

Comparison of tropospheric delay models using ground based GPS ZTD values in the atmosphere of Iran

Sam-Khaniani, A.¹  | Naeijian, R.¹ 

1. Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Corresponding Author E-mail: ali.sam@nit.ac.ir

(Received: 29 Jan 2023, Revised: 30 May 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 5 May 2024)

Summary

There are several sources of error that must be considered for accurate GPS positioning. One of these sources of error is the tropospheric delay of the signal, whose accurate estimation leads to an increase in the accuracy of positioning in navigation, as well as the accurate calculation of precipitable water vapor for meteorological and climatological applications. One of the accurate methods in determining ZTD values is to estimate it along with the coordinate components of ground stations using GPS observation processing. However, it is not possible to access permanent GPS receivers in all places and it is expensive. In addition to permanent GPS station data processing, the use of atmospheric profiles obtained from the radiosonde launch at each station is one of the other conventional methods for calculating the tropospheric zenith delay. The low temporal resolution of radiosonde observations (usually twice a day) and the high cost are the main limitations of this method. Moreover, the use of global or regional empirical models or models based on surface meteorological data are among the methods of calculating Zenith Tropospheric Delay (ZTD). It is necessary to evaluate the accuracy and precision of these models in each region before using them in the intended application. Iran has diverse topography and climatic conditions, so different tropospheric delay models may have different statistical quality in Iran compared to other regions. On the other hand, until today, no comprehensive research has been done in the region of Iran to evaluate the different tropospheric delay models presented in recent years.

Empirical ZTD models presented in recent years are a function of position, place and time and some models, such as Hopfield and Sastamoinen ZTD models are known as famous models based on surface meteorological data. Also, according to research conducted in other parts of the world, HGPT2 and GTrop models are among the successful global empirical models in ZTD estimation that have been proposed in recent years and operate independently of surface meteorological parameters.

In this study, with the help of one year of ZTD estimates obtained from the processing of GPS observations in 28 stations located in the region of Iran, the statistical qualities of Hopfield, Sastamoinen, HGPT2 and GTrop models were investigated. Based on the results, the average RMSE values of one year of ZTD calculated with the help of Hopfield, HGPT2, GTrop and Sastamoinen models were estimated to be 75, 38.8, 31.7 and 26.1 mm, respectively. Also, the average biases of ZTD values obtained from Hopfield, HGPT2, GTrop and Sastamoinen models in the whole region were -8.69, 18.9, 5.4 and -10.8 mm, respectively. The models of Hopfield and Sastamoinen were the most consistent with the ZTD values obtained from the processing of ground GPS observations. The results of this study showed that, in general, the Sastamoinen model is statistically more efficient than the other three models, but in order to achieve proper accuracy, it is necessary to develop a model suitable for the region of Iran.

Keywords: Zenith Tropospheric Delay, GPS, Saastamoinen, GTrop.

Cite this article: 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. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353897.1007493>

E-mail: (1) naeijianrohollah@gmail.com



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353897.1007493>

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

مقایسه مدل‌های تأخیر تروپوسفری با مقادیر زمین مبنای GPS ZTD در جو ایران

علی سام خانیانی^۱ | روح الله نائیجیان^۱

۱. گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: ali.sam@nit.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۳/۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۲/۱۶)

چکیده

برای تعیین دقیق موقعیت به کمک GPS چندین منبع خطا وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. یکی از این منابع خطا، تأخیر تروپوسفری سیگنال است که برآورد دقیق آن منجر به افزایش دقت تعیین موقعیت در ناوبری و همچنین محاسبه دقیق بخار آب قابل بارش برای هواشناسان و اقلیم‌شناسان می‌شود. علاوه بر پردازش مشاهدات GPS، استفاده از مدل‌های جهانی یا منطقه‌ای تجربی و یا مدل‌های مبتنی بر داده‌های هواشناسی سطحی از جمله روش‌های محاسبه تأخیر تروپوسفری زینتی (ZTD) به حساب می‌آیند. ارزیابی دقت و صحت این مدل‌ها در هر منطقه قبل از استفاده در کاربری مورد نظر، امری ضروری است. در این مطالعه، به کمک یک سال از برآوردهای ZTD به دست آمده از پردازش مشاهدات GPS در ۲۸ ایستگاه واقع در منطقه ایران، کیفیت آماری مدل‌های هاپفیلد، ساستاموین، HGPT2 و GTrop بررسی شد. بر اساس نتایج، میانگین RMSE مقادیر یک سال از ZTD محاسبه شده به کمک مدل‌های هاپفیلد، HGPT2، GTrop و ساستاموین به ترتیب ۰.۷۵، ۳.۸/۸، ۳.۱/۷ و ۲.۶/۱ میلی‌متر برآورد شد. همچنین، میانگین بایاس مقادیر ZTD حاصل از مدل‌های هاپفیلد، HGPT2، GTrop و ساستاموین در کل منطقه به ترتیب ۰.۶۹/۸، ۱.۸/۹، ۵/۴ و ۱۰/۸- میلی‌متر به دست آمد. بر اساس مقادیر ضرایب همبستگی، مدل هاپفیلد و ساستاموین بیشترین همخوانی را با مقادیر ZTD حاصل از پردازش مشاهدات GPS زمینی داشتند. نتایج این مطالعه، نشان داد که به‌طور کلی مدل ساستاموین نسبت به سه مدل دیگر از لحاظ آماری کارایی بیشتری دارد اما برای رسیدن به دقت‌های مناسب نیاز است که مدلی مناسب با منطقه ایران توسعه داده شود.

واژه‌های کلیدی: تأخیر تروپوسفری زینتی، GPS، ساستاموین، GTrop.

۱. مقدمه

زمینی، در هنگام عبور از اتمسفر خنثی، به دلیل برخورد با گازهای خشک و ذرات بخار آب موجود در جو به تأخیر افتاده و خم می‌شوند (بویس و همکاران، ۱۹۹۲). از آنجایی که تقریباً ۸۰ درصد از جرم اتمسفر، در تروپوسفر وجود دارد (شومن و داوولینگ، ۲۰۱۴) سهم زیادی از تأخیر و خم شدن سیگنال در این لایه از جو زمین اتفاق می‌افتد. تأخیر تروپوسفری سیگنال، بسته به زاویه ارتفاع ماهواره می‌تواند بین ۲ تا ۲۰ متر متغیر باشد (پنا و همکاران، ۲۰۰۱). تأخیر مایل تروپوسفر، معمولاً با استفاده از توابع تصویر وابسته به زاویه ارتفاعی ماهواره GNSS به جهت زینت تبدیل می‌شوند و به نام تأخیر زینتی تروپوسفر شناخته می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

سیستم‌های جهانی ناوبری ماهواره‌ای (GNSS) در سراسر جهان به‌طور معمول به‌عنوان ابزاری حیاتی برای ناوبری و موقعیت‌یابی شناخته شده هستند و مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی دیگر، از این فناوری برای استخراج اطلاعات در مورد شرایط جو زمین هم استفاده می‌شود که با عنوان هواشناسی به کمک GNSS شناخته می‌شود (دینگ و همکاران، ۲۰۱۶). مشاهدات GNSS مشابه با سایر روش‌های تعیین موقعیت آلوده به خطاهایی هستند. تأخیر تروپوسفری زینتی (ZTD) در میان منابع مختلف خطا روی مشاهدات GNSS، به‌عنوان یکی از منابع اصلی خطا مورد توجه قرار می‌گیرد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹). سیگنال‌های GNSS در مسیر انتقال از ماهواره به گیرنده

روش‌ها و ابزار زیادی برای به دست آوردن مقادیر ZTD وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از مشاهدات رادیوسوند (کاتسوجیانوپولوس و همکاران، ۲۰۰۶)، رادیومتر بخار آب (تکه و همکاران، ۲۰۱۳)، تداخل‌سنجی پایه بسیارطولانی (VLBI) (سوجا و همکاران، ۲۰۱۵)، پردازش داده‌های GNSS (نیل و همکاران، ۲۰۰۱؛ پیکیرداس و همکاران، ۲۰۱۴) و مدل‌سازی (لی و همکاران، ۲۰۱۲) اشاره کرد.

