

Review Paper

Determination of appropriate location for VLBI station establishing in the Middle East to reduce error of EOPs in CONT17 campaign

Asghar Rastbood^{1*} and Mohsen Sahebi-Ilekhchi¹

¹Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2021 December 21

Accepted: 2022 October 24

Available online: 2023 March 21

Keywords:

VLBI station

Earth orientation parameters

Middle East

Simulation

ABSTRACT

Very Long Baseline Interferometry (VLBI) is one of the essential approaches in geodesy. Significant capabilities of this technique are creation of International Celestial Reference Frame (ICRF), determination of Earth orientation parameters (EOPs), coordinates of station with high accuracy and light deflection. Many attempts could be done to increase accuracy of VLBI data, including technical improvement of equipment, physical models improvement, using optimal data processing methods and increasing number of stations. In this study, in order to reduce the error of EOPs in CONT17 campaign, the appropriate position for a VLBI station in the Middle East is investigated. The results showed that mean error of EOPs in the Legacy-1 and Legacy-2 reduced approximately 6.64% and 13.86% by adding two stations in Oman and Egypt countries, respectively.

1. Introduction

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. The wave received in the VLBI technique, unlike the waves received in the GPS technique, has natural sources (quasars). The radio wave reaches the station from great distances. It causes the wave front to be considered as plane and the power of the received wave is low. Due to the weakness of the received signals, large receivers should be used to detect the signals (Fig.1). The basic concept of VLBI technique is shown in Fig. 2.

The most important products of VLBI data processing are Earth Orientation Parameters (EOPs) and International Celestial Reference Frames (ICRFs). For example, 295 radio sources have been used to generate ICRF-2 (Fig.3). VLBI, along with other

satellite geodesy methods, has played an important role in the production of ITRFs. For example, Figure 4 shows the distribution map of 1499 ground stations describing ITRF2014. EOPs are a set that describe irregularities in the Earth's rotation. These parameters can be used for transformation between International Terrestrial Reference Frames (ITRFs) and Celestial Reference Frame (ICRF). 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 characteristics of the earth can be obtained from changes in the EOPs. Many attempts could be done to increase accuracy of VLBI products, including technical

* Corresponding author: Asghar Rastbood; E-mail: arastbood@tabrizu.ac.ir

Citation:

Rastbood, A., and Sahebi-Ilekhchi, M., 2023. Determination of appropriate location for VLBI station establishing in the Middle East to reduce error of EOPs in CONT17 campaign. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(1), 127, 55-68. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.320993.1966>

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2023 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2022.320993.1966

 dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.1.11.8



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

improvement of equipment, physical models improvement, using optimal data processing methods and increasing number of stations. Huda et al. (2021) have studied the effect of adding two VLBI stations to observation networks. In their research, two stations that will be built in the future were added to observation networks by simulation, and their effect on the estimation of EOPs and station coordinates was investigated. They performed two analyzes; A) The effect of these two stations on the one-hour observation period of IN320-314 with an emphasis on dUT1 estimation was obtained, and it was observed that these two stations reduce the repeatability of dUT1 by 25%. B) The effect of these two stations on two 24-hour observation periods of R4934 and AOV049 was investigated, and it was concluded that, in general, the two stations in Indonesia reduce the repeatability of EOPs by 20%; Also, the repeatability of station coordinates is reduced by 12%. Schartner et al. (2020) investigated the optimal location for building a new generation VGOS station to increase the accuracy of EOPs and concluded that to improve the accuracy of EOPs, it is better to build a station in South America. They also concluded that even building a station in a dissimilar location leads to an increase in accuracy.

In this research, the improvement of the accuracy of EOPs estimation by adding a new station to two observation networks used in CONT17 observation period has been investigated. These two observation networks are Legacy-1 and Legacy-2. The station added to the observation network is located in the Middle East. This area does not have any VLBI stations. The data are simulated and artificially generated because the station added to the observation network does not exist. It has been estimated that if there is a station in the Middle East region, the error of estimating the EOPs will be reduced.

2. Research methodology

An observation station must be connected to a network in order to obtain usable data from it. Because time delay cannot be calculated with one station. There are two ways to create a network. Either a new observation network should be created or one of the existing networks should be used and a new station added to it. In this research, the second way to select the network is chosen because the previously created observation network can be reused in practice.

Figure 5 shows the geographical distribution of the stations of Legacy-1 and Legacy-2 networks. Tables 1 and 2 show the locations, names and ID of the stations used in the Legacy-1 and Legacy-2 observation networks, respectively.

The points that will be investigated for the construction of the VLBI station are shown in Figure 6. The characteristics of the artificial station are assumed to be the same as those of the WETT13N station located in Germany. The entire Middle East

region is placed in a four-by-four grid. One of the cells has been removed because it does not include any of the Middle East countries. Therefore, 15 points are checked for the construction of the station. The center of the cells has been chosen as the construction site of the station. If the center of the cell is located in the sea, the closest land to the center of the cell is chosen as the location of the station.

To obtain the VLBI data, two steps are generally taken. The first step is to generate the observation scheduling file, which is provided to the observation station. The second step of data acquisition is based on the instructions of the observation planning file, which produces raw data that may have large errors, which are eliminated in the data processing step. In this research, because the station added to the observation network does not exist in reality, the observation scheduling file and data are simulated and produced close to reality. The observation scheduling file and data simulation was generated with the VieSched++ software (Schartner and Böhm, 2019).

3. Results and Discussions

In simulation, the results have been tried to be close to reality. Thus, the effect of troposphere, clock error and measurement error, which are three main sources of error in practice, have been applied to the produced data by simulation. The average error of each EOPs is as follows:

By adding each station number 1 to 15 to both Legacy1 and Legacy2 observation networks, the mean XPO error has decreased. The greatest effect on the reduction of XPO error in Legacy1 network is achieved by adding station number 12 and in Legacy2 network by adding station number 9, which reduce the error by 8.59% and 12.26%, respectively (Fig.7). The greatest effect on reducing the YPO error in Legacy-1 network is achieved by adding station number 12 and in Legacy-2 network by adding station number 14, which reduce the error by 4.12 and 16.29%, respectively (Fig.8).

The greatest effect on dUT1 error reduction in Legacy-1 network is achieved by adding station number 9 and in Legacy-2 network by adding station number 1, which reduce the error by 3.57% and 24.58%, respectively (Fig.9).

In the Legacy-1 network, when some stations are added to the observation network, despite increasing the number of observations, they lead to an increase in dUT1 estimation error. Sometimes an additional station does not lead to a better estimate of a parameter. In this case, some stations produce baselines that do not provide additional information about dUT1. To estimate dUT1 more accurately, long east-west baselines should be added to the observation network. At the same time, it is not always possible to improve all parameters because each parameter has different requirements, and in this case, despite the increase in the dUT1

determination error when adding some stations, the error of other EOPs is reduced by adding the same stations.

The greatest effect on the reduction of NUTX error in Legacy1 network is achieved by adding station number 12 and in Legacy2 network by adding station number 9, which reduce the error by 9.24% and 10.26%, respectively (Fig.10). Also, the greatest effect on the reduction of NUTY error in Legacy1 network is achieved by adding station number 15 and in Legacy2 network by adding station number 9, which reduce the error by 9.44% and 9.61%, respectively (Fig.11).

4. Conclusion

In order to determine the optimal location for the construction of

an observation station in the Middle East region, fifteen points were investigated to improve the estimation accuracy of EOPs in the CONT17 observation period. Each of the points was added one by one to the Legacy-1 and Legacy-2 observation networks, and then the improvement of the estimation error of the EOPs was checked. These two observation networks have been used in the CONT17 observation period. The main result of this research shows that with the construction of an observation station in Oman, the average error of determining the EOPs in the Legacy-1 observation network is reduced by 6.64%. Also, with the construction of an observation station in Egypt, the average error of determining the EOPs in the Legacy-2 observation network is reduced by 13.86%.

تعیین مکان مناسب برای احداث ایستگاه VLBI در منطقه خاورمیانه جهت کاهش خطای برآورد متغیرهای توجیه زمین در دوره مشاهداتی CONT17

اصغر راست‌بود^{۱*} و محسن صاحبی‌ایلخچی^۱

^۱گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

تداخل‌سنجی طول مبنای بسیار بلند (Very Long Baseline Interferometry) یا به اختصار VLBI یکی از روش‌های مهم در علم ژئودزی می‌باشد. از جمله توانایی‌های این روش می‌توان به ایجاد چارچوب مرجع سماوی بین‌المللی (International Celestial Reference Frame)، تعیین متغیرهای توجیه زمین (Earth Orientation Parameters)، مختصات ایستگاه‌های مشاهداتی با دقت بسیار بالا و متغیر انحراف نور اشاره کرد. کارهای بسیاری برای افزایش دقت داده‌های تکنیک VLBI می‌توان انجام داد که از جمله آنها می‌توان به بهبود فنی تجهیزات مورد استفاده، بهبود مدل‌های فیزیکی، استفاده از روش‌های مناسب پردازش داده و همچنین افزایش تعداد ایستگاه‌های مشاهداتی اشاره کرد. در این نوشتار مکان بهینه برای احداث ایستگاه VLBI در منطقه خاورمیانه جهت کاهش خطای برآورد متغیرهای توجیه زمین در دوره مشاهداتی CONT17 بررسی شده است. نتیجه اصلی پژوهش نشان می‌دهد که با احداث یک ایستگاه مشاهداتی در عمان، میانگین خطای تعیین متغیرهای توجیه زمین در شبکه مشاهداتی Legacy-1 ۶/۶۴ درصد و با احداث یک ایستگاه مشاهداتی در مصر، میانگین خطای تعیین متغیرهای توجیه زمین در شبکه مشاهداتی Legacy-2 ۱۳/۸۶ درصد کاهش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

