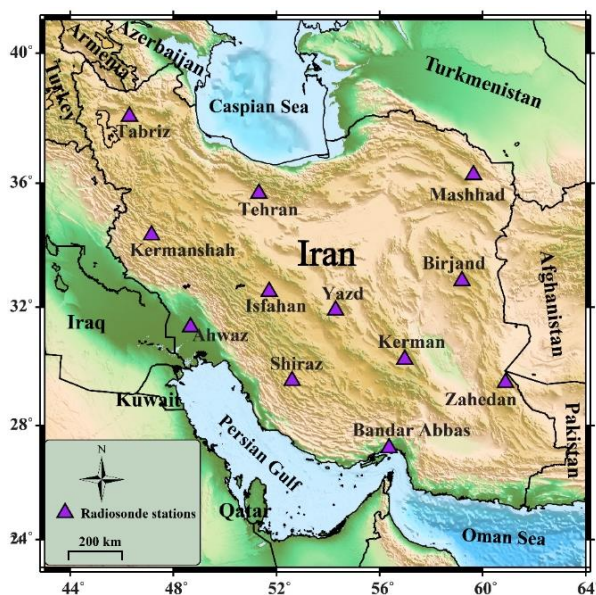
در سال‌های اخیر، روش‌های سنجش از دور فضایی، مانند GNSS RO و دستگاه‌های مایکروویو غیرفعال نصب شده بر روی ماهواره‌ها، امکان اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی و توزیع PWV از فضا را فراهم کرده‌اند (کرسینسکی و همکاران، ۱۹۹۷؛ میرز و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). این روش‌ها نسبت به روش‌های زمینی مزایای متعددی دارند. به عنوان مثال، GNSS RO دارای تفکیک بالایی در راستای قائم است و اندازه‌گیری‌های آن تحت تأثیر ابر و بارش قرار نمی‌گیرد (آنتس، ۲۰۱۱؛ آنتس و همکاران، ۲۰۰۸؛ هو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ویک و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر این، پوشش مشاهده‌ای این روش جهانی است و به موقعیت جغرافیایی، خشکی یا اقیانوس بستگی ندارد. بنابراین، GNSS RO برای اندازه‌گیری PWV در سراسر جهان، حتی در شرایط مختلف جوی، بسیار کاربردی است (جیکوب، ۲۰۰۱؛ لی و همکاران، ۲۰۱۴؛ منگ و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعات آماری دقیق نشان داده‌اند که در مناطق غالب اقیانوسی، مقادیر PWV به دست آمده از اختلافی رادیویی و GNSS زمینی، تفاوت میانگین حدود ۱ میلی‌متر، جذر خطای مربعی میانگین (RMSE) حدود ۵ میلی‌متر و همبستگی بالای ۰/۹ دارند (فونسکا و همکاران، ۲۰۱۸). در مطالعه‌ای به مقایسه دقت PWV حاصل از مأموریت COSMIC-2 با PWV حاصل از ایستگاه‌های زمینی GNSS در ۱۵۰ کیلومتری ایستگاه‌های GNSS پرداخته شده است که در آن نشان داده شد میانگین حاصل از ایستگاه‌های زمینی GNSS از داده‌های COSMIC-2 در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ برابر با ۴۵/۷ میلی‌متر و ۳۹/۹ میلی‌متر بوده است (لین و همکاران، ۲۰۲۴). یکی از مزایای مهم استفاده از PWV حاصل از مشاهدات GNSS RO این است که در مناطقی مانند ایران، که تعداد ایستگاه‌های دائمی رادیوسوند و GNSS کم است و در مواردی دسترسی به داده‌های آنها به دلیل مدیریت در سطح ملی با محدودیت‌هایی همراه است، می‌تواند به پژوهشگران در بهبود مطالعات هواشناسی

۲۰۱۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ شی جیه و همکاران، ۲۰۱۶؛ وانگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ وارد و همکاران، ۲۰۱۷؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین، تصاویر ماهواره‌ای مأموریت سنتینل-۳ (Sentinel-3) و لندست (Landsat) قادر به بازیابی مقادیر بخار آب موجود در جو در محدوده‌های وسیع مکانی و با توان تفکیک زمانی بالا هستند، اما دقت آنها به داده‌های آموزشی و روش‌های پردازش بستگی دارد (ایزانلو و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، روش‌های سنتی اندازه‌گیری جوی مانند رادیوسوند و رادیومتر مایکروویو به دلیل توزیع مکانی ناهمگن، پوشش محدود و وضوح زمانی پایین، در ثبت تغییرات مداوم بخار آب جوی ضعف دارند. با این وجود، رادیوسوندها به دلیل دقت بالایشان، همچنان به عنوان ابزار مرجع معتبری برای مطالعه جو مورد استفاده قرار می‌گیرند (گانگ و همکاران، ۲۰۱۸).

استفاده از رادیوسوند برای اندازه‌گیری پارامترهای جوی، از جمله PWV، به اوایل قرن بیستم و توسعه ابزارهای هواشناسی مدرن بازمی‌گردد. رادیوسوند که در دهه ۱۹۳۰ توسط هواشناسان معرفی شد، ابتدا برای اندازه‌گیری دما، فشار و رطوبت در ارتفاعات مختلف جو به کار گرفته شد. با گذشت زمان و بهبود حسگرها، از دهه ۱۹۵۰ به بعد، این ابزار به یکی از روش‌های اصلی برای برآورد PWV تبدیل شد. داده‌های رادیوسوند به دلیل ثبت مستقیم پروفایل قائم رطوبت، به عنوان مرجعی برای اعتبارسنجی روش‌های دیگر مانند سنجش از دور (Remote Sensing) مورد استفاده قرار گرفتند (حاجی‌آقاجانی و همکاران، ۲۰۲۱). در سال‌های اخیر، با ظهور فناوری‌های نوین مانند GNSS و سنجنده‌های ماهواره‌ای، نقش رادیوسوندها کمی تغییر کرده و بیشتر به عنوان معیاری برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی این روش‌ها مطرح شده است. با این حال، پیشینه استفاده از رادیوسوند همچنان اهمیت دارد. برای مثال، مطالعه‌ای توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی داده‌های طولانی‌مدت رادیوسوند برای تحلیل روند تغییرات PWV در مقیاس جهانی پرداخت و نشان داد که این ابزار هنوز در مطالعات اقلیمی ارزشمند است. این پژوهش از داده‌های رادیوسوند برای ارزیابی تغییرات بخار

استاندارد و ارتفاعات مختلف اندازه‌گیری و گزارش می‌شوند. این مجموعه داده‌ها معمولاً با فواصل زمانی ۱۲ یا ۲۴ ساعته، بسته به ایستگاه موردنظر، تولید شده و داده‌های آن در سراسر جهان از طریق سازمان ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA) از طریق وبسایت آنها در آدرس <https://www.ncei.noaa.gov> در دسترس قرار داده می‌شوند (رحیمی و همکاران، ۲۰۲۳).

در این مطالعه، از داده‌های ۱۲ ایستگاه رادیوسوند واقع در ایران برای برآورد PWV استفاده شده است. مجموعه داده‌های رادیوسوند ایران از مختصات جغرافیایی در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۲۴ درجه شمالی تا ۴۱ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۳ درجه شرقی تا ۶۴ درجه شرقی را در بر می‌گیرد. علاوه بر این، بازه زمانی مورد مطالعه از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۹ میلادی است. شکل ۱ توزیع مکانی ایستگاه‌های رادیوسوند در سراسر ایران را نشان می‌دهد. همچنین، جدول ۱ مشخصات این ایستگاه‌های رادیوسوند را ارائه می‌کند. لازم به ذکر است، برخی ایستگاه‌ها داده‌های کمتری را در بازه مطالعاتی دارد بودند، لذا در هر ایستگاه به تعداد مشاهدات صورت گرفته بررسی انجام گرفت.



شکل ۱. مکان‌های ایستگاه‌های رادیوسوند در سراسر ایران.

و جوی یاری رساند. این موضوع به‌ویژه در مناطقی که پوشش شبکه‌های زمینی ضعیف است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

مطالعات پیشین در ایران، از جمله پژوهش سام‌خانی (۲۰۲۳)، دقت برآورد PWV حاصل از GPS Radio Occultation در مقایسه با GPS زمینی در ایران را مورد بررسی قرار داده‌اند. با این حال، مقایسه این داده‌ها با مشاهدات رادیوسوند به‌عنوان مرجع کلاسیک و مورد استفاده در شبکه‌های سنجش جوی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از داده‌های COSMIC و اطلاعات رادیوسوند در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۹، به بررسی رفتار PWV در مناطق مختلف ایران پرداخته شده است. این کار ضمن تکمیل مطالعات پیشین، به بررسی خطاها در ایستگاه‌های متنوع جغرافیایی و در مقادیر مختلف PWV (به‌ویژه مقادیر بالا) می‌پردازد. هدف، ارزیابی قابلیت استفاده از داده‌های اختفای رادیویی در مناطق فاقد دسترسی به داده‌های زمینی و فراهم کردن بستری برای تحلیل‌های اقلیمی بلندمدت است. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان منبعی برای تهیه داده‌های بخار آب بارش‌شو در مناطقی با پوشش ضعیف داده‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرد و از این طریق به بهبود عملکرد مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا مانند مدل WRF در فرایند داده-گواری کمک نماید.

