


Analysis of present-day continental deformation in the Iranian plateau using strain tensor extracted from permanent and campaign GPS observations

Rastbood, A.¹ 

1. Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: arastbood@tabrizu.ac.ir

(Received: 22 May 2022, Revised: 23 Aug 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 14 June 2023)

Summary

Regional GPS networks are now becoming sufficiently dense that one can, with increasing confidence, calculate the full two-dimensional velocity gradient tensor rather than rely on one-dimensional transects. The two-dimensional tensor provides additional insight by allowing one to calculate the vertical axis rotation and dilatation rate tensors. Furthermore, the principal horizontal strain rate axes are not always obvious from examination of the velocity vectors alone. In this study, the Iranian plateau at the oblique collision zone of the Arabia-Eurasia tectonic plates has been selected as the study area. Deformation measured by regional GPS networks in the Iranian plateau reflects the geologic and tectonic variability of the region. Using GPS observations, the velocity gradient tensor can be obtained and by calculating the scalar quantities extracted from this tensor, we can study the continental deformation and interpret the tectonics of the region.

For the Iranian collisional plateau, the regional strain and rotation rate are analyzed by inverting GPS velocity vectors to calculate the two-dimensional velocity gradient tensor. In the general case, estimated deformations using GPS data show characteristics of regional deformation. Principal shortening and extension rate axes, vertical axis rotation, and two-dimensional 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 Iranian plateau. 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 occurs during strong earthquakes.

Vertical axis rotation amplitude and sign changes are due to distributed deformation throughout the plateau. The presence of large regions with almost constant low amplitude rotation rates indicates a quasi-rigid bodies rotation inside the Iranian collisional plateau bounded by faults. The estimated compressive axis confirms the direction of the Arabia-Eurasia tectonic plates collision. The internal amplitude of shortening is lower than the boundaries of the plateau and has a negative two-dimensional dilatation almost everywhere. A negative dilatation rate is associated with vertical crustal uplift.

The maximum value of negative volumetric strain was obtained in the southern part of Eastern Alborz. It was calculated as 8.1×10^{-3} and 4.6×10^{-3} per year, respectively, using the nearest neighbor and weighted distances methods.

We show the superiority of the gridding method over the Delaunay triangulation method. On the other hand, to study the strain locally in regions with active deformation, if the number of GPS stations in there is high, the value of α in the distance-weighted method or the number of neighborhoods in the nearest neighbor method should be chosen less. Current two-dimensional GPS networks are adequate to resolve first-order regional-scale instantaneous strain variations. However, the resolution of some of the issues raised here must await the deployment of dense, continuous, and high-rate GPS networks. Such networks, scaled to the dimensions of the problems one wishes to study, will provide more regular temporal sampling allowing one to calculate more reliably near fault interseismic strain. More importantly, they will bring a critical third dimension of velocity measurement, allowing one to calculate the full three-dimensional velocity gradient tensor. Furthermore, the deployment of dense networks of continuous GPS stations can be used in conjunction with differential radar interferometry to provide a more spatially and temporally complete snapshot of tectonic deformation.

Keywords: displacement gradient, nearest neighbor, distance weighted, the Iranian plateau, GPS.

تحلیل تغییر شکل قاره‌ای زمان حاضر در محدوده فلات ایران با استفاده از تانسور کرنش مستخرج از مشاهدات دائم و دوره‌ای GPS

اصغر راست‌بود^۱ ✉

۱. گروه نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: arastbood@tabrizu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۳/۲۴)

چکیده

با استفاده از بردارهای سرعت دائم و دوره‌ای GPS می‌توان به تانسور گرادیان جابجایی دست یافت و با محاسبه تانسور کرنش و کمیت‌های اسکالر مستخرج از این تانسور به بررسی تغییر شکل قاره‌ای و تفسیر زمین‌ساخت منطقه با توجه به گسل‌های فعال شناخته شده پرداخته شود. در این تحقیق برای فلات ایران در محدوده برخورد مایل صفحه‌های زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا تانسور گرادیان جابجایی با حل مسئله معکوس با استفاده از بردارهای سرعت مسطحاتی GPS محاسبه شد. سپس تانسور کرنش و کمیت‌های اسکالر مستخرج از آن یعنی محورهای اصلی کوتاه‌شدگی و کشیدگی، نرخ دوران حول محور قائم، کرنش برشی بیشینه و اتساع دوبعدی برآورد شده است. نتایج تحلیل با ویژگی‌های زمین‌ساختی بلندمدت در مناطق وسیعی از فلات ایران سازگار است که نشان می‌دهد میدان سرعت GPS منعکس‌کننده فرآیندهای زمین‌شناسی زمان حاضر فلات ایران است. تغییرات دامنه و جهت دوران حول محور قائم به دلیل تغییر شکل توزیع شده در سرتاسر فلات است. وجود مناطق بزرگ با نرخ‌های دوران تقریباً ثابت و کم دامنه نشانگر دوران اجسام شبه صلب در داخل فلات برخوردی ایران است که توسط گسل‌های فعال احاطه شده‌اند. دامنه کوتاه‌شدگی در مناطق داخلی نسبت به مرزهای فلات پایین‌تر بوده و تقریباً در همه جای فلات نرخ اتساع منفی است. نرخ اتساع منفی با بلاآمدگی قائم پوسته و کوهزایی همراه است. حداکثر مقدار اتساع دوبعدی منفی در بخش جنوبی البرز شرقی برابر $۸/۱ \times ۱۰^{-۳}$ و $۴/۶ \times ۱۰^{-۳}$ در سال به ترتیب با روش‌های نزدیک‌ترین همسایگی و فواصل وزن‌دار محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: گرادیان جابجایی، نزدیک‌ترین همسایگی، فواصل وزن‌دار، فلات ایران، GPS.

۱. مقدمه

گسترده داده‌های GPS در چند دهه اخیر دیدگاه جدیدی را در مورد وضعیت آبی کرنش در این فلات قاره که طی ده‌ها میلیون سال تکامل یافته است، ارائه می‌کند. در این تحقیق نرخ کرنش و چرخش منطقه‌ای با استفاده از میدان‌های سرعت GPS برای فلات ایران محاسبه شده و با ساختارهای عمده زمین‌شناسی موجود مقایسه می‌شوند. اکثر تحلیل‌های قبلی کرنش معمولاً از گرادیان‌های سرعت محاسبه‌شده در امتداد پروفیل‌های یک‌بعدی استفاده می‌کنند، به‌عنوان مثال: (بانرجی و بورگمن، ۲۰۰۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ ریلینگر و همکاران، ۲۰۰۶، جمور و همکاران، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱). با این حال، اخیراً داده‌های کافی در این مناطق برای محاسبه کامل تانسور گرادیان سرعت مسطحاتی در دسترس است که با

در طول چند دهه گذشته، فنون‌هایی مانند GPS مجموعه‌ای از داده‌های نرخ جابجایی با تفکیک‌پذیری بالا را در اختیار دانشمندان علوم زمین قرار داده است. تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی این مجموعه داده‌ها درک ما را از تغییر شکل زمین بهبود بخشیده است. فلات قاره‌ها قبل از ظهور زمین‌ساخت صفحه‌ای توجه زمین‌شناسان را به خود جلب کرده‌اند. فلات ایران در منطقه برخورد مایل مابین دو صفحه عربستان و اوراسیا قرار دارد. برخورد این دو صفحه در محدوده وسیعی در داخل ایران پراکنده می‌شود. شبکه‌های GPS مدرن، حداقل در مقیاس منطقه‌ای، بسیار کامل‌تر از شبکه‌های ژئودزی کلاسیک هستند، بنابراین این امکان را فراهم می‌آورند تا تانسور گرادیان جابجایی دوبعدی محاسبه شود. در دسترس بودن

با بزرگ‌ترین مقدار ویژه است. درون‌یابی میدان سرعت مسطحاتی GPS در محدوده برخورد مایل صفحات زمین‌ساختی عربستان-اوراسیا با استفاده از قیود قابلیت ارتجاعی توسط راست‌بود (۱۴۰۱) و برآورد و تفسیر زمین‌ساختی نرخ کرنش حاصل از آن در منطقه البرز توسط راست‌بود (۱۴۰۲) انجام شده است.

وو و همکاران (۲۰۱۶) از روش کریجینگ برای شبکه‌بندی میدان سرعت استفاده کرده‌اند. کریجینگ روشی مبتنی بر تحلیل زمین آماری مرسوم برای انجام درون‌یابی میدان سرعت GPS و تحلیل کرنش است. این روش مستلزم تعیین یک مدل و سه پارامتر است. مدل، نوع ساختار همبستگی است که در میدان تحت بررسی وجود دارد. مدل قطعه (Nugget) یک مدل نویز سفید است، مدل نمایی (Exponential) یک فرآیند پیوسته اما غیر دیفرانسیل‌پذیر است و گاوسی (Gaussian) هم پیوسته و هم دیفرانسیل‌پذیر است. همه مدل‌ها به یک قطعه نیاز دارند که نشان‌دهنده سطح واریانس نقطه‌ای در مشاهدات است که برای میدان‌های سرعت GNSS همان عدم قطعیت داده‌هاست. مدل‌های گاوسی و نمایی نیز نیاز به تعیین آستانه (Sill) و محدوده (Range) دارند. آستانه میانگین واریانس کل در مجموعه داده را مشخص می‌کند و باید به‌عنوان واریانس کل مشاهدات منهای قطعه مشخص شود. توجه به این نکته مهم است که قطعه را می‌توان به‌عنوان واریانس عدم قطعیت داده‌ها در نظر گرفت، ولی آستانه، واریانس خود داده‌ها است. محدوده مقیاس طول همبستگی مکانی همسانگرد است. برآورد چندمقیاسی میدان‌های سرعت GPS با استفاده از موجک‌های کروی و محاسبه کرنش با استفاده از میدان برآورد شده توسط تیپ و همکاران (۲۰۰۹) انجام شد.

الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی وزن‌دار مونگ-هان هوانگ توسط هندورگر و همکاران (۲۰۱۹) پیاده‌سازی شده است. دو پارامتر پیکربندی اضافی برای استفاده از این روش مورد نیاز است که عبارت‌اند از: شعاع جستجوی همسایگی و حداقل تعداد ایستگاه‌ها در شعاع

ابهاماتی تصویر بسیار بهتری از تغییر شکل مسطحاتی ارائه می‌دهد (انگلد و مولنار، ۲۰۰۵؛ فلش و همکاران، ۲۰۰۵؛ کاله و همکاران، ۲۰۰۰). از تحقیقات انجام شده در زمینه محاسبه کرنش محلی و نرخ دوران می‌توان به کار انجام شده در منطقه برخورد فلات‌های تبت و آناتولی و منطقه غیر برخوردی فلات آلتی‌پلانو اشاره کرد (آلمندینگر و همکاران، ۲۰۰۷). تانسور نرخ کرنش مسطحاتی در محدوده برخورد مایل صفحات زمین‌ساختی عربستان - اوراسیا از اندازه‌گیری‌های GPS توسط ماسون و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از روش مثلث‌سازی دلونی محاسبه شده است. همچنین ماسون و همکاران (۲۰۱۴) تانسور نرخ کرنش را در این منطقه از میدان سرعت GPS با استفاده از تغییرات زمانی مؤلفه‌های طول مبنا محاسبه کرده‌اند.

از دید تئوری با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان تانسور کرنش را محاسبه کرد. ساده‌ترین روش ممکن استفاده از مثلث‌بندی دلونی است. روابط مربوطه را می‌توان در بسیاری از مراجع از جمله کای و گرافارند (۲۰۰۷) یافت. مثلث‌بندی دلونی توسط ساویج و همکاران (۲۰۰۱) به زمین کروی تعمیم داده شد.

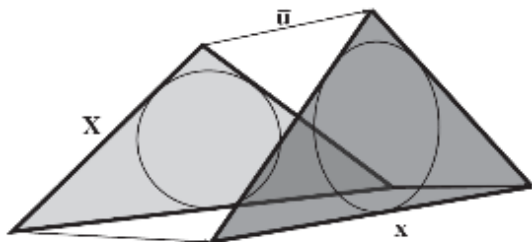
در برخی از مطالعات قبلی نخست میدان سرعت روی یک شبکه منظم درون‌یابی شده و کرنش با استفاده از میدان سرعت شبکه‌بندی شده محاسبه شده است. درون‌یابی بهینه داده‌های ژئودتیکی مکان گسسته برای تعیین کرنش توسط شن و همکاران (۲۰۱۵) انجام شد. هفت پارامتر پیکربندی اضافی برای استفاده از این روش مورد نیاز است که شامل وزن‌دهی فاصله گاوسی یا درجه دوم، وزن‌دهی مکانی ورونوی یا آزیموتی، کمینه، بیشینه و گام ثابت‌های هموارسازی مکانی، آستانه وزنی و آستانه عدم قطعیت می‌باشد. روش درون‌یابی سندول و وسل (۲۰۱۶) برای داده‌های برداری دو بعدی از قیود قابلیت ارتجاعی استفاده می‌کند. این روش بر اساس طرح درون‌یابی کشسان ورق نازک است. سه پارامتر پیکربندی اضافی برای استفاده از این روش مورد نیاز است که شامل نسبت پواسون، ضریب فاج و کوچک‌ترین مقدار ویژه مورد استفاده در تناسب

تغییر شکل قاره‌ای با استفاده از مشاهدات GPS تحلیل می‌شود. در نهایت نیز نتایج و پیشنهادات ارائه می‌شود.

