فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحهٔ ۴۵۳- ۴۶۵ (مقاله پژوهشی) DOI: 10.22059/jesphys.2021.320576.1007303

بررسی طرح هندسی مناسب برای شبکه مشاهداتی CONT14 جهت بهبود دقت برآورد پارامترهای توجیه زمین با احداث ایستگاه‌های VLBI در ایران

اصغر راست‌بود[1*] و محسن صاحبی ایلخچی[2]

۱. استادیار، گروه نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت: ۹۹/۱۲/۲۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده

روش تداخل‌سنجی طول مبناهای بسیار بلند یا به اختصار VLBI از اواسط دهه ۱۹۶۰ شروع به کار کرد و به‌عنوان یک روش ژئودزی فضایی در تعیین دقیق مختصات زمینی، تعیین پارامترهای توجیه زمین با دقت بسیار بالا و استخراج پارامترهای مهم ژئودینامیکی کاربرد دارد. پارامترهای توجیه زمین به مجموعه‌ای از پارامترها گفته می‌شود که نامنظمی‌های موجود در دوران زمین را توصیف می‌کند و می‌توان با استفاده از این پارامترها از چارچوب مرجع بین‌المللی زمینی به چارچوب مرجع بین‌المللی سماوی یا بالعکس انتقال یافت بنابراین این پارامترها اهمیت بسیار زیادی در علم ژئودزی دارند. هدف از این پژوهش بررسی دقت پارامترهای توجیه زمین بعد از اضافه‌کردن ایستگاه یا ایستگاه‌های مشاهداتی جدید به شبکه مشاهداتی CONT14 می‌باشد. ایستگاه‌های مشاهداتی به طور مصنوعی در ایران شبیه‌سازی شده‌اند. در این پژوهش دقت پارامترهای توجیه زمین قبل و بعد از اضافه‌کردن ایستگاه مشاهداتی جدید به شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه اصلی تحقیق نشان می‌دهد که با احداث چهار ایستگاه مشاهداتی در تبریز، اهواز، چابهار و مشهد دقت پارامترهای توجیه زمین ۱۳/۲۸ درصد نسبت به دقت پارامترهای توجیه زمین که از شبکه مشاهداتی CONT14 به دست می‌آیند، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تداخل‌سنجی طول مبناهای بسیار بلند، پارامترهای توجیه زمین، ایستگاه مشاهداتی VLBI، CONT14، ایران.

۱. مقدمه

روش تداخل‌سنجی طول مبناهای بسیار بلند یا به اختصار VLBI (Very Long Baseline Interferometry) از اواسط دهه ۱۹۶۰ کاربردی شد و به‌عنوان یک روش ژئودزی فضایی برای تعیین دقیق مختصات زمینی، تعیین پارامترهای توجیه زمین با دقت بسیار بالا و استخراج پارامترهای مهم ژئودینامیکی کاربرد دارد (شو و بهرند، ۲۰۱۲). ابتدا این روش برای بررسی شکل اجرام سماوی مانند کوازارها مورد استفاده قرار می‌گرفت اما بعدها با افزایش دقت مشاهدات، کاربردهای آن در مسائل ژئودزی و ژئودینامیکی توسط محققین کشف شد. در سال ۱۹۶۹ محققان توانستند با استفاده از تکنیک VLBI به دقت ۲ الی ۵ متر در تعیین مختصات زمینی و دقت ۱ ثانیه قوسی در تعیین مختصات اجرام سماوی دست یابند. اندازه‌گیری‌های اخیر توانسته‌اند به دقتی چندین برابر گذشته برسند. افزایش دقت مشاهدات به علت تغییر ثبت‌کننده‌ها از نوارهای مغناطیسی به دیسک‌های کامپیوتری، استفاده از نرم افزارها به جای سخت‌افزارها، بهبود مدل‌های فیزیکی، افزایش نرخ دریافت داده‌ها به علت استفاده از تجهیزات مدرن و... است. از مزایای دیسک‌های کامپیوتری نسبت به نوارهای مغناطیسی در ثبت داده‌ها می‌توان به آسان بودن نگهداری از اجزای مکانیکی، ثبت داده‌ها بدون خطا و شروع و پایان آنی ثبت داده‌ها اشاره کرد (کلارک، ۲۰۰۳). امروزه می‌توان مختصات و سرعت ایستگاه‌های زمینی را به‌ترتیب با دقت ۱mm و ۱mm/yr تعیین کرد.

با استفاده از روش VLBI می‌توان پارامترهای توجیه زمین (Earth Orientation Parameters) یا به اختصار EOPs را به‌دست آورد (هاینکلمن، ۲۰۱۳). پارامترهای توجیه

*نگارنده رابط: arastbood@tabrizu.ac.ir

زمین به مجموعه‌ای از پارامترها گفته می‌شود که نامنظمی‌های موجود در دوران زمین را توصیف می‌کنند (سایدلمن، ۱۹۸۲). می‌توان با استفاده از این پارامترها از چارچوب مرجع بین‌المللی زمینی (ITRF) به چارچوب مرجع بین‌المللی سماوی (ICRF) یا بالعکس انتقال یافت. تأثیرات ژئودینامیکی زمین و همچنین تأثیرات اجرام سماوی مانند ماه یا خورشید بر روی دوران زمین منجر به تغییر پارامترهای توجیه زمین می‌شود؛ بنابراین می‌توان از روی تغییرات پارامترهای توجیه زمین به تغییرات پارامترهای ژئودینامیکی زمین دست یافت و این امر ضرورت پایش مداوم و جهانی پارامترهای توجیه زمین را آشکار می‌سازد. با احداث ایستگاه VLBI، هم می‌توان تعداد مشاهدات یک شبکه را افزایش داد که یک امر بدیهی در افزایش دقت مشاهدات می‌باشد و هم به بهبود هندسه مشاهداتی کمک کرد که هر دو عامل می‌توانند منجر به افزایش دقت پارامترهای توجیه زمین شوند. حتی در صورت بالا بودن تعداد ایستگاه‌های شبکه مشاهداتی، اضافه‌کردن یک ایستگاه جدید نیز منجر به افزایش دقت پارامترهای توجیه زمین می‌شود (شارتنر و همکاران، ۲۰۲۰). در این تحقیق تأثیر احداث ایستگاه‌های مشاهداتی جدید در ایران بر روی دقت پارامترهای توجیه زمین بررسی شده است.

۱-۱. معرفی تکنیک VLBI

اساس VLBI اندازه‌گیری اختلاف زمانی رسیدن یک موج رادیویی به دو یا چند آنتن است که از آن به‌عنوان زمان تأخیر یاد می‌شود (کارینن، ۲۰۱۶). برای تحقق این امر اولاً باید از ساعت اتمی برای پایداری زمان استفاده شود و ثانیاً ساعت‌های موجود در آنتن‌ها همزمان باشند. پایداری بالای ساعت‌ها به‌وسیله تجهیزات مدرن میسر می‌شود و همچنین به‌وسیله داده کافی می‌توان عدم‌هماهنگی نسبی میان ساعت‌ها را برطرف کرد (ویتنی، ۲۰۰۰). همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، موج دریافتی از کوازارها در دو ایستگاه VLBI در زمان‌های متفاوتی به آنتن‌ها می‌رسند.