۲. داده‌ها و روش‌های مورد استفاده

۲-۱. مشاهدات رادیوسوند

رادیوسوندها، مجموعه‌ای از حسگرها و ابزارهایی هستند که از طریق بالن به فضا پرتاب می‌شوند، در حالی که از لایه‌های بالایی جو زمین عبور می‌کنند، پارامترهای جوی را اندازه‌گیری می‌کنند و داده‌های هواشناسی را مستقیم در طول مسیر خود ارائه می‌دهند (رحیمی و همکاران، ۲۰۲۳). متغیرهایی مانند دما، فشار، نقطه شبنم، سرعت و جهت باد و سایر پارامترها توسط رادیوسوند در سطوح فشاری

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های رادیوسوند.

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)
تبریز	۳۸٫۰۸	۴۶٫۲۸	۱۳۶۷
مشهد	۳۶٫۲۶	۵۹٫۶۳	۹۹۹
تهران	۳۵٫۶۸	۵۱٫۳۱	۱۲۰۴
کرمانشاه	۳۴٫۳۵	۴۷٫۱۵	۱۳۱۹
اصفهان	۳۲٫۵۱	۵۱٫۷۰	۱۵۵۰٫۴
بیرجند	۳۲٫۸۶	۵۹٫۲	۱۴۹۱
اهواز	۳۱٫۳۳	۴۸٫۶۶	۲۰
یزد	۳۱٫۹	۵۴٫۲۸	۱۲۳۸
کرمان	۳۰٫۲۵	۵۶٫۹۶	۱۷۴۸
شیراز	۲۹٫۴۶	۵۲٫۶	۱۴۸۴
زاهدان	۲۹٫۴۶	۶۰٫۸۸	۱۳۷۰
بندرعباس	۲۷٫۲۱	۵۶٫۳۶	۱۰

ترم فصلی است که به روز سال (doy، روزهای UTC از آغاز سال) بستگی دارد. a_0 تا a_4 پنج ضریب سیگموئید هستند و a_5 ضریب فصلی است (ماتئوس و همکاران، ۲۰۲۲). رادیوسوندها پروفایل‌های عمودی جو را به صورت روزانه در ساعت‌های ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ UTC ارائه می‌دهند. این پروفایل عمودی شامل اندازه‌گیری‌های هواشناسی فشار جو (P)، دمای مطلق (T)، رطوبت نسبی (RH) و ارتفاع ژئوپتانسیل (H) در سطوح مختلف فشار است. از این رو، مقدار PWV را می‌توان با انتگرال‌گیری عددی از این پارامترهای هواشناسی در طول نمایه‌ها به طور دقیق محاسبه کرد:

$$PWV = \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q dP \quad (2)$$

$$q = \frac{\varepsilon e}{P - (1 - \varepsilon)e} \quad (3)$$

$$e = 6.112 \exp\left(\frac{17.67 T_d}{T_d + 243.15}\right) \quad (4)$$

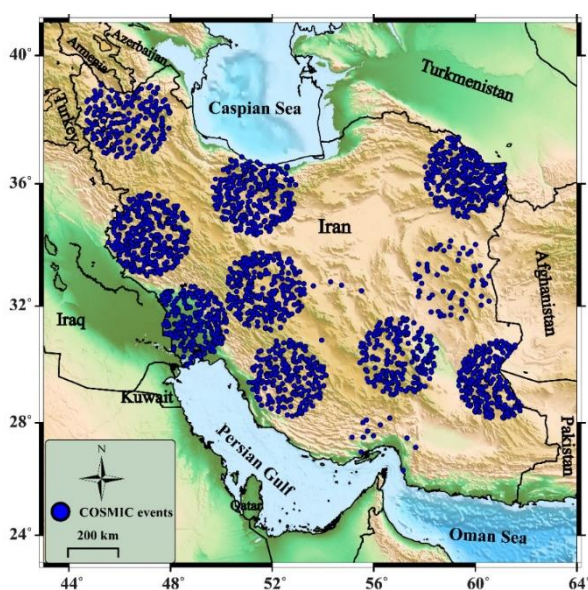
در روابط بالا، PWV بیانگر برآوردهای بخار آب بارش شو از مشاهدات رادیوسوند؛ g شتاب گرانش زمین با واحد متر بر مربع ثانیه؛ P_t فشار در بالاترین نقطه پروفایل با واحد هکتوپاسکال؛ q رطوبت ویژه با واحد کیلوگرم بر کیلوگرم؛ P_s فشار در سطح زمین با واحد هکتوپاسکال؛ e

در فرایند پردازش، داده‌های خام رادیوسوند در صورت برقراری شرایط زیر به عنوان داده‌های پرت در نظر گرفته شده و از فرایند محاسبات حذف شدند: (۱) اختلاف ارتفاع بین دو سطح فشار متوالی بیشتر از ۱۰ کیلومتر باشد؛ (۲) فاصله بین دو سطح فشار جوی متوالی بیشتر از ۲۰۰ هکتوپاسکال باشد (سون و همکاران، ۲۰۲۳)؛ (۳) تعداد کل لایه‌های قائم جو در داده‌های رادیوسوند کمتر از ۶ باشد؛ (۴) ارتفاع داده‌های نهایی ثبت شده در پروفایل کمتر از ۶ کیلومتر بالاتر از سطح زمین باشد (سون و همکاران، ۲۰۲۱)؛ و (۵) بیشینه سطح رطوبت (در سطح فشار ۲۰۰ تا ۳۵۰ هکتوپاسکال) کمتر از $\mu - 4\sigma$ باشد (که در آن μ و σ به ترتیب میانگین ارتفاع وردسپهر و انحراف معیار آن هستند)، که این مقدار از مدل تجربی معادله (۱) استخراج شده است (ماتئوس و همکاران، ۲۰۲۲):

$$f(\varphi, doy) = a_0 + \frac{a_1}{\left(1 + \exp\left(-\frac{\varphi - a_2}{a_3}\right)\right)^{a_4}} + a_5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi(doy - 28)}{365.25}\right) \quad (1)$$

که در آن، که دو ترم اول، تابع سیگموئید هستند که تنها به عرض جغرافیایی (φ)، بر حسب درجه وابسته‌اند، و ترم آخر،

محصولات داده‌ای را هم به صورت آنی و هم پس پردازش شده ارائه می‌دهند. در این مطالعه، از پروفایل‌های پس پردازش شده مأموریت COSMIC بر روی منطقه ایران در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۹ استفاده شده است. این پروفایل‌ها معمولاً با تأخیر شش هفته‌ای در دسترس قرار می‌گیرند. پروفایل‌های WetPrf، پروفایل‌های جوی هستند که اطلاعاتی نظیر فشار، دما و رطوبت، که به سطوح ارتفاعی ۱۰۰ متری درون‌یابی شده‌اند را در اختیار کاربران می‌گذارند (شیا و همکاران، ۲۰۲۰). برای ارزیابی دقت PWV حاصل از COSMIC بر اساس PWV حاصل از رادیوسوندها، ۲۳۹۸ رخداد RO در فاصله ۱۵۰ کیلومتری از سایت‌های رادیوسوند که تطابق زمانی با یکدیگر دارند، انتخاب شدند. برای مقایسه داده‌های اختفای رادیویی GNSS با مشاهدات رادیوسوند، علاوه بر در نظر گرفتن فاصله مکانی، تطابق زمانی نیز لحاظ شد؛ به طوری که تنها مواردی مورد استفاده قرار گرفتند که زمان وقوع رخداد اختفای رادیویی حداکثر در بازه ± 2 ساعت نسبت به زمان ثبت نمایه رادیوسوند قرار داشته باشد. معیارهای تطبیق مکانی و زمانی بین مشاهدات RO و رادیوسوند بر اساس پژوهش‌های پیشین انتخاب شده‌اند (لین و همکاران، ۲۰۲۴). شکل ۲ محدوده رخدادهای RO را نشان می‌دهد.



شکل ۲. رخدادهای اختفای رادیویی نسل COSMIC در ۱۵۰ کیلومتری سایت‌های رادیوسوند.

فشار بخار آب جوی با واحد هکتوپاسکال؛ ε نسبت وزن مولکولی بخار آب به هوای خشک؛ P فشار در جو؛ و T_d دمای نقطه شبنم با واحد درجه سانتی گراد هستند.

