

ارزیابی روش تعیین موقعیت مطلق دقیق با ترکیب‌های مختلف دو فرکانسه

BeiDou و Galileo

کمال پروازی^۱، سعید فرزانه^{۲*} و عبدالرضا صفری^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استاد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۴/۲۲، پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۵)

چکیده

در این تحقیق هدف ارزیابی ترکیب‌های مختلف عاری از یونسفر برای فرکانس‌های دو سیستم ماهواره‌ای ناوبری Galileo و BeiDou و در نهایت بررسی تأثیر این ترکیب‌ها در کیفیت تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) می‌باشد. به این منظور از نرم‌افزار PPPteh تحت matlab ارائه شده توسط نویسندگان مقاله استفاده می‌شود. ابتدا به ارزیابی ترکیب‌های مختلف فرکانس‌های ماهواره‌های Galileo شامل E1/E5a، E1/E5b، E1/E5، E1/E6 و ماهواره‌های BeiDou شامل B1/B2، B1/B3، B2/B3 پرداخته شد. بر این اساس ترکیب E1/E5a و B1/B2 به‌عنوان بهترین ترکیب برای استفاده در روش PPP انتخاب شدند. در بین دیگر فرکانس‌ها دو ترکیب E1/E5b و B1/B3 از دقت نزدیک به E1/E5a و B1/B2 برخوردار بودند. سپس با در نظر گرفتن دو معیار برتری، تعیین موقعیت PPP با ترکیب مشاهدات دو سیستم GPS/Galileo و GPS/BeiDou و استفاده از دو ترکیب انتخاب شده انجام گرفت. کاهش زمان همگرایی و افزایش دقت سه‌بعدی مؤلفه‌های مختصاتی نسبت به حالت GPS نتیجه شد. در حالت مقایسه دو ترکیب نزدیک به هم کاهش زمان همگرایی در حالت دوبعدی بین ۱ تا ۵ دقیقه برای BeiDou و ۱ تا ۸ دقیقه برای Galileo نتیجه شد. در هنگام ترکیب دو سیستم، استفاده از مشاهدات Galileo نسبت به BeiDou از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار بوده است. در نهایت مقایسه نتایج تعیین موقعیت PPP در حالت ترکیب سه سیستم GPS/Galileo/BeiDou انجام گرفت. که نسبت به حالت تک سیستم GPS و همچنین ترکیب دو سیستم GPS/Galileo و GPS/BeiDou از کیفیت بالاتری برخوردار بوده است. بنابراین می‌توان دید که انتخاب سیگنال‌های مناسب در تعیین موقعیت PPP و ترکیب مشاهدات مختلف با GPS می‌تواند نیازهای کاربر را از نظر دقت و زمان همگرایی مرتفع سازد.

واژه‌های کلیدی: PPPteh، تعیین موقعیت مطلق دقیق، زمان همگرایی، ترکیب دو فرکانسه، کیفیت سیگنال، سیستم ماهواره‌ای ناوبری Galileo و BeiDou.

۱. مقدمه

دقیق زمان و کاربردهای ژئودینامیکی اشاره کرد (زومبرگ و همکاران، ۱۹۹۷).

تأخیر یونسفری مرتبه اول می‌تواند با استفاده از ترکیب عاری از یونسفر حذف شود (هافمن و همکاران، ۲۰۰۷).

بنابراین در تعیین موقعیت مطلق دقیق به جای استفاده از مشاهدات خام کد و فاز، مشاهدات عاری از یونسفر کد و

فاز به کار گرفته می‌شود (ژائو و شن، ۲۰۰۲؛ زومبرگ و همکاران، ۱۹۹۷). با استفاده از اطلاعات دقیق مدار و

ساعت ماهواره و مشاهدات عاری از یونسفر و همچنین اعمال تصحیحاتی به مشاهدات مانند تصحیح خطای

امروزه تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) به واسطه کارایی بالایی که در تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات تنها

یک گیرنده دارد، در بسیاری از کاربردهای علمی و تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با تعیین

موقعیت نسبی، PPP یک روش مقرون به صرفه است چرا که در این روش احتیاجی به داشتن ایستگاه مرجع و انجام

مشاهدات همزمان وجود ندارد و مشکل داشتن فاصله از نقطه مرجع نیز مطرح نیست. از جمله کاربردهای دیگر

PPP به غیر از تعیین موقعیت، می‌توان به تعیین مدار ماهواره‌های با ارتفاع پایین، هواشناسی با GPS، تعیین

پیچش فاز، جدایی مرکز فاز آنتن ماهواره و گیرنده، اثر نسیت، تأثیرات جابه‌جایی ایستگاه به واسطه جزرومد زمین جامد و بارگذاری اقیانوسی، تغییر پارامترهای دوران زمین و ...، PPP قادر است به دقت در حد سانتی‌متر برسد (بیسناس و ژائو، ۲۰۰۹؛ کویا و هروکس، ۲۰۰۱). زمان طولانی لازم برای همگرایی مسئله مهم در روش تعیین موقعیت PPP است. دقت تعیین موقعیت با PPP و زمان لازم برای همگرایی به تعداد و هندسه ماهواره‌های قابل‌رؤیت، کیفیت مشاهدات شبه‌فاصله کد، لحاظ کردن وزن صحیح مشاهدات (معرفی مدل تصادفی مناسب)، پیوستگی مشاهدات فاز و نرخ اندازه‌گیری بستگی دارد (بیسناس و ژائو، ۲۰۰۹). به‌منظور کاهش زمان همگرایی یکی از ایده‌های مورد استفاده، افزایش درجه آزادی سیستم با استفاده از سیستم‌های GNSS می‌باشد. با گسترش سیستم‌های ناوبری جهانی از جمله Galileo و BeiDou تلفیق مشاهدات این سیستم‌ها می‌تواند افزایش سرعت همگرایی و بهبود دقت در روش PPP را به همراه داشته باشد (زنگنه نژاد و همکاران، ۲۰۱۸؛ لی و ژانگ، ۲۰۱۴؛ کائو و همکاران، ۲۰۱۰).

با ایجاد و توسعه سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جدید مانند Galileo و BeiDou، سیستم بین‌المللی IGS تولیدات مدار و ساعت دقیقی را ایجاد کرده است که به‌عنوان تولیدات Multi-GNSS شناخته می‌شوند. تگدور و همکاران (۲۰۱۴) اولین تحقیق در زمینه تلفیق چهار سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای ناوبری را انجام داده که از داده‌های روزانه چهار ایستگاه در حالت استاتیک و کینماتیک مورد پردازش قرار دادند. تلفیقی به‌صورت فقط GPS، GPS+GLONASS، GPS+GLONASS+Galileo و GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou انجام گرفته است. آنها به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن ماهواره‌های Galileo و BeiDou به‌طور قابل‌توجهی دقت تعیین موقعیت را بهبود نمی‌دهد. لی و همکاران (۲۰۱۵) یک مطالعه برای تجزیه و تحلیل تعیین موقعیت مطلق دقیق با استفاده از مشاهدات مربوط به

سیستم‌های ماهواره‌ای چندگانه هم به‌صورت استاتیک هم به‌صورت کینماتیک با استفاده ترکیب مشاهدات GPS+GLONASS+Galileo انجام دادند. نتیجه این تحقیق تأثیر اضافه شدن سیستم‌های ماهواره به GPS موجب بهبود دو پارامتر دقت تعیین موقعیت و زمان همگرایی شد. کائی و همکاران (۲۰۱۵) عملکرد روش تعیین موقعیت دقیق را در حالت استاتیک و کینماتیک مورد بررسی قرار دادند و بر اساس آن این نتیجه حاصل شد که اضافه شدن مشاهدات ماهواره‌ای Galileo در صورت کم بودن تعداد ماهواره‌ها تأثیری در بهبود دقت و زمان همگرایی ندارد. عبد رابو و الربانی (۲۰۱۵) به بررسی روش تعیین موقعیت دقیق به‌صورت مشاهدات ترکیب شده پرداختند و مشاهده کردند که ترکیب GPS+GLONASS نسبت به GPS تنها نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. وایت و همکاران (۲۰۱۵) ترکیب مشاهدات GPS+Galileo مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد که اضافه شدن Galileo به مشاهدات GPS موجب کاهش دقت تعیین موقعیت می‌شود.

