

Research Article

Accommodation of slip direction data with Nuvel1, ITRF and GSRM data in the Borazjan fault system

Babak Samani*, Abbas Charchi

Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: *Strain, Earthquake focal mechanism, Nuvel1 global model, ITRF global model, GSRM global model.*

1-Introduction

During the development of plate tectonic theory, many scientists and researchers tried to use different methods to quantitatively and qualitatively express the amount and direction of crustal motion. In the basic theory of plate tectonics, plates are considered rigid blocks, which act as very effective stress conductors (Wilson, 1993). However, when we look closely at the behavior of the plate, we find that in many places (especially in the continental crust), deformation also occurs within the plate. So far, various relative and absolute methods have been proposed to determine the direction and direction of movement of tectonic plates. The velocity and direction of tectonic plates can be calculated by three methods: 1) Relative movement of pages, 2) Absolute motion and 3) Relative motion of spatial geodesic. Today, the relative velocity between two plates can be measured and calculated using the spatial geodesy method (Gordon and Stein, 1992). Before the 1980s, the only methods available for this type of survey were standard ground-based geodetic methods for measuring baselines using optical techniques or laser rangefinders, including geodoliths (Thatcher, 2003). These methods are accurate enough to measure the relative motion of the plates, which are a few millimetres per year. However, in the last three decades, measuring very long baselines using extraterrestrial methods through space technology has become possible. In this study, using the data of global models such as the global plate motion model (NUVEL1), international terrestrial reference frame (ITRF) and global strain rate model (GSRM), the direction and velocity maps of the crust in twelve points of Borazjan fault system that have fault plane solution data have been prepared. Accordingly, the direction of the current strain fields is compared with the results of the global models Nuvel1, ITRF and GSRM. Finally, the degree of conformity of the results obtained from the fault slip data and global models' results were compared to identify a more appropriate model for future studies.

2- Methodology

In this study, the states of direction and velocity of crustal movement in the Borazjan fault system have been studied using data from global models of tectonic plate motion. Therefore, using the data of global models of Nuvel1, ITRF and GSRM, the direction and velocity maps of the crust in the Borazjan fault system have been prepared. Furthermore, to compare the results of the above modelling with the current strain fields, the fault slip data obtained from the fault plane solution for twelve earthquakes in the Borazjan fault system have also been evaluated.

3- Results and discussions

There are four essential methods for overseas mapping: Very long baseline interferometry (VLBI), Satellite laser ranging (SLR), Global Positioning System and Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite (DORIS). The VBLI method uses extraterrestrial radio signals or astronomers (Niell et al., 1979; Carter and Robertson, 1986). Satellite laser ranging (SLR) is calculated by measuring the travel time of a two-way pulsed laser light emitted from a satellite (Cohen and Smith, 1985). In the radio positioning method with satellite, radio interferometry related to satellites of Global Positioning System (GPS) is used (Dixon, 1991). This method is the most effective way to establish geodetic control over local and regional mapping (Kearey and vine, 2009). The DOIRS method is that a satellite examines the number of changes

made in this frequency by sending several frequencies to the ground reference and returning this frequency from the ground reference to the satellite. The difference between the reciprocating frequencies is called the Doppler Effect. Mechanism of different global models for crust motion analysis, using different databases such as analysis of plate Euler points, satellite positioning system, laser distance detection with satellite, very long baseline interferometry, and terrestrial geodesy data. The data obtained from the earthquake slip vector and the data inside the well. Each global model uses one or a combination of the above data sets. The first model of this model is Nuvel1 (Global plate motion model) (Argus et al., 2011). This model later became the basis of other global models such as ITRF, GRSM, etc. (Altamimi et al., 2016; Prawirodirdjo and Bock, 2004). The mechanism of the Nuvel1 model is to analyze Euler points and determine the direction of the motion vector with ground geodetic models for 12 tectonic plates. The ITRF global model uses data from various intelligence services such as the International Geodetic Society Information Service, the International Reference Systems and Earth Rotation Service, and data such as very long baseline interferometry, satellite tracking, and The Global Positioning System has been modeling the motions of tectonic plates (Altamimi et al., 2007, 2011, 2016). The global GSRM model is a model that uses ground geodetic data to calculate the horizontal velocities and the horizontal strain of the earth's surface (Kreemer et al., 2018). The data of Nuvel1, ITRF and GSRM global crustal motion models in twelve points in the Borazjan fault system, which had seismic data with a magnitude of more than 5 Richter and fault plane solution, were extracted from reputable scientific sites. Then, directional maps and crustal movement rates in the Borazjan fault system were drawn using GIS software. The crust's direction and velocity of motion using Nuvel global model data show that the general plate movement direction has a northeast-southwest direction, and the rate of crustal motion in the northern parts is slower than in the eastern and southern parts. The resulting pattern shows that the velocity of crustal movement has increased from north to south and west to east. The directional map and rate of crustal motion using the ITRF global model data show that the general direction of plate motion is northeast-southwest, and the rate of crustal velocity increases from northwest to southeast. The direction map and crustal movement rate using the GSRM global model data indicate that the crustal movement direction is northeast-southwest, and the movement velocity rate in the southeastern parts is higher than other parts of the Borazjan fault system.

4- Conclusion

Nuvel1, ITRF, and GRSM global modelling in determining the direction of motion and crust velocity in the Borazjan fault system show that the pattern of crustal motion direction is not the same in these models. Also, these modelling results indicate different movement velocities for each model. The global modelling results indicate that the rate of crustal movement in the Borazjan fault system from the north and northwest to the south and southeast is increasing mode. Comparison of fault slip direction data in the Borazjan fault system with the ITRF, GRSM and Nuvel1 models reveals 58.3, 25 and 16.7 per cent similarity, respectively. Therefore, it can be concluded that the ITRF model has more adaptation to the slip direction in the Borazjan fault system than other models.

References

- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C., 2007. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research* 89, 2-19.
- Altamimi, Z., Métivier, L., Collilieux, X., 2011. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research* 117, 231-243. <https://doi/full/10.1029/2001JB000561>
- Argus, D. F., Gordon, R. G., DeMets, C., 2011. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geophysics* 12, 333-42. <https://doi/10.1029/2011GC003751>
- Carter, W.E. Robertson, D.S., 1986. Studying the earth by very long-baseline interferometry. *Geological Society of America* 255, 44-52.
- Cohen, S.C., Smith, P.E., 1985. LAGEOS scientific results: introduction. *Journal of Geophysical Research* 90, 17-20. <https://doi/abs/10.1029/JB090iB11p09217>
- Dixon, T.H., 1991. An introduction to the Global Positioning System and some geological applications. *Rev. Geophysics* 29, 249-76. <https://doi/10.1029/91RG00152>
- Kearey, P., Vine, F. J., 2009. *Global tectonics*: John Wiley & Sons. p. 496.

- Kreemer, C., Holt, W. E., Haines, A. J., 2018. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation. *Geophysical Journal International* 154, 8-34. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x>
- Prawirodirdjo, L., Bock, Y., 2004. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 105, 79-99. <https://doi/10.1029/2003JB002944>
- Thatcher, W., 2003. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. *International Geology review* 45, 191–212. <https://doi/abs/10.2747/0020-6814.45.3.191>
- Wilson, D.S., 1993. Confirmation of the astronomical calibration of the magnetic polarity timescale from seafloor spreading rates. *Nature* 364, 788–90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03836.x>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Samani, B., Charchi, A., 2023. Accommodation of slip direction data with Nuvel1, ITRF and GSRM data in the Borazjan fault system. *Adv. Appl. Geol.* 13(1), 26-39.