ایستگاه VLBI

متغیرهای توجیه زمین

خاورمیانه

شبیه‌سازی

۱- نوشتار

در روش تداخل‌سنجی طول مبنای بسیار بلند یا به اختصار VLBI اختلاف زمانی بین رسیدن یک موج رادیویی به دو یا چند ایستگاه مختلف اندازه‌گیری می‌شود. موج دریافت شده در تکنیک VLBI برخلاف امواج دریافتی در تکنیک GPS منابعی طبیعی دارد. موج رادیویی از فواصل بسیار زیاد به ایستگاه می‌رسد و فاصله زیاد منبع موج از گیرنده باعث می‌شود جبهه موج مسطح در نظر گرفته شود و قدرت موج دریافتی کم باشد. به علت ضعیف بودن سیگنال‌های دریافتی، برای تشخیص سیگنال‌ها باید از گیرنده‌هایی استفاده شود که ابعاد بزرگی داشته باشند (شکل ۱) و نیز نرخ نمونه‌برداری و ثبت داده آنها بالا باشد تا بتوان موج را تشخیص داد (Schuh and Böhm, 2013). به همین علت ابعاد آنتن‌های VLBI بسیار بزرگ‌تر از آنتن‌های GPS می‌باشند.

نبود اتصال مستقیم آنتن‌ها باعث می‌شود فاصله ایستگاه‌ها تا حد مورد نیاز افزایش یابد به گونه‌ای که می‌توان ایستگاه‌ها را در فواصل چند هزار کیلومتری نسبت به یکدیگر قرار داد. در هر یک از ایستگاه‌هایی که به طور مستقیم به یکدیگر متصل نیستند ساعت اتمی مستقل با پایداری بسیار بالا استفاده می‌شود. در سال ۱۹۶۷ میلادی چندین گروه از دو ایستگاه که مستقیماً به یکدیگر متصل نبودند برای بررسی منابع رادیویی مورد استفاده قرار گرفتند؛

بنابراین اواسط دهه ۱۹۶۰ را می‌توان مبدأ پیدایش تکنیک VLBI به معنای امروزی دانست.

با در نظر گرفتن دو ایستگاه، موج رادیویی که به ایستگاه اول می‌رسد بعد از گذشت τ ثانیه به ایستگاه دوم خواهد رسید. τ همان تأخیر زمانی (Time delay) است. تأخیر زمانی دریافت سیگنال توسط دو آنتن با رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$\tau = (-b \cdot S_0) / c$$

در رابطه ۱، c سرعت موج است که برابر با سرعت نور در خلأ در نظر گرفته می‌شود، b بردار خط مبنا است که ایستگاه ۱ را به ایستگاه ۲ وصل می‌کند و S_0 بردار یک‌ای است که به سمت منبع رادیویی نشانه می‌رود و جهت این بردار در هر دو ایستگاه به علت فاصله بسیار زیاد منبع رادیویی یکسان است. در شکل ۲ مفهوم اساسی روش VLBI نشان داده شده است. سیگنال‌های دریافتی در دو ایستگاه پس از ذخیره در دیسک‌های کامپیوتری به مراکز ویژه‌ای به نام همبسته‌سازها فرستاده می‌شوند. در این مراکز از تابع همبستگی متقابل (Cross correlation function) برای به‌دست آوردن تأخیر زمانی میان دو موج دریافتی استفاده می‌شود. این تابع وقتی به بیشترین مقدار خود می‌رسد بیانگر این است که موج ثانویه به اندازه τ ثانیه انتقال زمانی داده شده است.

* نویسنده مسئول: اصغر راست‌بود؛ E-mail: arastbood@tabrizu.ac.ir

ماخذنگاری:

راست‌بود، ا. و صاحبی‌ایلخچی، م.، ۱۴۰۲، تعیین مکان مناسب برای احداث ایستگاه VLBI در منطقه خاورمیانه جهت کاهش خطای برآورد متغیرهای توجیه زمین در دوره مشاهداتی CONT17، فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳ (۱)، ۵۵-۶۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.320993.1966>

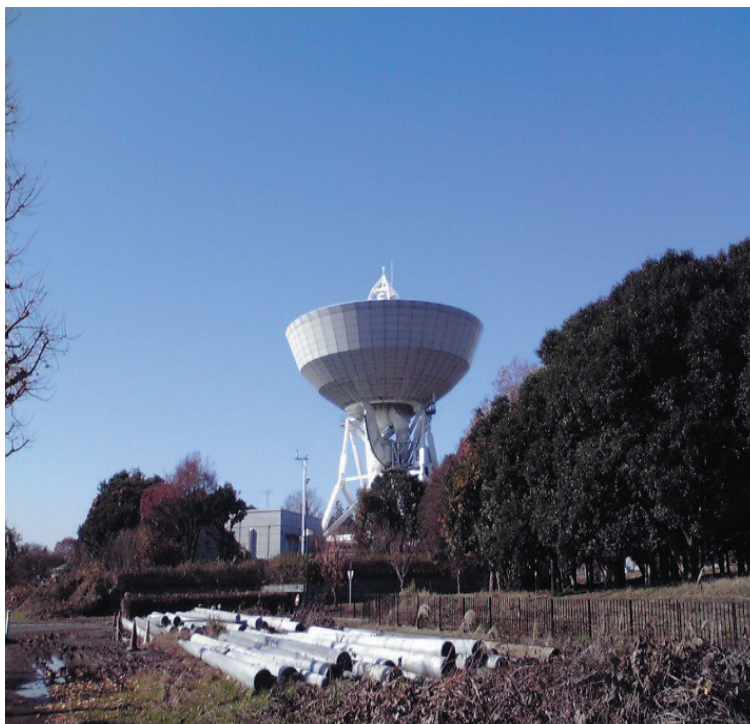
doi: 10.22071/gsj.2022.320993.1966

dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.1.11.8

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

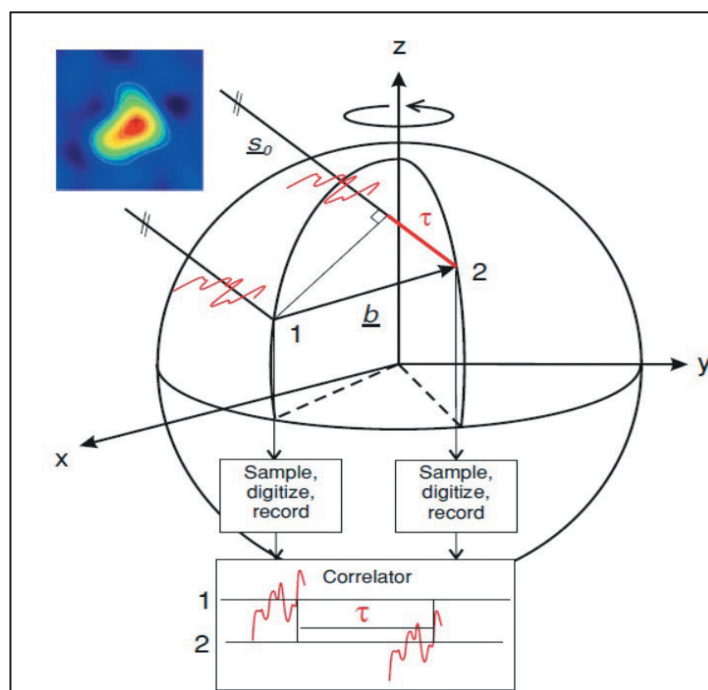


This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



شکل ۱- ایستگاه مورد استفاده در تکنیک VLBI با نام Tsukuba واقع در ژاپن. به علت ضعیف بودن سیگنال‌های دریافتی، ایستگاه‌ها ابعاد بزرگی دارند.

Figure 1. Station used in VLBI technique called Tsukuba located in Japan. Due to the weak received signals, the stations have large dimensions (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tsukuba_VLBI_Station.jpg).



شکل ۲- مفهوم اساسی تکنیک VLBI. یک موج رادیویی پس از گذشت τ ثانیه به ایستگاه دوم می‌رسد (Schuh and Böhm, 2013).

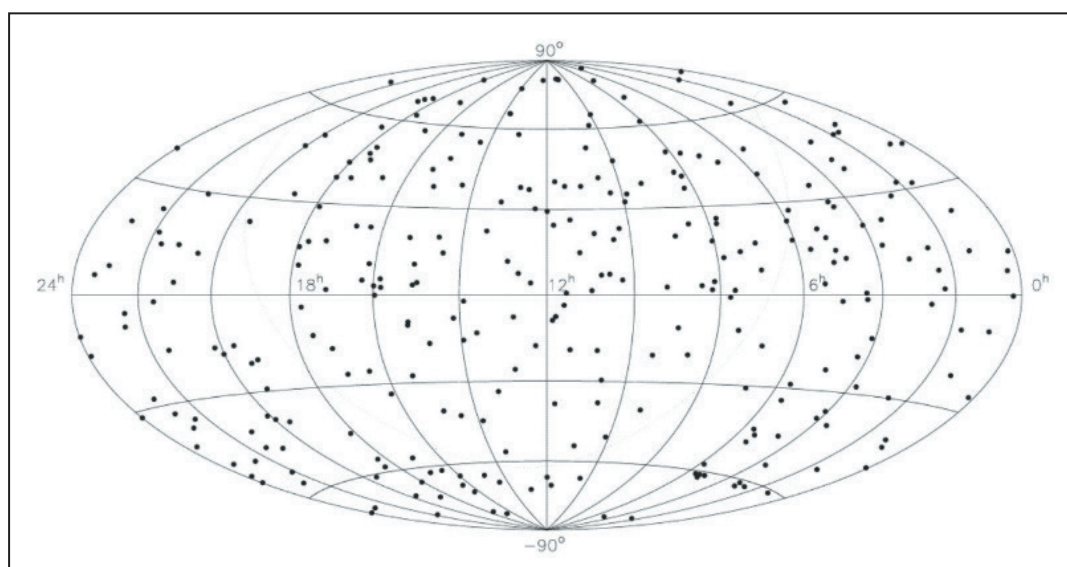
Figure 2 . Basic concept of VLBI technique. A radio wave reaches the second station after τ seconds (Schuh and Böhm, 2013).

