

Integration of Global Navigation Satellite System Observations for Generating Network Corrections Using a Virtual Reference Station Method

Nafar, S.¹  | Farzaneh, S.¹  

1. Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: farzaneh@ut.ac.ir

(Received: 11 May 2025, Revised: 13 Sep 2025, Accepted: 18 Oct 2025, Published online: 16 Dec 2025)

Summary

The rapid advancement of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) has revolutionized the field of geospatial data acquisition significantly, enhancing the accuracy and efficiency of positioning operations. This study investigates an innovative approach to improving positional accuracy by integrating observations from multiple GNSS constellations — specifically GPS (USA), Galileo (EU), and BeiDou (China) — within a Network-based Real-Time Kinematic (NRTK) positioning framework using a Virtual Reference Station (VRS) method. Traditionally, RTK positioning techniques relied on a single base station to provide corrections, which are effective only within a limited radius due to the degradation of accuracy with increasing distance from the base. The NRTK technique, and particularly the VRS method, emerged as a superior solution by establishing a network of reference stations that deliver spatially interpolated corrections to a virtual station near the user, significantly reducing the baseline length and associated atmospheric and orbital errors. This research implements a dual-frequency double-differencing observation model to mitigate receiver and satellite clock errors, followed by ambiguity resolution using the Melbourne-Wübbena combination and an ionosphere-free linear combination. These steps are vital in estimating the double-differenced integer ambiguities for each frequency, which are subsequently utilized to compute atmospheric delays with high precision. The use of the MLAMBDA algorithm for ambiguity fixing further enhances the reliability of the results.

The methodology includes the interpolation of network corrections using four distinct models: linear combination model (LCM), linear distance-based interpolation model (DIM), least squares model (LSM), and linear interpolation model (LIM). Each model offers different strategies to compute tropospheric and ionospheric corrections at the user's location based on surrounding reference station data. Notably, DIM, while computationally simpler, showed limitations due to its unidirectional approach that neglects two-dimensional spatial variability in atmospheric conditions. To assess the performance of the proposed VRS-based NRTK system, data from six permanent GNSS stations from the UNAVCO network were used, with a focus on a single baseline for clarity. The results were evaluated across multiple scenarios: single-system, dual-system, and triple-system integrations, with and without applying network corrections. The empirical data showed that the integration of multiple GNSS systems significantly reduces positional errors. For instance, without integration, GPS yielded horizontal and vertical errors of 33 cm and 52 cm, respectively, while Galileo and BeiDou had higher error margins. However, combining all three systems reduced these errors to just 6 cm horizontally and 17 cm vertically. Analysis of atmospheric corrections revealed that both ionospheric and tropospheric corrections are highly sensitive to satellite geometry, particularly around the times of satellite rise and set. These periods showed an exponential increase in correction values, indicating the need for a threshold-based correction exclusion strategy. A threshold of 15 cm for dispersive (ionospheric) and 10 cm for non-dispersive (tropospheric) corrections was found effective; for fewer systems, thresholds up to 30 cm were tested to maintain a non-singular solution matrix.

The results highlight that among all the interpolation methods, LSM, LIM, and LCM performed comparably well, while DIM often lagged, especially under multi-dimensional spatial variability. The dual-system integration of GPS and Galileo consistently outperformed GPS and BeiDou, likely due to structural similarities between GPS and Galileo and the higher noise levels in BeiDou observations. The final outcomes underscore that the optimal configuration for high-precision real-time positioning involves the integration of all three GNSS systems with a robust interpolation model that can accurately model the spatial behavior of atmospheric corrections. This integrated approach not only improves the accuracy of the mobile receiver's coordinates but also enhances the resilience and reliability of the positioning system by reducing dependency on any single GNSS constellation. In conclusion, the study demonstrates that multi-GNSS integration within a VRS-based NRTK framework significantly enhances positional accuracy. The selection of an appropriate interpolation method and the implementation of correction magnitude thresholds are crucial for optimizing performance. This methodology, when localized and adapted with native correction software, offers a promising direction for future GNSS applications in geodetic and cadastral surveying.

Keywords: Network Corrections, Mobile Receiver, Virtual Reference Station (VRS), Phase Ambiguity, Integer Ambiguity Resolution.

Cite this article: Nafar, S., & Farzaneh, S. (2025). Integration of Global Navigation Satellite System Observations for Generating Network Corrections Using a Virtual Reference Station Method. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(3), 531- 548. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.394061.1007682>

E-mail: (1) sajad04881@gmail.com



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.394061.1007682>

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

تلفیق مشاهدات سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی به منظور تولید تصحیحات شبکه‌ای به روش ایستگاه مرجع مجازی

سجاد نفر^۱ | سعید فرزانه^۱ ✉

۱. گروه ژئودزی و هیدروگرافی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: farzaneh@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۲۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۷/۲۶، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۹/۲۵)

چکیده

در این پژوهش، کارایی تلفیق مشاهدات سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی GPS، Galileo و BeiDou در تولید تصحیحات شبکه‌ای مبتنی بر روش ایستگاه مرجع مجازی (VRS) ارزیابی شده است. برای حذف خطاهای ساعت گیرنده و ماهواره از مدل مشاهدات دوفرکانسه تفاضلی دوگانه استفاده شد، همچنین ابهام فاز با بهره‌گیری از ترکیب ملبورن-ووبنا و ترکیب خطی عاری از اثرات یونسفر محاسبه و به کمک الگوریتم MLAMBDA تثبیت شد. در این راستا داده‌های شش ایستگاه دائم از شبکه UNAVCO به منظور بررسی عملکرد تعیین موقعیت کینماتیک آنی شبکه‌ای (NRTK) مبتنی بر VRS در سه سناریوی تک‌سامانه، دوسامانه و سه‌سامانه، در دو حالت اعمال تصحیحات شبکه‌ای و بدون آن، تحلیل شدند. نتایج نشان داد که تصحیحات جوی به هندسه ماهواره‌ها بسیار حساس هستند و در هنگام طلوع و غروب ماهواره‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابند. مقایسه روش‌های درون‌یابی حاکی از آن است که سه روش LSM، LIM و LCM عملکردی مشابه داشته‌اند، در حالی که روش DIM به دلیل ماهیت تک‌بعدی خود دقت کمتری ارائه کرده است. همچنین، تلفیق مشاهدات چندسامانه‌ای موجب ارتقای قابل توجه دقت موقعیت‌یابی شد؛ به گونه‌ای که خطای مسطحاتی از ۰/۳۴ متر در بهترین حالت تک‌سامانه‌ای به ۰/۰۷ متر در حالت تلفیق سه‌سامانه‌ای کاهش یافت. بررسی‌ها نشان داد که تلفیق GPS و Galileo نسبت به تلفیق GPS و BeiDou نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. یافته‌های این تحقیق بیانگر آن است که تلفیق چندسامانه‌ای همراه با به کارگیری تصحیحات شبکه‌ای به روش ایستگاه مرجع مجازی، دقت تعیین موقعیت کینماتیک آنی را به میزان قابل توجهی افزایش داده و وابستگی به یک سامانه منفرد را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تصحیحات شبکه، گیرنده متحرک، ایستگاه مرجع مجازی، ابهام فاز، حل ابهام فاز عدد صحیح.

۱. مقدمه

ایستگاه مرجع دقت آن به شدت کاهش می‌یابد (ریزوس، ۲۰۰۳). برای رفع این محدودیت، در میانه دهه روش شبکه‌ای (NRTK) RTK معرفی شد که با بهره‌گیری از شبکه‌ای از ایستگاه‌های مرجع و الگوریتم‌های پیشرفته حل ابهام فاز مانند LAMBDA، توانست محدوده و دقت تعیین موقعیت را به طور چشمگیری ارتقا دهد (زائو و همکاران، ۲۰۱۲).

NRTK به‌ویژه در قالب روش ایستگاه مرجع مجازی (VRS) توانست دقت موقعیت‌یابی در مقیاس‌های وسیع‌تر را تضمین کند و از این رو در دهه‌های اخیر به طور گسترده در کشورهای مختلف به کار گرفته شد. این فناوری کاربردهای

سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) ابرارهایی بنیادین برای تعیین موقعیت و زمان در سطح زمین و فضا هستند. با وجود گستردگی استفاده از این سامانه‌ها، دقت موقعیت‌یابی تک‌گیرنده‌ای در بسیاری از کاربردهای امروزی کافی نیست. به همین دلیل، روش‌های اصلاحی همچون DGPS و RTK توسعه یافتند که هر یک محدودیت‌ها و مزایای خاص خود را دارند. از اوایل دهه ۱۹۹۰، نیاز روزافزون به موقعیت‌یابی سریع و دقیق، منجر به معرفی تعیین موقعیت آنی (RTK) شد که داده‌های تصحیحی را از ایستگاه مرجع به گیرنده متحرک ارسال می‌کرد. هرچند RTK در فواصل کوتاه عملکرد مناسبی دارد، اما با افزایش فاصله از

استناد: نفر، سجاد و فرزانه، سعید (۱۴۰۴). تلفیق مشاهدات سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی به منظور تولید تصحیحات شبکه‌ای به روش ایستگاه مرجع مجازی. مجله فیزیک زمین

و فضا، ۵۱(۳)، ۵۳۱-۵۴۸. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.394061.1007682>

رایانامه: (۱) sajad04881@gmail.com

مارل (۱۹۹۸)، ریزوس و همکاران (۲۰۰۰)، لاندو (۲۰۰۰)، والث و همکاران (۲۰۰۰)، اولر و همکاران (۲۰۰۱)، گائو و همکاران (۲۰۰۲) انجام گرفت.

در دهه‌های اخیر، شبکه‌های VRS در بسیاری از کشورها از جمله اتریش، آلمان، سوئیس، دانمارک، فنلاند، چین، ژاپن و ایالات متحده توسعه یافته‌اند (لاندو، ۲۰۰۰). گسترش این شبکه‌ها نیازمند روش‌های پیشرفته درون‌یابی برای اعمال تصحیحات بوده است. در حال حاضر، این روش‌ها در چارچوب RTK و NRTK به کار گرفته می‌شوند و بسته به شرایط یونسفری، دقت نتایج متفاوت خواهد بود (اوکیف و همکاران، ۲۰۰۷).

در این تحقیق، برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تنها بر یک سامانه ناوبری ماهواره‌ای یا حداکثر دو سامانه تمرکز داشتند، کارایی تلفیق سه سامانه GPS، Galileo و BeiDou در چارچوب تعیین موقعیت کینماتیک آنی شبکه‌ای مبتنی بر ایستگاه مرجع مجازی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای حل ابهام فاز، ترکیبی از روش‌های پیشرفته شامل ترکیب ملبورن-ووبنا و ترکیب خطی عاری از یونسفر به کار گرفته شده و سپس الگوریتم MLAMBDA برای تثبیت ابهام استفاده شده است به طوری که منجر به افزایش پایداری و دقت برآورد به‌شمار می‌رود. در قدم بعدی در این تحقیق چهار روش مختلف درون‌یابی تصحیحات شبکه‌ای را به‌طور جامع مقایسه کرده و ضمن تأیید عملکرد مشابه روش‌های LSM، LIM و LCM، ضعف‌های روش DIM را به‌دلیل ماهیت تک‌بعدی آن آشکار ساخته است. نهایتاً در این تحقیق، رفتار تصحیحات جوی در ارتباط با هندسه ماهواره‌هاست مورد تحلیل قرار گرفته است به گونه‌ای که نشان داده شده تصحیحات یونسفری و تروپسفری در زمان طلوع و غروب ماهواره‌ها به‌صورت نمایی افزایش می‌یابند و بر همین اساس راهبرد تعیین آستانه برای حذف مشاهداتی که دارای خطای بالای مشاهداتی هستند، پیشنهاد شده است.