سیستم ماهواره‌ای ناوبری GPS از سال ۲۰۰۹ شروع به جایگزینی ماهواره‌های قدیمی با ماهواره‌های جدید بلوک IIF کرده است که علاوه بر انتقال سیگنال‌های موجود L1 و L2 با فرکانس‌های ۱۵۷۵/۴۲ و ۱۲۲۷/۶۰ مگاهرتز سیگنال L5 با فرکانس ۱۱۷۶/۴۵ را نیز در اختیار قرار می‌دهد (الربانی، ۲۰۰۲). در حال حاضر ۱۲ ماهواره بلوک IIF در حال فعالیت هستند (الکساندر، ۲۰۱۴). سیستم ماهواره‌ای ناوبری BeiDou صورت فلکی است که تمام ماهواره‌های آنها سیگنال‌های فرکانس سوم را در اختیار قرار می‌دهد. BeiDou در حال حاضر در مرحله توسعه سریع قرار دارند. سیگنال‌های B1، B2 و B3 مربوط به سیستم ناوبری BeiDou به‌ترتیب دارای فرکانس‌های ۱۵۶۱/۰۹۸، ۱۲۰۷/۱۴، ۱۲۶۸/۵۲ مگاهرتز می‌باشند (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ چنگقی، ۲۰۱۲). BeiDou برای اولین بار سرویس ناوبری منطقه‌ای خود را در سال ۲۰۱۲ راه‌اندازی کرد (<http://www.beidou.gov.cn>). با

فرکانس‌های مختلف وجود دارد، برای سیستم Galileo ده حالت، برای سیستم BeiDou سه حالت ساخت مشاهدات عاری از یونسفر فراهم شده است. برای ارزیابی روش تعیین موقعیت مطلق دقیق از نظر دقت موقعیت و زمان همگرایی چهار گام در نظر گرفته شده است: (۱) ابتدا استفاده از مشاهدات دو فرکانسه L_1, L_2 مربوط به GPS و انجام تعیین موقعیت، (۲) ترکیب دو سیستم GPS و Galileo و انتخاب بهترین مدل ترکیب در این حالت، (۳) ترکیب دو سیستم GPS و BeiDou و انتخاب بهترین مدل ترکیب و (۴) در نهایت پس از سه مرحله قبل تعیین موقعیت ترکیبی با استفاده از سه سیستم توسط بهترین مدل فرکانسی انجام خواهد گرفت و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بخش‌های مختلف مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ مدل ریاضی تعیین موقعیت مطلق دقیق ارائه می‌شود. در ادامه در بخش ۳ داده‌های مورد استفاده و استراتژی پردازش بیان می‌شود. در نهایت در بخش ۴ نتایج حاصل از این تحقیق ارائه می‌شود.

۲. تعیین موقعیت مطلق دقیق با ترکیب سیگنال‌های

مختلف GPS، GLONASS و BeiDou

در سال ۱۹۹۷ و سپس سال ۲۰۰۱ روش تعیین موقعیت PPP با استفاده از تولیدات دقیق مدار و ساعت ماهواره ارائه شد. برای رسیدن به دقت بالا در این روش و استفاده از این مشاهدات نیازمند اعمال تصحیحات مورد نیاز می‌باشد (کوبا و هروکس، ۲۰۰۱؛ زومبرگ و همکاران، ۱۹۹۷). مدل ریاضی تعیین موقعیت مطلق دقیق بر اساس معادلات خطی شده کد و فاز است که به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} \Phi_j &= E(\lambda_j \varphi_{r,j}^s) = \\ & \rho_r^s + c(t_r - t^s) + \lambda_j N_{r,j}^s + \\ & T_r^s - \mu_j I_{r,1}^s + B_{r,j} - B_j^s \quad (1) \\ P_{r,j}^s &= \rho_r^s + c(t_r - t^s) + \\ & T_r^s + \mu_j I_{r,1}^s + b_{r,j} - b_j^s \end{aligned}$$

در رابطه (۱) $P_{r,j}^s$ ، Φ_j و $\varphi_{r,j}^s$ به ترتیب مشاهدات

توجه به توسعه سیستم ماهواره‌ای ناوبری Galileo امروزه برای انجام تعیین موقعیت بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماهواره‌های مربوط به این سیستم امکان ارسال ۵ سیگنال مختلف را دارا می‌باشند. سیگنال‌های مربوط به این سیستم شامل $E1$ ، $E5a$ ، $E5b$ ، $E5$ و $E6$ می‌باشند که به ترتیب دارای فرکانس ۱۵۷۵/۴۲، ۱۱۷۶/۴۵، ۱۲۰۷/۱۴، ۱۱۹۱/۷۹۵ و ۱۲۷۸/۷۵ مگاهرتز است. با توجه به وجود تأخیر یونسفری، دو سیگنال مختلف با فرکانس‌های متفاوت معمولاً توسط ماهواره‌های ناوبری قبلی انتقال پیدا می‌کرد. در سال‌های اخیر، بیشتر ماهواره‌های نوسازی شده از یک سیستم، به عنوان مثال سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS)، با انتقال همزمان سیگنال‌ها در سه تا پنج فرکانس، عملیاتی شده است (پان و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین با توجه به به پیشرفت‌هایی که در سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای ایجاد شده است و همزمان با افزایش تعداد فرکانس‌های ارسالی از ماهواره‌ها، وجود نرم‌افزارهایی که قابلیت پردازش ترکیب چند سیستم و همچنین استفاده از همه فرکانس‌های ارسالی را داشته باشند از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا استفاده از مشاهدات چند سیستم نیازمند به کارگیری الگوریتم‌های متفاوت از حالت تک سیستمی می‌باشد (نورمی و همکاران، ۲۰۱۵).

در این تحقیق هدف ارزیابی روش تعیین موقعیت مطلق دقیق با استفاده از ترکیب فرکانس‌های مختلف می‌باشد. به این منظور از نرم‌افزار PPPteh ارائه شده توسط نویسندگان مقاله که تحت MATLAB نوشته شده است استفاده می‌شود (پروازی و همکاران، ۲۰۲۰؛ فرزانه و همکاران، ۲۰۲۰). PPPteh قابلیت پردازش مشاهدات مربوط به چهار سیستم GPS، GLONASS، BeiDou و Galileo برای انجام تعیین موقعیت مطلق دقیق را دارا می‌باشد. در این نرم‌افزار تمام ترکیب‌های ممکن برای ساخت مشاهدات عاری از یونسفر دو-فرکانسه برای تمام فرکانس‌های مختلف وجود دارد. به این صورت که برای سیستم تعیین موقعیت GPS سه حالت ترکیب

شبه‌فاصله کد بر حسب متر، مشاهده فاز بر حسب متر و مشاهده فاز بر حسب دور می‌باشد. r ، s و j به ترتیب نشان دهنده گیرنده، ماهواره و فرکانس می‌باشند. ρ فاصله هندسی بین گیرنده و ماهواره، T_r^s تأخیر تروپوسفری، t_r و t^s به ترتیب ساعت ماهواره و گیرنده، c سرعت نور، $I_{r,1}^s$ تأخیر یونسفری مرتبه‌اول، $\mu_j = \frac{f_1^2}{f_j^2}$ ، $b_{r,j}$ و $B_{r,j}$ به ترتیب بایاس سخت‌افزاری

کد و فاز گیرنده در فرکانس j بر حسب متر، b_j^s و B_j^s به ترتیب بایاس سخت‌افزاری کد و فاز ماهواره در فرکانس j بر حسب متر، $N_{r,j}^s$ ابهام فاز صحیح بر حسب دور، f_j و λ_j به ترتیب فرکانس و طول موج مربوطه می‌باشند. در PPP استاندارد دو فرکانسه به منظور حذف اثر مرتبه‌اول یونسفر از مشاهدات عاری از یونسفر زیر استفاده می‌شود (هافمن و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\Phi_{IF} = \rho + T + ct_{r,IF} - ct_{IF}^s + N_{IF} \quad (۳)$$

$$P_{r,j}^s = \rho + T + ct_{r,IF} - ct_{IF}^s$$

که در آن $ct_{r,IF} = ct_r + b_{r,IF}$ و $ct_{IF}^s = ct^s + b_{IF}^s$ و N ابهام فاز اعشاری عاری از یونسفر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N_{IF} = \frac{\lambda_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_1 - \frac{\lambda_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} N_2 + (B_{r,IF} - b_{r,IF}) - (B_{IF}^s - b_{IF}^s) \quad (۴)$$

رابطه (۳) معادله استاندارد PPP است که در آن ct_{IF}^s از خروجی تولیدات ساعت دقیق IGS در دسترس است و در این رابطه به عنوان مجهول برآورد می‌شود. برای استفاده از مدل ارائه شده در رابطه (۳) باید تمام تصحیحات موردنیاز از قبیل جزر و مدی، بارگذاری اتمسفری، توجیه زمین، حرکات پوسته، آفست مرکز فاز آنتن ماهواره و گیرنده، خطای ساعت ماهواره، خطای پیچش فاز، بایاس تفاضلی کد و اثر نسبیته اعمال شود (کوبا و هروکس، ۲۰۰۱).