به‌طور کلی دو دسته از مدل‌های تأخیر تروپوسفری وجود دارد. دسته اول، مدل‌هایی که با استفاده از پارامترهای سطحی هواشناسی اندازه‌گیری شده بر روی زمین اجرا می‌شوند: همانند مدل ساستاموینن (ساستاموینن، ۱۹۷۲)، هاپفیلد (هاپفیلد، ۱۹۶۹) و بلک (بلک و ایسنر، ۱۹۸۴) است. دسته دوم، مدل‌های تجربی هستند که خروجی آنها فقط وابسته به زمان و مکان یک ایستگاه است. همانند سری مدل‌های GZTD (یانو و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۲۰۱۶؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، سری مدل‌های IGGtrop (لی و همکاران، ۲۰۱۲) و سری مدل‌های GPT (بوهم و همکاران، ۲۰۰۷؛ بوهم و همکاران، ۲۰۱۵؛ لندسکرون و بوهم، ۲۰۱۸).

با توجه به اهمیت ZTD در کاربری‌های مختلف، در سال‌های گذشته مدل‌های زیادی به منظور به دست آوردن مقادیر این پارامتر، توسعه داده شده‌اند. برای مثال، کالینز و لنگلی در سال ۱۹۹۸ مدلی به نام UNB3 توسعه دادند که تغییرات تروپوسفر را در عرض جغرافیایی و فصل‌های مختلف در نظر می‌گیرد. آنها تغییرات در عرض را با درون‌یابی خطی و تغییرات فصلی را با استفاده از توابع کسینوسی از زمان لحاظ کردند. بعدها لئوناردو و همکاران در سال ۲۰۰۸ با بهبود مدل UNB3، مدل UNB3m را پیشنهاد دادند. یکی از ویژگی‌های خوب سری‌های UNB3 الگوریتم‌های ساده و تعداد کم پارامترهای آن است که دقت آن تقریباً ۵۰ میلی‌متر می‌باشد (مائو و همکاران، ۲۰۲۱).

پنا و همکاران (۲۰۰۱) بر اساس ارتفاع گیرنده و برآوردهایی از پارامترهای هواشناسی در یک الگوریتم

تأخیر تروپوسفری در راستای زینت به دو قسمت خشک (ZHD) و تر (ZWD) تقسیم می‌شوند (دیویس و همکاران، ۱۹۸۵). قسمت خشک معمولاً با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی از پارامترهای هواشناسی با دقت بالایی مدل‌سازی می‌شود. به دلیل متغیر بودن رفتار قسمت تر در زمان و مناطق مختلف، با دقت بالا قابل مدل‌سازی نیست و به شدت به تغییرات بخار آب و رطوبت لایه تروپوسفر وابسته است. تأخیر تروپوسفری سیگنال‌های GNSS علاوه بر این که پارامتری مهم در فرایند ناوبری و موقعیت‌یابی است (دیوان و همکاران، ۱۹۹۶؛ زومبرگ و همکاران، ۱۹۹۷؛ ژانک و همکاران، ۲۰۱۷)، مبنایی برای بازیابی بخار آب قابل بارش (PWV) نیز می‌باشد (لی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). هنگام عبور سیگنال از لایه‌های جو زمین، اثرات یونسفری و تروپوسفری روی سیگنال منجر به تأخیر و خمش آن می‌شوند. با استفاده از ترکیب خطی مشاهدات سیگنال‌های L1 و L2 در سامانه GPS می‌توان اثر یونسفر را تا حد خیلی زیادی برطرف کرد. مقدار باقی‌مانده خطای تروپوسفری روی سیگنال به دو بخش تر و خشک تقسیم می‌شوند که بخش خشک یا همان ZHD با دقت خیلی بالایی به کمک مشاهدات فشار سطحی در ایستگاه موردنظر قابل محاسبه است (ساستاموینن، ۱۹۷۲). از طرف دیگر، هنگام پردازش مشاهدات GPS، علاوه بر مجهولات مختصاتی ایستگاه‌ها، مقادیر ZTD هم به‌عنوان مجهولات اضافی برآورد می‌شود. بنابراین با تفاضل مقادیر ZTD برآورد شده از مقادیر ZHD محاسبه شده، اثر تر تروپوسفری (ZWD) برآورد می‌شود، پارامتری که در ارتباط مستقیم با مقادیر PWV موجود در جو بالای سر ایستگاه است. با استفاده از یک فاکتور بدون واحد، می‌توان مقادیر ZWD را به PWV تبدیل کرد ($ZWD = \Pi \cdot PWV$). فاکتور Π تابعی از ضرایب ثابت فیزیکی و همچنین دمای میانگین اتمسفری است. با در دست داشتن دمای سطحی در ایستگاه موردنظر می‌توان به کمک مدل خطی، مقدار دمای میانگین اتمسفری را محاسبه کرد و در نهایت PWV را محاسبه کرد.

بایاس مقادیر تأخیر تروپوسفری به ۲ میلی‌متر کاهش یافت.

سان و همکاران (۲۰۱۷) بر اساس توابع تجربی متعامد (EOF) و با استفاده از داده‌های GGOS در یک دوره ۴ ساله، مدل GEOFT را ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل پیشنهادی دارای بایاس ۳- میلی‌متر و همچنین RMSE ۳۹ میلی‌متر می‌باشد. سان و همکاران (۲۰۱۹) بر اساس ۴۰ سال داده جمع‌آوری شده از باز تحلیل ECMWF، یک مدل تجربی جدید به نام Gtrop را ارائه دادند. آنها ZHD را با متوسط بایاس ۱ میلی‌متر و متوسط RMSE ۶/۵ میلی‌متر تخمین زدند. همچنین، مدل Gtrop مقادیر ZWD را با متوسط بایاس ۱/۳ و متوسط RMSE ۹/۶ میلی‌متر تخمین می‌زند. چن و همکاران (۲۰۲۰) بر اساس سری زمانی تأخیر زینتی تروپوسفر برآورد شده در ایستگاه‌های GNSS شبکه مشاهدات حرکات پوسته چین و سایت‌های GNSS مناطق اطراف، مدل SHAtropE توسعه دادند. آنها برای این کار از داده‌های ۳۱۰ سایت GNSS در طول ۷ سال استفاده کردند و به RMSE برابر با ۳۵ میلی‌متر دست یافتند.

کشور ایران دارای توپوگرافی و شرایط اقلیمی متنوع است، بنابراین مدل‌های مختلف تأخیر تروپوسفری ممکن است کیفیت آماری متفاوتی را در منطقه ایران نسبت به سایر مناطق داشته باشند. از طرفی دیگر، تا به امروز تحقیق جامعی در منطقه ایران به منظور ارزیابی مدل‌های مختلف ارائه شده در سال‌های اخیر که تابعی از موقعیت، محل و زمان هستند و همچنین مدل‌های معروف مبتنی بر داده‌های هواشناسی سطحی صورت نگرفته است. مدل‌های هاپفیلد و ساستاموینن به عنوان مدل‌های معروف مبتنی بر داده‌های هواشناسی سطحی شناخته شده هستند. همچنین، با توجه به تحقیقات انجام شده در سایر نقاط جهان، مدل‌های HGPT2 و GTrop جزء مدل‌های جهانی موفق در برآورد ZTD هستند که در سال‌های اخیر مطرح شده‌اند و مستقل از پارامترهای هواشناسی سطحی عمل می‌کنند. هدف اصلی از انجام این تحقیق، ارزیابی کیفیت آماری محاسبه

تصحیح تجربی به مدل‌سازی تأخیر زینتی تروپوسفر پرداخته و مدل EGNOS را به صورت محلی برای بریتانیا توسعه دادند. آنها برای این کار از داده‌های پنج ایستگاه بریتانیا به مدت یک سال استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل EGNOS، تأخیری زینتی تروپوسفر را با RMSE بین ۴۰ تا ۴۷ میلی‌متر برآورد می‌کند، همچنین بیشترین خطای آنها بین ۱۳۲ تا ۱۷۸ میلی‌متر بوده است. در سال ۲۰۱۲ با استفاده از ۴ سال داده جمع‌آوری شده از مراکز ملی پیش‌بینی محیط‌زیست (NCEP)، مدل جدیدی به نام IGGtrop ارائه شد. میانگین جهانی بایاس برای این مدل ۸- میلی‌متر و همچنین RMSE نیز ۴۰ میلی‌متر برآورد شد. این مدل از داده‌های هواشناسی در ۳ بعد طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع بهره می‌گیرد. این امر موجب افزایش حجم ذخیره‌سازی این مدل نسبت به مدل‌های دیگر می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۱۲).