۲. روش پژوهش

در این تحقیق تولید تصحیحات به روش ایستگاه مرجع مجازی برای شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش

متنوعی در حوزه‌های نقشه‌برداری دقیق، کاداستر، پایش تغییر شکل سازه‌ها و زمین، مهندسی عمران، ناوبری هوایی و دریایی، کشاورزی دقیق و سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند پیدا کرده است. توانایی این روش در دستیابی به دقت سانتی‌متری در زمان واقعی، آن را به ابزاری ضروری برای پروژه‌هایی بدل کرده است که به داده‌های مکانی سریع، دقیق و پایدار نیاز دارند.

اساس کار NRTK بر حل مؤثر ابهام فاز است که با بهره‌گیری از الگوریتم‌های گوناگونی همچون تابع ابهام فاز، روش جستجوی حداقل مربعات، الگوریتم‌های سریع حل ابهام فاز، فیلترهای جستجوی سریع و به‌ویژه روش LAMBDA بهبود یافت و امکان دستیابی به حل سریع‌تر و پایدارتر ابهام‌ها را فراهم ساخت (لیک، ۲۰۰۴). دستیابی به دقت بالا به‌طور مستقیم وابسته به حل صحیح ابهام فاز است. در این زمینه، هچ در سال ۲۰۱۰ روش LSAST، فری و باتلر در ۱۹۹۰ روش FARA، و اولر و لاندو در ۱۹۹۲ نسخه اصلاح‌شده‌ای از تجزیه چولسکی را معرفی کردند. روش LAMBDA نیز توسط تیونینس در ۱۹۹۵ ارائه شد و بعدها توسط دیانگ و تیبریوس از منظر کاربردی مورد بررسی قرار گرفت (تیونینس و همکاران، ۲۰۰۵). در ادامه، جزایری و همکاران (۲۰۱۲) روش نظری تور را پیشنهاد دادند که به‌عنوان یکی از سریع‌ترین الگوریتم‌ها برای حل ابهام فاز شناخته می‌شود (هافمن و همکاران، ۲۰۰۷).

در حوزه مدل‌سازی خطا، ووبنا و همکاران در سال ۱۹۹۶ مدلی هندسی تحت عنوان پارامترهای تصحیح منطقه‌ای (FKP) را معرفی کردند که بر پایه درون‌یابی خطی عمل می‌کرد. یک سال بعد، وارنر و کانن با در نظر گرفتن اثر خطاهای چندمسیری، مدل ووبنا را توسعه دادند (راکوئت، ۱۹۹۸). از سوی دیگر، به‌منظور بهبود دقت تصحیحات، مفهوم ایستگاه مرجع مجازی (VRS) مطرح شد که نخستین بار توسط واینیگر در ۱۹۹۷ معرفی شد. این روش با ایجاد مشاهدات مصنوعی از یک ایستگاه فرضی، امکان کاهش خطاهای جوی و محاسبه دقیق‌تر خطاهای مرتبه دوم بین ایستگاه‌های مرجع را فراهم کرد (یانگ و همکاران، ۲۰۰۵). در این راستا پژوهش‌های گسترده‌ای توسط محققانی همچون

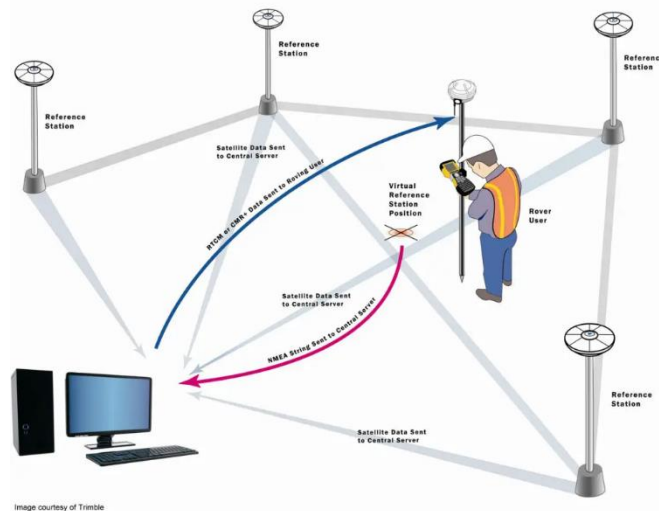
می‌توان آن را به شکل زیر نوشت (با در نظر گرفتن دو ایستگاه مرجع A و B و دو ماهواره k و j) (الموافی، ۲۰۱۲):

$$\lambda_i (-N_{AB,i}^{jk} + \phi_{AB,i}^{jk}) = \rho_{AB}^{jk}(t) - I_{AB,i}^{jk} + T_{AB}^{jk} \quad (1)$$

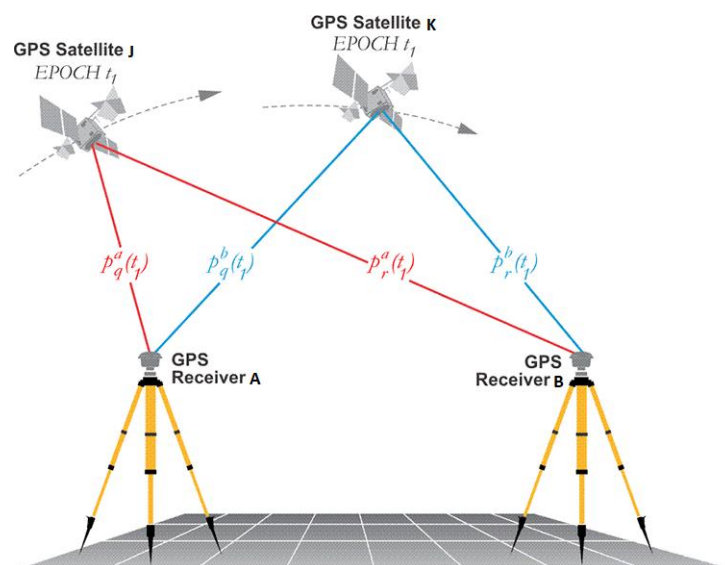
در رابطه (۱)، $\phi_{AB,i}^{jk}$ نشان‌دهنده مشاهدات فاز موج حامل تفاضلی دوگانه بین ماهواره‌های j و k و دو گیرنده A، B (شکل ۲)، $N_{AB,i}^{jk}$ ابهام فاز تفاضلی دوگانه، λ_i طول موج سیگنال، ρ_{AB}^{jk} فاصله هندسی تفاضلی دوگانه بین ماهواره و گیرنده (که با داشتن مختصات دقیق ایستگاه‌ها و محاسبه مختصات دقیق ماهواره‌ها قابل محاسبه است)، $I_{AB,i}^{jk}$ تأخیر یونسفری تفاضلی دوگانه و T_{AB}^{jk} تأخیر تروپوسفری تفاضلی دوگانه می‌باشد. شکل ۲ مفهوم روش تفاضلی دوگانه بین دو گیرنده و دو ماهواره در یک اپک را نشان می‌دهد.

هدف اصلی این است که طول مبنای بین ایستگاه مرجع مجازی و گیرنده کاهش پیدا کند و به سبب همین کاهش طول مبنا، خطاهای جوی و خطای مداری در مرحله تفاضلی مرتبه دوم کاهش یافته و در نهایت دقت تعیین موقعیت نهایی افزایش خواهد یافت (سعیدی، ۲۰۱۲). شکل ۱ مفهوم ایستگاه مرجع مجازی را نشان می‌دهد.

برای تولید تصحیحات در روش ایستگاه مرجع مجازی (VRS)، در گام نخست لازم است معادلات مشاهداتی به صورت تفاضلی دوگانه نوشته شوند تا خطاهای مشترکی نظیر خطای ساعت گیرنده و ساعت ماهواره حذف شوند. در ادامه، با انجام این فرایند، معادله ساده‌تر شده و



شکل ۱. تولید تصحیحات به روش VRS (Leica-Geosystems.com).



شکل ۲. مفهوم روش تفاضلی دوگانه بین دو گیرنده و دو ماهواره در یک اپک (وان، ۲۰۰۸).

دستگاه دو معادله و دو مجهول تشکیل شود. در این راستا، از ترکیب عاری از یونسفر بهره گرفته می‌شود که معادله آن به شکل زیر بیان می‌شود (سوییرانا و همکاران، ۲۰۱۳):

$$\nabla \Delta L_{r,NL}^{1S} = \frac{f_1^2 \lambda_1 \nabla \Delta \varphi_{r,1}^{1S} - f_2^2 \lambda_2 \nabla \Delta \varphi_{r,2}^{1S}}{f_1^2 - f_2^2} = \nabla \Delta \rho_{r,1}^{1S} + \nabla \Delta \delta \text{trop}_{r,1}^{1S} + \nabla \Delta N_{r,NL}^{1S} \quad (3)$$

در رابطه (۳) $\nabla \Delta L_{r,NL}^{1S}$ مقدار مشاهده عاری از یونسفر در سطح تفاضلی دوگانه، پارامتر $\nabla \Delta N_{r,NL}^{1S}$ ابهام فاز تفاضلی دوگانه عاری از یونسفر، $\nabla \Delta \rho_{r,1}^{1S}$ فاصله هندسی تفاضلی دوگانه بین ماهواره و گیرنده، $\nabla \Delta \varphi_{r,i}^{1S}$ مشاهده فاز تفاضلی دوگانه برای مشاهده فاز نام $(i=1,2)$ ، f_1, f_2 فرکانس دو طول موج مشاهدات استفاده شده بوده و در نهایت $\nabla \Delta \delta \text{trop}_{r,1}^{1S}$ خطای تروپوسفر تفاضلی دوگانه می‌باشد. با توجه به این که معادله عاری از یونسفر را استفاده کرده‌ایم خطای یونسفر کنار رفته است اما خطای تروپوسفر باقی می‌ماند، برای جلوگیری از کاهش دقت محاسبات به جای صرف نظر کردن یا مدل‌سازی خطای تروپوسفر این خطا را نیز به صورت مجهول وارد سرشکنی خواهیم کرد البته برای جلوگیری از افزایش تعداد مجهولات از تابع تصویر Niell استفاده می‌کنیم که به ما امکان می‌دهد از تعداد پارامترهای مجهول کاسته و به درجه آزادی معادلات اضافه کنیم (نیل، ۲۰۰۰).