با گسترش سیستم‌های دیگر ناوبری جهانی از جمله Galileo و BeiDou انجام PPP با تلفیق این سیستم‌ها به‌طور فزاینده‌ای گسترش یافت. پس از اعمال تولیدات دقیق و معرفی پارامترهای اختلاف زمان برای هر سیستم با توجه به آفست ساعت گیرنده GPS، می‌توان معادلات مشاهده IF را برای GPS، Galileo و BeiDou به شرح زیر نوشت:

$$E(\Phi_{IF}^G) = \rho^G + m_h^G ZHD + m_w^G ZWD + ct_{r,IF}^G - ct_{IF}^{s,G} + N_{IF}^G$$

$$E(P_{IF}^G) = \rho^G + m_h^G ZHD + m_w^G ZWD + ct_{r,IF}^G - ct_{IF}^{s,G}$$

$$E(\Phi_{IF}^E) = \rho^E + m_h^E ZHD + m_w^E ZWD + ct_{r,IF}^E + cdt_{sys}^{E,G} - ct_{IF}^{s,E} + N_{IF}^E$$

$$E(P_{IF}^E) = \rho^E + m_h^E ZHD + m_w^E ZWD + ct_{r,IF}^E + cdt_{sys}^{E,G} - ct_{IF}^{s,E} \quad (۵)$$

$$E(\Phi_{IF}^C) = \rho^C + m_h^C ZHD + m_w^C ZWD + ct_{r,IF}^C + cdt_{sys}^{C,G} - ct_{IF}^{s,C} + N_{IF}^C$$

$$E(P_{IF}^C) = \rho^C + m_h^C ZHD + m_w^C ZWD + ct_{r,IF}^C + cdt_{sys}^{C,G} - ct_{IF}^{s,C}$$

$$\Phi_{IF} = \rho + c(t_r - t^s) + \frac{\lambda_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_1 - \frac{\lambda_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} N_2 + T + B_{r,IF} - B_{IF}^s \quad (۲)$$

$$P_{r,j}^s = \rho + c(t_r - t^s) + T + b_{r,IF} - b_{IF}^s$$

که در آن $P_{IF} = \alpha_{IF} P_1 + \beta_{IF} P_2$ به ترتیب مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز، $\alpha_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$ و $\beta_{IF} = \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$ می‌باشند. در این رابطه همچنین $B_{r,IF} = \alpha_{IF} B_{r,1} + \beta_{IF} B_{r,2}$ و

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{IF}^{E_{1,2}} = \alpha_{1,2} \Phi_{IF}^{E_1} + \beta_{1,2} \Phi_{IF}^{E_2} \\ P_{IF}^{E_{1,2}} = \alpha_{1,2} P_{IF}^{E_1} + \beta_{1,2} P_{IF}^{E_2} \\ \Phi_{IF}^{E_{1,3}} = \alpha_{1,3} \Phi_{IF}^{E_1} + \beta_{1,3} \Phi_{IF}^{E_3} \\ P_{IF}^{E_{1,3}} = \alpha_{1,3} P_{IF}^{E_1} + \beta_{1,3} P_{IF}^{E_3} \\ \Phi_{IF}^{E_{1,4}} = \alpha_{2,3} \Phi_{IF}^{E_1} + \beta_{2,3} \Phi_{IF}^{E_4} \\ P_{IF}^{E_{1,4}} = \alpha_{2,3} P_{IF}^{E_1} + \beta_{2,3} P_{IF}^{E_4} \\ \Phi_{IF}^{E_{1,5}} = \alpha_{2,3} \Phi_{IF}^{E_1} + \beta_{2,3} \Phi_{IF}^{E_5} \\ P_{IF}^{E_{1,5}} = \alpha_{2,3} P_{IF}^{E_1} + \beta_{2,3} P_{IF}^{E_5} \\ \Phi_{IF}^{C_{1,2}} = \alpha_{1,2} \Phi_{IF}^{C_1} + \beta_{1,2} \Phi_{IF}^{C_2} \\ P_{IF}^{C_{1,2}} = \alpha_{1,2} P_{IF}^{C_1} + \beta_{1,2} P_{IF}^{C_2} \\ \Phi_{IF}^{C_{1,3}} = \alpha_{1,3} \Phi_{IF}^{C_1} + \beta_{1,3} \Phi_{IF}^{C_3} \\ P_{IF}^{C_{1,3}} = \alpha_{1,3} P_{IF}^{C_1} + \beta_{1,3} P_{IF}^{C_3} \\ \Phi_{IF}^{C_{2,3}} = \alpha_{2,3} \Phi_{IF}^{C_2} + \beta_{2,3} \Phi_{IF}^{C_3} \\ P_{IF}^{C_{2,3}} = \alpha_{2,3} P_{IF}^{C_2} + \beta_{2,3} P_{IF}^{C_3} \end{array} \right. ; \quad (6)$$

در رابطه (۶)، α و β ضرایب معادلات عاری از یونسفر کد و فاز می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\alpha_{i,j} = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} \quad (7)$$

$$\beta_{i,j} = -\frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2}$$

۳. داده‌های مورد استفاده و استراتژی پردازش
 مناسب برای انجام تعیین موقعیت multi-GNSS PPP (MGEX) است. که ایستگاه‌های آن به طور یکنواخت در سراسر جهان توزیع شده و امکان ردیابی اکثر سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری را دارند. داده‌ها از ۵ ایستگاه MGEX با توزیع جهانی جمع آوری شد. همه ایستگاه‌های انتخاب شده امکان ردیابی سیگنال‌های چهار سیستم GPS،

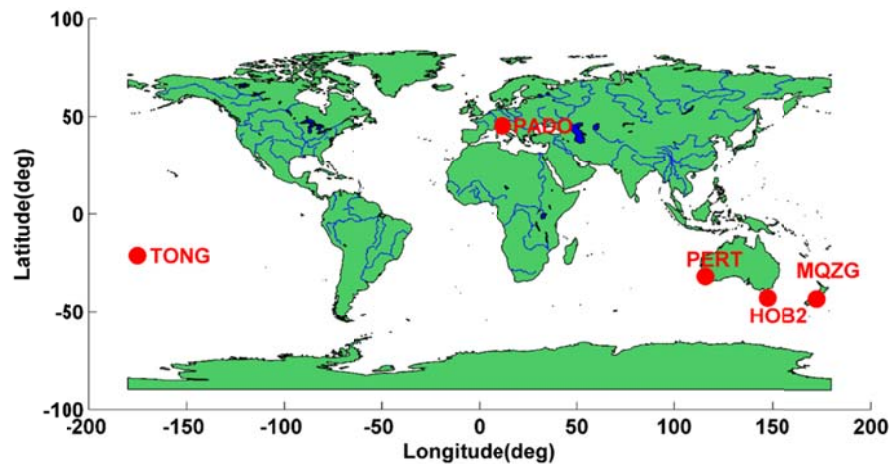
که در آن اندیس G نشان دهنده سیستم GPS ، E برای $Galileo$ و C برای $BeiDou$ می‌باشد. عبارت تأخیر تروپوسفری را می‌توان به صورت مدل $T = m_h(e)ZHD + m_w(e)ZWD$ به منظور مدل کردن تأخیر تروپوسفری مورد استفاده قرار داد. که در آن ZHD و ZWD به ترتیب تأخیر قائم هیدرواستاتیک (خشک) و تر، $m_h(e)$ و $m_w(e)$ به ترتیب توابع نگاشت مربوط به بخش هیدرواستاتیک و تر که تابع زاویه ارتفاعی ماهواره می‌باشند. پارامتر $cdt_{sys}^{E,G}$ و $cdt_{sys}^{C,G}$ به ترتیب معرف عدم همزمانی سیستم‌های زمان GPS با $Galileo$ و $BeiDou$ می‌باشند.

با استفاده از مجموعه معادلات (۵)، می‌توان ترکیب عاری از یونسفر برای سیگنال‌های سه فرکانسه GPS (E6, E5, E5b, E5a, E1) $Galileo$ ، (L5, L2, L1) $BeiDou$ (B3, B2, B1) را تشکیل داد. برای استفاده از سه فرکانس در تعیین موقعیت مطلق دقیق معادلات به شکل عاری از یونسفر معمولی و تولید دو معادله کد و فاز ارائه می‌شوند. بنابراین با توجه به نکات ارائه شده در قسمت قبل معادلات مشاهدات برای ترکیب فرکانس‌های مختلف مربوط به سه سیستم ماهواره‌ای ناوبری GPS، $Galileo$ و $BeiDou$ به صورت زیر ارائه می‌شود (زنکنه نژاد و همکاران، ۲۰۱۸؛ گنگ و بوک، ۲۰۱۳؛ گوا و همکاران، ۲۰۱۶).

