

## Investigation of subsidence in the northeastern of Iran by estimating the velocity vector and uncertainty of permanent GPS stations

Ghasemi Khalkhali, S. A.<sup>1</sup>  | Azmoudeh Ardalan, A.<sup>2</sup>  | Karimi, R.<sup>3</sup> 

1. **Corresponding Author**, Department of Surveying Engineering, Faculty of Basic Sciences and Technical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran. E-mail: [sa.ghasemi@iau.ac.ir](mailto:sa.ghasemi@iau.ac.ir)
2. Department of Geodesy and Hydrography, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [ardalan@ut.ac.ir](mailto:ardalan@ut.ac.ir)
3. Department of Geodesy and Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran. E-mail: [karimi@tafreshu.ac.ir](mailto:karimi@tafreshu.ac.ir)

(Received: 18 April 2022, Revised: 10 Aug 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 14 June 2023)

### Summary

This study presents a new estimate for subsidence in the northeast of the country through the time series analysis of 11-year (from the beginning of 2006 till the end of 2016) of 31 stations of the Khorasan network, as part of the Iranian Permanent Geodynamic & GNSS Network (IPGN), located in northeastern Iran. The mentioned estimation is obtained from the velocity vector of network stations in the International Terrestrial Reference Frame of ITRF2014 based on time series analysis in two realms, i.e., deterministic model analysis and stochastic model analysis. The deterministic model analysis is comprised of jump detection, determination of station motion model parameters, the study of station trend, outlier detection, and statistical significance test to check the jumps magnitude. Due to the interdependence of these steps, the related calculations are performed iteratively. Noise analysis includes two phases, namely, spatial filtering and temporal filtering. In the first phase, the Common Mode Error (CME) parameter is calculated using the weighted stacking method and taking into account the data correlation coefficient and stations distance. In the second phase, using the maximum likelihood estimation (MLE) method, the optimal noise model is derived as a combination of white noise and flicker noise. As a result, the reliable velocities of the stations (resulting from a complete analysis of the deterministic model) and their realistic uncertainties (resulting from the selection of optimal stochastic models) are calculated. Based on this study we found that: (1) Each station during the 11-year study period has on average nine jumps, all of which are of non-seismic origin. (2) Including the data from all IPGN stations in spatial filtering, leads to better results and on average reduces the norm of post-fit residual vectors for east, north, and up coordinate components by 30.17%, 29.40%, and 17.90%, respectively. (3) Concerning the temporal filtering, we found that the noise of the up-component is significantly higher than the noise of the horizontal components. (4) Stochastic model analysis showed the realistic uncertainties of the east, north, and up components are 4.33, 4.44, and 3.70 times, respectively, greater than the uncertainties which are derived without application of stochastic modeling (optimistic uncertainties). (5) The vertical velocity of most of stations was found to be in the normal range of -5 to 5 mm/yr. (6) Five stations, namely, GOLM, GRGN, NFRD, NISH, and SHRN are having anomalous subsidence (up to 9 mm/yr). (7) The proximity of the three stations GOLM, NFRD, and NISH allows us to infer a regional subsidence for the area of their location. (8) The station GRGN, in addition to anomalous subsidence, shows distinctive features such as the nonlinear trend as well as large periodic signals in the up component of the station. Therefore, to find the reason for such vertical behavior of the earth's crust more permanent GNSS stations must be established in that area. (9) The estimated parameters of periodic signal of the stations demonstrate that the annual and draconitic year signals have the largest amplitudes in the three coordinate components. In addition, amplitude of the periodic signals of the up component is significantly larger than the other components.

**Keywords:** Subsidence, Time series Analysis, Northeastern of Iran, Spatial Filtering, Jump detection.

**Cite this article:** Ghasemi Khalkhali, S. A., Azmoudeh Ardalan, A., & Karimi, R. (2023). Investigation of subsidence in the northeastern of Iran by estimating the velocity vector and uncertainty of permanent GPS stations. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(1), 35-51. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.341404.1007418>



## بررسی فرونشست شمال شرق ایران از طریق برآورد بردار سرعت و عدم قطعیت ایستگاه‌های دائمی GPS

سیدامین قاسمی خالخالی<sup>۱</sup> | علیرضا آزموده اردلان<sup>۲</sup> | روح‌اله کریمی<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران. رایانامه: [sa.ghasemi@iau.ac.ir](mailto:sa.ghasemi@iau.ac.ir)

۲. گروه ژئودزی و هیدروگرافی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [ardalan@ut.ac.ir](mailto:ardalan@ut.ac.ir)

۳. گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران. رایانامه: [karimi@tafreshu.ac.ir](mailto:karimi@tafreshu.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۱/۵/۱۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۳/۲۴)

### چکیده

این پژوهش ارائه دهنده برآوردی جدید برای فرونشست شمال شرق ایران از طریق آنالیز سری‌های زمانی ۳۱ ایستگاه GPS شبکه خراسان به‌عنوان بخشی از شبکه ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک و GNSS ایران (IPGN) واقع در شمال شرق ایران از ابتدای سال ۲۰۰۶ تا پایان سال ۲۰۱۶ است. برآورد یاد شده، حاصل از بردار سرعت ایستگاه‌های شبکه در چارچوب ITRF2014 بر مبنای آنالیز سری زمانی در دو بخش مدل تابعی و مدل تصادفی است. آنالیز مدل تابعی طی مراحل کشف پرش‌ها، تعیین مدل حرکت، کشف اشتباهات و آزمون آماری در قالب یک فرآیند تکرار انجام شده است. در آنالیز مدل تصادفی، همبستگی مکانی به روش پشت‌سازای وزن‌دار و همبستگی زمانی به روش برآورد ماکزیمم درست‌نمایی (MLE) و در نظر گرفتن مدل نویزی ترکیب نویز سفید و نویز فلیکر بررسی می‌شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که: (۱) هر یک از ایستگاه‌های این شبکه در بازه زمانی ۱۱ ساله به‌طور متوسط دارای ۹ پرش غیر لرزه‌ای بوده‌اند. (۲) فیلترینگ مکانی، میانگین نرم بردار باقیمانده‌های مؤلفه‌های شرقی، شمالی و قائم را به ترتیب ۳۰/۱۷، ۲۹/۴۰ و ۱۷/۹۰ درصد کاهش می‌دهد. (۳) پنج ایستگاه GERM، GRGN، NFRD و SHRN دارای فرونشست غیرطبیعی بوده و سه ایستگاه GERM، NFRD و SHRN که به یکدیگر نزدیک‌اند نشان از یک فرونشست منطقه‌ای دارند. (۴) در ایستگاه GRGN علاوه بر فرونشست زیاد، حرکت شتاب‌دار و سیگنال‌های پریودیک بزرگ نیز در مؤلفه قائم ایستگاه مشاهده شده و لذا لازم است برای آگاهی از علت این رفتار ارتفاعی پوسته زمین، در محدوده این ایستگاه داده‌های بیشتری از طریق نصب ایستگاه‌های دائمی جدید، جمع‌آوری شود.

واژه‌های کلیدی: فرونشست، آنالیز سری‌های زمانی، شمال شرق ایران، فیلترینگ مکانی، کشف پرش.

### ۱. مقدمه

(هاموند و همکاران، ۲۰۲۱؛ ریدل، ۲۰۲۱) و موارد دیگر به کار می‌رود.

در این تحقیق برای آنالیز سری‌های زمانی دو بخش آنالیز مدل تابعی و آنالیز مدل تصادفی یا همان آنالیز نویز در نظر گرفته شده‌است. منظور از آنالیز مدل تابعی تعیین مناسب‌ترین مدل ریاضی برای بیان حرکت ایستگاه است. در مناطق لرزه‌خیز، این مدل حرکت از چهار بخش روند عمومی حرکت، پرش‌ها، سیگنال‌های پریودیک و مدل‌های تغییر شکل پس‌لرزه‌ای (Post-Seismic PSD)

یکی از تکنیک‌های مشاهداتی ژئودزی، اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های دائمی سیستم‌های ماهواره‌ای بوده که پردازش این مشاهدات منجر به تولید سری‌های زمانی مختصات ایستگاه‌ها می‌شود. نتایج آنالیز این سری‌های زمانی در مطالعه تغییر شکل‌های پوسته‌ای، حرکت صفحات تکتونیکی (گراهام و همکاران، ۲۰۱۸)، فرآیندهای شکل‌گیری زلزله (تویتا، ۲۰۱۶)، بازگشت ارتجاعی پوسته پس از عصر یخبندان (Postglacial Rebound) (بوگاس و همکاران، ۲۰۱۹)، نرخ بالابردگی و فرونشست پوسته

استناد: قاسمی خالخالی، سیدامین؛ آزموده اردلان، علیرضا و کریمی، روح‌اله (۱۴۰۲). بررسی فرونشست شمال شرق ایران از طریق برآورد بردار سرعت و عدم قطعیت ایستگاه‌های

دائمی GPS. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۱)، ۳۵-۵۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.341404.1007418>

مورد استفاده قرار داده‌اند.

بردار سرعت ایستگاه‌های دائمی و عدم قطعیت‌های آن‌ها، به‌ویژه در مؤلفه قائم، نسبت به آنالیز سری‌های زمانی در هر دو بخش تابعی و تصادفی حساس هستند (بوگاس و همکاران، ۲۰۱۹). می‌توان چالش پیش روی این آنالیز را دستیابی به دقت بالا در مؤلفه قائم مختصات ایستگاه‌ها دانست؛ زیرا بسیاری از منابع خطا، اثر خود را در این مؤلفه نشان داده و مختصات قائم ایستگاه‌های GPS تحت تأثیر اثرات سیستماتیک هستند؛ بنابراین نارایی و ناسازگاری در چارچوب مرجع و مدار ماهواره‌ها و اثرات مربوط به استراتژی پردازش داده‌ها تأثیر خود را در این مؤلفه مختصاتی بیشتر نشان داده و باعث می‌شود که سطح نویز این مؤلفه افزایش یابد (تفرله و همکاران، ۲۰۰۸). روند عمومی در مؤلفه قائم می‌تواند به دو حرکت خطی و غیرخطی تقسیم‌شده که روند غیرخطی بیشتر در مقیاس‌های کوچک رخ داده و بنابراین مدل‌سازی آن دشوار است (وربلا و همکاران، ۲۰۲۲). بالاآمدگی پوسته بیشتر ناشی از بازگشت ارتجاعی پوسته پس از عصر یخبندان بوده و در مناطق شمالی کره زمین نظیر منطقه گرینلند و اسکاندیناوی رخ می‌دهد (آن و همکاران، ۲۰۲۱). از طرفی فرونشست زمین در مناطق ساحلی به افزایش نسبی سطح دریا کمک کرده و خطرات سیل را تشدید می‌کند (شیرزایی و همکاران، ۲۰۲۱).