متغیرهای حاصل از تکنیک VLBI عبارتند از:

(۱) متغیرهای توجیه زمین: یکی از مهمترین متغیرهای به‌دست آمده از روش VLBI متغیرهای توجیه زمین می‌باشند. متغیرهای توجیه زمین برای تعیین موقعیت ضروری هستند و VLBI تنها روشی است که تمامی متغیرهای توجیه زمین را به صورت یکجا به‌دست می‌آورد (Schuh and Böhm, 2013). این متغیرها شامل حرکت قطب سماوی (CP) در سیستم مرجع سماوی (NUTX)، دوران زمین حول محور مرتبط با قطب (DUT1) و حرکت قطبی (XPO, YPO) می‌باشد (Petit and Luzum, 2010). حرکت قطبی محور دوران لحظه‌ای زمین در سیستم مرجع زمینی توصیف می‌شود. از طرفی حرکت قطب سماوی در سیستم مرجع سماوی است و به این ترتیب با دانستن دو متغیر که

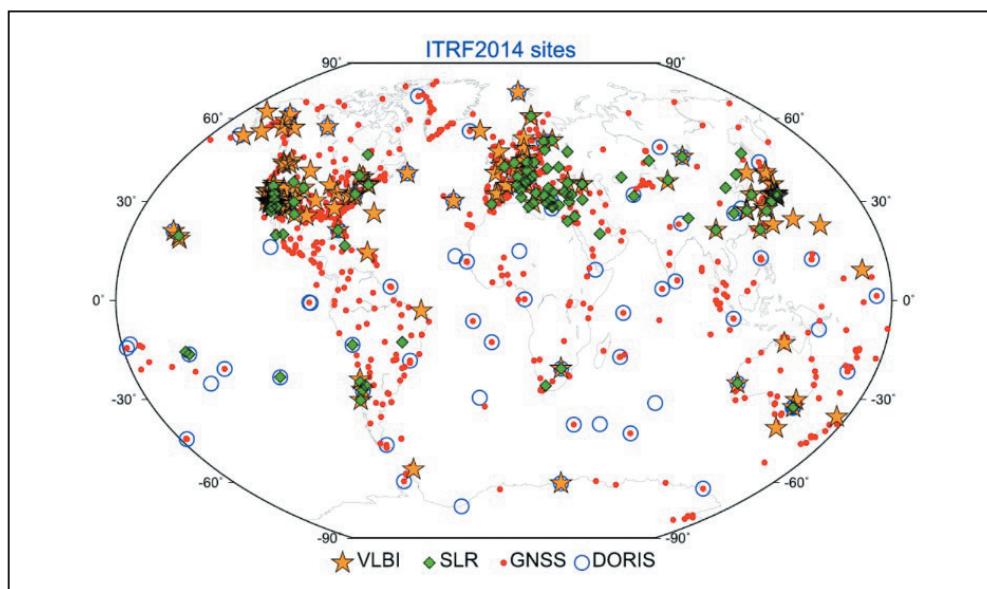
در سیستم‌های مرجع متفاوتی قرار دارند ارتباط بین سیستم مرجع سماوی و زمینی برقرار می‌شود.

(۲) چارچوب‌های مرجع: روش VLBI با تعیین مختصات اجرام سماوی قادر به تولید چارچوب مرجع سماوی در بسامد رادیویی می‌باشد (Fey et al., 2015). برای تولید ICRF-2 از ۲۹۵ منبع رادیویی استفاده شده است (شکل ۳). این روش به علت توانایی در تعیین مختصات و سرعت حرکت ایستگاه‌ها با دقت بالا همراه با دیگر تکنیک‌های ماهواره‌ای نقش مهمی در تعیین چارچوب مرجع زمینی ایفا می‌کند (Altamimi et al., 2016). VLBI در کنار دیگر روش‌های ماهواره‌ای نقش مهمی را در تولید ITRF2014 ایفا کرده است (شکل ۴).



شکل ۳- نقشه توزیع ۲۹۵ منبع رادیویی توصیف کننده ICRF-2 (Fey et al., 2015).

Figure 3. Distribution map of 295 radio sources describing ICRF-2 (Fey et al., 2015).



شکل ۴- نقشه توزیع ۱۴۹۹ ایستگاه زمینی توصیف کننده ITRF2014. این چارچوب مرجع زمینی با استفاده از داده‌های VLBI، SLR، GNSS و DORIS به دست آمده است (Altamimi et al., 2016).

Figure 4. Distribution map of 1499 ground stations describing ITRF2014. This terrestrial reference frame was obtained using VLBI, SLR, GNSS and DORIS data (Altamimi et al., 2016).

به‌ویژه در حالتی که جفت ایستگاه به‌طور پیوسته برداشت داده را انجام دهد. در حالت جفت ایستگاهی، ایستگاه دوم به صورت مصنوعی در کنار ایستگاه واقعی اول قرار داده شده بود.

نیلسون و همکاران (Nilsson et al., 2014) دقت متغیرهای توجیه زمین به‌دست آمده از دوره مشاهداتی CONT11 را بررسی کردند و با شبیه‌سازی‌های متعدد نشان دادند که در صورت استفاده از آنتن‌های نسل جدید در شبکه مشاهداتی CONT11 به جای آنتن‌های قدیمی خطای متغیرهای برآورد شده حدود پنج برابر کاهش می‌یابد. همچنین به این نتیجه رسیدند که برای دستیابی به بالاترین دقت در متغیرهای توجیه زمین ایستگاه‌های مشاهداتی باید به‌طور همگن پراکنده شده باشند.

در این نوشتار با شبیه‌سازی احداث ایستگاه، کاهش خطای برآورد متغیرهای توجیه زمین بررسی شده است. محل احداث ایستگاه خاورمیانه می‌باشد زیرا در این منطقه ایستگاه VLBI وجود ندارد. ایستگاه احداثی به دو شبکه از سه شبکه مورد استفاده در دوره مشاهداتی CONT17 اضافه می‌شود. به عبارتی تأثیر وجود ایستگاه مشاهداتی در منطقه خاورمیانه جهت مشارکت در دوره مشاهداتی CONT17 بر خطای متغیرهای توجیه زمین بررسی شده است و برآورد شده است که اگر در منطقه خاورمیانه ایستگاهی وجود داشته باشد خطای برآورد متغیرهای توجیه زمین به چه میزان کاهش می‌یابد.

۲- روش پژوهش

ایستگاه مشاهداتی باید به یک شبکه متصل شود تا بتوان داده قابل استفاده از آن به‌دست آورد. زیرا با یک ایستگاه نمی‌توان تأخیر زمانی را محاسبه کرد. برای ایجاد شبکه دو راه وجود دارد. یا باید یک شبکه مشاهداتی جدید ایجاد شود یا یکی از شبکه‌های موجود مورد استفاده قرار گیرد و ایستگاه جدیدی به آن اضافه شود. در این نوشتار راه دوم برای انتخاب شبکه برگزیده شده است زیرا شبکه مشاهداتی که پیش‌تر ایجاد شده در عمل امکان استفاده دوباره از آن وجود دارد. به عنوان مثال ۸۱ درصد ایستگاه‌های شبکه مشاهداتی مورد استفاده در دوره مشاهداتی CONT08 در دوره مشاهداتی CONT11 استفاده شده است. همچنین ۸۵ درصد ایستگاه‌های دوره مشاهداتی CONT11 در دوره مشاهداتی CONT14 مورد استفاده قرار گرفته است. در شبکه مشاهداتی Legacy-1 که در جدیدترین دوره مشاهداتی CONT داده برداشت کرده از ۷۶ درصد ایستگاه‌های دوره مشاهداتی CONT14 استفاده شده است. ممکن است یک شبکه مشاهداتی که فقط ایده آن وجود دارد امکان عملی ساختن آن وجود نداشته باشد. به عنوان مثال برای به‌وجود آوردن شبکه مشاهداتی CONT17 پیش از به اجرا درآوردن دوره مشاهداتی به تمامی اپراتورهای ایستگاه‌ها اعلام شده بود که در تاریخ ۲۸ نوامبر تا ۱۲ دسامبر ۲۰۱۷ قرار است یک دوره مشاهداتی ۱۴ روزه داشته باشند و پس از اعلام آمادگی اپراتورها دوره مشاهداتی صورت پذیرفت.