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{IF}^{G_{1,2}} = \alpha_{1,2} \Phi_{IF}^{G_1} + \beta_{1,2} \Phi_{IF}^{G_2} \\ P_{IF}^{G_{1,2}} = \alpha_{1,2} P_{IF}^{G_1} + \beta_{1,2} P_{IF}^{G_2} \\ \Phi_{IF}^{G_{1,5}} = \alpha_{1,5} \Phi_{IF}^{G_1} + \beta_{1,5} \Phi_{IF}^{G_5} \\ P_{IF}^{G_{1,5}} = \alpha_{1,5} P_{IF}^{G_1} + \beta_{1,5} P_{IF}^{G_5} \\ \Phi_{IF}^{G_{2,5}} = \alpha_{2,5} \Phi_{IF}^{G_2} + \beta_{2,5} \Phi_{IF}^{G_5} \\ P_{IF}^{G_{2,5}} = \alpha_{2,5} P_{IF}^{G_2} + \beta_{2,5} P_{IF}^{G_5} \end{array} \right. ;$$

استفاده نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از نرم افزار PPPteh در حالت تک سیستمی و چند سیستمی مورد بررسی قرار می گیرد. در جدول ۲ استراتژی پردازش استفاده شده در نرم افزار PPPteh ارائه شده است.

Galileo و BeiDou را دارند. مدت زمان مشاهده برای هر ایستگاه ۲۴ ساعت می باشد. و فاصله نمونه برداری مشاهدات ۳۰ ثانیه می باشد. در شکل ۱ موقعیت این ایستگاه ها و در جدول ۱ مشخصات ایستگاه های مورد



شکل ۱. ایستگاه های مورد استفاده در این تحقیق.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه های مورد استفاده.

نام ایستگاه	موقعیت مکانی ایستگاه	گیرنده	آنتن
PADO	Padova, ITALY	SEPT POLARX5	SEPCHOKE_B3E6
HOB2	Hobart, AUSTRALIA	SEPT POLARX5	AOAD/M_T
TONG	Nuku Alofa, TONGA	SEPT POLARX5	TRM59800.00
PERT	Perth, AUSTRALIA	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00
MQZG	Christchurch, NEWZEAL	TRIMBLE NETR9	TRM57971.00

جدول ۲. استراتژی پردازش در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق (پروازی و همکاران، ۲۰۲۰).

آیتم	مدل
مشاهدات	Undifferenced phase and code ionosphere-free combination observations
فرکانس	GPS: L1/L2/L5 ; Galileo: E1/E5a/E5b/E5,E6;BeiDou: B1/B2/B3
زاویه ارتفاعی	10°
سیستم های ماهواره ای مورد استفاده	Positioning by combining observations GPS, Galileo and BeiDou with nominal weight. Positioning by combining observations GPS, Galileo and BeiDou with estimated weight.
برآوردگر	The recursive least squares with the unknowns added
مدل تصادفی	Nominal Weight with Satellite Altitude Impact (Nominal Weight of Ionosphere Code and Phase Observations GPS Respectively 0.3m and 3mm. (زنگنه نژاد و همکاران ۲۰۱۸).
مدار و ساعت ماهواره	GFZ multi-GNSS (GBM)
آفست مرکز فاز گیرنده	IGS14.atx
آفست مرکز فاز ماهواره	Corrected by IGS14.atx
مدل تروپوسفری	Saastamoinen model and global mapping function (GMF)
اثر نسبی	Corrected
جهش فاز	Corrected
اثرات جابه جایی ایستگاه	Solid Earth tides, ocean tide loading and pole tides
وزن مشاهدات	Using RLS-VCE method to estimate the accuracy of observations and correlations between them, Using a method to estimate the accuracy of observations and correlations between them
نحوه پردازش مشاهدات	Static
مدل سرشکنی	PPP solution: recursive least square algorithm
پارامترهای برآورد شده	Receiver position, tropospheric wet delay, ambiguity parameters ,system time difference parameters

۴. نتایج

اپک در محدوده مشخص شده باشد به‌عنوان همگرایی موقعیت در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا نتایج PPP استاتیک برای سه حالت مختلف ترکیب فرکانس سیستم تعیین موقعیت GPS و BeiDou ارائه می‌شود. به این صورت که مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز برای سیگنال‌های L1/L2 به‌همراه سیگنال‌های B1/B2, B1/B3 و B2/B3 تشکیل شده و نتایج از نظر دقت و زمان همگرایی مقایسه می‌شوند. در جدول ۳ و ۴ نتایج آماری مربوط به RMSE سه مؤلفه مختصاتی (E, N, U) و همچنین زمان همگرایی برای حالت دوبعدی و سه‌بعدی ارائه شده است.

بررسی نتایج از نظر دقت و زمان همگرایی مورد بحث قرار می‌گیرد. مختصات مرجع برای هر ایستگاه از فایل SNX که توسط IGS ارائه می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. و خطای موقعیت که همان اختلاف بین مختصات برآورد شده و مختصات معلوم می‌باشد بررسی می‌شود. همگرایی در واقع نشان‌دهنده رسیدن مقدار خطای موقعیت در یک سطح معین که معمولاً ۱۰ سانتی‌متر است برای مؤلفه‌های East, North و UP تعریف می‌شود. برای این حالت ما همواره خطای مربوط به ۲۰ اپک متوالی را در نظر می‌گیریم. اگر خطای هر ۲۰

جدول ۳. RMSE مؤلفه‌های مختصاتی بر حسب میلی‌متر و زمان همگرایی بر حسب دقیقه (استفاده از سیستم GPS).

GPS (L1/L2)					
ایستگاه	HOB2	PADO	MQZG	TONG	PERT
همگرایی دوبعدی	۳۲	۷۱	۱۳۰	۶۹	۲۱
همگرایی سه‌بعدی	۱۱۱	۷۲	۱۳۰	۹۱	۴۳
مؤلفه شرقی-غربی	۷/۴۵	۱۳/۹۰	۱۴/۱۸	۱۰/۴۵	۱۷/۶۷
مؤلفه شمالی-جنوبی	۷/۰۰	۷/۶۱	۶/۵۹	۷/۴۷	۶/۷۹
مؤلفه ارتفاعی	۱۷/۶۵	۳۹/۹۵	۵۷/۶۹	۲۸/۰۵	۳۷/۸۰
تعداد ماهواره‌ها	۹	۱۰	۸	۸	۷

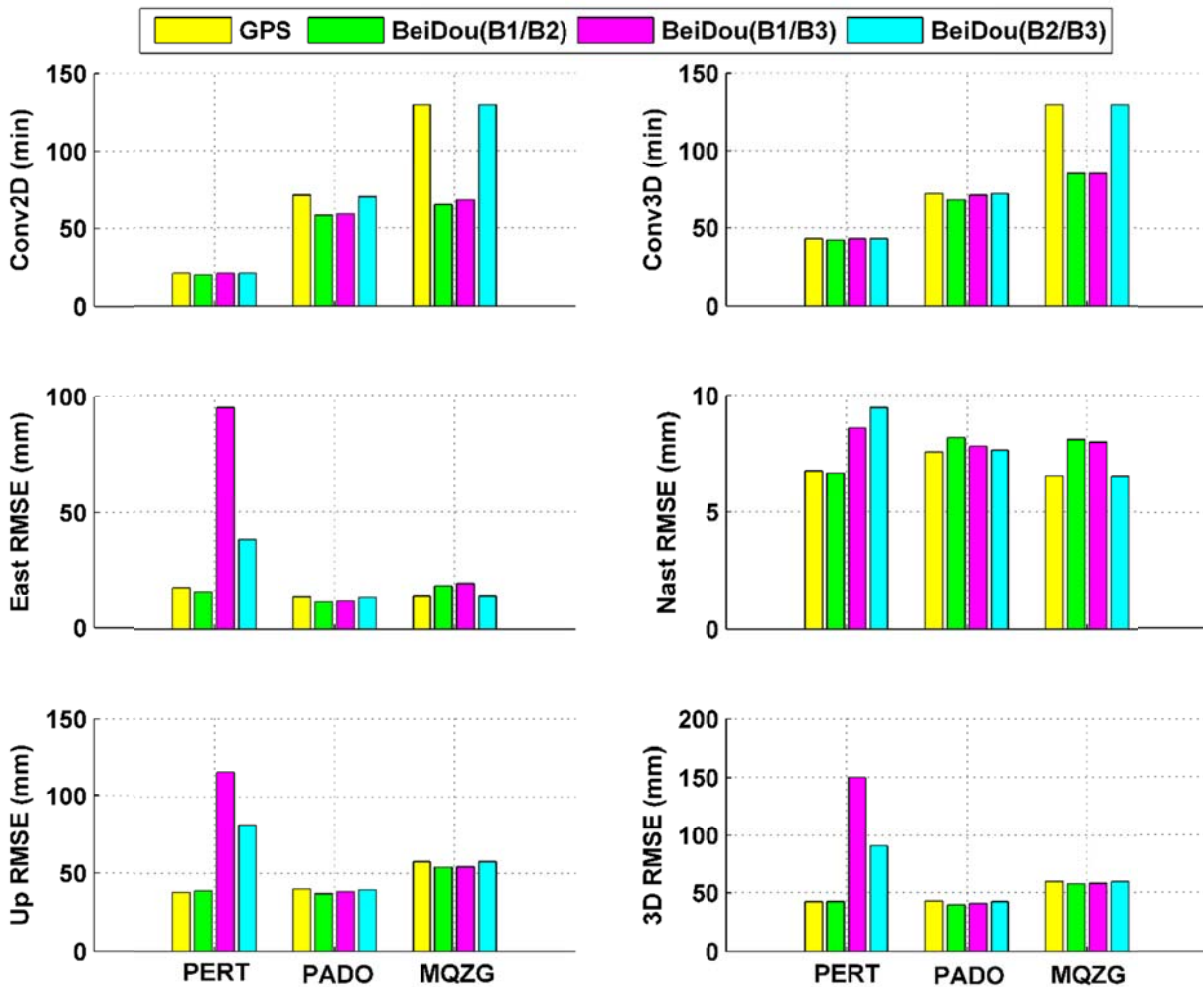
جدول ۴. RMSE مؤلفه‌های مختصاتی بر حسب میلی‌متر و زمان همگرایی بر حسب دقیقه (استفاده از سیستم GPS و BeiDou).

