

Research Article**Comparison of global modeling data and focal mechanism, a criterion for investigating the direction of crustal movement in Khuzestan Province**Babak Samani^{1*}, Abbas Charchi¹, Ahmad Sodani¹

1- Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz

Keywords: Fault plain solution, Nuvel1 global model, ITRF global model, GSRM global model**1- Introduction**

With the formation of plate tectonics, it became possible to describe many geological phenomena. This theory responded to how seas formed and closed orogeny and the cause of earthquakes. During this theory's development, many scientists and researchers tried to use different methods to quantitatively and qualitatively express the amount and direction of crustal motion. Plates are considered rigid blocks in plate tectonics' basic theory, acting as significant stress conductors (Wilson, 1993). However, when we look closely at the plate's behavior, we find that deformation also takes place within the plate in many places (especially in the continental crust). At first glance, this model is suitable for large-scale tectonic movements (Gordon, 1998). However, the areas near the borders are not rigid and have many folds and faults (Gordon and Stein, 1992; Gordon, 1998, 2000). Various relative and absolute methods have been proposed to determine the direction and direction of tectonic plates' movement. The speed and direction of tectonic plates can be calculated by 1) Relative movement of pages, 2) Absolute motion, and 3) Relative motion of spatial geodesic. The motion of the plates on the ground can be described using Euler's theorem. Today, the relative speed 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 plates' relative motion, which is a few millimeters per year. Fortunately, in the last three decades, it has become possible to measure very long baselines using extraterrestrial methods through space technology. In this study, using the data of global models such as NUVEL1, ITRF, and GSRM, the direction and speed maps of the crust in twenty points of Khuzestan province that have fault plane solution data have been prepared. Accordingly, the direction of the current stress 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 plane solution and the results of global models were compared to identify a more appropriate model for future studies.

2- Materials and methods

In this study, using data from global models of tectonic plate motion, the states of direction and speed of crustal movement in the Khuzestan Province have been studied. Therefore, using the data of global models of Nuvel1, ITRF, and GSRM, the direction and speed maps of the crust in the Khuzestan Province have been prepared. Furthermore, the data obtained from the fault plane solution for twenty earthquakes in Khuzestan Province have also been evaluated to compare the above modeling results with the current stress fields. Finally, by drawing the results of fault plane solution and the direction of crustal motion obtained from different global models and

* Corresponding author: b.samani@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2021.36018.2188

Received 2020-12-09

Accepted 2021-02-01

drawing them on the rose diagram, a more compatible model with the current crustal stresses in Khuzestan Province has been determined.

3-Results and discussion

There are four essential methods for overseas mapping: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), Global Positioning System, and Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite (DORIS). The VLBI 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 satellites, radio interferometry related to satellites of the 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 the frequency from the ground reference to the satellite. The difference between the reciprocating frequencies is called the Doppler Effect. Mechanism of global models for crust motion analysis, using databases such as 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. This model's first 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 Nuvel1 model's mechanism analyses Euler points and determines their 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 GRSM model is a model that uses ground geodetic data to calculate the horizontal velocities and the horizontal strain of the earth's surface).

Nuvel1, ITRF, and GRSM global crustal motion models in twenty points in Khuzestan Province had seismic data with a magnitude of more than 5 Richter and fault plane solutions were extracted from reputable scientific sites. Then, directional maps and crusty movement rates in Khuzestan Province were drawn using GIS software. The crust's direction and rate of motion using Novel global model data show that the plate's general direction of motion has a northwest-southeast 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 crustal movement speed 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 GRSM global model data indicate that the crustal movement direction is northeast-southwest, and the movement speed rate in the southeastern parts is higher than in other parts of the province.

4- Conclusions

The results of Nuvel1, ITRF, and GRSM global modeling in determining the direction of motion and crust speed in Khuzestan Province show that the pattern of crustal motion direction is not the same in these models. Also, these models' results indicate different movement values for each model in the province. Global modelling results indicate that, generally, the rate of crustal movement in Khuzestan Province from the north and northwest to the south and southeast is increasing mode. Using the transfer of crust directional data obtained from global modeling of Nuvel1, ITRF, and GRSM with the results of strain field analysis, resulting from the fault plane solution on the stereonet and drawing a rose diagram, it was found that the global ITRF model has the best adaptation to the present strain fields and the direction of crustal movement in the Khuzestan Province.



References

- Altamimi, Z., Métivier, L., Collilieux, X., 2011. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research* 117, 231-243.
- 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., 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.
- 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.
- Carter, W.E., Robertson, D.S., 1986. Studying the earth by very long-baseline interferometry. *Scientific American* 255, 44-52.
- Cohen, S.C., Smith, P.E., 1985. LAGEOS scientific results. *Journal of Geophysical Research* 90, 17-20.
- Dixon, T.H., 1991. An introduction to the Global Positioning System and some geological applications. *Reviews of Geophysics* 29, 249-76.
- Gordon, R.G., 1998. The plate tectonic approximation: plate non-rigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 26, 615-42.
- 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. (eds) *The History and Dynamics of Plate Motions*. *Geophysics* 121, 143-59.
- Gordon, R.G., Stein, S., 1992. Global tectonics and space geodesy. *Science* 256, 333-42.
- 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.
- Niell, A.E et al., 1979. Comparison of a radiointerferometric differential baseline measurement with conventional geodesy. *Tectonophysics* 52, 49-58.
- 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.
- Thatcher, W., 2003. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. *International Geology Review* 45, 191-212.
- Wilson, D.S., 1993. Confirmation of the astronomical calibration of the magnetic polarity timescale from seafloor spreading rates. *Nature* 364, 788-90.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Samani, B., Charchi, C., Sodani, A., 2022. Comparison of global modeling data and focal mechanism, a criterion for investigating the direction of crustal movement in Khuzestan Province. *Adv. Appl. Geol.* 12(2), 225-237.