۲-۲. رخدادهای اختفای رادیویی سامانه‌های ماهواره‌ای

ناوبری جهانی

سامانه مشاهده گر ماهواره‌ای برای هواشناسی، یونوسفر و اقلیم (COSMIC)، که در تایوان با نام FORMOSAT-3 نیز شناخته می‌شود، اولین مأموریت فضایی بود که به طور انحصاری بر پایه تکنیک اختفای رادیویی GNSS طراحی و اجرا شد. این مأموریت پیشگام در زمینه جمع‌آوری داده‌های جوی با استفاده از سیگنال‌های GNSS بود و توانست داده‌های دقیق و نزدیک به زمان آنی از لایه‌های مختلف جو زمین ارائه دهد. COSMIC به عنوان الگویی برای مأموریت‌های بعدی اختفای رادیویی GNSS عمل کرد و افق‌های جدیدی را در حوزه‌های هواشناسی، مطالعات اقلیمی و بررسی‌های یونوسفری گشود. یکی از مهم‌ترین دستاوردهای مأموریت COSMIC، تعداد قابل توجه مشاهدات جوی بود که به صورت جهانی و در هر روز جمع‌آوری می‌شد. این سامانه قادر بود روزانه بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ مشاهده را در نقاط مختلف جهان ثبت کند. این داده‌ها به دلیل دقت بالا و پوشش جغرافیایی گسترده، نقش به سزایی در بهبود پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP) ایفا کردند. در واقع، استفاده از داده‌های COSMIC در مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا، به ویژه در مناطقی که داده‌های سنتی هواشناسی محدود بودند، تأثیر مثبت و قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی‌ها داشت (آنتس و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال، دقت مقادیر بخار آب بارش‌شو حاصل از آن در مناطقی مانند ایران که ایستگاه‌های GNSS و سایت‌های رادیوسوند کم است، هنوز مشخص نیست. پروفایل‌های WetPrf مربوط به مأموریت‌های اختفای رادیویی GNSS به طور عمومی از طریق مرکز تحلیل و آرشیو داده‌های COSMIC (CDAAC) (www.cosmic.ucar.edu) در دسترس هستند و

رطوبت و خطاهای مربوط به هر یک به دست می آیند. انتگرال قائم چگالی جرم مطلق بخار آب، منجر به محاسبه PWV به ازای هر متر مربع می شود و می تواند با تقسیم بر چگالی آب مایع (۱ گرم بر سانتی متر مکعب) به واحد میلی متر یا سانتی متر تبدیل شود. فرمول PWV به صورت زیر است:

$$PWV = \int_0^{P_s} \frac{q}{g} dP \quad (7)$$

در رابطه بالا، q رطوبت ویژه (Specific Humidity)، g شتاب گرانش زمین (با مقدار تقریبی ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)، و P فشار هوا بر حسب هکتوپاسکال است. انتگرال قائم رطوبت، شامل هر دو بخش بخار و رطوبت متراکم شده، منجر به محاسبه ستون آب به ازای هر متر مربع می شود. کل PWV موجود در یک ستون قائم با سطح مقطع واحد، از سطح زمین تا مرز "بالایی" جو امتداد دارد. این مقدار به طور کلی بر حسب ارتفاعی بیان می شود که ماده آب، در صورت متراکم شدن کامل و جمع آوری در ظرفی با همان سطح مقطع واحد، به آن ارتفاع می رسد. از نظر ریاضی، PWV موجود در لایه ای که بین فشارهای p_1 و p_2 محدود شده است، توسط این فرمول داده می شود:

$$PWV = \int_{Z_0=0}^Z q_h(z) \rho_m(z) dz \quad (8)$$

$q_h(z)$ رطوبت ویژه در ارتفاع z را نشان می دهد و $\rho_m(z)$ چگالی هوای مرطوب در ارتفاع z است. جو به طور تقریبی به تعداد زیادی لایه از سطح زمین تا بالاترین نقاط تقسیم می شود، بنابراین فرمول PWV می تواند به معادله ای که بر حسب فشار بیان می شود، تبدیل شود:

$$PWV = -\frac{1}{g} \int_{P(Z_0=0)}^{P(Z)} q_h(P) dP \cong -\frac{1}{g} \sum_{i=1}^N q_{h,i} \Delta P \quad (9)$$

میانگین رطوبت ویژه با استفاده از رطوبت ویژه در پایین لایه و رطوبت ویژه در بالای لایه از معادله (۱۰) محاسبه می شود:

$$\bar{q}_{h,i} = \frac{q_{h,i-1} + q_{h,i}}{2} \quad (10)$$

پروفاایل های WetPrf مأموریت COSMIC اطلاعات

با فرض این که اثرات یونش (Ionization) به طور کامل تصحیح شده و پراکندگی ناشی از قطرات آب ناچیز است، شاخص شکست پذیری (Refractivity) از طریق رابطه زیر به دما (T)، فشار جزئی هوا خشک (P_d) و بخار آب بارش شو (e) مرتبط می شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸):

$$N = K_1 \times \frac{P_d}{Z_d T} + K_2 \times \frac{e}{Z_w T^2} + K_3 \times \frac{e}{Z_w T} \quad (5)$$

که در آن $K_1=77.643 \text{ K/hPa}$

$K_2=3.75463 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$ و $K_3=71.2952 \text{ K/hPa}$

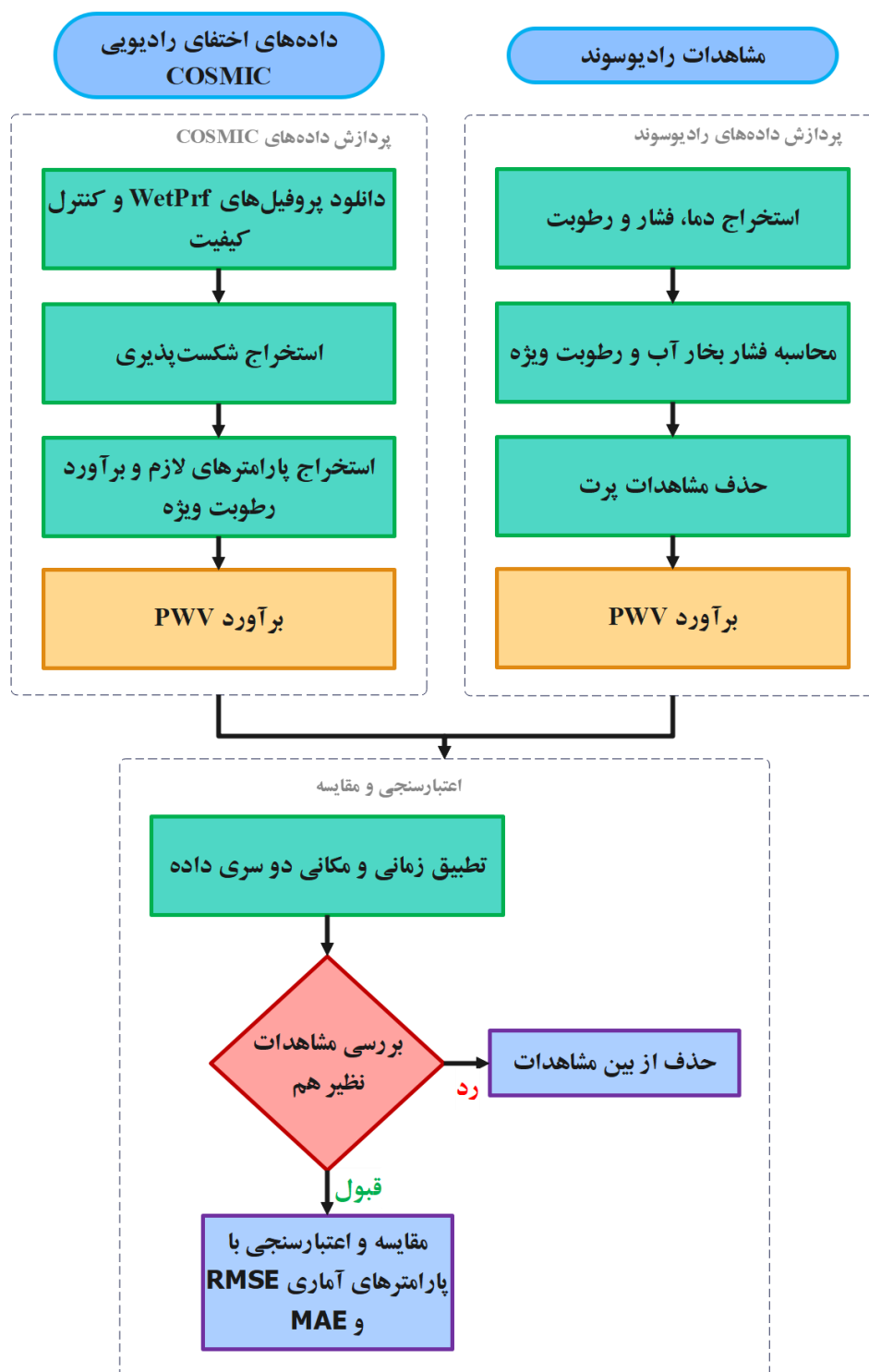
ثابت هایی هستند که به صورت تجربی تعیین می شوند، و Z_d و Z_w به ترتیب ضرایب تراکم پذیری هوا خشک و هوا تر هستند. این ضرایب تصحیح کننده اثرات غیرایده آل بودن گازها هستند. Z_d و Z_w ممکن است در قسمت های چگال تر جو تا ۰/۰۵٪ کوچک تر از واحد باشند. در ارتفاعات کمتر از ۷ تا ۸ کیلومتر، PWV قابل چشم پوشی نیست؛ معادله (۵) نمی تواند دما و PWV جو را به طور همزمان حل کند. اندازه گیری های خام اختفای رادیویی GNSS می توانند برای بازیابی پارامترهای جوی مانند دما، فشار و رطوبت استفاده شوند. روش وردشی یک بعدی (1DVar) راهکاری مؤثر برای ترکیب مشاهدات و اطلاعات پیش زمینه (Background) است که از مجموعه داده های پیش بینی ECMWF استخراج شده اند، فراهم می کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). این روش شامل یافتن محتمل ترین حالت جوی از طریق کمینه سازی تابع هزینه (J) است:

$$J[x] = (h(x) - y^0)^T (O + F)^{-1} (h(x) - y^0) + (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) \quad (6)$$