در این نوشتار میزان بهبود دقت برآورد متغیرهای توجیه زمین با افزودن یک ایستگاه به دو شبکه مشاهداتی مورد استفاده در دوره مشاهداتی CONT17 بررسی شده است. این دو شبکه مشاهداتی Legacy-1 و Legacy-2 نام دارند. ایستگاه افزوده شده به شبکه مشاهداتی در خاورمیانه قرار دارد. این منطقه فاقد هرگونه ایستگاه VLBI است. داده‌ها با شبیه‌سازی و به طور مصنوعی ایجاد شده‌اند زیرا ایستگاهی که به شبکه مشاهداتی اضافه می‌شود وجود خارجی ندارد.

دوره‌های مشاهداتی CONT برای به‌دست آوردن بهترین داده‌های ممکن برای VLBI به صورت پیوسته و طی یک دوره دو هفته‌ای طراحی شده است تا بهترین دقتی که تکنیک VLBI می‌تواند به آن دست یابد را نشان دهد (MacMillan, 2017). در دوره‌های مشاهداتی CONT به علت دوره زمانی

(۳) بررسی تئوری نسبیت: با پردازش سیگنال‌های دریافتی از منابع رادیویی که نزدیک خورشید واقع شده‌اند امکان تعیین متغیر انحراف نور (γ) وجود دارد. این متغیر انحراف فضا را به علت وجود اجرام سنگین بیان می‌کند. با استفاده از داده‌های روش VLBI مقدار $\gamma = 0.9999999999999999$ برای متغیر انحراف نور به‌دست آمده است (Lambert and Le Poncin-Lafitte, 2011).

(۴) تعیین متغیرهای حرکتی صفحات زمین‌ساختی: اگر ایستگاه‌ها روی صفحات زمین‌ساختی مختلفی قرار داشته باشند حرکت نسبی آنها نسبت به یکدیگر می‌تواند با سری زمانی مختصات آنها به‌دست آید. متغیرهای حرکتی ۶ صفحه زمین‌ساختی بزرگ با VLBI بررسی شده است (Jagoda and Rutkowska, 2020).

(۵) اعداد لاو (Love)(l) و شیدا (Shida)(h): این اعداد متغیرهای بدون بعدی هستند که توانایی زمین برای عکس‌العمل در برابر نیروهای جزرومدی را بیان می‌کنند. اگر زمین یک جسم کاملاً صلب بود این اعداد برابر با صفر می‌شدند و هیچ تغییر شکل جزرومدی در سطح زمین رخ نمی‌داد (Špičáková et al., 2009). کراسنو و همکاران (Krásná et al., 2013) از داده‌های ۲۷ سال برای به‌دست آوردن این متغیرها استفاده کردند. روش VLBI همچنین می‌تواند برای صحت‌سنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال نشان داده شده است که مدل کنونی International Earth Rotation and Reference Systems (IERS) Service برای تغییرات فرکانس بالای EOPs نیاز به بروزرسانی دارد (Nilsson et al., 2014).

هودا و همکاران (Huda et al., 2021) در پژوهشی به تأثیر اضافه کردن دو ایستگاه VLBI به شبکه‌های مشاهداتی پرداخته‌اند. در این پژوهش دو ایستگاه که در آینده ساخته خواهند شد با شبیه‌سازی به شبکه‌های مشاهداتی اضافه شدند و تأثیر آن‌ها بر برآورد متغیرهای توجیه زمین و مختصات ایستگاه‌ها بررسی شد. دو آنالیز در این نوشتار انجام شد؛ الف) تأثیر این دو ایستگاه بر دوره مشاهداتی یک ساعته 320-314 IN با تأکید بر برآورد dUT1 به‌دست آمد و دیده شد که این دو ایستگاه تکرارپذیری dUT1 را ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. ب) تأثیر این دو ایستگاه بر دو دوره مشاهداتی ۲۴ ساعته R4934 و AOV049 بررسی شد و این نتیجه به‌دست آمد که در حالت کلی، دو ایستگاه موجود در اندونزی تکرارپذیری متغیرهای توجیه زمین را ۲۰ درصد کاهش می‌دهد؛ همچنین تکرارپذیری مختصات ایستگاه ۱۲ درصد کاهش می‌یابد.

شارتنر و همکاران (Schartner et al., 2020) محل بهینه جهت احداث ایستگاه نسل جدید (VLBI Global Observing System) VGOS برای افزایش دقت متغیرهای توجیه زمین را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که برای بهبود دقت متغیرهای توجیه زمین بهتر است یک ایستگاه در آمریکای جنوبی احداث شود. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که حتی احداث یک ایستگاه در مکانی غیرمشابه نیز منجر به افزایش دقت می‌شود. ایستگاه‌های نسل جدید VGOS کارایی زیادی نسبت به ایستگاه‌های معمولی دارد که از جمله آنها می‌توان به بالا بودن نرخ چرخش، کوچک بودن قطر آنتن‌ها و حساسیت بالا اشاره کرد که در کل منجر به بهبود دقت و افزایش تعداد مشاهدات می‌شود و می‌تواند به راحتی در تعیین چارچوب مرجع زمینی بین‌المللی (ITRF) شرکت کنند.

شونبرگر (Schönberger, 2013) نیز برای تعیین میزان بهبود متغیرهای به‌دست آمده از طریق دوره مشاهداتی CONT11 (Continuous VLBI Campaign 2011) بین حالت تک ایستگاهی و جفت ایستگاهی مقایسه انجام داد و نشان داد که استفاده از دو ایستگاه در یک مکان به جای یک ایستگاه منجر به بهبود دقت متغیرهای به‌دست آمده می‌شود

اولین مرحله تولید فایل برنامه‌ریزی مشاهدات است که این فایل در اختیار ایستگاه مشاهداتی قرار می‌گیرد. دومین مرحله دریافت داده براساس دستورات فایل برنامه‌ریزی مشاهدات است که داده خام تولید می‌شود و ممکن است خطاهای بزرگی داشته باشد که در مرحله پردازش داده‌ها این خطاها از بین می‌روند. در این تحقیق چون ایستگاه اضافه شده به شبکه مشاهداتی وجود خارجی ندارد، فایل برنامه‌ریزی مشاهدات و داده‌ها به صورت شبیه‌سازی شده و نزدیک به واقعیت تولید شده‌اند.

۳-۱- تولید فایل برنامه‌ریزی مشاهدات

فایل برنامه‌ریزی مشاهدات با نرم‌افزار ++VieSched (Schartner and Böhm, 2019) تولید شد. فایل برنامه‌ریزی مشاهدات فایلی است که ایستگاه براساس دستورات موجود در آن مشاهدات خود را انجام می‌دهد و طبق این فایل در یک زمان مشخص به یک منبع رادیویی مشخص نشانه‌روی کرده و سپس داده برداشت می‌کند. این فایل شامل متغیرهای توصیفی سخت‌افزار ثبت‌کننده، متغیرهای توصیفی منبع و متغیرهای توصیف‌کننده نحوه برداشت داده است. برای بهینه‌سازی مشاهدات قید استفاده از زمان آزاد اعمال شده است (Schartner, 2019). استفاده از زمان آزاد باعث افزایش تعداد داده‌ها می‌شود.

برای هر ۱۵ روز دوره مشاهداتی CONT17 یک فایل برنامه‌ریزی تولید شده و هر ایستگاهی که هنگام برداشت داده واقعی در برخی از روزها داده‌ای برداشت نکرده از فایل برنامه‌ریزی مشاهدات حذف شده است. برای شبکه Legacy-1 تمامی ۹۲ منبع رادیویی که در عمل از آنها سیگنال دریافت شده به عنوان لیست منابع برای تولید فایل زمان‌بندی به نرم‌افزار معرفی شده است. در شبکه مشاهداتی Legacy-2 از یک لیست واحد منابع رادیویی استفاده نشده و برای تولید هر کدام از فایل‌های زمان‌بندی، لیست منابعی که در عمل برای هر روز از دوره مشاهداتی استفاده شده به نرم‌افزار معرفی شده است. کاتالوگ موقعیت منابع و همچنین کاتالوگ ویژگی منابع برای هر روز دوره مشاهداتی در وب‌سایت <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/sessions/2017> قابل دسترسی است.

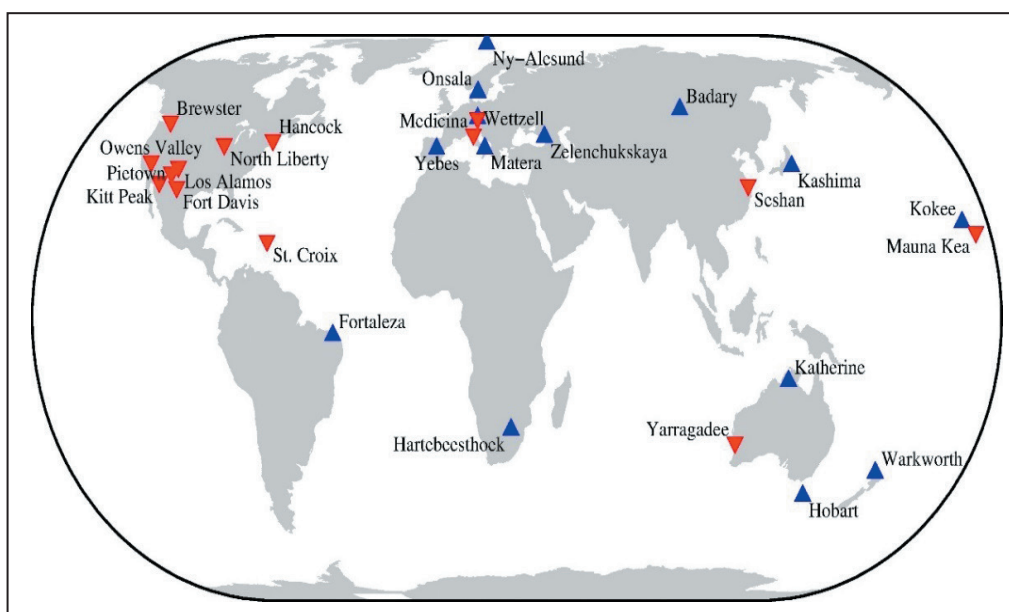
کوتاه برداشت داده‌ها که دو هفته می‌باشد، تأثیرات فصلی اثر کمتری بر داده‌ها می‌گذارند. همچنین در این دوره‌ها به علت استفاده از تجهیزات پیشرفته و بروز، خطای اندازه‌گیری بسیار کمتر از اغلب دوره‌های مشاهداتی دیگر می‌باشد (Gipson et al., 2008).