DOI : 10.22055/AAG.2022.39547.2265

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_17733.html

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

انطباق داده‌های راستای لغزش با داده‌های ITRF، Nuvel1 و GSRM در سامانه گسلی برازجان

بابک سامانی*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

عباس چرچی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

* b.samani@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

چکیده

تعیین راستا و سرعت حرکت پوسته در شناخت میدان‌های کرنش حاضر و فهم رخدادهای زمین ساختی حائز اهمیت می‌باشد. تاکنون مدل‌های مختلفی به منظور تعیین ویژگی‌های راستا و جهت حرکت پوسته ارائه شده است. در این مطالعه با استفاده از مدل‌های جهانی ITRF، Nuvel1 و GSRM به تهیه نقشه‌های جهت و سرعت حرکت پوسته در سامانه گسلی برازجان پرداخته شده است. بمنظور مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی‌های فوق با میدان کرنش کنونی، داده‌های راستای لغزش در سامانه گسلی برازجان برای دوازده زمین لرزه مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که راستای لغزش در سامانه گسلی برازجان با نتایج مدل سازی‌های ITRF، GSRM و Nuvel1 به ترتیب دارای ۵۸/۳، ۲۵ و ۱۶/۷ درصد مشابهت می‌باشند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که مدل ITRF دارای انطباق بیشتری با راستای لغزش در سامانه گسلی برازجان نسبت به سایر مدل‌ها است.

واژه‌های کلیدی: کرنش، حل کانون زمین لرزه، مدل جهانی Nuvel1، مدل جهانی ITRF، مدل جهانی GSRM

۱- مقدمه

زمین ساخت صفحه‌ای، یک نظریه کلیدی در توصیف بسیاری از پدیده‌های زمین شناسی می‌باشد. این نظریه در پاسخگویی به چگونگی شکل گیری اقیانوس‌ها، کوه‌زایی‌ها و علت وقوع زلزله‌ها بسیار راهگشا است. در طی تکامل این نظریه محققین زیادی تلاش کردند تا با استفاده از روش‌های مختلف به بیان کمی و کیفی مقدار و راستای حرکت پوسته بپردازند. در نظریه پایه زمین ساخت صفحه‌ای، صفحه‌ها صلب در نظر گرفته می‌شوند که به صورت هادی بسیار مؤثر تنش عمل می‌کنند (Wilson, 1993). بر اساس نظریات اولیه علم زمین‌ساخت تنش وارد بر حاشیه یک صفحه، بدون هیچ دگرشکلی در درون صفحه، به حاشیه مقابل آن منتقل می‌شود. به این ترتیب دگرشکلی فقط در حاشیه صفحه‌ها صورت می‌گیرد. اما با بررسی رفتار دقیق تر صفحه‌ها درخواهیم یافت که در بسیاری از مناطق (به ویژه در پوسته قاره‌ای) دگرشکلی در درون صفحه نیز اتفاق می‌افتد. این مدل در نگاه اول برای حرکات زمین‌ساختی در مقیاس بزرگ مناسب می‌باشد (Gordon, 1998). اما مناطق

نزدیک به مرزها، صلب نیستند و در آنها چین‌ها و گسل‌های زیادی تشکیل می‌شود (Gordon and Stein, 1992; Gordon, 1998, 2000). تاکنون روش‌های نسبی و مطلق مختلفی برای تعیین راستا و جهت حرکت صفحات زمین ساختی ارائه شده است. سرعت و جهت حرکت صفحات زمین ساختی با سه روش قابل محاسبه می‌باشد (Wilson, 1993):

- ۱- حرکت نسبی صفحات، ۲- حرکت مطلق (با استفاده از نقاط داغ)، ۳- حرکت نسبی ژئودتیک فضائی (داده‌های ماهواره‌ای).

حرکت صفحه‌ها بر سطح زمین را می‌توان با استفاده از قضیه اوپلر توصیف کرد. این قضیه بیان می‌کند که حرکت نسبی بین دو صفحه، منحصرأ با جدایش زاویه‌ای حول یک قطب حرکت نسبی، که قطب اوپلر نام دارد، تعریف می‌شود. این قطب و پاد-قطب آن، تنها دو نقطه‌ای در سطح زمین‌اند که نسبت به هیچ یک از دو صفحه حرکت نمی‌کنند. یک جنبه مهم حرکت نسبی صفحه، آن است که قطب هر دو صفحه برای زمان طولانی نسبت به آن‌ها ثابت می‌ماند. سرعت صفحه‌ها نیز برای دوره‌های چند میلیون ساله ثابت است (Wilson, 1993). امروزه می‌توان با

(Berberian, 1995). بنابراین پوسته ایران به شکل یک پوسته ناهمگن دارای ویژگی‌های دگرشکلی ناهمسان می‌باشد. اکنون ایران بصورت یک ورقه محصور شده در میان ورقه‌های لیتوسفری بوده و در اثر ادامه فرایند همگرایی از سوی صفحات آفر-عربی و اوراسیا تحت تاثیر رژیم زمین‌ساختی فشارشی قرار دارد. کمربند چین و راندگی زاگرس بخشی از کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا می‌باشد که در حاشیه شمال خاوری صفحه عربستان قرار گرفته است (Berberian and King, 1981). این کمربند کوهزایی شامل ۸ تا ۱۴ کیلومتر از رسوبات کامبرین تا عهد حاضر بوده که بر روی پی سنگ کامبرین قرار گرفته‌اند. تکامل ساختاری و زمین‌ساختی کمربند کوهزایی زاگرس در نتیجه سه رخداد اصلی الف) فرورانش پوسته اقیانوسی دریای نئوتتیس به زیر پوسته قاره‌ای ایران در طول کرتاسه پایینی، ب) جاگیری و رورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس بر روی حاشیه صفحه آفر-عربی و توسعه افیولیت‌های زاگرس در اواخر کرتاسه، ج) برخورد قاره ای-قاره ای صفحه آفر-عربی با صفحه ایران در اواخر کرتاسه به بعد صورت گرفته است (Alavi, 2004; 1994). در راستای شمال خاور به جنوب باختر، کمربند کوهزایی زاگرس شامل سه بخش اصلی: ۱) کمربند ماگمایی ارومیه دختر، ۲) کمربند دگرگونی سندانج-سیرجان و ۳) کمربند چین و رانده زاگرس با راستای شمال باختر-جنوب خاور می‌باشد. سنگ‌های دگرشکل شده کمربند دگرگونی سندانج-سیرجان نشان دهنده چندین فاز دگرشکلی در خود می‌باشند که آخرین فاز دگرشکلی نشان دهنده فرایند برخورد قاره‌ای بین صفحات آفر-عربی و ایران می‌باشد (Mohajjel and Fergusson, 2000, Mc Quarie, 2004). بر پایه انباشته‌های نمکی سری هرمز، زاگرس را می‌توان به دو بخش جنوب خاوری، یا «حوضه هرمز» و بخش شمال باختری، یا «حوضه اهواز» تقسیم کرد که مرز جدایی این دو، بر خطواره قطر-کازرون است (Berberian, 1995). سامانه گسلی قطر-کازرون در ایران شامل سه قطعه دنا، کازرون و برازجان با طول تقریبی ۴۰۰ کیلومتر می‌شود. سامانه گسلی کازرون-بrazجان از جمله شکستگی‌های بزرگی است که در جنوب ایران مرز زاگرس ساده چین خورده و فروافتادگی دزفول را تشکیل می‌دهد. این شکستگی در سطح زمین به صورت یک منطقه گسلی عریض است که دو روند شمالی جنوبی و کم و بیش موازی در آن دیده می‌شود. این دو روند در مجموع به صورت دو گسل