مطالعه‌ای دیگر با استفاده از داده‌های سری زمانی ۴ بعدی ZTD به دست آمده از سیستم مشاهده ژئودتیک جهانی (GGOS)، مدل جهانی GZTD را پیشنهاد کرد. این مدل به پارامترهای هواشناسی نیازی ندارد و بر اساس هارمونیک‌های کروی توسعه یافته است. در این مدل تغییرات طول جغرافیایی هم لحاظ شده است، در صورتی که مدل‌های UNB فقط تغییرات عرض جغرافیایی را لحاظ می‌کنند. نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین بایاس و RMSE این مدل به ترتیب ۲۰ و ۳۷ میلی‌متر می‌باشد (یائو و همکاران، ۲۰۱۳). بوهم و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های باز تحلیل ECMWF مدل GPT2w را به عنوان یکی دیگر از مدل‌های تجربی تروپوسفر توسعه دادند. مدل GPT2w تأخیر زینتی تروپوسفر را با بایاس متوسط کمتر از ۱ میلی‌متر و انحراف معیار ۳۶ میلی‌متر برای ۳۴۱ ایستگاه GNSS جهانی تخمین زد. این مدل صرفاً بر اساس داده‌های زمان و مکان ایستگاه‌ها و بدون اندازه‌گیری‌های هواشناسی در ایستگاه، ZTD را به دست می‌دهد. یائو و همکاران (۲۰۱۶) با در نظر گرفتن تغییرات روزانه، مدل GZTD2 را توسعه دادند که نسبت به مدل GZTD برتری داشت چرا که

مطالعه ۲۸ ایستگاه مجهز به سنسورهای هواشناسی از کل ایستگاه‌های IPGN به صورت پراکنده در کل کشور انتخاب شدند. محل قرارگیری ایستگاه‌های انتخاب شده در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این پژوهش سعی شده است که ایستگاه‌های انتخاب شده دارای پراکندگی مکانی تقریباً متقارنی باشند. علاوه بر توزیع تقریباً یکنواخت ایستگاه‌ها از لحاظ طول و عرض ژئودتیکی، ارتفاع ایستگاه‌ها بین ۲۰/۶۶۵۲- تا ۲۲۷۶/۱۴۱۸ متر متغیر است. این امر نشان‌دهنده توزیع ایستگاه‌های انتخاب شده در ارتفاع‌های مختلف می‌باشد.

در این مطالعه، دو دسته داده به مدت یک سال (۲۰۱۲) مورد استفاده قرار گرفتند. دسته اول از این داده‌ها، داده‌های خام GPS هستند که از ۲۸ ایستگاه دائمی GPS انتخاب شده جمع‌آوری شدند. دسته دوم از این داده‌ها، داده‌های هواشناسی هستند که از سنسورهای هواشناسی قرار گرفته در ایستگاه‌های انتخاب شده استخراج و جمع‌آوری شده‌اند.

مشاهدات خام GPS با نرخ ۱ ثانیه ذخیره و با فرمت راینکس مورد پردازش به منظور تعیین مؤلفه‌های موقعیت و تأخیر تروپوسفری سیگنال در ایستگاه‌ها قرار گرفتند. از طرفی دیگر سنسور هواشناسی مورد استفاده در ایستگاه‌ها، به تفکیک زمانی ۱۵ دقیقه یک‌بار در کل بازه مشاهداتی، داده‌های هواشناسی سطحی را اندازه‌گیری و در قالب یک فایل با فرمت m. برای هر روز ذخیره می‌شود. فایل‌های گردآوری شده، شامل داده‌های فشار (هکتو پاسکال)، دما (درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی (درصد) هستند. در ادامه، مدل‌های مختلف ZTD و برآوردهای این پارامتر که از پردازش مستقیم مشاهدات GPS به دست آمده‌اند به منظور مقایسه آماری معرفی خواهند شد.

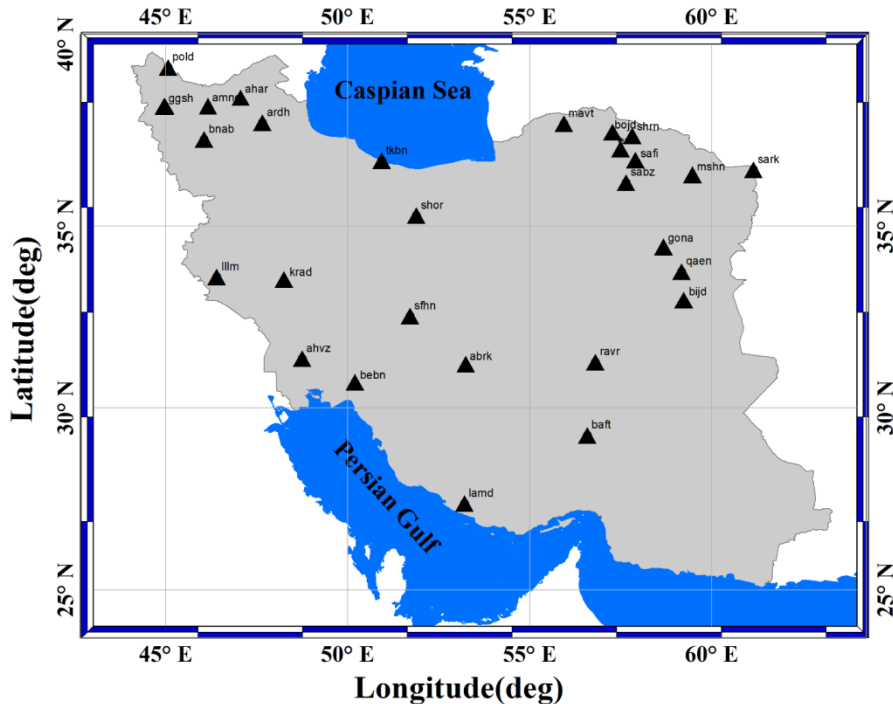
تأخیر تروپوسفری به کمک چهار مدل هاپفیلد، ساستاموینن، HGPT2 و GTrop در منطقه ایران است. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند دقت و صحت این مدل‌ها را در اختیار استفاده‌کنندگان مختلف در کاربری‌های ناوبری و همچنین هواشناسی در منطقه مورد مطالعه قرار دهد.

در بخش ۲ نحوه محاسبه مقادیر GPS-ZTD به عنوان مقادیر قابل اعتماد در ارزیابی آماری و همچنین مدل‌های HGPT2، هاپفیلد، ساستاموینن و GTrop آورده شده است. در بخش بعد، نحوه ارزیابی آماری مدل‌ها در منطقه بیان می‌شود. در بخش ۴، نتایج آماری مقایسه صحت و دقت مدل‌های مختلف نسبت به داده‌های قابل اعتماد GPS ZTD در ۲۸ ایستگاه پراکنده در منطقه مورد بحث قرار می‌گیرد. در پایان، بخش ۵ نتایج اصلی این مطالعه را بیان خواهد کرد.

۲. داده‌ها و روش کار

۲-۱. داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، کشور ایران است. اولین شبکه ژئودزی در این کشور توسط سازمان نقشه برداری کل کشور از سال ۱۳۶۶ طراحی و اجرا شد. بعد از گذشت سال‌ها این سازمان هم‌چنان به توسعه و ایجاد ایستگاه‌های ژئودزی در کشور پرداخت. ایستگاه‌های دائم GPS زمینی در ایران هم اکنون دارای تعداد بالای ۱۰۰ ایستگاه می‌باشند. در بعضی از ایستگاه‌های دائم علاوه بر گیرنده‌های GPS، سنسورهای هواشناسی وجود دارند که پارامترهای هواشناسی شامل فشار، رطوبت نسبی و دما در ایستگاه‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند. در شبکه IPGN تمام ایستگاه‌های دارای سنسور هواشناسی نمی‌باشند. در این



شکل ۱. توزیع ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه. نقاطی که با مثلث نشان داده شده‌اند در برآورد مدل ساستاموینن بهبودیافته استفاده شده‌اند. نقاط نشان داده شده با دایره در ارزیابی خارجی مدل پیشنهادی استفاده شده‌اند.