مزیت دوره مشاهداتی CONT17 نسبت به دیگر دوره‌های مشاهداتی CONT استفاده از سه شبکه مشاهداتی مستقل می‌باشد که امکان بررسی خطاهای مربوط به هندسه شبکه را فراهم می‌کند. این شبکه‌ها عبارتند از دو شبکه مشاهداتی قدیمی که هر کدام شامل ۱۴ ایستگاه می‌باشند (Legacy-1 و Legacy-2) و یک شبکه VGOS که ۶ ایستگاه دارد. در این پژوهش بهبود دقت در شبکه‌های مشاهداتی Legacy-1 و Legacy-2 بررسی شده است. شکل ۵ توزیع جغرافیایی ایستگاه‌های این دو شبکه را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های Legacy-1 به رنگ آبی و ایستگاه‌های Legacy-2 به رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند. برای اطلاع از جزئیات CONT17 می‌توان به بهرند و همکاران (Behrend et al., 2020) مراجعه کرد. در جدول‌های ۱ و ۲ محل استقرار ایستگاه‌های مورد استفاده در شبکه‌های مشاهداتی Legacy-1 و Legacy-2 نمایش داده شده‌اند.

نقاطی که برای احداث ایستگاه VLBI بررسی خواهند شد در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند. ویژگی‌های ایستگاه مصنوعی همانند ویژگی‌های ایستگاه WETT13N که در آلمان واقع است در نظر گرفته شده است. کل منطقه خاورمیانه در یک شبکه چهار در چهار قرار داده شده است. یکی از سلول‌ها به علت آنکه شامل هیچ یک از کشورهای خاورمیانه نمی‌باشد حذف شده است؛ بنابراین ۱۵ نقطه برای احداث ایستگاه بررسی می‌شوند. مرکز سلول‌ها به عنوان محل احداث ایستگاه انتخاب شده‌اند؛ اگر مرکز سلول داخل دریا واقع شده باشد نزدیک‌ترین خشکی به مرکز سلول به عنوان محل احداث ایستگاه انتخاب شده است زیرا احداث ایستگاه در خشکی عملی‌تر از احداث ایستگاه در دریا است.

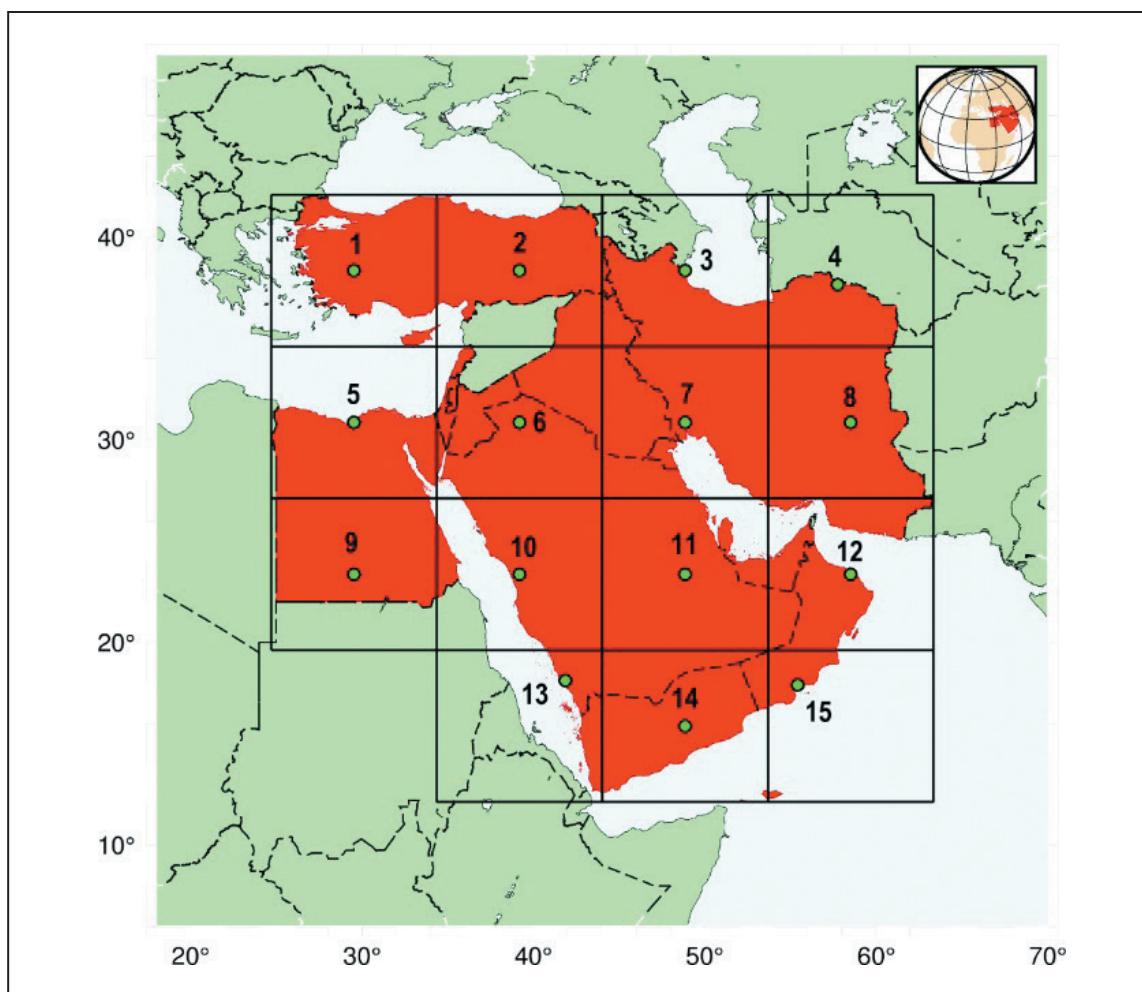
۳- داده‌ها

برای به‌دست آوردن داده‌های روش VLBI به صورت کلی دو مرحله طی می‌شود.



شکل ۵- توزیع جغرافیایی ایستگاه‌های Legacy-1 و Legacy-2. ایستگاه‌های Legacy-1 به رنگ آبی و ایستگاه‌های Legacy-2 به رنگ قرمز می‌باشند (<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont17>).

Figure 5. Geographical distribution of Legacy-1 and Legacy-2 stations. Legacy-1 stations are in blue and Legacy-2 stations are in red (<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont17>).



شکل ۶- ناحیه مورد مطالعه برای احداث ایستگاه مشاهداتی در خاورمیانه. کشورهایی که در منطقه خاورمیانه قرار دارند به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. کل منطقه در یک شبکه چهار در چهار قرار داده شده است. سلول واقع در سمت پایین و چپ تصویر به علت آنکه شامل هیچ یک از کشورهای خاورمیانه نمی‌باشد حذف شده است. نقاط سبز رنگ محل احداث ایستگاه می‌باشند و در صورتی که نقطه وسط سلول داخل دریا واقع شده باشد، نزدیک‌ترین خشکی به مرکز سلول به عنوان محل احداث ایستگاه انتخاب شده است.

Figure 6. The study area for the construction of an observation station in the Middle East. The countries that are located in the Middle East region are shown in red. The entire region is placed in a four-by-four grid. The cell located at the bottom and left side of the image has been removed because it does not contain any of the Middle East countries. The green points are the location of the station, and if the center of the cell is located in the sea, the closest land to the center of the cell is chosen as the location of the station.

جدول ۱- اسامی ایستگاه‌های موجود در شبکه Legacy-1 همراه با شناسه و محل قرارگیری آنها
(<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont17>).

Table 1. The names of the stations in the Legacy-1 network along with their ID and location
(<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont17>).

No	Station name	Station ID	Station location
1	BADARY	Bd	Russia
2	FORTLEZA	Ft	Brazil
3	HART15M	Ht	South Africa
4	HOBART26	Ho	Australia

ادامه جدول ۱-

Continued. Table 1

No	Station name	Station ID	Station location
5	KASHIM11	Kl	Japan
6	KATH12M	Ke	Australia
7	KOKEE	Kk	United States
8	MATERA	Ma	Italy
9	NYALES20	Ny	Norway
10	ONSALA60	On	Sweden
11	WARK12M	Ww	New Zealand
12	WETTZELL	Wz	Germany
13	YEBES40M	Ys	Spain
14	ZELENCHK	Zc	Russia

جدول ۲- اسامی ایستگاه‌های موجود در شبکه Legacy-2 همراه با شناسه و محل قرارگیری آنها
(<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont17>).