بعد از سرشکنی مقادیر ابهام فاز عاری از یونسفر در سطح تفاضلی دوگانه محاسبه خواهند شد با استفاده از روابط زیر می‌توان مقادیر ابهام فاز تفاضلی دوگانه فرکانس اول و دوم را محاسبه کرد (سوییرانا و همکاران، ۲۰۱۳):

$$\nabla \Delta N_{r,1}^{1S} = (\nabla \Delta A_{r,NL}^{1S} - \frac{cf_2 \nabla \Delta N_{r,W}^{1S}}{f_1^2 - f_2^2}) \times \frac{f_1 + f_2}{c} \quad (4)$$

$$\nabla \Delta N_{r,2}^{1S} = \nabla \Delta N_{r,1}^{1S} - \nabla \Delta N_{r,W}^{1S} \quad (5)$$

پس از استفاده از رابطه (۴) مقدار ابهام فاز تفاضلی دوگانه موج اول به صورت عدد حقیقی محاسبه خواهد شد که با استفاده از روش (Modified Least Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment) این عدد حقیقی به عدد صحیح مناسب انتقال خواهد یافت (چانگ و همکاران، ۲۰۰۵). در رابطه (۵) اما شرایط فرق می‌کند زیرا هر دو مقدار سمت راست معادله عدد صحیح

هدف اصلی از نوشتن این رابطه در روش ایستگاه مرجع مجازی (VRS)، محاسبه تأخیرات یونسفری و تروپوسفری در معادله مشاهدات تفاضلی دوگانه است. با این حال، وجود ابهام فاز تفاضلی دوگانه مانع از دستیابی مستقیم به این هدف می‌شود؛ بنابراین ابتدا باید مقدار این ابهام برآورد شود. برای این منظور، در صورتی که مشاهدات بر روی دو فرکانس در دسترس باشند، می‌توان از ترکیب ملبورن-ووبنا به عنوان ابزاری مؤثر جهت برآورد ابهام فاز تفاضلی دوگانه استفاده کرد. این ترکیب در سطح تفاضلی دوگانه به صورت زیر تعریف می‌شود (سوییرانا و همکاران، ۲۰۱۳):

$$\nabla \Delta L_{r,MW}^{1S} = \frac{f_1 \lambda_1 \nabla \Delta \varphi_{r,1}^{1S} - f_2 \lambda_2 \nabla \Delta \varphi_{r,2}^{1S}}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 \nabla \Delta P_{r,1}^{1S} + f_2 \nabla \Delta P_{r,2}^{1S}}{f_1 + f_2} = \lambda_W \nabla \Delta N_{r,W}^{1S} \quad (2)$$

رابطه (۲) از تفاضل دوگانه مشاهدات فاز موج حامل و مشاهدات شبه فاصله کد ساخته می‌شود که در آن $\nabla \Delta L_{r,MW}^{1S}$ تفاضل دوگانه مشاهدات بین گیرنده ۱، گیرنده ۲، ماهواره ۱ و ماهواره ۲، $\nabla \Delta \varphi_{r,i}^{1S}$ مشاهده فاز تفاضلی دوگانه برای مشاهده فاز نام $(i=1,2)$ ، $\nabla \Delta P_{r,i}^{1S}$ تفاضل دوگانه فاصله هندسی بین گیرنده ۱، گیرنده ۲، ماهواره ۱ و ماهواره ۲، λ_W طول موج ترکیب ملبورن-ووبنا $(\lambda_W = \frac{c}{f_1 - f_2})$ ، $\nabla \Delta N_{r,W}^{1S}$ ابهام فاز ملبورن-ووبنا در سطح تفاضلی دوگانه و f_1, f_2 فرکانس دو طول موج مشاهدات استفاده شده می‌باشد. با تقسیم دو طرف رابطه (۲) بر طول موج ترکیب ملبورن-ووبنا، مقدار حقیقی ابهام فاز تفاضلی دوگانه این ترکیب به دست می‌آید. از آنجاکه این پارامتر ذاتاً باید یک عدد صحیح باشد، مقدار محاسبه شده به نزدیک‌ترین عدد صحیح کوچک‌تر گرد می‌شود (سوییرانا و همکاران، ۲۰۱۳). نکته مهم این است که برای حل معادله (۱) و محاسبه خطاهای اتمسفری، لازم است ابهام فاز تفاضلی دوگانه برای هر یک از فرکانس‌ها به طور جداگانه برآورد شود. در حالی که تا این مرحله تنها ابهام فاز ترکیبی دو فرکانس (ترکیب ملبورن-ووبنا) محاسبه شده است. برای استخراج ابهام فاز تفاضلی دوگانه هر فرکانس به صورت مستقل، باید در کنار ترکیب ملبورن-ووبنا از یک ترکیب دیگر استفاده شود تا یک

هستند پس مقدار نهایی یا همان ابهام فاز تفاضلی دو گانه موج دوم نیز عدد صحیح خواهد شد.

با داشتن مقادیر عدد صحیح ابهام فاز تفاضلی دو گانه هر کدام از موج‌ها می‌توان با استفاده از رابطه (۱) خطای جوی را محاسبه کرد. اگر رابطه (۱) را بازنویسی کنیم به صورت زیر خواهد شد:

$$V_i = T_{AB}^{jk} - I_{AB,i}^{jk} = \lambda_i (-N_{AB,i}^{jk} + \Phi_{AB,i}^{jk}) - \rho_{AB}^{jk}(t) \quad (6)$$

اکنون که تمامی مقادیر موجود در سمت راست رابطه (۶) در دسترس هستند، می‌توان مقدار V_i را از این رابطه محاسبه کرد. از آنجا که میزان خطای یونسفری در هر یک از فرکانس‌ها متفاوت است، هنگام اعمال این خطا باید برای هر فرکانس، مقدار متناظر آن به طور جداگانه در نظر گرفته شود. در شرایطی که خطاهای یونسفری و تروپوسفری به صورت یک مجموعه در متغیر V_i ظاهر شوند، امکان جداسازی و اعمال مستقل خطای یونسفری مربوط به هر فرکانس وجود نخواهد داشت. بنابراین، لازم است خطاهای تروپوسفری و یونسفری از یکدیگر تفکیک شوند. برای انجام این جداسازی، از روابط زیر استفاده می‌شود (اوولر و همکاران، ۲۰۰۱):

$$I_{AB}^{jk} = \frac{f_r^j(V_1 - V_2)}{f_r^j - f_1^j} \quad (7)$$

$$T_{AB}^{jk} = \frac{f_1^j V_1 - f_r^j V_2}{f_r^j - f_1^j} \quad (8)$$

در روابط (۷) و (۸) مقادیر f_1, f_r فرکانس دو طول موج مشاهدات استفاده شده بوده و مقادیر V_1, V_2 خطاهای اتمسفری است که از رابطه (۶) برای هر فرکانس محاسبه شده است.

فرایندی که تاکنون تشریح شد، باید برای هر یک از ایستگاه‌های ثابت شبکه نسبت به ایستگاه مرجع اصلی اجرا شود تا خطاهای تروپوسفری و یونسفری در تمام خطوط مبنا محاسبه شود. پس از برآورد این خطاها برای تمامی ایستگاه‌ها، گام بعدی در روش ایستگاه مرجع مجازی (VRS)، انتقال مشاهدات از ایستگاه مرجع اصلی به ایستگاه مرجع مجازی است. در این مرحله، گیرنده متحرک (گیرنده کاربر) مختصات تقریبی خود را به مرکز پردازش شبکه ارسال می‌کند. این مختصات به عنوان موقعیت اولیه ایستگاه

مرجع مجازی در نظر گرفته می‌شود. سپس مرکز پردازش شبکه طی یک روند دو مرحله‌ای، با استفاده از مختصات تقریبی دریافت شده، یک ایستگاه مرجع مجازی در نزدیکی گیرنده کاربر ایجاد می‌نماید. این دو مرحله به شرح زیر است (جمال‌عسگری و همکاران، ۱۳۹۲):

الف) درونیابی تصحیحات شبکه برای مختصات تقریبی گیرنده متحرک

برای درونیابی در این تحقیق از چهار روش استفاده می‌شود که به شرح زیر می‌باشند:

- مدل ترکیب خطی (LCM: Linear Combination Model)

در این روش ابتدا ضرایب α_i با سرشکنی دستگاه معادلات زیر محاسبه می‌شود (دایی و همکاران، ۲۰۰۱):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \Delta X_{1n} & \Delta X_{2n} & \dots & \Delta X_{n-1,n} & 0 \\ \Delta Y_{1n} & \Delta Y_{2n} & \dots & \Delta Y_{n-1,n} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta X_{un} \\ \Delta X_{un} \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن ΔX_{in} و ΔY_{in} اختلافات مختصات مسطحاتی میان ایستگاه i ام و ایستگاه مرجع اصلی در دو جهت شرقی-غربی و شمالی-جنوبی می‌باشد. اندیس n نیز مربوط به ایستگاه سیار است. ملاحظه می‌شود که برای هر ایستگاه سیار و یک شبکه، مجموع ضرایب α_i ثابت و برابر با ۱ می‌باشد. به منظور اجتناب از اعداد بزرگ در ماتریس ضرایب دو پارامتر ΔX_{in} و ΔY_{in} به صورت زیر بر حسب طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها بازنویسی می‌شود (ووبنا و باگ، ۲۰۰۲):

$$\Delta X_{in} = (\lambda_i - \lambda_n) \cos \varphi_n \quad (10)$$

$$\Delta Y_{in} = \varphi_i - \varphi_n \quad (11)$$

که در آن φ و λ عرض و طول جغرافیایی ایستگاه‌ها بر حسب رادیان هستند.