DOI: 10.22055/AAG.2021.36018.2188.

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16816.html?lang=en



مقایسه داده‌های مدلسازی جهانی و حل ساز و کارکانونی زمین لرزه، معیاری جهت بررسی راستای حرکت پوسته در استان خوزستان

بابک سامانی*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

عباس چرچی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

احمد سودانی

کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

*b.samani@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۳

چکیده

تعیین راستا و سرعت حرکت پوسته در شناخت میدان‌های تنش و کرنش عهد حاضر و فهم رخداد‌های زمین‌ساختی حائز اهمیت می‌باشد. تاکنون مدل‌های جهانی مختلفی به منظور تعیین ویژگی‌های راستا و جهت حرکت پوسته ارائه شده است. در این مطالعه با استفاده از مدل‌های جهانی Nuvel1، ITRF و GSRM به تهیه نقشه‌های جهت و سرعت حرکت پوسته در استان خوزستان پرداخته شده است. به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های فوق با میدان‌های تنش و کرنش کنونی، داده‌های حاصل از حل صفحه گسل برای بیست زمین لرزه در استان خوزستان نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که راستای حرکت پوسته در استان خوزستان با نتایج مدل سازی ITRF دارای انطباق بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها بوده و می‌توان این مدل را به عنوان مدل مناسب‌تر برای اخذ داده‌ها و تحلیل‌ها در انجام مطالعات آینده در نظر گرفت.

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

مقدمه

تعیین راستا و جهت حرکت صفحات زمین‌ساختی ارائه شده است. سرعت و جهت حرکت صفحات زمین‌ساختی با سه روش قابل محاسبه می‌باشد (Wilson, 1993): ۱- حرکت نسبی صفحات، ۲- حرکت مطلق (با استفاده از نقاط داغ) و ۳- حرکت نسبی ژئودتیک فضائی (داده‌های ماهواره‌ای). حرکت صفحه‌ها بر سطح زمین را می‌توان با استفاده از قضیه اولر توصیف کرد. این قضیه بیان می‌کند که حرکت نسبی بین دو صفحه، منحصراً با جدایش زاویه‌ای حول یک قطب حرکت نسبی، که قطب اولر نام دارد، تعریف می‌شود. این قطب و پادقطب 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 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 مینا 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 درحد

با شکل‌گیری نظریه زمین‌ساخت صفحه‌ای، توصیف بسیاری از پدیده‌های زمین‌شناسی ممکن شد. این نظریه به چگونگی تشکیل و بسته شدن اقیانوسها، کوه‌زایی‌ها، علت وقوع زلزله و ... پاسخ داد. در طی تکامل این نظریه دانشمندان و محققین زیادی تلاش کردند تا با استفاده از روش‌های مختلف به بیان کمی و کیفی مقدار و جهت حرکت پوسته بپردازند. در نظریه پایه زمین‌ساخت 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 وقتی رفتار صفحه را از نزدیک بررسی می‌کنیم در می‌یابیم در بسیاری محل‌ها (به ویژه در پوسته قاره‌ای) دگرشکلی در درون صفحه نیز صورت می‌گیرد. 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

به جنوب باختر، کمربند کوهزایی زاگرس شامل سه بخش اصلی: (۱) کمربند ماگمایی ارومیه - دختر، (۲) کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان و (۳) کمربند چین و رانده زاگرس با راستای شمال باختر - جنوب خاور می باشد. سنگ‌های دگرشکل شده کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان نشان دهنده چندین فاز دگرشکلی در خود می باشند که آخرین فاز دگرشکلی نشان دهنده فرایند برخورد قاره‌ای بین صفحات آفری - عربی و ایران می باشد (Mohajjel and Fergussen, 2000, Mc Quarie, 2004). بر پایه انباشته‌های نمکی سری هرمز، زاگرس را می توان 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). استان خوزستان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش می باشد. این استان یکی از استانهای جنوب باختری کشور بوده که از دیدگاه زمین‌ساختی شامل منطقه زمین‌ساختی زاگرس و پهنه فروافتاده دزفول و دشت آبادان است. از نگاه زمین‌ریخت‌شناسی چهار چهره ریخت‌شناسی غالب در استان خوزستان حاکم است (شکل ۱). از سمت شمال خاور به جنوب باختر می توان مناطق کوهستانی زاگرس با ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر، مناطق کوهستانی کم ارتفاع با ارتفاع ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ متر، تپه ماهورها و بدلندها با ارتفاع ۵۰ تا ۳۰۰ متر و مناطق جلگه‌ای کم ارتفاع با ارتفاع کمتر از ۵۰ متر را مشخص نمود. از لحاظ لرزه‌زمین‌ساختی، ویژگی‌های زمین لرزه‌ها بویژه در بخش‌های شمالی استان عموماً از ویژگی و سرشت لرزه‌خیزی منطقه زاگرس طبیعت می کند. به گونه‌ای که زلزله‌ها دارای فراوانی بالا و بزرگای کوچک بوده و عموماً دارای عمق کانونی کم می باشند. در بخش‌های جنوبی استان و مناطق جلگه‌ای و دشتی خوزستان فراوانی زلزله‌ها کمتر شده و عموماً زلزله‌هایی با بزرگای کوچکتر از ۴ ریشتر، رخدادهای لرزه‌ای غالب می باشند. شکل ۲ پراکنندگی مکانی رومرکز رخدادهای لرزه‌ای ۳ ریشتر و بزرگتر در باجه زمانی ۱۹۶۴ تا ۲۰۱۹ را نشان می‌دهد.