Table 2. The names of the stations in the Legacy-2 network along with their ID and location
(<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont17>).

No	Station name	Station id	Station location
1	BR-VLBA	Br	United States
2	FD-VLBA	Fd	United States
3	HN-VLBA	Hn	United States
4	KP-VLBA	Kp	United States
5	LA-VLBA	La	United States
6	MK-VLBA	Mk	United States
7	NL-VLBA	Nl	United States
8	OV-VLBA	Ov	United States
9	PIETOWN	Pt	United States
10	SC-VLBA	Sc	United States
11	MEDICINA	Mc	Italy
12	SESHAN25	Sh	China
13	WETTZ13N	Wn	Germany
14	YARRA12M	Ya	Australia

یک حد پایینی برای زاویه ارتفاعی در نظر گرفت و برای کاهش اثرات خورشیدی حداقل فاصله موج دریافتی از خورشید برابر با ۴ درجه است.

۳-۲- تولید داده‌های شبیه‌سازی شده

برای شبیه‌سازی داده‌ها نیز از نرم‌افزار VieSched ++ استفاده شد. مشاهدات شبیه‌سازی شده با فرض تأثیر گرفتن از سه منبع خطای بسیار مهم تولید شده‌اند. این

منابع رادیویی به این علت اهمیت دارند که اگر منبع رادیویی دارای خطای زیادی باشد می‌تواند منجر به ایجاد خطای چند میلی‌متری در تعیین مختصات ایستگاه شود (Shabala et al., 2015). دیگر تنظیماتی که برای تولید فایل زمان‌بندی اعمال شده‌اند بدین شرح هستند: بیشینه زمان لازم برای چرخش تلسکوپ برابر با ۳۰۰ ثانیه است؛ کمینه زمان لازم برای دریافت داده از منبع رادیویی ۲۰ ثانیه است؛ کمینه زاویه ارتفاعی ۵ درجه است زیرا برای کاهش اثر تروپوسفر بر موج دریافتی همواره باید

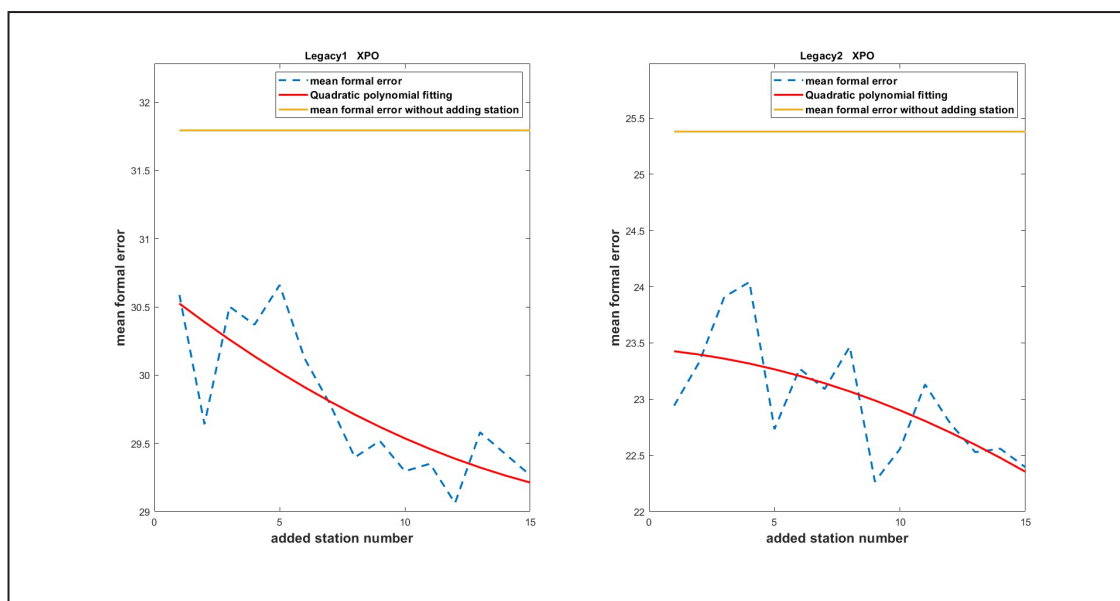
میانگین خطای هر یک از متغیرهای توجیه زمین به شرح زیر است:

(۱) میانگین خطای XPO برای هر دو شبکه Legacy-1 و Legacy-2 در شکل ۷ نمایش داده شده است. خط افقی زرد رنگ بیانگر میانگین خطای XPO در حالتی است که ایستگاه مشاهداتی جدیدی در خاورمیانه به شبکه مشاهداتی اضافه نشده است. همان گونه که دیده می شود با اضافه کردن هر یک از ایستگاه های شماره ۱ تا ۱۵ به هر دو شبکه مشاهداتی Legacy-1 و Legacy-2 میانگین خطای XPO کاهش پیدا کرده است. بیشترین تأثیر بر کاهش خطای XPO در شبکه Legacy-1 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۱۲ و در شبکه Legacy-2 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۹ حاصل می شود که به ترتیب خطا را ۸/۵۹ و ۱۲/۲۶ درصد کاهش می دهند.

سه منبع خطا تأخیر ناشی از بخش تروپوسفر، خطای مربوط به ساعت اتمی ایستگاه و خطای اندازه گیری می باشند (Pany et al., 2011). تأثیر دیگر منابع خطا در قالب خطای اندازه گیری به مشاهدات اعمال می شود. برای خطای اندازه گیری مقدار ۲۰ پیکو ثانیه برای هر دیده در نظر گرفته شده است.

۴- بحث

در این تحقیق به علت نبود وجود داده واقعی از ایستگاه شبیه سازی شده، امکان اعتبارسنجی وجود ندارد اما در شبیه سازی تا حد امکان سعی شده که نتایج به واقعیت نزدیک باشد. بدین صورت که تأثیر تروپوسفر، خطای ساعت و خطای اندازه گیری که در عمل، سه منبع عمده خطا هستند با شبیه سازی به داده تولیدی اعمال شده اند.



شکل ۷- میانگین خطای XPO برای شبکه (A) Legacy-1 و (B) Legacy-2. واحد محور عمودی μas می باشد. خط افقی زرد رنگ میزان خطای XPO در حالتی است که ایستگاهی به شبکه اضافه نشده است. خط چین آبی رنگ میزان خطا بعد از اضافه کردن هر یک از ایستگاه های ۱ تا ۱۵ می باشد. خط قرمز رنگ نیز برازش دو جمله ای به خط چین آبی رنگ است.

Figure 7. Average XPO error for Legacy-1 (A) and Legacy-2 (B) networks. The unit of the vertical axis is μas . The yellow horizontal line is the XPO error value when no station is added to the network. The blue dashed line is the error value after adding each station from 1 to 15. The red line is the quadratic polynomial fit to the blue dashed line.

امکان پذیر نمی باشد زیرا هر متغیر نیازمندی های متفاوتی دارد و در این مورد با وجود افزایش خطای تعیین dUT1 هنگام اضافه کردن برخی ایستگاه ها، خطای دیگر متغیرهای توجیه زمین با اضافه کردن همان ایستگاه ها کاهش می یابد.

(۴) میانگین خطای NUTX برای هر دو شبکه Legacy-1 و Legacy-2 در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. بیشترین تأثیر بر کاهش خطای NUTX در شبکه Legacy-1 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۱۲ و در شبکه Legacy-2 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۹ حاصل می شود که به ترتیب خطا را ۹/۲۴ و ۱۰/۲۶ درصد کاهش می دهند.

(۵) میانگین خطای NUTY برای هر دو شبکه Legacy-1 و Legacy-2 در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. بیشترین تأثیر بر کاهش خطای NUTY در شبکه Legacy-1 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۱۵ و در شبکه Legacy-2 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۹ حاصل می شود که به ترتیب خطا را ۹/۴۴ و ۹/۶۱ درصد کاهش می دهند.

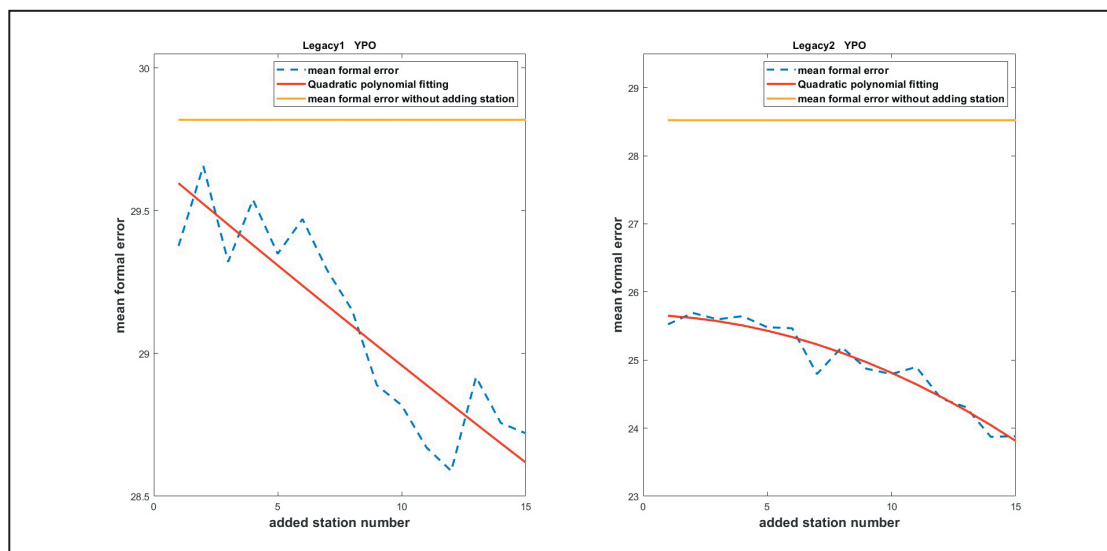
همان گونه که دیده می شود در اکثر موارد هر قدر ایستگاه به خط استوا نزدیک تر می شود، خطا بیشتر کاهش می یابد. بنابراین مناطقی که در بخش های جنوبی خاورمیانه واقع شده اند مستعد احداث ایستگاه VLBI هستند.