در معادله (۶) y^0 بردار مشاهدات را نشان می دهد؛ h عملگر مشاهده (غیرخطی) است؛ x^b اطلاعات مرجع پیش زمینه می باشد؛ O ، F و B به ترتیب ماتریس های هموردایی خطا برای مشاهدات، عملگر مشاهده و اطلاعات پیش زمینه هستند؛ و $h(x)$ برآوردی از مشاهداتی است که با وضعیت جوی x انجام می شود. مسئله کمینه وردایی می تواند با استفاده از تکرار شبه نیوتن حل شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). در نتیجه، پروفاایل های بهینه آماری فشار، دما و

ویژه استفاده کنیم. در شکل ۳ فلوچارت کلی روش کار مورد استفاده نشان داده شده است.

چندین سطح از فشار بخار آب بارش شو را ارائه می دهند، در نهایت، می توانیم از معادله (۳) برای محاسبه رطوبت



شکل ۳. فلوچارت کلی روش پژوهش به کار رفته در این مطالعه.

۳-۲. معیارهای ارزیابی و اعتبارسنجی

در این مطالعه ارزیابی برآوردهای PWV حاصل از مشاهدات COSMIC با استفاده از داده‌های مرجع PWV مبتنی بر رادیوسوند ارزیابی شده است. دو معیار متوسط ریشه میانگین مربعات (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای این ارزیابی به کار گرفته شده است، که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (PWV_{RO} - PWV_{RS})^2} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |PWV_{RO} - PWV_{RS}| \quad (12)$$

در روابط بالا، PWV_{RO} بخار آب بارش شو حاصل از رخدادهای COSMIC، PWV_{RS} بخار آب بارش شو حاصل از سایت‌های رادیوسوند و N تعداد داده‌های مشترک بین این دو است.

۳. نتایج و بحث

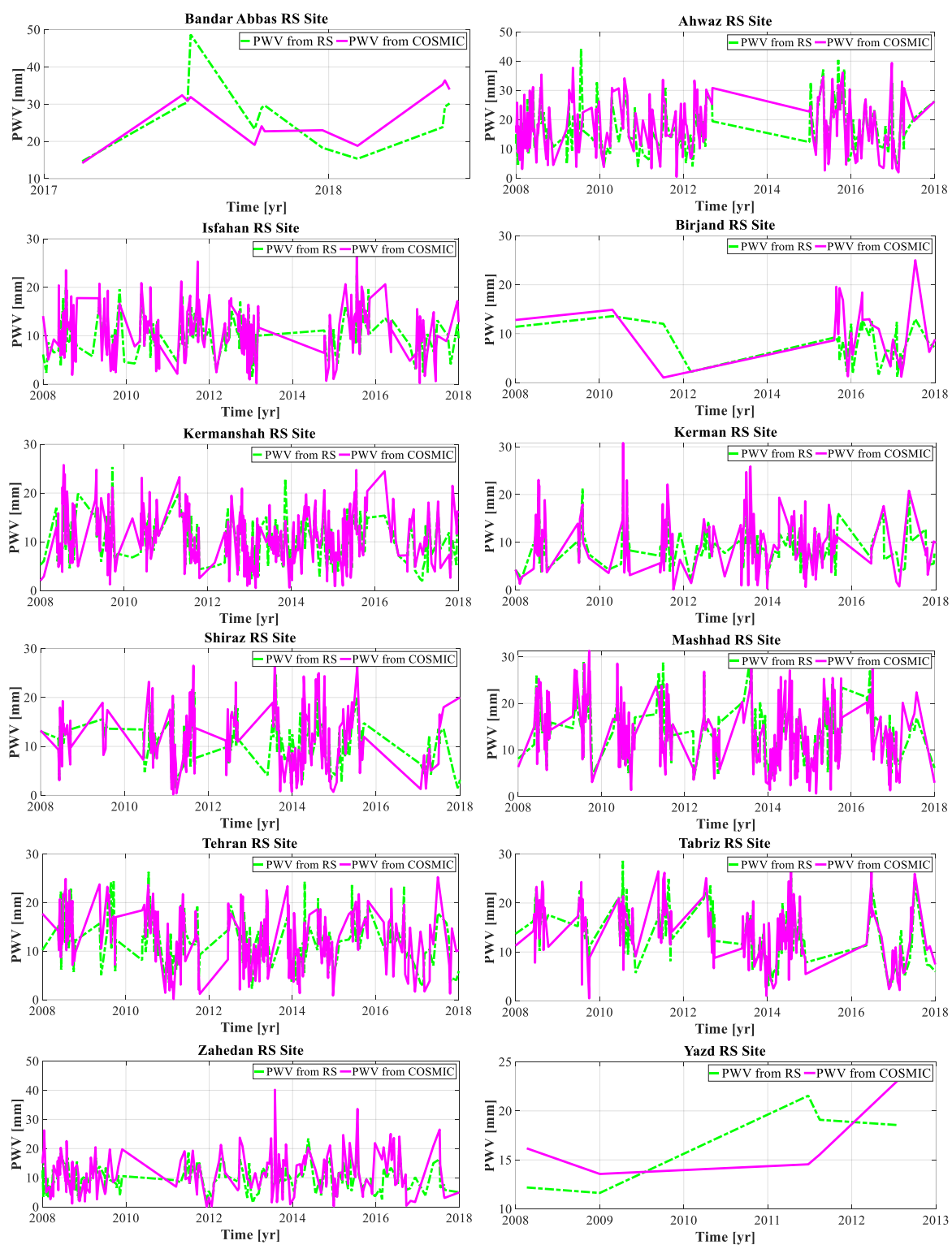
در این مطالعه، تمرکز ما بر تحلیل و ارزیابی مقادیر PWV از منابع داده‌ای متعدد در سراسر ایران است. هدف ما به دست آوردن مقادیر PWV از رخدادهای مأموریت COSMIC در شعاع ۱۵۰ کیلومتری سایت‌های رادیوسوند ایران است. این مقادیر با برآوردهای PWV به دست آمده از رادیوسوند مقایسه و اعتبارسنجی می‌شوند. لازم به ذکر است که به دلیل تعداد وجود گپ در برخی مشاهدات سایت‌های رادیوسوند، مقایسه و ارزیابی دقت پس از تطبیق زمانی و مکانی صورت گرفته است. علاوه بر این، تعداد رخدادهای در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. شکل ۴ نتایج مقایسه سری‌های زمانی مقادیر PWV حاصل از رادیوسوند و داده‌های مأموریت COSMIC را در ایستگاه‌های مختلف رادیوسوند ایران نشان می‌دهد.

این مقایسه در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۹ صورت گرفته است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، مقادیر PWV حاصل از رادیوسوند و COSMIC در اکثر ایستگاه‌ها الگوهای تغییرات مشابهی را دنبال می‌کنند، اما میزان انطباق آنها متفاوت است. در ایستگاه‌های بندرعباس