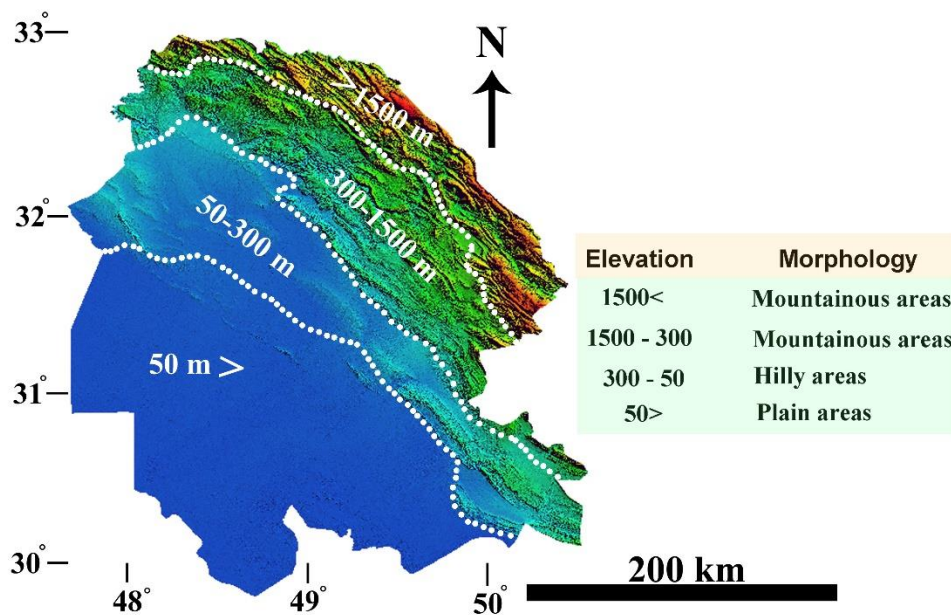
روش کار

در این مطالعه با استفاده از داده‌های حاصل از مدل‌های جهانی حرکت صفحات زمین‌ساختی، وضعیت راستا و سرعت حرکت پوسته در پهنه استان خوزستان 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 استان خوزستان پرداخته شده است. بمنظور مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی‌های فوق با میدان‌های تنش کنونی داده‌های حاصل از حل صفحه گسل برای بیست زمین لرزه در استان خوزستان نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با ترسیم نتایج حاصل از حل صفحات گسل و راستای حرکت پوسته‌ای حاصل از مدل‌های جهانی مختلف و ترسیم آنها بر روی نمودار گل‌سرخ‌ی مدل سازگارتر با میدان‌های تنش کنونی پوسته زمین در استان خوزستان معرفی گردیده است.

چند میلی متر در سال است، دقت کافی دارد. اما در مطالعات بزرگ مقیاس، باید بتوانیم فاصله‌های بسیار طولانی را با دقت بسیار زیادی اندازه‌گیری کنیم. خوشبختانه در سه دهه اخیر اندازه‌گیری خط مبنای بسیار دراز (Very long baseline interferometry) با استفاده از روش‌های برون‌مرزی از راه به کارگیری فناوری فضائی، ممکن شده است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های مدل‌های جهانی Nuvel1 (International ITRF, Global plate motion model) (Global strain rate GSRM و terrestrial reference frame) model) به تهیه نقشه‌های جهت و سرعت حرکت پوسته در بیست نقطه از استان خوزستان که دارای داده‌های حل صفحه گسل می‌باشند پرداخته شده است. بر این اساس به مقایسه راستای میدان‌های تنش کنونی با نتایج حاصل از مدل‌های جهانی Nuvel1, ITRF و GSRM پرداخته شده است. در انتها به برآورد میزان انطباق نتایج حاصل از حل صفحات گسل و نتایج مدل‌های جهانی حرکت پوسته‌ای Nuvel1, ITRF و GSRM به منظور شناخت مدل مناسب‌تر جهت مطالعات آینده پرداخته شده است.

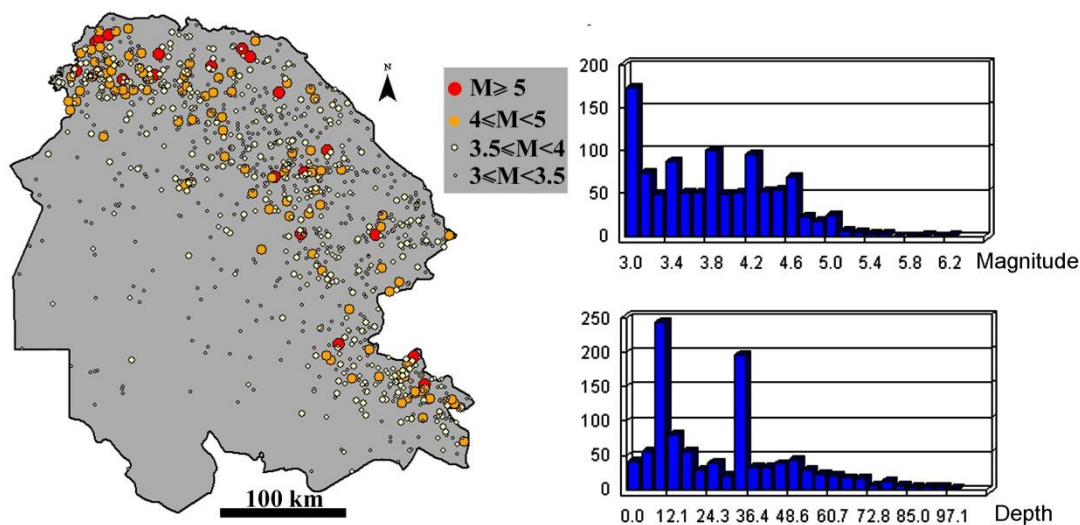
جایگاه زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه

کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا یکی از پرتکاپوترین کمربندهای کوهزایی در کره زمین است. این کمربند کوهزایی از کوه‌های آلپ در اروپای غربی شروع شده و تا شرق آسیا ادامه دارد و به 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 آلپ سبب شکل گرفتن این کمربند شده است. پوسته فلات ایران نیز بخشی از این کمربند بوده و شامل سلسله جبال‌هایی 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 (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 آفری - 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 می‌باشد که بر روی پی سنگ کامبرین قرار گرفته اند. تکامل ساختاری و زمین‌ساختی کمربند کوهزایی زاگرس در نتیجه سه رخداد اصلی الف) فروانش پوسته اقیانوسی دریای نئوتتیس به زیر پوسته قاره‌ای ایران در طول کرتاسه پایینی، ب) جاگیری و رورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس بر روی حاشیه صفحه آفری - عربی و توسعه اقیولیت های زاگرس در اواخر کرتاسه، ج) برخورد قاره ای- قاره‌ای صفحه آفری - عربی با صفحه ایران در اواخر کرتاسه به بعد صورت گرفته است (Alavi, 1994, 2004). در راستای شمال خاور



شکل ۱- نقشه پهنه بندی استان خوزستان بر اساس واحدهای ریخت شناسی.

Fig. 1. The morphological zoning map of the Khuzestan Province.



شکل ۲- پراکندگی مکانی رومرکز رخدادهای لرزه‌ای (۱۹۶۴-۲۰۱۹) و نمودارهای ستونی بزرگی و عمق زلزله‌ها در استان خوزستان.

Fig. 2. Earthquakes epicentral distribution (1964-2019) and the histogram of earthquakes magnitude and depth in the Khuzestan Province.

ترادسی بین دو صفحه به تعیین موقعیت قطب اوایل صفحات پرداخته می‌شود (Wilson, 1993). بیشینه سرعت گسترش، در استوای متناظر با قطب اوایل رخ می‌دهد و میزان سرعت متناسب با کسینوس عرض قطب اوایل 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

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 اوایل صفحات تکتونیک و مفهوم نقاط داغ با مختصات ثابت و الگوی جزایر خطی استفاده می‌شود (Kearey and vine, 2009). در روش اول با استفاده از الگوی گسلهای

روش مؤثرترین راه برای ایجاد کنترل ژئودتیک بر نقشه برداری‌های 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.

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، فاصله‌یابی لیزری با ماهواره، تداخل سنجی خط مبنای بسیار طولی، 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 مدل Nuvel1 (Global plate motion model) می‌باشد (Argus et al., 2011). این مدل بعدها پایه و اساس مدل‌های جهانی دیگر مانند ITRF، GRSM و ... قرار گرفت (Altamimi et al., 2016; Prawirodirdjo and Bock, 2004).

ساز و کار مدل Nuvel1، تحلیل و بررسی نقاط اوپلر و تعیین جهت بردار حرکتی آن‌ها، با مدل‌های ژئودزی زمینی برای ۱۲ صفحه زمین-ساختی است. در این مدل صفحات عربی، استرالیا، هند، آمریکای شمالی و جنوبی به عنوان صفحات مجزا در نظر گرفته شده‌اند اما صفحات نامبیا و سومالی به دلیل داده‌های نامطمئن به عنوان یک صفحه افریقایی در نظر گرفته شده است. این مدل از جمع‌آوری ۱۱۲۲ داده ژئودزی تهیه شده است که شامل ۲۷۷ داده از مرز صفحات جدا شونده (پشته‌های اقیانوسی)، ۱۲۱ داده از آزمون گسل‌های ترادیس 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، خط‌هایی 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 المللی سیستم‌های مرجع و چرخش زمین و با بکارگیری داده‌هایی همچون تداخل سنجی خط مبنای بسیار دراز، فاصله‌یابی با ماهواره و سیستم ماهواره‌ای موقعیت یاب جهانی به مدل سازی حرکات صفحات زمین ساختی 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).