GPS(L1/L2) and BeiDou(L1/L2, L1/L3, L2/L3)				
نام ایستگاه		L1/L2 and B1/B2	L1/L2 and B1/B3	L1/L2 and B2/B3
PADO	همگرایی دوبعدی	۵۸	۵۹	۷۰
	همگرایی سه‌بعدی	۶۸	۷۱	۷۲
	مؤلفه شرقی-غربی	۱۱/۸۰	۱۲/۱۲	۱۳/۶۷
	مؤلفه شمالی-جنوبی	۸/۲۳	۷/۸۶	۷/۶۹
	مؤلفه ارتفاعی	۳۶/۸۸	۳۸/۱۳	۳۹/۴۵
	تعداد ماهواره‌ها	۱۴	۱۴	۱۴
MQZG	همگرایی دوبعدی	۶۵	۶۸	۱۳۰
	همگرایی سه‌بعدی	۸۵	۸۵	۱۳۰
	مؤلفه شرقی-غربی	۱۸/۴۱	۱۹/۴۴	۱۴/۱۸
	مؤلفه شمالی-جنوبی	۸/۱۴	۸/۰۳	۶/۵۷
	مؤلفه ارتفاعی	۵۴/۰۹	۵۴/۳۵	۵۷/۷۴
	تعداد ماهواره‌ها	۱۱	۱۱	۱۱
PERT	همگرایی دوبعدی	۲۰	۲۱	۲۱
	همگرایی سه‌بعدی	۴۲	۴۳	۴۳
	مؤلفه شرقی-غربی	۱۵/۹۶	۹۵/۰۱	۳۸/۱۶
	مؤلفه شمالی-جنوبی	۶/۷۰	۸/۶۵	۹/۵۰
	مؤلفه ارتفاعی	۳۸/۷۷	۱۱۵/۹۳	۸۱/۸۲
	تعداد ماهواره‌ها	۱۵	۱۵	۱۵

سیگنال‌های B1/B3 برای تشکیل مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز از دقت نزدیک به ترکیب B1/B2 برخوردار می‌باشد. بر این اساس می‌توان در نظر گرفت که ترکیب سیگنال‌های B1/B3 برای ترکیب با مشاهدات عاری از یونسفر GPS از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند. در شکل ۲ نیز نتایج آماری به صورت هیستوگرام ارائه شده است.

در ادامه برای آنالیز سیگنال‌های ماهواره‌های Galileo با استفاده از نرم‌افزار PPPteh ترکیب‌های مختلف این سیستم ماهواره‌ای ناوبری انتخاب شده است. این ترکیب‌ها شامل چهار ترکیب $E1/E5$ ، $E1/E5b$ ، $E1/E5a$ ، $E1/E6$ می‌باشند. نتایج مربوط به ترکیب این سیگنال‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به اینکه هر ماهواره امکان ارسال سیگنال‌های متفاوتی را دارا می‌باشد لازم است که کیفیت مشاهدات مربوط به این سیگنال‌ها مورد بررسی قرار بگیرد. بنابراین بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۳ و ۴ می‌توان دید که در ابتدا اضافه شدن مشاهدات مربوط به ماهواره‌های BeiDou باعث کاهش زمان همگرایی و همچنین در اکثر موارد افزایش دقت سه‌بعدی مؤلفه‌های مختصاتی شده است. سپس برای مقایسه نتایج مربوط به سیگنال‌های مختلف ماهواره‌های BeiDou پارامترهای دقت مختصات و زمان همگرایی ارائه شده است. بر اساس این نتایج استفاده از ترکیب سیگنال‌های B1/B2 نسبت به دو ترکیب دیگر از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار می‌باشند. از طرفی ترکیب



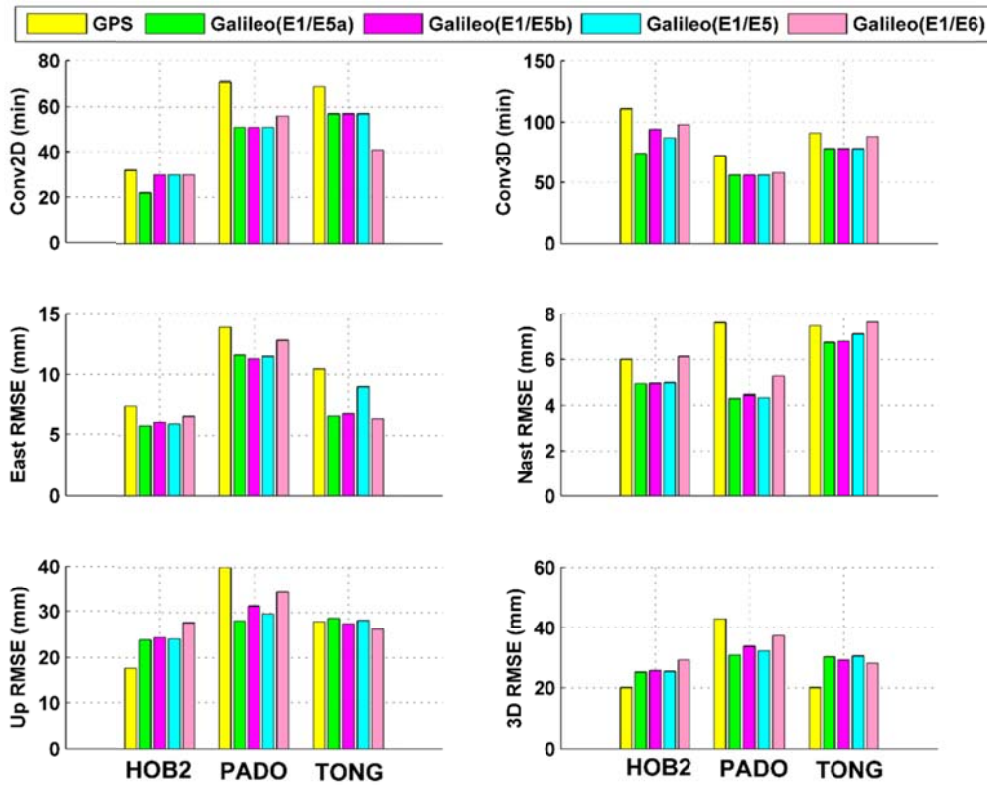
شکل ۲. مقدار RMSE برای مؤلفه‌های مختصاتی بر حسب میلی‌متر و زمان همگرایی بر حسب دقیقه.

جدول ۵. RMSE مؤلفه‌های مختصاتی بر حسب میلی‌متر و زمان همگرایی بر حسب دقیقه (استفاده از سیستم GPS و Galileo).