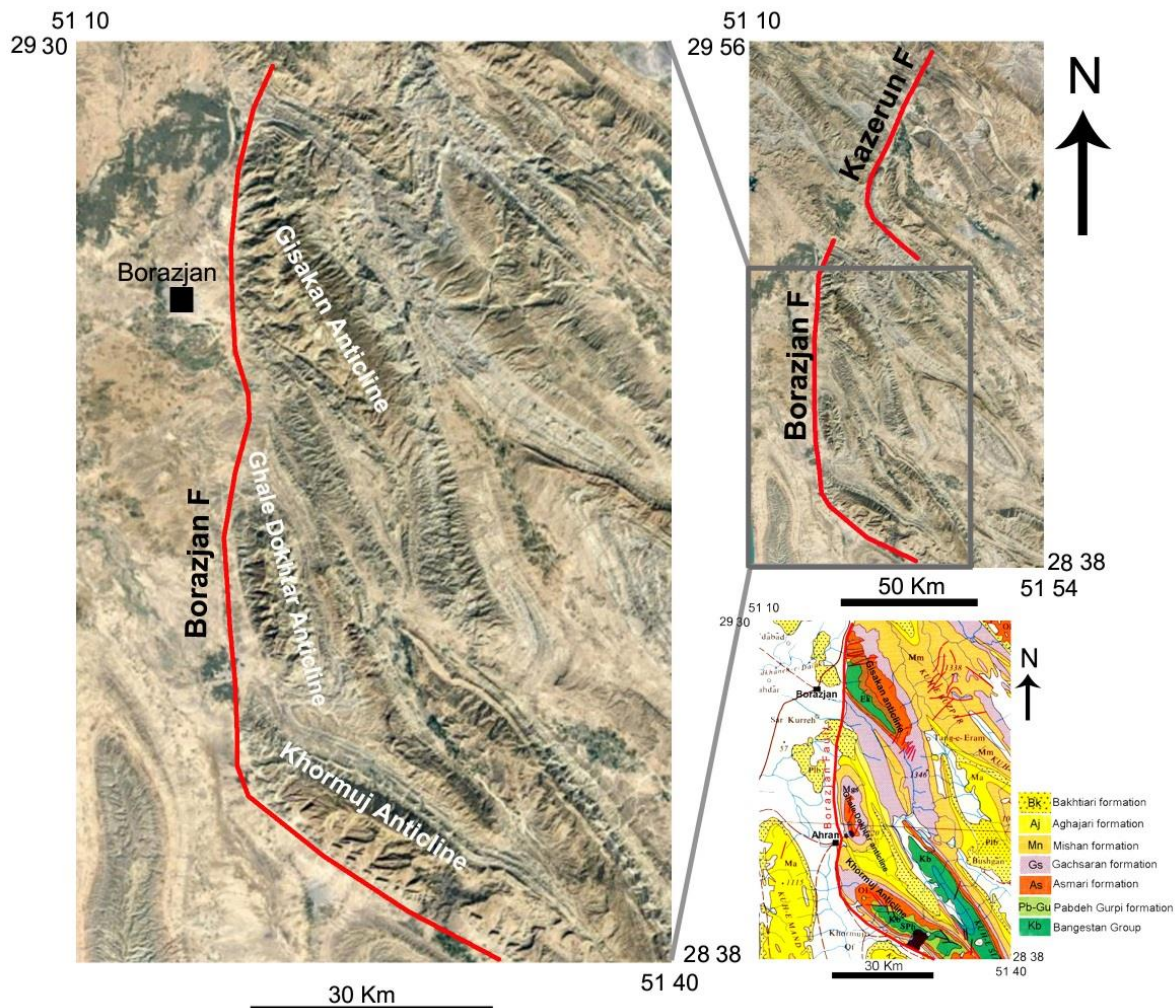
استفاده از روش ژئودزی فضایی سرعت نسبی بین دو صفحه را اندازه‌گیری و محاسبه کرد (Gordon and Stein, 1992). تا پیش از سال ۱۹۸۰ تنها از روش‌های ژئودزی استاندارد زمینی برای اندازه‌گیری خطوط مبنا با استفاده از فنون نوری یا ابزارهای فاصله‌سنج لیزری از جمله ژئودولیت استفاده می‌شد (Thatcher, 2003). این روش‌ها به طور قطع برای اندازه‌گیری حرکت نسبی صفحه‌ها که در حد چند میلی متر در سال است، دقت کافی دارد. اما در مطالعات بزرگ مقیاس، باید بتوان فاصله‌های بسیار طولانی را با دقت بسیار زیادی اندازه‌گیری کرد. خوشبختانه در سه دهه اخیر اندازه‌گیری خط مبناهای بسیار دراز (Very long baseline interferometry) با استفاده از روش‌های برون‌مرزی از راه به کارگیری فناوری فضایی، ممکن شده است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های مدل‌های جهانی Nuvel1 (Global plate motion model)، ITRF (International terrestrial reference frame) و GSRM (Global strain rate model) به تهیه نقشه‌های جهت و سرعت حرکت پوسته در دوازده نقطه از سامانه گسلی برازجان که دارای داده‌های حل صفحه گسل می‌باشند پرداخته شده است. با به کارگیری داده‌های حل سازوکار کانونی زمین لرزه، راستای لغزش در بخش‌های مختلف این سامانه گسلی تعیین گردید. بوسیله مقایسه داده‌های راستای لغزش در سامانه گسلی برازجان با داده‌های راستای حرکت پوسته‌ای حاصل از مدل‌های جهانی Nuvel1، ITRF و GSRM میزان درصد انطباق هر یک از مدل‌ها با راستای لغزش در این سامانه گسلی تعیین گردید. نهایتاً مدل سازگارتر با راستای لغزش در سامانه گسلی برازجان مشخص گردید.

۲- جایگاه زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه

کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا از کوه‌های آلپ در اروپای غربی شروع شده و تا شرق آسیا و کوه‌های هیمالیا در شمال شبه قاره هند ختم می‌شود (Stocklin, 1968). برخورد بین دو ابرقاره گندوانا در جنوب و اوراسیا در شمال، طی مراحل گوناگون کوهزایی آلپی سبب شکل گرفتن این کمربند شده است. پوسته فلات ایران نیز بخشی از این کمربند بوده و شامل سلسله جبال-هایی عظیم با روند شمال باختری-جنوب خاوری و خاوری-باختری می‌باشد. پوسته ایران شامل مجموعه‌ای از خرده قاره‌های گوناگونی است که از لبه شمالی ابرقاره گندوانا جدا شده و طی مراحل مختلف کوهزایی با یکدیگر برخورد کرده‌اند

قلعه دختر در بین آنها دارای محوری با راستای شمالی - جنوبی شده است و پرتگاه گسلی برازجان به وضوح از منطقه‌ای در شمال بندرعباس تا خورموج قابل مشاهده می‌باشد. چندین چشمه سولفوری و آبگرم در دامنه پرتگاه گسلی برازجان قرار دارند (Sepehr and Cosgorove, 2005).