بازتحلیل ERA-Interim مدل GTrop را ارائه کردند. در مدل پیشنهادی آنها پارامترهای ZHD، ZWD و دمای میانگین اتمسفری (T_m) برآورد می‌شود. تحقیق آنها نشان داد که مدل پیشنهادی در محاسبه تمامی پارامترها نسبت به مدل GPT2w صحت بالاتری دارد. تأخیر تروپوسفری و T_m دارای تغییرات فصلی قوی هستند (بوهم و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین در مطالعه سان و همکاران نشان داده شد که این پارامترها دارای روندهای خطی نیز هستند. تغییرات زمانی هر سه مؤلفه خروجی مدل GTrop با روندهای خطی و تغییرات فصلی مشخص می‌شود. ارزیابی مدل GTrop بر اساس یک سال داده جمع‌آوری شده از محصولات بازتحلیل ERA-Interim و رادیوسوند نشان داد که این مدل نسبت به مدل متعارف GPT2w دارای دقت بالاتری است. مدل GTrop از نظر RMSE ۳۹/۸ درصد بهبود برای ZWD، ۸/۶ درصد بهبود برای ZHD و ۷۸/۶ درصد بهبود برای میانگین وزنی دما نسبت به مدل GPT2w را دارا است (سان و همکاران، ۲۰۱۹).

۲-۲. محاسبه ZTD به کمک مشاهدات GPS

در این تحقیق، مقادیر ZTD حاصل از پردازش داده‌های خام گیرنده‌های GPS در ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌عنوان مقادیر قابل اعتماد برای ارزیابی مدل‌های محاسبه ZTD در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شوند. در هنگام برآورد مؤلفه‌های موقعیت ایستگاه‌های GPS، پارامتر ZTD هم به‌صورت مجهولات جانبی قابل برآورد هستند. در اینجا مشاهدات روزانه ایستگاه‌های GPS به روش پردازش شبکه‌ای توسط نرم افزار گامیت مورد پردازش قرار گرفتند و مقادیر ZTD هم‌زمان با مؤلفه‌های مختصاتی برآورد شدند. در هنگام پردازش مشاهدات شبکه GPS، مقدار آستانه زاویه ارتفاعی سیگنال‌ها ۱۰ درجه و تابع تصویر GMF، محصولات نهایی مداری و ساعت IGS، پارامترهای توجیه زمین IERS 2010 و مدل کالیبراسیون آنتن IGS08.atx استفاده شدند.

۲-۳. مدل GTrop

سان و همکاران (۲۰۱۹) بر اساس ۳۹ سال از داده‌های

در رابطه ۴، φ عرض ژئودتیک، P فشار (hPa)، T_c نشان‌دهنده دما ($^{\circ}\text{C}$)، h ارتفاع از سطح بیضوی (km)، e نشان‌دهنده فشار بخار آب (hPa)، e_s فشار بخار اشباع (hPa) و rh رطوبت نسبی (%) هستند. از آنجا که در ایستگاه‌های GPS به جای مقادیر فشار بخار آب مقادیر رطوبت نسبی اندازه‌گیری می‌شود، ابتدا به کمک رابطه تن در روابط ۴، e_s از اندازه‌گیری‌های دمای سطحی (T_c) محاسبه می‌شود (تن، ۱۹۳۰). سپس به کمک رطوبت نسبی و فشار بخار اشباع، مقادیر فشار بخار آب مورد نیاز برای مدل ساستاموینن محاسبه می‌شوند.

۲-۶. مدل HGPT2

ماتئوس و همکاران (۲۰۲۰) بر اساس ۲۰ سال از داده‌های جمع‌آوری شده از داده‌های بازتحلیل ECMWF مدل HGPT را به‌عنوان اولین نسل از این مدل ارائه کردند. آنها با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 مدلی را ارائه کردند که دمای هوای سطح، فشار سطح، ZHD و T_m را خروجی می‌دهد. آنها در مدل پیشنهادی خود روابطی را به‌عنوان مدل دمای سطحی، فشار سطحی در نظر گرفتند و بر اساس ۲۰ سال داده بازتحلیل، ضرایب مدل را برآورد کردند. همچنین، فشار به‌دست آمده توسط مدل HGPT در مدل ساستاموینن اصلاح شده قرار می‌گیرد و تأخیر هیدروستاتیکی (ZHD) را به‌عنوان یکی دیگر از خروجی‌های این مدل فراهم می‌آورد. در سال ۲۰۲۱ مدل HGPT2 به‌عنوان نسخه بهبودیافته HGPT معرفی شد (ماتئوس و همکاران، ۲۰۲۱). در مدل HGPT2 علاوه بر خروجی‌های داده شده در نسل قبل، رطوبت نسبی و قسمت تر تأخیر زینتی تروپوسفر (ZWD) و بخار آب قابل بارش برآورد می‌شود. از آنجایی که تأخیر زینتی کلی تروپوسفر برابر مجموع ZHD و ZWD است، می‌توان به کمک مدل HGPT2 مقدار تأخیر زینتی کلی تروپوسفر را برای هر نقطه از زمان و مکان محاسبه کرد.

۳. ارزیابی آماری

پس از آماده شدن سری‌های زمانی ZTD به‌دست آمده از

۲-۴. مدل هاپفیلد

مدل هاپفیلد بر اساس داده‌های هواشناسی جمع‌آوری شده توسط سنسورهای هواشناسی در ایستگاه‌های GPS زمینی می‌تواند تأخیر تروپوسفری زینتی را برآورد کند (هاپفیلد، ۱۹۶۹). میزان انکسار کل تروپوسفری برابر با مجموع انکسارهای قسمت‌های خشک (N_d) و مرطوب (N_w)؛ بنابراین تأخیر کلی زینتی تروپوسفر برابر است با مجموع تأخیر زینتی تروپوسفر خشک و قسمت مرطوب آن (رابطه ۱). مدل هاپفیلد برای تخمین مقدار تأخیر زینتی کلی تروپوسفری در رابطه ۲ آورده شده است.

$$ZTD = 10^{-6} \times \int (N_d + N_w) dh \quad (1)$$

$$ZTD_{Hopfield} = 1.552 \times 10^{-5} \times \frac{P_0}{T_0} (h_d - h_0) + 0.07465 \times \frac{e_0}{T_0^2} (h_w - h_0) \quad (2)$$

در رابطه ۲، P_0 ، T_0 ، e_0 و h_0 به ترتیب فشار (hPa)، دما (K)، فشار بخار آب (hPa) و ارتفاع سطح زمین بر حسب متر هستند. همچنین h_d ، h_w در رابطه ۳ تعریف شده‌اند.

$$\begin{aligned} h_d &= 40136 + 148.72(T_0 - 273.15) \\ h_w &= 11000m \end{aligned} \quad (3)$$

۲-۵. مدل ساستاموینن

مدل ساستاموینن در سال ۱۹۷۲ توسط ساستاموینن در اتاوا کانادا ارائه شد. همانند مدل هاپفیلد، این مدل متکی به داده‌های هواشناسی جمع‌آوری شده در ایستگاه زمینی است. با این حال، علاوه بر داده‌های هواشناسی، مختصات ژئودتیک ایستگاه در محاسبه تأخیر تروپوسفر زینتی به کمک مدل ساستاموینن به کار گرفته می‌شود. به عبارت دیگر مدل ساستاموینن به کمک فشار، دما، فشار بخار آب، رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه و ارتفاع و عرض ژئودتیک ایستگاه، تأخیر زینتی تروپوسفری را به‌دست می‌دهد.

$$\begin{aligned} ZTD_{Saastamoinen} &= 0.0022768 \\ &\times \frac{\left[P + \left(0.05 + \frac{1255}{T_c + 273.15} \right) e \right]}{f(\varphi, h)} \\ e_s &= 6.1078 \times e^{\frac{17.269T_c}{T_c + 237.3}} \quad e = e_s \times \frac{rh}{100} \\ f(\varphi, h) &= 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.0028h \end{aligned} \quad (4)$$