خیزی در طول زنجیره محاسبه می‌شود، تعیین کرد (McDougall and Duncan, 1980). امروزه می‌توان با استفاده از روش ژئودزی فضایی سرعت نسبی بین دو صفحه را اندازه‌گیری و محاسبه کرد (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 میلی متر 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 مبنای بسیار طولی با استفاده از روش‌های برون مرزی از راه به کارگیری فناوری فضایی، ممکن شده است. چهار روش مهم برای نقشه برداری برون مرزی وجود دارد. تداخل سنجی خط مبنای بسیار دراز^۱ (VLBI)، فاصله‌یابی لیزری با ماهواره^۲ (SLR)، موقعیت‌یابی رادیویی با ماهواره (با استفاده از سیستم موقعیت جهانی^۳) و ماهواره‌هایی با امکان داپلر^۴ (DORIS). در روش VBLI از علائم رادیویی برون کهکشانی یا اخترنماها استفاده می‌شود (Niell et al., 1979; Carter and Robertson, 1986). نشانه دریافتی از یک اخترنمای معین به طور همزمان توسط دو یا چند رادیوتلسکوپ در دو یا چند نقطه مبنای، 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 تپ 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 میلی متر 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 ماهواره‌های سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) استفاده می‌شود (Dixon, 1991). این روش روشی سه‌بعدی است که با آن، موقعیت نسبی دستگاه‌ها در دو سر خط مبنای، 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

- 1- Very long baseline interferometry
- 2- Satellite laser ranging
- 3- Global Positioning System
- 4- Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite

نتایج
ترسیم نقشه‌های سرعت و جهت حرکت پوسته

داده‌های مدل‌های جهانی حرکت پوسته‌ای ITRF، Nuvel1 و GSRM در بیست نقطه از محدوده استان خوزستان با داده‌های لرزه‌ای

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

Table 1. The numerical amounts of direction and velocity of crustal movement based on the different global models.

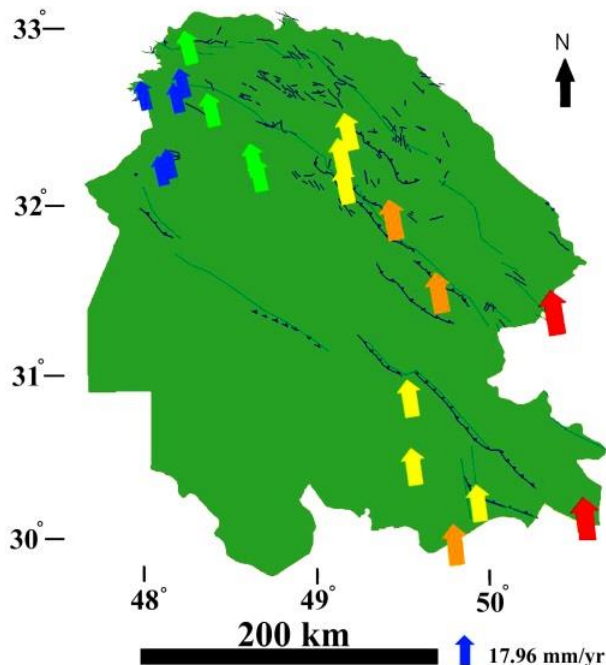
No	Nuvel1 Velocity(mm/yr)	Nuvel1 Strike	GSRM velocity(mm/yr)	GSRM Strike	ITRF velocity(mm/yr)	ITRF Strike
1	19.19	350.66°	15.89	9.48°	15.14	41.14°
2	18.28	347.52°	15.10	7.57°	15.06	40.06°
3	17.96	343.93°	14.86	7.35°	15.00	39.80°
4	18.70	348.76°	15.54	8.28°	16.50	40.50°
5	18.61	351.91°	15.62	10.90°	15.21	41.21°
6	17.99	346.90°	14.88	7.30°	16.81	39.81°
7	18.58	347.75°	15.30	7.54°	17.22	40.22°
8	18.18	346.46°	14.96	6.79°	16.77	39.77°
9	18.80	349.88°	15.59	9.11°	16.81	40.81°
10	18.81	352.63°	15.80	11.34°	16.46	41.46°
11	18.77	354.55°	14.89	6.04°	17.54	39.54°
12	18.71	353.03°	15.77	11.74°	17.51	41.51°
13	17.97	345.92°	15.73	6.51°	16.57	39.57°
14	18.28	347.31°	15.08	7.41°	17.01	40.01°
15	18.63	351.04°	15.57	10.18°	17.02	41.02°
16	19.18	353.27°	16.07	11.61°	18.75	41.75°
17	18.57	348.10°	15.32	7.83°	18.30	40.30°
18	18.62	347.47°	15.31	7.27°	18.17	40.17°
19	18.08	346.12°	14.88	6.59°	18.65	39.65°
20	18.11	345.97°	14.88	6.44°	18.63	39.63°

افزایش یافته است (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 و نرخ سرعت حرکت پوسته از سمت شمال باختر به سمت جنوب خاور افزایش می‌یابد (شکل ۴). نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی GSRM حاکی از آن است که راستای حرکت

نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی Nuvel1 نشان می‌دهد که راستای عمومی حرکت صفحه‌ای دارای راستای شمال باختری - جنوب خاوری بوده و نرخ حرکت پوسته در قسمت‌های شمالی (پیکان‌های آبی‌رنگ) کندتر از قسمت‌های خاوری و جنوب خاوری (پیکان‌های قرمز رنگ) است. الگوی حاصله نشان می‌دهد که سرعت حرکت پوسته‌ای از شمال به جنوب و از باختر به خاور