کازرون و برازجان معرفی شده‌اند. گسل برازجان با طولی در حدود ۱۸۰ کیلومتر در جنوب گسل کازرون و با یک جهش راست پله قرار گرفته است (شکل ۱). در نتیجه جابجایی راستگرد در طول این گسل محور شمال غربی - جنوب شرقی تاقدیس‌های خورموج و گیسکان به سمت یک روند شمالی - جنوبی، کشیدگی و چین خوردگی پیدا کرده است و تاقدیس



شکل ۱- تصویر ماهواره ای و نقشه زمین شناسی از سامانه گسلی کازرون-برازجان
Fig. 1. Satellite image and geological map of Kazerun-Borazjan fault system

بمنظور مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی‌های فوق با میدان‌های کرنش کنونی با به کارگیری داده‌های کانونی دوازده زمین لرزه، راستای لغزش در این سامانه گسلی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با مقایسه نتایج حاصل از راستای لغزش و راستای حرکت پوسته‌ای حاصل از مدل‌های جهانی مختلف مدل سازگارتر با میدان‌های کرنش کنونی پوسته زمین در سامانه گسلی برازجان معرفی گردیده است.

۳- روش کار

در این مطالعه با استفاده از داده‌های حاصل از مدل‌های جهانی حرکت صفحات زمین‌ساختی، وضعیت راستا و سرعت حرکت پوسته در سامانه گسلی برازجان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. از این رو با استفاده از داده‌های مدل‌های جهانی ITRF، Nuvel1 و GSRM به تهیه نقشه‌های جهت و سرعت حرکت پوسته در سامانه گسلی برازجان پرداخته شده است.

۴- تعیین راستا و سرعت صفحات زمین‌ساختی

سرعت و جهت حرکت صفحات زمین‌ساختی را می‌توان با استفاده از حرکت نسبی صفحات، حرکت مطلق صفحات و حرکت نسبی ژئودتیک فضائی مورد تحلیل و بررسی قرار داد. در مطالعه حرکت نسبی و مطلق صفحات به ترتیب از مفهوم قطب اوپلر صفحات تکتونیکی و مفهوم نقاط داغ با مختصات ثابت و الگوی جزایر خطی استفاد می‌شود (Kearey and Vine, 2009). در روش اول با استفاده از الگوی گسلهای ترادبسی بین دو صفحه به تعیین موقعیت قطب اوپلر صفحات پرداخته می‌شود (Wilson, 1993). بیشینه سرعت گسترش، در استوای متناظر با قطب اوپلر رخ می‌دهد و میزان سرعت متناسب با کسینوس عرض قطب اوپلر کاهش می‌یابد (Wilson, 1993). در روش دوم با استفاده از نظریه نقاط داغ ثابت می‌توان سرعت مطلق صفحه‌ها را به دست آورد. در مورد یک صفحه منفرد قطب چرخش را می‌توان از یک نقطه داغ منفرد و آهنگ چرخش آن، که با استفاده از آهنگ آتشفشان خیزی در طول زنجیره محاسبه می‌شود، تعیین کرد (McDougall and Duncan, 1980). امروزه می‌توان با استفاده از روش‌های نوین ژئودزی به اندازه‌گیری سرعت نسبی بین دو صفحه اقدام نمود (Gordon and Stein, 1992). استفاده از فنون نوری یا ابزارهای فاصله‌سنج لیزری از جمله ژئودولیت، از مهمترین روشهای اندازه‌گیری راستا و سرعت حرکت صفحات تا پیش از سال ۱۹۸۰ می‌باشند (Thatcher, 1979). این روش‌ها به طور قطع برای اندازه‌گیری حرکت نسبی صفحه‌ها که در حد چند میلی‌متر در سال است، دقت کافی دارد اما برای مطالعه مسائل بزرگ مقیاس، با فاصله‌های بسیار طولانی فاقد دقت لازم می‌باشد (Thatcher, 1979). خوشبختانه در سه دهه اخیر اندازه‌گیری خط میناهای بسیار طویل با استفاده از روش‌های برون‌مرزی از راه به کارگیری فناوری فضائی، ممکن شده است. چهار روش مهم برای نقشه برداری برون‌مرزی وجود دارد. تداخل سنجی خط مینای بسیار دراز (VLBI)، فاصله یابی لیزری با ماهواره (SLR)، موقعیت‌یابی رادیوی با ماهواره (با استفاده از سیستم موقعیت جهانی) و ماهواره‌هایی با امکان داپلر. در روش VLBI از علایم رادیویی برون کپکشانی یا اخترنماها استفاده می‌شود (Carter and Robertson, 1986). نشانه دریافتی از یک اخترنمای معین به طور همزمان توسط دو یا چند رادیوتلسکوپ در دو یا چند نقطه مینا، که مسافت آن‌ها

ممکن است تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر برسد، ثبت می‌شود. از آنجا که مکان تلسکوپ‌ها در سطح زمین متفاوت است، نشانه‌های دریافتی، تأخیرهای متفاوتی دارند که بزرگی تأخیر بین دو ایستگاه با فاصله میان آن‌ها و جهت آمدن سیگنال‌ها متناسب است. فاصله‌یابی با ماهواره (SLR)، بوسیله اندازه‌گیری زمان سیر دو طرفه یک پ نب نور لیزر باز تابیده از ماهواره، محاسبه می‌شود (Cohen and Smith, 1985). سپس با استفاده از سرعت نور، زمان سیر به فاصله تبدیل می‌شود. اگر دو سیستم لیزر در دو محل مختلف به طور همزمان یک ماهواره را ردیابی کنند، مکان نسبی آن دو محل را می‌توان با استفاده از مدل دینامیکی حرکت ماهواره محاسبه کرد و از تکرار اندازه‌گیری‌ها، دقتی حدود ۸۰ میلی‌متر به دست می‌آید. سپس از تکرار دوره-ای این رصدها، می‌توان حرکت نسبی صفحه‌ها را تعیین کرد (Christodoulidis et al., 1985). در روش موقعیت‌یابی رادیویی با ماهواره، از تداخل سنجی رادیویی مربوط به ماهواره-های سیستم موقعیت‌یابی جهانی استفاده می‌شود (Dixon, 1991). این روش روشی سه‌بعدی است که با آن، موقعیت نسبی دستگاه‌ها در دو سر خط مینا، به کمک نشانه‌هایی که از چند ماهواره به دستگاه‌ها می‌رسد، تعیین می‌شود. رصد همزمان ماهواره‌های چندتایی با گیرنده‌های کوچک قابل حمل، امکان اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق را فراهم می‌سازد. این روش مؤثرترین راه برای ایجاد کنترل ژئودتیک بر نقشه‌برداری‌های محلی و ناحیه‌ای است (Kearey and Vine, 2009). روش DOIRS به این صورت است که یک ماهواره با ارسال چند فرکانس به مرجع زمین و برگشت این فرکانس، از مرجع زمینی به ماهواره مقدار تغییرات ایجاد شده در این فرکانس را بررسی می‌کند. به اختلاف ایجاد شده بین فرکانس رفت و برگشت اثر داپلر گفته می‌شود.