مطالعات زیادی در مورد نتایج مشاهدات ایستگاه‌های GPS در ایران (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ خرمی و همکاران، ۲۰۱۹) و به‌ویژه منطقه شمال شرق (موسوی و همکاران، ۲۰۱۳؛ والپرسدورف و همکاران، ۲۰۱۴) صورت گرفته است. بیشتر این مطالعات حاصل مشاهدات کمپینی و بازه‌های مشاهداتی کوتاه‌مدت بوده و بردارهای سرعت نسبت به یک صفحه تکنونیک (صفحه اوراسیا) و با استفاده از نرم‌افزارهای پردازش داده‌های GPS (بدون آنالیز سری‌های زمانی) به‌دست آمده است. همچنین در زمینه بررسی تغییرات ارتفاعی پوسته مطالعاتی بر اساس آنالیز داده‌های تداخل‌سنجی رادار دریچه مصنوعی

(Deformation) تشکیل شده است. روند عمومی ایستگاه خطی است و تنها در مناطقی محدود می‌توان روندی غیرخطی را مشاهده کرد (بویس و براون، ۲۰۱۴). پرش‌های دستگاهی ناشی از تغییر تجهیزات و یا از کارافتادگی آن‌ها و پرش‌های لرزه‌ای ناشی از وقوع زلزله‌های بزرگ در مجاورت ایستگاه هستند (برونی و همکاران، ۲۰۱۴؛ امیری سیمکویی و همکاران، ۲۰۱۹). در آنالیز سری‌های زمانی ایستگاه‌های دائمی سیگنال‌های سالیانه و نیم‌سالانه (کلوز و همکاران، ۲۰۱۸a؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۱۸)، سیگنال سال دراکونیتیک (Draconitic Year) سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) (بوگاس و کلوز، ۲۰۱۶)، سیگنال حرکت قطبی چندلر (امیری سیمکویی و همکاران، ۲۰۱۷؛ کلوز و همکاران، ۲۰۱۸b) و سیگنال ربع‌سالانه (بوگاس و کلوز، ۲۰۱۶) مشاهده شده است.

آنالیز نویز، معمولاً برای بررسی همبستگی‌های مکانی (ودوینسکی و همکاران، ۱۹۹۷؛ نیکولایدیس، ۲۰۰۴) و زمانی (مائو و همکاران، ۱۹۹۹) بین داده‌ها صورت می‌گیرد. در بررسی همبستگی مکانی از دو روش پشته‌سازی (Stacking Method) (ژیانگ و همکاران، ۲۰۱۸) و تابع متعامد تجربی EOF (Empirical Orthogonal Function Method) (تفرله و همکاران، ۲۰۰۸) استفاده شده و برای حذف همبستگی مکانی بین ایستگاه‌ها، پارامتر خطای حالت مشترک CME (Common Mode Error) محاسبه می‌شود. همبستگی زمانی بین داده‌ها می‌تواند در دو حوزه فرکانس و زمان مورد مطالعه قرار گیرد. در حوزه فرکانس از فرآیند قانون توان و در حوزه زمان می‌توان از توابعی نظیر تابع خودهمبستگی استفاده کرد (برزقی و برقی، ۲۰۱۸). در حوزه فرکانس، محققین روش برآورد ماکزیمم درستمایی (MLE) Maximum Likelihood Estimation) (سانتاماریا گومز و همکاران، ۲۰۱۱) و نیز روش برآورد مؤلفه‌های واریانس (Variance Component Estimation) (امیری سیمکویی، ۲۰۱۶) را

۲۰۱۳). گازاکس و همکاران (۲۰۱۳) فرض بر آن دارند که در صورت کشف پرش در یک مؤلفه باید آن را در تمام مؤلفه‌ها در نظر گرفت. در نقطه مقابل، برونی و همکاران (۲۰۱۴) پرش‌های کشف شده در یک مؤلفه را تنها در آن مؤلفه در نظر گرفته‌اند. برخی محققین بعد از یافتن دامنه پرش‌ها، اقدام به انجام آزمون آماری با هدف ارزیابی دامنه پرش‌ها کرده‌اند (برقی و همکاران، ۲۰۰۹). سیگنال‌های پرئودیک ناشی از پدیده‌های ژئوفیزیکی و یا خطاهای سیستماتیک هستند. رای و همکاران (۲۰۰۸) دریافتند که سیگنال دراکنیتیک در سایر مشاهدات ماهواره‌ای وجود نداشته و محدود به مشاهدات GPS است. بوگاس و کلوز (۲۰۱۶) سیگنال‌های پرئودیک داده‌های GPS را به سه گروه ترئوپیکال، دراکنیتیک و چندلر تقسیم کردند. افزایش تعداد سیگنال‌ها باعث کاهش همبستگی و جابجایی شاخص طیفی به سمت صفر می‌شود (بوگاس و کلوز، ۲۰۱۶).

سری‌های زمانی مختصات ایستگاه‌های دائمی دارای وابستگی زمانی و مکانی بوده و استقلال آن‌ها از پارامتر زمان غیرواقعی است (تفرله و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر اثرات فصلی، همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های شبکه باعث ایجاد CME شده (لی و همکاران، ۲۰۱۹) که این خطا در شبکه‌های منطقه‌ای وجود دارد (گروزینسکی و همکاران، ۲۰۱۸). یکی از روش‌های حذف CME روش پشته‌سازی بوده که به چند حالت ساده (ودوینسکی و همکاران، ۱۹۹۷)، وزن‌دار (بوگاس و همکاران، ۲۰۱۵) و وزن‌دار با همبستگی (ژو و همکاران، ۲۰۱۷) انجام می‌شود. روش پشته‌سازی مخصوص شبکه‌های منطقه‌ای بوده و در شبکه‌های جهانی کاربرد ندارد (ژیانگ و همکاران، ۲۰۱۸). طبق تحقیقات بوگاس و همکاران (بوگاس و همکاران، ۲۰۱۵)، این روش در استخراج CME روش بهینه بوده و پیچیدگی زیادی نداشته و نسبت به روش‌های پیشرفته نتایج مشابهی دارد. هی و همکاران (۲۰۱۵) نشان داده‌اند که در یک شبکه گسترده، پارامتر CME همگن نبوده و روش فیلترینگ مکانی بلوکی را

( Interferometric Synthetic Aperture ) InSAR Radar انجام شده است. در این پژوهش از داده‌های یک بازه زمانی نسبتاً طولانی استفاده شده که مشاهدات آن حاصل ایستگاه‌های دائمی هستند. به علاوه در این تحقیق یک آنالیز کامل سری زمانی با انتخاب روش‌ها و توابع مناسب انجام و بردار سرعت قابل اطمینان ایستگاه‌ها در چارچوب مرجع زمینی بین‌المللی ( International Terrestrial Reference Frame ) ITRF حاصل شده است. نهایتاً نتایج حاصل برای مؤلفه قائم این بردارها مبنای بیان میزان بالآآمدگی و یا فرونشست پوسته در ایستگاه‌های دائمی شبکه خراسان قرار گرفته است.

لازم به ذکر است که تعیین بردار سرعت می‌تواند به دو روش انجام شود. در روش اول، که روش دینامیکی است، از اطلاعات ژئودینامیکی استفاده شده و از نیروها و عوامل ایجاد تغییر شکل پوسته برای تعیین بردار سرعت استفاده می‌شود. در روش دوم، که روش کینماتیکی است، مختصات ایستگاه در دوره‌های (اپوک) مختلف اندازه‌گیری شده و حرکت ایستگاه صرف‌نظر از عامل ایجاد آن مدل‌سازی می‌شود. از آنجایی که سری زمانی مختصات روزانه ایستگاه‌های IPGN در دسترس است، بنابراین در این پژوهش از روش کینماتیکی برای تعیین بردار سرعت استفاده شده است.

## ۲. پیشینه تحقیق

آنالیز مدل تابعی شامل مراحل نظیر کشف پرش‌ها، تعیین مدل حرکت ایستگاه و کشف اشتباه است. بويس و براون (۲۰۱۴) برای روند عمومی حرکت ایستگاه یک معادله چندجمله‌ای در نظر گرفتند. وجود اشتباه، خصوصیات سری‌های زمانی را تحت تأثیر قرار داده و باعث اربب شدن مدل نويز می‌شود (هی و همکاران، ۲۰۱۷). طبق اطلاعات سوپک SOPAC ( Scripps Orbit and Permanent Array Center ) حدود یک‌سوم پرش‌ها دلایل نامعلوم داشته و با روش‌های پیش‌پردازش و یا پس‌پردازش قابل کشف هستند (گازاکس و همکاران،

یکی از آن‌هاست. بر اساس این پژوهش، در سال ۲۰۰۴ در محدوده شهرهای مشهد و کاشمر فرونشست پوسته رخ داده است. همچنین میزان فرونشست در نیشابور (دهقانی و همکاران، ۲۰۰۹)، مشهد (خرمی و همکاران، ۲۰۲۰) و گرگان (تورانی و همکاران، ۲۰۲۱) نیز بررسی شده است که در اغلب این پژوهش‌ها از داده‌های InSAR استفاده شده است. دهقانی و همکاران (۲۰۰۹) فرونشست بیش از ۱۰ سانتیمتر در سال در بازه زمانی سال ۲۰۰۴ الی ۲۰۰۵ در محدوده نیشابور را شناسایی کرده‌اند. همچنین بر اساس نتایج تورانی و همکاران (۲۰۲۱) یک منطقه فرونشست در شمال شهر گرگان در بازه زمانی سال ۲۰۰۷ الی ۲۰۰۹ مشاهده شده که توأم با افت سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه بوده است.