در نهایت مقادیر درونیابی شده تصحیحات در ایستگاه سیار به صورت زیر از تصحیحات بین ایستگاه‌های مرجع به دست می‌آیند:

$$I_{r}^{1s} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_{n-1}] \begin{bmatrix} I_{1n}^{1s} \\ I_{2n}^{1s} \\ \vdots \\ I_{n-1n}^{1s} \end{bmatrix} \quad (12)$$

ضرایب به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{1n} & \Delta y_{1n} & 1 \\ \Delta x_{2n} & \Delta y_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta x_{n-1,n} & \Delta y_{n-1,n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1n}^{1s} | T_{1n}^{1s} \\ I_{2n}^{1s} | T_{2n}^{1s} \\ \vdots \\ I_{n-1,n}^{1s} | T_{n-1,n}^{1s} \end{bmatrix} \quad (۱۹)$$

ب) انتقال مشاهدات ایستگاه مرجع اصلی به ایستگاه مرجع مجازی

برای انتقال مشاهدات از ایستگاه مرجع اصلی به ایستگاه مرجع مجازی ابتدا لازم است که یک معادله مشاهده تفاضلی یگانه بین ماهواره‌ها برای ایستگاه مرجع اصلی نوشته شود که برای فرکانس i به صورت زیر است (جمال‌عسگری و همکاران، ۱۳۹۲):

$$\lambda_i \phi_{r,i}^{mn} = \rho_r^{mn}(t) + \lambda_i N_{r,i}^{mn} - I_{r,i}^{mn} + T_r^{mn} \quad (۲۰)$$

به طوری که $\phi_{r,i}^{mn}$ مشاهده تفاضلی یگانه بین ماهواره‌های m برای ایستگاه مرجع اصلی r ، ρ_r^{mn} فاصله هندسی تفاضلی یگانه بین دو ماهواره m و n و ایستگاه مرجع اصلی r ، $N_{r,i}^{mn}$ ابهام تفاضلی یگانه، و $I_{r,i}^{mn}$ ، T_r^{mn} خطاهای تروپوسفر و یونسفری در سطح تفاضلی یگانه هستند. در ادامه فرض می‌کنیم در محل مختصات تقریبی دریافت شده از کاربر نیز مشاهداتی نسبت به همان دو ماهواره m ، n وجود دارد لذا برای ایستگاه مرجع مجازی نیز یک مشاهده تفاضلی یگانه می‌نویسیم که البته مقدار آن مجهول است و در دسترس نیست که در عمل به دنبال این مجهول نیز هستیم (جمال‌عسگری و همکاران، ۱۳۹۲):

$$\lambda_i \phi_{v,i}^{mn} = \rho_v^{mn}(t) + \lambda_i N_{v,i}^{mn} - I_{v,i}^{mn} + T_v^{mn} \quad (۲۱)$$

به طوری که $\phi_{v,i}^{mn}$ مشاهده تفاضلی یگانه بین ماهواره‌های m برای ایستگاه مرجع مجازی v ، ρ_v^{mn} فاصله هندسی تفاضلی یگانه بین دو ماهواره m و n و ایستگاه مرجع مجازی v ، $N_{v,i}^{mn}$ ابهام تفاضلی یگانه ایستگاه مرجع مجازی و $I_{v,i}^{mn}$ ، T_v^{mn} خطاهای تروپوسفر و یونسفری در سطح تفاضلی یگانه برای ایستگاه مرجع مجازی هستند. حال اگر دو رابطه (۲۰) و (۲۱) را از هم کم کنیم به یک معادله تفاضلی دوگانه بین ماهواره‌های m ، n و دو ایستگاه مرجع اصلی و مجازی r ، v برای فرکانس i خواهیم رسید که به صورت زیر است (جمال‌عسگری و همکاران، ۱۳۹۲):

$$\lambda_i \phi_{rv,i}^{mn} = \rho_{rv}^{mn}(t) + \lambda_i N_{rv,i}^{mn} - I_{rv,i}^{mn} + T_{rv}^{mn} \quad (۲۲)$$

$$T_{1r}^{1s} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_{n-1}] \begin{bmatrix} T_{1n}^{1s} \\ T_{2n}^{1s} \\ \vdots \\ T_{n-1,n}^{1s} \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

که در آن T_{in}^{1s} و I_{in}^{1s} مقدار تصحیح تروپوسفری و یونسفری محاسبه شده در خط مرجع بین ایستگاه مرجع و ایستگاه نام شبکه است.

- درونیابی خطی بر اساس فاصله (Distance-based DIM (Linear Interpolation Method):

در این روش برای هر ایستگاه مرجع (غیر از ایستگاه مرجع اصلی) وزنی بر اساس معکوس فاصله بین ایستگاه سیار تا این ایستگاه محاسبه شده و سپس میانگین وزندار تصحیحات در موقعیت ایستگاه سیار، تصحیحات درونیابی شده را محاسبه می‌کند (دایی و همکاران، ۲۰۰۱).

$$T_{1r}^{1s} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{W_i}{W} T_{in}^{1s} \quad (۱۴)$$

$$I_{1r}^{1s} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{W_i}{W} I_{in}^{1s} \quad (۱۵)$$

در روابط فوق W مجموع وزن‌های محاسبه شده است.

- روش درونیابی خطی (Linear Interpolation LIM (Method):

در این روش یک خط با دو پارامتر به تصحیحات بین ایستگاه‌های مرجع برازش داده می‌شود و سپس با پارامترهای رویه به دست آمده تصحیحات محاسبه می‌شود. رابطه این رویه به صورت زیر است (دایی و همکاران، ۲۰۰۱):

$$I_{1r}^{1s} | T_{1r}^{1s} = a \Delta x_{un} + b \Delta y_{un} \quad (۱۶)$$

با سرشکنی می‌توان ضرایب a و b را با استفاده از تصحیحات بیس لاین‌ها محاسبه کرد که فرم ماتریسی معادلات مشاهدات در آن به شکل زیر است:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{1n} & \Delta y_{1n} \\ \Delta x_{2n} & \Delta y_{2n} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta x_{n-1,n} & \Delta y_{n-1,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1n}^{1s} | T_{1n}^{1s} \\ I_{2n}^{1s} | T_{2n}^{1s} \\ \vdots \\ I_{n-1,n}^{1s} | T_{n-1,n}^{1s} \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

- روش برازش رویه با مرتبه پایین (Low-order LSM (Surface Model):

در این روش به رابطه موجود در روش درونیابی خطی یک ضریب ثابت افزوده می‌شود به این نحو که (دایی و همکاران، ۲۰۰۱):

$$I_{1r}^{1s} | T_{1r}^{1s} = a \Delta x_{un} + b \Delta y_{un} + c \quad (۱۸)$$

که به این ترتیب معادلات مشاهدات ماتریسی جهت برآورد

محاسبه کرد. معادله تفاضلی دوگانه بین گیرنده متحرک و ایستگاه مرجع مجازی به صورت زیر خواهد بود (اوولر و همکاران، ۲۰۰۱):

$$\lambda_i \nabla \Delta \varphi_{uv,i}^{mn} = \nabla \Delta \rho_{uv}^{mn} + \lambda_i \nabla \Delta N_{uv,i}^{mn} \quad (24)$$

رابطه (۲۴) معادله مشاهده تفاضلی دوگانه بین ایستگاه مرجع مجازی و گیرنده متحرک است. نکته مورد اهمیت در این رابطه این است که به علت نزدیکی گیرنده متحرک به ایستگاه مرجع مجازی خطاهای جوی برای این دو محل برابر با هم می باشد. این برابر بودن باعث می شود در هنگام نوشتن معادله مشاهده تفاضلی دوگانه خطاهای جوی حذف شود به همین سبب نیز در رابطه (۲۴) اثری از خطاهای یونسفر و تروپوسفر دیده نمی شود. حالا با سرشکن کردن رابطه (۲۴) و استفاده از الگوریتم MLAMBDA (چانگ و همکاران، ۲۰۰۵) برای تبدیل عدد حقیقی ابهام فاز تفاضلی دوگانه $\nabla \Delta N_{uv,i}^{mn}$ به عدد صحیح، مختصات دقیق گیرنده متحرک محاسبه می شود.

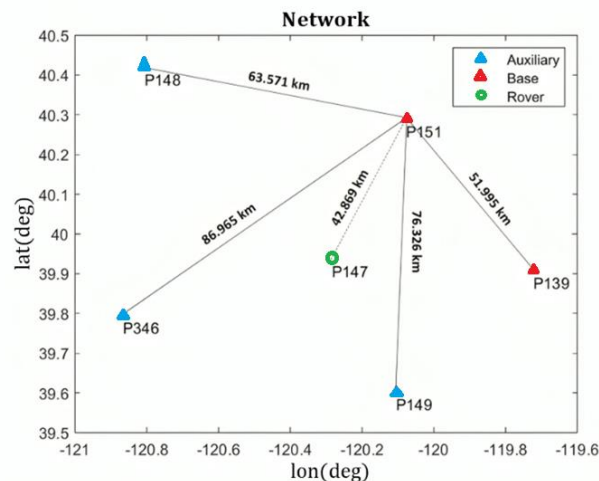
۳. نتایج

برای بررسی روش ارائه شده در این تحقیق مشاهدات روزانه مربوط به ۶ ایستگاه دائم از شبکه UNAVCO (University NAVSTAR Consortium) در روز ۲۹/۰۲/۲۰۲۴ میلادی جمع آوری شد. مشاهدات این ایستگاهها در چند فرکانس و به منظومه های تعیین موقعیت جهانی آمریکا، منظومه کشور چین و منظومه مربوط به اتحادیه اروپا می باشند. شمایی از این ایستگاهها در شکل ۳ نشان داده شده است.

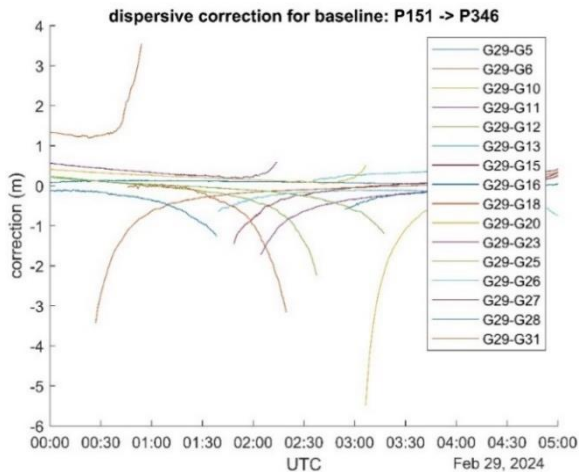
به طوری که $\Phi_{rv,i}^{mn}$ مشاهده تفاضلی دوگانه بوده و مجهول می باشد، ρ_{rv}^{mn} فاصله هندسی تفاضلی دوگانه بین دو ماهواره n, m و ایستگاه مرجع مجازی و اصلی بوده که معلومات مسئله هستند، $N_{rv,i}^{mn}$ ابهام تفاضلی دوگانه بوده و مجهول است و $I_{rv,i}^{mn}, T_{rv,i}^{mn}$ خطاهای تروپوسفر و یونسفری در سطح تفاضلی دوگانه اند که در مرحله قبل برای مختصات تقریبی یا همان ایستگاه مرجع مجازی محاسبه شده اند و کافی است در معادله جاگزاری شود. در معادله (۲۲) به جز مشاهده تفاضلی دوگانه $\Phi_{rv,i}^{mn}$ و ابهام فاز تفاضلی دوگانه $N_{rv,i}^{mn}$ باقی متغیرها معلوم هستند. حال کافی است با سرشکنی معادله (۲۲) مقدار مشاهده تفاضلی دوگانه $\Phi_{rv,i}^{mn}$ محاسبه شود و سپس با رابطه زیر مقدار مشاهده تفاضلی یگانه برای ایستگاه مرجع مجازی به دست آید (جمال عسگری و همکاران، ۱۳۹۲):

$$\lambda_i \Phi_{v,i}^{mn} = \lambda_i \Phi_{r,i}^{mn} - \lambda_i \Phi_{rv,i}^{mn} \quad (23)$$

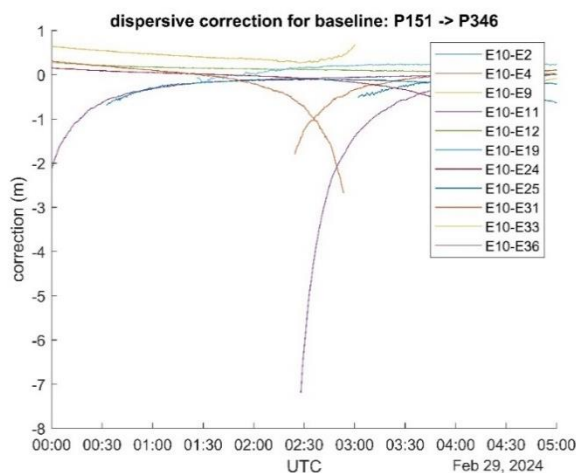
داشتن مشاهده تفاضلی یگانه در ایستگاه مرجع مجازی $\lambda_i \Phi_{v,i}^{mn}$ مانند این است که در محل ایستگاه مرجع مجازی (مختصات تقریبی ارسال شده توسط گیرنده متحرک) یک گیرنده واقعی قرار گرفته و مشاهدات را انجام می دهد. حالا می توان از مشاهده تفاضلی یگانه محاسبه شده توسط رابطه (۲۳) برای نوشتن معادله مشاهده تفاضلی دوگانه بین گیرنده متحرک و ایستگاه مرجع مجازی استفاده کرد به عبارتی با ایجاد ایستگاه مرجع مجازی یک شبیه سازی از روش تعیین مختصات کینماتیک آنی انجام شده است و می توان مختصات گیرنده متحرک را نسبت به این ایستگاه مجازی



شکل ۳. نحوه قرار گیری ایستگاههای مرجع اصلی، کمکی و گیرنده متحرک در شبکه.



