

# استفاده از وارون سازی داده های سازوکار کانونی زمین لرزه برای بررسی رژیم تنش لرزه زمین ساختی استان فارس

سیروس اسماعیلی<sup>۱\*</sup>، سامان منفرد<sup>۲</sup> و زهرا کمالی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۱، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۶)

## چکیده

در این پژوهش، به تحلیل میدان های تنش لرزه زمین ساختی استان فارس، بر پایه وارون سازی سازمان یافته داده های سازوکار کانونی زمین لرزه ها به روش آنچلیه (۲۰۰۲) پرداخته شده است. مهم ترین هدف این مقاله بررسی میزان یکنواختی رژیم تنش لرزه زمین ساختی و نوع سازوکار جنبشی غالب و احتمالی گسل های مسبب زمین لرزه در مناطق گوناگون محدوده مورد بررسی است. این روش، سه ارزیاب مهم برای تفسیر ویژگی های زمین ساختی به دست می دهد که عبارت انداز، ارزیاب های میزان پایداری رژیم تنش، ارزیاب های تعیین درجه صحت تحلیل و ارزیاب های تعیین میزان پایداری مکانیکی تانسورهای تنش. داده های سازوکار کانونی مورد استفاده در این پژوهش، محدوده ای بین سال های ۱۹۳۵ تا ۲۰۱۳ را در بر می گیرد. با توجه به ویژگی های زمین ساختی متفاوت محدوده مورد بررسی، لازم دانستیم که برای دستیابی به یک تحلیل واقع بینانه از رژیم تنش لرزه زمین ساختی، منطقه را به پهنه های با رژیم تنش به نسبت مجزا و متفاوت تقسیم کنیم و سپس روش ذکر شده را برای هر پهنه به کار بندیم. بدین منظور، با در نظر داشتن ویژگی های زمین ساختی و لرزه زمین ساختی و استفاده از بهترین روش های پیش بینی زمین آماری خطی نارایب مکانی (کریجینگ) با متغیرهای روند محورهای تنش بیشینه (P) و کمینه (T)، پنج پهنه با ویژگی های تنشی مجزا تشخیص داده شد. با توجه به اینکه روش کریجینگ این امکان را فراهم می آورد که بتوان مقدار متغیر مورد بررسی را در هر نقطه دلخواه که اطلاعات آن در دسترس نیست پیش بینی کرد لذا استفاده از این روش به منظور تشخیص اولیه این پهنه ها، موجب تسهیل و بهبود در استفاده از روش وارون سازی داده های سازوکار کانونی در مناطق گوناگون می شود. از آنجاکه در استفاده از روش کریجینگ هر مدلی نمی تواند مناسب باشد، به منظور تشخیص و استفاده از بهترین مدل کریجینگ روش اعتبارسنجی Leave-one-out به کار گرفته شد. همچنین تحلیل خطاهای مانده ها، به منظور انتخاب بهترین مدل صورت گرفت. مناسب ترین مدل از بین انواع روش های موجود کریجینگ به منظور پیش بینی روند محورهای تنش در کل استان فارس به کار گرفته شد. براساس نتایج پیش بینی مکانی و ارزیابی مناسبیت مدل ها روش کریجینگ عام بهترین نتایج را برای پهنه بندی اولیه به دست داد. براساس نتایج کریجینگ عام، پنج پهنه اولیه در استان فارس شناسایی و روش وارون سازی داده های سازوکار کانونی در این پنج پهنه به کار گرفته شد. نتایج تحلیل نشان می دهد که سوی میانگین محورهای تنش اصلی بهینه شده استان فارس، تغییرات زیادی نداشته و در جهت (NNE-SSW) (N21E) تا (N34E) است و با روند عمومی هم گرایی بین صفحه عربی و ایران مرکزی مطابقت دارد. پایداری و یکنواختی رژیم تنش، از پهنه های شمال غرب (محدوده سامانه گسل برشی کازرون) و جنوب شرق محدوده، به سمت پهنه جنوب غرب استان افزایش پیدا می کند. یکنواخت نبودن رژیم تنش، دلالت بر ناهمگنی و نامتجانسی سازوکارهای جنبشی گسل های لرزه زا و توزیع تنش، در مناطق یاد شده دارد. سازوکار جنبشی غالب گسل های محدوده های شمال غرب و جنوب شرق محدوده از نوع برشی امتداد لغز است و حرکت های معکوس و تا حدودی نرمال، در رتبه بعدی قرار گرفته اند و به سمت پهنه جنوب غرب، گسل ها تمایل زیادی به سازوکار جنبشی معکوس دارد و سازوکارهای امتداد لغزی و نرمال در جایگاه بعدی قرار می گیرند.

**واژه های کلیدی:** تانسور تنش، مولفه لغزش تنش برشی، سازوکار کانونی، استان فارس، کریجینگ

## Study of seismotectonic stress regime in Fars Province based on inversion of earthquake focal mechanisms data

Cyrus Esmaeili<sup>1\*</sup>, Saman Monfared<sup>2</sup>, Zahra Kamali<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Sciences, Birjand University, Birjand, Iran

<sup>2</sup>Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

(Received: 11 January 2014, accepted: 17 March 2015)

### Summary

We have analyzed the state of stress in Fars Province, Iran, based on systematic inversion of available focal mechanisms of the earthquake method of Angelier (2002). Fars Province makes up a significant portion of the "Fars salient" in the Zagros fold-thrust belt. The main purpose of this study was to evaluate the uniformity of the seismotectonic stress regimes and to investigate the dominant and possible kinetic mechanism of the faults that cause earthquakes in different parts of the study area.

We analysed the data using two main methods. First, the application of the right dihedral method quickly provided a robust graphical expression of the mechanical compatibility within a set of focal mechanisms. Second, a direct inversion gave an accurate quantitative account of the stress state. This method is based on consideration of the SSSC (Slip Shear Stress Component) criterion. The SSSC is the component of stress acting in the slip direction of a fault. The intrinsic characteristics of the adopted criterion results in two main technical properties of the method. First, no choice between the nodal planes is needed prior to or during the inversion. Second, the numerical aspects are reduced to a minimum so that the runtime is negligible regardless of the size of the data set.

The major advantage of this method is that, after the inversion, three main estimators enable one to evaluate the mechanical consistency of a data set in terms of both the individual and the average misfit levels obtained from the best-fitting stress tensor. These estimators are the estimator of the stability of the stress regime, the estimator to determine the accuracy of the analysis level and the estimator of mechanical stability stress tensors. The focal mechanism of the earthquake data was collected from 1935 to 2013 from a variety of sources. Some of these sources were online moment tensor catalogs and other sources were extracted from the literature.

Due to the very different characteristics of tectonics in Fars Province, we deemed it necessary to divide the area into zones with relatively similar stress regimes, and then follow these methods for each zone. Therefore, in view of the tectonic features and earthquake characteristics, the best linear unbiased geostatistical estimator method (Kriging) was used which provided the ability to predict under study variables in each unsampled coordinates based on a spatial correlation function. Therefore, using the spatial prediction method of Kriging, we could predict the spatial axes of the stress variables P and T to pre-identify the zones. This pre-identification of zones improves and facilitates using the method of systematic inversion of focal mechanisms. To choose the best spatial model, the Leave-one-out cross validation method was used. In addition, prediction residuals were evaluated to select the best spatial Kriging method. Evaluating and cross validation results showed that the Ordinary Kriging method presented the best spatial prediction method to pre-identify the zones. According to the Ordinary Kriging results, the five relatively distinct zones of stress characteristics in Fars Province were identified.

The results of the systematic inversion of focal mechanisms indicated that the mean principal stress axes optimized zones do not change significantly, and the common trend of NNE-SSW (N21E to N34E) was determined. The uniformity of the stress regime of the area (Fars Province) increased as we moved from the northwest (the range of Kazeroun shear fault zone) to the southeast and the southwest areas. The nonuniformity of the stress regimes implied heterogeneity and heterogeneous kinetic mechanisms for seismic faults and the stress distribution in the

mentioned areas. The kinetic mechanism of the northwest and southeast fault zones have a tendency to strike slip and general mechanism of southwest area is revers for many faults.

**Keywords:** stress tensor, Slip Shear Stress Component, focal mechanism, Fars Province, Kriging.

گونه‌های متفاوت تنشی که در این محدوده وجود دارد انتخاب شده است (شکل ۱). این منطقه به علت وجود داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ای به نسبت زیاد و وجود سامانه‌های گسلی فعالی چون کازرون، کره‌بس و سروستان، زمینه مساعدی برای بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساختی فراهم کرده است.

سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ای، اطلاعات باارزشی درباره جهت و بزرگای نسبی رژیم تنش پوسته در اختیار پژوهشگران قرار داده‌اند. روش‌های متعددی برای تحلیل رژیم تنش لرزه‌زمین‌ساختی براساس وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی از سوی پژوهشگرانی چون آنجلیه (۱۹۸۴)، گفارت و فورسیت (۱۹۸۴)، پاپازاچوز و کراتزی (۱۹۹۲)، لوئیس و وان اک (۱۹۹۶)، مرکی‌یر و گیلهاردیس (۱۹۸۹) عرضه شده است. اغلب این روش‌ها برپایه نظریه والاس-بات استوارند و بیانگر آن‌اند که بردار لغزش حاصل از سازوکار زمین‌لرزه‌ای، در جهت و سوی تنش برشی گسل است (والاس، ۱۹۵۱؛ بات، ۱۹۵۹). با توجه به مزیت‌های روش آنجلیه (۲۰۰۲) نسبت به روش‌های دیگر، مانند نبود نیاز به انتخاب پیشین بین صفحه‌های گره‌ای، روش ذکر شده، مبنای کار این بررسی قرار گرفته است. همچنین با توجه به اینکه در این بخش از ایران وضعیت پیچیده‌ای از تنش‌ها وجود دارد (اسماعیلی، ۱۳۹۰) و به علت ناهمگنی رژیم‌های تنش، نوع دیگری از تحلیل تنش اعمال شده است. در واقع با جدایش تنش‌ها در محدوده مورد بررسی رژیم‌های چندگانه تاثیرگذار در این روش مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های چندی برای بررسی رژیم تنش در امتداد سامانه‌های گسلی

## ۱ مقدمه و جایگاه زمین‌ساختی

کمریند چین‌خورده و رانده زاگرس درحکم بخشی از کمریند کوه‌زایی آلپ-همالیا در حاشیه شمال‌شرقی صفحه عربی واقع شده است (تکین، ۱۹۷۲؛ بربریان و کینگ، ۱۹۸۱). برخورد ترشیاری بین صفحه‌های عربی و ایران که اکنون نیز ادامه دارد، باعث چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی همراه با کوتاه‌شدگی در کمریند کوه‌زاد زاگرس شده است (تاتار و همکاران، ۲۰۰۴؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۴). این کوتاه‌شدگی در عرض کمریند چین‌خورده و رانده زاگرس، در حدود ۳۰ الی ۸۵ کیلومتر است و اغلب در بخش‌های بالایی افق‌های جدایشی، با چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی جبران می‌شود (فالکن، ۱۹۷۴؛ بلانس و همکاران، ۲۰۰۳). آهنگ هم‌گرایی بین صفحه عربی و ایران، براساس شبکه GPS، ۲۵ میلی‌متر برسال در جهت E1۰N (بایر و همکاران، ۲۰۰۲) و براساس مدل NUVEL-1، ۳۵ میلی‌متر بر سال (دمتس و همکاران، ۱۹۹۰) برآورد شده است.

تعیین و بازنگری سوی تنش‌های لرزه‌زمین‌ساختی عهدحاضر بخش جنوب‌شرقی زاگرس و جداسازی تنش‌های بخش‌های گوناگون آن با توجه به ناهمگنی آنها، با استفاده از روش‌های وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی، مهم‌ترین هدف این پژوهش است. در این مقاله، استان فارس که بخش اعظمی از آن در کمریند چین‌خورده و رانده زاگرس و قسمت باریکی از شمال شرق آن در زون فلسی شده زاگرس (علوی، ۲۰۰۷) واقع است، برای بررسی وضعیت رژیم تنش عهد حاضر و



شکل ۱. موقعیت زمین‌ساختی استان فارس در کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس. MF، گسل پیشانی کوه، KB، گسل کازرون، RF، گسل رازک، HF، گسل هندلیجان، Ba، گسل بالارود، KB، گسل کازرون، SP، گسل سبزویشان (طالبیان و جکسون، ۲۰۰۴؛ اسماعیلی و زمانی، ۱۳۹۰).

محدوده‌ای از ۱۹۳۵ تا ۲۰۱۳ را در بر می‌گیرد. در جدول ۱، منابع و روش‌های هر کدام از مجموعه داده‌ها آورده شده است. شکل ۲، موقعیت داده‌ها را روی نقشه زمین‌ساخت استان فارس نشان می‌دهد. در مرحله بعد، پالایش اولیه داده‌ها بر اساس موقعیت هندسی صفحه‌های گره‌ای و محورهای اصلی P، B و T، به ترتیب محور تنش بزرگ‌تر، متوسط و کوچک‌تر، صورت پذیرفت. از بین ۲۷۲ داده سازوکار کانونی گردآوری شده، ۲۴۹ داده انتخاب شدند. عمق کانونی این زمین‌لرزه‌ها کمتر از ۴۰ کیلومتر است و در عمق‌های ۱۰، ۱۵ و ۳۵ کیلومتر، بیشترین فراوانی را دارند. سازوکار جنبشی اغلب صفحه‌های گره‌ای از نوع معکوس است و سازوکارهای امتدادلغز، در رتبه بعدی قرار دارند. سازوکار جنبشی

کازرون، کره‌بس و زون گذر زاگرس-مکران، با تلفیق نتایج داده‌های میدانی و سازوکار کانونی صورت گرفته است (لاکومب و همکاران، ۲۰۰۶؛ جکسون و طالبیان، ۲۰۰۴؛ هاتزفلد و همکاران، ۲۰۱۰؛ یمینی‌فرد و همکاران، ۲۰۰۷) که در ادامه نتایج حاصل از این تحقیقات، با نتایج تحلیل این پژوهش مقایسه خواهد شد.

## ۲ روش تحقیق

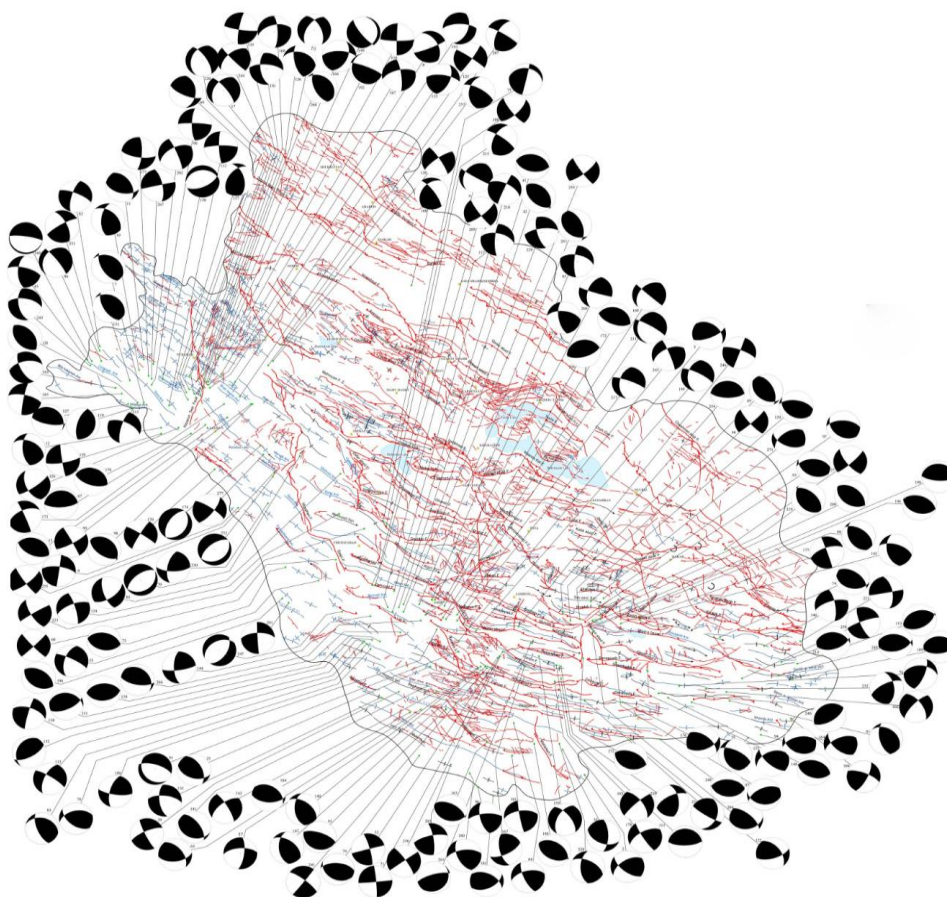
### ۱-۲ گردآوری داده‌های سازوکار کانونی

برای بررسی وارون‌سازی سازوکارهای کانونی در استان فارس، ابتدا به جمع‌آوری داده‌های سازوکار کانونی زلزله‌های موجود در محدوده پرداخته و در این زمینه به منابع گوناگونی مراجعه کردیم. داده‌های در دسترس،

نرمال، کمترین تعداد را دارد و به‌جز در انتهای شمالی سامانه گسلی کره‌بس و چند نقطه از جنوب‌غرب استان فارس، در سایر مناطق وجود ندارد. روند عمومی محورهای P، ۱۰ تا ۴۰ درجه و T، ۱۰۰ تا ۱۳۰ درجه است.