موج دریافتی از منابع رادیویی به‌علت فاصله خیلی زیاد منابع رادیویی از ایستگاه‌ها، عملاً یک موج مسطح در نظر گرفته می‌شود و این امر موجب سادگی مدل ریاضی مورد استفاده در پردازش داده‌ها می‌شود. از طریق تکرار مشاهدات و نیز دریافت امواج منابع رادیویی در جهات مختلف می‌توان مختصات منابع رادیویی و همچنین مختصات ایستگاه‌های زمینی را به‌دست آورد.

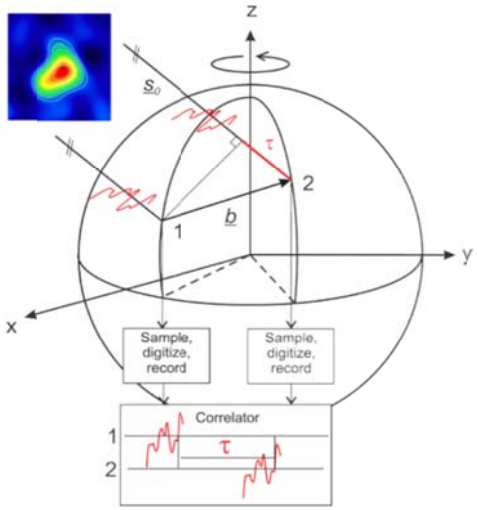
در رابطه ۱، ارتباط ریاضی میان اختلاف زمانی مشاهده شده و فاصله میان دو ایستگاه بیان شده است؛ در این رابطه، جهت بردار یکه s از آنتن به منبع رادیویی است، جهت بردار b که همان خط مبنا می‌باشد از گیرنده اول به‌سمت گیرنده دوم می‌باشد. سرعت موج برابر با سرعت نور در نظر گرفته می‌شود و با نماد c نشان داده شده است. به‌لحاظ ریاضی می‌توان رابطه میان اختلاف زمانی موج برای رسیدن به ایستگاه دوم نسبت به ایستگاه اول را که تأخیر هندسی (t_g) می‌نامند با ضرب برداری b و s به‌دست آورد.

$$t_g = -\frac{b.s}{c} = t_2 - t_1 \qquad (۱)$$

$\mathbf{t_2}$: زمان رسیدن موج به ایستگاه دوم

$\mathbf{t_1}$: زمان رسیدن موج به ایستگاه اول.

هنگامی که جبهه موج از ایستگاه اول به‌سمت ایستگاه دوم سیر می‌کند، حرکت زمین باعث می‌شود موج مسیر کمتر یا بیشتری را طی کند که این تأثیر باید از روی زمان اندازه‌گیری شده برداشته شود. البته در صورتی که هدف به‌دست آوردن پارامترهایی مانند سرعت حرکت زمین باشد این تأثیر نباید حذف شود.



شکل ۱. توصیف هندسی مشاهدات تکنیک **VLBI** (شو و بهرند، ۲۰۱۲).

عوامل مختلفی بر روی تأخیر زمانی مشاهده شده اثر می‌گذارند. با افزودن ترم‌های اصلاحی به تأخیر مشاهده‌شده، تأخیر واقعی به‌دست می‌آید که این تأخیر برای به‌دست آوردن پارامترهای دلخواه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تصحیحات شامل تأخیر ناشی از دوران زمین حول محور دورانی (اثر داپلر)، تأخیر ناشی از عدم‌هماهنگی ساعت‌های موجود در ایستگاه‌ها، تأخیر دستگاهی از جمله تأخیر ناشی از انتقال اطلاعات از طریق کابل موجود در آنتن، تأخیر ناشی از عبور موج از یونسفر، تأخیر ناشی از عبور موج از تروپسفر، تصحیح اثر نسبیت عام و خاص بر روی تأخیر کلاسیک هندسی، تصحیح ناشی از جابه‌جایی‌های متناوب و غیرمتناوب پوسته زمین و... می‌باشند.

با استفاده از تکنیک VLBI می‌توان چارچوب‌های مرجع بین‌المللی زمینی و سماوی و ماتریس انتقال میان آنها را به‌دست آورد (کارینن، ۲۰۱۶). یک چارچوب مرجع تحقق عملی یک سیستم مرجع از طریق مشاهدات است و از مجموعه‌ای از نقاط معتبر قابل‌شناسایی در آسمان (مانند منابع رادیویی) یا روی سطح زمین (مانند ایستگاه‌های مبنا) تشکیل شده است که در یک فهرست شامل مختصات دقیق در یک اپک معین و سرعت حرکات نقاط گنجانده شده‌اند. تکنیک VLBI در ایجاد و نگهداری چارچوب مرجع سماوی نقش انحصاری دارد که این چارچوب مرجع به‌عنوان چارچوب مرجع بین‌المللی سماوی یا ICRF شناخته می‌شود. اولین تحقق عملی ICRF در سال ۱۹۹۸ رخ داد که جایگزین کاتالوگ اپتیکی شد (شو و بهرند، ۲۰۱۲). برخلاف ICRF که تنها از طریق تکنیک VLBI تعیین می‌شود، چارچوب مرجع بین‌المللی زمینی از ترکیب چند تکنیک فضایی مانند VLBI، SLR، GNSS و... به‌دست می‌آید. روش ترکیبی از نقاط قوت هر تکنیک بهره می‌برد و تا حد ممکن خطاهای سیستماتیک را کاهش می‌دهد.

از دیگر کاربردهای تکنیک VLBI می‌توان به تعیین میزان حرکت پوسته زمین، تعیین سری زمانی پارامترهای جوی، تعیین تعداد الکترون‌های موجود در یونسفر و آزمایش و بررسی تئوری نسبیت اشاره کرد (سوورس و همکاران، ۱۹۹۸).

۱-۲. پارامترهای توجیه زمین

سرعت دورانی زمین و همچنین جهت‌گیری محور دورانی زمین نسبت به یک سیستم مرجع اینرشیال در طول زمان ثابت نیست. هرگونه جابه‌جایی جرم در داخل زمین یا روی زمین، منجر به تغییر پارامترهای توجیه زمین می‌شود. اگر جرم جابه‌جا شده کم باشد منجر به تغییرات کوچکی می‌شود که قابل اندازه‌گیری نیست اما اگر جرم جابه‌جا شده بزرگ باشد مثل جریان آب‌های اقیانوسی، جزرومد

یا زلزله؛ می‌تواند زمین را تحت‌تأثیر قرار داده و تغییرات محسوسی را در پارامترهای توجیه زمین ایجاد کند؛ بنابراین سری زمانی پارامترهای توجیه زمین اطلاعات ارزشمندی را در مورد دینامیک زمین در اختیار ما قرار می‌دهد.

پارامترهای توجیه زمین می‌توانند تبدیل دورانی میان ITRF و ICRF و بالعکس را فراهم سازند. این انتقال از طریق دنباله‌ای از دوران‌ها انجام می‌شود که مربوط به اثر پرسشن/نوتیشن (NUTX, NUTY) بر روی محور دورانی زمین، جابه‌جایی قطب نسبت به CIP (XPO, YPO) و DUT1 (UT1-UTC) است. مجموعه کامل این پارامترها به‌عنوان پارامترهای توجیه زمین شناخته می‌شوند. VLBI تنها تکنیک ژئودزی فضایی است که مجموعه پارامترهای توجیه زمین را به‌صورت یک‌جا به‌دست می‌آورد (هاینکلمن، ۲۰۱۳). در شکل ۲ پارامترهای توجیه زمین نشان داده شده است.