### ۳. روش تحقیق

در این تحقیق از آنجائی که اطلاعات اولیه در مورد زمان تغییر تجهیزات در دسترس نبوده و اثر زلزله‌های بزرگ بر ایستگاه‌ها نامشخص بود، برای شناسایی دوره‌های وقوع پرش، یک مرحله پیش‌پردازش اجرا شد. در هر اپوک و برای هر مؤلفه مختصاتی، دو پنجره از داده‌های قبل و بعد از آن در نظر گرفته شده و به هر یک از آن‌ها یک مدل خطی به روش کمترین مربعات وزن‌دار WLS (Weighted Least Squares) برازش داده شد. با تعیین این مدل‌ها، دو مقدار محاسباتی برای اپوک موردنظر برآورد و این مقادیر با مقدار مشاهداتی آن اپوک مقایسه و بیشترین اختلاف آن‌ها در نظر گرفته شد. در هر اپوک، در صورت بیشترین بودن اختلاف از سه برابر انحراف استاندارد، آن اپوک کاندیدای وجود پرش فرض شد.

پس از تعیین دوره‌های با احتمال وقوع پرش، می‌توان مدل حرکت ایستگاه را ارائه کرد. برای مدل حرکت هر ایستگاه دائمی در هر مؤلفه مختصاتی مانند  $y$  و بر حسب زمان  $t$  از رابطه زیر استفاده شد:

پیشنهاد کرده‌اند. مسئله دیگر در فیلترینگ مکانی، انتخاب تعدادی ایستگاه منتخب از بین ایستگاه‌های موجود برای تعیین CME بوده که معیارهای متعددی توسط محققین پیشنهاد شده است (ژو و همکاران، ۲۰۱۷؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۱۸). نويز موجود در هر مؤلفه  $t$  داده‌های GPS را می‌توان به صورت ذیل بیان کرد (ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۴):

$$P_1(f) = P_0 \left( \frac{f}{f_0} \right)^k \quad (1)$$

که در آن  $f$  فرکانس زمانی،  $P_0$  و  $f_0$  ضرایب نرمال شده و  $k$  شاخص طیفی است. به ازای شاخص‌های طیفی مختلف انواع نویزهای سفید ( $k = 0$ )، فلیکر ( $k = -1$ ) و قدم تصادفی ( $k = -2$ ) تعریف می‌شود. می‌توان نویز را به دو گروه نویز سفید و نویز رنگی ( $k \neq 0$ ) تقسیم کرد که نویز رنگی منجر به جایگزینی عدم قطعیت‌های واقعی با مقادیر خوش‌بینانه آن می‌شود (کلوز و همکاران، ۲۰۱۸b).

بسیاری از محققین در فیلترینگ زمانی از روش MLE استفاده کرده‌اند (مائو و همکاران، ۱۹۹۹؛ ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۴) که در آن، بهترین مدل نویزی با ماکزیمم کردن لگاریتم طبیعی تابع چگالی احتمال متغیر نرمال حاصل می‌شود (تفرله و همکاران، ۲۰۰۸) طبق تحقیقات انجام شده در مورد مدل نویزی داده‌های GPS، مناسب‌ترین مدل ترکیب نویز سفید و نویز فلیکر است (نیکولاییدیس، ۲۰۰۴؛ بیرهانو و همکاران، ۲۰۱۸). در مواردی هم که شاخص طیفی مجهول در نظر گرفته شده مقدار آن نزدیک به نویز فلیکر ( $k = -1$ ) برآورد شده است (تفرله و همکاران، ۲۰۰۸؛ سانتاماریا گومز و همکاران، ۲۰۱۱؛ بوگاس و همکاران، ۲۰۱۶).

در زمینه بررسی پدیده فرونشست در منطقه شمال شرق کشور، مطالعات مختلفی انجام شده که بیشتر آن‌ها بر اساس آنالیز داده‌های InSAR است. معتق و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی داده‌های InSAR و نیز داده‌های مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی، مناطق دارای فرونشست در ایران را شناسایی کردند، که محدوده شمال شرق کشور

صورت معنادار بودن نرم این بردار ( $\|g_j\|$ )، می توان گفت که پرش موردنظر یک پرش واقعی است. برای انجام فیلترینگ مکانی و محاسبه پارامتر CME به روش پشته سازی وزن دار، از میانگین وزن دار باقیمانده های برآورد شده تعدادی از ایستگاه های منتخب شبکه استفاده شد. پارامتر CME برای ایستگاه شماره  $i$  و در دوره  $t$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$CME(i, t) = \frac{\sum_{j=1}^s \hat{r}_j(t) W(\hat{r}_j(t))}{\sum_{j=1}^s W(\hat{r}_j(t))} \quad (3)$$

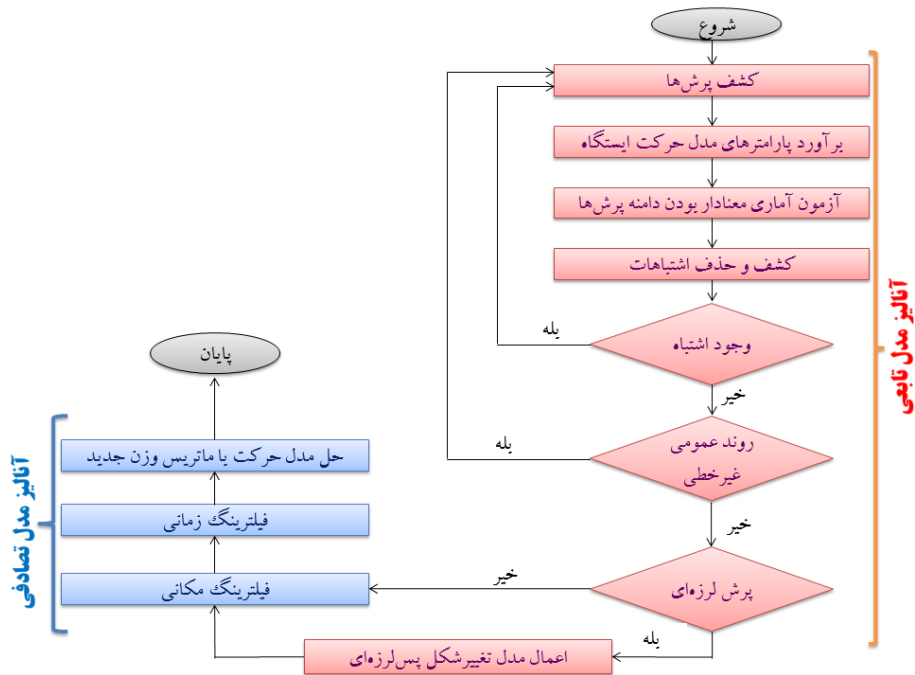
که در آن  $\hat{r}_j(t)$  باقیمانده برآورد شده ایستگاه شماره  $j$  در دوره  $t$ ،  $W$  پارامتر وزنی و  $s$  تعداد ایستگاه های منتخب برای محاسبه CME است. به این ترتیب برای هر مؤلفه و در هر ایستگاه بردار CME محاسبه شده که با حذف اثر آن از روی باقیمانده ها، بردار باقیمانده های فیلتر شده محاسبه می شود. بر اساس روش MLE، برای مطالعه نویز موجود در داده ها، بهترین مدل نویزی با ماکزیمم کردن تابع لگاریتم طبیعی ذیل حاصل می شود:

$$MLE = \ln[lik(\hat{r}_f, C)] = -\frac{1}{2} [\ln(\det C) + \hat{r}_f^T C^{-1} \hat{r}_f + n \ln(2\pi)] \quad (4)$$

که در آن  $\ln$  لگاریتم طبیعی،  $\hat{r}_f$  بردار باقیمانده های برآورد شده،  $C$  ماتریس کوواریانس و  $\det$  دترمینان ماتریس است. اگر مدل نویز را ترکیب نویز سفید و رنگی در نظر بگیریم ماتریس  $C$  به فرم  $C = a^2 I + b_k^2 J_k$  در آمده (ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۴) که ضرایب  $a$  و  $b_k$  به ترتیب دامنه نویزهای سفید و رنگی و  $I$  و  $J_k$  ماتریس کوواریانس آن ها هستند. در اینجا مدل نویز بهینه به صورت ترکیب نویز سفید و نویز فلیکر در نظر گرفته شد که ماتریس کوواریانس آن به صورت  $C = a^2 I + b_{-1}^2 J_{-1}$  است.  $a$  و  $b_{-1}$  ضرایب مجهول هستند. در مرحله پایانی، پارامترهای مجهول مدل حرکت ایستگاه و عدم قطعیت واقعی آن ها محاسبه شد. شکل ۱ فلوجارت مربوط به مراحل مختلف آنالیز سری های زمانی را نشان می دهد.

$$y(t) = y_0 + v_y t + \text{nonlinear trend} + \sum_{j=1}^{n_j} g_j H(t - t_{g_j}) + \sum_{p=1}^{n_p} [s_p \sin(\omega_p t) + c_p \cos(\omega_p t)] + \text{post seismic deformation} + r(t) \quad (2)$$

که در آن  $y_0$  مقدار اولیه،  $v_y$  سرعت ثابت،  $H$  تابع هوی ساید،  $g_j$  دامنه پرش شماره  $j$ ،  $t_{g_j}$  دوره وقوع پرش شماره  $j$  و  $n_j$  تعداد پرش ها است.  $s_p$  و  $c_p$  ضرایب جملات سینوسی و کسینوسی سیگنال پریودیک شماره  $p$  با فرکانس زاویه ای  $\omega_p$ ، کمیت  $n_p$  تعداد سیگنال های پریودیک و  $r(t)$  باقیمانده است. سطر اول معادله (۳) روند عمومی حرکت ایستگاه را بیان کرده که برای بررسی وجود روند غیرخطی انواع توابع ریاضی شامل چندجمله ای، لگاریتمی و نمایی و یا ترکیب آن ها در نظر گرفته شده است. سطر دوم رابطه (۲) بیانگر اثر پرش ها در مدل حرکت بوده که تعداد پرش ها ( $n_j$ ) و زمان وقوع آن ها ( $t_{g_j}$ ) در مرحله پیش پردازش به دست آمده است. سطر سوم رابطه (۲) بیانگر اثر سیگنال های پریودیک بوده که در مورد سیگنال های انتخابی باید دارای دامنه قابل قبولی بوده و تعداد آن ها با مدل نویزی همخوانی داشته باشد. برای کشف اشتباه از باقیمانده های برآورد شده استفاده می شود (هی و همکاران، ۲۰۱۷؛ بوگاس و همکاران، ۲۰۱۹). از آنجا که مراحل آنالیز تابعی یکدیگر را تحت تأثیر قرار می دهند بنابراین مراحل نیازمند تکرار بوده و هر تکرار شامل چهار مرحله کشف پرش ها، برآورد پارامترهای مدل حرکت، بررسی روند عمومی ایستگاه، کشف اشتباهات و آزمون آماری معنادار بودن دامنه پرش ها است (خالخالی و همکاران، ۲۰۲۱). برای تفکیک پرش های واقعی و کاذب، از آزمون آماری معنادار بودن دامنه پرش ها استفاده شد که در هر دوره دارای پرش، یک بردار پرش  $g_j$  شامل دامنه پرش در سه مؤلفه مختصات شرقی، شمالی و قائم تعریف می شود. در