GPS(L1/L2) and Galileo(E1/E5a, E1/E5b, E1/E5, E1/E6)					
Station		L1/L2 and E1/E5a	L1/L2 and E1/E5b	L1/L2 and E1/E5	L1/L2 and E1/E6
HOB2	همگرایی دوبعدی	۲۲	۳۰	۳۰	۳۰
	همگرایی سه‌بعدی	۷۴	۹۴	۸۷	۹۸
	مؤلفه شرقی-غربی	۵/۸۲	۶/۱۲	۵/۹۸	۶/۶۱
	مؤلفه شمالی-جنوبی	۴/۹۳	۴/۹۵	۴/۹۸	۶/۱۳
	مؤلفه ارتفاعی	۲۳/۹۶	۲۴/۴۲	۲۴/۱۷	۲۷/۸۰
	تعداد ماهواره‌ها	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
PADO	همگرایی دوبعدی	۵۱	۵۱	۵۱	۵۶
	همگرایی سه‌بعدی	۵۶	۵۶	۵۶	۵۸
	مؤلفه شرقی-غربی	۱۱/۶۰	۱۱/۳۰	۱۱/۴۹	۱۲/۸۲
	مؤلفه شمالی-جنوبی	۴/۳۰	۴/۴۵	۴/۳۴	۵/۲۷
	مؤلفه ارتفاعی	۲۸/۲۱	۳۱/۵۱	۲۹/۷۶	۳۴/۶۲
	تعداد ماهواره‌ها	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
TONG	همگرایی دوبعدی	۵۷	۵۷	۵۷	۴۱
	همگرایی سه‌بعدی	۷۸	۷۸	۷۸	۸۸
	مؤلفه شرقی-غربی	۶/۶۵	۶/۸۳	۸/۹۹	۶/۴۲
	مؤلفه شمالی-جنوبی	۶/۷۵	۶/۷۹	۷/۱۲	۷/۶۴
	مؤلفه ارتفاعی	۲۸/۷۲	۲۷/۵۲	۲۸/۲۹	۲۶/۳۳
	تعداد ماهواره‌ها	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴

ترکیب سیگنال‌های $E1/E5a$ نسبت به سه ترکیب دیگر از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار می‌باشند. از طرفی ترکیب سیگنال‌های $E1/E5b$ و $E1/E5$ برای تشکیل مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز از دقت نزدیک به ترکیب $E1/E5a$ برخوردار می‌باشند. بر این اساس می‌توان در نظر گرفت که ترکیب سیگنال‌های $E1/E5a$ برای ترکیب با مشاهدات عاری از یونسفر GPS از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند. در شکل ۳ نیز نتایج آماری به صورت هیستوگرام ارائه شده است.

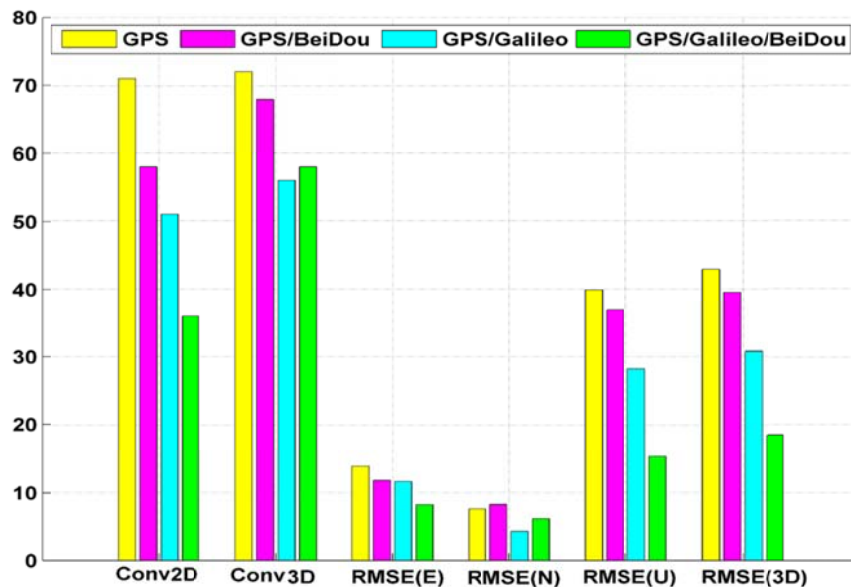
همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، اضافه‌شدن مشاهدات مربوط به ماهواره‌های Galileo در هنگام ترکیب با مشاهدات GPS موجب افزایش دقت و کاهش زمان همگرایی شده است. بر اساس این نتایج چهار ترکیب مختلف برای تشکیل مشاهدات عاری از یونسفر شامل $E1/E5$ ، $E1/E5b$ ، $E1/E5a$ ، $E1/E6$ در نظر گرفته شده است. دو پارامتر دقت و زمان همگرایی به‌عنوان معیارهای مورد نظر برای انتخاب بهترین مدل ارائه شده است. بر اساس این نتایج استفاده از



شکل ۳. مقدار RMSE برای مؤلفه‌های مختصاتی بر حسب میلی‌متر و زمان همگرایی بر حسب دقیقه.

ماهوره‌های ناوبری GPS، Galileo، و BeiDou بررسی می‌شود. برای انجام این کار از ایستگاه PADO که به صورت مشترک تجزیه و تحلیل مربوط به هر دو سیستم ماهوره‌های ناوبری Galileo و BeiDou بر روی آن انجام گرفته است استفاده می‌شود. نتایج مربوط به این ایستگاه در شکل ۴ ارائه شده است.

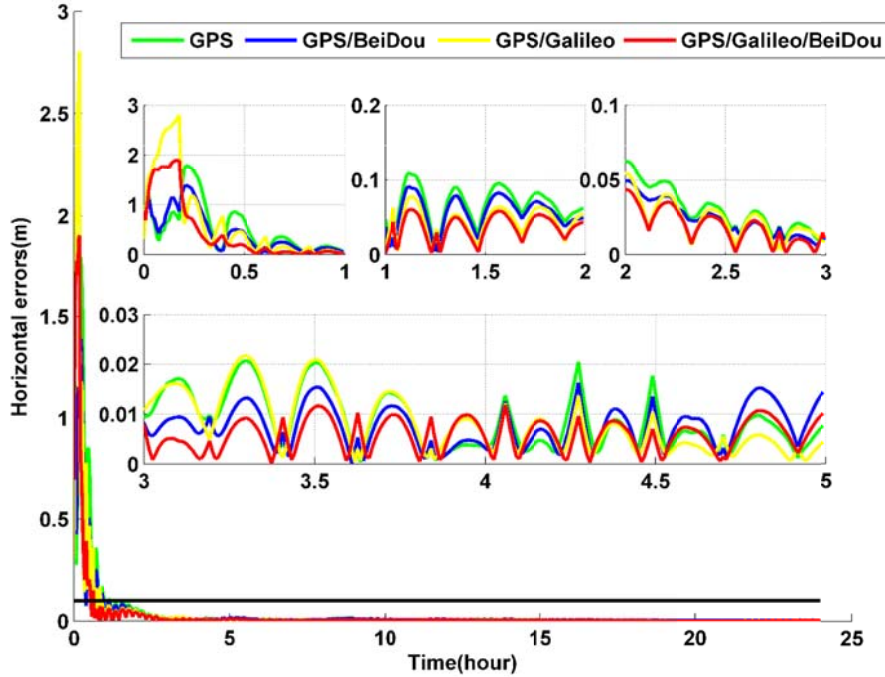
اکنون با توجه به نتایج ارائه شده و با مشخص شدن بهترین ترکیب سیگنال برای مشاهدات مربوط به سیستم‌های ماهوره‌های ناوبری Galileo و BeiDou، به بررسی دقت و زمان همگرایی در هنگام ترکیب سه سیستم پرداخته می‌شود و نتایج با ترکیب‌های $B1/B2, E1/E5a, L1/L2$ مربوط به سه سیستم



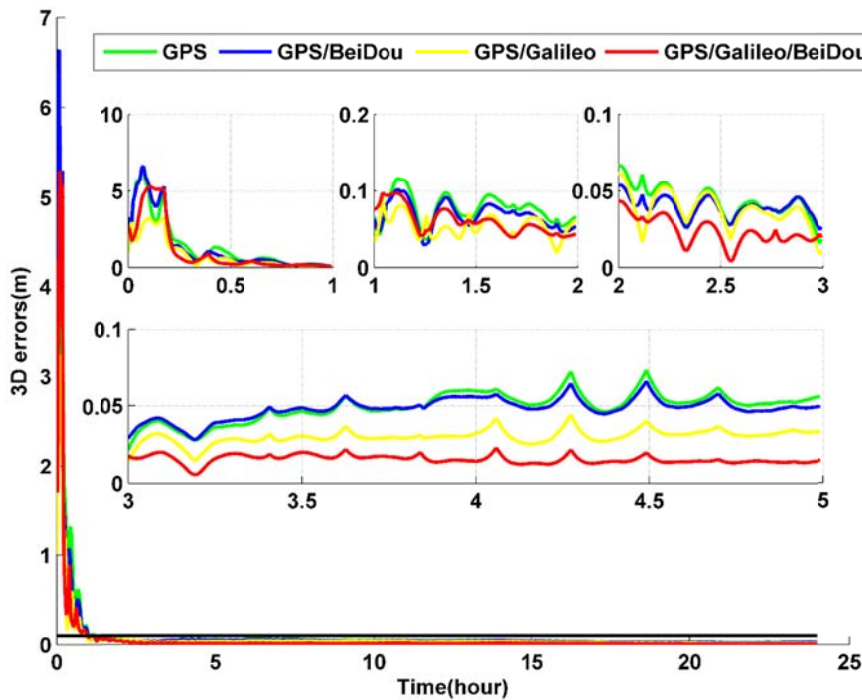
شکل ۴. RMSE مؤلفه‌های مختصاتی بر حسب میلی‌متر و زمان همگرایی بر حسب دقیقه (استفاده از سیستم GPS، Galileo و BeiDou).