شکل ۴. تصحیحات یونسفری سامانه GPS در خط مرجع بین ایستگاه مرجع و نقطه P346.



شکل ۵. تصحیحات یونسفری سامانه Galileo در خط مرجع بین ایستگاه مرجع و نقطه P346.

با بررسی دقیق شکل ۵ که نمودار تصحیحات یونسفری سامانه Galileo در خط مرجع بین ایستگاه مرجع اصلی (P151) و ایستگاه مرجع کمکی (P346) را نشان می‌دهد، می‌توان الگوهای مهمی در رفتار یونسفری این سامانه اروپایی مشاهده کرد.

در این نمودار سری زمانی که مربوط به ۵ ساعت ابتدایی زمان UTC است، تصحیحات یونسفری سامانه Galileo دارای ویژگی‌های قابل توجهی است. به طور کلی، بیشتر تصحیحات در محدوده ± 15 سانتی متر قرار دارند که نسبت به سامانه GPS (شکل ۴) محدوده اندکی بزرگ‌تر را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این نمودار، الگوی پراکندگی منظم‌تر تصحیحات نسبت به GPS است، که می‌تواند بیانگر ثبات

در شکل ۳ مثلث‌های آبی رنگ ایستگاه‌های مرجع کمکی، مثلث قرمز رنگ ایستگاه مرجع اصلی و دایره سبز رنگ گیرنده متحرک می‌باشد. پس از محاسبه تصحیحات بر اساس نرم‌افزار تهیه شده توسط نگارندگان و تفکیک آنها به دو نوع خطای یونسفری و تروپوسفری برای هر خط مبنا در هر سه سامانه ناوبری ماهواره‌ای GPS، Galileo و Beidou سری زمانی آنها ترسیم شدند به طوری که هر نمودار در مدت زمان ۵ ساعت ابتدایی زمان (UTC) می‌باشد.

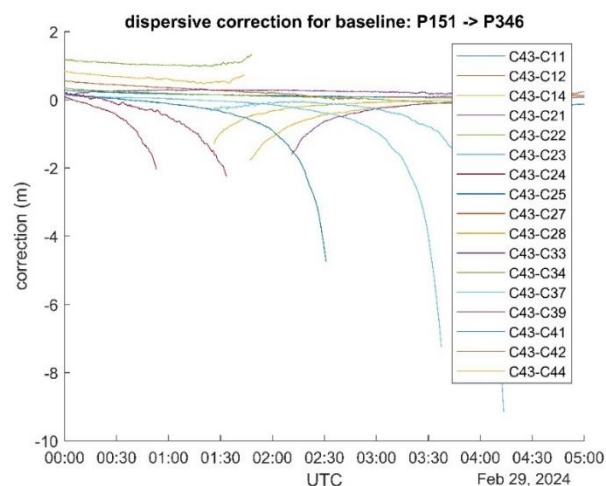
- تصحیحات تفاضلی دوگانه یونسفری برای خط مبنا اول بین ایستگاه مرجع اصلی P151 در شکل ۳ و ایستگاه مرجع کمکی P346:

با بررسی دقیق شکل ۴ که نمودار تصحیحات یونسفری سامانه GPS در خط مرجع بین ایستگاه مرجع اصلی (P151) و ایستگاه مرجع کمکی (P346) را نشان می‌دهد، می‌توان الگوهای مهمی در رفتار تصحیحات یونسفری مشاهده کرد. این نمودار سری زمانی تغییرات تصحیحات یونسفری را طی ۵ ساعت ابتدایی زمان UTC نمایش می‌دهد. در این نمودار، به وضوح می‌توان دید که تصحیحات یونسفری سامانه GPS دارای نوسانات قابل توجهی است. بیشتر تصحیحات در محدوده ± 10 سانتی متر قرار دارند، اما در برخی نقاط زمانی، مقادیر تصحیحات به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند و حتی به حدود چندین متر نیز می‌رسند. روند کلی تغییرات نشان می‌دهد که تصحیحات یونسفری با گذشت زمان دچار تغییرات تدریجی می‌شوند. این امر بیانگر تغییر شرایط یونسفری در طول مدت زمان مشاهدات است که می‌تواند متأثر از تغییرات روزانه فعالیت خورشیدی و تغییر چگالی الکترون‌های آزاد در لایه یونسفر باشد. مشاهده این رفتار متغیر و گاه غیرقابل پیش‌بینی در تصحیحات یونسفری، اهمیت استفاده از حد آستانه برای تصحیحات را که در متن مقاله به آن اشاره شده است را تأیید می‌کند. به این ترتیب، ماهواره‌هایی که تصحیحات آنها از این حد فراتر می‌رود، می‌توانند از فرایند تعیین موقعیت حذف شوند تا دقت نهایی افزایش یابد.

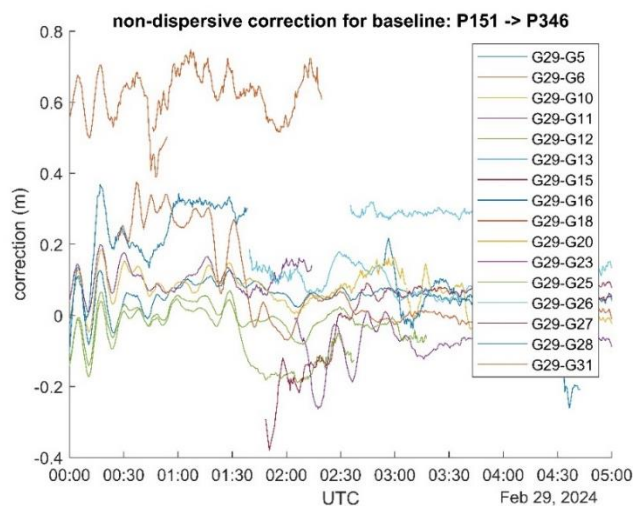
نسبی سیگنال‌های Galileo باشد. در برخی نقاط زمانی خاص، مشابه آنچه در سامانه GPS مشاهده شد، مقادیر تصحیحات به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند و به مقادیر بالاتر از ۲۰ سانتی‌متر نیز می‌رسند. این افزایش‌های ناگهانی عمدتاً مربوط به زمان‌های طلوع و غروب ماهواره‌هاست که با یافته‌های کلی پژوهش درباره رفتار نمایی تصحیحات در این زمان‌ها همخوانی دارد. تفاوت قابل‌توجه دیگر در مقایسه با سامانه GPS، تعداد کمتر خطوط (ماهواره‌ها) در نمودار Galileo است که نشان‌دهنده پوشش ماهواره‌ای کمتر این سامانه در زمان انجام آزمایش می‌باشد. این امر می‌تواند بر تعداد مشاهدات در دسترس و به تبع آن بر دقت نهایی تعیین موقعیت در حالت تک‌سامانه‌ای تأثیرگذار باشد. با این حال، نکته مثبت قابل‌توجه در مورد تصحیحات یونسفری Galileo، پایداری نسبی آنها در طول زمان است. برخلاف برخی ماهواره‌های GPS که نوسانات شدیدتری نشان می‌دادند، ماهواره‌های Galileo رفتار پایدارتری را نمایش می‌دهند. این پایداری می‌تواند ناشی از طراحی پیشرفته‌تر این سامانه و یا تفاوت در فرکانس‌های مورد استفاده باشد که منجر به تأثیرپذیری متفاوت از شرایط یونسفری می‌شود. این ویژگی‌های Galileo توجیه‌کننده نتایج جدول ۱ است که نشان می‌دهد سامانه Galileo به تنهایی دقت بهتری نسبت به BeiDou و دقت کمتری نسبت به GPS دارد. همچنین، در ترکیب‌های دوگانه (جدول ۲)، تلفیق GPS با Galileo عملکرد بهتری نسبت به تلفیق GPS با BeiDou دارد که می‌تواند ناشی از همین پایداری نسبی تصحیحات یونسفری Galileo و شباهت ساختاری بیشتر آن با GPS باشد.