در این تحقیق برای به‌دست آوردن دقت پارامترهای توجیه زمین از نرم‌افزار VieSched++ استفاده شده است؛ این نرم‌افزار از روش کمترین مربعات برای تخمین پارامترها و دقت مربوط به آنها استفاده می‌کند (شارتنر و بوم، ۲۰۱۹).

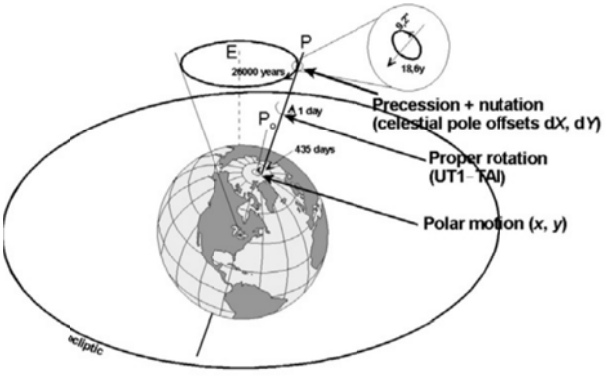
۲. روش پژوهش

یک دوره مشاهداتی VLBI شامل تعداد معینی ایستگاه مشاهداتی، تعداد معینی منابع رادیویی و مدت‌زمان معلومی است که طی این مدت‌زمان، مشاهدات ثبت می‌شوند. در ادامه این مشاهدات مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرند و پارامترهای توجیه زمین به‌دست می‌آید.

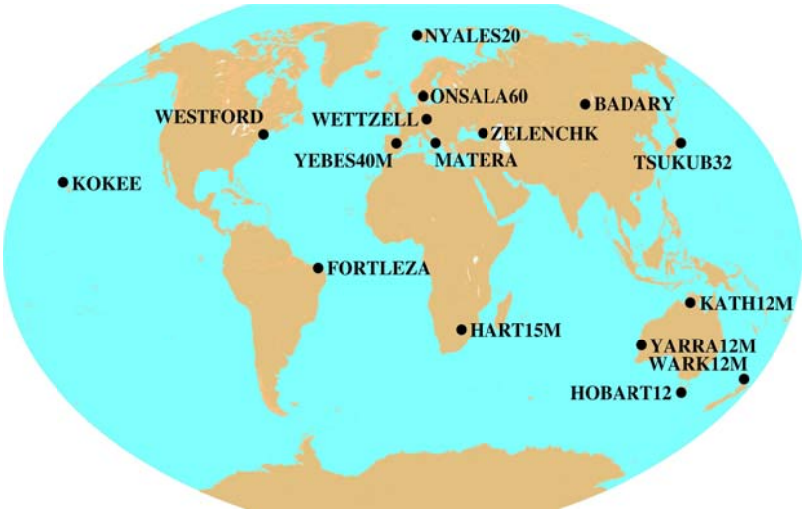
سازمان IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) اطلاعات مربوط به دوره‌های مشاهداتی انجام شده و همچنین دوره‌های مشاهداتی که در آینده انجام خواهند گرفت را ارائه می‌دهد. در این تحقیق از دوره مشاهداتی CONT14 استفاده شده است. دوره‌های مشاهداتی CONT (Continuous VLBI Campaign) یکی از معروف‌ترین و مهم‌ترین دوره‌های مشاهداتی می‌باشند که ایستگاه‌های موجود در این دوره‌های مشاهداتی، به‌صورت مداوم و طی ۱۵ روز داده برداشت می‌کنند. به‌طور متوسط هر سه سال یک‌بار دوره مشاهداتی CONT داده برداشت می‌کند.

به‌علت حجم عظیم اطلاعات در این دوره‌های مشاهداتی، پارامترهای توجیه زمین با دقت بسیار بالایی تعیین می‌شوند. به‌علت اهمیت زیاد دوره‌های CONT، تأثیر احداث ایستگاه در ایران بر روی دقت پارامترهای توجیه زمین در یکی از این دوره‌ها بررسی شده که در این تحقیق از دوره مشاهداتی CONT14 استفاده شده است.

در دوره مشاهداتی CONT14، ۱۷ ایستگاه مشارکت دارند. در جدول ۱ اسامی ایستگاه‌ها همراه با شناسه و مکان قرارگیری آنها بیان شده است. همچنین در شکل ۳ مکان جغرافیایی این ایستگاه‌ها به تصویر کشیده شده است. زمان شروع دوره مشاهداتی CONT14، ۶ مِی ۲۰۱۴ و زمان پایان آن ۲۰ مِی ۲۰۱۴ می‌باشد.



شکل ۲. توصیف شماتیک پارامترهای توجیه زمین (وندراک، ۲۰۰۹).



شکل۳. شبکه مشاهداتی دوره CONT14 (ناثنقل و همکاران، ۲۰۲۱).

جدول۱. اسامی ایستگاه‌های موجود در دوره مشاهداتی CONT14 همراه با شناسه و محل قرارگیری آنها.

ردیف	نام ایستگاه	شناسه ایستگاه	محل استقرار ایستگاه
۱	BADARY	Bd	روسیه
۲	FORTLEZA	Ft	برزیل
۳	HART15M	Ht	آفریقای جنوبی
۴	HOBART12	Hb	استرالیا
۵	HOBART26	Ho	استرالیا
۶	KATH12M	Ke	استرالیا
۷	KOKEE	Kk	آمریکا
۸	MATERA	Ma	ایتالیا
۹	NYALES20	Ny	نروژ
۱۰	ONSALA60	On	سوئد
۱۱	TSUKUB32	Ts	ژاپن
۱۲	WARK12M	Ww	نیوزلند
۱۳	WESTFORD	Wf	آمریکا
۱۴	WETTZELL	Wz	آلمان
۱۵	YARRA12M	Ya	استرالیا
۱۶	YEBES40M	Ys	اسپانیا
۱۷	ZELENCHK	Zc	روسیه

برای دست‌یابی به بالاترین دقت در پارامترهای توجیه زمین، ایستگاه‌های مشاهداتی باید به‌طور همگن پراکنده باشند (نیلسون و همکاران، ۲۰۱۴) بنابراین باید به طرح هندسی مناسب به‌منظور افزایش دقت پارامترها رسید.

به‌طورکلی برای افزایش دقت DUT1 بهتر است خطوط مبنایی که امتداد شرقی-غربی دارند را وارد شبکه کنیم و همچنین برای افزایش دقت اثر حرکت مربوط به قطب و پرسشن/نوتیشن بر روی محور دورانی زمین بهتر است خطوط مبنایی که امتداد شمالی-جنوبی دارند را وارد شبکه کنیم (نیلسون و همکاران، ۲۰۱۴).

به‌علت اینکه تا کنون ایستگاه VLBI در داخل ایران احداث نشده در این تحقیق به‌طور مصنوعی ایستگاه‌ها شبیه‌سازی می‌شوند. داده‌ها به‌صورت مصنوعی به‌دست می‌آیند و برای نزدیک شدن به واقعیت نویز به داده‌ها

وارد می‌شود. دقت داده‌ها برای حالت ایده‌آل می‌باشد؛ یعنی دقتی که در عمل به‌دست می‌آید کمتر از دقتی است که به‌طور مصنوعی و شبیه‌سازی شده به‌دست می‌آید. همچنین دقت به‌دست آمده، حد نهایی ممکن برای دقت را تعیین می‌کند؛ چون شرایط برداشت داده کاملاً ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود؛ اما در واقعیت ممکن است به‌علت تغییر سرعت وزش باد، تغییر ناگهانی شرایط آب‌وهوایی، به‌وجود آمدن مشکل فنی برای ایستگاه و... دقت واقعی کاهش یابد.