۲. محاسبه تانسور گرادیان جابجایی

تغییر شکل گرادیان میدان جابجایی است. شکل ۱ سه نقطه را در سیستم مختصات اولیه X (مثلث روشن) نشان می‌دهد که در امتداد سه بردار غیر موازی u جابجا شده و به مختصات نهایی x (مثلث تیره) منتقل شده‌اند. اگر تغییر شکل همگن باشد (خطوط موازی در حالت اولیه در حالت نهایی نیز موازی باقی بمانند)، رابطه مابین بردارهای جابجایی و وضعیت مرجع به صورت‌تبه 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 ۱. سه نقطه در وضعیت اولیه X در امتداد بردارهای غیر موازی u به وضعیت نهایی x حرکت کرده و منجر به ایجاد کرنش می‌شوند (کاردوزو و آلمندینگر، ۲۰۰۹).

در رابطه (۱) t_i یک مقدار ثابت است که انتقال یک نقطه نسبت به مبدأ را نمایش می‌دهد، و G_{ij} گرادیان‌های جابجایی در وضعیت مرجع هستند. G تانسور گرادیان جابجایی لاگرانژی نامیده می‌شود (مینز، ۱۹۷۶). از رابطه (۱) دیده می‌شود که جهت حل دستگاه معادلات در حالت دو بعدی شش مجهول وجود دارد: دو مؤلفه بردار انتقال و چهار مؤلفه تانسور گرادیان جابجایی لاگرانژی یا اولری. در حالت سه بعدی نیز دوازده مجهول وجود دارد: سه مؤلفه بردار انتقال و نه مؤلفه تانسور گرادیان جابجایی لاگرانژی یا اولری. برای هر ایستگاه GPS با بردار سرعت معلوم، اگر دو بعدی باشد دو معادله و اگر سه بعدی باشد سه معادله می‌توان نوشت؛ بنابراین در

جستجو. کاردوزو و آلمندینگر (۲۰۰۹) نیز از روش‌های شبکه‌بندی با نزدیک‌ترین همسایگی و فواصل وزن‌دار برای محاسبه نرخ کرنش از میدان سرعت مسطحاتی GPS در فلات تبت، آناتولی و آلتی‌پلانو استفاده کرده‌اند. هدف تحقیق حاضر نشان دادن ارتباط مابین کرنش حاصل از GPS با تغییر شکل‌های دائمی در محدوده فلات ایران در محل برخورد مایل صفحات زمین‌ساختی عربستان - اوراسیا می‌باشد. بدین منظور تانسور کرنش با استفاده از میدان سرعت مسطحاتی حاصل از مشاهدات دائم و دوره‌ای GPS در منطقه فلات ایران محاسبه شده و تغییر شکل قاره‌ای با کمیت‌های اسکالر مستخرج از این تانسور از جمله جهت محورهای فشارشی و کششی، نرخ دوران حول محور قائم، کرنش برشی بیشینه و اتساع مورد تحلیل قرار گرفته است تا نشان دهد که میدان‌های سرعت GPS منعکس‌کننده فرآیندهای مرتبط با تحولات زمین‌ساختی منطقه هستند. در این تحقیق از سه روش مثلث‌بندی دلونی، شبکه‌بندی با نزدیک‌ترین همسایگی‌ها و فواصل وزن‌دار برای محاسبه نرخ کرنش، دوران و اتساع استفاده شده است. نوآوری تحقیق حاضر استفاده از گسترده‌ترین و به‌روزترین میدان سرعت GPS مسطحاتی موجود در محدوده فلات ایران به منظور شبکه‌بندی کرنش و کمیت‌های اسکالر منتج از آن با دو روش نزدیک‌ترین همسایگی و فواصل وزن‌دار می‌باشد. همچنین تغییر مقادیر و جهت دوران حول محور قائم، تغییرات کرنش برشی بیشینه و تغییرات اتساع محلی با تغییر تعداد ایستگاه‌ها در روش نزدیک‌ترین همسایگی و تغییر وزن ایستگاه‌های دور از مرکز سلول‌ها در روش فواصل وزن‌دار برای منطقه مورد مطالعه بررسی شده است.

در ادامه روش‌های حل عددی کرنش مورد مطالعه قرار گرفته و مفهوم و نحوه محاسبه تانسور گرادیان جابجایی با استفاده از مشاهدات GPS به همراه تفسیر هندسی آن مطرح می‌شود. سپس به محاسبه وضعیت کرنش در فلات ایران پرداخته می‌شود. بدین صورت که نخست زمین‌ساخت منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس

اگر ایستگاه‌ها بر اساس فاصله‌ای که از نقطه محاسبه تانسور کرنش دارند وزن‌دهی نشده باشند، مسئله مربعات خطی عمومی را می‌توان با تجزیه مقدار منفرد (SVD) حل کرد (پرس و همکاران، ۱۹۹۲). با اینکه روش‌های سریع-تری نیز موجود می‌باشند، روش SVD این مزیت را دارد که اگر معادلات نرمال نزدیک به سینگولار باشند، جواب پایدارتری خواهد داد. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که در حالت دو بعدی ایستگاه‌ها تقریباً در یک خط قرار گرفته باشند. اگر ایستگاه‌ها نسبت به نقطه محاسبه تانسور کرنش بر اساس فاصله‌ای که با آن دارند، وزن‌دهی شده باشند، می‌توان مسئله مربعات خطی را با روش کمترین مربعات وزن‌دار با پایداری کمتر حل کرد (منکه، ۱۹۸۴). در هر دو حالت جواب شامل: (۱) پارامترهای مجهول مدل \vec{a} (۲) واریانس‌ها یا مربع انحراف معیار خطای پارامترهای \vec{a} که در واقع همان مؤلفه‌های قطری ماتریس واریانس - کوواریانس می‌باشند و (۳) یک برآورد آماری از میزان خوبی برازش (χ^2 , Goodness of fit) (پرس و همکاران، ۱۹۹۲).

با محاسبه مجهولات یعنی بردار \vec{a} ، گرادیان جابه‌جایی (چهار المان آخر در حالت دو بعدی بردار \vec{a}) محاسبه می‌شود. در حالتی که مختصات وضعیت مرجع معلوم است، تانسور کرنش لاگرانژی به شکل زیر خواهد بود:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} [G_{ij} + G_{ji} + G_{ki}G_{kj}] \quad (5)$$

تانسور کرنش لاگرانژی، تانسور متقارن است، در حالتی که مؤلفه‌های خارج قطر اصلی تانسور کرنش برابر صفر باشند، محورهای مختصات توجه خاصی پیدا می‌کنند. در واقع این محورها جهات اصلی را نشان داده و متناظر با محورهای بیضی کرنش در حالت دو بعدی می‌باشند. این مسئله معادل محاسبه مقادیر و بردارهای ویژه تانسور کرنش است. بردارهای ویژه، کسینوس‌های هادی محورهای اصلی تانسور کرنش در وضعیت مرجع (تانسور کرنش لاگرانژی) هستند. مقادیر ویژه با کشیدگی‌های

حالت دو بعدی حداقل سه ایستگاه که روی یک خط قرار ندارند و در حالت سه بعدی حداقل چهار ایستگاه که روی یک صفحه قرار ندارند، برای محاسبه کرنش مورد نیاز است.

برای حل این سیستم معادلات خطی با استفاده از روش‌های جبر خطی، می‌بایست معادله (۱) به صورت سه ماتریس بازنویسی شود که دو تا از این ماتریس‌ها شامل کمیت‌های معلوم و ماتریس دیگر شامل کمیت‌های مجهول می‌شود. در حالت دو بعدی معادلات بازنویسی شده برای وضعیت مرجع به صورت زیر خواهند بود:

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

معادلات (۲) را می‌توان نه تنها برای سه ایستگاه در حالت دو بعدی بلکه در حالت کلی برای n ایستگاه نوشت. اگر بیشتر از سه ایستگاه در فضای دو بعدی داشته باشیم، تعداد معادلات بیشتر از تعداد پارامترهای مجهول خواهد شد. در این حالت اطلاعات اضافی را می‌توان برای ارزیابی دقت پارامترهای محاسبه شده مورد استفاده قرار داد.

جهت حل معادلات (۲) از تئوری معکوس‌سازی کلاسیک و به‌ویژه حل مسئله کمترین مربعات خطی استفاده می‌شود. این مسئله به شکل زیر می‌باشد:

$$\vec{b} = M \vec{a} \quad (3)$$

که در آن بردار جابجایی‌ها یا سرعت‌های جابجایی معلوم، M ماتریس طرح با موقعیت اولیه یا نهایی ایستگاه‌ها و \vec{a} بردار مجهولات مسئله می‌باشد. برای حل کردن مسئله و به دست آوردن بردار \vec{a} ، بردار \vec{b} در معکوس ماتریس M ضرب می‌شود.

$$\vec{a} = M^{-1} \vec{b} \quad (4)$$

اصلی (Elongation) به صورت زیر در ارتباط هستند (پرس و همکاران، ۱۹۹۲):

در وضعیت مرجع:

$$\lambda_i = (1 + 2E_{ii}) \quad (6)$$

در رابطه فوق λ کشیدگی کوادراتیک می باشد.

۱-۲. تفسیر هندسی تانسور کرنش

روابط (۲) تا (۶) عملیات بنیادی هستند که برای محاسبه تانسور کرنش مورد استفاده قرار می گیرند. مؤلفه های تانسور کرنش کمیت های وابسته به سیستم مختصات می باشند. با استفاده از تانسور گرادیان جابه جایی امکان محاسبه انواع معیارهای اسکالر تغییر شکل وجود دارد که دارای تفسیر فیزیکی مناسب هستند. دلایل استفاده از معیارهای اسکالر تغییر شکل عبارت اند از: ۱- سهولت استفاده کاربردی از کمیت های اسکالر تغییر شکل ۲- امکان تفسیر هندسی این معیارها (کار با کمیت اسکالر خیلی راحت تر از کار با میدان های تانسوری است). از جمله این کمیت های اسکالر می توان به اتساع، برش و دوران اشاره کرد.

۱-۱-۲. نرخ کرنش حجمی

در حالت سه بعدی، نرخ کرنش حجمی یا اتساع اولین کمیت ناوردای نرخ کرنش بی نهایت کوچک است زیرا به سیستم مختصات بستگی ندارد. این کمیت بدون واحد یا دیمانسیون است. در حالت دو بعدی مقدار آن برای انبساط سطح مثبت و برای انقباض سطح منفی می باشد. کمیت ناوردای اتساع خاصیت ایزوتروپیک بودن یعنی عدم وابستگی به جهت را نشان می دهد.

کمیت ناوردای اول برابر است با (رمزی، ۱۹۶۷):

$$I_\varepsilon = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \lambda_{11} + \lambda_{22} + \lambda_{33} \quad (7)$$

با این حال، نرخ جابجایی قائم به دست آمده از مشاهدات GPS کم دقت بوده و غیر قابل اعتماد است. اگر حجم

پوسته ثابت فرض شود اتساع برابر صفر بوده و می توان λ_{33} را از منهای مجموع λ_{11} و λ_{22} محاسبه کرد. این قضیه مسئله مهمی را مطرح می کند که آیا تغییر شکل اندازه گیری شده توسط GPS دارای حجم ثابت است یا خیر؛ تغییر شکل کشسان با نسبت پواسون حدود ۰/۲۵ مشخص می شود در حالی که برای تغییر شکل با حجم ثابت (تراکم ناپذیر) نسبت پواسون ۰/۵ است (تورکوت و شوپرت، ۱۹۸۲). در حالتی که $(\lambda_{11} + \lambda_{22}) < 0$ ، کوتاه شدگی مسطحاتی زیاد است که باید با گسترش در راستای قائم پوسته (ضخیم شدن) متعادل شود؛ اگر $(\lambda_{11} + \lambda_{22}) = 0$ شود، به معنای یک سیستم امتداد لغز بدون نازک شدن و ضخیم شدن پوسته است؛ و در حالی که $(\lambda_{11} + \lambda_{22}) > 0$ ، افزونگی کشش مسطحاتی وجود دارد که باید با کوتاه شدگی قائم نازک شدن) پوسته متعادل شود.

