

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

مدل سازی تغییر شکل قاره‌ای در منطقه انتقالی از زاگرس به مکران با استفاده از مشاهدات GPS

Modelling of continental deformation in the transition region of The Zagros-Makran by GPS observations

ایوب کیانی میلانی¹ (*); دکتر توحید ملک زاده²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، گروه نقشه برداری دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

Kiani.mi.ai@gmail.com

2- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

t-malekzadeh@iau-ahar.ac.ir

چکیده

تغییر شکل اندازه‌گیری شده توسط شبکه‌های GPS محلی در مناطق قاره‌ای، تحولات زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منطقه را نشان می‌دهد. با آنالیز کرنش منطقه‌ای و سرعت دوران محاسبه شده از مشاهدات GPS می‌توان به تنسور گرادیان سرعت دو بعدی دست یافت. در این تحقیق تنگه هرمز که در منطقه انتقالی مابین برخورد صفحات تکتونیکی عربستان - اوراسیا و فرورائش مکران قرار دارد به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده و از مشاهدات GPS انجام شده در این منطقه در سال‌های 2000 و 2002 برای محاسبه کرنش و جهت و نرخ‌های دوران استفاده شده است. با استفاده از مشاهدات GPS نرخ دوران در سمت شرقی تنگه هرمز برابر $1.68 \times 10^{-6} \text{ deg/yr}$ به‌صورت ساعت‌گرد و در سمت غربی تنگه هرمز برابر $3.37 \times 10^{-7} \text{ deg/yr}$ به‌صورت پادساعت‌گرد محاسبه گردید که مؤید وجود گسلش‌های معکوس در راستای شمال غربی - جنوب شرقی در سمت شرقی و گسلش‌های معکوس در راستای شمال شرقی - جنوب غربی در سمت غربی تنگه هرمز می‌باشد. همچنین نرخ اتساع کمینه و بیشینه در منطقه به‌ترتیب برابر $5.27 \times 10^{-8} \text{ deg/yr}$ و $2.51 \times 10^{-8} \text{ deg/yr}$ برآورد گردید که در هر دو حالت فشارشی بوده و نشان‌دهنده وجود گسلش‌های معکوس در منطقه است. جهت محورهای فشارشی محاسبه شده نیز تطبیق خوبی با جهت برخورد صفحه‌های زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا دارد. در حالت کلی تغییر شکل‌های محاسبه شده با استفاده از مشاهدات GPS به‌خوبی خصوصیات تغییر شکل منطقه را نشان می‌دهد. محورهای نرخ کششی و فشارشی، دوران محور قائم و کرنش حجمی دوبعدی (اتساع) با ویژگی‌های زمین‌شناسی بلند مدت در منطقه سازگار بوده و نشان می‌دهد که میدان سرعت GPS منعکس کننده فرآیندهای مرتبط با تحولات زمین‌شناسی منطقه است. اختلاف مابین نتایج حاصل از GPS و مشاهدات زمین‌شناسی را می‌توان به پراکندگی ایستگاه‌های GPS یا تغییر شکل دائمی ناشی از زمین‌لرزه‌های بزرگ نسبت داد.

چکیده انگلیسی:

Deformation measured by regional GPS networks in continental areas reflects the geologic and tectonic variability of the region. With analyzing the regional strain and rotation rate by inverting GPS velocities, full two-dimensional velocity gradient tensor could be calculated. In this research Hormuz strait in the transition zone between Arabia-Eurasia plate tectonic collision zone and Makran subduction has been selected as study area. GPS observations collected in 2000 and 2002 has been used to estimate strain, direction and rotation rates in this region. Using GPS data, in eastern side of Hormuz strait rotation rate has been estimated clockwise as $1.68 \times 10^{-6} \text{ deg/yr}$. It shows NW-SE inverse faulting in this

area. Also rotation rate in western side of Hormuz strait estimated as $3.37 \times 10^{-7} \text{ deg/yr}$. It shows NE-SW inverse faulting in this area. Maximum and minimum values of dilatation rate were estimated as $-5.27 \times 10^{-8} \text{ deg/yr}$ and $-2.51 \times 10^{-8} \text{ deg/yr}$, respectively. It's compressive in both cases and shows inverse faulting in the study region. Also estimated compressive axes confirm the direction of Arabia-Eurasia plate tectonic collision. In general case, estimated deformations using GPS data show characteristics of regional deformation. Principal shortening and extension rate axes, vertical axis rotation, and 2D volume strain (dilatation) are very consistent with long-term geological features over large areas, indicating that the GPS velocity fields reflect processes responsible for the recent geologic evolution of the region. Differences between geological and GPS descriptions of deformation can be attributed either to GPS networks that are too sparse to capture local interseismic deformation, or to permanent deformation that accrues during strong earthquakes.