۵- مدل‌های جهانی محاسبه حرکات صفحات زمین

سازوکار مدل‌های جهانی مختلف برای تحلیل حرکت پوسته، با استفاده از بانک‌های اطلاعاتی متفاوت همچون تحلیل و بررسی نقاط اوپلر صفحات، سیستم ماهواره‌ای موقعیت یاب جهانی، فاصله یابی لیزری با ماهواره، تداخل سنجی خط مینای بسیار طویل، داده‌های ژئودزی زمینی، داده‌های حاصل از بردار لغزش زمین لرزه‌ها و داده‌های درون چاهی می‌باشد. در هر یک از مدل‌های جهانی از یک یا ترکیبی از چند دسته از داده‌های فوق استفاده می‌شود. اولین مدل از این دسته مدل‌ها، مدل (Global

المللی سیستمهای مرجع و چرخش زمین و با بکارگیری داده-هایی همچون تداخل سنجی خط مبنای بسیار دراز، فاصله یابی با ماهواره و سیستم ماهواره‌ای موقعیت یاب جهانی به مدل سازی حرکات صفحات زمین‌ساختی پرداخته است (Altamimi et al., 2007, 2011, 2016). مدل جهانی GSRM مدلی است که با استفاده از داده‌های ژئودزی زمینی برای محاسبه سرعت‌های افقی و میزان کرنش افقی سطح زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل از داده‌های حاصل از ۳۰۰۰ مطالعات ژئودزیکی، داده‌های موجود از ۵۰ نوع مقالات به‌روز، بردار و نرخ لغزش گسل‌ها و داده‌های درون چاهی استفاده شده است (Kreemer et al, 2018).

۶- ترسیم نقشه های سرعت و جهت حرکت پوسته

داده‌های مدل‌های جهانی حرکت پوسته‌ای Nuvel1، ITRF و GSRM در دوازده نقطه از محدوده سامانه گسلی برازجان با داده‌های لرزه‌ای بزرگتر از ۵ ریشتر و حل صفحه گسل از سایت‌های معتبر علمی استخراج گردید (جدول ۱). سپس با استفاده از نرم افزار Arc GIS نقشه‌های راستا و نرخ حرکت پوسته در سامانه گسلی برازجان ترسیم گردید.

Argus et al.,) می‌باشد (plate motion model Nuvel1). این مدل بعدها خود پایه و اساس مدل‌های جهانی دیگر مانند ITRF، GRSM و سایر مدل‌ها قرار گرفت (Altamimi et al., 2016; Prawirodirdjo and Bock, 2004). ساز و کار مدل Nuvel1، تحلیل و بررسی نقاط اویلر، و تعیین جهت بردار حرکتی آن‌ها، با مدل‌های ژئودزی زمینی برای ۱۲ صفحه زمین‌ساختی است. در این مدل صفحات عربی، استرالیا، هند، آمریکای شمالی و جنوبی به عنوان صفحات مجزا در نظر گرفته شده‌اند اما صفحات نامیبیا و سومالی به دلیل داده‌های نامطمئن به عنوان یک صفحه آفریقایی در نظر گرفته شده است. این مدل از جمع آوری ۱۱۲۲ داده ژئودزی تهیه شده است که شامل ۲۷۷ داده از مرز صفحات جدا شونده (پشته‌های اقیانوسی)، ۱۲۱ داده از آزمون گسل‌های تراس و ۷۲۴ داده از بردارهای لغزش زلزله می‌باشد (Argus et al., 2011). داده‌های Nuvel1 در جاهایی که به دلیل برخورد قاره‌ای مانند برخورد صفحات عربی- اوراسیا و برخورد صفحات هند- اوراسیا سرعت حرکت پوسته کاهنده است، خطاهایی را از خود نشان می‌دهد (Kearey and vine, 2009). مدل جهانی ITRF با استفاده از داده‌های حاصل از سرویس‌های اطلاعاتی مختلف همچون سرویس اطلاعاتی انجمن بین المللی ژئودزی، سرویس بین

جدول ۱- مقادیر عددی راستا و سرعت حرکت پوسته بر اساس مدل‌های جهانی مختلف

Table 1. Numerical amounts of crustal direction and velocity movement based on different global models

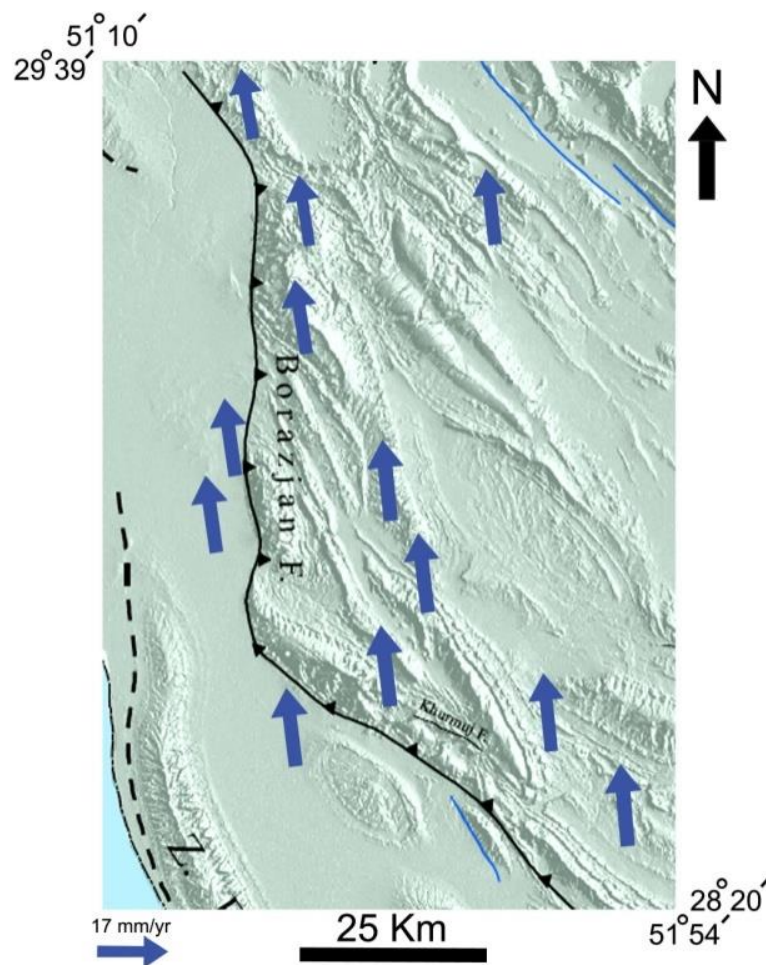
No	Nuvel1		GSRM		ITRF		Fault Slip direction Strike
	Velocity(mm/yr)	Strike	velocity(mm/yr)	Strike	velocity(mm/yr)	Strike	
1	17.15	350.66°	14.89	9.38°	16.44	42.15°	53°
2	17.25	351.52°	14.10	9.57°	16.36	42.06°	33°
3	17.96	351.83°	14.86	9.35°	16.00	42.80°	350°
4	18.70	352.26°	15.54	10.28°	16.52	42.50°	51°
5	18.66	352.81°	15.62	10.90°	16.21	43.21°	39°
6	18.95	353.11°	15.48	10.15°	16.81	43.81°	8°
7	19.58	353.93°	15.60	11.54°	17.72	44.22°	8°
8	19.18	354.46°	14.56	10.23°	17.77	34.77°	12°
9	19.98	355.88°	16.59	9.21°	17.81	45.91°	34°
10	19.31	353.63°	15.80	11.34°	16.46	44.36°	39°
11	19.73	354.55°	14.82	8.34°	16.34	43.54°	350°
12	18.43	353.03°	14.37	10.46°	16.21	43.41°	28°