جدول ۱. منابع داده‌های سازوکار کانونی. روش استفاده شده برای هر منبع آورده شده است.

مرجع	روش
کاندرا (۱۹۸۱) (دانشگاه هاروارد)	منابع گوناگون تانسور گشتاور مرکزوار (CMT)
سازمان زمین‌شناسی امریکا جکسون و فیچ (۱۹۷۹)	تانسور گشتاور مرکزوار (CMT) تحلیل شکل اولین موج رسیده
جکسون و مک‌کنزی (۱۹۸۴)	تحلیل شکل اولین موج رسیده
جکسون و همکاران (۲۰۰۲)	تحلیل شکل اولین موج رسیده
مک‌کنزی (۱۹۷۲)	تحلیل شکل اولین موج رسیده
موستریوک و پترو (۱۹۹۴)	ناشناس
نوروزی (۱۹۷۲)	احتمالاً اولین حرکت موج P



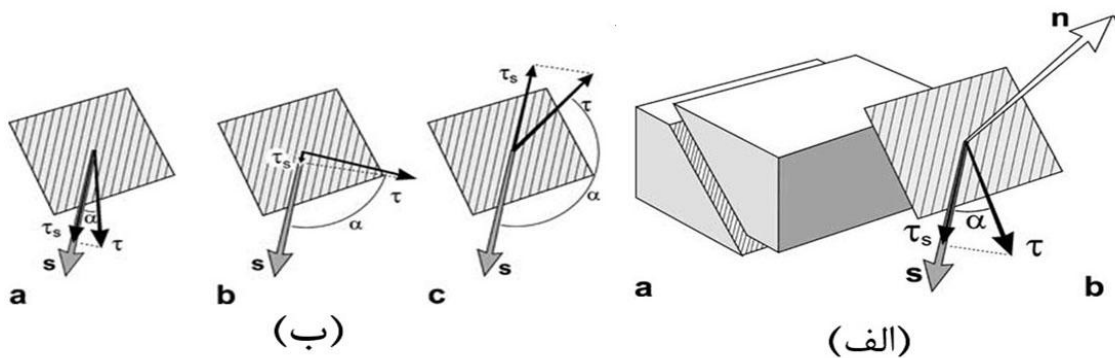
شکل ۲. موقعیت داده‌های سازوکار زمین‌لرزه‌ای در استان فارس روی نقشه زمین‌ساخت استان (اسماعیلی، ۱۳۹۰).

۲-۲ مبانی وارون‌سازی سازوکارهای کانونی بر

مبنای مولفه لغزش تنش برشی (SSSC)

در روش آنجلیه (۲۰۰۲)، دو مزیت عمده، آن را از سایر روش‌ها مجزا می‌کند: اولاً هیچ انتخاب پیشین بین صفحه‌های گره‌ای وجود ندارد (آنجلیه، ۲۰۰۲)؛ ثانیاً، تانسورهای تنش به چهار مولفه مجهول کاهش پیدا می‌کنند و با حل چهار معادله چهارمجهولی، به تفسیر درباره رژیم تنش لرزه‌زمین‌ساختی پرداخته می‌شود (آنجلیه، ۱۹۸۴). این چهار مولفه مجهول عبارت‌اند از جهت‌های سه محور اصلی تنش بهینه  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (تنش‌های بهینه فشارشی، خشی و کششی) و نسبت تنش تفاضلی اصلی،  $\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ . نتایج نهایی، هم به صورت عددی، در سه دسته الف،  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \phi$ ، ب، ارزیاب میزان پایداری رژیم تنش  $\omega_{acc}$ ، ارزیاب‌های تعیین درجه صحت تحلیل صورت‌گرفته و پایداری مکانیکی تانسورهای تنش  $\omega_{sd}, \omega_{moy}, \tau_{sd}^*, \alpha_{sd}, \alpha_{moy}$ ، ج، به صورت ترسیمی (تصویر شده روی نیم‌کره پایینی شبکه هم‌مساحت اشمیت) داده می‌شود. همچنین روی تصویر به‌دست آمده، بیضی‌های اطمینان ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد و

حاشیه خطای آزمون‌تی هر دسته از داده‌ها محاسبه می‌شود. این روش بر پایه مولفه لغزش تنش برشی، (SSSC Slip Shear Stress Component) استوار است (شکل ۳-۳). الف و ب) و همانند بردار،  $s\tau$ ، تصویر عمودی تنش برشی ( $\tau$ ) روی بردار لغزش ( $s$ ) است. بر این اساس، اگر تنش محاسبه شده در خلاف جهت لغزش مشاهده شده عمل کند مقدار  $\tau_s$ ، عددی منفی خواهد بود. تنش و بردارهای مربوط (شامل  $\tau$  و  $\tau_s$ )، همگی با روابط هندسی و ریاضی محاسبه شده‌اند، برخلاف  $S$  که روی گسل قابل مشاهده است. برای یک تنش برشی که زاویه مایل کوچکی با جهت لغزش دارد، مقدار SSSC مثبت است و بزرگای آن نزدیک به تنش برشی ( $\tau$ ) و در زاویه صفر مساوی با آن خواهد بود (شکل ۳-ب-ا). همچنان‌که زاویه  $\alpha$ ، به زاویه ۹۰ درجه نزدیک می‌شود، مقدار SSSC کوچک و کوچک‌تر شده و در زاویه ۹۰ درجه، مقدار آن به صفر می‌رسد (شکل ۳-ب-ب). برای زوایای منفی، مقدار SSSC منفی‌تر و نزدیک به بزرگای تنش برش است و در زاویه ۱۸۰ درجه به مقدار  $-\tau$  می‌رسد (شکل ۳-ب-ج).



شکل ۳. الف، تصویری از گسل چپ‌گرد معکوس، برای نمایش مولفه لغزش تنش برشی (SSSC).  $n$ ، خط عمود بر صفحه گسل،  $s$  بردار لغزش واحد. هاشورخورده روی گسلی، منطبق با امتداد لغزش صفحه گسل است. پیکان‌های سیاه دلالت بر تنش برشی ( $\tau$ ) و بردار SSSC ( $\tau_s$ ) دارد.  $\alpha$ ، زاویه تنش برشی محاسبه شده و لغزش واقعی. ب، اختلاف در مقدار  $\tau_s$ ، با تغییر زاویه لغزشی-برشی ( $\alpha$ ). سه حالت متفاوت با مدول تنش برشی مشابه ( $\tau$ ): حالت a، با زاویه کوچک  $\alpha$ ،  $\tau_s$  نزدیک به  $\tau$  و در نتیجه مقدار  $\tau_s$  و  $\tau$  نیز نزدیک به هم هستند، حالت b، زاویه  $\alpha$ ، نزدیک به ۹۰ درجه و مقدار SSSC کوچک است و در حالت c، زاویه منفی بزرگ‌تر  $\alpha$ ، و در نتیجه مقدار  $\tau_s$  نزدیک به  $\tau$  و نزدیک به  $-\tau$  خواهد بود.

معیار، معیارهای دیگری مانند فرضیات مانایی و همسان‌گردی نیز باید مورد بررسی قرار گیرد.

### ۳ استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ

مانایی فرایندی فضایی به معنی پایایی توزیع مشاهدات در راستای تغییرات طول و عرض جغرافیایی است. همسان‌گردی یک فرایند فضایی بدین معنی است که برازش تابع تغییرنگار (Variogram function) در جهت‌های جغرافیایی متفاوت یکسان است و نبود همسان‌گردی نشان‌دهنده وجود همبستگی فضایی مشاهدات در یک جهت خاص است. اگر مجموعه متغیرهای

$$\mathbf{Z}(\mathbf{s}) = [Z(s_1), \dots, Z(s_n) : s_i \in D \subseteq R^k]$$

را به مثابه یک

فرایند فضایی در نظر بگیرید، به طوری که  $s_i$  در حکم مختصات مکانی این متغیرها باشد.  $2\gamma(\mathbf{h})$  تابع تغییرنگار نامیده می‌شود و برآورد تجربی این تابع‌ها به صورت رابطه (۱) را ماترون (۱۹۶۲) تعریف کرده است.