واژه‌های کلیدی: تنسور کرنش، نرخ دوران، برخورد، فرورانش، تنگه هرمز، GPS.

Keywords: strain tensor, rotation rate, collision, subduction, Hormuz strait, GPS.

1- مقدمه

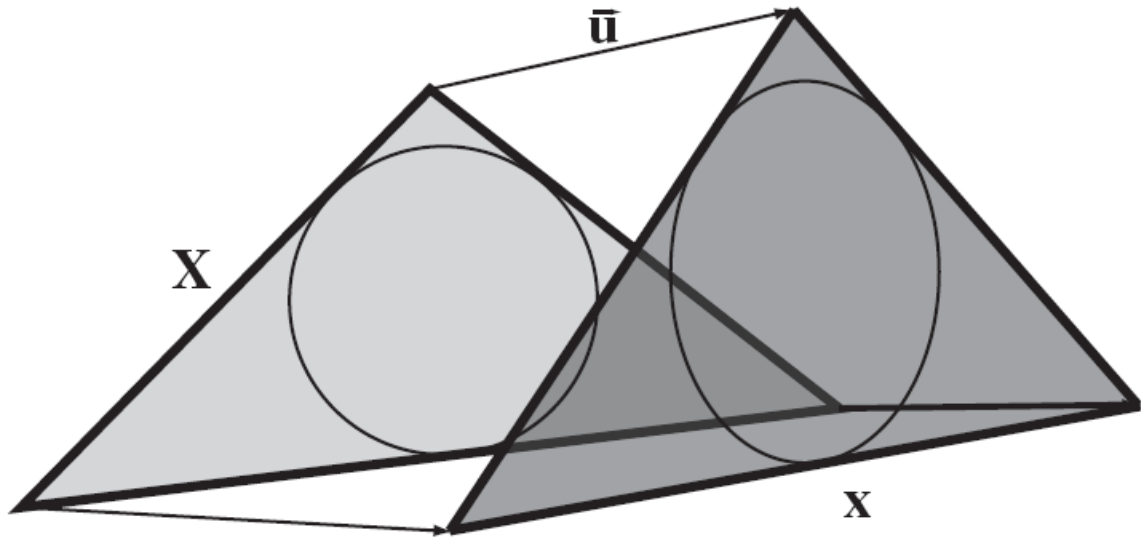
فلات ایران در منطقه برخورد مایل دو صفحه عربستان و اوراسیا قرار دارد. برخورد این دو صفحه در محدوده وسیعی در داخل ایران پراکنده می‌شود. از جمله این مناطق تنگه هرمز می‌باشد که در منطقه انتقالی مابین برخورد در زاگرس و فرورانش در مکران قرار دارد.

در این تحقیق نرخ کرنش و دوران با استفاده از میدان سرعت GPS در این منطقه محاسبه شده و با روند کلی ساختارهای زمین‌شناسی موجود در منطقه مورد مقایسه قرار گرفته است. از تحقیقات انجام شده در زمینه محاسبه کرنش محلی و نرخ دوران در منطقه انتقالی تغییر شکل از زاگرس به مکران با استفاده از مشاهدات GPS می‌توان به مرجع [1] اشاره نمود که از روش مثلث‌بندی دلونی استفاده کرده است. تحقیق دیگری در این زمینه در منطقه برخورد فلات‌های تبت و آناتولی انجام شده است [2]. در این تحقیق از روش‌های گریدبندی برای محاسبه نرخ کرنش و دوران استفاده شده است.

2- روش محاسبه

تغییر شکل گرادیان میدان جابجایی است. شکل 1 سه نقطه را در سیستم مختصات اولیه \mathbf{X} نشان می‌دهد که توسط سه بردار غیرموازی \mathbf{u} جابجا شده و به مختصات نهایی \mathbf{x} منتقل شده‌اند. اگر تغییر شکل همگن باشد (یعنی خطوط موازی در حالت اولیه در حالت نهایی نیز خطوط موازی باقی بمانند)، رابطه مابین بردارهای جابجایی و حالات اولیه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_i = t_i + G_{ij} X_j, \quad G_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \quad (1)$$



شکل 1. سه نقطه در وضعیت اولیه X در امتداد بردارهای غیرموازی u به وضعیت نهایی x حرکت کرده و منجر به ایجاد کرنش می‌شوند [3].