حرکت صفحه‌ای دارای راستای شمال، شمال باختری- جنوب، جنوب خاوری بوده و نرخ حرکت پوسته در بخش‌های

نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی Nuvel1 نشان می‌دهد که راستای عمومی

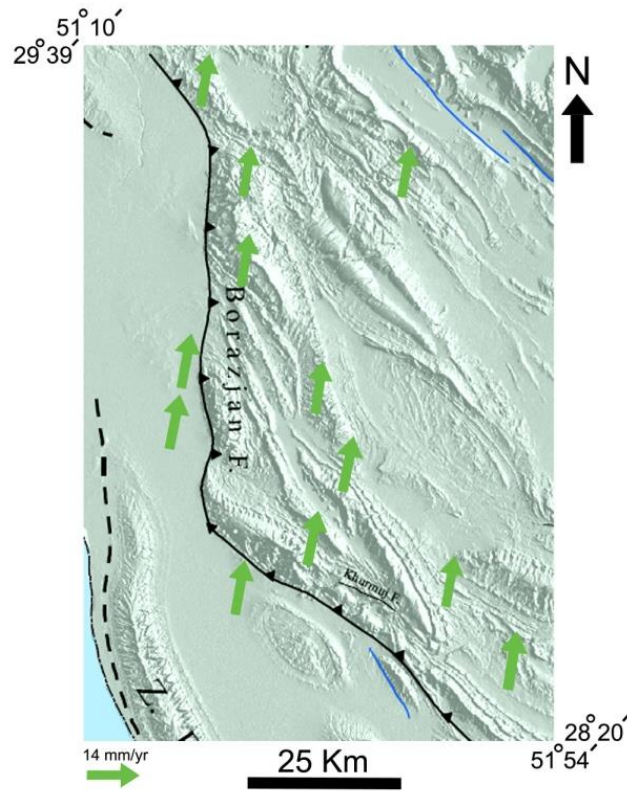
و همچون مدل GSRM میزان انحراف از شمال راستای حرکت در بخش‌های جنوبی سامانه گسلی کمی افزایش یافته است. نرخ سرعت حرکت پوسته از سمت شمال و شمال باختر به سمت جنوب و جنوب خاور افزایش می‌یابد (شکل ۴). مقایسه نتایج حاصل از سه مدل نشان می‌دهد که راستای حرکت پوسته در مدل‌های ITRF و GSRM دارای راستای تقریباً مشابهی (روند عمومی شمال خاوری- جنوب باختری و حرکت به سمت شمال خاور) بوده و مدل Nuvel1 راستایی با روند عمومی شمال باختری- جنوب خاوری و حرکت به سمت شمال باختر را برای پوسته در سامانه گسلی برازجان ارائه می‌دهد. درحالی‌که هر سه مدل نشان دهنده افزایش نرخ سرعت پوسته از سمت شمال، شمال باختر به سمت جنوب، جنوب خاور می‌باشند.

شمالی کمی کندتر از قسمت‌های جنوبی است. الگوی حاصله نشان می‌دهد که سرعت حرکت پوسته‌ای از شمال به جنوب و از باختر به خاور اندکی افزایش یافته است و راستای حرکت تمایل بیشتری به سمت راستای شمالی-جنوبی پیدا کرده است. (شکل ۲). نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی GSRM حاکی از آن است که راستای عمومی حرکت پوسته‌ای شمال خاوری- جنوب باختری بوده و در بخش‌های جنوبی میزان انحراف از شمال به تدریج افزایش می‌یابد. همچنین نرخ سرعت حرکت در بخش‌های جنوبی و جنوب خاوری نسبت به سایر بخش‌های سامانه گسلی برازجان دارای سرعت بیشتری می‌باشد. (شکل ۳). نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی ITRF نشان می‌دهد که راستای عمومی حرکت صفحه‌ای دارای راستای شمال خاوری- جنوب باختری بوده



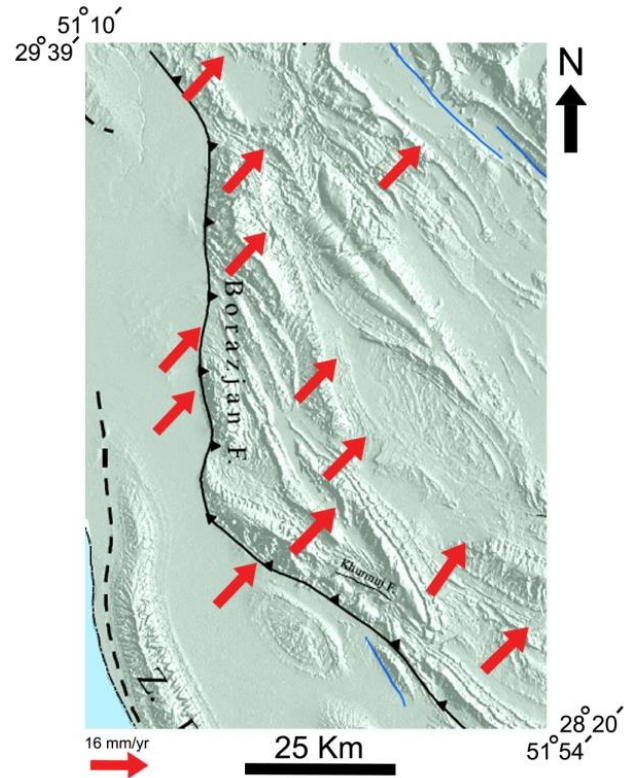
شکل ۲- نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی Nuvel1

Fig. 2. Movement direction and velocity of crustal movement map using Nuvel1 global model data



شکل ۳- نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی GSRM

Fig. 3. Movement direction and velocity of crustal movement map using GSRM global model data