هافیلد، Gtrop، HGPT2 و ساستاموین با رنگ‌های متفاوت در ایستگاه‌های safi، abrk، baft، illm در کنار مقادیر حاصل از پردازش مشاهدات GPS (گراف مشکی) آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، مقادیر حاصل از مدل مرسوم ساستاموین (گراف قرمز) نسبت به سایر مدل‌ها موافقت بیشتری با مقادیر قابل‌اعتماد حاصل از مشاهدات GPS (گراف مشکی) دارند. از طرفی دیگر مدل هافیلد (گراف زرد رنگ) در هر چهار ایستگاه دارای بایاس بالایی نسبت به مقادیر GPS-ZTD است. علاوه بر این، همان‌طور که از قبل انتظار می‌رفت مدل‌های Gtrop (گراف قهوه‌ای) و HGPT2 (گراف آبی) که مستقل از مشاهدات محلی هواشناسی به برآورد ZTD می‌پردازند، قادر به نمایش تغییرات و نوسانات کوتاه‌مدت این پارامتر در هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها نبوده است. با این حال، دو مدل اخیر به‌طور میانگین رفتار سالانه و نیم‌سالانه ZTD در ایستگاه‌ها را تا حد زیادی با موفقیت نشان می‌دهند.

علاوه بر مقایسه گرافیکی مدل‌های مختلف ZTD با یکدیگر در شکل ۲، ضروری است که کارایی مقادیر تأخیر تروپوسفری همه مدل‌ها در تمام ایستگاه‌ها با یکدیگر مقایسه شوند. به همین منظور در شکل ۳ مقادیر بایاس، RMSE و ضریب همبستگی برای همه مدل‌ها در مقایسه با GPS-ZTD در هر یک از ایستگاه‌ها آورده شده است. بر اساس مطالعه وی و همکاران در سال ۲۰۰۹، اگر صحت پارامتر ZTD حدود ۴ تا ۱۰ میلی‌متر باشد و خطای دما و فشار سطحی به ترتیب ۲ میلی‌بار و ۲ کلوین باشد، مقادیر PWV را که با استفاده از این پارامترها در تکنیک هواشناسی زمین-مینا با GPS به دست می‌آیند دارای RMSE بین ۱/۱ تا ۱/۹ میلی‌متر خواهد بود. با توجه به مقادیر MBE در شکل ۳، به‌طور واضح بایاس منفی قابل توجه مدل هافیلد در تمامی ایستگاه‌ها دیده می‌شود. به‌طور کلی در تمامی ایستگاه‌ها قدرمطلق مقادیر MBE مدل Gtrop و ساستاموین نزدیک به هم می‌باشد ولی نسبت به مدل HGPT2 دارای بایاس کمتری هستند.

پردازش مشاهدات GPS و مدل‌های معرفی شده در تمامی ایستگاه‌ها برای کل بازه مطالعاتی، آماره‌های موردنیاز جهت ارزیابی چهار مدل تأخیر تروپوسفری محاسبه می‌شوند. برای بررسی میزان صحت و دقت ZTD هر یک از مدل‌های مورد مطالعه در منطقه، مقادیر خطای میانگین بایاس MBE، خطای RMSE و ضریب همبستگی (R) با مقادیر GPS-ZTD، در هر ایستگاه با استفاده از روابط ۵ تا ۷ محاسبه می‌شوند و مورد بحث قرار خواهند گرفت.

$$MBE(model) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ZTD_i^{model} - ZTD_i^{GPS}) \quad (5)$$

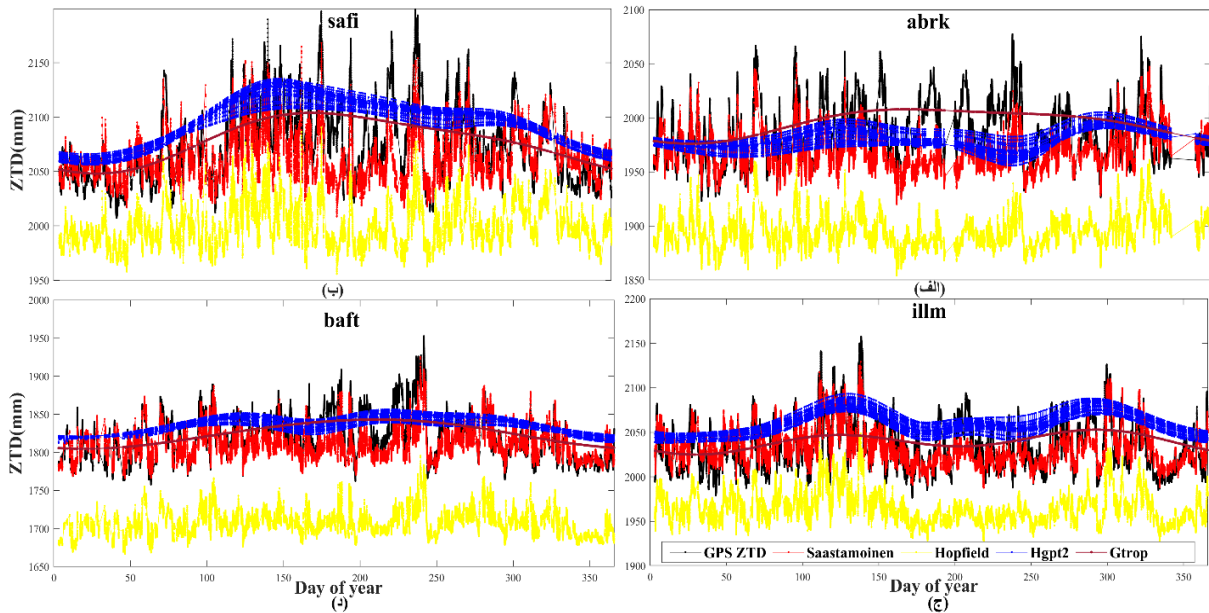
$$RMSE(model) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ZTD_i^{model} - ZTD_i^{GPS})^2} \quad (6)$$

$$R(model) = \frac{\sum_{i=1}^N (ZTD_i^{model} - ZTD_m^{model}) \sum_{i=1}^N (ZTD_i^{GPS} - ZTD_m^{GPS})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (ZTD_i^{model} - ZTD_m^{model})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (ZTD_i^{GPS} - ZTD_m^{GPS})^2}} \quad (7)$$

که N تعداد کل داده‌های موجود در سری زمانی ZTD متعلق به هر ایستگاه است. همچنین ZTD_i^{model} و ZTD_i^{GPS} مقادیر i ام ZTD مربوط به سری زمانی به دست آمده از مدل و پردازش مشاهدات GPS در ایستگاه مورد نظر است. در رابطه ۷، میانگین مقادیر سری زمانی ZTD در ایستگاه مورد نظر متناظر با پردازش مشاهدات GPS و محاسبات حاصل از مدل به ترتیب با ZTD_m^{model} و ZTD_m^{GPS} مشخص شده است.