در رابطه فوق t_i یک مقدار ثابت است که انتقال یک نقطه در مبدأ را نمایش می‌دهد، و G_{ij} گرادیان‌های جابجایی در حالت اولیه هستند. G تانسور گرادیان جابجایی لاگرانژی نامیده می‌شود [4]. به همین صورت رابطه مابین بردارهای جابه‌جایی و موقعیت‌های نهایی با روابط زیر بیان می‌شود:

$$u_i = t_i + g_{ij}x_j, \quad g_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

در رابطه فوق g_{ij} گرادیان‌های جابجایی در حالت نهایی می‌باشند. g نیز تانسور گرادیان جابجایی اولری می‌باشد [4]. از روابط (1) و (2) دیده می‌شود که در حالت دو بعدی شش مجهول خواهیم داشت: دو مؤلفه بردار انتقال و چهار مؤلفه تانسور گرادیان جابه‌جایی لاگرانژی یا اولری. در حالت سه بعدی دوازده مجهول خواهیم داشت: سه مؤلفه بردار انتقال و نه مؤلفه تانسور گرادیان جابه‌جایی لاگرانژی یا اولری. هر نقطه (ایستگاه GPS) با جابجایی یا سرعت جابجایی معلوم، اگر در فضای دو بعدی باشد دو معادله و اگر در فضای سه بعدی باشد سه معادله خواهد داشت. بنابراین در فضای دو بعدی حداقل سه نقطه که روی یک خط قرار ندارند، و در فضای سه بعدی حداقل چهار نقطه که روی یک صفحه قرار ندارند، برای حل کرنش مورد نیاز است.

برای حل این سیستم معادلات خطی با استفاده از روش‌های جبر خطی، می‌بایست معادلات (1) و (2) به صورت سه ماتریس بازنویسی شوند که دو تا از این ماتریس‌ها شامل کمیت‌های معلوم و ماتریس دیگر شامل کمیت‌های مجهول می‌شود. در حالت دو بعدی معادلات بازنویسی شده برای حالت اولیه به صورت زیر خواهند بود:

(3)

$$\begin{bmatrix} {}^1u_1 \\ {}^1u_2 \\ {}^2u_1 \\ {}^2u_2 \\ \dots \\ \dots \\ {}^nu_1 \\ {}^nu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & {}^1X_1 & {}^1X_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^1X_1 & {}^1X_2 \\ 1 & 0 & {}^2X_1 & {}^2X_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^2X_1 & {}^2X_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & {}^nX_1 & {}^nX_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^nX_1 & {}^nX_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ G_{11} \\ G_{12} \\ G_{21} \\ G_{22} \end{bmatrix}$$

و یا در حالت نهایی:

(4)

$$\begin{bmatrix} {}^1u_1 \\ {}^1u_2 \\ {}^2u_1 \\ {}^2u_2 \\ \dots \\ \dots \\ {}^nu_1 \\ {}^nu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & {}^1x_1 & {}^1x_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^1x_1 & {}^1x_2 \\ 1 & 0 & {}^2x_1 & {}^2x_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^2x_1 & {}^1x_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & {}^nx_1 & {}^nx_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^nx_1 & {}^nx_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ g_{11} \\ g_{12} \\ g_{21} \\ g_{22} \end{bmatrix}$$

در فضای سه بعدی شکل معادلات به همین صورت خواهد بود تنها با این تفاوت که یک اندیس اضافه تر وجود خواهد داشت. یعنی یک بردار $3n \times 1$ در طرف چپ معادله، و یک ماتریس $3n \times 12$ و یک بردار 12×1 در طرف راست معادله خواهد بود. معادلات (3) و (4) را می توان نه تنها برای سه ایستگاه در حالت دو بعدی یا چهار ایستگاه در حالت سه بعدی بلکه برای n ایستگاه نوشت. اگر بیشتر از سه ایستگاه در فضای دو بعدی و بیشتر از چهار ایستگاه در فضای سه بعدی داشته باشیم، تعداد معادلات بیشتر از تعداد پارامترهای مجهول خواهد شد. در این حالت اطلاعات اضافی را می توان برای ارزیابی پارامترهای محاسبه شده مورد استفاده قرار داد.