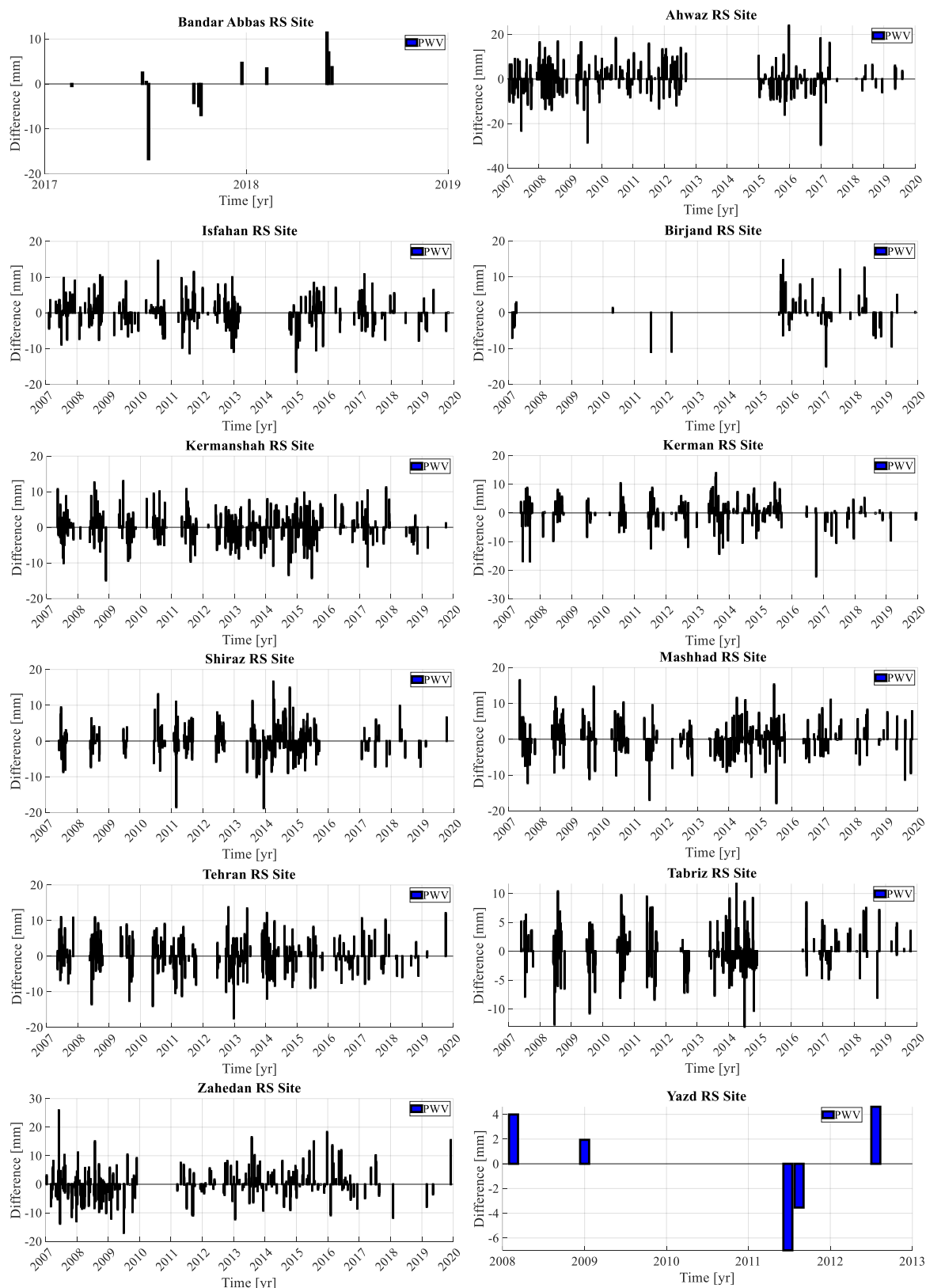
و یزد، همبستگی نسبتاً خوبی بین دو منبع داده مشاهده می‌شود، در حالی که در ایستگاه‌های اهواز، اصفهان، کرمانشاه و تبریز، نوسانات بیشتری در نتایج حاصل از COSMIC دیده می‌شود. مقادیر PWV در ایستگاه‌های مختلف دارای دامنه متفاوتی است که این تفاوت‌ها بیانگر شرایط اقلیمی متنوع در نقاط مختلف ایران می‌باشد. برای مثال، در ایستگاه‌های جنوبی مانند بندرعباس، مقادیر PWV عموماً بالاتر بوده که نشان‌دهنده رطوبت بیشتر در این مناطق است. همچنین، برخی از ایستگاه‌ها دارای گپ‌های داده‌ای هستند که به دلیل عدم وجود اندازه‌گیری در برخی بازه‌های زمانی می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر، تفاوت در میزان نوسانات مقادیر PWV در ایستگاه‌های مختلف است که در برخی ایستگاه‌ها مانند زاهدان، تغییرات فصلی مشخص‌تری را می‌توان مشاهده کرد.

مقایسه این دو منبع داده پس از تطبیق زمانی و مکانی صورت گرفته است تا اطمینان حاصل شود که داده‌های مقایسه شده مربوط به همان موقعیت و زمان هستند. با این حال، تفاوت‌های موجود می‌تواند ناشی از عواملی نظیر تفاوت در روش‌های اندازه‌گیری، خطاهای ابزاری، و یا تفاوت در دقت اندازه‌گیری دو سامانه باشد. این مقایسه به ما کمک می‌کند تا قابلیت اطمینان برآوردهای PWV از مأموریت COSMIC را در مقایسه با داده‌های رادیوسوند که به عنوان مرجع در نظر گرفته شده‌اند، ارزیابی کنیم و میزان خطای احتمالی در هر ایستگاه را تعیین نماییم که در ادامه بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۵ سری زمانی اختلاف مقادیر PWV حاصل از داده‌های رادیوسوند و مأموریت COSMIC را در ۱۲ ایستگاه رادیوسوند ایران نشان می‌دهد. این نمودارها بیانگر میزان انحراف بین دو روش اندازه‌گیری هستند و امکان ارزیابی دقیق‌تر توافق بین این دو منبع داده را فراهم می‌کنند. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، میزان و الگوی اختلافات در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. در اکثر ایستگاه‌ها، اختلافات در محدوده ± 10 میلی‌متر قرار دارند، اما نوسانات قابل توجهی نیز در برخی بازه‌های زمانی دیده می‌شود.



شکل ۴. سری زمانی PWV حاصل از رخدادهای مأموریت COSMIC و سایت‌های رادیوسوند.



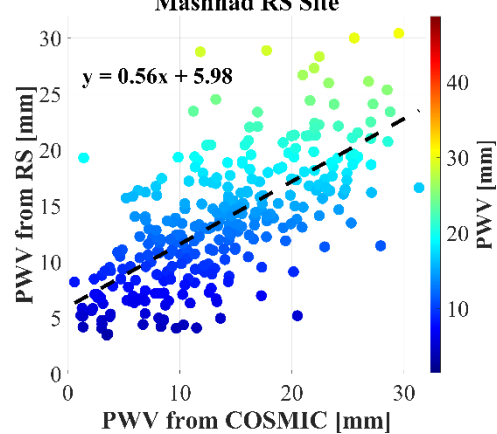
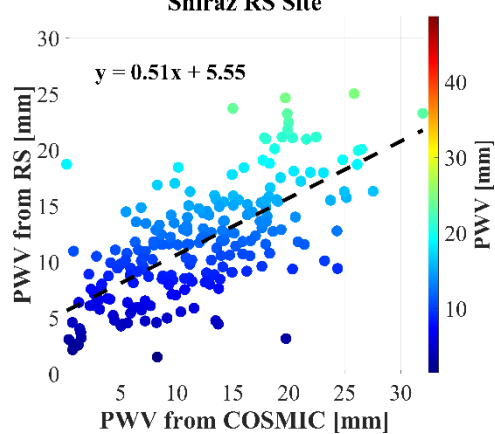
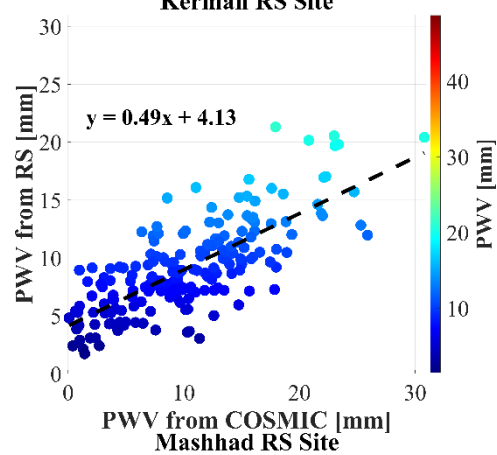
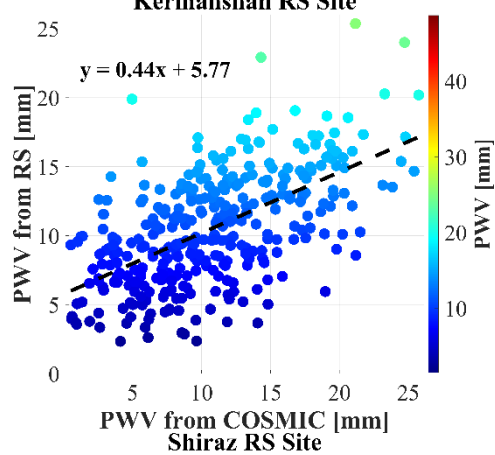
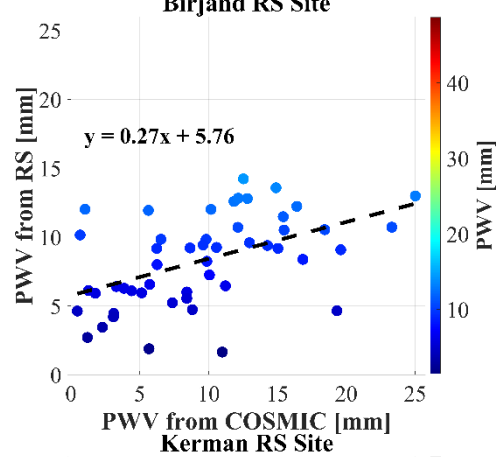
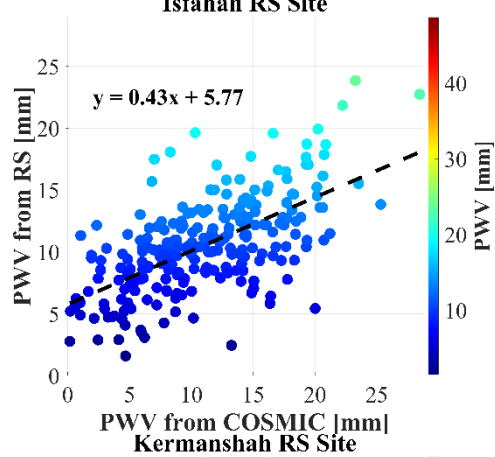
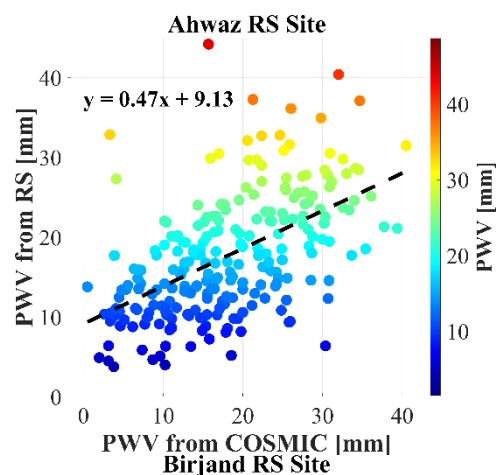
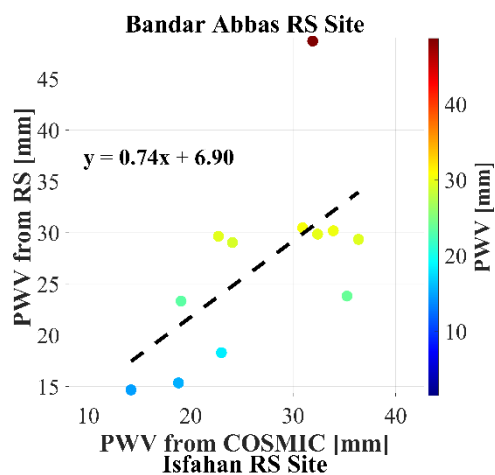
شکل ۵. سری زمانی اختلاف مقادیر PWV بین داده‌های رادیوسوند و COSMIC در ایستگاه‌های مختلف رادیوسوند ایران.