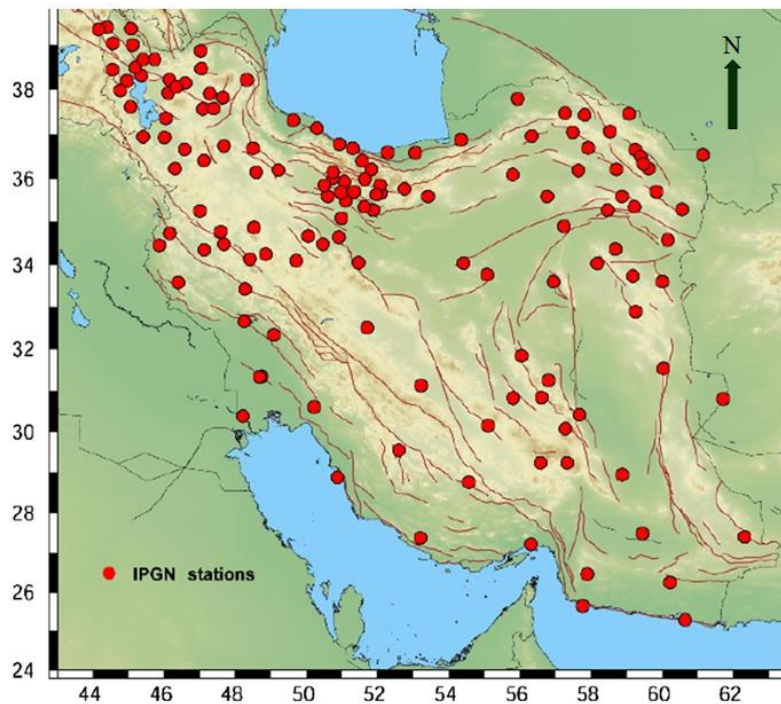
شکل ۱. فلوچارت مراحل آنالیز سری‌های زمانی روزانه ایستگاه‌های GPS به تفکیک مراحل (مرحله آنالیز مدل تابعی و مرحله آنالیز مدل تصادفی).

۴. داده‌های پژوهش (Permanent Geodynamic & GNSS Network) بوده

ایستگاه‌های این پژوهش بخشی از شبکه ایستگاه‌های

که در سال ۱۳۸۳ طراحی و ایجاد شده‌اند. شکل ۲ پراکندگی ایستگاه‌های کل این شبکه را نشان می‌دهد.

دائمی ژئودینامیک و GNSS ایران (IPGN Iranian)



شکل ۲. پراکندگی ایستگاه‌های IPGN (برگرفته از وب سایت سازمان نقشه برداری کشور).

۵۰ درصد هستند سایر ایستگاه‌ها از تراکم داده بالایی برخوردار بوده و تعداد روزهای فاقد داده آن‌ها به‌طور متوسط ۳۲۸ روز است.

#### ۵-۱. نتایج آنالیز مدل تابعی

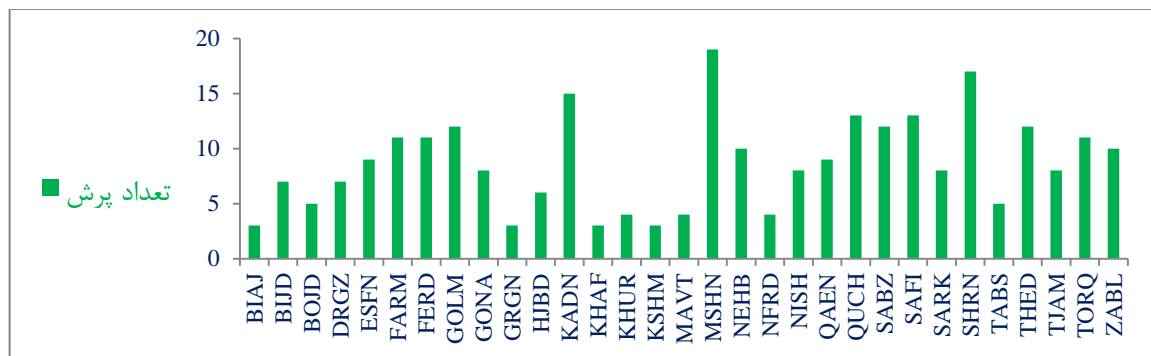
مراحل ذکر شده برای پیش‌پردازش مشاهدات و نیز آنالیز مدل تابعی بر روی ۳۱ ایستگاه شبکه خراسان صورت گرفت و مشخص شد که بیشترین اشتباه در ایستگاه‌های SHRN با ۳۰۹ و KADN با ۲۳۴ اشتباه بوده و متوسط اشتباهات ایستگاه‌ها ۱۱۶ اشتباه است. به علاوه دو استراتژی یک‌مولفه‌ای و سه‌مولفه‌ای (خالخالی و همکاران، ۲۰۲۱) در مرحله پیش‌پردازش (کشف پرش‌ها) نتایج مشابهی را در پی داشت. شکل ۳ نمودار تعداد پرش‌های کشف شده در ایستگاه‌های شبکه خراسان در استراتژی سه‌مولفه‌ای را نمایش می‌دهد.

مطابق شکل ۳ بیشترین پرش در ایستگاه‌های MSHN با ۱۹ پرش و SHRN با ۱۷ پرش و کمترین پرش در ایستگاه‌های BIAJ، GRGN، KHAF و KSHM با سه پرش است. هر ایستگاه به‌طور متوسط دارای ۹ پرش در بازه مشاهداتی ۱۱ ساله است. یک روند عمومی غیرخطی در مؤلفه قائم ایستگاه GRGN مشاهده شده که معادله آن به صورت تابع چندجمله‌ای درجه چهار برآورد شد. همچنین بررسی انجام شده نشان داد که تعداد ۲۱ زلزله با دامنه بزرگ‌تر از پنج در این منطقه رخ داده که در زمان وقوع آن‌ها هیچ پرشی کشف نشده و تمامی ایستگاه‌ها فاقد پرش لرزه‌ای هستند.

این شبکه شامل شش شبکه محلی آذربایجان، تهران، خراسان، خوزستان، هرمزگان و همدان بوده که سه مورد اول از تراکم ایستگاه بالاتری برخوردارند. داده‌های این پژوهش سری‌های زمانی مختصات روزانه ۳۱ ایستگاه دائمی IPGN در شبکه خراسان است. این شبکه در شمال شرق ایران و شامل استان‌های خراسان شمالی، خراسان رضوی، خراسان جنوبی، گلستان و بخش‌هایی از استان‌های سمنان، اصفهان، یزد و سیستان و بلوچستان است. پردازش این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GAMIT/GLOBK 10.6 (هرینگ و همکاران، ۲۰۱۵) و در ITRF 2014 (التیمی و همکاران، ۲۰۱۶) انجام شده و بازه مشاهداتی این داده‌ها از ابتدای سال ۲۰۰۶ تا پایان سال ۲۰۱۶ است. هر ایستگاه دارای سه سری زمانی مختصات روزانه شامل مؤلفه‌های شرقی، شمالی و قائم است. برای کشف پرش‌های لرزه‌ای، از داده‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری استفاده شد که حاوی اطلاعات زلزله‌های رخ داده در مناطق مختلف کشور است. لازم به ذکر است که تمامی محاسبات این پژوهش با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

#### ۵. نتایج عددی

شبکه خراسان در محدوده عرض جغرافیایی  $30.8^{\circ} < \varphi < 37.8^{\circ}$  و طول جغرافیایی  $54.4^{\circ} < \lambda < 61.7^{\circ}$  واقع شده است. به‌استثنای سه ایستگاه DRGZ، HJBD و KHAF که دارای گپ بالای



شکل ۳. نمودار تعداد پرش‌های کشف شده در ایستگاه‌های دائمی شبکه خراسان به روش سه‌مولفه‌ای (مرجع پردازش‌های تحقیق).



## ۲-۵. نتایج فیلترینگ مکانی

در اینجا دو روش بلوکی و یکپارچه بکار گرفته شد به این صورت که در روش بلوکی تنها از ایستگاه‌های شبکه خراسان و در روش یکپارچه از سایر ایستگاه‌های IPGN نیز استفاده شده است. از آنجایی که میانگین فاصله ۳۱ ایستگاه شبکه خراسان از یکدیگر ۳۵۱ کیلومتر است، لذا روش بلوکی در دو حالت یک‌بلوکی و دوبلوکی صورت گرفت. در حالت دوم، شبکه خراسان به دو بلوک تقسیم و بلوک شمالی شامل ۱۶ ایستگاه در عرض‌های بالاتر و بلوک جنوبی شامل ۱۵ ایستگاه در عرض‌های پایین‌تر در نظر گرفته شد. در هر دو حالت، دو سناریو در تعیین ایستگاه‌های منتخب در نظر گرفته شد. سناریوی اول شامل معیارهایی نظیر گپ کمتر، اشتباه کمتر و پرش کمتر بوده و در سناریوی دوم، در هر ایستگاه، سایر ایستگاه‌ها به‌عنوان ایستگاه‌های منتخب در نظر گرفته شدند. در روش یکپارچه از داده‌های تمامی ایستگاه‌های IPGN واقع در مجاورت هر ایستگاه و تا فاصله معینی از آن استفاده شده است. میانگین درصد کاهش نرم بردار باقیمانده‌های برآورد شده

۳۱ ایستگاه شبکه خراسان در جدول ۱ ارائه شده است.

مطابق داده‌های جدول ۱، در روش‌های بلوکی، سناریوی دوم نتایج بهتری در پی داشته و مقایسه دو حالت دو بلوکی (با میانگین‌گیری از بلوک‌های شمالی و جنوبی) و یک‌بلوکی بیانگر بهتر بودن حالت یک‌بلوکی است. مقایسه این مقادیر با مقادیر متناظر حاصل از روش یکپارچه نشان می‌دهد که روش یکپارچه بهترین نتایج را در سه مؤلفه در پی داشته است. این موضوع می‌تواند ناشی از کوچک بودن IPGN بوده که در مقایسه با شبکه‌ای مانند CMONOC (ژو و همکاران، ۲۰۱۷) ابعاد کوچک‌تری دارد.

## ۳-۵. نتایج فیلترینگ زمانی و پارامترهای مدل حرکت

## ایستگاه

جدول ۲ دامنه نویزها و سرعت‌های قابل اطمینان (v) ایستگاه‌های شبکه خراسان در چارچوب مرجع ITRF2014 به همراه عدم قطعیت‌های واقعی این سرعت‌ها ( $\sigma_v$ ) را نشان می‌دهد.

جدول ۱. میانگین درصد کاهش نرم بردار باقیمانده‌های برآورد شده ایستگاه‌های شبکه خراسان برای روش‌های بلوکی و یکپارچه.

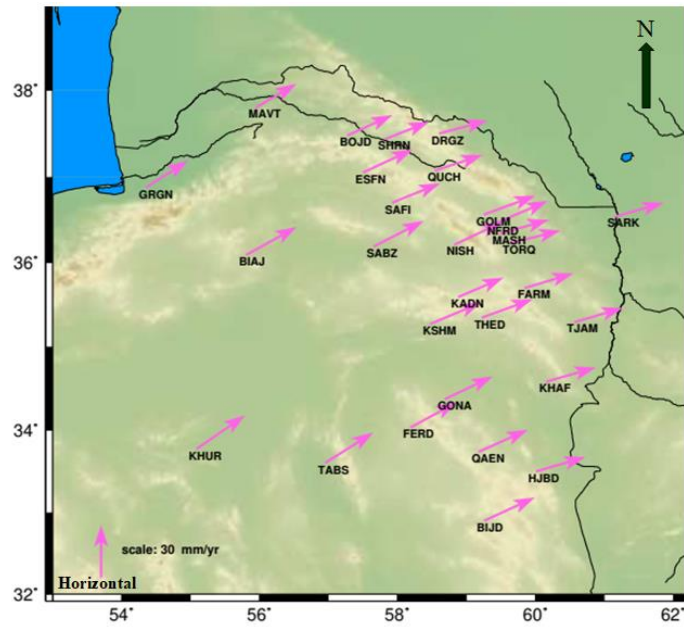
روش	بلوک	سناریو	مؤلفه شرقی	مؤلفه شمالی	مؤلفه قائم
یک‌بلوکی	خراسان	اول	۲۵/۹۹ %	۲۵/۱۰ %	۱۳/۷۵ %
		دوم	۲۸/۶۲ %	۲۷/۰۷ %	۱۶/۵۱ %
دوبلوکی	شمالی	اول	۲۲/۹۵ %	۲۱/۴۱ %	۱۲/۰۹ %
		دوم	۲۳/۱۳ %	۲۰/۸۳ %	۱۲/۱۷ %
	جنوبی	اول	۳۱/۰۸ %	۲۹/۹۳ %	۱۶/۸۹ %
		دوم	۳۲/۴۱ %	۳۱/۱۰ %	۱۸/۰۶ %
یکپارچه	IPGN	دوم	۳۰/۱۷ %	۲۹/۴۰ %	۱۷/۹۰ %

جدول ۲. دامنه نوین سفید (برحسب  $mm$ )، دامنه نوین فلیکر (برحسب  $mm/year^{1/4}$ ) و سرعت‌های قابل اطمینان (برحسب  $mm/year$ ) همراه با عدم قطعیت‌های واقعی (برحسب  $mm/year$ ) در ایستگاه‌های شبکه خراسان.

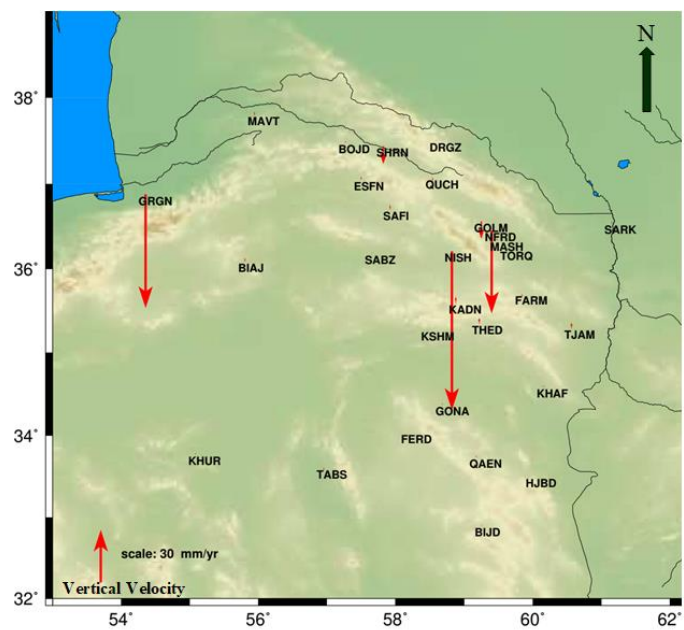
مؤلفه قائم			مؤلفه شمالی			مؤلفه شرقی			نام ایستگاه
$v_U + \sigma_{v_U}$	$b_{-1U}$	$a_U$	$v_N + \sigma_{v_N}$	$b_{-1N}$	$a_N$	$v_E + \sigma_{v_E}$	$b_{-1E}$	$a_E$	
۱/۹۵±۰/۳۵	۳/۸	۲/۶	۱۵/۸۶±۰/۱۶	۱/۸	۰/۶	۲۸/۶۹±۰/۱۵	۱/۷	۰/۶	BIAJ
۰/۴۹±۰/۴۰	۳/۷	۲/۶	۱۳/۲۷±۰/۱۸	۱/۷	۰/۷	۲۸/۹۱±۰/۱۶	۱/۶	۰/۶	BIJD
۰/۹۶±۰/۴۶	۴/۹	۲/۴	۱۱/۵۴±۰/۱۸	۲/۰	۰/۶	۲۵/۵۹±۰/۱۶	۱/۸	۰/۶	BOJD
۰/۳۴±۱/۳۲	۵/۶	۲/۲	۷/۴۵±۰/۴۸	۲/۱	۰/۶	۲۷/۶۰±۰/۴۶	۲/۰	۰/۶	DRGZ
۱/۷۷±۰/۴۷	۳/۹	۲/۵	۱۳/۱۲±۰/۲۲	۱/۹	۰/۶	۲۸/۴۳±۰/۱۸	۱/۶	۰/۶	ESFN
-۱/۷۶±۰/۶۵	۴/۹	۲/۴	۸/۴۳±۰/۲۴	۱/۹	۰/۶	۲۷/۷۹±۰/۲۲	۱/۷	۰/۶	FARM
-۰/۰۸±۰/۵۴	۳/۸	۲/۶	۱۴/۵۲±۰/۲۲	۱/۷	۰/۷	۲۶/۶۸±۰/۲۱	۱/۶	۰/۶	FERD
-۹/۹۸±۰/۵۷	۴/۱	۲/۵	۱۰/۷۸±۰/۲۴	۱/۸	۰/۷	۲۹/۴۲±۰/۲۱	۱/۶	۰/۶	GOLM
۱/۰۶±۰/۴۴	۳/۶	۲/۶	۱۳/۰۱±۰/۱۹	۱/۷	۰/۷	۲۷/۴۳±۰/۱۸	۱/۶	۰/۶	GONA
-۶۴/۹۱±۸/۰۴	۱۱/۰	۱/۳	۱۵/۲۰±۰/۲۲	۲/۷	۰/۵	۲۳/۸۵±۰/۲۱	۲/۶	۰/۶	GRGN
۰/۰۷±۱/۳۱	۵/۹	۲/۲	۸/۲۰±۰/۴۵	۲/۱	۰/۶	۲۸/۲۷±۰/۴۷	۲/۲	۰/۶	HJBD
۳/۷۶±۰/۸۰	۵/۶	۲/۲	۱۱/۰۲±۰/۲۷	۲/۰	۰/۶	۲۵/۸۰±۰/۲۷	۲/۰	۰/۶	KADN
۱/۰۰±۱/۲۳	۶/۷	۲/۱	۸/۰۸±۰/۴۴	۲/۴	۰/۵	۲۸/۰۸±۰/۴۲	۲/۳	۰/۶	KHAF
۰/۹۰±۰/۳۹	۳/۹	۲/۶	۱۹/۱۴±۱/۱۶	۱/۷	۰/۷	۲۷/۶۶±۰/۱۵	۱/۶	۰/۶	KHUR
-۰/۱۱±۰/۳۷	۳/۹	۲/۶	۱۲/۲۳±۰/۱۶	۱/۷	۰/۷	۲۹/۱۹±۰/۱۵	۱/۶	۰/۶	KSHM
۱/۹۰±۰/۴۲	۴/۳	۲/۵	۱۳/۶۲±۰/۱۹	۲/۰	۰/۶	۲۳/۱۹±۰/۱۶	۱/۷	۰/۶	MAVT
۱/۴۲±۰/۸۳	۵/۲	۲/۳	۷/۹۱±۰/۲۸	۱/۸	۰/۶	۲۸/۰۳±۰/۲۶	۱/۷	۰/۶	MSHN
۰/۵۸±۰/۷۳	۶/۳	۲/۱	۱۳/۶۳±۰/۲۸	۲/۵	۰/۵	۲۹/۷۹±۰/۲۵	۲/۲	۰/۶	NEHB
-۴۷/۲۲±۰/۸۲	۸/۲	۱/۸	۱۳/۰۳±۰/۲۴	۲/۴	۰/۵	۳۰/۵۸±۰/۳۰	۳/۰	۰/۵	NFRD
-۹۰/۴۷±۰/۶۶	۶/۲	۲/۱	۱۳/۰۶±۰/۲۳	۲/۲	۰/۶	۲۷/۶۲±۰/۲۳	۲/۲	۰/۶	NISH
۱/۰۸±۰/۴۵	۳/۹	۲/۵	۱۲/۴۶±۰/۱۸	۱/۷	۰/۷	۲۷/۹۳±۰/۱۸	۱/۷	۰/۶	QAEN
-۲/۱۸±۰/۶۱	۴/۳	۲/۵	۸/۹۵±۰/۲۳	۱/۷	۰/۷	۲۷/۱۷±۰/۲۳	۱/۷	۰/۶	QUCH
۰/۳۴±۰/۵۹	۴/۰	۲/۵	۱۴/۵۹±۰/۲۸	۲/۱	۰/۶	۲۸/۵۰±۰/۲۴	۱/۸	۰/۶	SABZ
۲/۵۸±۰/۵۳	۳/۹	۲/۶	۱۱/۰۱±۰/۲۲	۱/۷	۰/۷	۲۷/۳۵±۰/۲۰	۱/۶	۰/۶	SAFI
۱/۲۹±۰/۴۱	۳/۸	۲/۶	۷/۸۹±۰/۱۸	۱/۸	۰/۶	۲۷/۸۷±۰/۱۷	۱/۷	۰/۶	SARK
-۱۰/۲۱±۰/۹۵	۴/۶	۲/۴	۹/۸۷±۰/۵۹	۳/۴	۰/۳	۲۵/۱۳±۰/۴۹	۲/۷	۰/۶	SHRN
-۱/۴۸±۰/۴۸	۴/۴	۲/۵	۱۷/۲۳±۰/۱۸	۱/۸	۰/۶	۲۷/۳۷±۰/۱۸	۱/۸	۰/۶	TABS
۳/۳۳±۰/۵۸	۳/۹	۲/۵	۱۰/۴۵±۰/۲۶	۱/۹	۰/۶	۲۸/۹۳±۰/۲۴	۱/۸	۰/۶	THED
۳/۱۳±۰/۵۱	۴/۲	۲/۵	۸/۰۸±۰/۲۲	۱/۹	۰/۶	۲۷/۶۴±۰/۲۲	۱/۹	۰/۶	TJAM
۰/۳۳±۰/۵۵	۴/۲	۲/۵	۷/۲۷±۰/۲۳	۱/۹	۰/۶	۲۸/۶۸±۰/۲۱	۱/۷	۰/۶	TORQ
۲/۷۷±۰/۵۲	۳/۹	۲/۶	۷/۶۰±۰/۲۳	۱/۹	۰/۶	۲۹/۴۱±۰/۲۱	۱/۷	۰/۶	ZABL