بردارهای سرعت GPS مورد استفاده در این تحقیق از مقاله خرمی و همکاران (۲۰۱۹)، مسطحاتی می باشند، لذا کل محاسبات در فضای دوبعدی انجام شده و در تفسیر نتایج حاصل برای نرخ اتساع از فرض حجم تقریباً ثابت برای پوسته استفاده شده است.

۲-۱-۲. کرنش برشی

کرنش برشی خاصیت غیر ایزوتروپیک تغییر شکل را نشان داده و تفسیر هندسی آن حداکثر مقدار تغییر در امتداد می باشد. این کمیت به عنوان یک کمیت یا عامل کلیدی در مطالعات پیش بینی زمین لرزه شناخته شده است.

کمیت ناوردای حداکثر کرنش برشی در وضعیت مرجع به صورت زیر تعریف می شود (رمزی، ۱۹۶۷):

$$\theta = \frac{\pi}{4}, \gamma_{max} = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{2(\lambda_{max}\lambda_{min})^{1/2}} \quad (8)$$

γ_{max} مقدار بیشینه کرنش برشی است و θ زاویه ای است که جهت کرنش برشی بیشینه با محور کرنش اصلی بیشینه می سازد. جهت نرخ کرنش برشی بیشینه همیشه ۴۵ درجه

نسبت به محورهای اصلی کرنش است.

۲-۱-۳. نرخ دوران

در نهایت بایستی دوران محاسبه شود. این عمل تنها زمانی قابل انجام است که تغییر شکل بی‌نهایت کوچک (Infinitesimal) باشد. تغییر شکل بسیار جزئی بدین معناست که ترکیب و پیکربندی جسم قبل و بعد از تغییر شکل عملاً یکسان باشد و یا تنها انتقال و دوران جسم صلب 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:

$$G_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} \quad (9)$$

بخش پادمقارن تانسور گرادیان جابجایی، ω_{ij} ، را می‌توان به راحتی برحسب بردار محوری که دامنه آن معادل میزان نرخ دوران حول محور قائم است، بازنویسی شود (مالورن، ۱۹۶۹). دوران‌های مذکور نسبت به یک محور قائم با جهت مثبت رو به پایین در جهت عقربه‌های ساعت (CW) مثبت و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت (CCW) منفی است که مطابق قراردادهای معمول زمین‌شناسی است.

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

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{-(\omega_{23} - \omega_{32})}{2}, \\ R_2 &= \frac{-(-\omega_{13} + \omega_{31})}{2}, \\ R_3 &= \frac{-(\omega_{12} - \omega_{21})}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

بزرگی R نشان‌دهنده میزان دوران و علامت آن نشان‌دهنده جهت دوران است.

۳. محاسبه نرخ کرنش از میدان سرعت GPS

شبکه‌های GPS تغییر شکل‌های بسیار کوچک و عملاً آنی را در مقیاس زمانی زمین‌شناسی ثبت می‌کنند. در عمل GPS کرنش بی‌نهایت کوچک را نشان می‌دهد؛ بنابراین، تجزیه کرنش به تانسورهای متقارن و پادمقارن

(معادله ۱۰) و محاسبه نرخ دوران (معادله ۱۱) عملیات صحیحی می‌باشد. شبکه‌های GPS منطقه‌ای معمولاً دارای توزیع یکنواخت نیستند. برای استخراج الگوهای منطقه‌ای مؤثر از داده‌های پراکنده می‌توان از چندین رویکرد مانند مثلث‌بندی دلونی یا راه‌حل‌های شبکه‌ای همگن مختلف مانند شبکه‌بندی با نزدیک‌ترین همسایگی‌ها یا با فواصل وزن‌دار استفاده کرد. این مسئله به دلیل توزیع غیریکنواخت ایستگاه‌های GPS در سراسر منطقه مورد نظر، به صورت محدود حل می‌شود. هیچ راه‌حل ایده‌آلی برای این مسئله وجود ندارد؛ بنابراین در این تحقیق از رویکردهای معمول برای تفسیر الگوهای غالب منطقه‌ای استفاده می‌شود. ناهنجاری‌های محلی به همان اندازه که احتمال دارد غیرواقعی بوده و ناشی از نمونه‌برداری غیریکنواخت باشند، می‌توانند واقعی بوده و ناشی از ویژگی‌های زمین‌ساختی باشند. کاربرد این روش برای داده‌های منطقه‌ای GPS توسط آلمندینگر و همکاران (۲۰۰۵) و آلمندینگر و همکاران (۲۰۰۷) نشان داده شده است. جالب توجه است که این تحقیقات یک ارتباط واضح مابین کرنش GPS و تغییر شکل‌های دائمی و بلندمدت زمین‌شناسی را نشان می‌دهند.

برای راه‌حل‌های شبکه‌ای، از دو رویکرد نزدیک‌ترین همسایگی و فواصل وزن‌دار استفاده می‌شود. در هر دو آنالیز، یک شبکه یکنواخت برای منطقه ساخته شده و گرادیان‌های سرعت در مرکز هر سلول شبکه محاسبه می‌شود. تفاوت دو روش اساساً به نحوه مرتبط ساختن سرعت ایستگاه‌های GPS به آنالیزهای مربوط به نقاط مرکزی هر سلول ارتباط دارد. در روش نزدیک‌ترین همسایگی، گرادیان‌ها با استفاده از تعداد ثابتی از ایستگاه‌ها (۳) که نزدیک‌ترین به گره هر سلول شبکه هستند، محاسبه می‌شوند. حساسیت مکانی مستقیماً به تراکم ایستگاه‌های GPS مورد استفاده 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

در هر مثلث به صورت همگن در نظر می گیرند که از جمله معایب این روش می باشد زیرا که پارامترهای تغییر شکل عملاً از نقطه ای به نقطه دیگر متفاوت است.

۴. بر آورد تغییر شکل قاره ای با میدان سرعت GPS در محدوده فلات ایران در منطقه برخورد مایل صفحات زمین ساختی عربستان- اوراسیا

جهت محاسبه تانسور گرادیان جابه جایی در محدوده برخورد مایل صفحات زمین ساختی عربستان - اوراسیا از سه روش مثلث بندی دلونی و شبکه بندی با نزدیک ترین همسایگی ها و فواصل وزن دار استفاده شد. بدین منظور از گسترده ترین و به روزترین میدان سرعت GPS مسطحاتی برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد (شکل ۲). این میدان نتیجه ترکیب پردازش داده های جمع آوری شده در طول ۱۰ سال از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ از شبکه دائمی GNSS ایران (IPGN) با میدان های سرعت منتشر شده قبلی از مشاهدات GPS طی سال های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۳ بوده و متشکل از ۳۹۵ ایستگاه GPS است (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹).

نتایج محاسبات در اشکال ۳ تا ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل ها، نتیجه محاسبات به ترتیب با مثلث بندی دلونی و شبکه بندی با نزدیک ترین همسایگی و فواصل وزن دار نشان داده شده است. در کلیه اشکال نتایج حاصل از شبکه بندی بهتر از مثلث بندی دلونی است. علت این برتری را می توان چنین توجیه کرد که: ۱- در مثلث بندی دلونی، مثلث بندی بین ایستگاه های GPS انجام می شود پس ابعاد مثلث بندی ها مستقیماً به پراکندگی ایستگاه های GPS بستگی دارد در حالی که در شبکه بندی ابعاد سلول ها یکسان بوده و کاملاً دلخواه است. از طرفی نرخ کرنش در هر مثلث یا سلول شبکه همگن در نظر گرفته می شود که ممکن است با واقعیت سازگاری نداشته باشد. ۲- در روش مثلث بندی دلونی صرفاً از اطلاعات رئوس هر مثلث برای محاسبه تانسور کرنش در مرکز ثقل آن مثلث استفاده می شود در حالی که در شبکه بندی از اطلاعات

ایستگاه با فاصله آن از نقطه مرکزی سلول شبکه با اختصاص ثابت α وزن دهی می شود. ثابت وزن دهی α نشان می دهد که چگونه اثر یک ایستگاه با فاصله آن از نقطه مرکزی سلول کاهش می یابد. هر داده GPS با عامل وزن دهی می شود (کاردوزو و آلمندینگر، ۲۰۰۹):

$$W = \exp\left(\frac{-d^2}{2\alpha^2}\right) \quad (11)$$

در رابطه فوق d فاصله مابین نقطه مرکزی سلول و یک ایستگاه GPS می باشد. ایستگاه هایی که در فاصله 1α قرار دارند ۶۷٪ در جواب کمترین مربعات سهم هستند در حالی که ایستگاه هایی که در فاصله بزرگ تر از 3α قرار دارند سهم آن ها کمتر از ۱٪ است. در قالب ماتریسی، W به صورت یک ماتریس قطری ظاهر شده و با رابطه زیر در روند وارون سازی کمترین مربعات خطی کلاسیک وارد می شود (منکه، ۱۹۸۴).

$$m = [G^T W G]^{-1} G^T W d, \quad (12)$$

در رابطه فوق G ماتریس طرح $2n \times 6$ سمت راست رابطه (۲)، d بردار ستونی سرعت ها در سمت چپ رابطه (۲) و m بردار ستونی گرادیان های سرعت و انتقال در سمت راست رابطه (۲) می باشد.

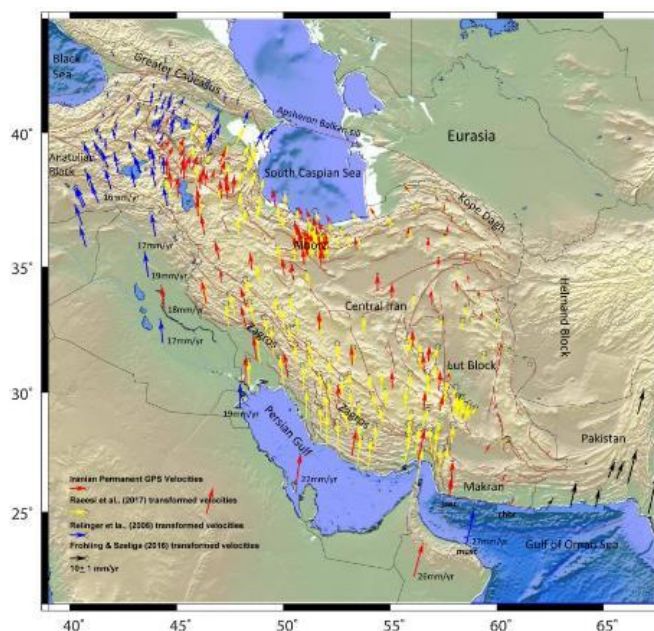
با وجود تعداد بیشتر از ۳ ایستگاه و معلوم بودن خطای بردارهای سرعت GPS و بهره گیری از این فرض که کرنش مابین ایستگاه ها همگن است، دقت مقادیر مجهول قابل محاسبه می باشد. محاسبات در نقطه مرکزی هر سلول، مستقل از محاسبات در کلیه سلول های دیگر می باشد. در انجام محاسبات مقدار ثابت وزن دهی α چنان انتخاب می شود که میزان تغییرات در پارامتر مورد محاسبه حداکثر بوده و تعداد سلول های حذفی که مقدار مورد محاسبه در آن ها کوچک تر از دقت برآورد شده باشد، حداقل شود.

در روش مثلث بندی دلونی، مدل جابه جایی برای مثلث های مجزا، از نقاط مجاور هم تشکیل شده است و سپس تانسور کرنش و پارامترهای آن در مرکز ثقل مثلث های مزبور محاسبه می شود. در این روش کرنش را

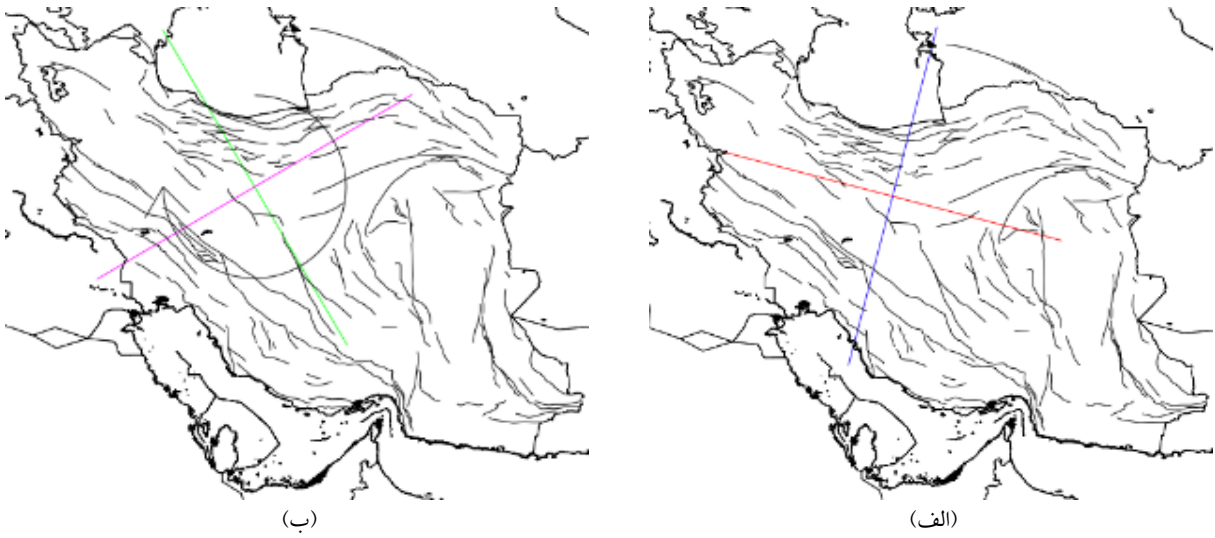
گسل‌های شیب‌لغز در منطقه از نوع معکوس باشد، انتظار می‌رود که روند عمومی این نوع گسل‌ها کمابیش عمود بر راستای محور فشارش باشد. جهت کشش نیز دارای زاویه تند با راستای برخورد مایل دو صفحه برخوردی است. شکل ۳-ب جهت دوران حول محور قائم و محورهای کرنش برشی بیشینه راست‌گرد (رنگ سبز) و چپ‌گرد (رنگ بنفش) به‌دست آمده از روش کمترین مربعات را که بهترین انطباق را با منطقه تحت پوشش مشاهدات GPS دارد نشان می‌دهد. مطابق این شکل برآیند جهت دوران در منطقه در جهت حرکت عقربه‌های ساعت با مقدار تقریبی $2/39 \times 10^{-2}$ رادیان در سال است. انتظار می‌رود که روند عمومی گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد در منطقه در راستای کرنش برشی بیشینه راست‌گرد (رنگ سبز) و روند عمومی گسل‌های امتدادلغز چپ‌گرد در راستای کرنش برشی بیشینه چپ‌گرد (رنگ بنفش) باشد. مقدار کرنش برشی بیشینه چپ‌گرد $1/46 \times 10^{-3}$ در سال بوده و دارای آزیموت تقریبی ۴۵ درجه می‌باشد.

کلیه ایستگاه‌ها بر اساس تعداد یا وزنی که برحسب فاصله به آن‌ها اختصاص داده می‌شود استفاده می‌شود. مثلث‌بندی با رعایت شرط دلونی انجام شد و جهت جلوگیری از تولید خروجی‌های غیرواقعی در نواحی مرزی بردارهای سرعت GPS مثلث‌های با زاویه زیر ۱۸ درجه ترسیم نشده و از روند محاسبات خارج شدند. همچنین در روش شبکه‌بندی سلول‌هایی که قدر مطلق کمیت اسکالر مورد محاسبه در آن‌ها کمتر از خطای ۲۵ بود از نتایج محاسبات حذف شدند.

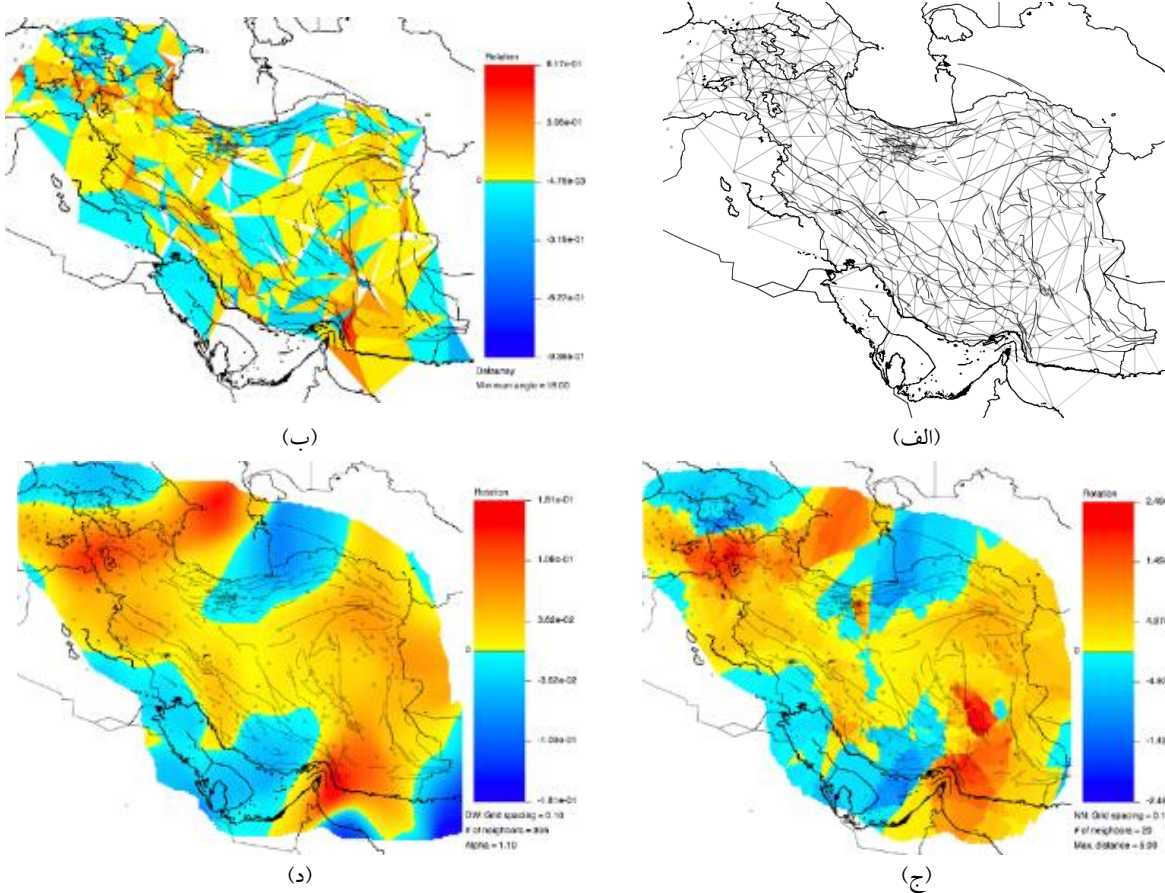
شکل ۳-الف جهت محورهای اصلی کرنش یعنی محورهای فشارشی (رنگ آبی) و کششی (رنگ قرمز) به‌دست آمده از روش کمترین مربعات را که بهترین انطباق را با منطقه تحت پوشش مشاهدات GPS دارد نشان می‌دهد. مقدار کرنش فشارشی $1/36 \times 10^{-3}$ در سال بوده و دارای آزیموت تقریبی ۱۴/۶۷ درجه می‌باشد. مطابق شکل ۳-الف جهت محور فشارشی تقریباً عمود بر محل برخورد مایل صفحات زمین‌ساختی عربستان - اوراسیا یعنی کوه‌های زاگرس است. با توجه به برخوردی بودن عامل تشکیل فلات ایران که باعث شده است اکثر



شکل ۲. میدان سرعت GPS نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹). میدان‌های سرعت راپلینگر و همکاران، ۲۰۰۶ (بردارهای آبی)، فرولینگ و شلایگا، ۲۰۱۶ (بردارهای سیاه) و رئیس و همکاران، ۲۰۱۷ (بردارهای زرد) به چارچوب مرجع IPGN (بردارهای قرمز) تبدیل شده‌اند. گسل‌های اصلی ایران، شرق ترکیه و قفقاز از حسامی و همکاران (۲۰۰۳)، طالبیان و همکاران (۲۰۱۳)، قدس و همکاران (۲۰۱۵) اقتباس شده است.



شکل ۳. (الف) جهت محوره‌های فشارشی (رنگ آبی) و کششی (رنگ قرمز) و (ب) جهت دوران حول محور قائم و محوره‌های کرنش برشی بیشینه راست‌گرد (رنگ سبز) و چپ‌گرد (رنگ بنفش)، به‌دست‌آمده از روش کمترین مربعات که بهترین انطباق را با مشاهدات GPS در منطقه مورد مطالعه دارد.



شکل ۴. (الف) شکل مثلث‌بندی دلونی انجام شده برای محاسبات. جهت و نرخ دوران حول محور قائم به روش (ب) مثلث‌بندی دلونی، (ج) نزدیک‌ترین همسایگی، (د) فواصل وزن‌دار. دامنه و جهت دوران حول محور قائم در کل منطقه مورد مطالعه متغیر است که نشان‌دهنده توزیع تغییر شکل حاصل از برخورد دو صفحه در کل فلات ایران است.

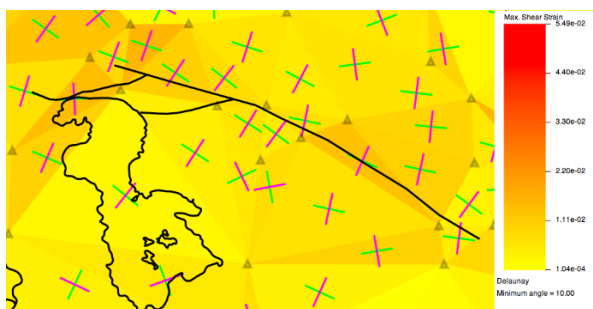
شکل ۴ جهت و نرخ‌های دوران حاصل از مشاهدات GPS را با استفاده از سه روش نشان می‌دهد. رنگ زمینه نشان‌دهنده دوران حول محور قائم می‌باشد که سمت مثبت محور مطابق قرارداد معمول زمین‌شناسی به سمت داخل زمین می‌باشد. رنگ زرد الی قرمز نشان‌دهنده دوران در جهت عقربه‌های ساعت و رنگ آبی نشان‌دهنده دوران در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌باشد. شکل ۴-الف مثلث‌بندی دلونی انجام شده برای محاسبات را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که از دید ریاضی بهترین روش برای مثلث‌بندی که باعث توزیع تقریباً یکنواخت دقت در نتایج می‌شود روش دلونی (دلونی، ۱۹۳۴) است. عدم رعایت شرط دلونی در مثلث‌بندی باعث تغییر نتایج و البته توزیع غیریکنواخت دقت خواهد شد. با توجه به اینکه توزیع نرخ کرنش در داخل هر مثلث یکنواخت فرض می‌شود، لذا عدم رعایت شرط دلونی و انجام مثلث‌بندی یا حتی چندضلعی‌بندی به نحوی که با توجه به داده‌های زمین‌شناسی داخل هر مثلث یا چندضلعی دارای شرایط زمین‌ساختی تقریباً یکسانی باشد منجر به نتایج نزدیک‌تر به واقعیت برای این روش خواهد شد. در این تحقیق مثلث‌بندی صرفاً بر اساس رعایت شرط دلونی انجام شده است.

مطابق هر سه شکل ۴-ب، ج و د دامنه و جهت دوران حول محور قائم در کل منطقه مورد مطالعه متغیر است که نشان‌دهنده توزیع تغییر شکل حاصل از برخورد مایل دو صفحه زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا در کل منطقه مورد مطالعه است. همان‌طور که اشکال ۴-ج و د نشان می‌دهند جهت دوران البرز غربی در جهت عقربه‌های ساعت و البرز شرقی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت است، تغییر جهت دوران برآورد شده در منطقه البرز، مقاومت پوسته دریای خزر را در مقابل تغییر شکل ناشی از برخورد دو صفحه نشان می‌دهد، به نحوی که برخورد دو صفحه باعث به وجود آمدن گسلش‌های معکوس در منطقه مورد مطالعه شده و مقاومت پوسته اقیانوسی دریای خزر در مقابل برخورد و تداوم برخورد باعث ایجاد

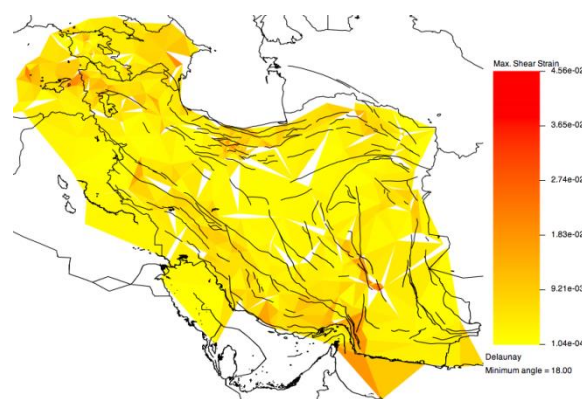
گسلش‌های امتدادلغز راست گرد در راستای شمال غرب - جنوب شرق در منطقه شمال غرب ایران شده است که تأییدکننده نظر آلن و همکاران (۲۰۰۳) و جکسون و همکاران (۲۰۰۲) است.

شکل ۵-الف مقادیر نرخ کرنش برشی بیشینه به روش مثلث‌بندی دلونی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵-ب جهت‌های کرنش برشی بیشینه راست گرد (رنگ سبز) در محدوده گسل شمال تبریز انطباق خوبی با راستای این گسل دارد که تأییدکننده رفتار امتدادلغز راست گرد این گسل است. شکل ۵-ج جهت‌های کرنش برشی بیشینه چپ گرد (رنگ بنفش) در بخش جنوبی البرز مرکزی را نشان می‌دهد که در برخی نواحی انطباق خوبی با گسل‌های شمال تهران داشته و تأییدکننده رفتار امتدادلغز چپ گرد در این گسل‌ها از جمله گسل مشا - فشم است. همچنین مطابق شکل ۵-د جهت‌های کرنش برشی بیشینه راست گرد (رنگ سبز) انطباق خوبی با راستای گسل زندان - میناب در منطقه انتقال برخورد زاگرس به فرورانش مکران داشته و رفتار امتدادلغز راست گرد را برای این گسل نشان می‌دهد.

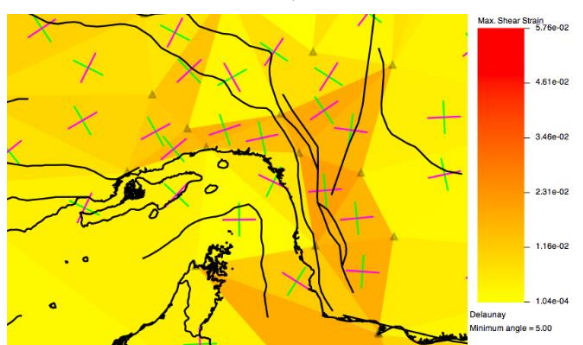
شکل ۶-الف مقادیر نرخ کرنش برشی بیشینه با شبکه‌بندی به روش نزدیک‌ترین همسایگی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶-ب جهت‌های کرنش برشی بیشینه راست گرد (رنگ سبز) در محدوده گسل شمال تبریز انطباق خوبی با راستای این گسل دارد که تأییدکننده رفتار امتدادلغز راست گرد این گسل است. شکل ۶-ج جهت‌های کرنش برشی بیشینه چپ گرد (رنگ بنفش) در بخش جنوبی البرز مرکزی را نشان می‌دهد که در برخی نواحی انطباق خوبی با گسل‌های شمال تهران داشته و تأییدکننده رفتار امتدادلغز چپ گرد در این گسل‌هاست. همچنین مطابق شکل ۵-د جهت‌های کرنش برشی بیشینه راست گرد (رنگ سبز) انطباق خوبی با راستای گسل زندان - میناب در منطقه انتقال برخورد زاگرس به فرورانش مکران داشته و رفتار امتدادلغز راست گرد را برای این گسل تأیید می‌کند.



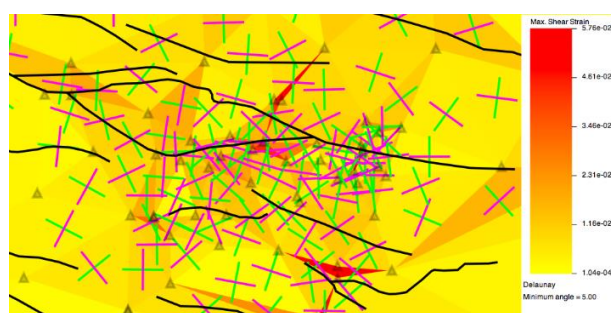
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵. (الف) نرخ کرنش برشی بیشینه به روش مثلث‌بندی دلونی. جهت‌های کرنش برشی بیشینه راست‌گرد (رنگ سبز) و چپ‌گرد (رنگ بنفش) در محدوده (ب) گسل شمال تبریز، (ج) بخش جنوبی البرز مرکزی (د) منطقه انتقال برخورد زاگرس به فرورانش مکران، انطباق خوبی با راستای گسل‌های امتدادلغز دارد.

می‌دهد.

شکل ۸- الف مقادیر نرخ اتساع به روش مثلث‌بندی دلونی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل هم مناطق انقباضی و هم مناطق انبساطی در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۸- ب و ۸- د جهت‌های اصلی کرنش یعنی فشارشی (رنگ آبی) و کششی (رنگ قرمز) با گسل شمال تبریز و گسل زندان - میناب تقریباً دارای زاویه ۴۵ درجه هستند که باز مؤید امتدادلغز بودن این گسل‌ها است. همچنین عمود بودن تقریبی محور فشارشی نسبت به گسل‌های بخش جنوبی البرز مرکزی تأیید کننده رفتار شیب‌لغز معکوس در این گسل‌هاست.

اشکال ۹- الف و ۱۰- الف به ترتیب مقادیر نرخ اتساع به روش شبکه‌بندی با نزدیک‌ترین همسایگی و فواصل وزن‌دار را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. مطابق هر

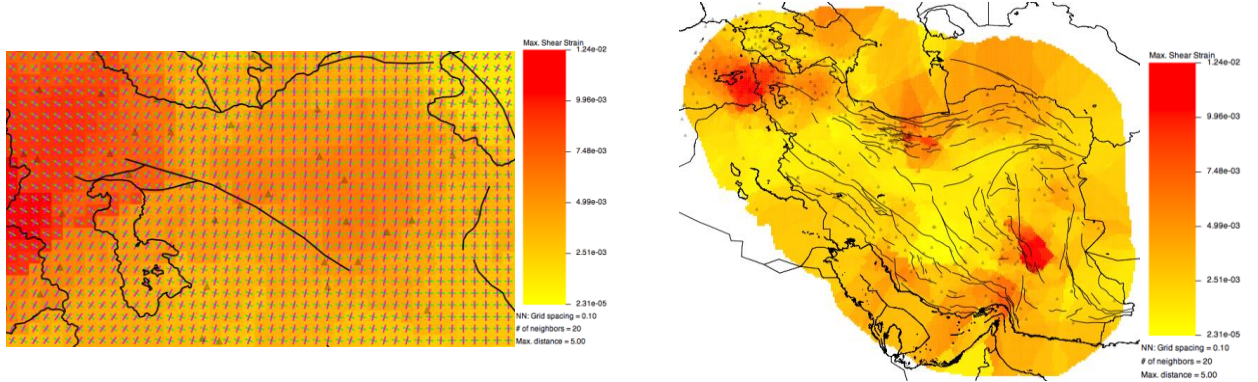
شکل ۷- الف مقادیر نرخ کرنش برشی بیشینه با شبکه‌بندی به روش فواصل وزن‌دار را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷- ب جهت‌های کرنش برشی بیشینه راست‌گرد (رنگ سبز) در محدوده گسل شمال تبریز انطباق خوبی با راستای این گسل دارد که تأیید کننده رفتار امتدادلغز راست‌گرد این گسل است. شکل ۷- ج جهت‌های کرنش برشی بیشینه چپ‌گرد (رنگ بنفش) در بخش جنوبی البرز مرکزی را نشان می‌دهد که در برخی نواحی انطباق خوبی با گسل‌های شمال تهران داشته و تأیید کننده رفتار امتدادلغز چپ‌گرد در این گسل‌هاست. همچنین مطابق شکل ۷- د جهت‌های کرنش برشی بیشینه راست‌گرد (رنگ سبز) انطباق خوبی با راستای گسل زندان - میناب در منطقه انتقال برخورد زاگرس به فرورانش مکران داشته و رفتار امتدادلغز راست‌گرد را برای این گسل نشان

انتخاب تعداد نزدیک‌ترین همسایگی برابر ۷۵. انتخاب تعداد بیشتر بردار سرعت GPS برای نزدیک‌ترین همسایگی تأثیر ایستگاه‌های دور از مرکز سلول‌ها را بیشتر کرده و باعث حذف اثرات محلی از نتیجه برآورد اتساع شده و کل منطقه مورد مطالعه را به صورت انقباضی نشان می‌دهد (شکل ۱۴- الف). مقایسه دو شکل ۶- الف و ۱۳- الف نشانگر تغییر مقادیر کرنش برشی بیشینه به‌ازای دو انتخاب متفاوت برای تعداد ایستگاه‌های نزدیک‌ترین همسایگی است. همچنین دو شکل ۴- ب و ۱۲- الف تغییر در مقدار و جهت دوران حول محور قائم را به‌ازای دو انتخاب متفاوت برای تعداد ایستگاه‌های نزدیک‌ترین همسایگی نشان می‌دهند. در ادامه داده‌ها به دو صورت با روش فواصل وزن‌دار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت: (۱) با انتخاب $\alpha = 1.1 \text{ km}$ (شکل ۱۰- الف) و (۲) با انتخاب $\alpha = 2.0 \text{ km}$. انتخاب مقدار بزرگ‌تر برای α وزن ایستگاه‌های دور از مرکز سلول‌ها را بیشتر کرده و باعث حذف اثرات محلی از نتیجه برآورد شده و ناهنجاری‌های موضعی کرنش را به دلیل هموارسازی منطقه‌ای نشان نمی‌دهد. در نتیجه کل منطقه مورد مطالعه به صورت انقباضی دیده می‌شود (شکل ۱۴- ب). مقایسه دو شکل ۷- الف و ۱۳- ب نشانگر تغییر مقادیر کرنش برشی بیشینه به‌ازای دو انتخاب متفاوت برای α است. همچنین دو شکل ۴- ج و ۱۲- ب تغییر در مقدار و جهت دوران حول محور قائم را به‌ازای دو انتخاب متفاوت برای α در روش فواصل وزن‌دار نشان می‌دهند. در نتیجه برای مطالعه کرنش به صورت محلی در مناطقی که دچار تغییر شکل فعال می‌باشند در صورتی که تعداد ایستگاه در محل زیاد باشد بایستی مقدار α در روش وزن‌دار یا تعداد همسایگی‌ها در روش نزدیک‌ترین همسایگی را کمتر انتخاب کرد.

دو شکل اکثراً مناطق انقباضی (رنگ آبی) و بعضاً مناطق انبساطی (رنگ زرد تا قرمز) با نرخ کم در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. مناطق انبساطی با شواهد زمین‌شناسی مطابقت ندارد که شاید به دلیل تراکم ایستگاهی کم GPS باشد. مطابق اشکال ۹- ب و ۱۰- ب جهت‌های اصلی کرنش یعنی محور فشارشی (رنگ آبی) و محور کششی (رنگ قرمز) با راستای اصلی گسل شمال تبریز دارای زاویه تقریبی ۴۵ درجه هستند که باز مؤید امتداد لغز بودن این گسل است. همچنین محورهای فشارشی تقریباً عمود بر دو شاخه شیب‌لغز معکوس این گسل هستند. همچنین عمود بودن تقریبی محور فشارشی نسبت به راستای برخی گسل‌های بخش جنوبی البرز مرکزی از جمله گسل مشا و گسل شمال تهران تأیید کننده رفتار شیب‌لغز معکوس و تقاطع با زاویه حدود ۴۵ درجه در برخی مناطق دیگر بیانگر رفتار امتداد لغز در این گسل‌هاست (اشکال ۹- ج و ۱۰- ج). نظیر همین قضیه برای گسل زندان - میناب نیز برقرار است (اشکال ۹- د و ۱۰- د).

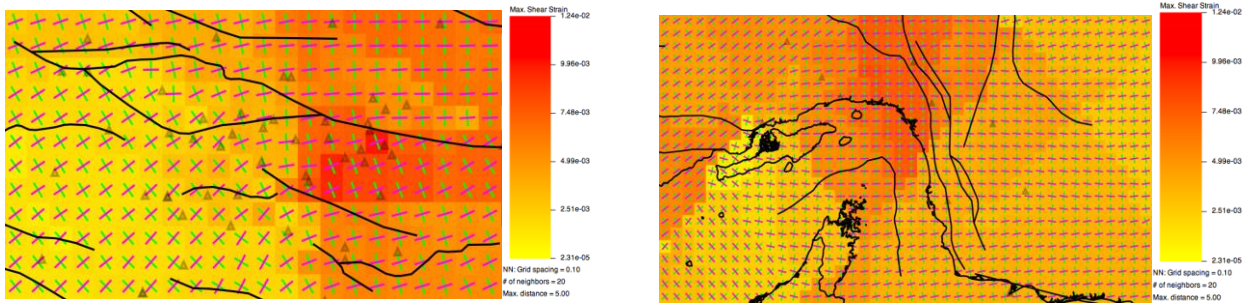
شکل ۱۱ نرخ کوتاه‌شدگی در محدوده ایران با سه روش مثلث‌بندی دلونی، نزدیک‌ترین همسایگی و فواصل وزن‌دار را نشان می‌دهد که تأیید کننده منطقه برخوردی است.

روشی که با آن گرادیان جابجایی یا میدان سرعت تحلیل می‌شود می‌تواند الگوهای محلی یا منطقه‌ای زمین‌شناسی را نشان دهد. کرنش برآورد شده به طول آنالیز بسیار حساس است. به عنوان مثال داده‌های منطقه مورد مطالعه به دو صورت با روش نزدیک‌ترین همسایگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت: (۱) با انتخاب تعداد نزدیک‌ترین همسایگی برابر ۲۰ (شکل ۹- الف) و (۲) با



(ب)

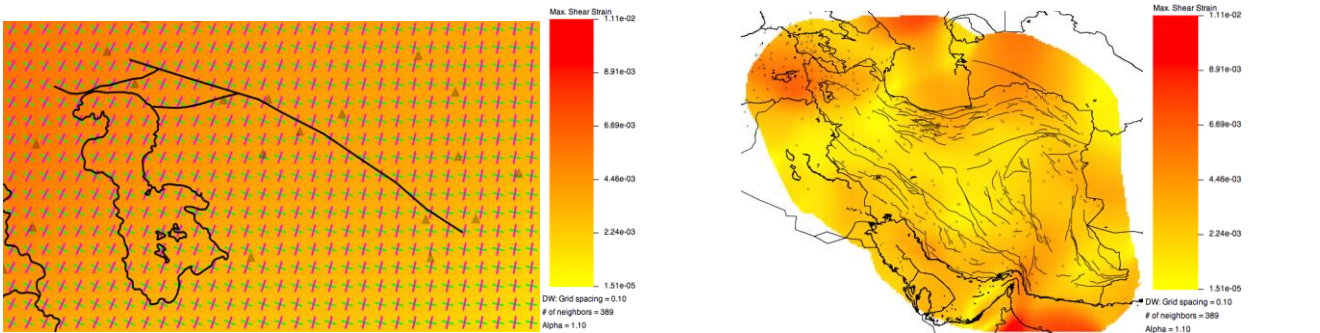
(الف)



(د)

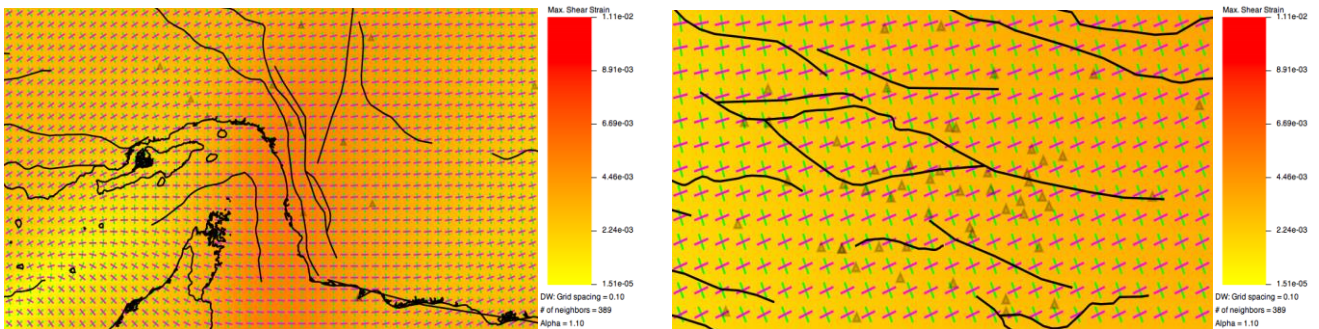
(ج)

شکل ۶. (الف) نرخ کرنش برشی بیشینه با شبکه‌بندی به روش نزدیک‌ترین همسایگی. انطباق جهت کرنش برشی بیشینه در حالت (ب) راست‌گرد (رنگ سبز) با گسل شمال تبریز، (ج) چپ‌گرد (رنگ بنفش) با گسل‌های بخش جنوبی البرز مرکزی، (د) راست‌گرد (رنگ سبز) با گسل زندان - میناب در منطقه انتقالی برخورد از زاگرس به فرورانش مکران، مشاهده می‌شود.



(ب)

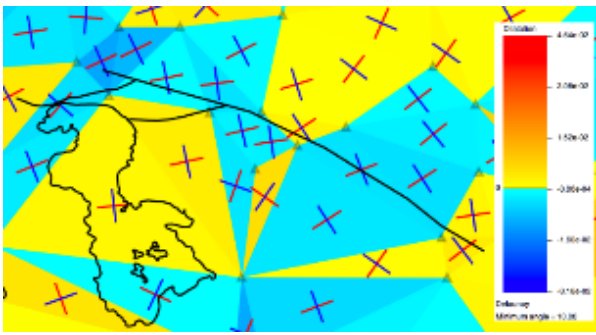
(الف)



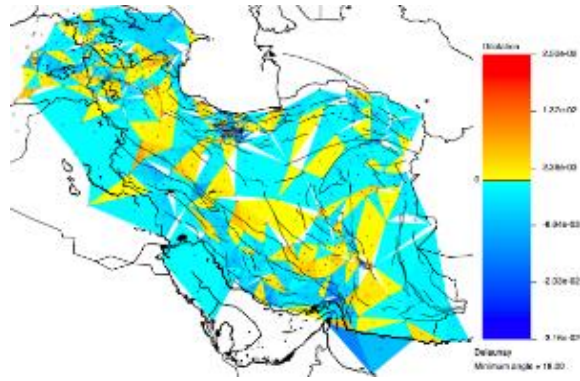
(د)

(ج)

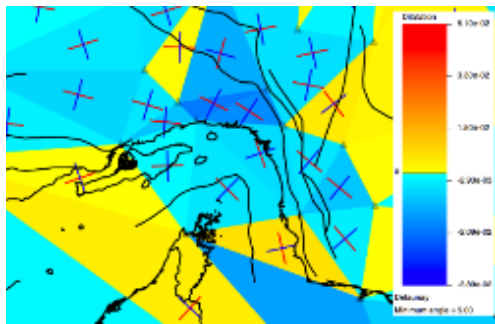
شکل ۷. (الف) نرخ کرنش برشی بیشینه با شبکه‌بندی به روش فواصل وزن‌دار. انطباق جهت کرنش برشی بیشینه در حالت (ب) راست‌گرد (رنگ سبز) با گسل شمال تبریز، (ج) چپ‌گرد (رنگ بنفش) با گسل‌های بخش جنوبی البرز مرکزی، (د) راست‌گرد (رنگ سبز) با گسل زندان - میناب در منطقه انتقالی برخورد از زاگرس به فرورانش مکران مشاهده می‌شود.



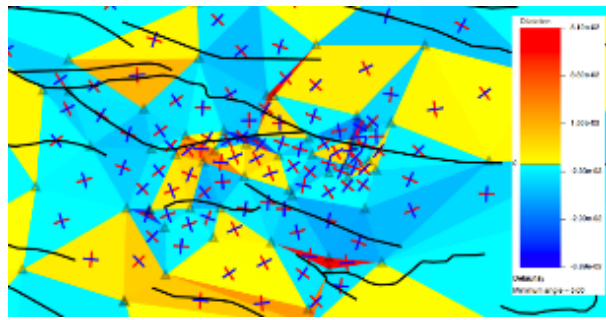
(ب)



(الف)

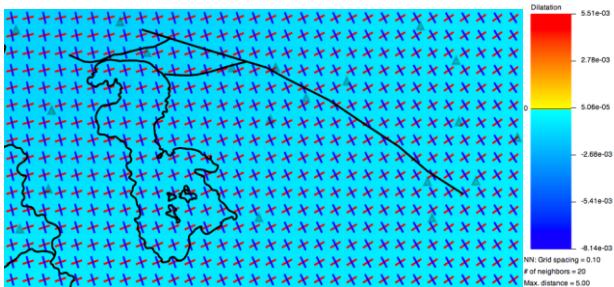


(د)

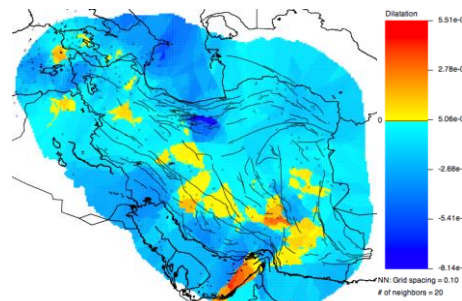


(ج)

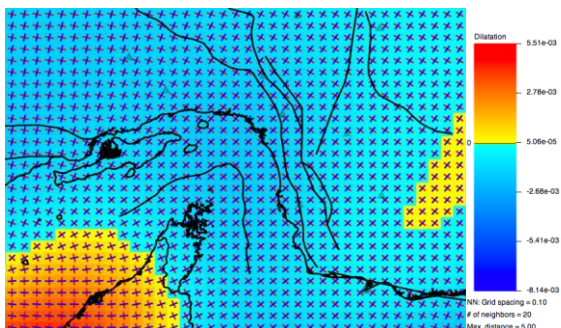
شکل ۸. (الف) نرخ اتساع به روش مثلث‌بندی دلونی. انطباق جهت‌های اصلی کرنش یعنی فشارشی (رنگ آبی) و کششی (رنگ قرمز) با (ب) گسل شمال تبریز، (ج) گسل‌های بخش جنوبی البرز مرکزی، (د) گسل زندان - میناب در منطقه انتقالی از برخورد در زاگرس به فرورانش مکران مشاهده می‌شود.



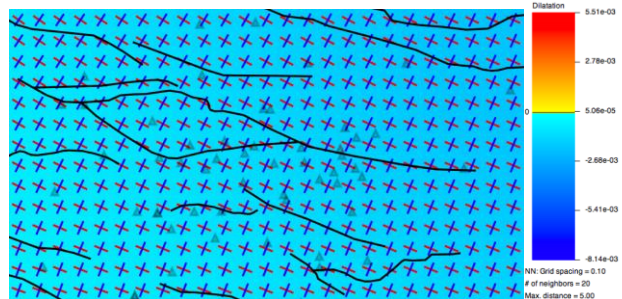
(ب)



(الف)

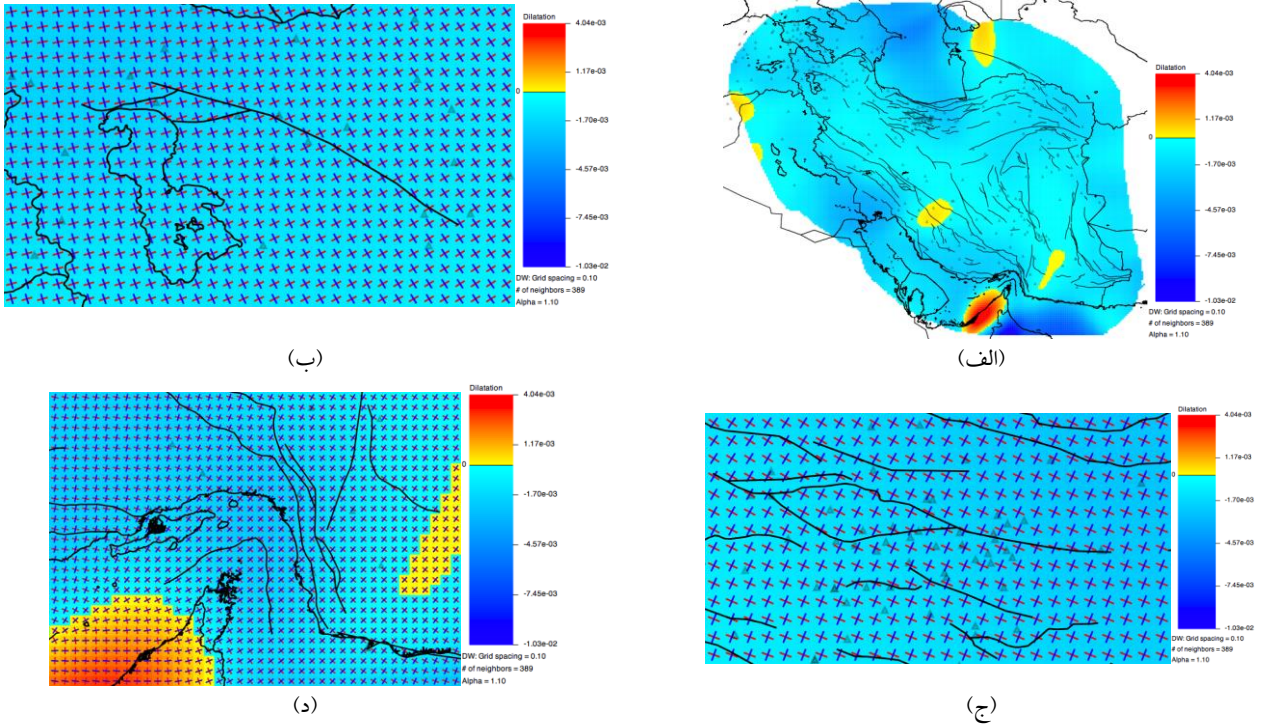


(د)