مربوط به زمان همگرایی دوبعدی و سه‌بعدی و همچنین دقت مؤلفه‌های مختصاتی در دو سیستم مختصات ECEF و UTM برای ترکیب‌های GPS، GPS/BeiDou، GPS/Galileo و GPS/Galileo/BeiDou در تمام اپک‌ها در شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه شده است.

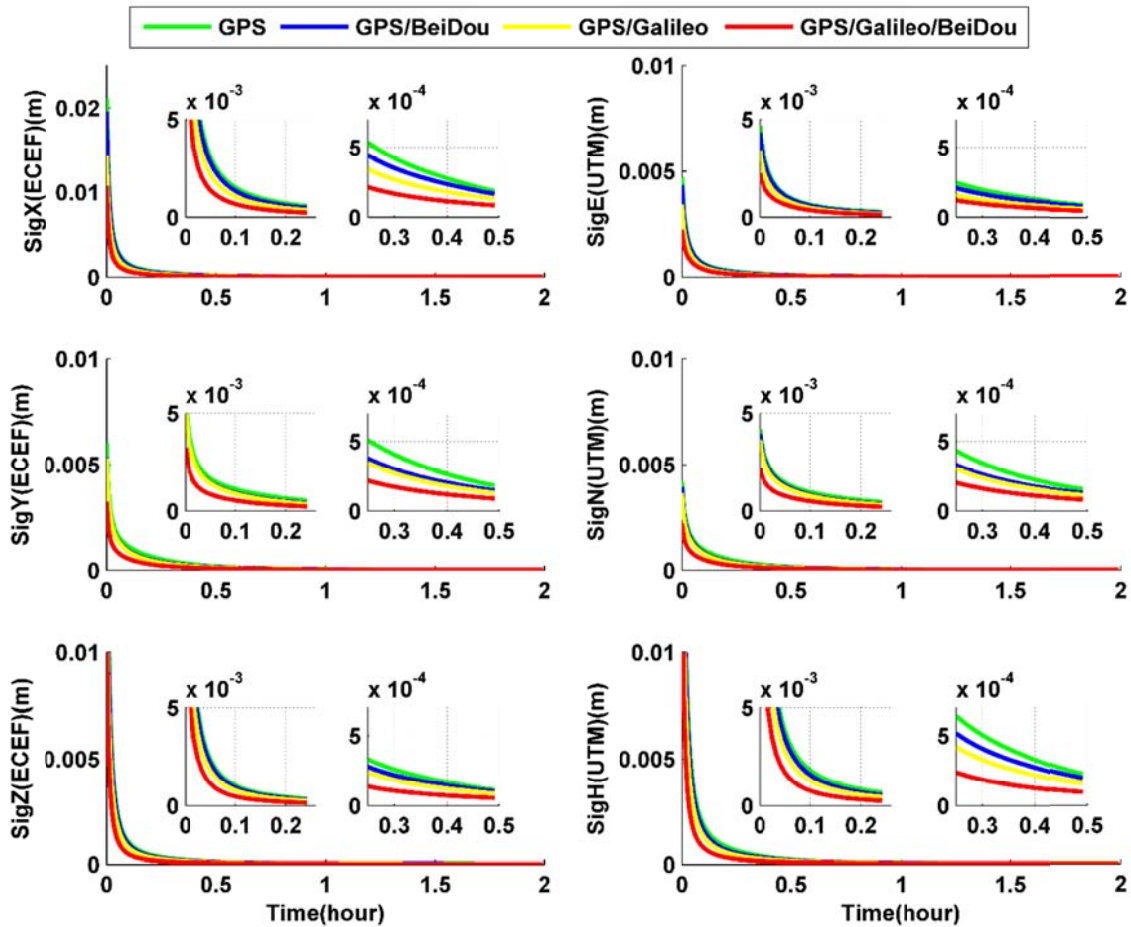
با توجه به شکل ۴ در هنگام ترکیب سه سیستم ماهواره‌ای ناوبری GPS، Galileo و BeiDou بهبود قابل توجهی هم در کاهش زمان همگرایی و هم افزایش دقت سه‌بعدی مختصات ارائه شده است. برای درک بهتر استفاده از مشاهدات ترکیبی برای این سیستم‌ها، در ادامه نتایج



شکل ۵. همگرایی دوبعدی با در نظر گرفتن شرط همگرایی ۱۰ سانتی‌متر (خط سیاه) برای ترکیب‌های GPS، GPS/BeiDou، GPS/Galileo و GPS/Galileo/BeiDou



شکل ۶. همگرایی سه‌بعدی با در نظر گرفتن شرط همگرایی ۱۰ سانتی‌متر (خط سیاه) برای ترکیب‌های GPS، GPS/BeiDou، GPS/Galileo و GPS/Galileo/BeiDou



شکل ۷. دقت سه مؤلفه مختصات در دو سیستم مختصات ECEF و UTM برای ترکیب‌های GPS، GPS/BeiDou، GPS/Galileo و GPS/Galileo/BeiDou

مناسب برای تشکیل مشاهدات عاری از یونسفر در تعیین موقعیت مطلق دقیق و همچنین ترکیب مشاهدات مختلف با در نظر گرفتن وزن صحیح برای هر سیگنال در ترکیب با GPS می‌تواند نیازهای کاربر چه از نظر دقت و چه زمان همگرایی مرتفع سازد.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق هدف ارزیابی روش تعیین موقعیت مطلق دقیق با استفاده از ترکیب فرکانس‌های مختلف می‌باشد. به این منظور از نرم‌افزار PPPteh ارائه شده توسط نویسندگان مقاله که تحت MATLAB نوشته شده است استفاده می‌شود. بنابراین در این تحقیق ترکیبات فرکانسی مختلفی برای تشکیل مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز برای سیستم ماهواره‌ای ناوبری Galileo و BeiDou در

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های ۵ تا ۷ می‌توان دید که اضافه شدن سیستم‌های ماهواره‌ای مختلف به سیستم GPS باعث افزایش دقت مؤلفه‌های مختصاتی و همچنین کاهش زمان همگرایی خواهد شد. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است خطای ارائه شده (اختلاف مختصات برآوردشده با مختصات نهایی ایستگاه از فایل IGS در هنگام استفاده از سیستم‌های Galileo و BeiDou در ترکیب با GPS اختلاف محسوسی هم در زمان همگرایی و هم در دقت مختصات مشاهده می‌شود. ترکیب هر سه سیستم با یکدیگر افزایش دقت و کاهش زمان همگرایی بیشتری را به دنبال دارد. اما در ترکیب‌های دو تایی با GPS استفاده از مشاهدات مربوط به ماهواره‌های Galileo ما را به دقت بالاتر و همچنین زمان همگرایی کمتری می‌رساند. بنابراین انتخاب سیگنال‌های

BeiDou بهبود قابل توجهی هم در کاهش زمان همگرایی و هم افزایش دقت سه‌بعدی مختصات ارائه شده است. همچنین خطای ارائه شده (اختلاف مختصات برآورد شده با مختصات نهایی ایستگاه از فایل IGS) در هنگام استفاده از سیستم‌های Galileo و BeiDou در ترکیب با GPS اختلاف محسوسی هم در زمان همگرایی و هم در دقت مختصات مشاهده می‌شود. ترکیب هر سه سیستم با یکدیگر افزایش دقت و کاهش زمان همگرایی بیشتری را به دنبال دارد. اما در ترکیب‌های دو تایی با GPS استفاده از مشاهدات مربوط به ماهواره‌های Galileo ما را به دقت بالاتر و همچنین زمان همگرایی کمتری می‌رساند. بنابراین انتخاب سیگنال‌های مناسب برای تشکیل مشاهدات عاری از یونسفر در تعیین موقعیت مطلق دقیق و همچنین ترکیب مشاهدات مختلف با در نظر گرفتن وزن صحیح برای هر سیگنال در ترکیب با GPS می‌تواند نیازهای کاربر را چه از نظر دقت و چه زمان همگرایی مرتفع سازد.