راه حل معادلات 3 و 4 یک کاربرد کلاسیک تئوری معکوس سازی و به ویژه حل مسئله کمترین مربعات خطی می باشد. این مسئله به شکل زیر می باشد:

$$\mathbf{b} = \mathbf{M}\mathbf{a} \quad (5)$$

که در آن \mathbf{b} بردار جابجایی ها یا سرعت های جابجایی معلوم، \mathbf{M} ماتریس طرح با موقعیت اولیه یا نهایی ایستگاه ها و \mathbf{a} بردار مجهولات مسئله می باشد. برای حل کردن مسئله و به دست آوردن بردار \mathbf{a} بردار \mathbf{b} در معکوس ماتریس \mathbf{M} ضرب می شود.

$$\mathbf{a} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{b} \quad (6)$$

اگر ایستگاه ها بر اساس فاصله ای که از نقطه محاسبه کرنش دارند وزن دهی نشده باشند، مسئله مربع خطی عمومی را می توان با تجزیه مقدار تکین (SVD) حل کرد [6]. با اینکه روش های سریع تری نیز موجود می باشند، روش SVD این مزیت را دارد که اگر معادلات نرمال نزدیک به سینگولار باشند، جواب پایدارتری خواهد داد. این حالت وقتی

اتفاق می افتد که در حالت دو بعدی ایستگاه‌ها تقریباً در یک خط و یا در حالت سه بعدی ایستگاه‌ها در یک صفحه قرار گرفته باشند. اگر ایستگاه‌ها نسبت به نقطه محاسبه کرنش بر اساس فاصله‌ای که با آن دارند، وزن‌دهی شده باشند، می‌توان مسئله مربعات خطی را با روش کمترین مربعات وزندار با پایداری کمتر [5] حل کرد. در هر دو حالت جواب شامل: (1) پارامترهای مجهول مدل \mathbf{a} (2) واریانس‌ها یا مربع انحراف معیار خطای پارامترهای \mathbf{a} که در واقع همان مؤلفه‌های قطری ماتریس کوواریانس می‌باشند و (3) یک برآورد آماری از میزان خوبی برازش [6].

با محاسبه مجهولات یعنی بردار \mathbf{a} ، گرادیان جابه‌جایی (چهار المان آخر در حالت دو بعدی، یا نه المان آخر در حالت سه بعدی بردار \mathbf{a}) محاسبه می‌شود. در حالتی که مختصات اولیه معلوم است، تنسور کرنش لاگرانژی به شکل زیر خواهد بود:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} [G_{ij} + G_{ji} + G_{ki}G_{kj}] \quad (7)$$

و یا در حالتی که مختصات های ایستگاه‌ها در موقعیت نهایی معلوم است، تنسور کرنش اولری به صورت زیر خواهد بود:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} [g_{ij} + g_{ji} - g_{ki}g_{kj}] \quad (8)$$

تنسورهای کرنش لاگرانژی و اولری، تنسورهای متقارن هستند، و بنابراین در حالتی که مؤلفه‌های خارج قطر اصلی تنسور کرنش برابر صفر باشند، محورهای مختصات توجیه خاصی پیدا می‌کنند. در واقع این محورهای اصلی را نشان داده و متناظر با محورهای بیضی کرنش در حالت دو بعدی و یا بیضوی کرنش در حالت سه بعدی می‌باشند. این مسئله معادل محاسبه مقادیر و بردارهای ویژه تنسور کرنش است. بردارهای ویژه، کسینوس‌های هادی محورهای اصلی تنسور کرنش در حالت اولیه (تنسور کرنش لاگرانژی) یا نهایی (تنسور کرنش اولری) هستند. مقادیر ویژه با کشیدگی‌های اصلی به صورت زیر در ارتباطند [6]:

در وضعیت اولیه :

$$\lambda_i = (1 + 2E_{ii}) \quad (9)$$

یا در وضعیت نهایی :

$$\frac{1}{\lambda_i} = (1 - 2e_{ii}) \quad (10)$$

در روابط فوق λ کشیدگی کوادراتیک می‌باشد که مربع بسط $S(1+\lambda)$ است. روابط 3 تا 10 عملیات‌های اساسی هستند که برای محاسبه تنسور کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر محاسبه تنسور استرین، کمیت‌های دیگری را نیز می‌توان محاسبه نمود که عبارتند از:

- اتساع یا کرنش حجمی [7]

$$\Delta = S_1 S_2 S_3 - 1 \quad (11)$$

و کرنش برشی ماکزیمم [7] در حالت اولیه:

$$\theta = \frac{\pi}{4}, \quad \gamma_{\max} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2(\lambda_{\max} \lambda_{\min})^{1/2}} \quad (12)$$

یا در حالت نهایی:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{1/2}, \quad \gamma_{\max} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2(\lambda_{\max} \lambda_{\min})^{1/2}} \quad (13)$$

θ زاویه‌ای است که جهت کرنش برشی ماکزیمم با محور کرنش اصلی ماکزیمم می‌سازد و γ_{max} مقدار ماکزیمم کرنش برشی است.