$N(\mathbf{h})$  مجموعه همه زوج‌هایی است که در فاصله  $\mathbf{h}$  از یکدیگر قرار دارند و  $|N(\mathbf{h})|$  تعداد این مشاهدات است. در روش کریجینگ ساده با فرض معلوم بودن مقدار میانگین تحت شرایط نآرایی و کمترین مربعات خطا در مکان غیرنمونه‌ای  $s_0$  مقدار پیش‌بینی به صورت  $\hat{Z}(s_0) = \gamma(\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)' \Gamma^{-1} \mathbf{Z}(\mathbf{s})$  به دست می‌آید. این مقدار برای روش کریجینگ معمول با فرض معلوم نبودن میانگین به صورت  $\hat{Z}(s_0) = \gamma(\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)' \Gamma^{-1} \mathbf{Z}(\mathbf{s})$  و در کریجینگ جامع با فرض اینکه میانگین فرایند خود ترکیب خطی از متغیر فضایی دیگری است به صورت  $\hat{Z}(s_0) = \Gamma_f^{-1} \gamma_0 \mathbf{Z}(\mathbf{s})$  (شابنبرگر، ۲۰۰۴). به منظور عرضه یک مدل پیش‌بینی مناسب بررسی نیکویی برازش مدل‌های انتخاب شده و اعتبارسنجی این مدل‌ها بسیار حائز اهمیت است.

### ۳-۲ پهنه‌بندی اولیه محدوده مورد بررسی از لحاظ

هم‌سازی و یکنواختی نسبی رژیم تنش

حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ای، روشی مهم در پژوهش‌های زمین‌ساختی و ابزار پایه برای تحلیل میدان‌های تنش ناحیه‌ای به شمار می‌رود. اغلب در استفاده از روش‌های وارون‌سازی سازوکارهای کانونی، فرض اولیه این است که همه این سازوکارها به طور مکانیکی همساز هستند، بدین مفهوم که همگی آنها تحت تاثیر یک رژیم تنشی میانگین بوده‌اند (آنجلیه، ۱۹۷۵). برای اطمینان بخشیدن به این فرض، از روش‌هایی مانند دوجهی مستقیم (آنجلیه، ۱۹۷۷)، طبق اصول حل سازوکارهای کانونی، برآورد اولیه‌ای از سوگیری محورهای اصلی تنش  $P$ ،  $B$  و  $T$  (محورهای تنش بیشینه، خنثی و کمینه)، در حکم مهم‌ترین خصیصه رژیم تنش صورت می‌گیرد. نتایج این روش روی استریوپلات آورده می‌شود. در این روش، نتایج برآورد میانگین موقعیت فضایی محورهای تنش روی استریوپلات نشان داده می‌شود. بنابراین، تصویر روشنی از پراکندگی محورهای اصلی تنش، در هر مختصات مکانی دلخواه از ناحیه مورد بررسی را به دست نمی‌دهد. در صورتی که در روش پیشنهادی این مقاله، با استفاده از روش زمین‌آماري کریجینگ، علاوه بر برآورد اولیه سوگیری محورهای اصلی تنش، قادر به عرضه روند تغییرات این محورها در هر نقطه دلخواه از محدوده مورد بررسی خواهیم بود.

کریجینگ مجموعه‌ای از روش‌های درونیابی برای مشاهدات زمین‌آماري با کمینه کردن میانگین توان دوم خطای پیش‌بینی، تحت شرط نآرایی است. این روش‌ها بر مبنای تابع‌هایی که نوسان‌های مکانی ناشی از تغییر مختصات مکانی مشاهدات را نشان می‌دهد، ساخته می‌شوند (شابنبرگر، ۲۰۰۴). معمولاً در مجموعه آمار کلاسیک معیار بررسی مشاهدات در مقایسه با توزیع نرمال محک زده می‌شود ولی در آمار فضایی علاوه بر این

به منظور نرمال‌سازی مشاهدات به کار برده شده است. برای بررسی مانایی در میانگین، با استفاده از نمودار پراکنش سه‌بعدی، مشاهده می‌شود که داده‌ها دارای روند خاصی نیست و میانگین آنها با تغییرات طول و عرض جغرافیایی ثابت است (شکل ۲). بررسی فرض‌های مانایی و همسان‌گردی برای داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه-ای در استان فارس، نشان‌دهنده مانایی و همسان‌گردی در این مشاهدات است، لذا به منظور برازش تابع‌های تغییرنگار، از مدل‌های تغییرنگار مانا و همسان‌گرد استفاده شده است.

برای محاسبه بهترین تابع تغییرنگار، ابتدا مقدار تغییرنگار تجربی در دوازده گام مکانی که در شکل ۴ با علامت (+) نشان داده شده است با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. سپس انواع گوناگونی از تابع‌های تغییرنگار مانا و همسان‌گرد روی مقادیر تغییرنگار تجربی برازش داده شد و مقادیر ملاک‌های اعتبارسنجی برای این مدل‌ها در هر کدام از روش‌های کریجینگ ساده، معمول و جامع برای داده‌های سازوکار کانونی محاسبه شد. مقادیر ملاک‌های ارزیاب اعتبارسنجی در جدول ۳ آورده شده است.

در این مقاله به منظور تحلیل روش‌های کریجینگ و انتخاب بهترین الگوی پیش‌بینی، با استفاده از روش اعتبارسنجی  $t$ ، بر پایه ملاک‌هایی مانند میانگین و میانگین توان دوم خطا، میانگین خطای استاندارد شده و میانگین انحراف استاندارد پیش‌بینی تعریف شده در جدول ۲ مورد استفاده قرار گرفته است. بهترین الگوی پیش‌بینی، مدل با کمترین میانگین و میانگین مربعات خطا در نظر گرفته می‌شود. همچنین هرچه مقدار  $MSTDK$  به  $\sqrt{MSE}$  نزدیک‌تر و مقدار  $SMSE$  به مقدار یک نزدیک‌تر باشد، الگوی به‌دست آمده بهتر است.

۱-۳ نتایج تحلیلی استفاده از روش کریجینگ با متغیر محور تنش  $P$ ، برای محدوده مورد بررسی به علت فشارشی بودن محدوده، متغیر محور تنش بیشینه اصلی  $P$ ، برای پهنه‌بندی اولیه هم‌سازی رژیم تنش با استفاده از روش‌های کریجینگ، در نظر گرفته شده است. ابتدا، به منظور تحلیل و به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماري با استفاده از روش شاپیرو-ویلک (شاپیرو، ۱۹۷۲)، نرمال بودن مشاهدات، مورد آزمون قرار گرفت. فرض نرمال بودن برای این مشاهدات با این آزمون رد شده و لذا تبدیل باکس-کاکس (Box-Cox) با مقدار  $\lambda = 0.37$

جدول ۲. مدل و مقادیر ملاک‌های اعتبارسنجی انواع روش‌های کریجینگ.

$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z^*(s_i) - z(s_i))$	میانگین خطای پیش‌بینی
$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (z^*(s_i) - z(s_i))^2}{N}$	میانگین توان دوم خطای پیش‌بینی
$SMSE = \sum_{i=1}^N \left( \frac{(z^*(s_i) - z(s_i))^2}{N \times \sigma_k^2(s_i)} \right)$	میانگین توان دوم خطای استاندارد شده
$MSTDK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_k(s_i)$	میانگین انحراف استاندارد پیش‌بینی

جدول ۳. مقادیر ملاک‌های اعتبارسنجی در هر روش کریجینگ.