در این تحقیق داده‌هایی که طی ۲۴ ساعت توسط شبکه مشاهداتی CONT14 برداشت می‌شوند پردازش شده است. به‌علت در دسترس نبودن فایل مشخصات ایستگاه TSUKUB32 که برای تولید مصنوعی داده‌ها ضروری می‌باشد، این ایستگاه از شبکه مشاهداتی حذف شده است. ابتدا داده‌های برداشت شده از این شبکه پردازش شده و خطای پارامترهای توجیه زمین به‌دست می‌آید؛ سپس یک ایستگاه جدید به شبکه اضافه شده و دوباره خطای پارامترهای توجیه زمین محاسبه می‌شود. این عمل برای حالت‌های دو ایستگاهی، سه ایستگاهی، چهار ایستگاهی و پنج ایستگاهی انجام می‌شود.

به‌علت هزینه بسیار زیاد احداث ایستگاه مشاهداتی VLBI، حداکثر پنج ایستگاه مشاهداتی به شبکه وارد شده است. این پنج ایستگاه در کل ایران به‌صورت نسبتاً منظم پراکنده شده‌اند. مقایسه خطاهای به‌دست آمده، میزان بهبود دقت پارامترهای توجیه زمین را نشان می‌دهد.

۳. محاسبات

با آنالیز داده‌های برداشت شده توسط دوره مشاهداتی CONT14، دقت پارامترهای توجیه زمین به‌دست می‌آیند و مبنای تعیین بهبود یا عدم‌بهبود دقت پارامتری‌های توجیه زمین در حالت‌های مختلف می‌باشند؛ در جدول ۲ می‌توانید این مقادیر را مشاهده کنید. معیار ما برای تعیین دقت، میانگین خطای هرکدام از پارامترهای توجیه زمین می‌باشد. تمامی ایستگاه‌هایی که قرار است به شبکه مشاهداتی اضافه شوند ویژگی‌های دستگاهی یکسانی دارند که در جدول ۳ مشخصات مهم این ایستگاه‌ها بیان شده است. برای راحتی کار هنگام مقایسه نتایج، برای هر حالت یک شناسه اختیاری برای شبکه مشاهداتی انتخاب شده که در جدول ۴ قابل‌مشاهده می‌باشند. در ادامه، تمامی حالت‌های ممکن برای اضافه‌کردن ایستگاه جدید را بررسی می‌کنیم. بعد از اضافه‌کردن ایستگاه یا ایستگاه‌های مشاهداتی جدید، دوباره داده‌های به‌دست آمده پردازش می‌شوند و دقت پارامترهای توجیه زمین به‌دست می‌آیند. در شکل ۴ موقعیت جغرافیایی پنج ایستگاه مشاهداتی جدید نمایش داده شده‌است.

جدول۲. دقت پارامترهای توجیه زمین در دوره مشاهداتی شبیه سازی شده CONT14 (µs: Micro second, µas: Micro arc second).

پارامتر	XPO (µas)	YPO (µas)	Dut1 (µs)	NUTX (µas)	NUTY (µas)
میانگین خطا	۱۶/۸۱۴۸	۱۸/۳۵۸۶	۱/۰۹۴۹	۱۰/۸۵۹۹	۱۰/۴۴۹

جدول۳. مشخصات ایستگاه‌های مشاهداتی جدید ($1Jansky = 10^{-26}$ W m^{-2} Hz^{-1}).

آیدی ایستگاه	محل قرارگیری ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	قطر آنتن (متر)	SEFD* در باند (Jy) X	SEFD* در باند (Jy) S
N0	تبریز	۳۸/۰۵	۴۶/۳۳	۲۰	۷۵۰	۱۱۱۵
N1	اهواز	۳۱/۳۵	۴۸/۸۶	۲۰	۷۵۰	۱۱۱۵
N2	چابهار	۲۵/۳۲	۶۰/۶۶	۲۰	۷۵۰	۱۱۱۵
N3	مشهد	۳۶/۳۰	۵۹/۷۳	۲۰	۷۵۰	۱۱۱۵
N4	یزد	۳۲/۲۷	۵۴/۰۹	۲۰	۷۵۰	۱۱۱۵

* کمیت SEFD شاخص حساسیت آنتن می‌باشد و هر قدر میزان SEFD یک آنتن کمتر باشد حساسیت آنتن افزایش می‌یابد (تامسون و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول۴. ایستگاه‌های اضافه‌شده به شبکه مشاهداتی در حالت‌های مختلف.

شناسه شبکه مشاهداتی	ایستگاه اضافه شده به شبکه مشاهداتی	شناسه شبکه مشاهداتی	ایستگاه اضافه شده به شبکه مشاهداتی	شناسه شبکه مشاهداتی	ایستگاه اضافه شده به شبکه مشاهداتی
۱	N0	۲	N1	۳	N2
۴	N3	۵	N4	۶	N0,N1
۷	N0,N2	۸	N0,N3	۹	N0,N4
۱۰	N1,N2	۱۱	N1,N3	۱۲	N1,N4
۱۳	N2,N3	۱۴	N2,N4	۱۵	N3,N4
۱۶	N0,N1,N2	۱۷	N0,N1,N3	۱۸	N0,N1,N4
۱۹	N0,N2,N3	۲۰	N0,N2,N4	۲۱	N0,N3,N4
۲۲	N1,N2,N3	۲۳	N1,N2,N4	۲۴	N2,N3,N4
۲۵	N1,N3,N4	۲۶	N0,N1,N2,N3	۲۷	N0,N1,N2,N4
۲۸	N0,N1,N3,N4	۲۹	N0,N2,N3,N4	۳۰	N1,N2,N3,N4
۳۱	N0,N1,N2,N3,N4				

شکل۴. موقعیت جغرافیایی پنج ایستگاه مشاهداتی جدید.

۳-۱. اضافه‌کردن یک ایستگاه جدید به دوره مشاهداتی CONT14

به‌ترتیب پنج ایستگاه به‌صورت انفرادی به شبکه مشاهداتی CONT14 اضافه می‌شود. در این حالت،۱۷ ایستگاه و ۱۳۶ خط مبنا وجود دارد؛ نتایج این حالت در شکل ۵ نمایش داده شده است. بهترین دقت برای XPO در شبکه ۴، بهترین دقت برای YPO در شبکه ۳، بهترین دقت برای Dut1 در شبکه ۴، بهترین دقت برای NUTX در شبکه ۴ و بهترین دقت برای NUTY در شبکه ۵ حاصل می‌شود.

۳-۲. اضافه‌کردن دو ایستگاه جدید به دوره مشاهداتی CONT14

ایستگاه‌ها به‌صورت دوتایی به شبکه مشاهداتی CONT14

اضافه می‌شوند. در این‌صورت ۱۰ حالت ممکن برای احداث دو ایستگاه در پنج نقطه وجود دارد که در تمامی حالات، شبکه مشاهداتی شامل ۱۸ ایستگاه و ۱۵۳ خط مبنا می‌باشد؛ نتایج این حالت در شکل ۶ نمایش داده شده است. بهترین دقت برای XPO در شبکه ۱۱، بهترین دقت برای YPO در شبکه ۱۱، بهترین دقت برای Dut1 در شبکه ۱۱، بهترین دقت برای NUTX در شبکه ۸ و بهترین دقت برای NUTY در شبکه ۷ حاصل می‌شود.