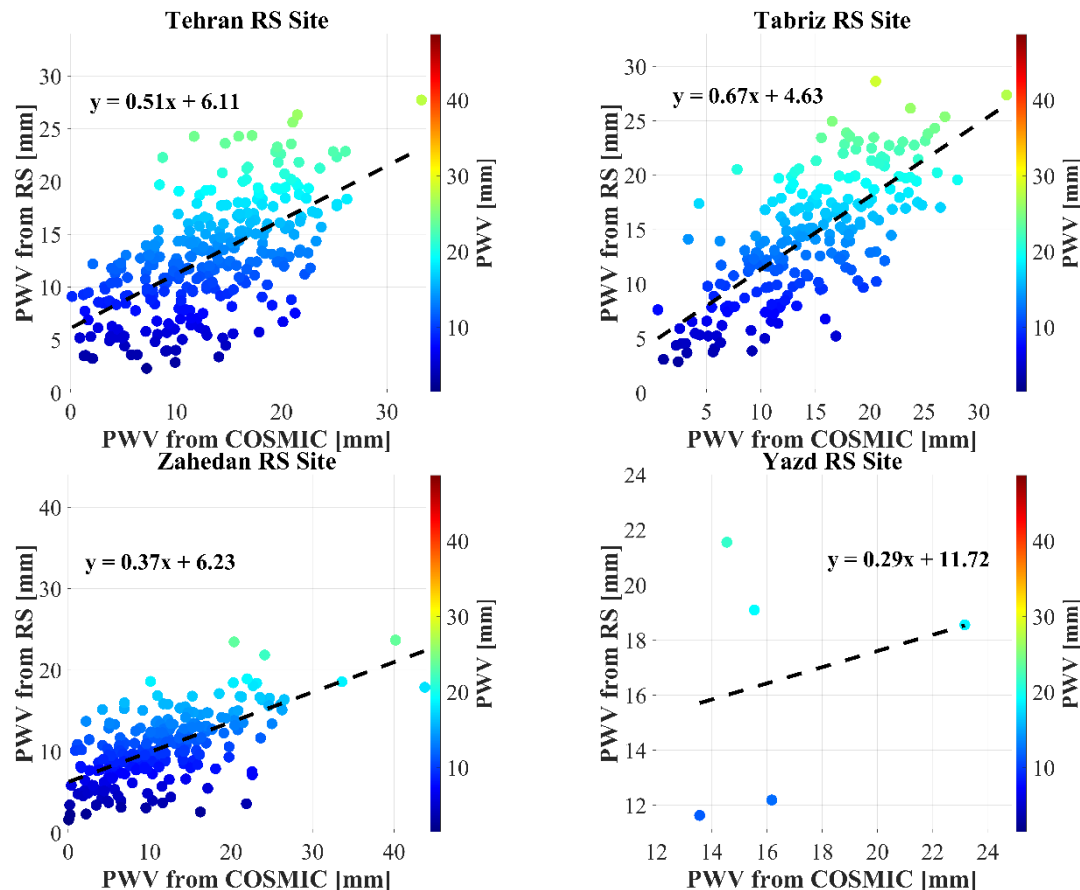
نمودار، محور افقی مقادیر PWV به‌دست‌آمده از COSMIC و محور عمودی مقادیر PWV حاصل از رادیوسوند را نشان می‌دهد. همچنین، معادله خط رگرسیون

شکل ۶ نمودارهای همبستگی بین مقادیر PWV حاصل از اندازه‌گیری‌های رادیوسوند و داده‌های COSMIC را برای ۱۲ ایستگاه رادیوسوند در سراسر ایران نشان می‌دهد. در هر

رابطه خطی بین این دو منبع داده است.

خطی برای هر ایستگاه نمایش داده شده است که بیانگر





شکل ۶. نمودارهای همبستگی بین مقادیر PWV حاصل از رادیوسوند و COSMIC در ایستگاه‌های مختلف رادیوسوند ایران.

که نشان‌دهنده این است که عموماً مقادیر PWV حاصل از رادیوسوند در مقادیر بالا، کمتر از مقادیر متناظر COSMIC است. علاوه بر این، عرض از مبدأ مثبت در تمام معادلات (از ۴/۶۳ در تبریز تا ۱۱/۷۲ در یزد) نشان می‌دهد که در مقادیر پایین PWV، اندازه‌گیری‌های رادیوسوند تمایل به بیشتر بودن نسبت به مقادیر COSMIC دارند. پراکندگی نقاط در اطراف خط رگرسیون نیز اطلاعات مهمی درباره میزان سازگاری بین دو منبع داده فراهم می‌کند. پراکندگی کمتر نشان‌دهنده سازگاری بیشتر است، در حالی که پراکندگی زیاد می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر عوامل مختلف (مانند شرایط جوی، خطاهای اندازه‌گیری یا تفاوت‌های ذاتی در دو روش) بر نتایج باشد. در جدول ۲ مقایسه بین داده‌های PWV حاصل از رادیوسوند و COSMIC با استفاده از معیارهای RMSE و MAE نشان داده شده است.

همان‌طور که از نمودارهای فوق مشخص است، در اکثر ایستگاه‌ها، الگوی پراکندگی نقاط حول خط رگرسیون نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین داده‌های دو منبع است، اما میزان این همبستگی در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. رنگ‌آمیزی نقاط بر اساس مقادیر PWV امکان تشخیص الگوهای احتمالی را در رابطه با میزان رطوبت فراهم می‌کند. در ایستگاه بندرعباس، شیب خط رگرسیون (۰/۷۴) نسبتاً بالاست که نشان‌دهنده تطابق نسبی خوب بین دو منبع داده است، اما تعداد نقاط محدود است.

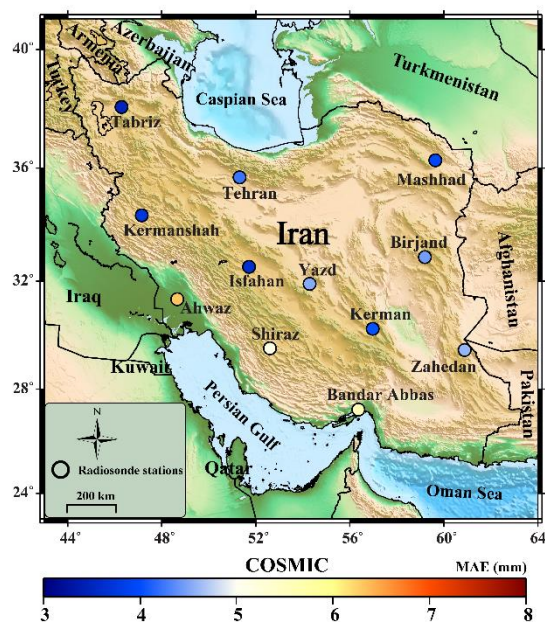
در مقابل، در ایستگاه اهواز با وجود تعداد نقاط بیشتر، شیب کمتر (۰/۴۸) نشان‌دهنده انطباق کمتر بین داده‌های دو منبع است. ایستگاه تبریز با شیب ۰/۶۷ همبستگی نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. شیب خط رگرسیون در اکثر ایستگاه‌ها کمتر از ۱ است (از ۰/۲۹ در یزد و بیرجند تا ۰/۷۴ در بندرعباس).