در نهایت بایستی چرخش محاسبه شود. این عمل تنها زمانی قابل انجام است که تغییر شکل بسیار جزئی باشد. تغییر شکل بسیار جزئی بدین معناست که ترکیب و پیکربندی جسم قبل و بعد از تغییر عملاً یکسان باشند و یا تنها انتقال و چرخش جسم سخت مطرح باشد. در این حالت می‌توان تانسور گرادیان جابجایی را به صورت حاصل جمع یک تانسور متقارن ε_{ij} و یک تانسور پادمقارن ω_{ij} نوشت:

$$G_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} \quad (14)$$

برای محاسبه چرخش از تانسور پادمقارن ω_{ij} خواهیم داشت:

$$R_1 = \frac{-(\omega_{23} - \omega_{32})}{2}, \quad R_2 = \frac{-(-\omega_{13} + \omega_{31})}{2}, \quad R_3 = \frac{-(\omega_{12} - \omega_{21})}{2} \quad (15)$$

بزرگی R نشان‌دهنده میزان چرخش و علامت آن نشان دهنده جهت چرخش است (با نگاه کردن در جهت مثبت محور دوران، دوران در جهت عقربه‌های ساعت مثبت و در جهت خلاف عقربه‌های ساعت منفی است).

3- محاسبه میدان نرخ کرنش با استفاده از میدان سرعت GPS

روش‌های متعددی برای محاسبه میدان نرخ کرنش دو بعدی و نرخ دوران با استفاده از مشاهدات GPS وجود دارد که شامل مثلث‌بندی دلونی و روش‌های گریدبندی می‌باشد. به دلیل توزیع غیریکنواخت ایستگاه‌های GPS هیچ‌یک از روش‌های ارائه شده راه‌حل ایده‌آلی نیستند.

در روش گریدبندی از دو روش نزدیکترین نقاط و فواصل وزن‌دار استفاده می‌شود. در هر دو روش یک گرید یکنواخت در منطقه ساخته شده و گرادیان سرعت در گره‌های گرید محاسبه می‌شود. تفاوت دو روش به نحوه مربوط ساختن ایستگاه‌ها به آنالیزهای مربوط به هر گره ارتباط دارد.

در روش نزدیک‌ترین نقاط، گرادیان‌ها با استفاده از تعداد ثابتی از نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها به هر گره محاسبه می‌شود. حساسیت مکانی مستقیماً به تراکم ایستگاه‌های GPS ارتباط داشته و در مناطق مختلف شبکه متفاوت است. در روش فواصل وزن‌دار، کلیه ایستگاه‌های شبکه در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی اطلاعات هر ایستگاه با فاصله آنها از گره شبکه با اختصاص ثابت α وزن‌دهی می‌شود. ثابت α نشان می‌دهد که چگونه اثر یک ایستگاه با فاصله آن از گره کاهش می‌یابد. هر فاصله با فاکتور W وزن‌دهی می‌شود:

$$W = \exp\left(\frac{-d^2}{2\alpha^2}\right) \quad (16)$$

در رابطه فوق d فاصله مابین گره و یک ایستگاه می‌باشد. ایستگاه‌هایی که در فاصله α 1 قرار دارند 67٪ در محاسبات سرشکنی سهم دارند در حالی که ایستگاه‌هایی که در فاصله بزرگتر از α 3 قرار دارند سهم آنها در سرشکنی کمتر از 1٪ است. در فرمت ماتریسی، W به صورت یک ماتریس قطری ظاهر شده و با رابطه زیر در روند سرشکنی خطی وارد می‌شود [5].

$$m = [G^T W G]^{-1} G^T W d, \quad (17)$$

در رابطه فوق G ماتریس طرح $(2n \times 6)$ سمت راست رابطه (3)، d بردار ستونی سرعت‌ها در سمت چپ رابطه (3) و m بردار ستونی گرادیان‌های سرعت و انتقال در سمت راست رابطه (3) می‌باشد.