مراجع

- Abd Rabbou, M. and El-Rabbany, A., 2015, PPP accuracy enhancement using GPS/GLONASS observations in kinematic mode, *Positioning*, 6(01), p.1.
- Alexander, K., 2014. US GPS program and policy update. 26th SBAS International Working Group, pp.24-29.
- Bisnath, S. and Gao, Y., 2009, Current state of precise point positioning and future prospects and limitations, In *Observing our changing earth* (pp. 615-623), Springer, Berlin, Heidelberg.
- Cai, C., Gao, Y., Pan, L. and Zhu, J., 2015, Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo, *Advances in space research*, 56(1), 133-143.
- Cao, W., Hauschild, A., Steigenberger, P., Langley, R. B., Urquhart, L. and Santos, M., 2010, Performance evaluation of integrated GPS/GIOVE precise point positioning.
- El-Rabbany, A., 2002, Introduction to GPS: the global positioning system, Artech house.
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J. and Schuh, H., 2015, Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time

نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج ارائه شده برای سیستم ماهواره‌ای ناوبری Galileo و BeiDou به ترتیب دو ترکیب $E1/E5a$ و $B1/B2$ به‌عنوان بهترین ترکیب برای استفاده در تعیین موقعیت مطلق دقیق انتخاب شدند. بعد از انجام تعیین موقعیت مطلق دقیق، اضافه شدن مشاهدات مربوط به ماهواره‌های BeiDou باعث کاهش زمان همگرایی و همچنین در اکثر موارد افزایش دقت سه‌بعدی مؤلفه‌های مختصاتی شده است. استفاده از ترکیب سیگنال‌های $B1/B2$ نسبت به دو ترکیب دیگر از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار می‌باشند. همین روند برای مشاهدات ماهواره‌های Galileo نیز انجام گرفت که بر این اساس استفاده از مشاهدات مربوط به ماهواره‌های Galileo در هنگام ترکیب با مشاهدات GPS موجب افزایش دقت و کاهش زمان همگرایی شده است. استفاده از ترکیب سیگنال‌های $E1/E5a$ نسبت به سه ترکیب دیگر از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار می‌باشند در نهایت با ترکیب هر سه سیستم و در نظر گرفتن مدل فرکانسی انتخاب شده در مرحله اول این نتیجه حاصل شد که ترکیب سه سیستم ماهواره‌ای ناوبری GPS، Galileo و

- precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo, *Journal of Geodesy*, 89(6), 607-635.
- Nurmi, J., Lohan, E. S., Sand, S. and Hurskainen, H. eds., 2015, GALILEO positioning technology (Vol. 176), Dordrecht, The Netherlands Springer.
- Yang, Y., Gao, W., Guo, S., Mao, Y. and Yang, Y., 2019, Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system, *Navigation*, 66(1), 7-18.
- Chengqi, R., 2012, April. Development of the BeiDou navigation satellite system, In *Global navigation satellite systems*, Report of the Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering, Washington, DC.
- Farzaneh, S., Safari, A. and Parvazi, K., 2020, Evaluation of statistical models of precise point positioning based on satellites elevation angles, *Jornal of earth and space physics*, 45(4), 99-119. doi: 10.22059/jesphys.2019.269327.1007060.
- Gao, Y. and Shen, X., 2002, A New Method for Carrier-Phase-Based Precise Point Positioning, *Navigation*, 49(2), 109-116.

- Geng, J. and Bock, Y., 2013, Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution, *Journal of geodesy*, 87(5), 449-460.
- Guo, F., Zhang, X., Wang, J. and Ren, X., 2016, Modeling and assessment of triple-frequency BDS precise point positioning, *Journal of geodesy*, 90(11), 1223-1235.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E., 2007, *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Science & Business Media.
- Kouba, J. and Héroux, P., 2001, Precise point positioning using IGS orbit and clock products, *GPS solutions*, 5(2), 12-28.
- Li, P. and Zhang, X., 2014, Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning, *GPS solutions*, 18(3), 461-471.
- Pan, L., Zhang, X. and Guo, F., 2019, Characterizing inter-frequency bias and signal quality for GLONASS satellites with triple-frequency transmissions, *Advances in Space Research*, 64(7), 1398-1414.
- Parvazi, K., Farzaneh, S. and Safari, A., 2020, Role of the RLS-VCE-estimated stochastic model for improvement of accuracy and convergence time in multi-GNSS precise point positioning, *Measurement*, 165, p.108073.
- Tegedor, J., Øvstedal, O. and Vigen, E., 2014, Precise orbit determination and point positioning using GPS, Glonass, Galileo and BeiDou.
- White, R. M. and Langley, R. B., 2015, October. Precise Point Positioning with Galileo Observables, In *Proceedings of 5th Int. Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme* (pp. 27-29).
- Zangeneh-Nejad, F., Amiri-Simkooei, A. R., Sharifi, M. A. and Asgari, J., 2018, Recursive least squares with additive parameters: Application to precise point positioning, *Journal of Surveying Engineering*, 144(4), p.04018006.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. and 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.

Evaluation of Precise Point Positioning method with different combinations of Dual-frequencies of Galileo and BeiDou using PPPteh software

Parvazi, K.¹, Farzaneh, S.^{2*} and Safari, A. R.³

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

2. Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

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

(Received: 12 July 2020, Accepted: 24 Jan 2021)

Summary

Due to advances in global navigation satellite systems, it has been possible for satellites to send different frequencies. For this reason, different combinations of these frequencies can be considered to form ionospheric codes and phase observations. In this study, the aim is to evaluate the Precise Point Positioning method using a combination of different frequencies. For this purpose, the PPPteh software provided by the authors, written under MatLab is used. PPPteh has the ability to process observations from four GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo satellite systems to perform precise point positioning. In this software, there are all possible combinations for making Dual-frequency ionosphere-free observations for all different frequencies. There are three modes for combining different frequencies for the GPS positioning system, ten modes for the Galileo system, and three modes for building the BeiDou satellite system to make ionosphere-free observations. To evaluate the precise point positioning method, four steps have been considered in terms of position accuracy and convergence time: 1) First, use the observations of two frequencies L_1, L_2 related to GPS and determine the position, 2) Combine the two systems satellite GPS and Galileo and select the best combination model, 3) Combining the two systems GPS and BeiDou and selecting the best combination and 4) Finally, after the previous three steps, the combination position will be determined using the three systems by the best frequency model and the results will be compared with each other. Based on the results provided for the Galileo and BeiDou navigation satellite systems, two combinations $E1/E5a$ and $B1/B2$ were selected as the best combinations for use in determining the precise point positioning, respectively. Following the precise point positioning, the addition of observations on BeiDou satellites has reduced convergence time and, in most cases, increased the three-dimensional accuracy of the coordinate components. Using a combination of the $B1/B2$ signals has a better quality than the other two combinations. The same process was followed for observations of Galileo satellites, according to which the use of observations related to Galileo satellites when combined with GPS observations has increased accuracy and reduced convergence time. The use of $E1/E5a$ signal signals is of better combination than the other three combinations. Finally, by combining all three systems and considering the selected frequency model in the first stage, it was concluded that the combination of three satellite navigation satellite systems GPS, Galileo and BeiDou significantly improved both in reducing convergence time and increasing the three-dimensional accuracy of the coordinates provided. Also, the error provided (the difference in the estimated coordinates with the final coordinates of the station from the IGS file), when using the Galileo and BeiDou systems in combination with the GPS, is noticeably different both in convergence and in the accuracy of the coordinates. Combining all three systems together increases accuracy and reduces convergence time. But in dual-combination with GPS, the use of Galileo satellite observations gives us higher accuracy as well as less convergence time. Therefore, choosing the right signals to form ionosphere-free observations in determining the exact absolute position as well as combining different observations with the correct weight for each signal in combination with GPS, can meet the user's needs in terms of accuracy and convergence.

Keywords: PPPteh, Precise Point Positioning, Convergence time, Dual-Frequency, Signal quality, Galileo and BeiDou navigation satellite systems.

* Corresponding author:

farzaneh@ut.ac.ir