جدول ۲. مقایسه آماری بین سری زمانی PWV حاصل از مشاهدات رادیوسوند و COSMIC.

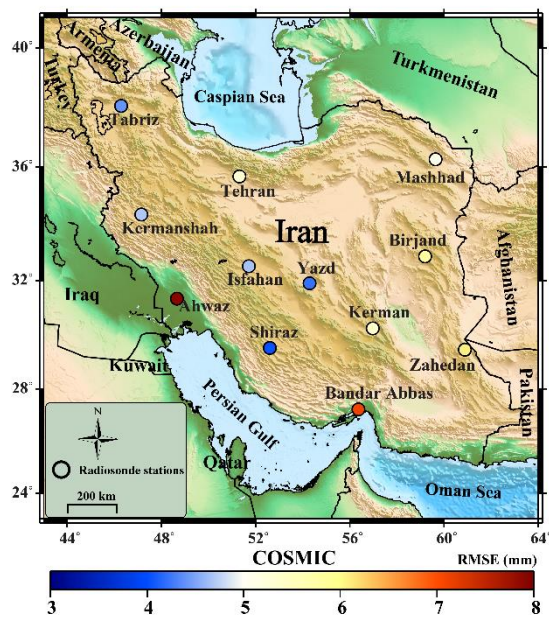
ایستگاه رادیوسوند	اهواز	بندر عباس	بیرجند	اصفهان	کرمان	کرمانشاه	مشهد	شیراز	تبریز	تهران	یزد	زاهدان
RMSE (mm)	۷٫۹۲	۷٫۱۱	۵٫۸۲	۴٫۶۶	۵٫۳۸	۴٫۶۹	۵٫۰۹	۵٫۱۳	۴٫۴۰	۵٫۲۸	۴٫۵۲	۶٫۰۸
MAE (mm)	۶٫۳۰	۵٫۵۷	۴٫۴۵	۳٫۶۴	۴٫۰۳	۳٫۷۲	۳٫۹۴	۴٫۰۳	۳٫۴۸	۴٫۲۳	۴٫۲۱	۴٫۵۹

نتایج نشان می‌دهد که میزان خطا در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. ایستگاه اهواز با RMSE برابر با ۷٫۹۲ میلی‌متر و MAE برابر با ۶٫۳۰ میلی‌متر، بیشترین میزان خطا را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی خاص این منطقه با رطوبت بالا و تغییرات شدید جوی باشد. در مقابل، ایستگاه کرمانشاه با RMSE برابر با ۴٫۶۹ میلی‌متر و MAE برابر با ۳٫۷۲ میلی‌متر، کمترین میزان خطا را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تطابق بهتر بین دو منبع داده در این ایستگاه است. به طور کلی، میانگین RMSE در تمامی ایستگاه‌ها حدود ۵٫۶۵ میلی‌متر و میانگین MAE حدود ۴٫۴۸ میلی‌متر است که نشان می‌دهد مقادیر PWV حاصل از COSMIC با خطای نسبتاً قابل قبولی می‌توانند جایگزین یا مکمل داده‌های رادیوسوند در مناطقی باشند که فاقد پوشش کافی ایستگاه‌های رادیوسوند یا GNSS هستند.

مقایسه روند تغییرات RMSE و MAE در ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد که این دو شاخص همبستگی بالایی با یکدیگر دارند، اما در برخی ایستگاه‌ها مانند بندرعباس و بیرجند، تفاوت نسبی بیشتری بین RMSE و MAE مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده انحراف از توزیع نرمال خطاها در این ایستگاه‌ها باشد. همچنین، روند تغییرات این شاخص‌ها با موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها نیز ارتباط دارد؛ به طوری که ایستگاه‌های جنوبی مانند اهواز و بندرعباس با اقلیم گرم و مرطوب، عموماً خطای بیشتری نسبت به ایستگاه‌های مرکزی و شمالی نشان می‌دهند. این می‌تواند ناشی از پیچیدگی بیشتر الگوهای رطوبتی در این مناطق و محدودیت‌های هر دو روش اندازه‌گیری در شرایط رطوبت بالا باشد. در شکل ۷ مقادیر RMSE و MAE به صورت مکانی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۷. (الف) توزیع مکانی RMSE و (ب) MAE در ایستگاه‌های رادیوسوند ایران.

۴. نتیجه گیری

بررسی و درک دقیق تغییرات PWV به دلیل نقش کلیدی آن در انتقال آب در جو، تبدیل انرژی و تغییرات اقلیمی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های اختفای رادیویی سامانه ماهواره‌ای COSMIC و مشاهدات رادیوسوند، تغییرات PWV در مناطق مختلف ایران طی بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان مقادیر PWV حاصل از رخدادهای COSMIC در مقایسه با داده‌های مرجع رادیوسوند و تعیین میزان خطا در ایستگاه‌های مختلف بود. این پژوهش به عنوان یک گام اساسی در بهبود مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا و اقلیم در مناطق با دسترسی محدود به داده‌های زمینی مانند رادیوسوند و گیرنده‌های GNSS مطرح شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل ۱۲ ایستگاه رادیوسوند واقع در نقاط مختلف ایران بودند که در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۲۴ تا ۴۱ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۳ تا ۶۴ درجه شرقی پراکنده شده‌اند. همچنین، از ۲۳۹۸ رخداد اختفای رادیویی مأموریت COSMIC در شعاع ۱۵۰ کیلومتری ایستگاه‌های رادیوسوند استفاده شد. این داده‌ها پس از تطبیق زمانی و مکانی با داده‌های رادیوسوند، با استفاده از معیارهای آماری RMSE و MAE ارزیابی شدند.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مقادیر PWV حاصل از COSMIC در اکثر ایستگاه‌ها الگوهای تغییرات مشابهی با داده‌های رادیوسوند دنبال می‌کنند، اما میزان انطباق آنها در مناطق مختلف متفاوت است. به طور کلی، میانگین RMSE در تمامی ایستگاه‌ها حدود ۵/۶۵ میلی‌متر و میانگین MAE حدود ۴/۴۸ میلی‌متر محاسبه شد. این مقادیر نشان می‌دهند که داده‌های COSMIC با خطای نسبتاً قابل قبولی می‌توانند به عنوان جایگزین یا مکمل داده‌های رادیوسوند در مناطقی باشند که فاقد پوشش کافی ایستگاه‌های رادیوسوند یا GNSS هستند.

در بین ایستگاه‌ها، ایستگاه اهواز با RMSE برابر با ۷/۹۲

میلی‌متر و MAE برابر با ۶/۳۰ میلی‌متر، بیشترین میزان خطا را نشان داد که می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی خاص این منطقه با رطوبت بالا و تغییرات شدید جوی باشد. در مقابل، ایستگاه کرمانشاه با RMSE برابر با ۴/۶۹ میلی‌متر و MAE برابر با ۳/۷۲ میلی‌متر، کمترین میزان خطا را نشان داد که نشان‌دهنده تطابق بهتر بین دو منبع داده در این ایستگاه است. ایستگاه‌های جنوبی مانند اهواز و بندرعباس که در مناطق گرم و مرطوب قرار دارند، عموماً خطای بیشتری نسبت به ایستگاه‌های مرکزی و شمالی نشان دادند. این موضوع می‌تواند ناشی از پیچیدگی بیشتر الگوهای رطوبتی در این مناطق و محدودیت‌های هر دو روش اندازه‌گیری در شرایط رطوبت بالا باشد.

همچنین، تحلیل همبستگی بین داده‌های COSMIC و رادیوسوند نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها، همبستگی مثبتی بین دو منبع داده وجود دارد، اما میزان این همبستگی در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. شیب خط رگرسیون در اکثر ایستگاه‌ها کمتر از ۱ بود که نشان‌دهنده این است که عموماً مقادیر PWV حاصل از رادیوسوند در مقادیر بالا، کمتر از مقادیر متناظر COSMIC است. علاوه بر این، عرض‌ازمبدأ مثبت در تمام معادلات نشان می‌دهد که در مقادیر پایین PWV، اندازه‌گیری‌های رادیوسوند تمایل به بیشتر بودن نسبت به مقادیر COSMIC دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین خطای مطلق (MAE) ۴/۴۸ میلی‌متر، RMSE برابر با ۵/۶۵ میلی‌متر و بایاس ۳/۴۴ میلی‌متر به دست آمد. این ارقام با نتایج سام‌خانیانی (۲۰۲۳) که مقادیر بایاس ۳/۳ میلی‌متر و RMSE حدود ۵/۲ میلی‌متر را در مقایسه GPS RO و GPS زمینی گزارش کرده‌اند، هم‌راستا است. اما در پژوهش حاضر علاوه بر بازه زمانی بلندمدت، تمرکز بر مقایسه با داده‌های رادیوسوند به عنوان مرجع بوده است که تفاوت‌های ساختاری با GPS زمینی دارد.