۳-۳. اضافه‌کردن سه ایستگاه جدید به دوره مشاهداتی CONT14

ایستگاه‌ها به‌صورت سه‌تایی به شبکه مشاهداتی CONT14 اضافه می‌شوند. در این صورت ۱۰ حالت ممکن برای احداث سه ایستگاه در پنج نقطه وجود دارد که در تمامی حالات، شبکه مشاهداتی شامل ۱۹ ایستگاه و ۱۷۱ خط مبنا است؛ نتایج این حالت در شکل ۷ نمایش داده شده است. بهترین دقت برای XPO در شبکه ۲۰، بهترین دقت برای YPO در شبکه ۲۰، بهترین دقت برای Dut1 در شبکه ۱۶، بهترین دقت برای NUTX در شبکه ۲۳ و بهترین دقت برای NUTY در شبکه ۲۵ حاصل می‌شود.

۳-۴. اضافه‌کردن چهار ایستگاه جدید به دوره مشاهداتی CONT14

ایستگاه‌ها به‌صورت چهارتایی به شبکه مشاهداتی CONT14 اضافه می‌شوند؛ در این‌صورت ۵ حالت ممکن برای احداث چهار ایستگاه در پنج نقطه وجود دارد که در تمامی حالات، شبکه مشاهداتی شامل ۲۰ ایستگاه و ۱۹۰ خط مبنا است؛ نتایج این حالت در شکل ۸ نمایش داده شده است. بهترین دقت برای XPO در شبکه ۲۶، بهترین دقت برای YPO در شبکه ۲۸، بهترین دقت برای Dut1 در شبکه ۲۸، بهترین دقت برای NUTX در شبکه ۳۰ و بهترین دقت برای NUTY در شبکه ۳۰ حاصل می‌شود.

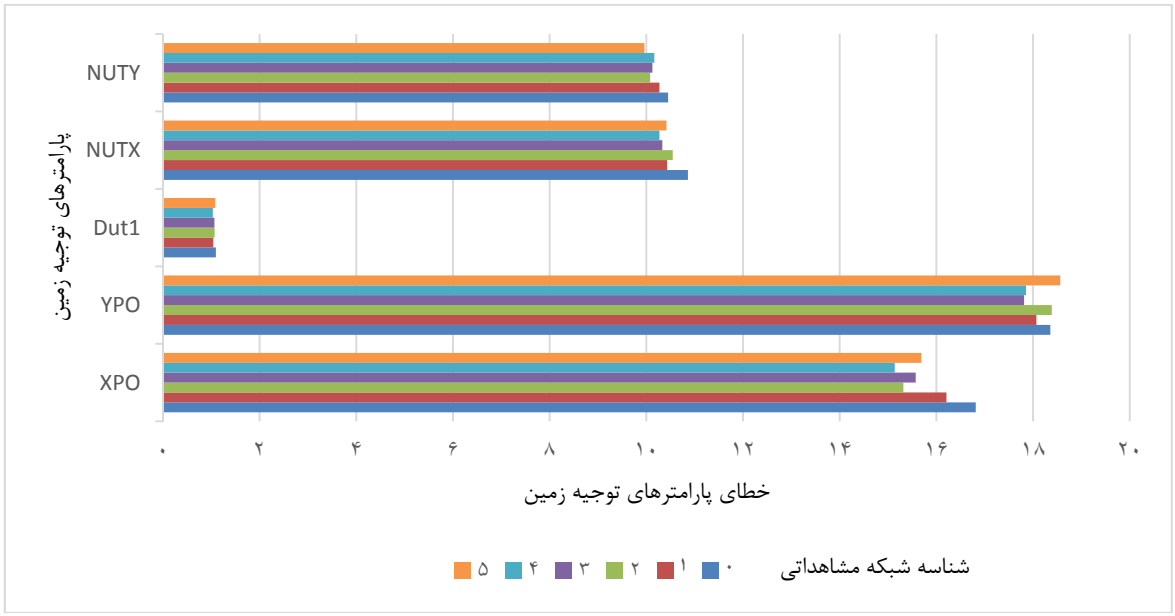
۳-۵. اضافه‌کردن پنج ایستگاه جدید به دوره مشاهداتی CONT14

فقط یک حالت برای اضافه‌کردن هر پنج ایستگاه به شبکه مشاهداتی CONT14 وجود دارد. در این حالت، شبکه مشاهداتی شامل ۲۱ ایستگاه و ۲۱۰ خط مبنا است؛ نتایج این حالت در شکل ۹ نمایش داده شده است.

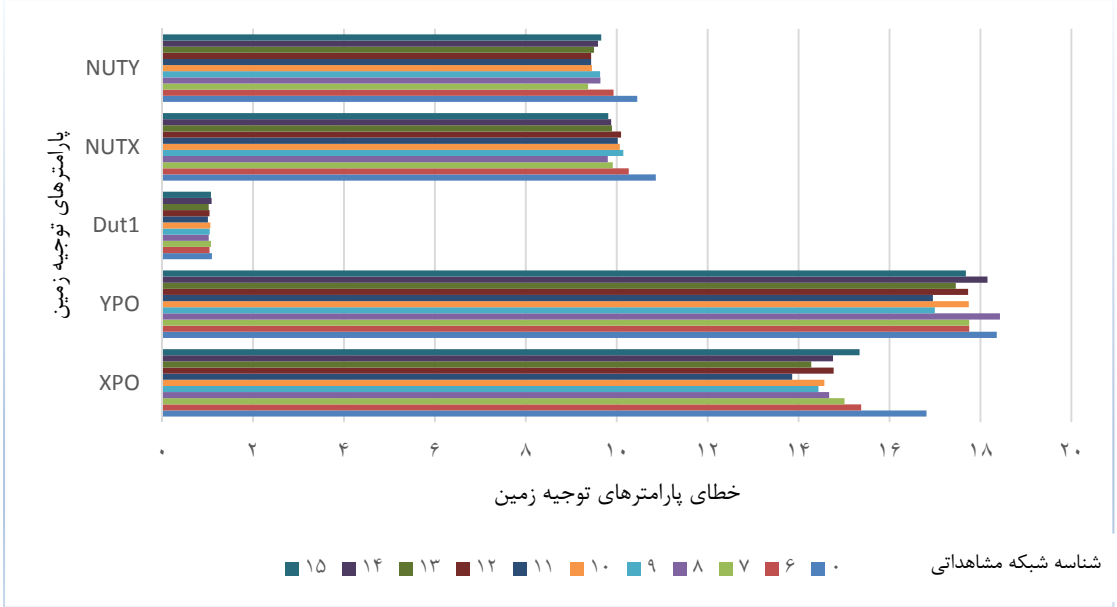
۳-۶. مقایسه دقت پارامترهای توجیه زمین بین حالت‌های مختلف