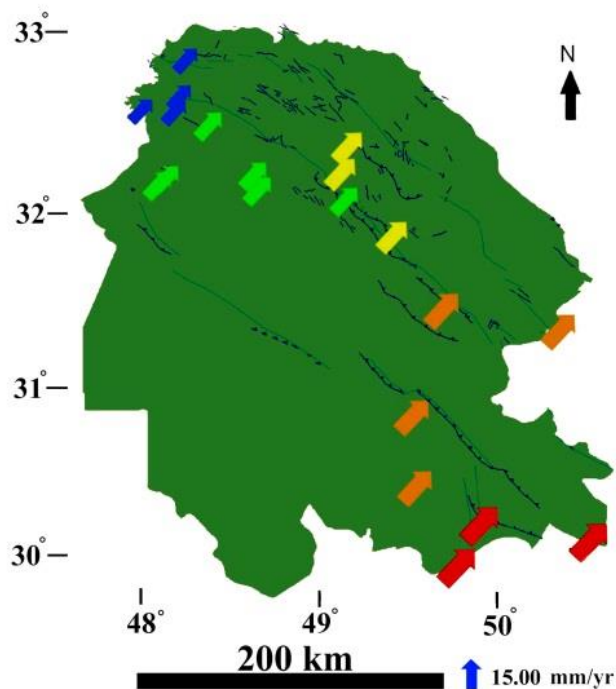
بوده و مدل Nuvel1 راستایی با روند عمومی شمال باختری - جنوب خاوری و حرکت به سمت شمال باختر را برای پوسته استان خوزستان ارائه می‌دهد. درحالیکه هر سه مدل نشان دهنده افزایش نرخ سرعت پوسته از سمت شمال باختر به سمت جنوب خاور می‌باشند.

پوسته‌ای شمال خاوری - جنوب باختری بوده و نرخ سرعت حرکت در بخش‌های جنوب خاوری از سایر نقاط استان بیشتر می‌باشد (شکل ۵). 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)



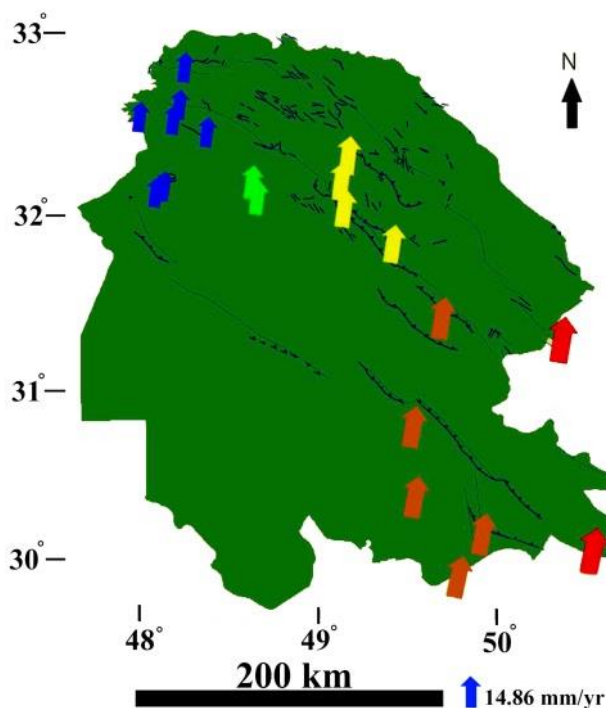
شکل ۳- نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی Nuvel1.

Fig. 3. The map showing direction and velocity of crustal movement using Nuvel1 global model data



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

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



شکل ۵- نقشه جهت و نرخ حرکت پوسته با استفاده از داده‌های مدل جهانی GSRM.

Fig. 5. The map showing direction and velocity of crustal movement using GSRM global model data.

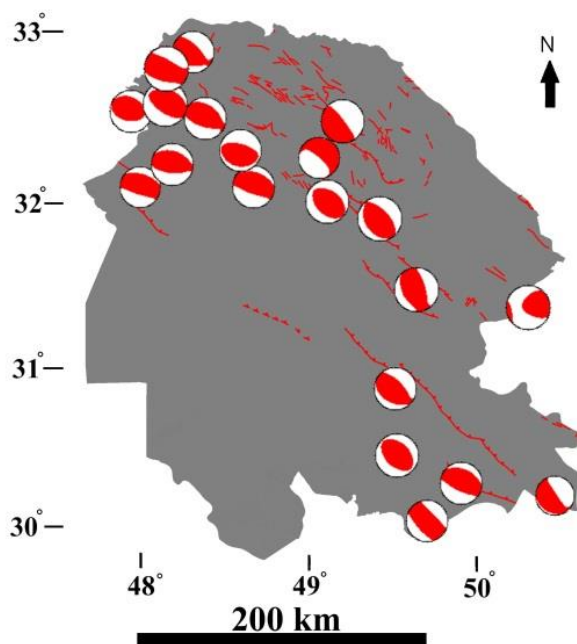
با جوان‌ترین حالات تنش در پوسته زمین بوده لذا نتایج حاصل از این تحلیل قابل اطمینان‌ترین نتایج از راستای میدان‌های تنش و کرنش عهد حاضر در پهنه استان خوزستان را نشان خواهد داد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل سازی‌های جهانی ITRF، Nuvel1 و GRSM در تعیین جهت راستای حرکت و سرعت پوسته ای در استان خوزستان 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 استان می‌باشد. مقایسه نتایج مدل سازی‌های جهانی حرکات زمین‌ساختی حاکی از آن است که بطور عمومی میزان نرخ حرکت پوسته‌ای در استان خوزستان از بخش‌های شمال و شمال باختری به سمت بخش‌های جنوب و جنوب خاوری در حال افزایش است. با استفاده از انتقال داده‌های راستای حرکت پوسته‌ای حاصل از مدل سازی‌های جهانی ITRF، Nuvel1 و GRSM و نتایج تحلیل میدان کرنش حاصل از حل صفحات گسل بر روی شبکه استریونوت و ترسیم دیاگرام گل‌سرخ به منظور مقایسه نتایج (شکل ۸)، مشخص شد که مدل جهانی ITRF دارای بهترین انطباق و سازگاری با میدان‌های کرنش و راستای حرکت پوسته‌ای عهد حاضر در استان خوزستان می‌باشد.