	ME	MSE	SMSE	MSTDK
کریجینگ ساده	0.14	6.32	0.88	7.23
کریجینگ معمول	0.04	6.75	0.92	7.42
کریجینگ جامع	0.03	7.03	1.06	6.58



است. در این تصاویر، روشن‌ترین نقطه، محل محور تنش فشارشی ترجیحی ( $\sigma_{1\ pref}$ ) و محل تیره‌ترین نقاط، محورهای تنش کششی و خنثی ترجیحی ( $\sigma_{3\ pref}$  و  $\sigma_{2\ pref}$ ) را نشان می‌دهد. این محورها بیشترین احتمال وقوع مکانی هر کدام از محورهای اصلی تنش را نشان می‌دهد. بنابراین نمی‌تواند به‌طور قطع، به منزله محورهای تنش اصلی در نظر گرفته شود. همچنین مقدار  $\varphi_{est}$ ، برآورد اولیه مقدار  $\varphi$ ، را در حکم تابعی از احتمال توزیع سه‌بعدی محورهای اصلی بیان می‌کند. مقادیر  $T_{max}$  و  $P_{max}$ ، پایداری مکانیکی مجموعه داده‌ها را براساس میزان تمرکز محورهای اصلی تنش، نشان می‌دهد. با استفاده از تنش تفاضلی  $\phi_{est} = (\sigma_{2est} - \sigma_{3est}) / (\sigma_{1est} - \sigma_{3est})$  نیز می‌توان برآورد اولیه‌ای از سازوکار جنبشی گسل‌های منطقه به‌دست آورد.  $N_m$ ، تعداد داده‌های شرکت داده شده در تحلیل است و بیشتر محور تنش بیشینه داده‌های سازوکار کانونی را نسبت به تنش بهینه فشارشی محاسبه شده نشان می‌دهد (شکل ۷-الف).

در استفاده از این روش بایستی دو فرض را در نظر گرفت. اولاً، همه سازوکارهای کانونی، به‌طور مکانیکی همساز باشند، بدین مفهوم که همگی آنها تحت‌تأثیر یک رژیم تنشی میانگین قرار داشته باشند. ثانیاً، تنش همگن در قالب وضعیت محورهای اصلی تنش و آهنگ تنش تفاضلی، تعریف شده باشد (آنجلیه، ۱۹۸۹).

با توجه به مقادیر به‌دست آمده در این جدول، روش کریجینگ جامع دارای کمترین مقدار میانگین خطا است و میانگین مربعات استاندارد شده در این روش به مقدار یک بسیار نزدیک است که این امر نشان‌دهنده آن است که الگوی پیش‌بینی مناسب و همچنین مقادیر میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف معیار پیش‌بینی در این روش نسبت به سایر روش‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر است.

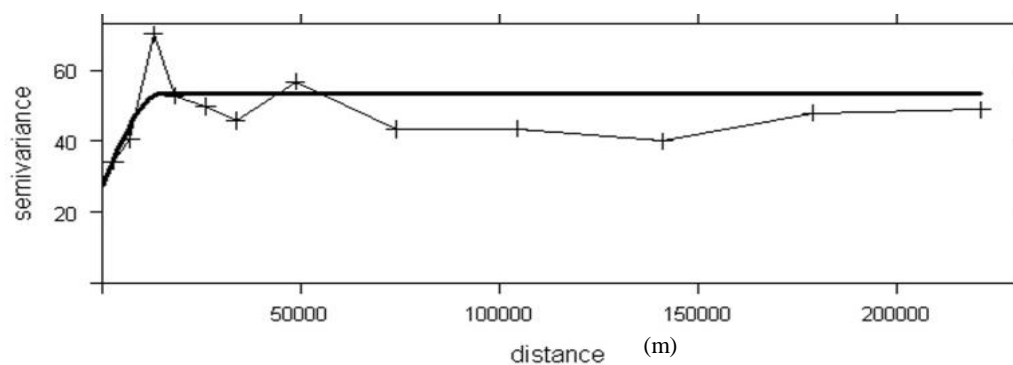
این پهنه‌ها انطباق مناسبی با سامانه‌های گسلی فعالی همچون کازرون (پهنه A)، کره‌بس (پهنه B)، گسل‌های پیشانی (Salient) فارس (پهنه C) و گسل‌های موازی با خط عمان (پهنه E) دارند. در ادامه روش‌های وارون‌سازی سازوکارهای کانونی به‌منظور بررسی رژیم تنش، برای هر پهنه محاسبه خواهد شد.

### ۲-۳ اجرای روش دوجهی مستقیم در محدوده مورد بررسی

روش دوجهی مستقیم را اولین بار آنجلیه و مک‌لر (آنجلیه و مک‌لر، ۱۹۷۷) مطرح کردند و برآورد اولیه‌ای از سوگیری تانسورهای تنش و مقدار تنش تفاضلی به‌دست دادند. در اینجا، بعد از پالایش اولیه داده‌های سازوکار کانونی، همه آنها در تحلیل وارون داده‌ها به روش دوجهی مستقیم شرکت داده شده‌اند. نتایج عددی حاصل از کاربرد این روش در پهنه‌های گوناگون استان فارس، در جدول ۴، و نتایج ترسیمی آن در شکل ۶، آورده شده

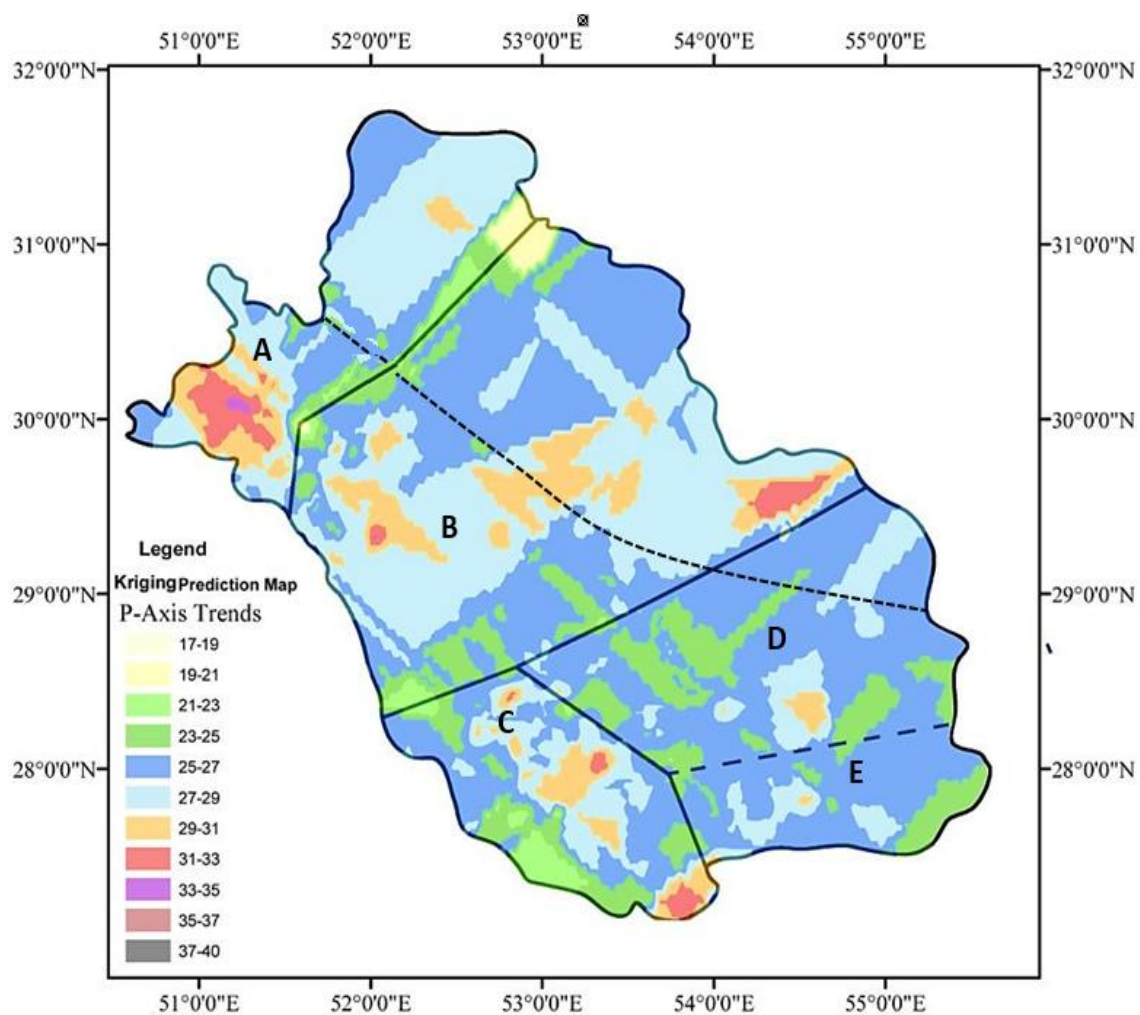
جدول ۴. نتایج عددی روش دوجهی مستقیم در پهنه‌های مختلف استان فارس (موقعیت محورها بر اساس جهت شیب و شیب بیان شده است).