۴. نتایج و بحث

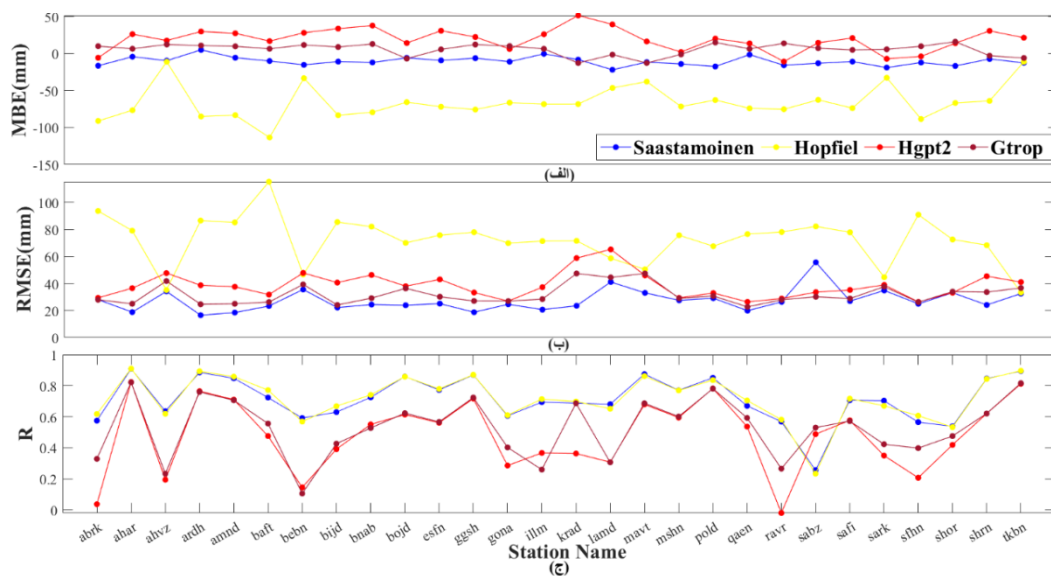
پس از پردازش مشاهدات GPS در تمامی ایستگاه‌ها، سری‌های زمانی ZTD برای کل بازه مطالعاتی در هر ایستگاه برآورد شدند و به‌عنوان مبنا در ارزیابی آماری سایر مدل‌های معرفی شده در بخش ۳ در نظر گرفته شد. در ابتدا به منظور مقایسه گرافیکی مدل‌های مختلف نسبت به مقادیر قابل اعتماد GPS-ZTD، در ۴ ایستگاه دلخواه که در مکان‌های مختلف قرار دارند، مقادیر حاصل از مدل‌های مختلف در مدت یک سال نمایش داده شده‌اند. در شکل ۲، سری‌های زمانی یک‌ساله مدل‌های



شکل ۲. مقایسه ZTD های حاصل از مدل ساستاموینن (قرمز)، هاپفیلد (زرد)، HGPT2 (آبی)، Gtrop (قهوه‌ای) و GPS-ZTD (مشکی) در ایستگاه‌های (الف) abrk، (ب) safi، (ج) illm و (د) baft.

در تمامی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که مدل Gtrop اگرچه مقایسه با یاس و RMSE کمتری نسبت به مدل‌های هاپفیلد و HGPT2 دارد و حتی بایاس کمتری نسبت به مدل ساستاموینن دارد ولی همبستگی پایین‌تری نسبت به مدل هاپفیلد و ساستاموینن در منطقه مورد مطالعه داشته است. همچنین بیشترین مقادیر همبستگی متعلق به مدل‌های هاپفیلد و ساستاموینن است که در اکثر ایستگاه‌ها بین ۰/۶ تا ۰/۹۱ برآورد شده است.

تقریباً برای تمامی ایستگاه‌ها، مدل ساستاموینن و هاپفیلد به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر RMSE را به خود اختصاص داده‌اند. با این حال، مقادیر RMSE مدل ساستاموینن نسبت به GPS-ZTD در برخی از ایستگاه‌ها به بیش از ۴۰ میلی‌متر می‌رسد که دقت مناسبی محسوب نمی‌شود. از اینرو، ارائه مدلی بهتر برای برآورد ZTD در منطقه مورد مطالعه ضروری به نظر می‌رسد. مقایسه مقادیر ضریب همبستگی مدل‌های مختلف نسبت به GPS-ZTD



شکل ۳. ارزیابی آماری مقادیر تأخیر تروپوسفری حاصل از مدل‌های ساستاموینن (قرمز)، هاپفیلد (زرد)، HGPT2 (آبی) و Gtrop (قهوه‌ای) در مقایسه با برآوردهای GPS-ZTD. برای ارزیابی مدل‌های ذکر شده، میانگین بایاس (الف)، RMSE (ب) و ضریب همبستگی (ج) در تمامی ایستگاه‌ها محاسبه شده است.

ساستاموین و کمترین مقادیر متعلق به مدل HGPT2 بوده است. علاوه بر بیان مقادیر میانگین آماره‌ها برای هر مدل تأخیر تروپوسفری در منطقه ایران (جدول ۳)، هیستوگرام اختلاف مقادیر ZTD به دست آمده از هر کدام از مدل‌ها نسبت به مقادیر متناظر GPS-ZTD در همه ایستگاه‌ها در شکل ۴ آورده شده است.

با استفاده از شکل ۴، توزیع مقادیر باقی‌مانده‌های هر مدل را می‌توان نسبت به سایر مدل‌ها مقایسه کرد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، پراکندگی مقادیر باقی‌مانده‌های مدل ساستاموین نسبت به سایر مدل‌ها کمتر است. به عبارت دیگر هیستوگرام مقادیر باقی‌مانده‌های مدل ساستاموین در منطقه ایران شکل کشیده‌تری را نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه داشته است که انعکاسی از RMSE کمتر این مدل نسبت به سایر مدل‌ها است. با این حال بایاس منفی مدل ساستاموین در منطقه ایران بر اساس هیستوگرام باقی‌مانده‌ها در شکل ۴ به وضوح مشخص است. از طرفی دیگر، میانگین باقی‌مانده‌های مدل هاپفیلد منفی است و فاصله زیادی را نسبت به صفر دارد. در مقابل، مدل جهانی HGPT2 مقادیر ZTD را بیشتر از مقدار واقعی در منطقه ایران برآورد می‌کند و بایاس مثبت در هیستوگرام باقی‌مانده‌های این مدل در شکل ۴، گویای این مسئله است. توزیع باقی‌مانده‌های هر دو مدل GTrop و HGPT2 دارای شکل نرمال است ولی کشیدگی بیشتر مدل GTrop نسبت به مدل HGPT2 و همچنین نزدیکی میانگین باقی‌مانده‌های آن به صفر نشان از دقت و صحت بالاتر این مدل نسبت به HGPT2 در منطقه ایران است.

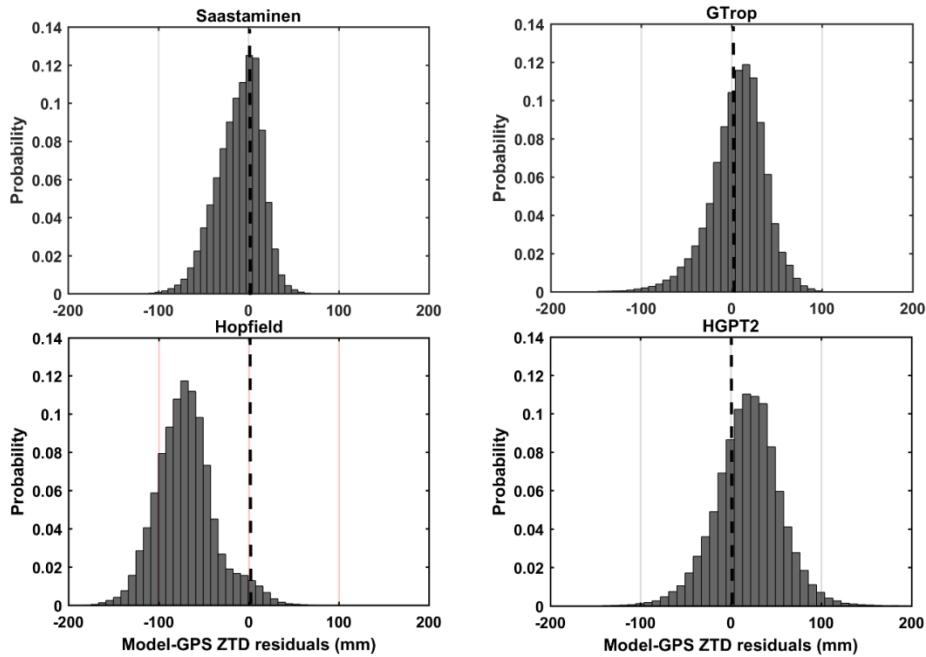
جدول ۳ کارایی مدل‌های مختلف ZTD در تمام ایستگاه‌های (نقاط مثلثی در شکل ۱) برای سال ۲۰۱۲ را نسبت به یکدیگر آورده است. همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود، مدل هاپفیلد در منطقه مورد مطالعه، مقادیر بایاس منفی بزرگ تا ۱۱۳ میلی‌متر را دارا می‌باشد و بر اساس مقادیر MBE و RMSE ضعیف‌ترین مدل در منطقه می‌باشد. همچنین، با بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۳، می‌توان دریافت که مدل Gtrop اگرچه یک مدل جهانی است ولی به‌طور متوسط کمترین میزان بایاس را در بین چهار مدل مورد مطالعه داشته است.