بهترین دقت برای XPOL در شبکه ۲۶ حاصل می‌شود. در این شبکه دقت XPOL نسبت به شبکه CONT14 حدود ۱۷/۶۲درصد بهبود می‌یابد. در شبکه ۱۱ نیز دقت XPOL نسبت به شبکه CONT14 حدود ۱۷/۵۸ درصد بهبود می‌یابد. با توجه به اختلاف کم درصد دقت بهبود یافته برای XPOL در شبکه‌های ۲۶ و ۱۱ و همچنین به‌صرفه بودن احداث ایستگاه‌های کم، شبکه مشاهداتی ۱۱ برای بهبود دقت XPOL پیشنهاد می‌شود. در شبکه مشاهداتی ۱۱، دو ایستگاه واقع در اهواز و مشهد به شبکه مشاهداتی CONT14 اضافه شده است. بهترین دقت برای YPOL در شبکه ۲۸ حاصل می‌شود. در این شبکه دقت YPOL نسبت به شبکه CONT14 حدود ۹/۰۹ درصد بهبود می‌یابد. در این مشاهداتی، چهار ایستگاه واقع در اهواز، مشهد، تبریز و یزد به شبکه مشاهداتی CONT14 اضافه شده است. بهترین دقت برای DUT1 در شبکه ۳۱ حاصل می‌شود. در این شبکه دقت DUT1 نسبت به شبکه CONT14 حدود ۱۰/۲۷ درصد بهبود می‌یابد. در شبکه مشاهداتی ۳۱، پنج ایستگاه واقع در اهواز، مشهد، یزد و تبریز به شبکه مشاهداتی CONT14 اضافه شده است. بهترین دقت برای NUTX در شبکه ۳۱ حاصل می‌شود. در این شبکه دقت NUTX نسبت به شبکه CONT14 حدود ۱۵/۹۷ درصد بهبود می‌یابد. در شبکه ۳۰ نیز دقت NUTX نسبت به شبکه CONT14 حدود ۱۵/۶۵ درصد بهبود می‌یابد. با توجه به اختلاف کم درصد دقت بهبود

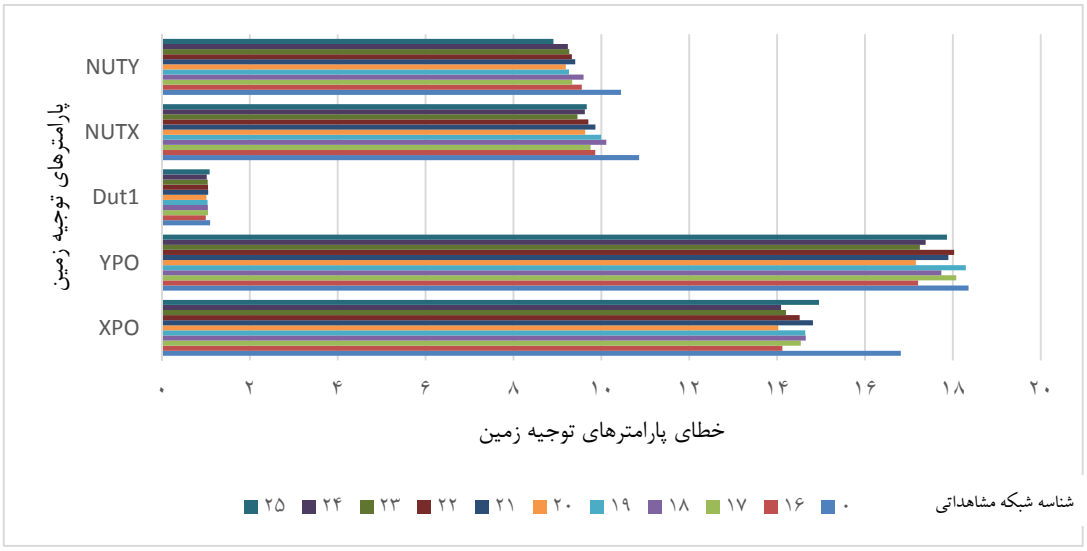
یافته برای NUTX در شبکه‌های ۳۱ و ۳۰ و همچنین به‌صرفه بودن احداث ایستگاه‌های کم، شبکه مشاهداتی ۳۰ برای بهبود دقت NUTX پیشنهاد می‌شود. در شبکه مشاهداتی ۳۰، چهار ایستگاه واقع در اهواز، مشهد، چابهار و یزد به شبکه مشاهداتی CONT14 اضافه شده است. بهترین دقت برای NUTY در شبکه ۳۱ حاصل می‌شود. در این شبکه دقت NUTY نسبت به شبکه CONT14 حدود ۱۶/۴ درصد بهبود می‌یابد.



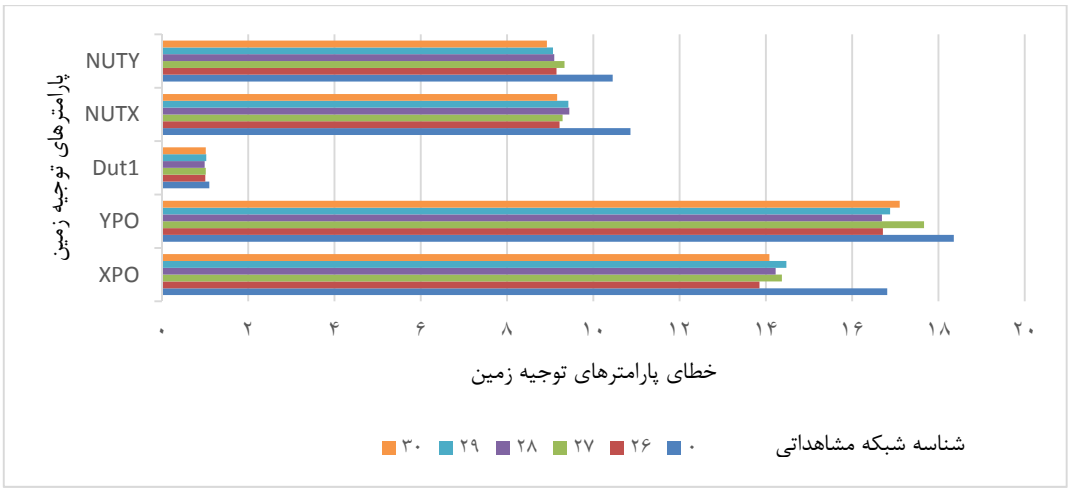
شکل۵. خطای پارامترهای توجیه زمین برای حالت ۱۷ ایستگاهی.



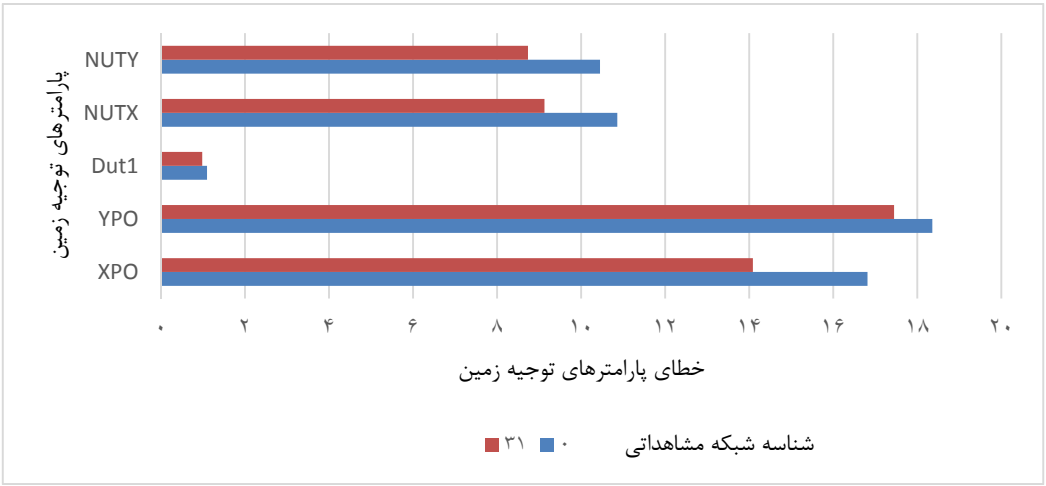
شکل۶. خطای پارامترهای توجیه زمین برای حالت ۱۸ ایستگاهی.