با وجود تعداد بیشتر از 3 ایستگاه و معلوم بودن خطای بردارهای سرعت GPS و بهره‌گیری از این فرض که کرنش مابین ایستگاه‌ها همگن است، دقت مقادیر مجهول قابل محاسبه می‌باشد. گریدهایی که مقدار مطلق مجهول محاسباتی

در آنها کمتر از خطای 1σ باشد، از نتایج محاسبات حذف می‌شوند. محاسبات در هر گره از گرید مستقل از محاسبات در کلیه گره‌های دیگر می‌باشد.

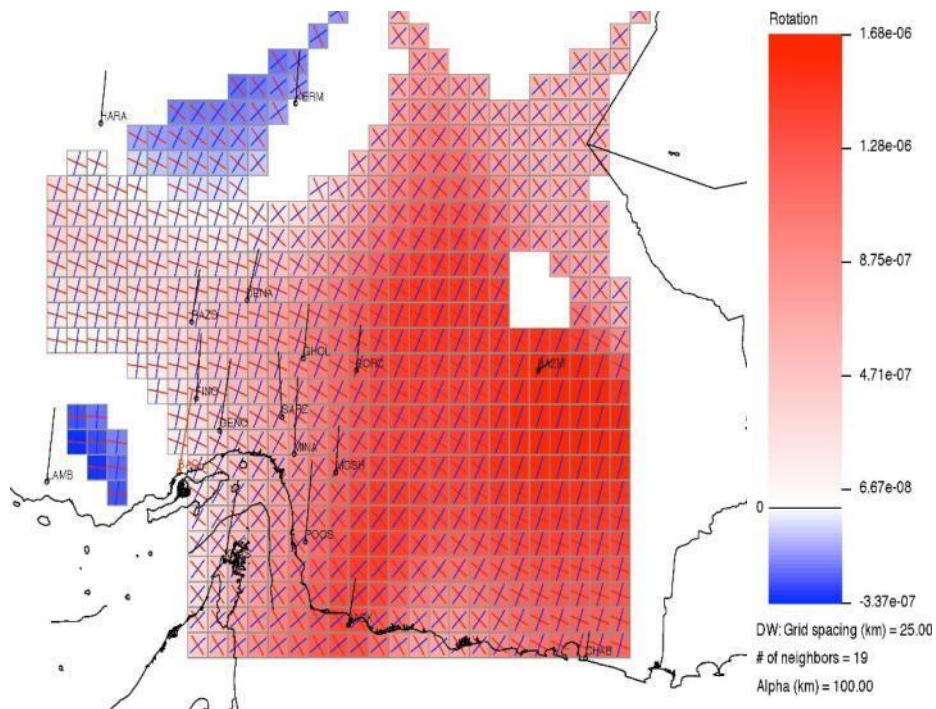
در انجام محاسبات مقدار ثابت α چنان انتخاب می‌شود که میزان تغییرات در پارامتر مورد محاسبه حداکثر بوده و تعداد گره‌های حذفی که مقدار مورد محاسبه در آنها کوچکتر از دقت برآورد شده باشد، حداقل باشد.