خراسان در چارچوب مرجع ITRF2014 را نشان می‌دهد.

شکل ۴ بردارهای سرعت افقی و قائم ایستگاه‌های شبکه



(الف)



(ب)

شکل ۴. بردارهای سرعت افقی (الف) و قائم (ب) ایستگاه‌های دائمی GPS شبکه خراسان در چارچوب مرجع ITRF2014 (مرجع پردازش - های تحقیقی).

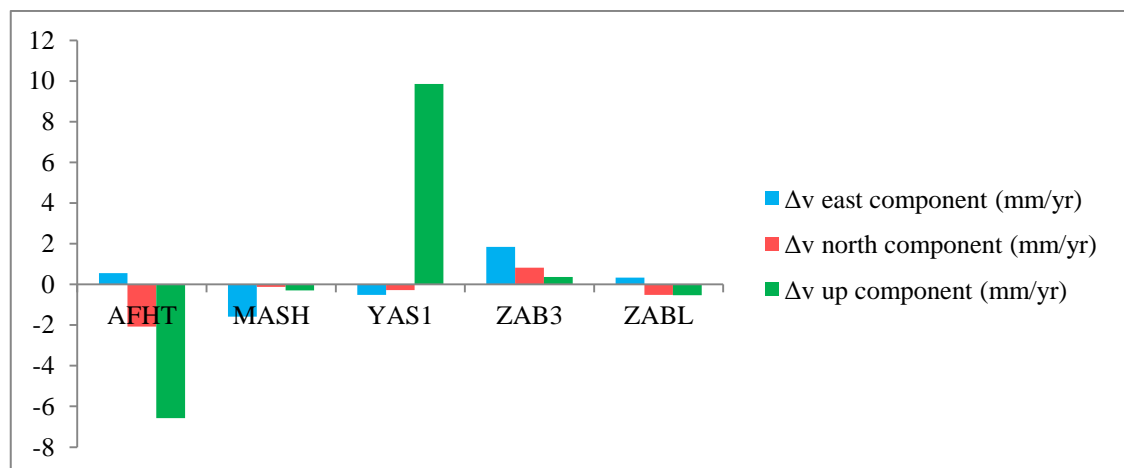
آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است (بلویت و همکاران، ۲۰۱۸).

برای هر ایستگاه MIDAS، نزدیک‌ترین ایستگاه از شبکه خراسان مشخص و اختلاف سرعت‌های این دو ایستگاه محاسبه شده است. نمودار مربوط به این اختلاف سرعت‌ها ( $\Delta v$ ) در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای ارزیابی نتایج، سرعت‌های جدول ۲ با مقادیر ایستگاه‌های اختلاف بین‌سالانه میانه ارزیابی شده برای چولگی MIDAS (Median Interannual Difference Adjusted for Skewness) را مورد مقایسه قرار می‌دهیم. برای این منظور، پنج ایستگاه MIDAS در مجاورت ایستگاه‌های شبکه خراسان در نظر گرفته که مشخصات

جدول ۳. موقعیت مکانی، بازه زمانی مشاهداتی و سرعت‌های محاسبه شده همراه با عدم قطعیت سرعت‌ها در ایستگاه‌های MIDAS واقع شده در مجاورت شبکه خراسان (بلویت و همکاران، ۲۰۱۸).

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	تاریخ شروع (میلادی)	تاریخ پایان (میلادی)	$v_E + \sigma_{v_E}$ (mm/year)	$v_N + \sigma_{v_N}$ (mm/year)	$v_U + \sigma_{v_U}$ (mm/year)
AFHT	۳۴/۳۵	۶۲/۲۲	۲۰۰۸/۸	۲۰۱۱	$۲۸/۲۰ \pm ۰/۶۷$	$۶/۰۱ \pm ۰/۸۵$	$-۳/۴۴ \pm ۳/۴۹$
MASH	۳۶/۳۱	۵۹/۴۷	۲۰۰۰/۷	۲۰۰۲/۸	$۲۶/۴۴ \pm ۳/۳۴$	$۷/۷۸ \pm ۵/۵۱$	$۱/۱۲ \pm ۱۸/۱۵$
YAS1	۳۵/۲۹	۵۸/۴۶	۱۹۹۸/۸	۲۰۰۳/۹	$۲۸/۶۸ \pm ۰/۷۵$	$۱۱/۹۵ \pm ۲/۳۴$	$۹/۷۵ \pm ۴/۴۷$
ZAB3	۳۱/۰۵	۶۱/۵۲	۲۰۰۰/۸	۲۰۰۳/۸	$۳۱/۲۵ \pm ۱/۰۷$	$۸/۴۲ \pm ۵/۱۰$	$۳/۱۴ \pm ۸/۵۲$
ZABL	۳۰/۸۴	۶۱/۷۲	۲۰۱۱/۴	۲۰۱۶/۵	$۲۹/۷۵ \pm ۰/۲۷$	$۷/۰۹ \pm ۰/۲۷$	$۲/۲۴ \pm ۱/۰۰$

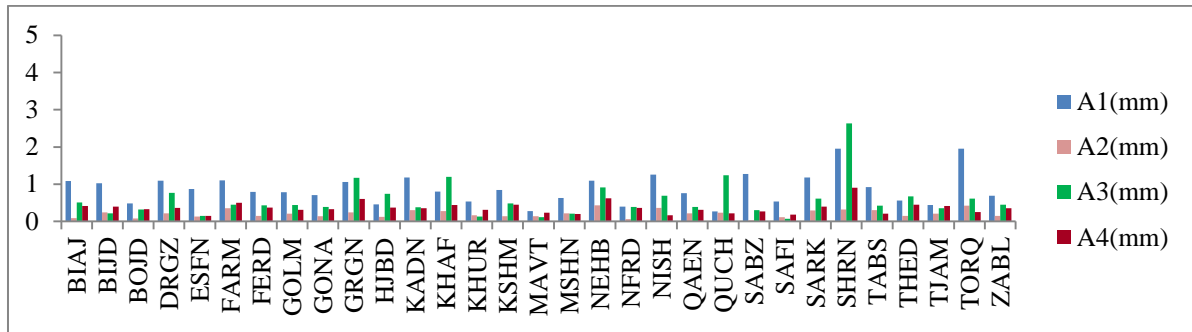


شکل ۵. نمودار اختلاف سرعت ( $\Delta v$ ) ایستگاه‌های MIDAS با نزدیک‌ترین ایستگاه به آن‌ها در شبکه خراسان در هر سه مؤلفه شرقی (رنگ آبی)، شمالی (رنگ قرمز) و قائم (رنگ سبز).

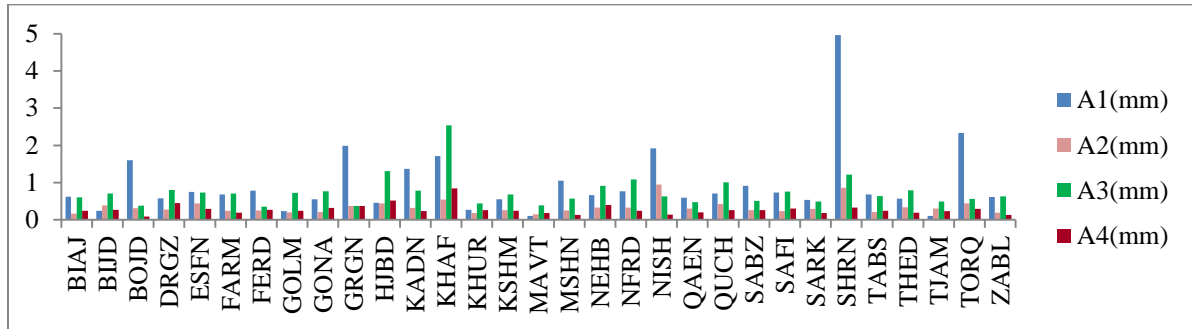
برای ایستگاه MASH که در فاصله اندکی از ایستگاه MSHN قرار گرفته برابر  $۰/۶۷$  میلی‌متر در سال بوده که بر سازگاری این نتایج دلالت دارد.