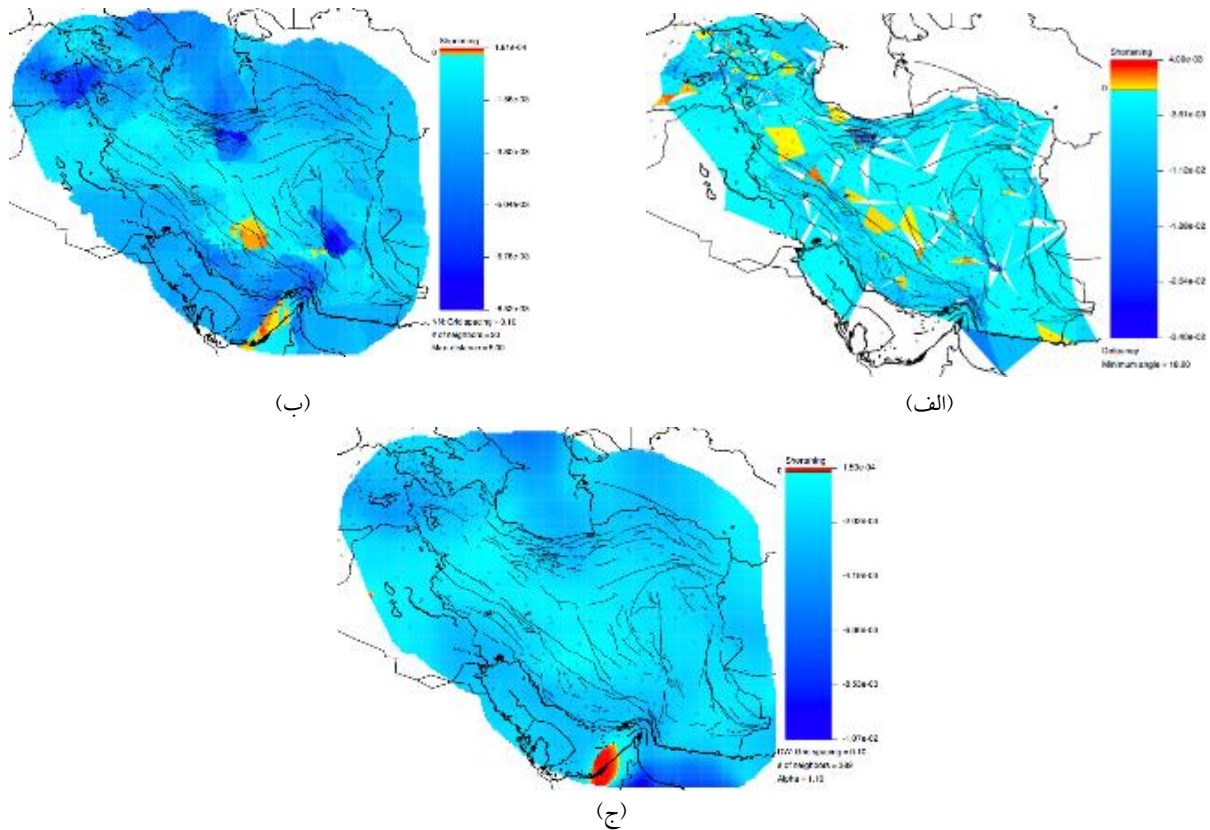


(ج)

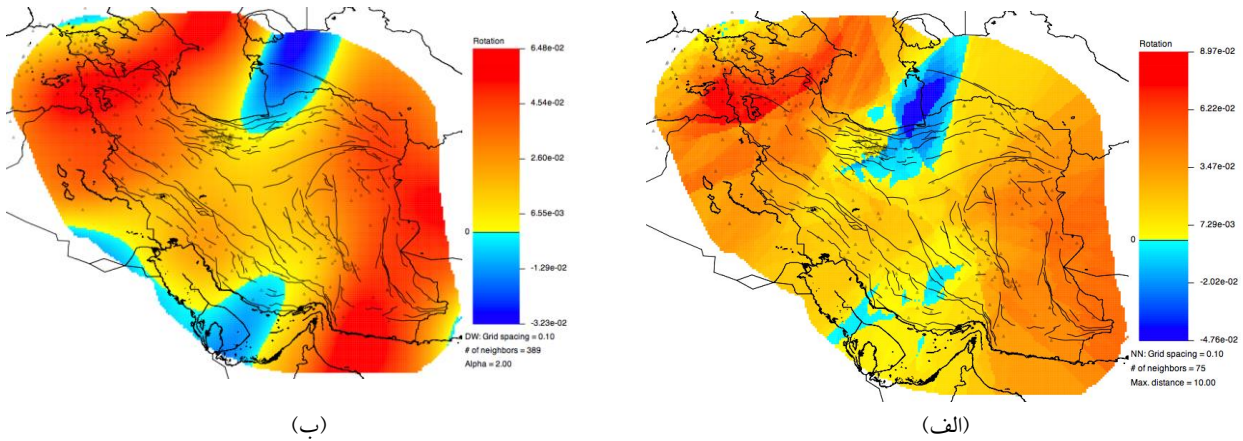
شکل ۹. (الف) نرخ اتساع با شبکه‌بندی به روش نزدیک‌ترین همسایگی. جهت‌های اصلی کرنش یعنی فشارشی (رنگ آبی) و کششی (رنگ قرمز) نسبت به (ب) گسل شمال تبریز، (ج) گسل‌های بخش جنوبی البرز مرکزی، (د) گسل زندان - میناب در منطقه انتقالی از برخورد در زاگرس به فرورانش مکران، با توصیفات زمین‌شناسی مطابقت دارد.



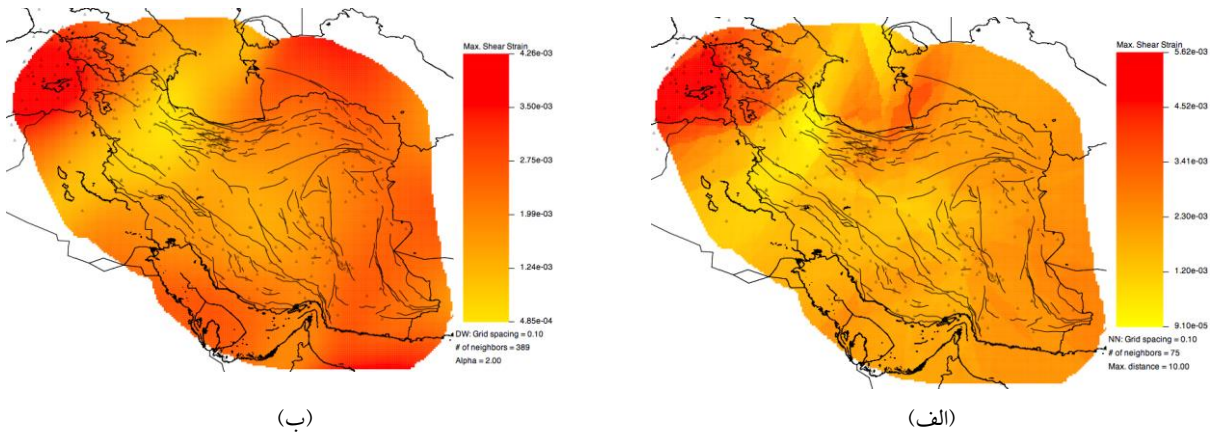
شکل ۱۰. (الف) نرخ اتساع با شبکه‌بندی به روش فواصل وزندار. جهت‌های اصلی کرنش یعنی فشارشی (رنگ آبی) و کششی (رنگ قرمز) با (ب) گسل شمال تبریز، (ج) گسل‌های بخش جنوبی البرز مرکزی، (د) گسل زندان - میناب در منطقه انتقالی از برخورد در زاگرس به فرورانش در مکران با توصیفات زمین‌شناسی مطابقت دارد.



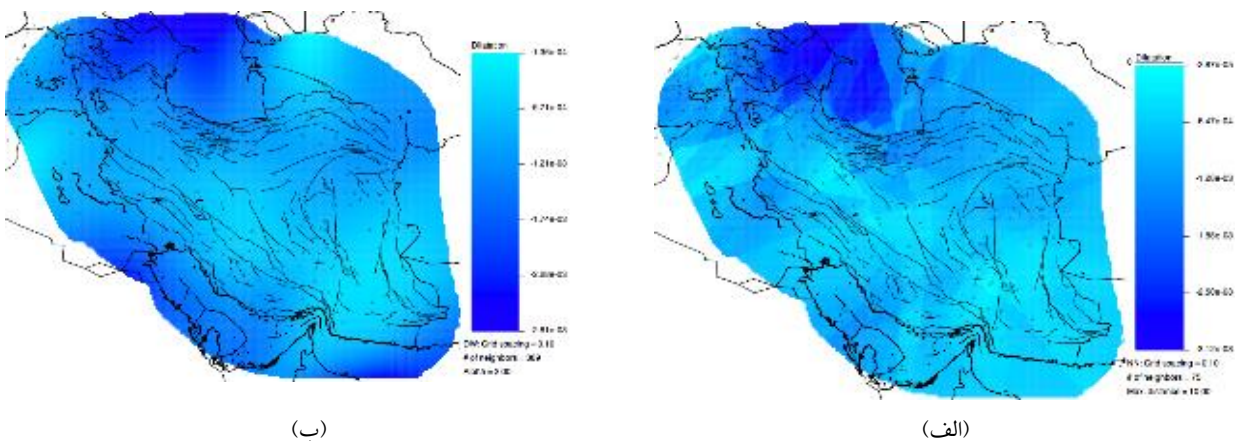
شکل ۱۱. نرخ کوتاه‌شدگی در محدوده ایران با روش (الف) مثلث‌بندی دلونی، (ب) نزدیک‌ترین همسایگی و (ج) فواصل وزندار که تأییدکننده وقوع برخورد دو صفحه در محدوده ایران است.



شکل ۱۲. تغییر مقادیر و جهت دوران حول محور قائم (الف) با افزایش تعداد ایستگاه‌ها در روش نزدیک‌ترین همسایگی در مقایسه با شکل ۴-ج و (ب) با افزایش وزن ایستگاه‌های دور از مرکز سلول‌ها با انتخاب قید $\alpha = 2.00$ در مقایسه با شکل ۴-د.



شکل ۱۳. تغییر مقادیر کرنش برشی بیشینه (الف) با افزایش تعداد ایستگاه‌ها در روش نزدیک‌ترین همسایگی در مقایسه با شکل ۶-الف و (ب) با افزایش وزن ایستگاه‌های دور از مرکز سلول‌ها با انتخاب قید $\alpha = 2.00$ در مقایسه با شکل ۷-الف.



شکل ۱۴. فیلتر شدن اثرات محلی اتساع (الف) با افزایش تعداد ایستگاه‌ها در روش نزدیک‌ترین همسایگی در مقایسه با شکل ۹-الف و (ب) با افزایش وزن ایستگاه‌های دور از مرکز سلول‌ها با انتخاب قید $\alpha = 2.00$ در مقایسه با شکل ۱۰-الف.

۵. نتیجه‌گیری و بحث

برازش یک مدل کرنش همگن برای داده‌های جابجایی یک روش پردازش ساده است که اغلب نادیده گرفته می‌شود. کرنش مانند یک ابزاری است که نشان می‌دهد یک ماده چقدر، کجا و چه زمانی تغییر شکل داده است. مدل‌سازی معکوس کرنش با استفاده از داده‌های جابه‌جایی یا سرعت الگویی را به مشاهدات پراکنده می‌دهد که در ابتدا ممکن است کاملاً پراکنده به نظر برسند. محاسبه کرنش برای تفسیر مشاهدات جابجایی یا سرعت با استفاده از مکانیک محیط‌های پیوسته ضروری است.

امروزه شبکه‌های GPS محلی به اندازه کافی چگال بوده و می‌توان به‌جای استفاده از پروفیل‌های یک بعدی، تانسور گرادین سرعت دوبعدی یا مسطحاتی را محاسبه کرد. با استفاده از تانسور گرادین دو بعدی می‌توان کمیت‌های اسکالری نظیر نرخ دوران حول محور قائم و نرخ اتساع را محاسبه کرده و به تفسیر تغییر شکل‌های موجود در منطقه پرداخت. شبکه‌های GPS مسطحاتی 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 گسل‌های فعال دست یافت.