شکل۷. خطای پارامترهای توجیه زمین برای حالت ۱۹ ایستگاهی.



شکل۸. خطای پارامترهای توجیه زمین برای حالت ۲۰ ایستگاهی.



شکل۹. خطای پارامترهای توجیه زمین برای حالت ۲۱ ایستگاهی.

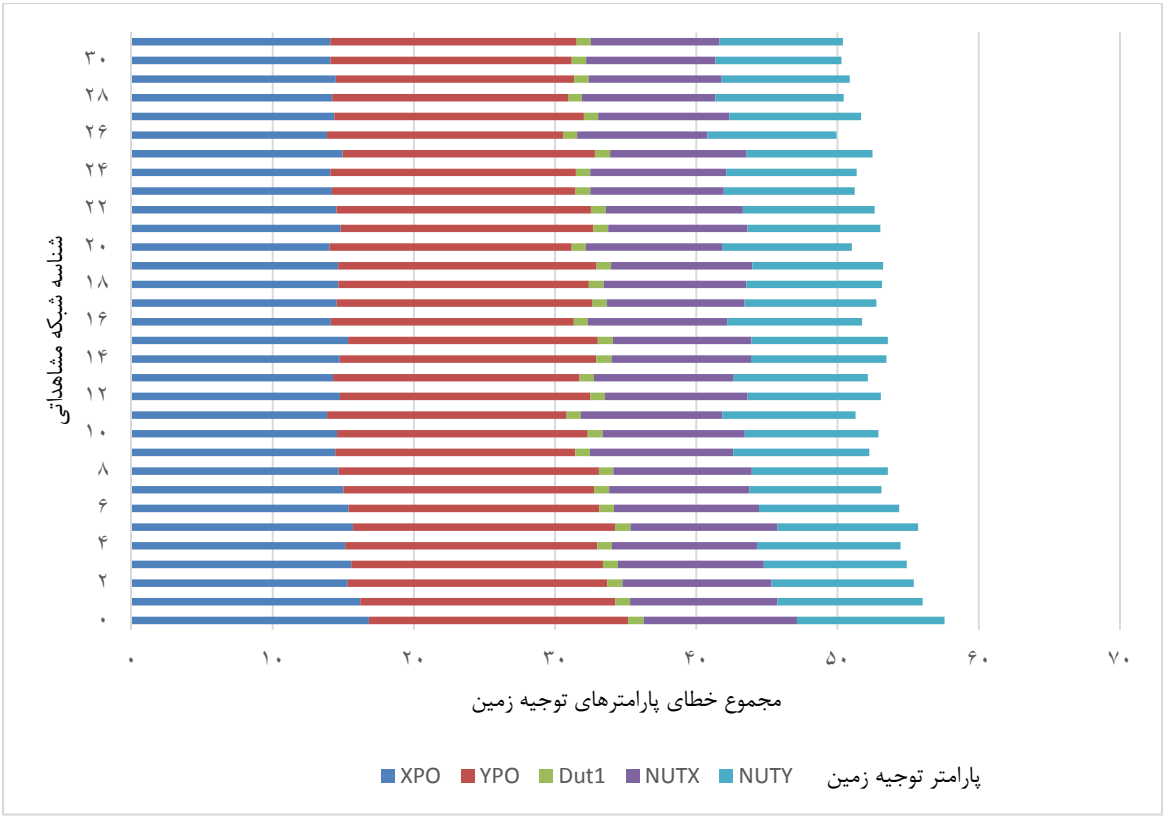
۳-۷. طرح هندسی مناسب برای حالت‌های مختلف و بهینه‌ترین شبکه مشاهداتی

در جدول ۵ برای هر چهار حالت، طرح هندسی مناسب برای احداث ایستگاه‌های مشاهداتی جدید بیان شده است؛ طرح هندسی مناسب طرحی است که در آن میزان بهبود دقت تمامی پارامترهای توجیه زمین به مقدار بیشینه میان حالت‌های مختلف می‌رسد. در صورتی که بخواهیم پنج ایستگاه در پنج نقطه احداث کنیم فقط یک حالت ممکن وجود دارد و مقایسه‌ای بین حالت‌های مختلف نمی‌توان انجام داد.

برای تعیین بهینه‌ترین شبکه مشاهداتی که دقت تمامی پارامترهای توجیه زمین در آن شبکه نسبت به شبکه‌های مشاهداتی دیگر بهبود زیادی یافته باشد، مجموع دقت تمامی پارامترهای توجیه زمین برای هر شبکه محاسبه‌شده و در انتها میان آنها مقایسه صورت می‌گیردکه در شکل ۱۰ این مقادیر رسم شده است. بهینه‌ترین شبکه مشاهداتی مربوط به شبکه ۲۶ می‌باشد که در مجموع دقت پارامترهای توجیه زمین ۱۳/۲۸ درصد بهبود یافته است؛ بنابراین برای بهبود دقت تمامی پارامترهای توجیه زمین در دوره مشاهداتی CONT14 باید چهار ایستگاه در چابهار، تبریز، اهواز و مشهد احداث کنیم.

جدول۵. طرح هندسی مناسب برای حالت های مختلف.

حالت‌های مختلف برای اضافه‌کردن ایستگاه به شبکه مشاهداتی CONT14	طرح هندسی مناسب
اضافه‌کردن یک ایستگاه	احداث ایستگاه در مشهد
اضافه‌کردن دو ایستگاه	احداث ایستگاه در مشهد و اهواز
اضافه‌کردن سه ایستگاه	احداث ایستگاه در تبریز، چابهار و یزد
اضافه‌کردن چهار ایستگاه	احداث ایستگاه در مشهد، تبریز، اهواز و چابهار



شکل ۱۰. مجموع خطای پارامترهای توجیه زمین برای تمامی شبکه‌های مشاهداتی.

۴. نتیجه‌گیری

در علم ژئودزی همواره در کنار نتایج، دقت نتایج نیز مورد بحث قرار می‌گیرد و داده‌هایی با دقت بالا موردعلاقه محققان است. نتایج حاصل از پردازش داده‌های VLBI نقش به‌سزایی در افزایش دانش ما نسبت به زمین دارد و علوم ژئودزی و ژئودینامیک همواره از این نتایج بهره می‌برند. تکنیک VLBI با استفاده از اختلاف زمانی موردنیاز برای رسیدن موج رادیویی حاصل از اجرام سماوی دوردست از ایستگاه اول به ایستگاه دوم، پارامترهای مختلف از جمله مختصات ایستگاه زمینی، مختصات اجرام سماوی، پارامترهای توجیه زمین، میزان حرکت پوسته زمین و... را می‌تواند تخمین بزند. می‌توان با افزایش تعداد مشاهدات و همچنین بهبود هندسه شبکه مشاهداتی، دقت نتایج را افزایش داد. پارامترهای توجیه زمین یکی از نتایج مهم و انحصاری پردازش داده‌های تکنیک VLBI می‌باشد؛ این پارامترها سرعت دورانی زمین و همچنین جهت‌گیری محور دورانی زمین نسبت به یک سیستم مرجع اینرشیال را بیان می‌کنند. در این تحقیق تأثیر احداث یک یا چند ایستگاه مشاهداتی VLBI در ایران بر روی دقت پارامترهای توجیه زمین در شبکه مشاهداتی CONT14 بررسی شد و نشان داده شد که با احداث چهار ایستگاه مشاهداتی در چابهار، تبریز، اهواز و مشهد میتوان دقت پارامترهای توجیه زمین را ۱۳/۲۸ درصد افزایش داد.

در مطالعات بعدی می‌توان دامنه مطالعاتی را افزایش داد و به‌جای ایران در منطقه خاورمیانه یا مناطقی که از نبود ایستگاه VLBI رنج می‌برند این مطالعات را انجام داد. در نیمکره جنوبی به‌علت کم‌بودن تعداد کشورهایی که قادر به پرداخت بودجه برای تأسیس ایستگاه مشاهداتی هستند، کمبود ایستگاه مشاهداتی را شاهد هستیم و می‌توان به‌طور ویژه بر روی نیمکره جنوبی مطالعاتی را انجام داد. نحوه برداشت داده توسط ایستگاه مشاهداتی نیز تأثیر زیادی بر روی دقت نتایج دارد. به‌عنوان مثال ایستگاهی که نرخ برداشت داده بالاتری دارد می‌تواند در مدت‌زمان کوتاهی داده لازم برای پردازش را فراهم کند و به‌وسیله صرفه‌جویی در زمان می‌توانیم مشاهدات بیشتری را به منابع رادیویی مختلف انجام دهیم. در مطالعات بعدی می‌توان تأثیر نحوه برداشت داده بر روی دقت نتایج را بررسی کرد.

تشکر و قدردانی

از سازمان IVS برای در اختیار گذاشتن اطلاعات مربوط به دوره مشاهداتی CONT14، کمال تقدیر و تشکر را داریم.

مراجع

Clark, B., 2003, A review of the history of VLBI, Radio astronomy at the fringe, 1.

Heinkelman, R., 2013, VLBI geodesy, observations, analysis, and results, Geodetic sciences–observations, modeling and applications, S. Jin (ed.), InTech open, doi, 10, 127-156.

Kareinen, N., 2016, Geodetic Analysis for the Very Long Baseline Interferometry Global Observing System, Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

Nilsson, T., Heinkelmann, R., Karbon, M., raposo-pulido, V., Soja, B. and Schuh, H., 2014, Earth orientation parameters estimated from VLBI during the CONT11 campaign, Journal of Geodesy, 88, 491-502.

Nothnagel, A., Artz, T., Behrend, D. and Malkin, Z., 2021, Continuous VLBI Campaign 2014 www.ivscc.gsfc.nasa.gov/ program/cont14.

Thompson, R., Moran, J. and Swenson, G., 2017, Interferometry and synthesis in radio astronomy, Springer Nature, p11-13.

Schartner, M. and Böhm, J., 2019, VieSched++: a new VLBI scheduling software for geodesy and astrometry. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 131, 084501.

Schartner, M., Böhm, J. and Nothnagel, A., 2020, Optimal antenna locations of the VLBI Global Observing System for the estimation of Earth orientation parameters, Earth, Planets and Space, 72, 1-14.

Schuh, H. and Behrend, D., 2012, VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry, Journal of Geodynamics, 61, 68-80.

Seidelmann, P., 1982, 1980 IAU theory of nutation: The final report of the IAU working

group on nutation, Celestial mechanics, 27, 79-106.

Sovers, O. J., Fanselow, J. L. and Jacobs, C. S., 1998, Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. Reviews of Modern Physics, 70, 1393.

Vondrak, J., 2009, Geophysical contributions in precessionnutation, Proc. VI Serbian-Bulgarian Astronomical Conference, Publ. Astr. Soc. Rudjer Bošković, 143-153.

Whitney, A., 2000, How Do VLBI Correlators Work?, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting Proceedings, 187-205.

Investigation of a suitable geometric design for the CONT14 observation network to improve the accuracy of EOPs by construction of VLBI stations in Iran

Rastbood, A.[1*] and Sahebi Ilekhchi, M.[2]

1. Assistant Professor, Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. M.Sc. Student, Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(Received: 14 March 2021, Accepted: 25 May 2021)

Summary

Very long baseline interferometry (VLBI) has been used since the mid-1960s as a spatial geodetic tool for accurately determining coordinates on the ground, determining the Earth's rotational axis with very high accuracy and extracting important parameters related to earth. The most important products of VLBI data processing are Earth Orientation Parameters (EOPs) and International Celestial Reference Frames (ICRFs). Other important parameters can be determined by VLBI are International Terrestrial Reference Frames (ITRFs), light deflection parameter, motion parameters of tectonic plates, Love and Shida numbers and ionospheric and tropospheric parameters. The basic principle of VLBI is measuring the time difference between the arrival time of a radio wave in two or more antennas, which is referred to as the time delay. To achieve this purpose, first the atomic clock must be used and secondly the clocks in the antennas must be synchronous. Earth orientation parameters (EOPs) are a set of parameters that describe irregularities in the Earth's rotation. The VLBI method can be used to derive EOPs. These parameters can be used for transformation between international terrestrial reference frame (ITRFs) and celestial reference frame (ICRFs) or vice versa. This transformation takes place through a sequence of rotations related to precession/nutation (NUTX, NUTY), earth rotation (Dut1) and polar motion (XPO, YPO). The geophysical effects of the Earth as well as the effects of celestial bodies such as the Moon or the Sun on the Earth's rotation, lead to changes in the EOPs; therefore, changes in geophysical parameters of the earth can be obtained from changes in the EOPs. The purpose of this study is to investigate the accuracy of the EOPs after adding new observation stations to the CONT14 observation network. These observation stations are artificially constructed in Iran and the accuracy of EOPs before and after adding new station to the network is investigated. CONT sessions are one of the most famous and important sessions in which the stations collect data continuously for two weeks. On average, the CONT sessions take place every three years. Due to the large amount of data in these sessions, the EOPs are determined with high accuracy. Due to the importance of CONT sessions, we will investigate the effect of constructing stations in Iran on the accuracy of the EOPs in one of the CONT sessions, which will be added to the CONT14 observation network. Due to the high cost of constructing a VLBI observation station and to approaching reality, we will add five stations to the network in maximum case. The local network resulting from the five new stations covers the whole of Iran and the locations of these five stations have been chosen arbitrarily. With analyzing the data that collected by the CONT14 session, the accuracy of the EOPs is obtained. After adding new observation stations to CONT14 network and performing the new session, the collected data is processed again and the accuracy of the EOPs is obtained. A comparison of the accuracy obtained in the new mode with accuracy obtained in CONT14 session shows the degree of improvement of EOPs accuracy .By comparing EOPs precision in all possible observation networks, we came to the conclusion that if four observation stations are constructed in Tabriz, Ahvaz, Chabahar and Mashhad and add them to the CONT14 observation network we can improve CONT14 EOPs accuracy by about 13.28%.

Keywords: Very long baseline interferometry (VLBI), Earth orientation parameters (EOP), Station, CONT14, Iran.

* Corresponding author: arastbood@tabrizu.ac.ir