با بررسی دقیق شکل ۶ که نمودار تصحیحات یونسفری سامانه BeiDou چین در خط مرجع بین ایستگاه مرجع اصلی (P151) و ایستگاه مرجع کمکی (P346) را نشان می‌دهد، می‌توان الگوهای خاصی را در رفتار یونسفری این سامانه مشاهده کرد، در این نمودار سری زمانی مربوط به ۵ ساعت ابتدایی زمان UTC، تصحیحات یونسفری سامانه BeiDou دارای ویژگی‌های قابل‌توجهی است که آن را از دو سامانه دیگر متمایز می‌کند. مشخص‌ترین ویژگی این نمودار، دامنه

بزرگ‌تر تصحیحات یونسفری نسبت به GPS و Galileo است. در حالی که بیشتر تصحیحات GPS و Galileo در محدوده ± 15 سانتی‌متر قرار داشتند، تصحیحات BeiDou در بسیاری از موارد از ± 20 سانتی‌متر فراتر می‌روند و در برخی نقاط حتی به بیش از ± 40 سانتی‌متر نیز می‌رسند. همچنین، نوسانات شدیدتر و پراکندگی بیشتر در تصحیحات یونسفری BeiDou مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این سامانه به شرایط یونسفری باشد. این الگوی رفتاری متغیر، یکی از دلایل اصلی دقت پایین‌تر سامانه BeiDou در حالت تک‌سامانه‌ای است که در جدول ۱ نیز منعکس شده است. نکته قابل‌توجه دیگر، تعداد زیاد خطوط (ماهواره‌ها) در نمودار BeiDou است که نشان‌دهنده پوشش ماهواره‌ای خوب این سامانه در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. با این حال، علی‌رغم تعداد بیشتر ماهواره‌ها، کیفیت پایین‌تر سیگنال‌ها (که خود را در قالب تصحیحات یونسفری بزرگ‌تر نشان می‌دهد) منجر به دقت پایین‌تر این سامانه شده است. در این نمودار نیز مانند دو نمودار قبلی، افزایش قابل‌توجه مقادیر تصحیحات در زمان‌های مربوط به طلوع و غروب ماهواره‌ها مشاهده می‌شود، اما در مورد BeiDou این افزایش‌ها شدیدتر و با دامنه بزرگ‌تری رخ می‌دهند. این رفتار نمایی تصحیحات در این زمان‌ها، اهمیت استفاده از حد آستانه برای حذف مشاهدات با تصحیحات بزرگ را تأیید می‌کند، خصوصاً برای سامانه BeiDou که تصحیحات آن به‌طور میانگین بزرگ‌تر است. مقایسه این نمودار با نمودارهای GPS و Galileo توجیه‌کننده نتایج ارائه شده در جداول ۱ تا ۳ است که نشان می‌دهد سامانه BeiDou به تنهایی دقت پایین‌تری دارد و حتی در ترکیب با GPS نیز عملکرد ضعیف‌تری نسبت به ترکیب GPS با Galileo از خود نشان می‌دهد. با این حال، نکته مهمی که از این نمودار برمی‌آید این است که علی‌رغم تصحیحات بزرگ‌تر و متغیرتر، وجود تعداد بیشتر ماهواره‌های BeiDou می‌تواند در تلفیق سه سامانه مفید باشد، زیرا با استفاده از حد آستانه مناسب می‌توان ماهواره‌های با تصحیحات بزرگ را حذف کرد و همچنان از مزیت تعداد بیشتر مشاهدات بهره برد.



شکل ۶. تصحیحات یونسفری سامانه Beidou در خط مرجع بین ایستگاه مرجع و نقطه P346.

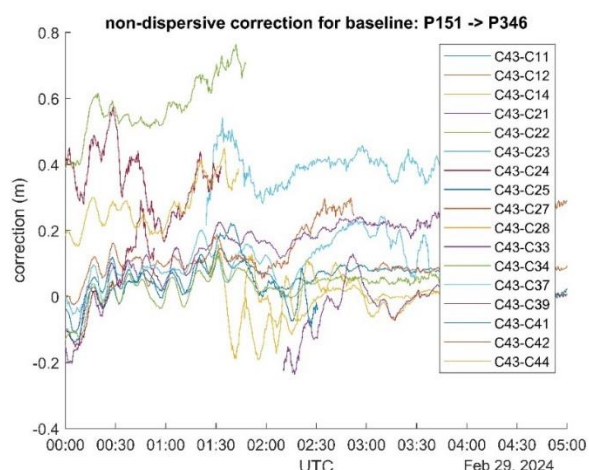


شکل ۷. تصحیحات تروپوسفری سامانه GPS در خط مرجع بین ایستگاه مرجع و نقطه P346.

خاص، مقادیر تصحیحات تروپوسفری نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند و به بیش از ± 20 سانتی‌متر می‌رسند. این افزایش‌های ناگهانی همچنان با زمان‌های طلوع و غروب ماهواره‌ها مرتبط هستند، اما با شدت کمتری نسبت به تصحیحات یونسفری رخ می‌دهند. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار، همبستگی بیشتر بین تصحیحات تروپوسفری ماهواره‌های مختلف است. در حالی که در نمودار تصحیحات یونسفری، ماهواره‌های مختلف رفتارهای متفاوتی نشان می‌دادند، در اینجا رفتار نسبتاً مشابهی بین ماهواره‌های مختلف مشاهده می‌شود. این همبستگی می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که تروپوسفر یک لایه غیرپاشنده است و تأثیر آن بر سیگنال‌ها مستقل از فرکانس می‌باشد.

- تصحیحات تفاضلی دوگانه تروپوسفری برای خط مبدا اول بین ایستگاه مرجع اصلی P151 و ایستگاه مرجع کمکی P346P.

با بررسی دقیق شکل ۷ که نمودار تصحیحات تروپوسفری سامانه GPS در خط مرجع بین ایستگاه مرجع اصلی (P151) و ایستگاه مرجع کمکی (P346) را نشان می‌دهد، می‌توان به درک عمیق‌تری از رفتار تروپوسفری و تأثیر آن بر دقت تعیین موقعیت دست یافت. در این نمودار سری زمانی، تصحیحات تروپوسفری سامانه GPS عمدتاً در محدوده ± 10 سانتی‌متر قرار دارند که نسبت به تصحیحات یونسفری (شکل ۴) محدوده کوچک‌تری را نشان می‌دهد. مشابه آنچه در تصحیحات یونسفری مشاهده شد، در برخی نقاط زمانی



شکل ۸. تصحیحات تروپوسفری سامانه Beidou در خط مرجع بین ایستگاه مرجع و نقطه P346.

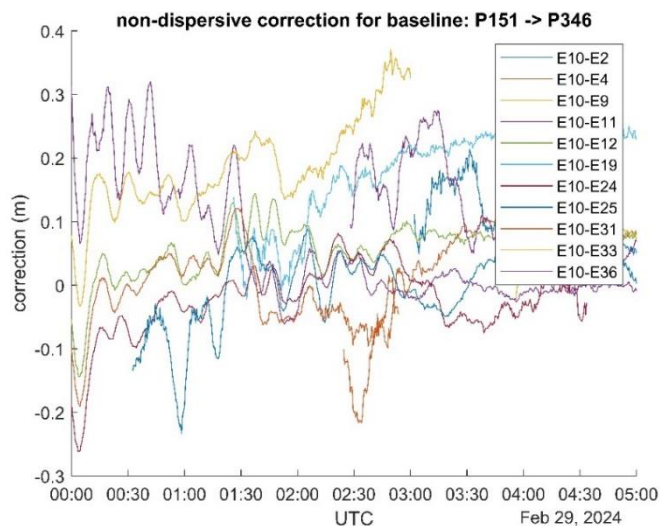
ج) نویز بیشتر در مشاهدات BeiDou که می‌تواند در تخمین تصحیحات تروپوسفری تأثیرگذار باشد. همچنین، در این نمودار نیز مانند نمودار تصحیحات یونسفری BeiDou، نوسانات شدیدتر و پراکندگی بیشتری مشاهده می‌شود. این نوسانات بیشتر در تصحیحات تروپوسفری BeiDou، یکی دیگر از دلایل دقت پایین‌تر این سامانه در حالت تک‌سامانه‌ای است که در جدول ۱ مشاهده شد. نکته قابل توجه دیگر، وجود برخی خطوط با الگوی رفتاری کاملاً متفاوت است که نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در شرایط هندسی ماهواره‌های مختلف BeiDou می‌باشد. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از ترکیب خاص ماهواره‌های BeiDou باشد که شامل ماهواره‌های مدار زمین‌آهنگ (GEO)، مدار زمین میان‌شیب‌دار (IGSO) و مدار زمین میانی (MEO) می‌باشند.

در شکل ۸ که نمودار تصحیحات تروپوسفری سامانه BeiDou را نشان می‌دهد، الگوهای متفاوتی نسبت به تصحیحات تروپوسفری GPS مشاهده می‌شود. تصحیحات تروپوسفری BeiDou دارای دامنه بزرگ‌تری هستند و در بسیاری از موارد از محدوده ± 15 سانتی‌متر فراتر می‌روند و در برخی نقاط حتی به ± 30 سانتی‌متر نیز می‌رسند.

این دامنه بزرگ‌تر تصحیحات تروپوسفری در BeiDou می‌تواند به چند دلیل باشد:

الف) تفاوت در زاویه ارتفاعی ماهواره‌های (مدار متفاوت) سامانه BeiDou نسبت به سامانه GPS که منجر به مسیر طولانی‌تر سیگنال در تروپوسفر می‌شود.

ب) تفاوت در دقت مدل‌سازی تروپوسفر در الگوریتم‌های پردازش مشاهدات BeiDou



شکل ۹. تصحیحات تروپوسفری سامانه Galileo در خط مرجع بین ایستگاه مرجع و نقطه P346.

پیدا می‌کند وجود مقادیر زیاد از طرفی باعث خطای زیاد درون‌یابی چه در مورد تصحیحات یونسفری و چه تروپوسفری می‌شود.

برای شرط اندازه تصحیحات در این تحقیق حد آستانه تصحیحات پاشنده برابر ۱۵ سانتی‌متر و حد آستانه تصحیحات ناپاشنده برابر ۱۰ سانتی‌متر به صورت تجربی در نظر گرفته شد. برای حالات دارای تعداد سامانه کمتر (خصوصاً حالات تک‌سامانه‌ای) این مقادیر منجر به کمبود درجه آزادی می‌شوند که برای آنها یکی از حد آستانه‌های ۲۰، ۲۵ و یا ۳۰ سانتی‌متر (هم برای تصحیحات یونسفری و هم تروپوسفری) انتخاب می‌شود به نحوی که دستگاه معادلات تکیه نباشد.

پس از اینکه به بهترین حالات استفاده از تصحیحات دست پیدا کردیم حال باید تعیین مختصات دقیق گیرنده متحرک در حالات مختلف از جمله تک‌سامانه‌ای، تلفیق دو سامانه و تلفیق هر سه سامانه بررسی شود به طوری که درون‌یابی‌های گفته شده در این تحقیق هر کدام جداگانه بررسی شود و البته در کنار آن حالت بدون استفاده از تصحیحات هم باید بررسی شود تا تأثیر اعمال تصحیحات نسبت به عدم اعمال تصحیحات نیز مورد بررسی واقع شود.