جهت محاسبه تانسور گرادین جابه‌جایی در محدوده فلات ایران از سه روش مثلث‌بندی دلونی و شبکه‌بندی با نزدیک‌ترین همسایگی و فواصل وزن‌دار با مشاهدات GPS استفاده شد. مطابق نتایج به‌دست آمده از محاسبات در حالت کلی جهت محورهای فشارشی با جهت برخورد صفحه‌های زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا انطباق دارد. مطابق هر سه رویکرد مورد استفاده دامنه و جهت دوران حول محور قائم در سراسر فلات ایران متغیر است که نشانگر توزیع تغییر شکل در کل منطقه مورد مطالعه بوده و مشارکت کل فلات ایران را در توزیع برخورد مایل مابین صفحه‌های زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا نشان می‌دهد. در هر سه روش تغییر جهت دوران برآورد شده در منطقه

البرز، مقاومت پوسته اقیانوسی دریای خزر را در مقابل تغییر شکل ناشی از برخورد صفحات عربستان و اوراسیا نشان می‌دهد، به‌نحوی که برخورد دو صفحه باعث به وجود آمدن گسل‌های معکوس در منطقه مورد مطالعه شده و مقاومت پوسته اقیانوسی دریای خزر در مقابل برخورد و تداوم برخورد باعث ایجاد گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد در راستای شمال غرب - جنوب شرق در منطقه ایران شده است.

محورهای اصلی کرنش بی‌نهایت کوچک با جهت ساختارهای عمده زمین‌شناسی مطابقت دارند. جهت محورهای کوتاه‌شدگی به‌صورت تقریباً متعامد با گسل‌های معکوس در منطقه مورد مطالعه است. در امتداد گسل‌های امتدادلغز، محورهای کششی و محورهای فشارشی دارای زاویه نزدیک به ۴۵ درجه نسبت به مناطق گسلی هستند. همچنین جهت کرنش برشی بیشینه در حالت راست‌گرد و چپ‌گرد انطباق تقریبی به‌ترتیب با راستای گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد و چپ‌گرد در منطقه مورد مطالعه دارد. کرنش حاصل از GPS حوزه‌های منسجم بزرگی از چرخش در جهت عقربه‌های ساعت (مثبت) و خلاف جهت عقربه‌های ساعت (منفی) را نشان می‌دهد که با تغییر شکل دائمی و طولانی‌مدت منطقه سازگار است.

نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهند که در حالت کلی تغییر شکل‌های محاسبه شده با استفاده از مشاهدات GPS ویژگی‌های تغییرشکلی در منطقه مورد مطالعه را منعکس کرده و انطباق مناسبی با شواهد زمین‌شناسی و تحقیقات قبلی از جمله ماسون و همکاران (۲۰۰۷ و ۲۰۱۴) دارند. به‌نحوی که محورهای کششی، فشارشی، برشی، نرخ دوران حول محور قائم و نرخ اتساع با ویژگی‌های زمین‌شناسی بلندمدت در منطقه سازگار بوده و نشان می‌دهند که میدان‌های سرعت GPS فرآیندهای مرتبط با تحولات زمین‌ساختی منطقه را تأیید می‌کنند. اختلاف مابین نتایج حاصل از GPS و مشاهدات زمین‌شناسی را می‌توان به پراکندگی و توزیع غیریکنواخت ایستگاه‌های GPS یا

و با نرخ بالا بود. چنین شبکه‌هایی که به ابعاد مسائل مورد مطالعه مقیاس بندی شده‌اند، نمونه برداری زمانی منظم تری را ارائه کرده و این امکان را می‌دهد تا با اطمینان بیشتری کرنش بین لرزه‌ای نزدیک گسل را برآورد کند. مهم تر از آن استفاده از شبکه‌های سه بعدی پیشنهاد می‌شود که امکان محاسبه تانسور گرادیان سرعت سه بعدی را فراهم می‌آورد. علاوه بر این استقرار شبکه‌های متراکم ایستگاه‌های GPS پیوسته همراه با تداخل سنجی راداری تفاضلی برای ارائه تصویر لحظه‌ای کامل تر مکانی و زمانی از تغییر شکل زمین ساختی پیشنهاد می‌شود.

شبکه بندی میدان سرعت GPS با استفاده از توابع گرین، موجک کروی، کریچینگ و شبکه‌های عصبی و صحت سنجی نتایج آن‌ها با تکنیک‌های یادگیری ماشین و محاسبه تانسور کرنش و کمیت‌های اسکالر مستخرج از آن با استفاده از میدان سرعت شبکه بندی شده و مقایسه نتایج با همدیگر و با نتایج عملیات میدانی برای تحقیقات بعدی پیشنهاد می‌شود.

مراجع

راست بود، ا.، (۱۴۰۱). درون یابی میدان سرعت مسطحاتی GPS در محدوده برخورد مایل صفحات زمین ساختی عربستان-اوراسیا با استفاده از توابع گرین. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۳)، ۶۱۱-۶۲۱.

راست بود، ا.، (۱۴۰۲). تغییر شکل‌های معاصر پوست‌های در منطقه البرز براساس میدان سرعت GPS و توابع اسپلین. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۷(۱)، ۱-۱۹.

Allen, M. B., Vincent S. J., Alsop G. I., Ismail-zadeh, A., & Flecker, R. (2003). Late Cenozoic deformation in the South Caspian region: effects of a rigid basement block within a collision zone. *Tectonophysics*, 366 (3-4), 223-239.

Allmendinger, R.W., Smalley, R., Caprio, H., & Brooks, B. (2005). Bending the Bolivian orocline in real time. *Geology*, 33, 905-908.

Allmendinger, R. W., Reilinger, R., & Loveless, J. (2007). Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano. *Tectonics*, 26, TC3013, doi:10.1029/2006TC002030.

تغییر شکل دائمی ناشی از زمین لرزه‌های بزرگ نسبت داد. محاسبات انجام شده برتری روش‌های شبکه بندی را نسبت به روش مثلث بندی دلونی نشان می‌دهد. عدم رعایت شرط دلونی و انجام مثلث بندی یا چندضلعی بندی به نحوی که با توجه به داده‌های زمین شناسی موجود داخل هر مثلث یا چندضلعی شرایط زمین ساختی تقریباً یکسانی حاکم باشد منجر به نزدیکی نتایج حاصل از این روش به واقعیت خواهد شد.

مطابق نتایج این تحقیق برای مطالعه کرنش به صورت محلی در مناطقی که دچار تغییر شکل فعال هستند در صورتی که تعداد ایستگاه در محل زیاد باشد بایستی مقدار ثابت α در روش وزن دار یا تعداد همسایگی‌ها در روش نزدیک ترین همسایگی را کمتر انتخاب کرد.

برای آزمون روش، استفاده از سرعت‌های شبکه‌ای تعیین شده از مدل‌هایی نظیر المان‌های مرزی یا بلوک کشسان برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان نشان داد که حداقل در تقریب مرتبه اول، تغییر شکل محاسبه شده از بردارهای GPS توصیف قابل قبولی از الگوهای تغییر شکل منطقه‌ای ارائه می‌دهند. برای استفاده از داده‌های GPS جهت درک تکامل فلات، باید رابطه بین تغییر شکل آنی، کشسان، بین لرزه‌ای و تغییر شکل دائمی طولانی مدت در منطقه مورد مطالعه بررسی شود. شبکه‌های GPS مسطحاتی فعلی برای مشاهده تغییرات لحظه‌ای و مرتبه اول کرنش در مقیاس منطقه‌ای کافی هستند. با این حال، برای بررسی دقیق تر باید در انتظار استقرار شبکه‌های GPS متراکم با مشاهدات پیوسته

Banerjee, P., & Bürgmann, R. (2002). Convergence across the northwest Himalaya from GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 29(13), 1652, doi:10.1029/2002GL015184.

Cai, J., & Grafarend, E.W. (2007). Statistical analysis of geodetic deformation (strain rate) derived from the space geodetic measurements of BIFROST Project in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, 43, 214-238.

Cardozo, N., & Allmendinger, R.W. (2009). SSPX: A program to compute strain from displacement/velocity data. *Computers & Geosciences*, 35, 1343-1357.

- Delaunay, B. (1934), Sur la sphère vide. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. *Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles*, 6, 793–800.
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H.R., Ritz, J.-F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Le Moigne, N., Sedighi, M., & Khorrami, F. (2010). Gps and Gravity Constraints on Continental Deformation in the Alborz Mountain Range, Iran. *Geophysical Journal International*, 183(3), 1287-1301.
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H.R., & Tavakoli, F. (2011). Nw Iran-Eastern Turkey Present-Day Kinematics: Results from the Iranian Permanent Gps Network. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1–2), 27-34.
- England, P., & Molnar, P. (2005). Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia. *J. Geophys. Res.*, 110, B12401, doi:10.1029/2004JB003541.
- Flesch, L. M., W. E. Holt, P. G. Silver, M. Stephenson, C.-Y. Wang, & Chan, W. W. (2005). Constraining the extent of crust-mantle coupling in central Asia using GPS, geologic, and shear wave splitting data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 238, 248 – 268.
- Frohling, E., & Szeliga, W. (2016). GPS constraints on interpolate locking within Makran subduction zone. *Geophys. J. Int.*, 205, 67–76.
- Ghods A., Shabaniyan E., Bergman E., Faridi M., Donner S., Mortezaejad G., & Aziz-Zanjani A. (2015). The Varzaghan–Ahar, Iran, Earthquake Doublet (Mw 6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest Iran. *Geophys. J. Int.*, 203, 522–540.
- Handwerger, A. L., Huang, M. H., Fielding, E. J., Booth, A. M., & Bürgmann, R. (2019). A shift from drought to extreme rainfall drives a stable landslide to catastrophic failure. *Scientific reports*, 9(1), 1-12.
- Hessami, K., Jamali, F. & Tabassi, H. (2003). Major Active Faults of Iran (map), Ministry of Science, Research and Technology, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- Jackson J., Priestley K., Allen M., & Berberian M. (2002). Active tectonics of the south Caspian basin. *Geophysical Journal International*, 148 (2), 214-245.
- Kahle, H.-G., Cocard, M., Peter, Y., Geiger, A., Reilinger, R., Barka, A., & Veis, G. (2000). GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian plates. *J. Geophys. Res.*, 105(23), 353-370.
- Khorrami F., Vernant P., Masson F., Nilfouroushan F., Mousavi Z., Nankali H., Saadat S. A., Walpersdorf A., Hosseini S., Tavakoli P., Aghamohammadi A., & Alijanzade, M. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophys. J. Int.*, 217, 832–843.
- Malvern, L. E. (1969). Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignières, M., Nankali, H., & Van Gorp, S., 2007, Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophys. J. Int.*, 170, 436–440.
- Masson, F., Lehujeur, M., Ziegler Y., & Doubre, C. (2014). Strain rate tensor in Iran from a new GPS velocity field. *Geophys. J. Int.*, doi:10.1093/gji/ggt509.
- Means, W. D. (1976). Stress And Strain: Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists. Springer, New York, 339.
- Menke, W. (1984). Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press, Orlando FLa, p. 260.
- 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.
- Raeesi, M., Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., Boroujeni S., & Tiampo, K. (2017). Quantitative Analysis of Seismicity in Iran. *Pure Appl. Geophys.*, 174, 793-833.
- Ramsay, J.G. (1967). Folding and Fracturing of Rocks. McGraw-Hill Book Company, New York p. 568.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., & Karam, G., (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa – Arabia – Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res.*, 111, B05411, doi:10.1029/2005JB004051.
- Sandwell, D. T., & Wessel P. (2016). Interpolation of 2-D vector data using constraints from elasticity. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (10), 703–10,709, doi:10.1002/2016GL070340.
- Savage, J. C., Weijun Gan, W., & Svarc, J. L. (2001). Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone, *Journal of Geophysical Research*, 106 (B10), 21995-

- 22007.
- Shen, Z. K., M. Wang, Zeng, Y., & Wang, F. (2015). Optimal interpolation of spatially discretized geodetic data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105(4), 2117-2127, doi:10.1785/0120140247.
- Tape, C., Muse, P., Simons, M., Dong, D., & Frank Webb, F. (2009). Multiscale estimation of GPS velocity fields. *Geophys. J. Int.*, 179, 945-971.
- Talebian, M., Ghorashi, M., & Nazari, H. (2013). Seismotectonic map of the Central Alborz, Research Institute for Earth Sciences. Geological Survey of Iran.
- Turcotte, D. L., & Schubert, G. (1982). *Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems*, 450 pp., John Wiley, New York.
- Zhang, P., Shen, Z., Wang, M., Gan, W., Bürgmann, R., Molnar, P., Wang, Q., Niu, Z., Sun, J., Wu, J., Hanrong, S., & Xinzhao, Y., (2004). Continuous deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System data. *Geology*, 32, 809- 812.
- Wu, Y., Jiang Z., Liu, X., Wei, W., Zhu, S., Zhang L., Zou Z., Xiong, X., Wang, Q., & Du J. (2016). A Comprehensive Study of Gridding Methods for GPS Horizontal Velocity Fields. *Pure and Applied Geophysics*, 174(3), 1201-1217.