در اینجا چهار سیگنال پرودییک سالیانه، نیم‌سالانه، سال دراکونیتیک و نیم‌سالانه دراکونیتیک در مدل حرکت ایستگاه‌ها لحاظ شده که دامنه هر یک از این سیگنال‌ها از رابطه  $A_p = \sqrt{s_p^2 + c_p^2}$  محاسبه می‌شود. شکل ۶ دامنه چهار سیگنال پرودییک موردنظر را در ایستگاه‌های شبکه خراسان نشان می‌دهد.

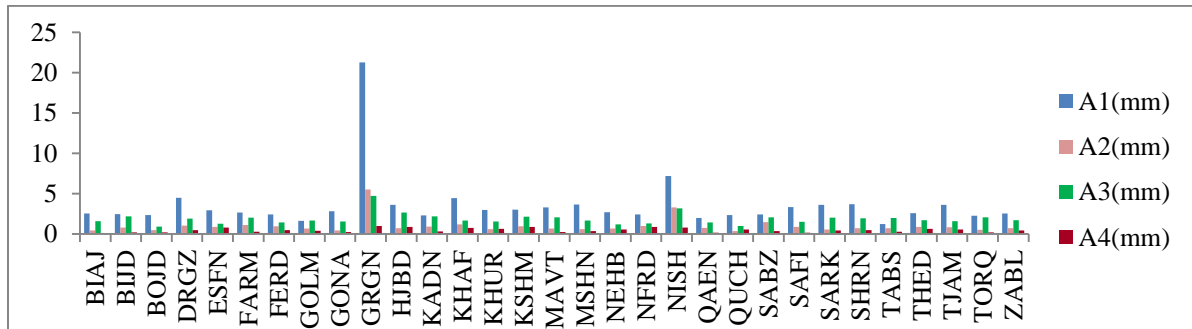
با توجه به شکل ۵ می‌توان بیان داشت که به‌استثنای اختلاف زیاد در مؤلفه قائم ایستگاه‌های AFHT و YAS1، نتایج سایر ایستگاه‌های MIDAS با مقادیر این پژوهش هم‌خوانی دارد. اختلاف‌های فوق ناشی از عواملی مانند تفاوت روش‌های محاسباتی، اختلاف بازه‌های زمانی (در ایستگاه YAS1) و فاصله مکانی ایستگاه‌ها (در ایستگاه FAHT) است. ایستگاه ZABL در هر دو گروه MIDAS و IPGN قرار داشته و میانگین اختلاف سرعت آن در سه مؤلفه  $۰/۴۶$  میلی‌متر در سال است. این مقدار



(الف)



(ب)

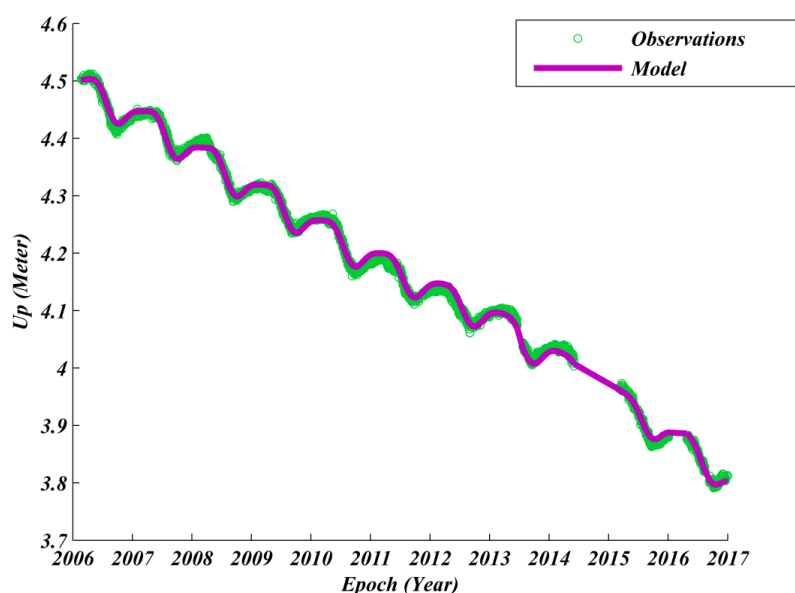


(ج)

شکل ۶. نمودار دامنه سیگنال‌های پریودیک موجود در مؤلفه‌های شرقی (الف)، شمالی (ب) و قائم (ج) ایستگاه‌های دائمی GPS شبکه خراسان. اندیس‌های یک الی چهار به ترتیب بیانگر سیگنال‌های (۱) سالیانه، (۲) نیم‌سالانه، (۳) سال دراکونیتیک و (۴) نیم‌سالانه دراکونیتیک هستند. (مرجع پردازش‌های تحقیق).

افقی آن نیز دارای دامنه‌های نسبتاً بزرگی هستند. همچنین این ایستگاه دارای یک فرونشست بسیار بزرگ (۶۴/۹۱- میلی‌متر در سال) است. شکل ۷ نمودار سری زمانی روزانه مؤلفه قائم ایستگاه GRGN و مدل برازش یافته بر آن را نمایش می‌دهد. در بخش بعدی در مورد حرکت این ایستگاه و مقایسه نتایج آن با سایر پژوهش‌ها توضیح داده خواهد شد.

بر مبنای شکل ۶، دامنه سیگنال‌های مؤلفه قائم بزرگ‌تر از مؤلفه‌های مسطحاتی بوده که نتایج سایر محققین نیز مؤید همین مسئله است (کلوز و بوگاس، ۲۰۱۷؛ کلوز و همکاران، ۲۰۱۸a). مشابه شبکه‌های دیگر (بوگاس و کلوز، ۲۰۱۶) در اینجا هم سیگنال‌های سالیانه و سال دراکونیتیک دارای بزرگ‌ترین دامنه‌ها هستند. در مؤلفه قائم، بزرگ‌ترین دامنه سیگنال‌های پریودیک مربوط به ایستگاه GRGN بوده که مؤلفه‌های



شکل ۷. نمودار سری زمانی روزانه مؤلفه قائم ایستگاه GRGN (نقاط سبز)، و مدل ریاضی برازش یافته بر آن (منحنی بنفش).

#### ۶. بحث و نتیجه گیری

بررسی دامنه نویزها در جدول ۲ نشان می‌دهد که دامنه نویزها در مؤلفه‌های مسطحی تقریباً یکسان بوده و کوچک‌تر از دامنه نویز مؤلفه ارتفاعی است. دامنه نویز فلیکر در هر سه مؤلفه مختصاتی بزرگ‌تر از نویز سفید است. همچنین دامنه نویزها در مؤلفه ارتفاعی بیشتر از مؤلفه‌های مسطحی است. عدم قطعیت برآورد شده واقعی ایستگاه‌ها به‌طور متوسط در مؤلفه شرقی  $4/33$  برابر، در مؤلفه شمالی  $4/44$  برابر و در مؤلفه قائم  $3/70$  برابر بزرگ‌تر از مقادیر خوش‌بینانه بوده که با یافته‌های تفرله و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد. برخلاف عدم قطعیت‌ها، سرعت ایستگاه‌ها تحت تأثیر آنالیز نویز قرار نگرفته و مقدار آن‌ها قبل و بعد از آنالیز نویز به‌طور متوسط  $0/08$  میلی‌متر در سال تغییر کرده است. طبق جدول ۲ اندازه سرعت مؤلفه قائم در ۸ ایستگاه کمتر از عدم قطعیت آن است که این نکته بیانگر ضرورت انجام آنالیز نویز و لحاظ کردن عدم قطعیت‌های واقعی برآورد شده در این تحقیق است (بوگاس و همکاران، ۲۰۱۹).

مطابق جدول ۲ و شکل ۴ سرعت‌های افقی ایستگاه‌ها تقریباً مشابه و انحراف استاندارد آن‌ها در مؤلفه‌های شرقی

و شمالی به ترتیب  $1/62$  میلی‌متر در سال و  $3/14$  میلی‌متر در سال است. اما سرعت‌های ارتفاعی دارای تغییرات زیادی بوده و انحراف استاندارد آن‌ها  $21/33$  میلی‌متر در سال است. زیرا برخی از ایستگاه‌ها شامل GOLM، GRGN، NFRD، NISH و SHRN دارای فرونشست زیاد و غیرطبیعی (بیشتر از ۹ میلی‌متر در سال) هستند. از بین ایستگاه‌های مذکور، سه ایستگاه GOLM، NFRD و NISH در مجاورت یکدیگر بوده و بنابراین رفتار آن‌ها می‌تواند به‌عنوان یک فرونشست منطقه‌ای تلفی شود. دهقانی و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از داده‌های InSAR، حداکثر سرعت فرونشست در منطقه نیشابور در فاصله زمانی سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵ را در تابستان به ترتیب ۱۷ سانتیمتر در سال و ۱۱ سانتیمتر در سال برآورد کردند. با توجه به موقعیت ایستگاه دائمی NISH، مقدار به‌دست‌آمده در این پژوهش (حدود ۹ سانتیمتر در سال) با مقادیر مذکور همخوانی دارد. در ایستگاه SHRN فرونشست  $10/21$  میلی‌متر در سال محاسبه شده اما بیشتر ایستگاه‌های اطراف آن دارای بالاآمدگی بوده و بنابراین فرونشست یادشده می‌تواند محدود به یک بخش کوچک باشد.

در تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی منطقه گرگان کاملاً مشهود است (تورانی و همکاران، ۲۰۲۱). در مقابل، ایستگاه‌های دائمی GPS تغییرات موقعیت را به صورت پیوسته بیان کرده و در اینجا نیز یک آنالیز کامل سری زمانی با در نظر گرفتن تمامی عوامل انجام شده است. ثانیاً مشاهدات InSAR فرونشست را در یک منطقه نشان داده در حالی که ایستگاه دائمی GPS فرونشست را به صورت نقطه‌ای نشان می‌دهد. ثالثاً بازه‌های زمانی مشاهدات پژوهش حاضر در مقایسه با مشاهدات InSAR بلندمدت بوده و دقت و اطمینان بیشتری دارند.

به استثنای ایستگاه‌های یادشده، سرعت ارتفاعی سایر ایستگاه‌ها در محدوده طبیعی ۵- الی ۵+ میلی‌متر در سال قرار دارد (استانسیاکس و همکاران، ۲۰۱۲). به طور کلی از بین ۳۱ ایستگاه شبکه خراسان، ۲۱ ایستگاه دارای بالا آمدگی بوده که بیشترین میزان آن در ایستگاه KADN و به میزان ۳/۷۶ میلی‌متر در سال است و ۱۰ ایستگاه دارای فرونشست بوده که بیشترین میزان آن در ایستگاه NISH و به میزان ۹۰/۴۷- میلی‌متر در سال است.