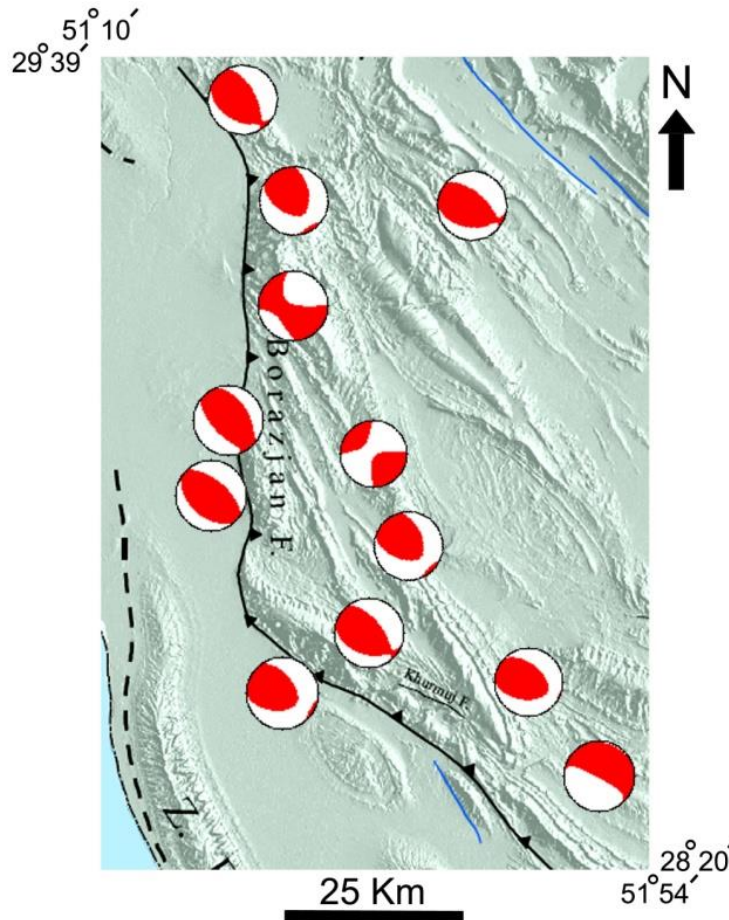
شکل ۴- جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی ITRF

Fig. 4. Movement direction and velocity of crustal movement map using ITRF global model data

۷- سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها

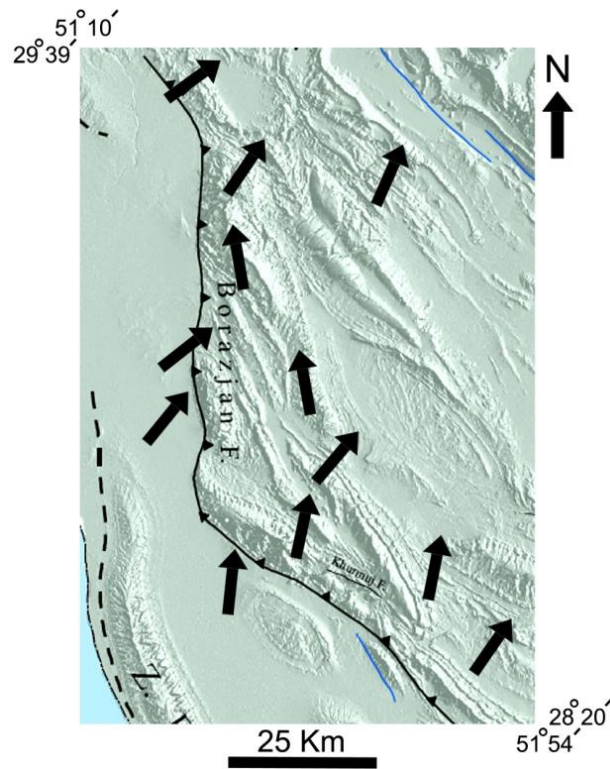
هنگامی که امواج لرزه‌ای ایجاد شده، توسط زمین لرزه‌ها، در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری سراسر جهان ثبت می‌شوند، می‌توان از آن‌ها برای تعیین ماهیت گسلش همراه با زمین لرزه‌ها، جهت-گیری صفحه گسل و وضعیت تنش سنگ کره استفاده کرد. نتایج چنین تحلیلی را حل سازوکار کانونی یا حل صفحه گسلی می‌نامند. این فن، روشی بسیار توانمند برای تحلیل حرکت‌های سنگ کره و بویژه حرکت‌های ناشی از نیروهای زمین‌ساخت صفحه‌ای است. از اطلاعات جهانی زمین لرزه‌هایی با بزرگی بیشتر از ۵ ریشتر می‌توان برای این موارد استفاده کرد و ضرورتی ندارد که ثبت‌کننده‌ها در محل زمین لرزه‌ها وجود داشته باشند. بنابراین داده‌ها برای مطالعه‌ی مستقیم مناطق دور از دسترس حاصل می‌شوند. با استفاده از بانک اطلاعات جهانی تنسور لحظه‌ای مرکزی (global centroid moment)

(catalog) داده‌های حل سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها برای دوازده زمین لرزه بزرگتر از ۵ ریشتر برای سامانه گسلی برازجان اخذ گردید. داده‌ها نشان می‌دهد که گسلش معکوس با مولفه امتدادلغز راستگرد، مکانیزم غالب در این سامانه گسلی می‌باشد (شکل ۵). با استفاده از مقایسه الگوی صفحات گره‌ای در استریوگرام‌های حل سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها با راستای اثر گسل بر روی نقشه، هندسه صفحه گسل و موقعیت خش لغز بر روی گسل تعیین گردید. سپس با استفاده از تصویر اندازی موقعیت خش لغز بر روی محیط شبکه استریونت راستای لغزش نسبی گسلش برای هر رخداد لرزه‌ای تعیین گردید. بر این اساس نقشه راستای لغزش برای هر رخداد لرزه‌ای در سامانه گسلی برازجان تهیه شد (شکل ۶). از آنجا که وقوع زلزله‌ها در ارتباط با جوان‌ترین رخدادهای زمین‌ساختی در پوسته زمین می‌باشند لذا نتایج حاصل از این تحلیل واند در ارائه راستای لغزش عهد حاضر در سامانه گسلی برازجان حائز اهمیت باشد.

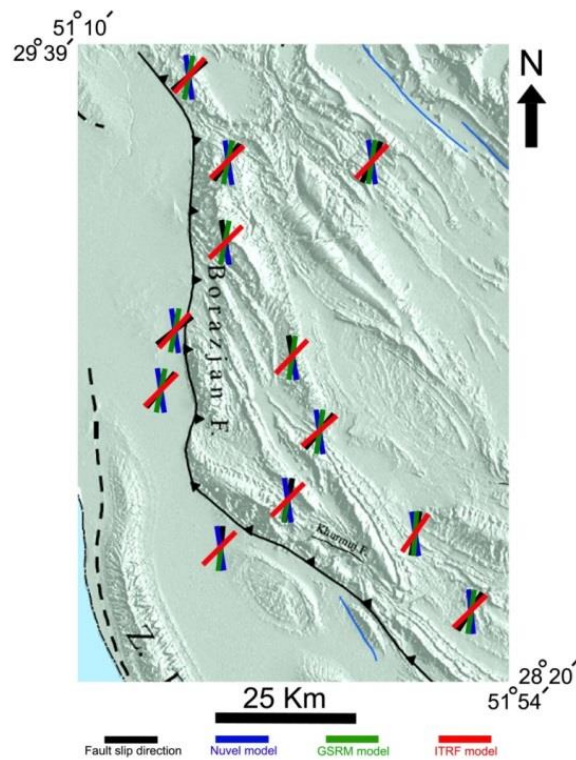


شکل ۵- حل صفحه گسل زلزله‌های با بزرگی بیشتر از ۵ ریشتر در سامانه گسلی برازجان

Fig. 5. Fault plane solution for earthquakes with magnitude more than 5 Richter in the Borazjan fault system