(۲) میانگین خطای YPO برای هر دو شبکه Legacy-1 و Legacy-2 در شکل ۸ نمایش داده شده است. بیشترین تأثیر بر کاهش خطای YPO در شبکه Legacy-1 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۱۲ و در شبکه Legacy-2 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۱۴ حاصل می شود که به ترتیب خطا را ۴/۱۲ و ۱۶/۲۹ درصد کاهش می دهند.

(۳) میانگین خطای dUT1 برای هر دو شبکه Legacy-1 و Legacy-2 در شکل ۹ نمایش داده شده است. بیشترین تأثیر بر کاهش خطای dUT1 در شبکه Legacy-1 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۹ و در شبکه Legacy-2 با اضافه کردن ایستگاه شماره ۱ حاصل می شود که به ترتیب خطا را ۳/۵۷ و ۲۴/۵۸ درصد کاهش می دهند. در شبکه Legacy-1 برخی ایستگاه ها هنگامی که به شبکه مشاهداتی اضافه می شوند با وجود بالا بردن تعداد مشاهدات منجر به افزایش خطای برآورد dUT1 می شوند. گاهی اوقات ایستگاه اضافی منجر به برآورد بهتر یک متغیر نمی شود. در این مورد برخی ایستگاه ها منجر به تولید خطوط مبنایی می شوند که اطلاعات بیشتری در مورد dUT1 ارائه نمی دهند. برای برآورد دقیق تر dUT1 بایستی خطوط مبنای طولانی خاوری- باختری به شبکه مشاهداتی اضافه شوند. در ضمن بهبود همه متغیرها همواره

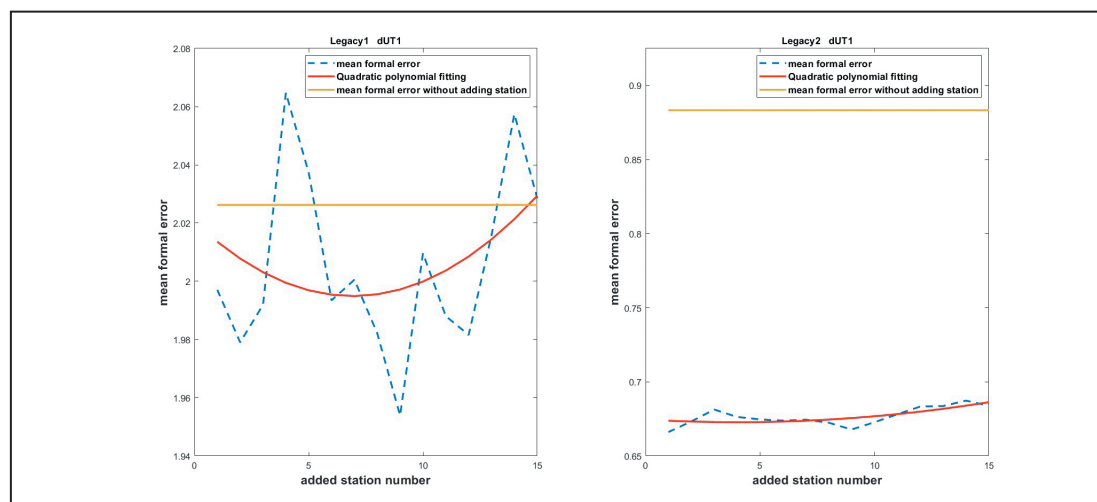
به طور میانگین، خطای تعیین متغیرهای توجیه زمین را ۶/۶۴ درصد کاهش می دهد. همچنین در صورت اضافه شدن ایستگاه شماره ۹ به شبکه مشاهداتی Legacy-2 به طور میانگین، خطای تعیین متغیرهای توجیه زمین ۱۳/۸۶ درصد کاهش می یابد.

برای تعیین ایستگاهی که نسبت به بقیه ایستگاه ها خطای کل متغیرهای توجیه زمین را بیشتر کاهش دهد، میانگین کاهش خطای همه متغیرها معیار قرار داده شده است. بدین ترتیب در صورتی که ایستگاه شماره ۱۲ به شبکه مشاهداتی Legacy-1 اضافه شود



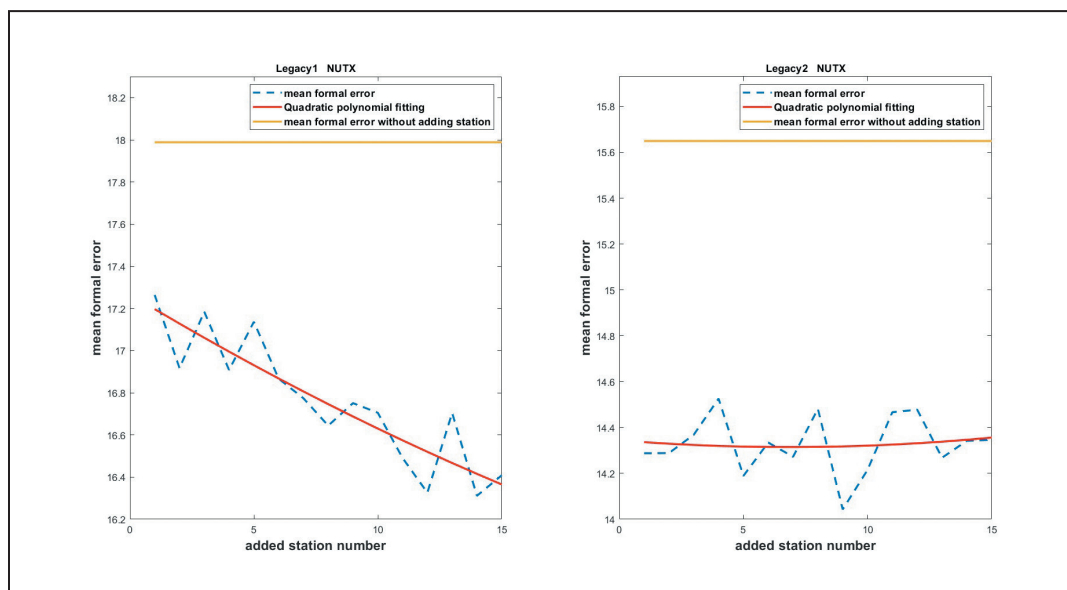
شکل ۸- میانگین خطای YPO برای شبکه Legacy-1 (A) و Legacy-2 (B). واحد محور عمودی μs می باشد. خط افقی زرد رنگ میزان خطای YPO در حالتی است که ایستگاهی به شبکه اضافه نشده است. خط چین آبی رنگ میزان خطا بعد از اضافه کردن هریک از ایستگاه های ۱ تا ۱۵ می باشد. خط قرمز رنگ نیز برازش دوجمله ای به خط چین آبی رنگ است.

Figure 8. Average YPO error for Legacy-1 (A) and Legacy-2 (B) networks. The unit of the vertical axis is μs . The yellow horizontal line is the YPO error value when no station is added to the network. The blue dashed line is the error value after adding each station from 1 to 15. The red line is the quadratic polynomial fit to the blue dashed line.



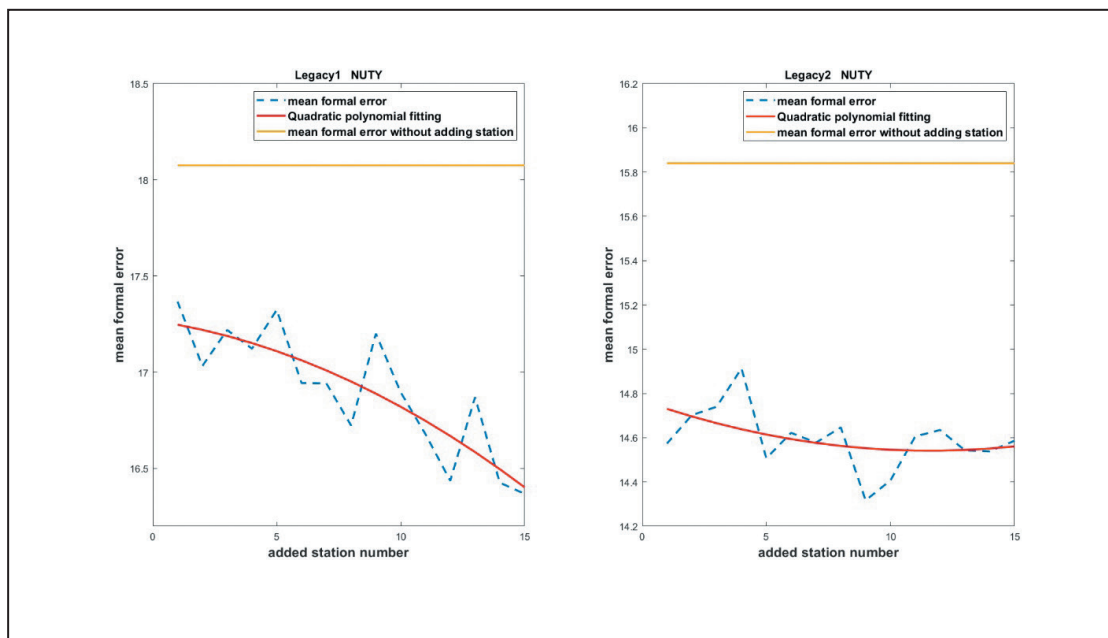
شکل ۹- میانگین خطای dUT1 برای شبکه Legacy-1(A) و Legacy-2(B). واحد محور عمودی μs است. خط افقی زرد رنگ میزان خطای dUT1 در حالتی است که ایستگاهی به شبکه اضافه نشده است. خط چین آبی رنگ میزان خطا بعد از اضافه کردن هریک از ایستگاه های ۱ تا ۱۵ می باشد. خط قرمز رنگ نیز برازش دوجمله ای به خط چین آبی رنگ است.