Zones	$N_m$	$T_{max}$	$P_{max}$	$\sigma_{1\ pref}$		$\sigma_{2\ pref}$		$\sigma_{3\ pref}$		$\varphi_{est}$
A	55	65	68	208	05	027	62	119	01	0.30
B	29	73	73	205	06	294	18	100	70	0.37
C	62	82	82	199	11	107	11	335	74	0.18
D	35	65	67	197	08	293	30	093	60	0.24
E	24	54	51	031	06	124	34	293	56	0.29



شکل ۴. تابع تغییرنگار برازش داده شده روی مشاهدات در ۱۲ گام مکانی.

Model: Spherical, Nugget:27.42 , Partial sill:25.90, Range:14639.62



شکل ۵. نقشه پیش‌بینی مکانی متغیر سوی محور تنش بیشینه (P) در استان فارس، براساس روش زمین‌آماری کریجینگ. پنج پهنه با مشخصات به‌نسبت متمایز سوی تنش بیشینه، برآورد شده است.

تجربی ثابت شده است که مقادیر کم، متوسط و بزرگ  $\varphi$ ، به ترتیب حکایت از سازوکار حرکتی معکوس، امتدادلغز و نرمال دارد (آنجلیه، ۱۹۸۹). محدودتر بودن بیضی اطمینان محورهای تنش فشارشی ( $\sigma_1$ )، یکنواختی بیشتر محور تنش بیشینه داده‌های سازوکار کانونی را نسبت به تنش بهینه فشارشی محاسبه شده نشان می‌دهد (شکل ۷-الف).

#### ۲-۴ پهنه B:

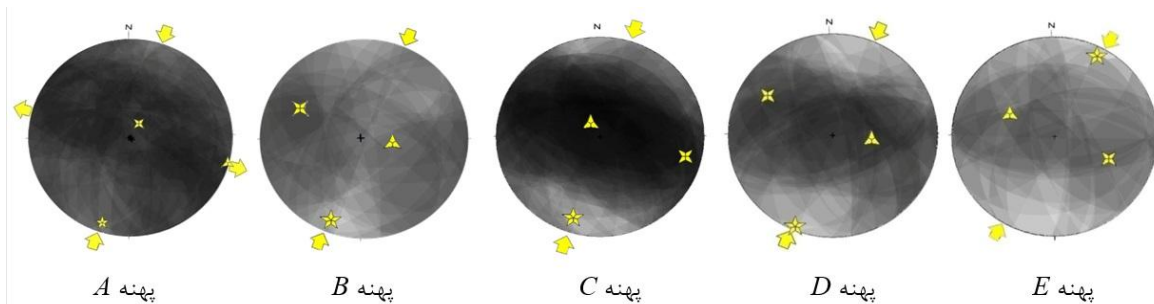
مقدار آستانه پذیرفتنی ( $\omega_{acc}$ ) برای این پهنه، ۲۵ درصد انتخاب شده است و با این انتخاب، ۷۰ درصد داده‌ها در تحلیل شرکت داده شدند ( $N_{acc}$ ، برابر با ۷۰ درصد). درصد کم مولفه آستانه پذیرفتنی، به مفهوم یکنواختی بیشتر رژیم تنشی در این پهنه است. مقدار متوسط  $\varphi$ ، دلالت بر وجود سازوکارهای جنبشی امتدادلغز گسل‌های این پهنه دارد. همچنین نزدیکی تنش  $\sigma_3$ ، به وضعیت قائم و نیز غیرافقی بودن تنش  $\sigma_2$  (شکل ۷)، می‌توان سازوکار معکوس امتدادلغزی را نیز، برای گسل‌های این پهنه در نظر گرفت.

#### ۴ تعیین تانسورهای تنش و سوی رژیم تنش لرزه‌زمین‌ساختی، در پهنه‌های گوناگون استان فارس (A, B, C, D, E و E)

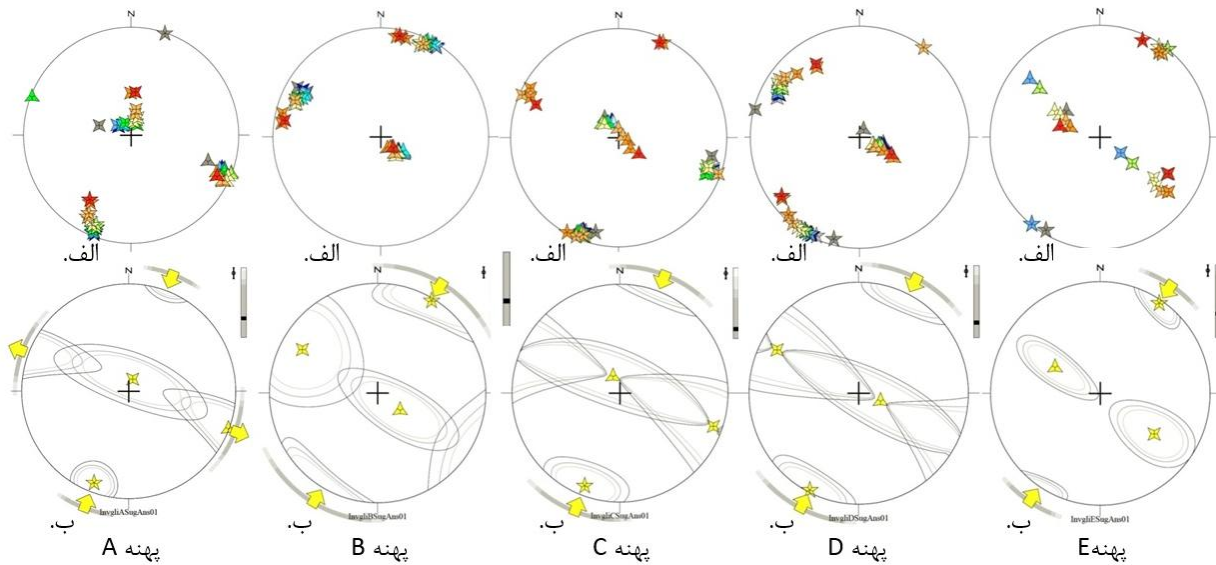
##### ۱-۴ پهنه:

مقدار آستانه پذیرفتنی  $\omega_{acc}$  برابر ۵۵ درصد، نایکنواختی نسبی رژیم تنش لرزه‌زمین‌ساختی این پهنه را بیان می‌کند. زیرا با این انتخاب، فقط ۵۶ درصد داده‌ها در تحلیل وارون شرکت داده شده‌اند. نزدیک به قائم بودن محور تنش خنثی ( $\sigma_2$ )، حاکی از سازوکار جنبشی امتدادلغز گسل‌های این پهنه است. مهم‌ترین این گسل‌ها، سامانه گسلی کازرون است که حرکت امتدادلغزی غالب آن به اثبات رسیده است (لاکومب و همکاران، ۲۰۰۶؛ سپهر و کاسگروو، ۲۰۰۵).

مقدار زیاد پارامتر  $\tau_{moy}^*$  (متوسط نسبت تنش برشی به تنش برشی حداکثر)، ۷۷ درصد با انحراف استاندارد ۱۱ درصد و مقدار کم  $\alpha_{moy}$ ، برابر ۱۹ درجه، با انحراف استاندارد ( $\alpha_{sd}$ ) ۱۱ درجه، پایداری مکانیکی مجموعه داده‌های انتخاب شده (۵۶ درصد داده‌ها) را نشان می‌دهد. از مقدار  $\varphi$  برابر ۰/۳، می‌توان سازوکار جنبشی امتدادلغز معکوس گسل‌های فعال این پهنه را استنباط کرد. به‌طور



شکل ۶. تصویر استریوگرافیکی حاصل از کاربرد روش دو وجهی مستقیم، برای به‌دست آوردن میانگین تانسورهای تنش در پهنه‌های A تا E. جهت و میل محورهای بیشینه تنش فشارشی ( $\sigma_{1pref}$ )، محور تنش خنثی ( $\sigma_{2pref}$ ) و تنش کششی ( $\sigma_{3pref}$ )، به ترتیب با ستاره‌های پنج، چهار و سه پر نشان داده شده است.