#### منابع

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & 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.
- Amiri-Simkoei, A. (2016). Non-negative least-squares variance component estimation with application to GPS time series. *Journal of Geodesy*, 90(5), 451-466.
- Amiri-Simkoei, A., Hosseini-Asl, M., Asgari, J., & Zangeneh-Nejad, F. (2019). Offset detection in GPS position time series using multivariate analysis. *GPS solutions*, 23(1), 13.
- Amiri-Simkoei, A., Mohammadloo, T., & Argus, D. (2017). Multivariate analysis of GPS position time series of JPL second reprocessing campaign. *Journal of Geodesy*, 91(6), 685-704.
- An, J., Zhang, B., Ai, S., Wang, Z., & Feng, Y. (2021). Evaluation of vertical crustal movements and sea level changes around Greenland from GPS and tide gauge observations. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(1), 4-12.
- Barzaghi, R., & Borghi, A. (2018). Theory of second order stationary random processes applied to GPS coordinate time-series. *GPS Solutions*, 22(3), 86.
- Borghi, A., Aoudia, A., Riva, R. E., & Barzaghi, R. (2009). GPS monitoring and earthquake prediction: a success story towards a useful integration. *Tectonophysics*, 465(1-4), 177-189.
- Bevis, M., & Brown, A. (2014). Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. *Journal of Geodesy*, 88(3), 283-311.
- Birhanu, Y., Williams, S., Bendick, R., & Fisseha, S. (2018). Time dependence of noise characteristics in continuous GPS observations from East Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 144, 83-89.
- Blewitt, G., Hammond, W. C., & Kreemer, C. (2018). Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos*, 99, 1-2.
- Bogusz, J., Gruszczynski, M., Figurski, M., &

در ایستگاه GRGN یک فرونشست غیرطبیعی همراه با حرکت شتاب‌دار و نیز سیگنال‌های پرریودیک با دامنه‌های بزرگ دیده می‌شود که بیانگر وضعیت غیرعادی این ایستگاه در مؤلفه قائم است (شکل ۷). در اطراف ایستگاه مذکور هیچ ایستگاهی از شبکه IPGN وجود نداشته و لذا بررسی رفتار ارتفاعی پوسته زمین در محدوده اطراف این ایستگاه نیازمند ایجاد ایستگاه‌های جدید برای تولید مشاهدات بیشتر است. نتایج حاصل از آنالیز داده‌های InSAR در محدوده گرگان (تورانی و همکاران، ۲۰۲۱) در یک بازه زمانی ۳۴/۵ ماهه (اوایل سال ۲۰۰۷ تا اواخر سال ۲۰۰۹) بیانگر فرونشست ۴/۸ سانتیمتر در گرگان بوده که با مقدار برآوردشده در این تحقیق مقداری اختلاف دارد. این تفاوت و مقادیر نظیر آن ناشی از چند عامل است؛ اولاً فرونشست حاصل از مشاهدات InSAR حاصل اختلاف ارتفاع پوسته زمین در دو لحظه از زمان بوده و تغییرات پوسته در فاصله بین این دو دوره نامشخص است. در نتیجه از اثر عواملی نظیر سیگنال‌های پرریودیک صرف نظر می‌شود. این عامل در ایستگاهی نظیر GRGN (شکل ۷) تأثیر بسزایی در تعیین فرونشست داشته و اثر آن

- Klos, A. (2015). Spatio-temporal filtering for determination of common mode error in regional GNSS networks. *Open Geosciences*, 7(1).
- Bogusz, J., & Klos, A. (2016). On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. *GPS solutions*, 20(4), 655-664.
- Bogusz, J., Klos, A., & Pokonieczny, K. (2019). Optimal Strategy of a GPS Position Time Series Analysis for Post-Glacial Rebound Investigation in Europe. *Remote Sensing*, 11(10), 1209.
- Bruni, S., Zerbini, S., Raicich, F., Errico, M., & Santi, E. (2014). Detecting discontinuities in GNSS coordinate time series with STARS: case study, the Bologna and Medicina GPS sites. *Journal of Geodesy*, 88(12), 1203-1214.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J., Entezam, I., Mansourian, A., & Saatchi, S. (2009). InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International*, 178(1), 47-56.
- Gazeaux, J., Williams, S., King, M., Bos, M., Dach, R., Deo, M., Moore, A.W., Ostini, L., Petrie, E., Roggero, M., & Teferle, F.N. (2013). Detecting offsets in GPS time series: First results from the detection of offsets in GPS experiment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5), 2397-2407.
- Graham, S. E., Loveless, J. P., & Meade, B. J. (2018). Global plate motions and earthquake cycle effects. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7), 2032-2048.
- Gruszczynski, M., Klos, A., & Bogusz, J. (2016). Orthogonal transformation in extracting of common mode errors from continuous GPS networks. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 13(3), 291-298.
- Hammond, W. C., Blewitt, G., Kreemer, C., & Nerem, R. S. (2021). GPS imaging of global vertical land motion for studies of sea level rise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(7), e2021JB022355.
- He, X., Hua, X., Yu, K., Xuan, W., Lu, T., Zhang, W., & Chen, X. (2015). Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering. *Advances in Space Research*, 55(5), 1316-1327.
- He, X., Montillet, J.-P., Fernandes, R., Bos, M., Yu, K., Hua, X., & Jiang, W. (2017). Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, 106, 12-29.
- Herring, T., King, R., & McClusky, S. (2015). Introduction to GAMIT/GLOBK, release 10.6. Mass. Inst. of Technol., Cambridge. <https://ncc.gov.ir/>
- Jiang, W., Ma, J., Li, Z., Zhou, X., & Zhou, B. (2018). Effect of removing the common mode errors on linear regression analysis of noise amplitudes in position time series of a regional GPS network & a case study of GPS stations in Southern California. *Advances in Space Research*, 61(10), 2521-2530.
- Khalkhali, S. A. G., Ardalan, A. A., & Karimi, R. (2021). A time series analysis of permanent GNSS stations in the northwest network of Iran. *Annals of Geophysics*, 64(2), GD218-GD218.
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., Saadat, S.A., Walpersdorf, A., Hosseini, S., Tavakoli, P., & Aghamohammadi, A. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophysical Journal International*, 217(2), 832-843.
- Khorrami, M., Abrishami, S., & Maghsoudi, Y. (2020). Mashhad subsidence monitoring by interferometric synthetic aperture radar technique. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(6), 1187-1204.
- Klos, A., & Bogusz, J. (2017). An evaluation of velocity estimates with a correlated noise: case study of IGS ITRF2014 European stations. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 14(3), 255-265.
- Klos, A., Bos, M. S., & Bogusz, J. (2018a). Detecting time-varying seasonal signal in GPS position time series with different noise levels. *GPS solutions*, 22(1), 21.
- Klos, A., Olivares, G., Teferle, F. N., Hunegnaw, A., & Bogusz, J. (2018b). On the combined effect of periodic signals and colored noise on velocity uncertainties. *GPS solutions*, 22(1), 1.
- Li, W., Li, F., Zhang, S., Lei, J., Zhang, Q., & Yuan, L. (2019). Spatiotemporal Filtering and Noise Analysis for Regional GNSS Network in Antarctica Using Independent Component Analysis. *Remote Sensing*, 11(4), 386.
- Mao, A., Harrison, C. G., & Dixon, T. H. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B2), 2797-2816.
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16).
- Mousavi, Z., Walpersdorf, A., Walker, R.T., Tavakoli, F., Pathier, E., Nankali, H.R.E.A., Nilfouroushan, F., & Djamour, Y. (2013). Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and the South Caspian region. *Earth and Planetary Science*



- Letters*, 377, 287-298.
- Nikolaidis, R. (2004). Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System.
- Ostanciaux, E., Husson, L., Choblet, G., Robin, C., & Pedoja, K. (2012). Present-day trends of vertical ground motion along the coast lines. *Earth-Science Reviews*, 110(1-4), 74-92.
- Ray, J., Altamimi, Z., Collilieux, X., & van Dam, T. (2008). Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates. *GPS solutions*, 12(1), 55-64.
- Riddell, A. R. (2021). Vertical land motion of the Australian plate (Doctoral dissertation, University of Tasmania).
- Santamaría-Gómez, A., Bouin, M. N., Collilieux, X., & Wöppelmann, G. (2011). Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, (116)B1.
- Shirzaei, M., Freymueller, J., Törnqvist, T. E., Galloway, D. L., Dura, T., & Minderhoud, P. S. (2021). Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(1), 40-58.
- Teferle, F. N., Williams, S. D., Kierulf, H. P., Bingley, R. M., & Plag, H.-P. (2008). A continuous GPS coordinate time series analysis strategy for high-accuracy vertical land movements. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(3-4), 205-216.
- Tobita, M. (2016). Combined logarithmic and exponential function model for fitting postseismic GNSS time series after 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 1-12.
- Tourani, M., Caglayan, A., Saber, R., Isik, V., & Chitea, F. (2021). Determination of land subsidence in gorgan plain with insar method (Golestan, NE Iran). book: geoscience for society, education and environment.
- Varbla, S., Ågren, J., Ellmann, A., & Poutanen, M. (2022). Treatment of tide gauge time series and marine GNSS measurements for vertical land motion with relevance to the implementation of the Baltic Sea Chart Datum 2000. *Remote Sensing*, 14(4), 920.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., . . . Bayer, R. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, 157(1), 381-398.
- Walpersdorf, A., Manighetti, I., Mousavi, Z., Tavakoli, F., Vergnolle, M., Jadidi, A., Hatzfeld, D., Aghamohammadi, A., Bigot, A., Djamour, Y., & Nankali, H. (2014). Present-day kinematics and fault slip rates in eastern Iran, derived from 11 years of GPS data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2), 1359-1383.
- Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., & Genrich, J. (1997). Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 18057-18070.
- Williams, S.D., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R.M., Prawirodirdjo, L., Miller, M., & Johnson, D.J. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3).
- Zhu, Z., Zhou, X., Deng, L., Wang, K., & Zhou, B. (2017). Quantitative analysis of geophysical sources of common mode component in CMONOC GPS coordinate time series. *Advances in Space Research*, 60(12), 2896-2909.