Figure 9. Average dUT1 error for Legacy-1 (A) and Legacy-2 (B) networks. The unit of the vertical axis is μs . The yellow horizontal line is the error value of dUT1 in the case that no station is added to the network. The blue dashed line is the error value after adding each station from 1 to 15. The red line is the quadratic polynomial fit to the blue dashed line.



شکل ۱۰- میانگین خطای NUTX برای شبکه Legacy-1(A) و Legacy-2(B). واحد محور عمودی μas می‌باشد. خط افقی زرد رنگ میزان خطای NUTX در حالتی است که ایستگاهی به شبکه اضافه نشده است. خط چین آبی رنگ میزان خطا بعد از اضافه کردن هریک از ایستگاه‌های ۱ تا ۱۵ می‌باشد. خط قرمز رنگ نیز برازش دوجمله‌ای به خط چین آبی رنگ است.

Figure 10. Average NUTX error for Legacy-1 (A) and Legacy-2 (B) networks. The unit of the vertical axis is μas . The yellow horizontal line is the NUTX error value when no station is added to the network. The blue dashed line is the error value after adding each station from 1 to 15. The red line is the quadratic polynomial fit to the blue dashed line.



شکل ۱۱- میانگین خطای NUTY برای شبکه Legacy-1(A) و Legacy-2(B). واحد محور عمودی μas می‌باشد. خط افقی زرد رنگ میزان خطای NUTY در حالتی است که ایستگاهی به شبکه اضافه نشده است. خط چین آبی رنگ میزان خطا بعد از اضافه کردن هریک از ایستگاه‌های ۱ تا ۱۵ می‌باشد. خط قرمز رنگ نیز برازش دوجمله‌ای به خط چین آبی رنگ است.

Figure 11. Average NUTY error for Legacy-1 (A) and Legacy-2 (B) networks. The unit of the vertical axis is μas . The yellow horizontal line is the NUTY error value in the case that no station is added to the network. The blue dashed line is the error value after adding each station from 1 to 15. The red line is the quadratic polynomial fit to the blue dashed line.

۵- نتیجه گیری

تعیین متغیرهای توجیه زمین در شبکه مشاهداتی Legacy-2 ۱۳/۸۶ درصد کاهش می یابد. در مطالعات بعدی می توان دامنه مطالعاتی را افزایش داد و به جای خاورمیانه در مناطق دیگری که فاقد ایستگاه VLBI هستند این مطالعات را انجام داد. در نیمکره جنوبی زمین به علت کم بودن تعداد کشورهایی که قادر به پرداخت بودجه برای تأسیس ایستگاه مشاهداتی هستند، کمبود ایستگاه مشاهداتی دیده می شود و می توان به طور ویژه در نیمکره جنوبی مطالعاتی را انجام داد. نحوه برداشت داده توسط ایستگاه مشاهداتی نیز تأثیر زیادی بر دقت نتایج دارد. به عنوان مثال ایستگاهی که نرخ برداشت داده بالاتری دارد می تواند در مدت زمان کوتاهی داده لازم برای پردازش را فراهم کند و با صرفه جویی در زمان می توان مشاهدات بیشتری را به منابع رادیویی مختلف انجام داد. در مطالعات بعدی می توان تأثیر چگونگی برداشت داده بر دقت نتایج را بررسی کرد.

در این نوشتار میزان افزایش دقت با احداث ایستگاه مشاهداتی بررسی شده است. صرف احداث ایستگاه جدید برای افزایش دقت کافی نیست بلکه ایستگاه باید در مکانی احداث شود که سبب بهبود هندسه مشاهداتی شود. برای تعیین مکان بهینه احداث یک ایستگاه مشاهداتی در منطقه خاورمیانه برای بهبود دقت برآورد متغیرهای توجیه زمین در دوره مشاهداتی CONT17؛ تعداد پانزده نقطه بررسی شدند. هر یک از نقاط یک به یک به شبکه های مشاهداتی Legacy-1 و Legacy-2 اضافه شده و سپس میزان بهبود خطای برآورد متغیرهای توجیه زمین بررسی شد. این دو شبکه مشاهداتی در دوره مشاهداتی CONT17 مورد استفاده قرار گرفته اند. نتیجه اصلی پژوهش نشان می دهد که با احداث یک ایستگاه مشاهداتی در عمان، میانگین خطای تعیین متغیرهای توجیه زمین در شبکه مشاهداتی Legacy-1 ۶/۶۴ درصد کاهش می یابد. همچنین با احداث یک ایستگاه مشاهداتی در مصر، میانگین خطای

References

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., and Collilieux, X., 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of geophysical research: solid earth* 121(8), 6109-6131, DOI: 10.1002/2016JB013098.
- Behrend, D., Thomas, C., Gipson, J., Himwich, E., and Le Bail, K., 2020. On the organization of CONT17, *Journal of Geodesy* 94(10), 1-13, DOI: 10.1007/s00190-020-01436-x.
- Fey, A.L., Gordon, D., Jacobs, C.S., Ma, C., Gaume, R.A., Arias, E.F., Bianco, G., Boboltz, D.A., Böckmann, S., Bolotin, S., and Charlot, P., 2015. The second realization of the international celestial reference frame by very long baseline interferometry. *The Astronomical Journal* 150(2), 58, DOI: 10.1088/0004-6256/150/2/58.
- Gipson, J., MacMillan, D., and Petrov, L., 2008. Improved estimation in VLBI through better modeling and analysis. *Measuring the Future, Proceedings of the Fifth IVS*, 157.
- Huda, I.N., Hidayat, T., Dermawan, B., Lambert, S., Liu, N., Leon, S., Fujisawa, K., Yonekura, Y., Sugiyama, K., Hirota, T., and Premadi, P.W., 2021. Measuring the impact of Indonesian antennas on global geodetic VLBI network. *Experimental Astronomy* 52(1), 141-155, DOI: 10.1007/s10686-021-09773-1.
- Jagoda, M., and Rutkowska, M., 2020. Use of VLBI measurement technique for determination of motion parameters of the tectonic plates. *Metrology and Measurement Systems*, 151-165, DOI: 10.24425/mms.2020.131722.
- Krásná, H., Böhm, J., and Schuh, H., 2013. Tidal Love and Shida numbers estimated by geodetic VLBI. *Journal of geodynamics* 70, 21-27, DOI: 10.1016/j.jog.2013.05.001.
- Lambert, S.B. and Le Poncin-Lafitte, C., 2011. Improved determination of γ by VLBI. *Astronomy & Astrophysics* 529, A70, DOI: 10.1051/0004-6361/201016370.
- MacMillan, D.S., 2017. EOP and scale from continuous VLBI observing: CONT campaigns to future VGOS networks. *Journal of Geodesy* 91(7), 819-829, DOI: 10.1007/s00190-017-1003-4.
- 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(5), 491-502, DOI: 10.1007/s00190-014-0700-5.
- Pany, A., Böhm, J., MacMillan, D., Schuh, H., Nilsson, T., and Wresnik, J., 2011. Monte Carlo simulations of the impact of troposphere, clock and measurement errors on the repeatability of VLBI positions. *Journal of Geodesy* 85(1), 39-50, DOI: 10.1007/s00190-010-0415-1.
- Petit, G., and Luzum, B., 2010. IERS conventions. *IERS technical note*, 36(1), 2010.
- Schartner, M., 2019. Optimizing geodetic VLBI schedules with VieSched++. Ph.D. thesis, Univ. of Wien, Austria, 148 p.
- 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), 1-14, DOI: 10.1186/s40623-020-01214-1.
- 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(1002), 084501, DOI: 10.1088/1538-3873/ab1820.
- Schönberger, C., 2013. Simulations of VLBI observations with the Onsala Twin Telescope. M.Sc. thesis, Univ. of Chalmers, Sweden, 46 p, DOI: 20.500.12380/185857.
- Schuh, H., and Böhm, J., 2013. Very long baseline interferometry for geodesy and astrometry. Springer, Berlin, Heidelberg, 339-376, DOI: 10.1007/978-3-642-28000-9_7.
- Shabala, S.S., McCallum, J.N., Plank, L., and Böhm, J., 2015. Simulating the effects of quasar structure on parameters from geodetic VLBI. *Journal of Geodesy* 89(9), 873-886, DOI: 10.1007/s00190-015-0820-6.
- Špičáková, H., Böhm, J., Cervera, P.M., and Schuh, H., 2009. Determination of degree-2 Love and Shida numbers from VLBI. *Marees Terrestres Bulletin D'Informations*, 11679.