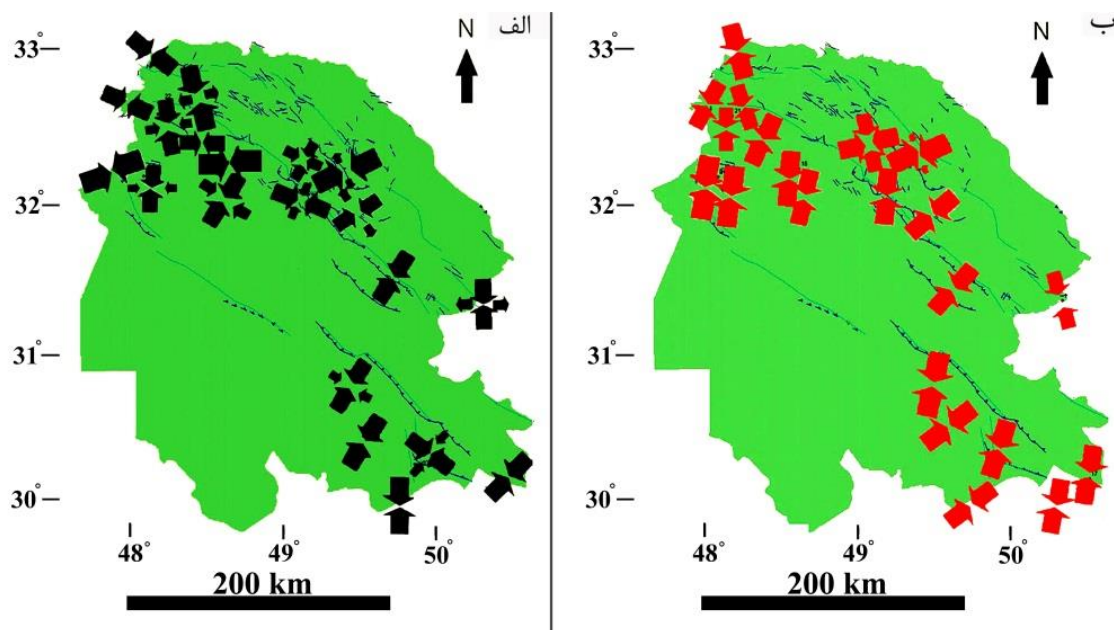
سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها

هنگامی که امواج لرزه‌ای ایجاد شده، توسط زمین‌لرزه‌ها، در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری سراسر جهان ثبت می‌شوند، می‌توان از آن‌ها برای تعیین ماهیت گسلش همراه با زمین‌لرزه‌ها، جهت‌گیری صفحه گسل و وضعیت تنش سنگ‌کره استفاده کرد. نتایج چنین تحلیلی را حل سازوکار کانونی یا حل صفحه گسلی می‌نامند. این فن، روشی بسیار توانمند برای تحلیل حرکت‌های سنگ‌کره و بویژه حرکت‌های ناشی از نیروهای زمین‌ساخت صفحه‌ای است. از اطلاعات جهانی زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بیشتر از ۵ ریشتر می‌توان برای این موارد استفاده کرد و ضرورتی ندارد که ثبت‌کننده‌ها در محل زمین‌لرزه‌ها 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 بیست زمین لرزه بزرگتر از ۵ ریشتر برای استان خوزستان اخذ گردید. داده‌ها نشان می‌دهد که گسلش معکوس، مکانیزم غالب در پهنه استان خوزستان می‌باشد (شکل ۶). با استفاده از نرم افزار T-tecto و با استفاده از روش وارونه‌سازی (Inversion method) داده‌ها به تحلیل تنش و کرنش در کانون زمین لرزه‌ها پرداخته شد و راستای محورهای اصلی تنش و کرنش در محل رومرکز زلزله‌ها ترسیم گردید (شکل a و b). از آنجا که وقوع زلزله‌ها در ارتباط



شکل ۶- حل صفحه گسل زلزله‌های با بزرگی بیشتر از ۵ ریشتر در استان خوزستان.

Fig. 6. Fault plane solution of earthquakes with $M > 5$ in the Khuzestan Province.