به طور کلی، این مطالعه نشان داد که داده‌های COSMIC می‌توانند به عنوان یک منبع معتبر برای برآورد PWV در مناطقی با دسترسی محدود به داده‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرند. تحلیل همبستگی نشان داد که شیب خط

است و نیازمند ارزیابی موردی برای هر منطقه و کاربرد خاص می‌باشد. این پژوهش می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای مطالعات آینده در زمینه بهبود مدل‌های پیش‌بینی وضع هوا و اقلیم در مناطق با دسترسی محدود به داده‌های زمینی برای داده‌گذاری مطرح شود.

مراجع

- 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. <https://doi.org/10.5194/AMT-4-1077-2011>
- Anthes, R. A., Bernhardt, P. A., Chen, Y., Cucurull, L., Dymond, K. F., Ector, D., Healy, S. B., Ho, S.-P., Hunt, D. C., Kuo, Y.-H., & others. (2008). The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 313–334.
- Anthes, R., Sjöberg, J., Feng, X., & Syndergaard, S. (2022). Comparison of COSMIC and COSMIC-2 Radio Occultation Refractivity and Bending Angle Uncertainties in August 2006 and 2021. *Atmosphere*, 13(5), 790. <https://doi.org/10.3390/atmos13050790>
- Bock, O., & Nuret, M. (2009). Verification of NWP model analyses and radiosonde humidity data with GPS precipitable water vapor estimates during AMMA. *Weather and Forecasting*, 24(4), 1085–1101.
- 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, 115–122.
- Gong, S., Hagan, D. F. T., Wu, X., & Wang, G. (2018). Spatio-temporal analysis of precipitable water vapour over northwest China utilizing MERSI/FY-3A products. *International Journal of Remote Sensing*, 39(10), 3094–3110. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1437298>
- Haji-Aghajany, S., Amerian, Y., Verhagen, S., Rohm, W., & Schuh, H. (2021). The effect of function-based and voxel-based tropospheric tomography techniques on the GNSS positioning accuracy. *Journal of Geodesy*, 95(7), 1–17. <https://doi.org/10.1007/S00190-021-01528-2/METRICS>
- Ho, S. P., Peng, L., Mears, C., & Anthes, R. A. (2018). Comparison of global observations and trends of total precipitable water derived from microwave radiometers and COSMIC radio occultation from 2006 to 2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(1), 259–274. <https://doi.org/10.5194/ACP-18-259-2018>
- Izanlou, S., Haji-Aghajany, S., & Amerian, Y. (2024). Enhanced Troposphere Tomography: Integration of GNSS and Remote Sensing Data With Optimal Vertical Constraints. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 3701–3714. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3354884>
- Jacob, D. (2001). The role of water vapour in the atmosphere. A short overview from a climate modeller's point of view. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6–8), 523–527.
- Kishore, P., Venkat Ratnam, M., Namboothiri, S. P., Velicogna, I., Basha, G., Jiang, J. H., Igarashi, K., Rao, S. V. B., & Sivakumar, V. (2011). Global (50°S–50°N) distribution of water vapor observed by COSMIC GPS RO: Comparison with GPS radiosonde, NCEP, ERA-Interim, and JRA-25 reanalysis data sets. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(13), 1849–1860. <https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2011.04.017>
- Kursinski, E. R., Hajj, G. A., Schofield, J. T., Linfield, R. P., & Hardy, K. R. (1997). Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D19), 23429–23465. <https://doi.org/10.1029/97JD01569>
- Li, X., Dick, G., Ge, M., Heise, S., Wickert, J., & Bender, M. (2014). Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: Precise point positioning with orbit, clock, and phase delay corrections. *Geophysical Research Letters*, 41(10), 3615–3621.
- Lien, T. Y., Yeh, T. K., Wang, C. S., Xu, Y., Jiang, N., & Yang, S. C. (2024). Accuracy verification of the precipitable water vapor derived from COSMIC-2 radio occultation using ground-based GNSS. *Advances in Space Research*, 73(9), 4597–4607.

- <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2024.01.041>
- Liu, Z., Li, M., Zhong, W., & Wong, M. S. (2013). An approach to evaluate the absolute accuracy of WVR water vapor measurements inferred from multiple water vapor techniques. *Journal of Geodynamics*, 72, 86–94.
- Mateus, P., Mendes, V. B., & Pires, C. A. L. (2022). Global Empirical Models for Tropopause Height Determination. *Remote Sensing*, 14(17), 4303. <https://doi.org/10.3390/rs14174303>
- Mears, C. A., Wang, J., Smith, D., & Wentz, F. J. (2015). Intercomparison of total precipitable water measurements made by satellite-borne microwave radiometers and ground-based GPS instruments. *Journal of Geophysical Research*, 120(6), 2492–2504. <https://doi.org/10.1002/2014JD022694>
- Meng, X., Cheng, J., & Liang, S. (2017). Estimating land surface temperature from Feng Yun-3C/MERSI data using a new land surface emissivity scheme. *Remote Sensing*, 9(12), 1247.
- Mohammadi Ahoei, M. A., & Sam-Khaniani, A. (2024). Using the multivariate linear regression method to model the 2-meter air temperature from MODIS sensor data. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(3), 803–821. <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2024.376789.1007609>
- Rahimi, H., Asgari, J., & Nafisi, V. (2023). The effect of data sources on calculating mean temperature and integrated water vapor in Iran. *Meteorological Applications*, 30(6), e2167. <https://doi.org/10.1002/met.2167>
- SamKhaniani, A. (2023). Evaluation of GPS RO derived precipitable water vapor against ground-based GPS observations over Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 16(4), 85–100. doi: 10.30499/ijg.2022.343984.1426
- Sam-Khaniani, A., & Naeijian, R. (2024). Comparison of tropospheric delay models using ground based GPS ZTD values in the atmosphere of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 23–36. <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2023.353897.1007493>
- Sharifi, M. A., Azadi, M., & Khaniani, A. S. (2016). Numerical simulation of rainfall with assimilation of conventional and GPS observations over north of Iran. *Annals of Geophysics*, 59(3). <https://doi.org/10.4401/ag-6919>
- Shi-Jie, F., Zang, J.-F., Peng, X.-Y., Su-Qin, W., Yan-Xiong, L., & Ke-Fei, Z. (2016). Validation of atmospheric water vapor derived from ship-borne GPS measurements in the Chinese Bohai Sea. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(2), 2.
- Shi, J., Xu, C., Guo, J., & Gao, Y. (2014). Real-time GPS precise point positioning-based precipitable water vapor estimation for rainfall monitoring and forecasting. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6), 3452–3459.
- Sun, P., Wu, S., Zhang, K., Wan, M., & Wang, R. (2021). A new global grid-based weighted mean temperature model considering vertical nonlinear variation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(3), 2529–2542. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2529-2021>
- Sun, Y., Yang, F., Liu, M., Li, Z., Gong, X., & Wang, Y. (2023). Evaluation of the weighted mean temperature over China using multiple reanalysis data and radiosonde. *Atmospheric Research*, 285, 106664. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106664>
- Wang, J., Zhang, L., Dai, A., Van Hove, T., & Van Baelen, J. (2007). A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11).
- Wang, X., Zhang, K., Wu, S., Fan, S., & Cheng, Y. (2016). Water vapor-weighted mean temperature and its impact on the determination of precipitable water vapor and its linear trend. *Journal of Geophysical Research*, 121(2), 833–852. <https://doi.org/10.1002/2015JD024181>
- Ward, D. M., Kursinski, E. R., Otarola, A. C., Stovern, M., McGhee, J., Young, A., Hainsworth, J., Hagen, J., Sisk, W., & Reed, H. (2017). Retrieval of water vapor using ground-based observations from a prototype ATOMMS active cm-and mm-wavelength occultation instrument. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1–36.
- Wick, G. A., Kuo, Y.-H., Ralph, F. M., Wee, T.-K., & Neiman, P. J. (2008). Intercomparison of integrated water vapor retrievals from SSM/I and COSMIC. *Geophysical Research Letters*, 35(21).
- Xia, P., Ye, S., Chen, B., Chen, D., & Xu, K. (2020). Improving the weighted mean temperature model: A case study using nine year (2007–2015) radiosonde and COSMIC data in Hong Kong. *Meteorological Applications*, 27(1), e1864. <https://doi.org/10.1002/met.1864>
- Yao, Y., Shan, L., & Zhao, Q. (2017). Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application. *Scientific Reports*, 7(1), 12465. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12593-z>
- 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), 3428303.
<https://doi.org/10.1155/2018/3428303>
- Zhang, T., Wen, J., der Velde, R., Meng, X., Li, Z., Liu, Y., & Liu, R. (2008). Estimation of the total atmospheric water vapor content and land surface temperature based on AATSR thermal data. *Sensors*, 8(3), 1832–1845.