۳-۱. تک‌سامانه‌ای

جدول ۱ نتایج تعیین موقعیت گیرنده متحرک را با استفاده از سه سامانه ناوبری ماهواره‌ای GPS، Galileo و BeiDou به صورت مجزا نشان می‌دهد. خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) در سه راستای شمالی، شرقی و ارتفاعی برای هر سامانه و با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی تصحیحات شبکه‌ای گزارش شده است. برای سامانه GPS، مقادیر RMSE در راستای شمالی بین ۰/۱۳ تا ۰/۲۵ متر، در راستای شرقی بین ۰/۳۱ تا ۰/۴۳ متر و در راستای ارتفاعی بین ۰/۴۸ تا ۰/۸۴ متر متغیر است. روش‌های LCM و LIM بهترین عملکرد را با خطای مسطحاتی ۰/۳۴ متر نشان می‌دهند، در حالی که حالت بدون تصحیح (بدون در نظر گرفتن تصحیحات شبکه‌ای) بدترین نتیجه را با خطای مسطحاتی ۰/۴۹ متر دارد. این نتایج نشان می‌دهد که اعمال تصحیحات شبکه‌ای، خطا را به میزان قابل توجهی (حدود ۳۰٪) کاهش می‌دهد. برای

در شکل ۹ که نمودار تصحیحات تروپوسفری سامانه Galileo را نشان می‌دهد، الگوهایی مشابه با تصحیحات تروپوسفری GPS مشاهده می‌شود، اما با برخی تفاوت‌های قابل توجه. تصحیحات تروپوسفری Galileo عمدتاً در محدوده ± 12 سانتی‌متر قرار دارند که اندکی بزرگ‌تر از محدوده تصحیحات GPS اما کوچک‌تر از محدوده تصحیحات BeiDou است. نکته مثبت قابل توجه در مورد تصحیحات تروپوسفری Galileo، ثبات نسبی آنها در طول زمان است. برخلاف BeiDou که نوسانات شدیدتری نشان می‌داد، ماهواره‌های Galileo رفتار پایدارتری را نمایش می‌دهند که مشابه با GPS است. این پایداری می‌تواند ناشی از طراحی مشابه Galileo با GPS و استفاده از مدارهای مشابه برای ماهواره‌ها باشد. در این نمودار نیز، افزایش مقادیر تصحیحات در زمان‌های مربوط به طلوع و غروب ماهواره‌ها مشاهده می‌شود، اما این افزایش‌ها نسبت به BeiDou کمتر و نسبت به GPS اندکی بیشتر است. این الگو تأیید می‌کند که حد آستانه ۱۰ سانتی‌متر برای تصحیحات ناپاشنده (تروپوسفری) که در متن مقاله ذکر شده، یک انتخاب منطقی برای فیلترکردن مشاهدات با کیفیت پایین است. تعداد کمتر خطوط در نمودار Galileo نسبت به دو سامانه دیگر، مجدداً تأیید می‌کند که پوشش ماهواره‌ای این سامانه در زمان انجام آزمایش کمتر بوده است. با این حال، کیفیت بالای مشاهدات (که خود را در قالب تصحیحات تروپوسفری کوچک‌تر و پایدارتر نشان می‌دهد) توانسته تا حدودی این کمبود را جبران کند. با مقایسه هر سه نمودار تصحیحات تروپوسفری، می‌توان نتیجه گرفت که GPS و Galileo رفتار مشابه‌تری دارند و هر دو از BeiDou پایدارتر هستند. این یافته توجیه‌کننده نتایج جدول ۲ است که نشان می‌دهد تلفیق GPS با Galileo عملکرد بهتری نسبت به تلفیق GPS با BeiDou دارد. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از نمایش بیش از اندازه تنها برای یکی از خطوط مبنا ترسیمات انجام گرفت و نتیجه‌ای که می‌توان برداشت کرد این است که نه تنها در نمودارهای فوق، بلکه در تمامی نمودارهای خطوط مبنا ملاحظه می‌شود، هنگام نزدیک شدن به طلوع و غروب ماهواره‌ها، مقادیر مربوط به تصحیحات پاشنده به صورت شبیه به نمایی افزایش

۳-۲. تلفیق دو سامانه

جدول ۲ نتایج تلفیق دو به دوی سامانه‌های ناوبری را نشان می‌دهد. GPS+Galileo و GPS+BeiDou این تلفیق‌ها به‌منظور بررسی اثر هم‌افزایی سامانه‌ها انجام شده است. برای تلفیق GPS+Galileo، مقادیر RMSE در راستای شمالی بین ۰/۰۶ تا ۰/۲۹ متر، در راستای شرقی بین ۰/۰۸ تا ۰/۵۵ متر و در راستای ارتفاعی بین ۰/۱۹ تا ۱/۰۴ متر متغیر است. روش LIM بهترین عملکرد را با خطای مسطحاتی ۰/۰۹ متر و خطای ارتفاعی ۰/۱۹ متر نشان می‌دهد. مقایسه این نتایج با حالت تک‌سامانه‌ای نشان می‌دهد که تلفیق GPS و Galileo دقت را به‌میزان قابل‌توجهی بهبود بخشیده است، به‌طوری‌که خطای مسطحاتی از ۰/۱۷ متر (بهترین حالت Galileo) به ۰/۰۹ متر کاهش یافته است. برای تلفیق GPS+BeiDou، مقادیر RMSE در راستای شمالی بین ۰/۰۷ تا ۰/۳۱ متر، در راستای شرقی بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۶ متر و در راستای ارتفاعی بین ۰/۱۷ تا ۱/۳۰ متر متغیر است. روش LCM بهترین عملکرد را با خطای مسطحاتی ۰/۱۰ متر و خطای ارتفاعی ۰/۱۷ متر نشان می‌دهد. این نتایج نیز بهبود قابل‌توجهی نسبت به حالت تک‌سامانه‌ای دارند، اما اندکی ضعیف‌تر از تلفیق GPS+Galileo هستند. مقایسه دو تلفیق نشان می‌دهد که GPS+Galileo عملکرد اندکی بهتر در مؤلفه مسطحاتی (۰/۰۹ متر در مقابل ۰/۱۰ متر) دارد، اما GPS+BeiDou در مؤلفه ارتفاعی اندکی بهتر عمل می‌کند (۰/۱۷ متر در مقابل ۰/۱۹ متر). این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از آرایش هندسی متفاوت ماهواره‌ها باشد؛ ماهواره‌های BeiDou شامل ماهواره‌های مدار زمین‌آهنگ (GEO) هستند که می‌توانند به تعیین ارتفاع بهتر کمک کنند. در هر دو تلفیق، تفاوت بین حالت با تصحیح و بدون تصحیح بسیار چشمگیر است، که نشان می‌دهد تصحیحات شبکه‌ای نقش مهمی در بهبود دقت دارند. برای GPS+Galileo، خطای مسطحاتی از ۰/۶۲ متر (بدون تصحیح) به ۰/۰۹ متر (با تصحیح LIM) کاهش می‌یابد؛ و برای GPS+BeiDou، این کاهش از ۰/۶۸ متر به ۰/۱۰ متر است. در مورد روش‌های درون‌یابی، الگوی متفاوتی نسبت به حالت تک‌سامانه‌ای مشاهده می‌شود. برای

سامانه Galileo، مقادیر RMSE در راستای شمالی بین ۰/۱۴ تا ۰/۹۴ متر، در راستای شرقی بین ۰/۱ تا ۱/۰۱ متر و در راستای ارتفاعی بین ۰/۲۴ تا ۲/۶۴ متر متغیر است. روش DIM بهترین عملکرد را با خطای مسطحاتی ۰/۱۷ متر دارد، در حالی که حالت بدون تصحیح دارای خطای مسطحاتی ۱/۳۸ متر است. نکته قابل‌توجه این است که تفاوت بین حالت با تصحیح و بدون تصحیح برای Galileo بسیار بیشتر از GPS است (حدود ۸ برابر)، که نشان می‌دهد سامانه Galileo به شدت از تصحیحات شبکه‌ای سود می‌برد. برای سامانه BeiDou، مقادیر RMSE در راستای شمالی بین ۰/۳۴ تا ۰/۹۴ متر، در راستای شرقی بین ۰/۵۸ تا ۱/۲۶ متر و در راستای ارتفاعی بین ۱/۳۳ تا ۲/۷۹ متر متغیر است. روش LIM بهترین عملکرد را با خطای مسطحاتی ۰/۶۹ متر نشان می‌دهد. به‌طور کلی، سامانه BeiDou نسبت به دو سامانه دیگر عملکرد ضعیف‌تری دارد، حتی با اعمال تصحیحات. مقایسه سه سامانه نشان می‌دهد که Galileo در حالت تک‌سامانه‌ای و با اعمال تصحیحات، بهترین دقت مسطحاتی (۰/۱۷ متر) را دارد، اما GPS بهترین دقت ارتفاعی (۰/۴۸ متر) را نشان می‌دهد. BeiDou در هر دو مؤلفه ضعیف‌ترین عملکرد را دارد. نکته جالب این است که بدون اعمال تصحیحات، GPS دقت بهتری نسبت به دو سامانه دیگر دارد، که نشان‌دهنده دقت بالاتر این سامانه نسبت به سامانه‌های دیگر است.

جدول ۱. نتایج تعیین موقعیت گیرنده متحرک در حالت تک‌سامانه‌ای.

RMSE (m)				
Up	East	North	روش درون‌یابی	منظومه‌ها
۰/۵۳	۰/۳۲	۰/۱۳	LCM	GPS
۰/۵۱	۰/۴۳	۰/۱۷	DM	GPS
۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۱۳	LM	GPS
۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۱۴	LSM	GPS
۰/۸۴	۰/۴۲	۰/۲۵	No Corr	GPS
۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۵	LCM	GAL
۰/۳۱	۰/۱۰	۰/۱۴	DM	GAL
۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۱۵	LM	GAL
۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۴	LSM	GAL
۲/۶۴	۱/۰۱	۰/۹۴	No Corr	GAL
۱/۳۴	۰/۵۸	۰/۳۶	LCM	BDS
۱/۳۷	۰/۵۹	۰/۳۴	DM	BDS
۱/۳۳	۰/۵۸	۰/۳۵	LM	BDS
۱/۳۶	۰/۶۰	۰/۳۵	LSM	BDS
۲/۷۹	۱/۲۶	۰/۹۴	No Corr	BDS

LIM اندکی ضعیف‌تر با خطای مسطحاتی ۰/۰۸ متر عمل می‌کند. روش DIM با خطای مسطحاتی ۰/۰۹ متر ضعیف‌ترین عملکرد را در بین روش‌های درونیابی دارد. مقایسه این نتایج با جداول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که تلفیق هر سه سامانه، دقت را به میزان قابل توجهی نسبت به حالت تک‌سامانه‌ای و حتی نسبت به تلفیق دو سامانه بهبود بخشیده است. خطای مسطحاتی از ۰/۰۹ متر (بهترین حالت GPS+Galileo) به ۰/۰۷ متر کاهش یافته است، که نشان‌دهنده بهبود ۲۲٪ است. خطای ارتفاعی نیز از ۰/۱۷ متر (بهترین حالت GPS+BeiDou) به ۰/۱۷ متر (با روش‌های LCM، LM و LSM) ثابت مانده است. تفاوت بین حالت با تصحیح و بدون تصحیح در تلفیق سه سامانه نیز بسیار چشمگیر است. خطای مسطحاتی از ۰/۴۶ متر (بدون تصحیح) به ۰/۰۷ متر (با تصحیح LCM یا LSM) کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده بهبود ۸۵٪ است. این بهبود قابل توجه نشان می‌دهد که تصحیحات شبکه‌ای در تلفیق سامانه‌ها نقش بسیار مهمی دارند. در مورد روش‌های درونیابی، سه روش LCM، LIM و LSM عملکرد تقریباً یکسانی دارند و تفاوت آنها در حد میلی‌متر است. روش DIM همچنان ضعیف‌ترین عملکرد را نشان می‌دهد، اما تفاوت آن با سایر روش‌ها کمتر از حالت‌های قبلی است. این همگرایی نتایج می‌تواند ناشی از افزایش تعداد مشاهدات و بهبود آرایش هندسی ماهواره‌ها در تلفیق سه سامانه باشد.