شکل ۷. نتایج ترسیمی حاصل از کاربرد روش وارون‌سازی مستقیم، برای به‌دست آوردن متوسط تانسورهای تنش پهنه‌های گوناگون استان فارس، بر اساس روش آنجلیه (۲۰۰۲). در ردیف الف، موقعیت محورهای تنش اصلی  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  روی استریونت، به‌ترتیب با ستاره‌های پنج، چهار و سه پر نشان داده شده است. در ردیف ب، موقعیت میانگین تانسورهای تنش ( $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$ )، همراه با بیضی‌های اطمینان (۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد)، نمایش داده شده است. پیکان‌ها، روند فشارش و کشش را همراه با حاشیه خطای آزمون (نوار خاکستری اطراف پیکان‌ها)، نشان می‌دهد. مقدار  $\varphi$ ، و خطای احتمالی آن به‌صورت مقیاس ستونی خاکستری رنگ، در گوشه بالای سمت راست استریوپلات آورده شده است.

تحقیقات ساختاری صورت گرفته پژوهشگران گوناگون از جمله توکلی و همکاران (۲۰۰۸) و لاکومب (۲۰۰۶) روی سامانه گسلی کره‌بس (مهم‌ترین ساختار زمین‌ساختی و فعال این پهنه)، این سازوکار حرکتی را تایید می‌کنند. مقدار به‌نسبت زیاد تانسور  $\tau_{moy}^*$  (حدود ۷۰ درصد)، پایداری نسبی مکانیکی میانگین مجموعه داده‌های انتخاب شده را بیان می‌کند، ولی اختلاف زاویه‌ای  $\alpha_{moy}$ ، به‌نسبت زیاد است و پراکندگی روند مولفه‌های برش این پهنه را نشان می‌دهد.

#### ۳-۴ پهنه C:

مجموعه داده‌ها را نسبت به هم، بیان می‌کند. خطای سمتی مولفه  $\sigma_1$ ، از N-S تا NE-SW، متغیر و گسترده‌گی آن، کمی بیشتر از شکل مشابه پهنه A است.

مناسب‌ترین مقدار مولفه  $\omega_{acc}$ ، در این پهنه ۵ درصد محاسبه شده است که با این انتخاب، ۸۰ درصد داده‌ها در تحلیل وارون تنش، شرکت داده شدند. مقدار کم ارزیاب  $\omega_{acc}$ ، و متعاقب آن انتخاب تعداد بیشتری از داده‌ها، پایداری مکانیکی هرچه بیشتر مجموعه داده‌های سازوکار کانونی را بیان می‌کند. همچنین مقدار کم این ارزیاب  $(\omega_{acc})$ ، دلالت بر یکنواختی رژیم تنش دارد. مقدار زیاد  $\tau_{moy}^*$ ، برابر با ۷۹٪ و انحراف استاندارد  $(\tau_{sd}^*)$  ۱۸ درصد، سازگاری بیشتر داده‌ها را از لحاظ انطباق با تنش برشی

بر اساس شکل ۷-ب، توزیع فضایی تنش  $\sigma_3$ ، با آستانه‌های قابل پذیرش متفاوت، محدودتر از توزیع دو مولفه تنشی دیگر است. با این حال، پراکندگی فضایی دو مولفه تنش  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  نیز، زیاد نیست و پایداری مکانیکی

## ۵ نتیجه‌گیری

براساس تحلیل تحقیقات وارون‌سازی سازوکارهای کانونی، روند عمومی تنش فشارشی در محدوده مورد بررسی، NNE-SSW، تعیین شده است. این روند با روند عمومی همگرایی بین صفحه‌های عربی و ایران مرکزی سازگاری دارد. همچنین تحقیقات ژئودتیکی GPS صورت گرفته نیز موید همین مسئله هستند. سوی محورهای تنش بهینه بیشینه،  $\sigma_1$ ، از  $0.21$  درجه برای محدوده A، تا  $0.34$  درجه برای محدوده E متغیر است. در دو پهنه A و C، روند یکنواختی رژیم تنش و همچنین پایداری مکانیکی مجموعه داده‌های هر پهنه، از سمت پهنه‌های A و E، به سمت پهنه C افزایش پیدا می‌کند. سازوکار غالب جنبشی سامانه‌های گسلی شمال غرب (کازرون و کره‌بس) و جنوب شرق استان فارس، امتدادلغز همراه با مؤلفه معکوس و بین این دو محدوده، سازوکارهای جنبشی معکوس همراه با مؤلفه‌های امتدادلغزی تعیین شده است. دو نوار بُرشی با روند شمالی-جنوبی، در امتداد سامانه‌های گسلی کازرون و کره‌بس، و روند شمال شرق-جنوب غرب (در جنوب استان فارس)، در امتداد خط عمان به اثبات رسیده است. روش وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی به روش آنجلیه (2002) و همه روش‌های مشابه دیگر قادر به تعیین سوی برش در گسل‌های امتدادلغز تشخیص داده شده (با توجه به معیار  $\varphi$ ) نیستند.

با توجه به زمین‌شناسی منطقه، راستای امتدادلغزی راست‌گرد سامانه گسلی کازرون محرز بوده و برای جنوب شرق استان فارس با توجه به جهت انتقال پیش‌آمدگی فارس (Fars salient) و وجود توده مقاوم افیولیت عمان برای این محدوده (جنوب شرق استان فارس) می‌توان راستای امتدادلغزی را در نظر گرفت. در کل می‌توان ادعا کرد که پایداری و یکنواختی رژیم تنش، به سمت میانه کمان فارس افزایش پیدا کرده و

بیشینه  $\tau_{max}$  بیان می‌کند. در اینجا، حالت میانگین این مقدار ( $\omega_{acc}$ )، حدود ۷۰ درصد تعیین شده است که با انطباق کامل فاصله به نسبت کمی دارد. مقدار کم مؤلفه  $\varphi$ ،  $0.14$ ، دلالت بر سازوکار جنبشی معکوس گسل‌های فعال این پهنه دارد. در آستانه‌های قابل پذیرش بالاتر، مقدار این پارامتر تا  $0.53$  نیز ادامه پیدا می‌کند و می‌تواند دلیلی بر تمایل گسل‌های فعال منطقه، به سازوکار جنبشی امتدادلغز باشد (جدول ۵).

در اینجا، مقادیر متفاوت  $\omega_{acc}$ ، باعث پراکندگی زیاد موقعیت فضایی تنش  $\sigma_1$ ، نمی‌شود. گسترش بیضی اطمینان و حاشیه خطای اطمینان سمتی محور بیشینه، محدودتر از سایر بیضی‌ها است که صحت ادعای اخیر را تایید می‌کند (شکل ۷-ج). همه این پارامترها، یکنواختی رژیم تنش لرزه‌زمین‌ساختی این محدوده را بیان می‌کنند.

## ۴-۴ پهنه E:

مناسب‌ترین مقدار آستانه پذیرفتنی ( $\omega_{acc}$ ) برابر با  $0.65$  تعیین شده است. یعنی ۴۲ درصد داده‌ها در تحلیل نهایی شرکت داده شده‌اند. با این انتخاب، مقادیر زیاد ارزیاب‌های کمکی  $\omega_{moy}$ ،  $\tau_{moy}^*$  و مقدار زاویه کم  $\alpha_{moy}$ ، صحت تحلیل صورت‌پذیرفته و پایداری مکانیکی مجموعه داده‌های با آستانه پذیرفتنی فوق را بیان می‌کند. مقدار تنش تفاضلی،  $\varphi$ ، در همه انتخاب‌های  $\omega_{acc}$ ، نزدیک به مقادیر متوسط است و نمایانگر سازوکار حرکتی غالب امتدادلغز، گسل‌های منطقه است. بیضی‌های اطمینان ( $60$ ،  $75$  و  $90$ ٪) برای هر سه محور تنش  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$ ، ( $5-7$ ) محدودتر است (شکل ۷-ه). با این حال این امر نمی‌تواند فقط به معنی پایداری مکانیکی محورهای تنش پهنه E باشد، بلکه با انتخاب مقدار کمتر از نصف داده‌ها، این حالت رخ داده است و این پایداری را می‌توان، حداکثر برای ۴۲ درصد داده‌ها تعمیم داد.