شکل ۶- بردارهای راستای لغزش در بخش‌های مختلف سامانه گسلی برازجان
 Fig. 6. Slip direction vectors in the different parts of Borazjan fault system



شکل ۷- مقایسه نتایج مدل‌های مختلف و راستای لغزش در سامانه گسلی برازجان
 Fig. 7. Comparison the results of different models and slip direction in the Borazjan fault system

۸- نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدل سازی‌های جهانی Nuvel1، ITRF و GRSM در تعیین جهت راستای حرکت و سرعت پوسته‌ای در سامانه گسلی برازجان نشان می‌دهد که الگوی راستای حرکت پوسته در این مدل‌ها یکسان نمی‌باشد. همچنین نتایج این مدل سازی‌ها حاکی از مقادیر متفاوت نرخ حرکت پوسته‌ای به ازای هر مدل در نقاط مختلف این سامانه گسلی می‌باشد. مقایسه نتایج مدل سازی‌های جهانی حرکات زمین‌ساختی حاکی از آن است که بطور عمومی میزان نرخ حرکت پوسته‌ای در سامانه گسلی برازجان از بخش‌های شمال و شمال باختری به سمت بخش‌های جنوب و جنوب خاوری در حال افزایش است. شاید بحث در خصوص علت این تغییر در الگوی میزان نرخ حرکت پوسته‌ای چندان راحت نباشد اما احتمالاً رفتارهای متفاوت بخش‌های مختلف پوسته در میدان‌های تنش ناحیه‌ای را بتوان بعنوان مهمترین عامل در مقادیر متفاوت نرخ حرکت پوسته‌ای در نظر گرفت. داده‌های حاصل از مدل سازی Nuvel1 نشان می‌دهد که راستای حرکت پوسته‌ای در بخش‌های مختلف سامانه گسلی برازجان یکسان نبوده و در بخش‌های مختلف حدوداً دارای ۵ درجه اختلاف شد (جدول ۱ و شکل ۲). همچنین بر اساس نتایج مدل سازی‌های GRSM و ITRF راستای

حرکت پوسته‌ای در سامانه گسلی برازجان به ترتیب دارای ۳ و ۱۰ درجه اختلاف در بخش‌های مختلف آن می‌باشد (جدول ۱) و شکل‌های ۳ و ۴). مقایسه نتایج راستای حرکت پوسته‌ای توسط مدل سازی‌های مختلف و راستای لغزش گسل در سامانه گسلی برازجان نشان می‌دهد که مدل جهانی ITRF دارای بهترین انطباق و سازگاری با راستای لغزش گسلی و میدانهای کرنش عهد حاضر در در این سامانه گسلی می‌باشد (شکل ۷). در این شکل بمنظور مقایسه بهتر راستاهای آزمایشی، نتایج حاصل از مدل سازی‌های مختلف با رنگهای متفاوت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که راستای لغزش در سامانه گسلی برازجان با نتایج مدل سازی‌های ITRF، GSRM و Nuvel1 به ترتیب دارای ۵۸/۳، ۲۵ و ۱۶/۷ درصد مشابهت می‌باشند. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان مدل جهانی ITRF را بعنوان مدل مناسب تر در مطالعات راستای حرکت پوسته‌ای در نظر گرفت.

قدردانی

بدین وسیله نویسندگان مقاله از حمایت ای مالی و معنوی صورت گرفته توسط معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.EG1401.341) درانجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایند.

مراجع

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretation. *Tectonophysics* 229, 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304, 1–20. <https://dx.doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>
- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C., 2007. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research* 89, 2-19.
- Altamimi, Z., Métivier, L., Collilieux, X., 2011. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research* 117, 231-243. <https://doi/full/10.1029/2001JB000561>
- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C., 2016. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research* 107, 2-19. <https://doi/10.1029/2011JB008930>
- Argus, D. F., Gordon, R. G., DeMets, C., 2011. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geophysics* 12, 333–42. <https://doi/10.1029/2011GC003751>
- Berberian, M., 1995. Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics* 241, 193–224. <https://doi/10.1016/004019519400185C>
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265. <https://doi/10.1139/e81-019>
- Carter, W.E. Robertson, D.S., 1986. Studying the earth by very long-baseline interferometry. *Geological Society of America* 255, 44–52.
- Christodoulidis, D.C. et al., 1985. Observing tectonic plate motions and deformations from satellite laser ranging. *Journal of Geophysical Research* 90, 49–63. <https://doi/10.1029/JB090iB11p09249>

- Cohen, S.C., Smith, P.E., 1985. LAGEOS scientific results: introduction. *Journal of Geophysical Research* 90, 17–20. <https://doi/abs/10.1029/JB090iB11p09217>
- Dixon, T.H., 1991. An introduction to the Global Positioning System and some geological applications. *Journal of Geophysical Research* 29, 249–76. <https://doi/10.1029/91RG00152>
- Gordon, R.G., 1998. The plate tectonic approximation: plate non-rigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions. *Earth planet* 26, 615–42. <https://doi/abs/10.1146/26.1.615>
- Gordon, R.G., 2000. Diffuse oceanic plate boundaries: strain rates, vertically averaged rheology, and comparisons with narrow plate boundaries and stable plate interiors. In Richards, M.A., Gordon, R.G., Van Der Hilst, R.D. *The History and Dynamics of Plate Motions*. *Geophysics* 121, 143–59. <https://doi/abs/10.1029/GM121p0143>
- Gordon, R.G., Stein, S., 1992. Global tectonics and space geodesy. *Science* 256, 333–42. <https://doi/10.1126/science.256.5055.333>
- Kearey, P., Vine, F. J., 2009. *Global tectonics*: John Wiley & Sons.
- Kreemer, C., Holt, W. E., Haines, A. J., 2018. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation. *Geophysical Journal International* 154, 8-34. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x>
- McDougall, I. Duncan, R.A., 1980. Linear volcanic chain recording plate motions? *Tectonophysics* 63, 275–95. [https://doi/10.1016/0040-1951\(80\)90117-1](https://doi/10.1016/0040-1951(80)90117-1)
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology* 26, 519–535. <https://doi/S0191814103001421>
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Structural Geology* 22, 1125–1139. [https://doi:10.1016/S0191-8141\(00\)00023-7](https://doi:10.1016/S0191-8141(00)00023-7)
- Prawirodirdjo, L., Bock, Y., 2004. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 105, 79-99. <https://doi/10.1029/2003JB002944>
- Sepehr, M. A., Cosgrove, J.W., 2005. Role of the Kazerun Fault Zone in the formation and deformation of the Zagros Fold-Thrust Belt Iran. *Tectonics* 24, TC5005, [doi:10.1029/2004TC001725](https://doi/10.1029/2004TC001725)
- Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran, a review, *A. A. P. G. Bull.*, 52(7), PP. 1229-1258.
- Thatcher, W., 1979. Systematic inversion of geodetic data in central California. *Geophysics* 84, 83–95. <https://doi/abs/10.1029/JB084iB05p02283>
- Thatcher, W., 2003. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. *Int. Geology review* 45, 191–212. <https://doi/abs/10.2747/0020-6814.45.3.191>
- Wilson, D.S., 1993. Confirmation of the astronomical calibration of the magnetic polarity timescale from sea floor spreading rates. *Nature* 364, 788–90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03836.x>