همچنین لازم به ذکر است که این مدل بدون نیاز به داده‌های هواشناسی سطحی در ایستگاه قادر به محاسبه مقادیر ZTD است و از این لحاظ می‌تواند کم‌هزینه‌تر از مدل‌هایی مثل ساستاموین باشد. ویژگی جالب توجه دیگر از بررسی آماری مدل Gtrop در منطقه ایران، این است بازه تغییرات مقادیر RMSE این مدل در تمامی ایستگاه‌ها بین ۲۲/۷ تا ۴۷/۴ میلی‌متر است. در حالی که مدل ساستاموین به‌طور میانگین در کل ایستگاه‌ها حدود ۶ میلی‌متر RMSE کمتری نسبت به مدل GTrop دارد ولی اندازه بازه تغییرات RMSE برای مدل ساستاموین همانند GTrop است و بین ۱۶/۵ تا ۴۱/۱ میلی‌متر متغیر می‌باشد.

به‌طور کلی، میانگین RMSE مقادیر یک‌سال از ZTD محاسبه شده به کمک مدل‌های هاپفیلد، HGPT2، Gtrop و ساستاموین در تمام ایستگاه به ترتیب ۳۱/۷، ۳۸/۸، ۷۵ و ۲۶/۱ میلی‌متر به دست آمد. همچنین، بیشترین همبستگی با مقادیر GPS-ZTD متعلق به مدل‌های هاپفیلد و

جدول ۱. ارزیابی آماری مدل‌های مختلف برآورد تأخیر زینتی تروپوسفر در مقایسه با مقادیر GPS-ZTD در ۲۸ ایستگاه پراکنده در منطقه مورد مطالعه برای سال ۲۰۱۲.

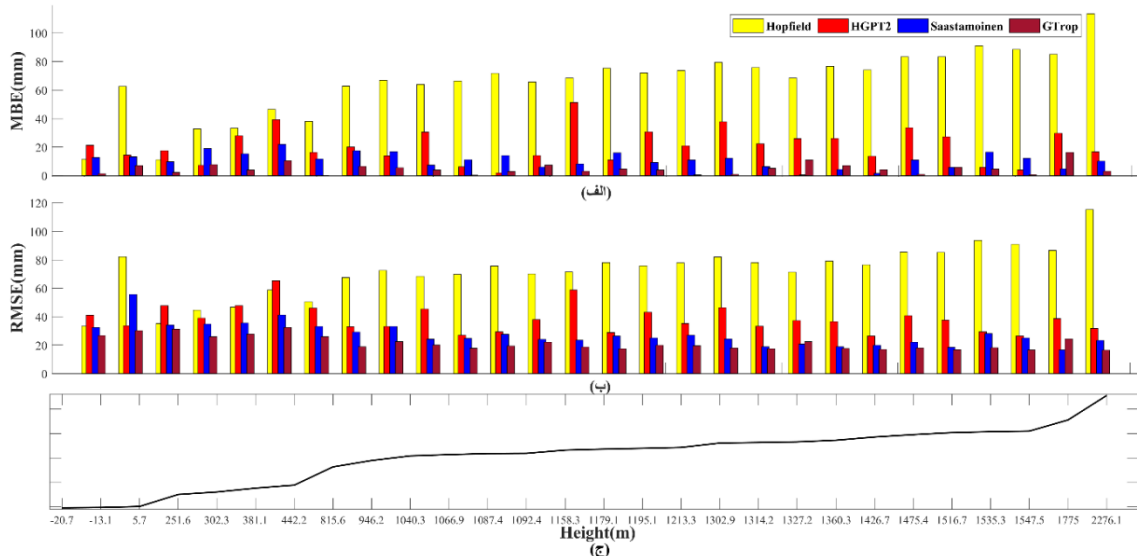
	MBE (mm)			RMSE (mm)			R		
	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
Hopfield	-۱۱۳/۴	-۱۱/۲	-۶۹/۸	۳۳/۳	۱۱۵/۳	۷۵	۰/۵۳	۰/۹۱	۰/۷۳
HGPT2	-۱۰/۹	۵۱/۳	۱۹	۲۶/۴	۶۵/۲	۳۹	-۰/۰۲	۰/۸۲	۰/۴۴
GTrop	-۱۲/۹	۱۵/۹	۵/۴	۲۲/۷	۴۷/۴	۳۱/۸	۰/۱۱	۰/۸۲	۰/۵۱
Saastamoinen	-۲۲/۰	۴/۹	-۱۰/۸	۱۶/۵	۴۱/۱	۲۶/۱	۰/۵۴	۰/۹۱	۰/۷۲



شکل ۴. هیستوگرام اختلاف مقادیر تأخیر تروپوسفری زینتی به دست آمده از مدل‌های مورد مطالعه نسبت به مقادیر متناظر GPS-ZTD در منطقه ایران.

با افزایش ارتفاع ایستگاه کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، اندازه RMSE و MBE مدل‌های ساستاموینن، GTrop و HGPT2 با افزایش ارتفاع ایستگاه تغییرات صعودی یا نزولی معناداری از خود نشان نداده‌اند. با این حال، آماره‌های خطا برای مدل هاپفیلد، تقریباً بیشترین مقادیر را در ایستگاه‌های با ارتفاع بالاتر از ۸۰۰ متر داشته است. علاوه بر این، حساسیت مدل هاپفیلد به افزایش ارتفاع برای آماره بایاس بیشتر از RMSE بوده است.

علاوه بر این، به منظور بررسی ارتباط دقت مدل‌های ZTD با ارتفاع ایستگاه مورد نظر، در شکل ۵، RMSE و قدرمطلق MBE هر کدام از مدل‌ها بر حسب ارتفاع ایستگاه‌ها به صورت نمودار میله‌ای نمایش داده شده است. گراف مشکی رنگ در شکل ۵ نشان‌دهنده ارتفاع ایستگاه‌ها می‌باشد. با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که دقت و صحت مدل‌های ساستاموینن، GTrop و HGPT2 در ارتفاعات مختلف تقریباً یکسان است، در حالی که دقت مدل هاپفیلد (نمودار میله‌ای زرد رنگ)



شکل ۵. ارتباط (الف) میانگین بایاس و (ب) RMSE مدل‌های مختلف ZTD با (ج) ارتفاع ایستگاه‌ها.

۵. نتیجه‌گیری

افزایش دقت و صحت در محاسبه مقادیر تأخیر تروپوسفری منجر به بهبود کیفیت در برآورد مقادیر بخار آب قابل بارش جوی می‌باشد و نقش مؤثر در افزایش دقت تعیین موقعیت ماهواره‌ای دارد. یکی از روش‌های دقیق در تعیین مقادیر ZTD برآورد آن به همراه مؤلفه‌های مختصاتی ایستگاه‌های زمینی با استفاده از پردازش مشاهدات GPS است. با این حال در تمام نقاط، دسترسی به گیرنده‌های GPS دائم ممکن نیست و هزینه‌بر است. از طرفی دیگر، مدل‌های جهانی برای محاسبه ZTD وجود دارند که مستقل از مشاهدات سطحی هواشناسی قادر به محاسبه ZTD در هر مختصات و زمانی هستند. با این حال، ممکن است دقت و صحت این مدل‌ها در یک منطقه خاص برای اهداف و کاربری‌های مد نظر محققان کافی نباشد. ایران کشوری با وسعت بالا و توپوگرافی و شرایط آب‌وهوایی متنوع است. بنابراین، ارزیابی مدل‌های موجود برای محاسبه ZTD و همچنین توسعه مدلی با صحت بیشتر نسبت به مدل‌های قبلی در این منطقه می‌تواند ارزشمند باشد. در این تحقیق، صحت و دقت مقادیر ZTD به دست آمده از مدل‌های هاپفیلد، HGPT2، و Gtrop و ساستاموین در ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، یک سال از برآوردهای ZTD به دست آمده از پردازش مشاهدات ۲۸ ایستگاه دائم GPS واقع در منطقه ایران به عنوان مقادیر قابل اعتماد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که به‌طور میانگین، کمترین مقدار بایاس (۵/۴ میلی‌متر) و RMSE (۲۶/۱ میلی‌متر) در منطقه ایران به ترتیب متعلق است به مدل‌های Gtrop و ساستاموین

می‌باشد. همچنین، بررسی مقادیر میانگین ضریب همبستگی و RMSE تأخیر تروپوسفری به دست آمده از مدل‌های مختلف در منطقه نشان داد که مدل ساستاموین نسبت به مدل‌های هاپفیلد، HGPT2 و Gtrop موافقت بالاتری با مقادیر GPS-ZTD دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل Gtrop اگرچه یک مدل جهانی است ولی با توجه به مستقل بودن از پارامترهای هواشناسی سطحی به‌منظور محاسبه ZTD می‌تواند با مدل ساستاموین قابل رقابت باشد. لازم به ذکر است که مقادیر RMSE به دست آمده برای مدل‌هایی مثل Gtrop و ساستاموین در منطقه ایران اگرچه نسبت به دو مدل HGPT2 و هاپفیلد کمتر به دست آمدند ولی هنوز برای ناوبری دقیق و همچنین محاسبه مقادیر بخار آب قابل بارش با صحت مناسب، نیازمند به ارتقا هستند. به عبارت دیگر توسعه مدلی با دقت و صحت بالاتر برای منطقه ایران امری اجتناب‌ناپذیر است و می‌تواند در مطالعات آینده علاقه‌مندان به این حوزه مورد توجه قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از داوران محترم برای پیشنهادات ارزشمندی که به‌منظور افزایش کیفیت این تحقیق ارائه کردند، تشکر می‌کنند. همچنین، مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره No. P/M/1122 اعلام می‌دارند.

مراجع

- 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. <https://doi.org/10.1029/92JD01517>
- Black, H. D., & Eisner, A. (1984). Correcting satellite Doppler data for tropospheric effects. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, 89(D2), 2616-2626.
- Boehm, J., Heinkelmann, R. & Schuh, H. (2007).

- Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *J. Geod.*, 81, 679-683. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0135-3>
- Böhm, J., Möller, G., Schindelegger, M., Pain, G., & Weber, R. (2015). Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solut*, 19, 433-441. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0403-7>
- Chen, J., Wang, J., Wang, A., Ding, J., & Zhang, Y. (2020). SHATropE—A regional gridded ZTD model for China and the surrounding

- areas. *Remote Sensing*, 12(1), 165. <https://doi.org/10.3390/rs12010165>
- Collins, J. P., & Langley, R. B. (1998). The residual tropospheric propagation delay: How bad can it get?, Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1998), Nashville, TN, September 1998, 729-738.
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio science*, 20(6), 1593-1607.
- Ding, M., Hu, W., Jin, X., & Yu, L. (2016). A new ZTD model based on permanent ground-based GNSS-ZTD data. *Survey review*, 48(351), 385-391. <https://doi.org/10.1179/1752270615Y.0000000034>
- Duan, J., Bevis, M., Fang, P., Bock, Y., Chiswell, S., Businger, S., Rocken, C., Solheim, F., Hove, T., Ware, R., McClusky, S., Herring, T., & King, R. W. (1996). GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35, 830-838. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)0352.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)0352.0.CO;2)
- Hopfield, H. S. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical research*. Wiley Online Library, 74(18), 4487-4499. doi: 10.1029/JC074i018p04487
- Katsougiannopoulos, S., Pikridas, C., Rossikopoulos, D., Ifadis, I., & Fotiou, A. (2006). Tropospheric refraction estimation using various models, radiosonde measurements and permanent GPS data. PS5. 4-GNSS Processing and Applications, 15.
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *J. Geod.*, 92, 349-360. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>
- Leandro, R.F., Langley, R.B. & Santos, M.C. (2008). UNB3m_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques. *GPS Solut*, 12, 65-70. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0077-5>
- Li, W., Yuan, Y., Ou, J., Li, H., & Li, Z. (2012). A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. *Chin. Sci. Bull.*, 57, 2132-2139. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5010-9>
- 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 Letter*, 41(10), 3615-3621. <https://doi.org/10.1002/2013GL058721>
- Mao, J., Wang, Q., Liang, Y., & Cui, T. (2021). A new simplified zenith tropospheric delay model for real-time GNSS applications. *GPS Solut*, 25, 43 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01092-4>
- Mateus, P., Catalão, J., Mendes, V. B., & Nico, G. (2020). An ERA5-based hourly global pressure and temperature (HGPT) model. *Remote Sensing*, 12(7), 1098. <https://doi.org/10.3390/rs12071098>
- Mateus, P., Mendes, V. B., & Plecha, S. M. (2021). HGPT2: An ERA5-Based Global Model to Estimate Relative Humidity. *Remote Sensing*, 13(11), 2179. <https://doi.org/10.3390/rs13112179>
- Niell, A. E., Coster, A. J., Solheim, F. S., Mendes, V. B., Toor, P. C., Langley, R. B., & Upham, C. A. (2001). Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(6), 830-850. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018%3C0830:COMOAW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018%3C0830:COMOAW%3E2.0.CO;2)
- Penna, N., Dodson, A., & Chen, W. (2001). Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model. *Journal of Navigation*, 54(1), 37-55. doi:10.1017/S0373463300001107
- Pikridas, C., Katsougiannopoulos, S. & Zinas, N. (2014). A comparative study of zenith tropospheric delay and precipitable water vapor estimates using scientific GPS processing software and web based automated PPP service. *Acta Geod Geophys*, 49, 177-188. <https://doi.org/10.1007/s40328-014-0047-7>
- Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *The use of artificial satellites for geodesy*, 15, 247-251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>
- Showman, A. P., & Dowling, T. E. (2014). Earth as a planet: Atmosphere and Oceans. In Encyclopedia of the solar system (pp. 423-444). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415845-0.00020-7>
- Soja, B., Nilsson, T., Karbon, M., Zus, F., Dick, G., Deng, Z., Wickert, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2015). Tropospheric delay determination by Kalman filtering VLBI data. *Earth Planet Sp*, 67, 144 (2015). <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0293-0>
- Sun, L., Chen, P., Wei, E., & Li, Q. (2017). Global model of zenith tropospheric delay proposed based on EOF analysis. *Advances in Space Research*, 60(1), 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.03.045>
- Sun, Z., Zhang, B., & Yao, Y. (2019). A global

- model for estimating tropospheric delay and weighted mean temperature developed with atmospheric reanalysis data from 1979 to 2017. *Remote Sensing*, 11(16), 1893. <https://doi.org/10.3390/rs11161893>.
- Teke, K., Nilsson, T., Böhm, J., Hobiger, T., Steigenberger, P., García-Espada, S., Haas, R., & Willis, P. (2013). Troposphere delays from space geodetic techniques, water vapor radiometers, and numerical weather models over a series of continuous VLBI campaigns. *J. Geod*, 87, 981–1001. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0662-z>
- Teten O. (1930). Über einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys.*, 6, 297-309.
- Yang, L., Gao, J., Zhu, D., Zheng, N., & Li, Z. (2020). Improved zenith tropospheric delay modeling using the piecewise model of atmospheric refractivity. *Remote Sensing*, 12(23), 3876. <https://doi.org/10.3390/rs12233876>
- Yao, Y. B., HE, C. Y., Zhang, B., & XU, C. Q. (2013). A new global zenith tropospheric delay model GZTD. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(7), 2218-2227.
- Yao, Y., Hu, Y., Yu, C., Zhang, B., & Guo, J. (2016). An improved global zenith tropospheric delay model GZTD2 considering diurnal variations. *Nonlinear processes in geophysics*, 23(3), 127-136.
- Yao, Y., Xu, X., Xu, C., Peng, W., & Wan, Y. (2019). Establishment of a real-time local tropospheric fusion model. *Remote Sensing*, 11(11), 1321. <https://doi.org/10.3390/rs11111321>
- Zheng, F., Lou, Y., Gu, S., Gong, X., & Shi, C. (2018). Modeling tropospheric wet delays with national GNSS reference network in China for BeiDou precise point positioning. *Journal of Geodesy*, 92, 545–560. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1080-4>.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of geophysical research: solid earth*, 102(B3), 5005-5017.