GPS+Galileo، روش LIM بهترین است، در حالی که برای GPS+BeiDou، روش LCM عملکرد بهتری دارد. این تفاوت می‌تواند ناشی از الگوهای متفاوت تغییرات اتمسفری در ترکیب‌های مختلف باشد.

جدول ۲. نتایج تعیین موقعیت گیرنده متحرک در حالت تک‌سامانه‌ای

RMSE (m)				
Up	East	North	روش درونیابی	منظومه‌ها
۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۰۶	LCM	GPS+GAL
۰/۲۰	۰/۰۸	۰/۱۰	DM	GPS+GAL
۰/۱۹	۰/۰۸	۰/۰۶	LM	GPS+GAL
۰/۱۹	۰/۰۸	۰/۰۶	LSM	GPS+GAL
۱/۰۴	۰/۵۵	۰/۲۹	No Corr	GPS+GAL
۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۰۸	LCM	GPS+BDS
۰/۶۷	۰/۲۲	۰/۱۱	DM	GPS+BDS
۰/۲۱	۰/۰۶	۰/۰۷	LM	GPS+BDS
۰/۲۱	۰/۰۶	۰/۰۷	LSM	GPS+BDS
۱/۳۰	۰/۶۰	۰/۳۱	No Corr	GPS+BDS

۳-۳. تلفیق هر سه سامانه

جدول ۳ نتایج تلفیق هر سه سامانه GPS+Galileo+BeiDou را نشان می‌دهد، که به منظور بررسی اثر هم‌افزایی حداکثری انجام شده است. در این تلفیق، مقادیر RMSE در راستای شمالی بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۹ متر، در راستای شرقی بین ۰/۰۴ تا ۰/۳۴ متر و در راستای ارتفاعی بین ۰/۱۷ تا ۱/۰۸ متر متغیر است. روش‌های LCM و LSM بهترین عملکرد را با خطای مسطحاتی یکسان ۰/۰۷ متر نشان می‌دهند، در حالی که روش

جدول ۳. نتایج تعیین موقعیت گیرنده متحرک در حالت تک‌سامانه‌ای.

RMSE (m)				
Up	East	North	روش درونیابی	منظومه‌ها
۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۰۵	LCM	GPS+GAL+BDS
۰/۱۸	۰/۰۵	۰/۰۶	DM	GPS+GAL+BDS
۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۵	LM	GPS+GAL+BDS
۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۰۵	LSM	GPS+GAL+BDS
۱/۰۸	۰/۴۳	۰/۱۹	No Corr	GPS+GAL+BDS

مقایسه جداول ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد که:

- تلفیق سامانه‌ها دقت تعیین موقعیت را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. بهترین دقت مسطحاتی از ۰/۱۷ متر (بهترین حالت تک‌سامانه‌ای) به ۰/۰۷ متر (در تلفیق سه سامانه) کاهش یافته است.

- تصحیحات شبکه‌ای نقش بسیار مهمی در بهبود دقت دارند. تفاوت بین حالت با تصحیح و بدون تصحیح در همه جداول چشمگیر است، اما این تفاوت در تلفیق سامانه‌ها بزرگ‌تر است.

- روش‌های درون‌یابی LIM، LCM و LSM عملکرد نسبتاً مشابهی دارند، در حالی که روش DIM معمولاً ضعیف‌تر عمل می‌کند. با این حال، تفاوت بین روش‌ها با افزایش تعداد سامانه‌های تلفیق شده کاهش می‌یابد.

- مؤلفه ارتفاعی همواره خطای بیشتری نسبت به مؤلفه‌های مسطحاتی دارد، که این امر ناشی از آرایش هندسی ماهواره‌ها و محدودیت‌های ذاتی تعیین موقعیت ماهواره‌ای است.

- سامانه GPS به تنهایی پایداری بیشتری نسبت به دو سامانه دیگر دارد، اما بهترین نتایج زمانی حاصل می‌شود که هر سه سامانه با هم تلفیق شوند.

- تلفیق GPS+Galileo عملکرد بهتری نسبت به تلفیق GPS+BeiDou دارد، که می‌تواند ناشی از سازگاری بیشتر بین GPS و Galileo و یا کیفیت بهتر مشاهدات Galileo نسبت به BeiDou باشد.

- تلفیق هر سه سامانه با اعمال تصحیحات شبکه‌ای، دقت قابل توجهی (در حد چند سانتی‌متر) را برای تعیین موقعیت کینماتیک آنی فراهم می‌کند، که برای بسیاری از کاربردهای عملی مانند نقشه‌برداری دقیق و ناوبری کافی است.

این نتایج اهمیت تلفیق سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای و استفاده از تصحیحات شبکه‌ای را برای دستیابی به دقت بالا در تعیین موقعیت تأیید می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که به کارگیری روش ایستگاه مرجع مجازی (VRS) در چارچوب تعیین موقعیت کینماتیک آنی شبکه‌ای، به‌ویژه هنگامی که با تلفیق چندسامانه‌ای همراه باشد، می‌تواند دقت و پایداری موقعیت‌یابی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. تحلیل داده‌های حاصل از شش ایستگاه دائم UNAVCO آشکار کرد که در حالت تک‌سامانه‌ای، سامانه GPS عملکرد بهتری نسبت به دو سامانه Galileo و BeiDou دارد، هرچند که اعمال تصحیحات شبکه‌ای باعث ارتقای چشمگیر دقت در هر سه سامانه شد. مقایسه تلفیق‌های دوگانه نشان داد که ترکیب GPS و Galileo به دلیل شباهت ساختاری و کیفیت بالاتر مشاهدات، نتایج دقیق‌تری نسبت به ترکیب GPS و BeiDou ارائه می‌دهد. افزون بر این، استفاده همزمان از سه سامانه موجب کاهش چشمگیر خطای مسطحاتی از مقیاس چند ده سانتی‌متر در حالت تک‌سامانه‌ای به حدود هفت سانتی‌متر شد که بیانگر هم‌افزایی قابل توجه ناشی از افزایش تعداد مشاهدات و بهبود هندسه فضایی ماهواره‌ها است. بررسی روش‌های درون‌یابی نیز نشان داد که مدل‌های LIM، LCM و LSM عملکردی مشابه و قابل‌اعتماد دارند، در حالی که روش DIM به دلیل ماهیت تک‌بعدی خود دقت کمتری ارائه می‌کند. علاوه بر این، تحلیل تصحیحات اتمسفری نشان داد که این تصحیحات به هندسه ماهواره‌ها حساس بوده و در زمان طلوع و غروب ماهواره‌ها به‌صورت نمایی افزایش می‌یابند؛ از این رو اعمال آستانه برای حذف مشاهدات با خطای بالا اقدامی ضروری در بهبود دقت است.

مراجع

عسگری، ج.؛ امیری سیمکویی، ع. ر. و زنگنه‌نژاد، ف. (۱۳۹۲). توسعه الگوریتم ایستگاه مرجع مجازی GNSS برای ایجاد یک سیستم شبکه RTK. علوم و فنون نقشه برداری، ۲(۴)، ۷۳-۸۸.

Chang, X.-W., Yang, X., & Zhou, T. (2005). MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation. *Journal of Geodesy*, 79(9), 552-565.
Dai, L., Han, S., Wang, J., & Rizos, C. (2001).

A study on GPS/GLONASS multiple reference station techniques for precise real-time carrier phase-based positioning. In *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division*

- of The Institute of Navigation (ION GPS 2001).
- El-Mowafy, A. (2012). Precise real-time positioning using network RTK. In *Global navigation satellite systems: Signal, theory and applications*, 7, 161–188.
- Euler, H., Keenan, C., & Zebhauser, B. (2001). Study of a simplified approach in utilizing information from permanent reference station arrays. In *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001)*.
- Euler, H.J., & Landau, H. (1992). Fast ambiguity resolution on the fly for real-time applications. *Sixth international geodetic symposium on satellite doppler positioning*, Columbus, Ohio, March(1992).
- Frei, E., & Beutler, G. (1990). Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach (FARA): Theory and first results. *Manuscripta Geodaetica*, 15(6), 325–356.
- Gao, X. W., Liu, J. N., & Ge, M. R. (2002). An ambiguity searching method for network RTK baselines between base stations at single epoch. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 31(4), 305–309.
- Hatch, R. R. (2010). Improved GNSS ambiguity resolution with a C-band signal. In *Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation* (pp. 535–539).
- Hofmann, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer.
- Jazaeri, S., Amiri-Simkooei, A. R., & Sharifi, M. A. (2012). Fast integer least-squares estimation for GNSS high-dimensional ambiguity resolution using lattice theory. *Journal of Geodesy*, 86(2), 123–136.
- Landau, H. (2000). Zur Qualitätssicherung in GPS Referenzstationsnetzen. In *XXIII Course of Engineering Surveying* (pp. 277–290). Verlag Konrad Wittwer.
- Leick, A. (2004). *GPS satellite surveying*. Wiley.
- Marel, H. van der. (1998). Virtual GPS reference stations in the Netherlands. In *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1998)* (pp. 49–58).
- Niell, A. (2000). Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. *Earth, Planets and Space*, 52, 699–702.
- O’Keefe, K., Lin, M., & Lachapelle, G. (2007). Network real-time kinematic performance analysis using RTCM 3.0 and the Southern Alberta network. *Geomatica*, 61(1), 29–41.
- Raquet, J. F. (1998). *Development of a method for kinematic GPS carrier phase ambiguity resolution* (Doctoral dissertation). University of Calgary.
- Rizos, C. (2003). Network RTK research and implementation: A geodetic perspective. *Journal of Global Positioning Systems*, 1(2), 144–150.
- Rizos, C., Han, S., & Chen, H. Y. (2000). Regional-scale multiple reference stations for carrier phase-based GPS positioning: A correction generation algorithm. *Earth, Planets and Space*, 52(10), 795–800.
- Saeidi, A. (2012). *Evaluation of network RTK in Southern Ontario* (Master’s thesis). York University.
- Subirana, J. S., Zornoza, J. J., & Hernández-Pajares, M. (2013). *GNSS data processing, Vol. I: Fundamentals and algorithms*. ESA Communications.
- Teunissen, P. J. G., Simons, D. G., & Tiberius, C. C. J. M. (2005). *Probability and observation theory*. Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering.
- Van Sickle, J. (2008). *GPS for land surveyors*. CRC press.
- Vollath, U., Buecherl, A., Landau, H., Pagels, C., & Wager, B. (2000). Multi-base RTK positioning using virtual reference stations. In *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)* (pp. 123–131).
- Vollath, U., Landau, H., Chen, X., Doucet, K., & Pagels, C. (2002). Network RTK versus single base RTK: Understanding the error characteristics. In *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002)*.
- Wübbena, G., & Bagge, A. (2002). RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP. Geo++ White Paper), 2006.01.
- Yang, X., Zhou, T., & Chang, W. X. (2005). MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least squares estimation. *Journal of Geodesy*, 79(9), 552–565.

Zou, X., Ge, M., Tang, W., Shi, C., & Liu, J.
(2012). URTK: Undifferenced network
RTK positioning. *GPS Solutions*.
<https://doi.org/10.1007/s10291-012-0277-5>