

## مطالعه آماری توزیع فضایی محورهای فشارش در پیرامون گسل مسبب زلزله (T) و کشش (B)، میانه (P) ۲۰۱۲ اهر - ورزقان، کوه‌های قوشاداغ، شمال غرب ایران

احد نوری مخوری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد.

بهنام رحیمی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد.

علی جعفری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۲۶

ahad.nouri@mail.um.ac.ir

### چکیده

در این مطالعه با استفاده از ۲۶ سازوکار کانونی زلزله‌های گردآوری شده، الگوی توزیع فضایی محورهای فشارش، میانه و کشش، به صورت آماری در اطراف سیستم گسلی قوشاداغ مطالعه گردیده است. جهت گیری متوسط هر یک از محورهای فشارش، میانه و کشش به ترتیب ۰۸۲/۷۴ و ۲۲۱/۱۲ می‌باشد. توزیع فضایی این محورها به ترتیب توزیع خوشه‌ای، خطی (کمربندی) و خطی (کمربندی) است. تغییر در جهت گیری محورهای فشارش و کشش بسیار اندک است به طوری که محورهای فشارش و کشش به ترتیب دارای جهت‌گیری SE - NW و SW - NE هستند. گستره تغییرات ماهیت سازوکارهای کانونی به صورت فشارشی، فشارشی - امتدادلغزی و امتدادلغزی است. تغییرات ماهیت سازوکار کانونی زلزله‌ها و همچنین تغییرات موقعیت فضایی هر یک از محورهای فشارش، میانه و کشش نشانگر مشارکت هردو رژیم فشارشی و امتدادلغزی در این منطقه است که می‌تواند نشانه رژیم دگرشکلی ترافشارش در این منطقه باشد. این مجموعه داده‌ها نشان‌دهنده جهت‌گیری بیشینه تنش فشارشی افقی ( $S_{Hmax}$ ) در راستای SE - NW برای این منطقه است. این تحقیق نشان می‌دهد، مطالعه ماهیت سازوکار کانونی زلزله‌ها و الگوی توزیع فضایی محورهای فشارش، میانه و کشش، در فهم الگوی دگرشکلی یک منطقه با اهمیت است.

**کلید واژه‌ها:** بیشینه تنش فشارشی افقی، زلزله اهر - ورزقان، سازوکار کانونی زلزله، سیستم گسلی قوشاداغ و الگوی توزیع فضایی محورها

### مقدمه

این منطقه دارای رژیم تکتونیکی غالب راندگی است (Zamani and Masson, 2014). در غرب با گسل Kazerg، در جنوب با گسل شمال تبریز - گایلاتو و در شرق با سیستم گسلی تالش در غرب دریای خزر (Ghods et al., 2015) محصور شده است. این منطقه متأثر از همگرایی ورقه‌های عربی - اوراسیا (Vernant et al., 2004) دارای تکتونیک فعال (Zamani and Masson, 2014) است و پهنه گذاری (transitional zone) بین مناطق با ویژگی‌های متفاوت ژئودینامیکی می‌باشد (Donner et al., 2015). الگوی ساختاری در این منطقه حداقل بوسیله سه دسته غالب و متفاوت گسلش کواترنری با روندهای E - W، WNW - ESE و SW - NE تعریف می‌شود (Ghods et al., 2015) (شکل ۱).

### لرزه زمین ساخت منطقه

ویژگی‌های لرزه‌ای شمال غرب ایران علی‌رغم زلزله‌های مخرب تاریخی و فشرده آن (Berberian, 1976a; Berberian and Arshadi, 1976; Ambraseys and Melville, 1982; Berberian, 2014) خوبی شناخته‌شده نیست (Berberian, 1997). در این منطقه، سیستم گسلی اهر به خوبی حالت پاره - پاره (segmented) با کینماتیک متفاوت در پاره‌های مختلف نشان می‌دهد که پاره مسبب زلزله ۲۰۱۲ اهر - ورزقان

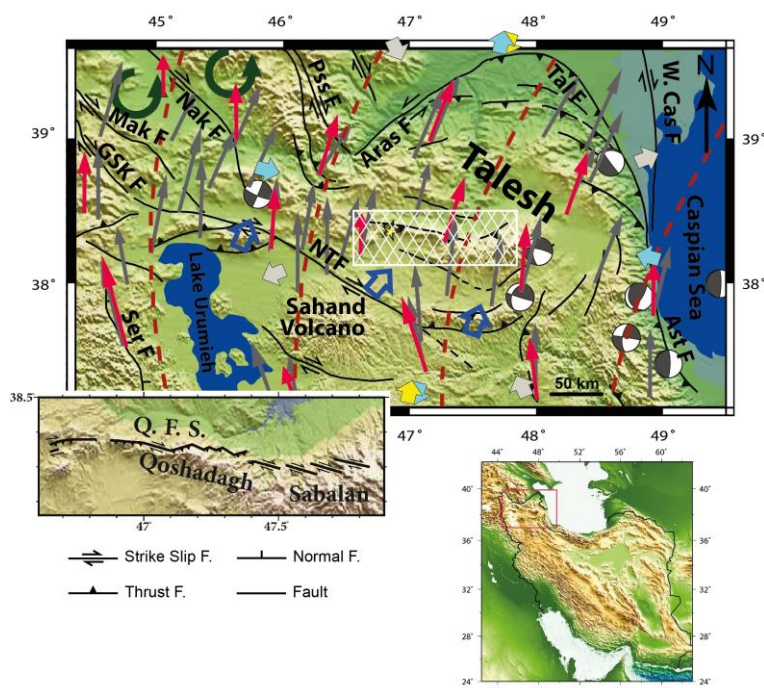
در تاریخ ۲۰۱۲/۰۸/۱۱ میلادی دو زلزله با بزرگای (Mw) ۶.۵ و ۶.۴ با فاصله زمانی تقریباً ۱۱ دقیقه با رومرکز مشخص شده (CMT: Centroid Moment Tensor) در شمال غرب ایران در کوه‌های قوشاداغ، در روی سیستم گسلی قوشاداغ، مرز جنوبی تالش (Baron et al., 2013) اتفاق افتاد. این زلزله‌ها که از نوع زلزله‌های doublet بودند (زلزله‌هایی که از نظر زمانی، مکانی و بزرگای شبیه همدیگر هستند هرچند که ممکن است بعضی از آن‌ها فاقد ارتباط فیزیکی مشخص باشند) (Donner et al., 2015)، توزیع دگرشکلی (Copley et al., 2013) و سازوکار گسلش (Nemati, Ghods et al., Donner et al., 2015)؛ Donner et al., 2015; 2013 در منطقه شمال غرب را آشکار کردند. در این مقاله با مطالعه الگوی توزیع فضایی محورهای فشارش (P)، میانه (B) و کشش (T) و همچنین جهت‌گیری بیشینه تنش فشارشی افقی ( $S_{Hmax}$ ) به بررسی جهت و ماهیت میدان تنش عمل کننده در این منطقه و الگوی دگرشکلی آن پرداخته شده است.

### بیشینه و خاستگاه زمین ساختی شمال غرب

منطقه شمال غرب ایران بین دو کمر بند راندگی، بین قفقاز در شمال و زاگرس در جنوب قرار گرفته (Hessami et al, 2003) و در مقیاس بزرگ

شده است ولی تطبیق آنها با گسل‌های فعال مشخص مشکل است. همچنین بسیاری از گسل‌ها با دوره بازگشت غیر مشخص وجود دارند طوری که دوره بازگشت بسیاری از گسل‌ها بخصوص گسل‌های رانده در شمال این منطقه، حتی طولانی‌تر از یک زلزله ثبت شده در طول هزاران سال می‌باشد (Berberian, 1997).

بین گسل‌هایی با سیستم رانده قرار گرفته است (Donner et al, 2015). زلزله‌های اخیر در منطقه‌ای رخ داده‌اند که فاقد زلزله بزرگ تاریخی ثبت شده است (Nemati, 2013; Donner et al, 2015) و باعث شکستگی‌های مشخص و طویل همرا با آثار مخرب شدند (شکل ۲). با وجود این، در این منطقه زلزله‌های تاریخی به دارازی هزاران سال ثبت



شکل ۱. خلاصه‌ای از چهارچوب تکتونیکی شمال غرب کشور. گسل‌ها برگرفته از (Siahkali Moradi et al. (2011), Djamour et al. (2011), Masson et al. (2006) به ترتیب گسل شمال تبریز، گسل سرو، گسل گایلاتو - سیه چشمه - خوی، گسل ماکو، گسل نخجوان، گسل Sunik - Sevan - Pamabak، گسل تالش، گسل ارس، سیستم گسلی قوشاداغ، گسل غرب خزر و گسل آستارا هستند. مکانیسم‌های کانونی زلزله‌ها برگرفته شده از CMT catalog. پیکان‌های کشیده قرمز و خاکستری، میدان سرعتی بر اساس مطالعات GPS به ترتیب از (Masson et al. (2006) و (Djmour et al. (2011) و خط چین‌ها نشانگر جهات فشارش کواترنری هستند (Soleymani Azad et al., 2011). پیکان‌های آبی رنگ توخالی، جهت بیشینه کوتاه شدگی افقی (Berberian, 1976b)، پیکان‌های پهن توپر، جهات تنش‌های امروزی (Zamani and Masson, 2014) و پیکان‌های منحنی وار سبز رنگ چرخش بلوک‌های بین گسل‌ها را نشان می‌دهند (Copley and Jackson, 2006). تصویر پایین نقشه، منطقه هاشورخورد روی نقشه اصلی و منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

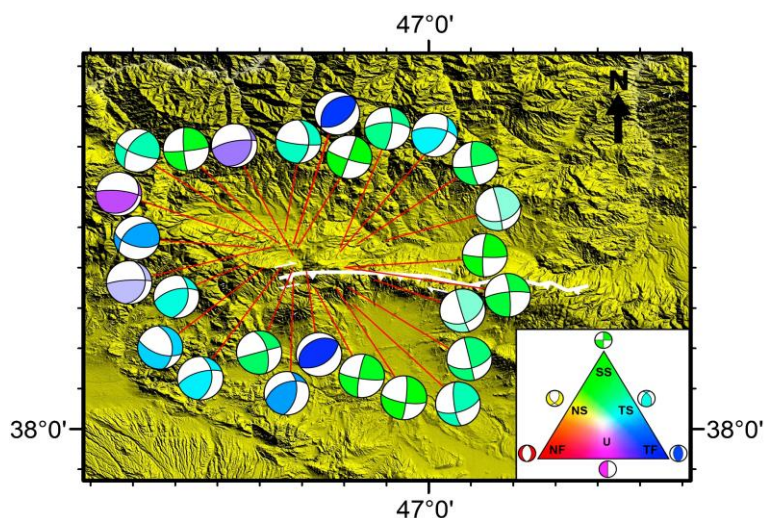


شکل ۲. تصاویر صحرایی آثار گسیختگی سطحی گسل مسبب زلزله اهر - ورزقان.

## داده‌ها و روش مطالعه

داده‌های مورد استفاده ۲۶ سازوکار کانونی ارائه شده برای توالی لرزه‌ای زلزله اهر - ورزقان (Nemati, 2013; Donner et al., 2015; ورزقان) (CMT catalog) هستند. برای تعیین ماهیت هر یک از سازوکارهای کانونی از روش Frohlich (1992) استفاده شد. بعد از تعیین موقعیت فضایی محورهای فشارش (P)، میانه (B) و کشش (T) مربوط به هر سازوکار، الگوی توزیع آن‌ها مطالعه گردید (Dzik, 1992). جهت‌گیری  $S_{Hmax}$  برای هر مکانیسم کانونی با استفاده از تعاریف بیان شده در نقشه جهانی تنش (World Stress Map) (Zobak, 1992) تعیین شد سپس برای تعیین سوگیری کلی  $S_{Hmax}$  از روش Lund and Townend (2007) استفاده گردید.

روش Frohlich (1992) یک روش گرافیکی - عددی است که ماهیت هر سازوکار کانونی، با توجه به مقادیر زوایای محورهای P، B و T مشخص می‌شود. ماهیت هر سازوکار کانونی در این نمودار به صورت رانندگی (TF)،



شکل ۳. تصویر مکانیسم‌های کانونی زلزله‌های مورد استفاده با موقعیت رومرکز آنها. طیف رنگی سازوکارها براساس موقعیت هر کدام از آن‌ها در نمودار برگرفته شده از Frohlich (1992) در پایین نقشه در گوشه سمت راست می‌باشد.

است (شکل ۴ د و جدول ۱). این نحوه توزیع آماری برای مقادیر میل محورهای P، B و T نشانگر مشارکت فشارش و امتدادلغزی (با توجه میل کم محور P و میل متوسط تا زیاد محور T) برای این مجموعه است (جدول ۱).

مطالعه آماری توزیع فضایی محورهای P، B و T بر اساس Dzik (1992) نشان دهنده توزیع غیر یکنواخت این محورهاست (جدول ۲ و شکل ۵). توزیع محور P به صورت خوشه‌ای و محور B و T به صورت خطی (کمربندی) (خطی تا خوشه‌ای) است. با توجه به نتایج حاصل در جدول ۲، مقادیر  $Rm$ ،  $N.lengh$  و  $Ka$  برای محور P نشان‌دهنده توزیع خوشه‌ای خوب برای این محور با  $MCA=22^\circ$  است. مقادیر  $Rm$ ،  $N.lengh$  و  $Ka$  محور B و T نشان دهنده توزیع تقریباً خطی (نزدیک مرز خطی - خوشه‌ای با گرایش به توزیع خطی) به ترتیب با  $MCA=44,3^\circ$  و  $MCA=42,2^\circ$  است. با توجه به مقادیر  $N.lengh$  و  $Rm$ ، محور B توزیع خطی تری نسبت به محور T دارد، به علاوه مقدار MCA محورهای T نسبت به محور B پایین است. این نشان می‌دهد که

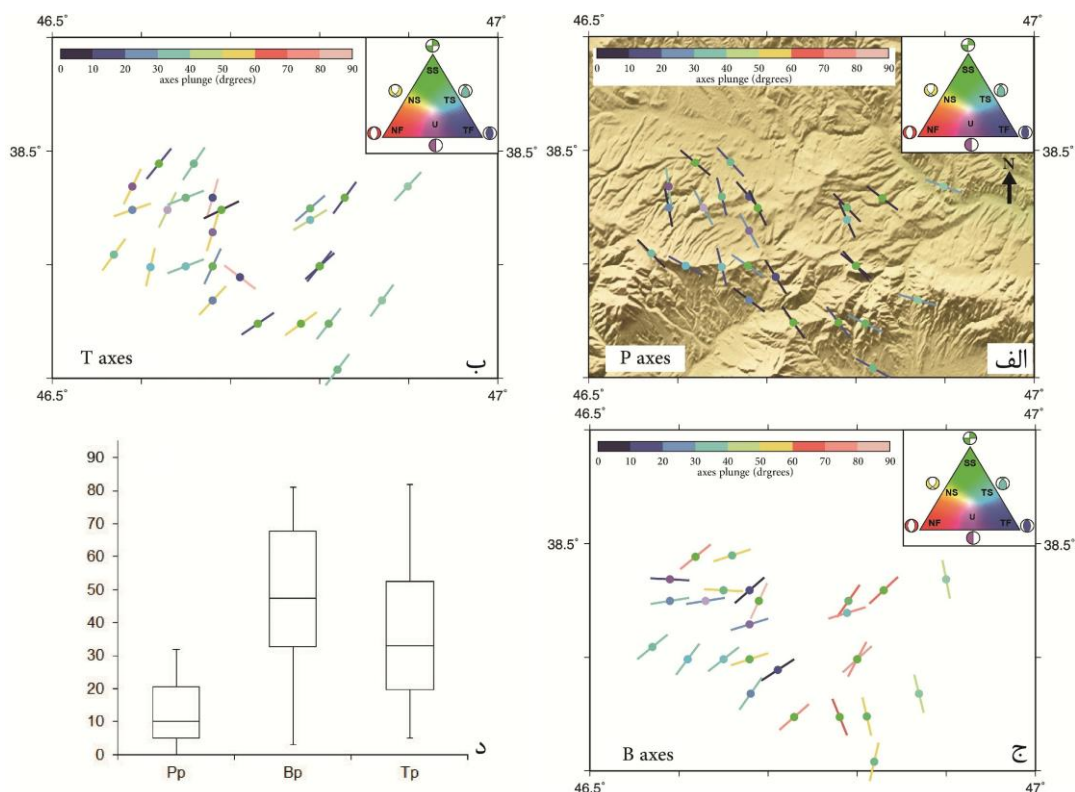
تعداد ۲۶ داده در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته شده است. نخست مقادیر میل هر یک از محورهای P، B و T برآورد شده و در ۳ گروه جداگانه قرار داده شدند، سپس برای مطالعه تغییرات مقادیر محورهای P، B و T، پارامترهای آماری الگوی توزیع پراکندگی داده‌های یک مجموعه بکار برده شد.

دامنه بین چارکی (۱۵/۵) محورهای P، مقادیر چارک‌های اول (۵)، سوم (۲۰،۵) و میانه (۱۰) و همچنین فاصله بین کمترین مقدار (۰) و چارک اول (۵) محورهای P نشانگر محدود بودن این محورها در میل‌های کم است. دامنه بین چارکی (۳۵)، مقدار چارک سوم (۶۷/۷۵) و بیشترین مقدار (۸۱) محور B نشانگر میل متوسط تا زیاد این محور است. برای محور T مقادیر دامنه بین چارکی (۳۲/۷۵)، چارک‌های اول (۳۳)، میانه (۳۳)، سوم (۵۲/۵) و همچنین مقادیر بیشینه (۸۲) و کمینه (۵) بیانگر پراکندگی غالب میل متوسط است. تعداد داده‌های پرت بالایی و پایینی هر سه محور P، B و T صفر است، این نشانگر تغییرات تدریجی مقادیر میل این محورها و عدم اختلاف زیاد هر داده با داده ماقبل خود در این توالی

۱ - رژیم تنش کششی ( $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ ) مرتبط با گسلش شیب لغز شمال، ۲ - رژیم تنش امتداد لغز ( $S_{Hmax} > S_v > S_{Hmin}$ ) مرتبط با گسلش با لغزش افقی و ۳ - رژیم تنش راندگی ( $S_{Hmax} > S_{Hmin} > S_v$ ) مرتبط با گسلش شیب لغز معکوس. در بعضی از مناطق میدان تنش به صورت مرزی بین رژیم‌های تنش ظاهر می‌شود (Zoback, 1992). نتایج تعیین  $S_{Hmax}$  برای هر کدام از سازوکارهای کانونی نشان می‌دهد، این محدوده  $S_{Hmax}$  با جهت گیری مشابه برای هر یک از سازوکارهای کانونی را پوشش می‌دهد. طوری که همه سازوکارهای کانونی به کار گرفته شده نشانگر  $S_{Hmax}$  با جهت گیری NW - SE است (شکل ۶).

توزیع محور B پراکنده‌تر از محور T است یا به عبارتی دیگر توزیع فضایی محورهای T تمایل بیشتری نسبت به خوشه‌ای شدن دارند. محدود بودن پراکندگی محورهای P و T به خصوص الگوی پراکندگی با حالت خوشه‌ای محور P تصویر روشنی از فشارش در جهت شمال غرب - جنوب شرق ارائه می‌کند.

بیشینه تنش فشاری افقی در نقشه جهانی تنش با عنوان  $S_{Hmax}$  تعریف شده است (Zoback, 1992). براساس بزرگای نسبی تنش، سه نوع رژیم تنش می‌تواند تعریف شود:



شکل ۴. جهت گیری محورهای P، T و B، به ترتیب در شکل‌های الف، ب و ج نشان داده شده است. رنگ هریک از محورها براساس مقدار میل آن‌ها براساس دامنه رنگی مقادیر مختلف میل در بالای هر تصویر و رنگ دایره مرکزی آن‌ها براساس موقعیت آن در نمودار Frohlich (1992) (در گوشه راست تصاویر) مشخص شده است. شکل د، توزیع آماری میل محورهای فشارش (Pp)، میانه (Bp) و کشش (Tp) را نشان می‌دهد (مقادیر در جدول ۱).

جدول ۱. پراکندگی آماری میل محورهای فشارش (Pp)، میانه (Bp) و کشش (Tp): Min: کوچکترین مقدار،  $Q_1$ : چارک اول، median: میانه،  $Q_3$ : چارک سوم، IQR: دامنه بین چارکی، upper outliers: داده خارج از محدوده بالایی و lower outliers: داده خارج از محدوده پایینی.

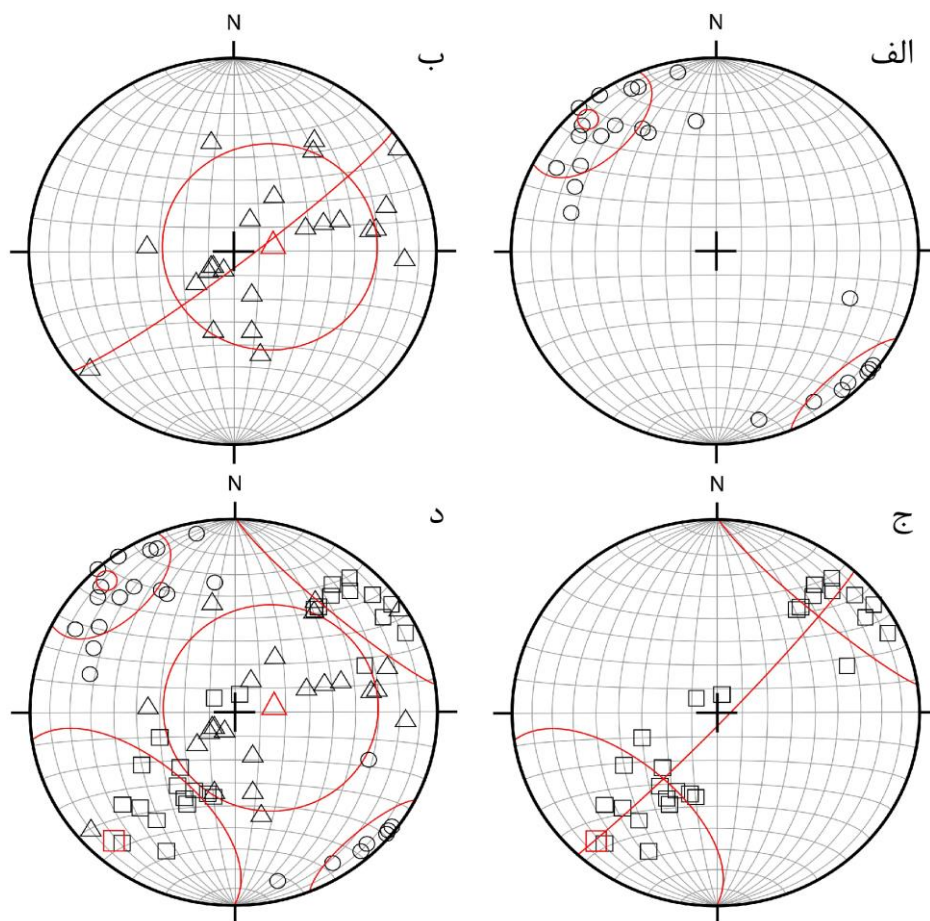
axis	min	$Q_1$	median	$Q_3$	max	IQR	upper outliers	lower outliers
Pp	۰	۵	۱۰	۲۰/۵	۳۲	۱۵/۵	۰	۰
Bp	۳	۳۲/۷۵	۴۷/۵	۶۷/۷۵	۸۱	۳۵	۰	۰
Tp	۵	۱۹/۷۵	۳۳	۵۲/۵	۸۲	۳۲/۷۵	۰	۰

قابل توجهی با محورهای بیشینه و کمینه تنش عمل کننده بر پوسته داشته باشند و محور بیشینه تنش می‌تواند با اختلاف زیاد با محور P قرار گیرد (McKenzie, 1969). لذا برای قضاوت در مورد میدان تنش از روی محورهای فشارش و کشش سازوکار کانونی زلزله‌ها، محدودیت وجود خواهد داشت. اما می‌توان با بکار بردن تعدادی از سازوکارهای کانونی، این

برای آگاهی از میدان تنش امروزی موثر بر یک منطقه (سامانی و چرچی، ۱۳۹۴)، سازوکارهای کانونی زلزله‌ها فراهم کننده اطلاعاتی در مورد رژیم تنش و بزرگای نسبی تنش‌های اصلی هستند. اما مشکل اصلی در این مورد موازی نبودن محورهای P و T با محورهای تنش است (Fossen, 2010). طوری که محورهای P و T سازوکار کانونی ممکن است تفاوت

تکتونیک روی نقشه به صورت جهت گیری بیشینه تنش فشارشی افقی است (Lund and J Townend, 2007). این روش نشان دهنده جهت گیری شمال غرب - جنوب شرق  $S_{Hmax}$  است (شکل ۶).

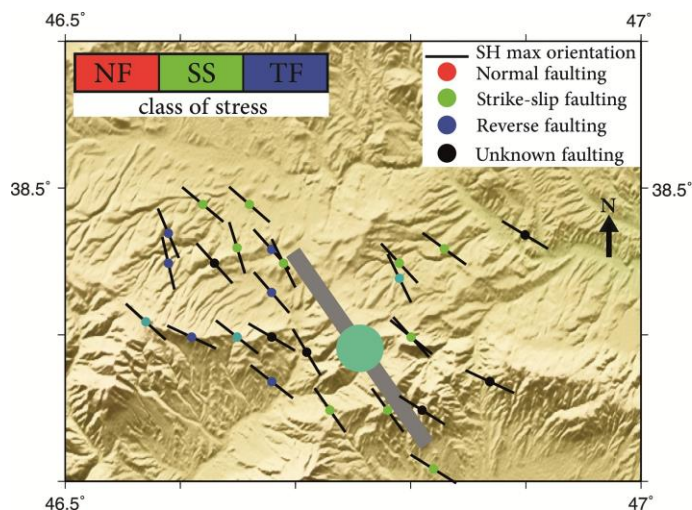
مشکل را کاهش داد (Fossen, 2010). با این وجود در روش وارون نیز خطای میل محورهای تنش و نسبت تنش بر نتایج اعمال می شود. یکی از راه های مناسب برای حذف این خطاها به نمایش درآوردن نتایج تنش



شکل ۵. الگوی توزیع فضایی محورهای P, B و T، به ترتیب با شکل های الف، ب و ج نشان داده شده اند. شکل د، نحوه توزیع هر یک از محورهای P, B و T را در روی یک استریونت نشان می دهد. دایره ها نشانگر محور P، مثلث ها نشانگر محور B و مربع ها نشانگر موقعیت محور T هستند.

جدول ۲. پارامترهای الگوی توزیع فضایی هر یک از محورهای P, B و T. Orient: جهت گیری متوسط محورها، Rm: میزان خوشه ای بودن، Ka: پارامتر تمرکز، MCA: متوسط زاویه مخروط (mean cone angle) که نشان دهنده فاصله متوسط محورها با محور میانگین است، N.length (normalized length): بزرگای نرمال شده هر یک از محورها که پارامتری از الگوی توزیع است و Dist.pat.: الگوی توزیع فضایی محورها، Cluster توزیع خوشه ای و Girdle توزیع کمربندی یا خطی را نشان می دهد.

axis	Orient.	Rm	Ka	MCA	N.length	Dist.pat.
P	۳۱۸/۰۸	۰/۹۷	۱۳/۷	۲۲°	۰/۹۳	خوشه ای
B	۰۸۲/۷۴	۰/۷۲	۳/۵	۴۴/۳°	۰/۷۶	کمربندی
T	۲۲۱/۱۲	۰/۷۴	۳/۸	۴۲/۳°	۰/۷۸	کمربندی



شکل ۶. جهت گیری محور  $S_{Hmax}$  برای سازوکارهای کانونی نشان داده شده است. رنگ دایره مرکز هر کدام از آن‌ها نشان‌دهنده نوع تنش مربوط به آن است (رنگ قرمز: گسلش نرمال، رنگ سبز: گسلش امتدادلغز، رنگ آبی: گسلش معکوس و رنگ سیاه: گسلش نامعلوم یا تعریف نشده). محور بزرگ نمایش داده شده مربوط به جهت گیری  $S_{Hmax}$  منطقه به روش (Lund and Townend, 2007) می‌باشد.

## بحث

برای مطالعه در زمینه تنش، خصوصیات ژئودینامیکی، لرزه زمین-ساخت و زمین ساخت فعال یک منطقه، سازوکار کانونی زلزله‌ها به طور گسترده مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرند و در بحث تغییرات تنش کلمب بسیار حائز اهمیت هستند (یزدانفر و همکاران، ۱۳۹۶). در این مطالعات، استفاده از نمودارهای مثلثی برای دسته بندی و تعیین ماهیت سازوکارهای کانونی موثر خواهند بود (Frohlich, 1992). سازوکارهای ارائه شده برای توالی لرزه‌ای قوشاداغ که نشانگر تکتونیک فعال این منطقه است، در گستره ماهیت رانده، رانده - امتدادلغزی و امتدادلغزی تغییر نشان می‌دهند. جهت گیری محورهای فشارش و کشش تقریباً دارای ثبات جهت گیری هستند و پیچیدگی خاصی نشان نمی‌دهند.

یکی از راه‌های مناسب برای نشان دادن نتایج تحلیل تنش‌های تکتونیک، به نقشه درآوردن جهت آزمون‌های بیشینه تنش فشاری افقی است (Lund and Townend, 2007). نتیجه تحلیل جهت یابی  $S_{Hmax}$  در تطابق با جهت گیری محورهای فشارش است. در مقیاس محلی میدان تنش مسئول لرزه زمین ساخت اخیر این منطقه، در توافق با فشارش رژیم حاصل از میدان‌های تنش امروزی بازسازی شده توسط Zamani and Masson (2014)، نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه به صورت شمال غرب-جنوب شرق دگرشکلی فشارشی را متحمل می‌شود. کارهای Baron et al., (2013) روی تنش دیرین در این منطقه نشان داد میدان تنش با جهت گیری تقریبی شمال‌غرب - جنوب شرق  $\sigma_1$  (فاز T1 در مقاله مذکور) احتمالاً یکی از کنترل کننده‌های اصلی تکامل سیستم گسلی قوشاداغ

## منابع

- سامانی ب.، چرچی ع.، ۱۳۹۴، تحلیل الگوی مکانی گسلش و رومرکز رخدادهای لرزه‌ای با استفاده از روش فرای (مطالعه موردی در استان یزد)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، زمستان ۹۴، شماره ۱۸.
- یزدانفر ک.، آق آتابای م.، رقیمی م.، ۱۳۹۶، بررسی ارتباط بین تغییرات استرس کلمب و توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها: به منظور برآورد عمق زمین‌لرزه‌ها در کمر بند زاگرس، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، بهار ۹۶، شماره ۲۳.
- Ambraseys, N.N. and Melville, C.P., 1982. A History of Persian Earthquakes, Cambridge Univ. Press. 219p.

## نتیجه گیری

در سازوکارهای کانونی مربوط به توالی لرزه‌ای ثبت شده در این منطقه، ماهیت گسلش معکوس، معکوس - امتدادلغز و امتدادلغزی نشان می‌دهند. مطالعه ماهیت هر یک از سازوکار کانونی زلزله‌ها، تحلیل محورهای کشش و فشارش و میانه و همچنین نحوه توزیع غیر یکنواخت آن‌ها (خوشه‌ای و خطی) در گستره خیلی کوچک در گسل مسبب زمین‌لرزه‌های اهر - ورزقان نشانگر مشارکت هردو رژیم فشارش و امتدادلغزی طی این زلزله‌ها است. تغییرات مهمی در جهت گیری محورهای فشارش و  $S_{Hmax}$  هر یک از سازوکارهای کانونی از روند غالب SE - NW دیده نمی‌شود. این جهت گیری بازتاب کننده کوتاه شدگی محلی در جهت NW - SE در منطقه است. این نحوه جهت گیری  $S_{Hmax}$  و محورهای فشارش تصویر کننده جهت گیری فشارش متفاوت از پیشینه تکتونیک ساختارهای بزرگ مقیاس با روند کلی شرقی - غربی این منطقه است. اهمیت استفاده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در ارتباط با تحقیق در مورد ماهیت دگرشکلی و تنش‌های مؤثر بر یک منطقه، از جنبه‌های کاربردی این پژوهش است.