- Angelier, J., 1984, Tectonic analyses of fault slip data sets: *J. Geoph. Res.* 89 (No. B7), 5835–5848.
- Angelier J., 1989, From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data: *J. Structural Geology*, 2, 37–50.
- Angelier, J., 2002, Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress: A new method free of choice among nodal planes: *Geophys. J. Int.* 150, 588–609.
- Bayer, R., et al. 2002, Active deformation in Zagros-Makran transition zone inferred from GPS, tectonic and seismological measurements: *Geophys. J. Int.* (2006) 165, 373–381.
- Berberian, M., and King, G. C. P., 1981, Towards the paleogeography and tectonic evolution of Iran: *Can. J. Earth Sci.*, 18, 210–265.
- Blanc, E. J.-P., M. B. Allen, S. Inger, and Hassani, H., 2003, Structural style in the Zagros simple folded zone, Iran: *J. Geol. Soc. London*, 60, 401–412.
- Bott, M. H. P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting: *Geol. Mag.* 96, 109–117.
- Chandra, U., 1981, Focal mechanism solutions and their tectonic implications for the eastern Alpine–Himalayan region. In: Gupta, H.K., Delany, F.M., *Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution: Geodynamics Series Vol. 3*, copublished by the Am. Geophys. Union, Washington, DC and the Geol. Soc. Am., Boulder, CO, pp. 243–271.
- Union Washington DC and the Geol. Soc. Am. Boulder.
- CMT, Centroid Moment Tensor catalogue, Harvard University, 2006. Department of geological Sciences, available online at: <http://www.seismology.harvard.edu/CMT>.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and Stein, S., 1990, Current plate motions: *Geophys. J. Int.*, 101, 425–478.
- Esmaeili, C., and Zamani, A., 2011. Tectonic map of Fars Province: Shiraz University, scale 1:500,000.
- Falcon, N. L., 1974, Southern Iran: Zagros Mountains, in *Mesozoic–Cenozoic Orogenic Belts*, edited by Spencer: *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 199–211.
- Gephart, J. W., and Forsyth, D. W., 1984, An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: An application to the San Fernando earthquake sequence: *J. Geophys. Res.*, B, 89, 9305–9320.
- هرچه به سمت خط ساحلی خلیج فارس (به سمت استان بوشهر) پیش برویم بر مقدار این پایداری و یکنواختی افزوده می‌شود.
- ### تشکر و قدردانی
- از استادان گرامی جناب آقایان دکتر احمد زمانی و دکتر بهزاد زمانی به خاطر راهنمایی‌های بی‌دریغشان در این پژوهش و از داوران و همه دست اندرکاران محترم این مجله نهایت تشکر و امتنان را داریم.
- ### منابع
- اسماعیلی، سیروس، ۱۳۹۰، بررسی لرزه‌زمین‌ساخت استان فارس (جنوب شرق زاگرس): پایان‌نامه کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی (تکتونیک)، دانشگاه شیراز.
- منفرد، س.، زمانی، ا.، اسماعیلی، س.، خورشیدیان، ک.، ۱۳۹۰، کاربرد زمین‌آمار در تحلیل فضایی پیش‌بینی بزرگ‌ا و عمق کانونی زمین‌لرزه‌های استان فارس (جنوب شرق زاگرس): پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم.
- Allen, M. B., J. Jackson, and Walker, R. 2004, Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of the short-term and long-term deformation rates: *Tectonics*. J., 23, TC2008, doi:10.1029/2003TC001530.
- Alavi, M., 2007, Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran: *American J. Science*, 307, 1064–1095.
- Angelier, J., 1975, Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites failles: l'utilité d'une confrontation entre méthodes dynamiques et cinématiques. *C.R. Hebd. S'éanc; Acad. Sci. Paris D* 281, 1805–1808.
- Angelier, J., and Mechler, P., 1977, Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits: *Bull. Soc. Geol. France* 19, 1309–1318.

- aftershock sequence: New techniques and results: *J. Geophys. Res.* 96, 6, 303-6,319.
- Mostriouk, A. O., Petrov, V.A., 1994, Catalogue of focal mechanisms of Earthquakes 1964–1990: Materials of World Data Center B., Moscow: 87.
- Nowroozi, A. A., 1972, Focal mechanisms of earthquakes in Persia, Turkey, West Pakistan, and Afghanistan and plate tectonics of the Middle East: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 62: 823–850.
- Papazachos, C.B., and Kiratzi, A. A., 1992, A formulation for reliable estimation of active crustal deformation and its application to central Greece: *Geophys. J. Int.* 111, 424–432.
- Shapiro, S. S. and Francia, R. S., 1972, An approximate analysis of variance test for normality: *American Statistical Association* 67: 215–216.
- Wallace, R. E., 1951, Geometry of shearing stress and relation to faulting, *J. Geol.*, 59, 118–130.
- Schabenberger, O. and Gotway, C. A., 2004, *Statistical Methods for Spatial Data Analysis*: Boca Raton, Chapman and Hall–CRC.
- Sepehr, M. and Cosgrove, J. W., 2005, Role of the Kazerun Fault Zone in the formation and deformation of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran: *J. Tectonics*, 24, TC 5005, doi:10.1029/2004TC001725, 2005.
- Tatar, M., D. Hatzfeld, and Ghafory-Ashtiyany, M., 2004, Tectonics of the Central Zagros (Iran) deduced from microearthquake seismicity: *Geophys. J. Int.*, 156, 255–266.
- Tavakoli, F., Walpersdorf, A., Authemayou, C., Nankali, H.R., Hatzfeld, D., Tatar, M., Djamour, Y., Nilforoushan, F., and Cotte, N., 2008, Distribution of the right-lateral strike-slip motion from the Main Recent Fault to the Kazerun Fault system (Zagros, Iran): Evidence from present-day GPS velocities: *Earth and Planetary Science Letters*, 275, 342–347.
- Takin, M., 1972, Iranian geology and continental drift in the Middle East, *Nature*, 235, 147–150.
- Talebian, M., and Jackson, J., 2004, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran: *Geophysics. J. Int.* 156, 506–526.
- USGS, U. S. G. S., 2006, Available online at <http://earthquake.us-gs.gov>.
- Wallace, R. E., 1951, Geometry of shearing stress and relationship to faulting: *J. Geol.* 59, 111–130.
- Yamini-Fard, F., Hatzfeld, D., Farahbod, A. M., Paul, A. and Mokhtari, M., 2007, The diffuse transition between the Zagros continental Hatzfeld, D., Authemayou, C., Vander Beek, P., Bellier, O., Lave', J., Oveisi, B., Tatar, M., Tavakoli, F., Walpersdore, A., and Yamini-Fard, F., 2010, The kinematics of the Zagros Mountains (Iran): The Geological Society of London, DOI: 10.1144/SP330.3 0305-8719/10.
- Jackson, J. A., and Fitch, T. J., 1979, Seismotectonic implications of relocated aftershock sequences in Iran and Turkey: *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 57: 209–229.
- Jackson, J. A., and McKenzie, D. P., 1984, Active tectonics of the Alpine–Himalayan belt between western Turkey and Pakistan: *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 77, 185–264.
- Jackson, J. A., Priestley, K., Allen, and Berberian, M., 2002, Active tectonic of South Caspian Basin: *Geophys. J. Int.* 148: 214–245.
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Kargar, S., and Mayer, L., 2006, Late Cenozoic and modern stress fields in the western Fars (Iran): Implications for the tectonic and kinematic evolution of central Zagros: *Tectonics*, 25, TC1003, doi:10.1029/2005TC001831.
- Loohuis, J., and van Eck, T., 1996, Simultaneous focal mechanism and stress tensor inversion using a genetic algorithm: *Phys. Chem. Earth* 21 (4), 267–271.
- Matheron, G., 1962, *Traite de geostatistique applique*, Tome I. Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minierrres. No. 14. Editions Technip (Pair).
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., Tealeb, A., 2003, GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions: *Geophysical J.*, 155, 126–138.
- McKenzie, D., 1972, Active tectonics of the Mediterranean region: *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 30: 109–185.
- McQuarrie, N., Stock, J. M., Verdel, C., and Wernicke, B. P., 2003, Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions: *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2036, doi: 10.1029/2003GL017992.
- Mercier, J.-L., and Carey-Gailhardis, S. E., 1989, Regional state of stress and characteristic fault kinematics instabilities shown by aftershock sequence: The aftershock sequences of the 1978 Thessaloniki (Greece) and 1980 Campania–Lucania (Italy) earthquakes as examples: *Earth planet. Sci. Lett.*, 92, 247–264.
- Michael, A. J., 1991, Spatial variations of stress within the 1987 Whittier Narrows, California,

Zamani, B., 2009, Study of Tectonic Stress State of Iran: Ph.D. Thesis, Shiraz University, Iran.

collision and the Makran oceanic subduction (Iran): microearthquake seismicity and crustal structure: *Geophys. J. Int.*, 170, 182–194.