4- محاسبه کرنش و نرخ دوران در منطقه بین زاگرس و مکران

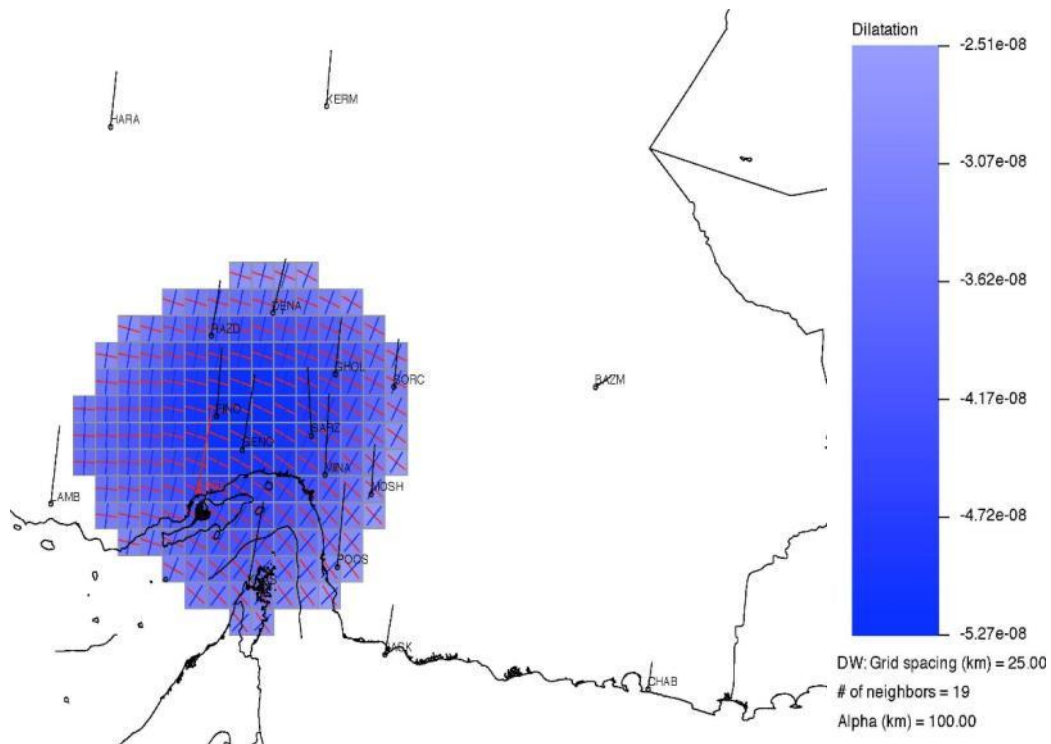
جهت محاسبه کرنش و نرخ دوران در منطقه بین برخورد مایل صفحه‌های عربستان و اوراسیا در زاگرس و فرورانش مکران از روش فواصل وزن دار استفاده گردید. مشاهدات GPS مورد استفاده در محاسبات در جدول 1 فهرست گردیده است. مقدار ثابت $\alpha = 100$ چنان انتخاب گردید که نوسان بین مقادیر حداقل و حداکثر به بیشترین مقدار خود رسیده و تعداد گره‌های حذفی حداقل گردد. نتایج محاسبات در اشکال 2 و 3 نشان داده شده است.

جدول 1- میدان سرعت GPS در منطقه مورد مطالعه، ستون اول نام ایستگاه‌های GPS، ستون‌های دوم و سوم مختصات جغرافیایی ایستگاه-ها، ستون‌های چهارم و پنجم مؤلفه‌های سرعت ایستگاه‌ها از مرجع [2] و ستون‌های ششم، هفتم و هشتم دقت و همبستگی مشاهدات GPS را نشان می‌دهد.

Site	long. (°E)	lat. (°N)	$V_e(\text{Masson})$ (mm/yr)	$V_n(\text{Masson})$ (mm/yr)	σ_e (mm/yr)	σ_n (mm/yr)	corr.
BAGH	55.657	27.000	5.14	24.77	2.08	1.79	0.030
BAZM	60.180	27.865	5.33	3.11	2.06	1.62	0.038
CHAB	60.694	25.300	1.39	7.82	1.90	1.56	0.038
DENA	56.504	28.529	4.38	15.50	1.98	1.73	0.023
FINO	55.867	27.651	1.79	19.73	2.04	1.78	0.026
GENO	56.162	27.366	4.25	21.70	2.04	1.79	0.027
GHOL	57.217	28.010	2.06	16.27	1.90	1.67	0.029
HARA	54.608	30.079	1.99	15.88	1.72	1.52	0.033
JASK	57.767	25.636	2.78	14.24	1.71	1.48	0.040
KERM	57.119	30.277	1.58	16.07	2.51	1.71	0.043
KHAS	56.233	26.208	5.22	24.40	1.94	1.56	0.036
LAMB	54.004	26.883	2.99	22.30	2.02	1.58	0.031
MINA	57.100	27.160	1.36	23.36	1.89	1.64	0.030
MOSH	57.620	26.993	1.21	14.26	1.93	1.69	0.029
POOS	57.237	26.379	2.58	24.18	2.01	1.75	0.029
RAZD	55.800	28.330	3.11	15.82	1.82	1.59	0.029
SARZ	56.946	27.488	-1.33	19.70	1.99	1.75	0.026
SORC	57.884	27.901	1.60	13.73	1.97	1.69	0.031
ZABO	62.517	31.049	0.89	0.57	1.58	1.45	0.006



شکل 2. کرنش و نرخ‌های دوران حاصل از GPS، محورهای کرنش افقی اصلی با خطوط رنگی مشخص شده‌اند، به نحوی که خطوط آبی نشان‌دهنده کوتاه‌شدگی و خطوط قرمز نشان‌دهنده کشیدگی می‌باشند. رنگ زمینه نشان‌دهنده دوران حول محور قائم می‌باشد که سمت مثبت آن به داخل صفحه می‌باشد. رنگ قرمز نشان‌دهنده دوران در جهت عقربه‌های ساعت و رنگ آبی نشان‌دهنده دوران در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌باشد. در مناطقی که با رنگ سفید مشخص شده‌اند قدر مطلق مقدار دوران کمتر از خطای 1σ می‌باشد. بردارهای GPS از مرجع [2] استخراج گردیده است.