- Baron, I., Kernstockova, M., Faridi, M., Bubík, M., Milovsky, R., Melichar, R., Sabouri, J. and Baburek, J., 2013. Paleostress analysis of a gigantic gravitational mass movement in active tectonic setting: The Qoshadagh slope failure, Ahar, NW Iran. *Tectonophysics*, Vol: 605, p: 70 - 87.
- Berberian M., 1976a. documented earthquake faults in Iran. *Geol. Surv. Iran*, Vol: 39, p: 143 - 186.
- Berberian, M. and Arshadi, S., 1976. On the evidence of the youngest activity of the North Tabriz Fault and the seismicity of Tabriz city. *Geol. Surv. Iran Rep*, Vol: 39, p: 397 - 418.
- Berberian, M., 2014. Earthquakes and coseismic surface faulting on the Iranian Plateau. Elsevier. 628p.
- Berberian, M., 1997. Seismic sources of the Transcaucasian historical earthquakes. Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus, NATO ASI Series Vol: 2, p: 233 - 311.
- Berberian, M., 1976b. Sismotectonic Map of Iran. Geological Survey of Iran.
- CMT, Centroid Moment Tensor catalogue, Harvard University. Available online at: <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>.
- Copley, A. and Jackson, J., 2006. Active tectonics of the Turkish-Iranian plateau. *Tectonics*, Vol: 25, No: 6, TC6006.
- Copley, A., Faridi, M., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nazari, H., Oveisi, B. and Talebian, M., 2013. The 2012 August 11 Ahar earthquakes: consequences for tectonics and earthquake hazard in the Turkish-Iranian Plateau. *Geophysical Journal International*, Vol: 196, No:1, p: 15 - 21.
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H.R. and Tavakoli, F., 2011. NW Iran - eastern Turkey present - day kinematics: results from the Iranian permanent GPS network. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol: 307, p: 27 - 34.
- Donner, S., Ghods, A., Kruger, F., Roßler, D., Landgraf, A. and Ballato, P., 2015. The Ahar-Varzeghan Earthquake Doublet (Mw 6.4 and 6.2) of 11 August 2012: Regional Seismic Moment Tensors and a Seismotectonic Interpretation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol: 105, No: 2a.
- Dzik, E.J., 1992. watson: A computer program to calculate principal axis orientation and confidence cone for unimodal bipolar orientation data. *Computers & Geosciences*, Vol: 18, No: 2 - 3, p: 367 - 383.
- Fossen Haakon, 2010, structural geology. Cambridge University Press. 463p.
- Frohlich, C., 1992. Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol: 75, No: 1 - 3, p: 193 - 198.
- Ghods, A., Shabaniyan, E., Bergman, E., Faridi, M., Donner, S., Mortezaejad, G. and Aziz - Zanjani, A., 2015. The Varzaghan-Ahar, Iran, Earthquake Doublet (Mw 6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest Iran. *Geophysical Journal International*, Vol: 203, No: 1, p: 522 - 540.
- Hessami, K., Pantosti, D., Tabassi, H., Shabaniyan, E., Abbassi, M.R., Fegghi, K. and Soleymani, S., 2003. Paleoequakes and slip rates of the North Tabriz Fault, NW Iran: preliminary results. *Annals of Geophysics*, Vol: 46, No: 5, p: 903 - 915.
- Lund, B. and Townend, J., 2007. Calculating horizontal stress orientations with full or partial knowledge of the tectonic stress tensor. *Geophysical Journal International*, Vol: 170, No: 3, p: 1328 - 1335.
- Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., Chery, J., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H. and Vernant, P., 2006. Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol: 252, No: 1, p: 180 - 188.
- McKenzie, D.P., 1969. The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol: 59, No: 2, p: 591 - 601.
- Moradi, A.S., Hatzfeld, D. and Tatar, M., 2011. Microseismicity and seismotectonics of the North Tabriz fault (Iran). *Tectonophysics*, Vol: 506, No: 1, p: 22 - 30.
- Nemati, M., 2013. Some Aspects about Seismology of 2012 August 11 Ahar - Vaezaghan (Azarbayjan, NW of Persia) Earthquakes Sequences. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, Vol:24, No: 3, p: 229 - 241.
- Soleymani Azad, S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M.R., Zadeh, M.S. and Ritz, J.F., 2011. The Zandjan fault system: Morphological and tectonic evidences of a new active fault network in the NW of Iran. *Tectonophysics*, Vol: 506, No: 1, p: 73 - 85.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R. and Tavakoli, F., 2004. Present - day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, Vol: 157, NO: 1, p: 381 - 398.
- Zamani, B. and Masson, F., 2014. Recent tectonics of East (Iranian) Azerbaijan from stress state reconstructions. *Tectonophysics*, Vol: 611, p: 61 - 82.
- Zoback, M.L., 1992. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol: 97, No: B9, p: 11703 - 11728.