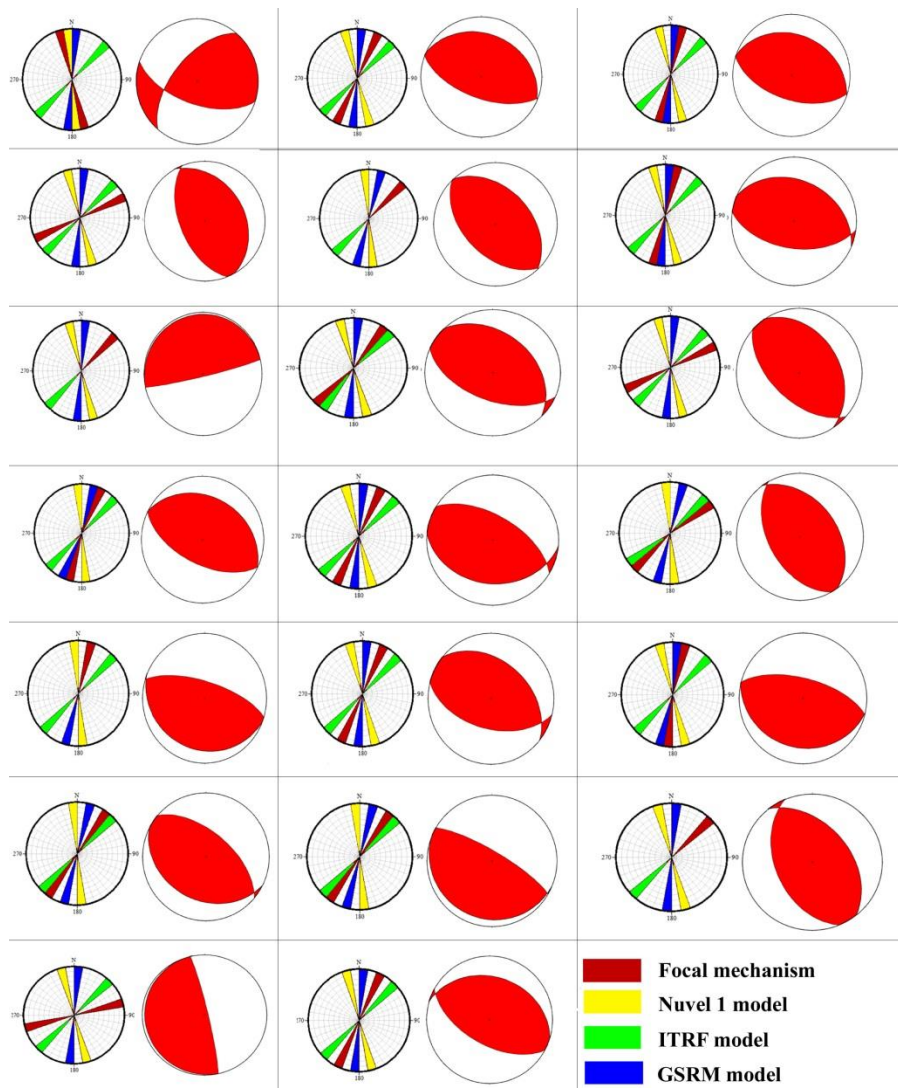


شکل ۷- (a) نقشه راستای محورهای تنش اصلی و (b) نقشه راستای محورهای کرنش اصلی در محدوده خوزستان با استفاده از داده‌های لرزه‌ای.

Fig. 7. (a) Principal stress axes direction map and (b) Principal strain axes direction map of the Khuzestan Province using seismic data.

همچنین رنگ قهوه‌ای راستای محاسبه شده برای حرکت پوسته با استفاده از تحلیل حل گسل برای رخدادهای لرزه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان مدل جهانی ITRF را به عنوان مدل مناسب‌تر در مطالعات راستای حرکت پوسته‌ای مورد توجه قرار داد.

در این شکل به منظور مقایسه بصری راحت‌تر راستاهای آزمون، نتایج حاصل از مدل‌های مختلف با رنگهای متفاوت نشان داده شده است. رنگ‌های زرد، سبز و آبی به ترتیب نشان دهنده راستای حرکت پوسته در مدل‌های ITRF، Nuvel1 و GSRM می‌باشد.



شکل ۸- دیاگرام‌های گل سرخی جهت مقایسه نتایج مدل سازی‌های جهانی و حل کانونی زلزله‌ها.

Fig. 8. Rose diagrams for comparison of global models and earthquakes focal mechanism data.

منابع

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretation. *Tectonophysics* 229, 211–238.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304, 1–20.
- Altamimi, Z., Métivier, L., Collilieux, X., 2011. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research* 117, 231–243.
- 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., 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.
- 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.
- Berberian, M., 1995. Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics* 241, 193–224.

- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265.
- Carter, W.E., Robertson, D.S., 1986. Studying the earth by very long-baseline interferometry. *Scientific American* 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.
- Cohen, S.C., Smith, P.E., 1985. LAGEOS scientific results: introduction. *Journal of Geophysical Research* 90, 17–20.
- Dixon, T.H., 1991. An introduction to the Global Positioning System and some geological applications. *Reviews of Geophysics* 29, 249–76.
- Gordon, R.G., 1998. The plate tectonic approximation: plate non-rigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions. *Annual Reviews of Earth Planet* 26, 615–42.
- 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. (eds) *The History and Dynamics of Plate Motions*. *Geophys.* 121, 143–59.
- Gordon, R.G., Stein, S., 1992. Global tectonics and space geodesy. *Science* 256, 333–42.
- 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.
- McDougall, I., Duncan, R.A., 1980. Linear volcanic chain recording plate motions?. *Tectonophysics* 63, 275–95.
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology* 26, 519–535.
- 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.
- Niell, A.E. et al., 1979. Comparison of a radiointerferometric differential baseline measurement with conventional geodesy. *Tectonophysics* 52, 49–58.
- 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.
- Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran, a review. *A. A. P. G. Bulletin* 52(7), pp. 1229–1258.
- Thatcher, W., 1979. Systematic inversion of geodetic data in central California. *Geophysics* 84, 83–95.
- Thatcher, W., 2003. GPS constraints on the kinematics of continental deformation. *International Geology Reviews* 45, 191–212.
- Wilson, D.S., 1993. Confirmation of the astronomical calibration of the magnetic polarity timescale from seafloor spreading rates. *Nature* 364, 788–90.



©2022 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.