شکل 3. کرنش و نرخ اتساع حاصل از GPS، نرخ اتساع مثبت (کشش) با رنگ قرمز و نرخ اتساع منفی (فشارش) با رنگ آبی مشخص شده است. در مناطقی که با رنگ سفید مشخص شده‌اند قدر مطلق مقدار اتساع کمتر از خطای 1σ می‌باشد.

5- نتیجه گیری

امروزه شبکه‌های GPS محلی به اندازه کافی چگال بوده و می‌توان به‌جای استفاده از پروفیل‌های یک بعدی، تنسور گرادیان سرعت دوبعدی را محاسبه نمود. با استفاده از تنسور گرادیان دو بعدی می‌توان نرخ دوران حول محور قائم و تنسور نرخ اتساع را محاسبه نمود.

مطابق نتایج به‌دست آمده از محاسبات در حالت کلی جهت محورهای فشارشی با جهت برخورد صفحه‌های زمین-ساختی عربستان و اوراسیا انطباق دارد. محاسبه دوران‌ها نشان می‌دهد که در سمت شرقی تنگه هرمز دوران ساعت‌گرد با مقدار بیشینه $1.68 \times 10^{-6} \text{ deg/yr}$ و در سمت غربی آن دوران پادساعت‌گرد با مقدار بیشینه $3.37 \times 10^{-7} \text{ deg/yr}$ وجود دارد ولی دوران ساعت‌گرد قوی‌تر از دوران پادساعت‌گرد می‌باشد. دوران‌های محاسبه شده مؤید وجود گسلش‌های معکوس در راستای شمال غربی - جنوب شرقی در سمت شرقی تنگه هرمز و وجود گسلش‌های معکوس در راستای شمال شرقی - جنوب غربی در سمت غربی آن می‌باشد.

محاسبه کمیت اتساع نشان‌دهنده فشارش با مقدار متوسط $3.89 \times 10^{-8} / \text{yr}$ در این منطقه می‌باشد که مؤید برخورد عربستان با اوراسیا بوده و وجود گسلش‌های معکوس در این منطقه را تأیید می‌نماید. شبکه‌های GPS دوبعدی جهت به‌دست آوردن تقریب مرتبه اول تغییرات کرنش لحظه‌ای مناسب می‌باشند. با استفاده از شبکه‌های GPS دائمی چگال می‌توان به برآورد قابل اعتمادتری از نرخ کرنش بین‌لرزه‌ای نزدیک گسل دست یافت. علاوه‌براین با استفاده از این شبکه‌ها می‌توان بعد سوم سرعت را محاسبه نموده و به تنسور گرادیان سه‌بعدی دست یافت.

منابع

1. Bayer R., Chery J., Tatar M., Vernant Ph., Abbassi M., Masson F., Nilforoushan F., Doerflinger E., Regard V. and Bellier O., (2006), "Active deformation in Zagros-Makran transition zone inferred from GPS measurements," *Geophysical Journal International*, **165**, 373-381, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02879.x
2. Allmendinger W. R., Reilinger R., Loveless J., (2007), "Strain and Rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano," *Tectonics*, **26**, TC3013, 2007, 18 PP. doi:10.1029/2006TC002030.
3. Cardozo N., Allmendinger R. W., (2009), "SSPX: A program to compute strain from displacement/velocity data," *Computer & Geosciences*, **35**, 2009, 1343-1357.
4. Means, W. D., (1976), "Stress And Strain: Basic Concepts Of Continuum Mechanics For Geologists," Springer, New York, p. 339.
5. Menke, W., (1984), "Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory," Academic Press, Orlando FLA, p. 260.
6. Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P., (1992), "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing," second ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 994.
7. Ramsay, J.G., (1967), "Folding And Fracturing Of Rocks," McGraw-Hill Book Company, New York p. 568.
8. Shen Z.K., Jackson D.D. and Ge B.X., (1996), "Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements," *Journal of Geophysical Research*, **101**, pp. 27957-27980.

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

نوبت آشنایی
بررسی مقاله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

نوبت آشنایی
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

نوبت آشنایی
آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو