

بررسی وضعیت تنش نوزمین‌ساختی و ارائه مدل کینماتیکی در دشت گرگان، شمال خاوری ایران

معصومه روستائی^۱، مریم روستائی^۲، بهزاد زمانی^۳ و مجید نعمتی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم و مرکز پژوهشی زمین‌لرزه، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۳۰

چکیده

در این پژوهش، سعی شده است که با استفاده از روش تحلیل وارون و با استناد بر حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی داده در دشت گرگان، رژیم تنش حاکم بر این منطقه محاسبه و همچنین، مدلی برای گسلش پنهان و کینماتیک آنها در این منطقه ارائه شود. بدین منظور، ابتدا زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه (که دارای حل سازوکار کانونی بودند) برای شرکت در تحلیل انتخاب شدند. نتایج به دست آمده پس از اعمال تحلیل وارون روی داده‌های لرزه‌ای منطقه، نشان از وجود یک رژیم تنش کششی با روند $N42^{\circ}W$ دارد. این امر چیره بودن ساختارهای کششی محلی همانند گسل‌های عادی کم‌ژرفا را در این منطقه نشان می‌دهد. همچنین تنش متوسط نیز همانند تنش کمینه نزدیک به افق و بیانگر وجود ساختارهایی چون گسل‌های امتدادلغز در منطقه است. این مسئله با سازوکار چیره داده‌های لرزه‌ای شرکت‌کننده در تحلیل وارون همخوانی دارد. با بررسی مطالعات پیشین و نتایج به دست آمده از آنها، تلاش برای ارائه یک مدل کینماتیکی در این منطقه بیشتر شد. فرض بر این است که سامانه گسلی قرناوه که از دو گسل مراوه‌تپه و اینچه‌برون (دارای حرکت امتدادلغز و چپ‌گرد) تشکیل شده است در پایانه خاوری خود در سطح زمین، به‌صورت پنهان در زیر رسوبات دشت گرگان و تا نزدیکی دریای کاسپین با راستای تقریبی خاوری-باختری امتداد دارد. حرکت این دو گسل در زیر رسوبات سبب ایجاد چرخشی در سوی حرکت عقربه‌های ساعت در پهنه میان دو صفحه گسلی می‌شود. راستای این پهنه که تحت تأثیر گسل‌های یاد شده است با روند لرزه‌خیزی منطقه همسو است. با ارائه مدل یادشده می‌توان برای اغلب سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی داده و همچنین ژرفای رویداد آنها توجیهی داشت. بیشتر زمین‌لرزه‌های روی داده در این ناحیه دارای مؤلفه‌های عادی و یا چپ‌گرد هستند. از سوی دیگر، ساختارهایی چون گلفشان‌ها و چین‌های مرتبط با گسل (در شمال آق‌قلا) را می‌توان با ارائه این مدل توجیه کرد. اگر چه نبود داده‌های زیر سطحی ژئوفیزیکی در این منطقه ارائه این الگو را با حدس و گمان همراه می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: تنش نوزمین‌ساخت، دشت گرگان، وضعیت تنش، تحلیل وارون.

***نویسنده مسئول:** معصومه روستائی

E.mail: rustaeimasomah@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

جنوبی جای گرفته است که شناخت ساختار آن اهمیت زیادی برای شناخت گستره دارد (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶). این دشت و پهنه‌ای از کاسپین که به بلوک ترکمن و بخشی از پهنه توران (Turan Plateau) معروف شده است، پهنه‌ای کم‌ارتفاع در خاور دریای کاسپین و باختر کپه‌داغ است که این دو پهنه زمین‌شناسی - ساختاری را به هم پیوند می‌دهد. این دشت از جنوب با گسل کاسپین از پهنه البرز جدا می‌شود و از شمال در راستای گسل کپه‌داغ با فرونشستگی قره‌بغاز و صحرای باختر ترکمنستان همسایه است (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶). از آنجایی که مرز خاوری (صفحه کاسپین جنوبی مرز خاوری ندارد و تا کپه‌داغ گسترده‌گی دارد) دریای کاسپین جنوبی کمتر مورد توجه بوده است، بررسی لرزه‌خیزی این ناحیه از مهم‌ترین مطالعات برای شناخت ساختارهای آن به شمار می‌رود.

در این پژوهش، سعی شده است که با استفاده از روش تحلیل وارون و با استناد بر حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه، رژیم تنش حاکم بر این منطقه به دست آید. همچنین با توجه به یافته‌های پیشین از ساختارهای منطقه، الگوی زمین‌ساختی برای گسلش پنهان در این منطقه ارائه شود. در پایان نیز ارتباط رژیم به دست آمده با رویداد زمین‌لرزه‌ها و همچنین ارتباط آن با الگوی زمین‌ساختی پیشنهادی و ساختارهای موجود مورد بررسی قرار گیرد. در این منطقه هیچ‌گونه پژوهشی در رابطه با تحلیل تنش بر پایه داده‌های لرزه‌ای صورت نگرفته است؛ از این رو، پژوهش کانونی بی‌همتا است. بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، مربوط به مناطق دیگر ایران است.

رشته کوه البرز با ارتفاع ۳۰۰۰ متر واقع در شمال ایران در اثر رویدادهای زمین‌ساختی پی‌درپی، در ارتباط با برخورد ایران مرکزی با اوراسیا در اواخر تریاس و برخورد کونونی عربستان با اوراسیا شکل گرفته است (Zanchi et al., 2006). در کناره شمالی البرز، زمین‌های پست کاسپین جنوبی در منطقه‌ای با پوشش کم در پیرامون لبه حوضه کاسپین جنوبی جای گرفته‌اند. این منطقه به دلیل وجود نهشته‌های رسوبی ستبر و حجم قابل توجهی از نفت و گاز اهمیت دارد (Brunet et al., 2003). حوضه کاسپین جنوبی از جنوب و باختر با کمربندهای راندگی اصلی البرز، تالش و کپه‌داغ و از شمال با پهنه فروانش جوان آپشرون - بالکان هم‌مرز است (Jackson et al., 2002). کوه‌های البرز، حوضه کاسپین جنوبی را از جنوب محدود می‌کنند؛ این امر سبب شکل‌گیری مرز جدایش سنگ‌های ایران مرکزی از سنگ‌هایی با خاستگاه اوراسیایی است (Stocklin, 1974). رسوبات ته‌نشین شده در حوضه کاسپین جنوبی به بیش از ۲۰ کیلومتر می‌رسد، این مسئله آن را یکی از ژرف‌ترین حوضه‌های رسوبی در جهان ساخته است (Brunet et al., 2003). ستون چینه‌شناسی باختر حوضه کاسپین جنوبی نشان می‌دهد که از ۵/۵ میلیون سال پیش، حدود ۲/۴ کیلومتر فرونشست در این منطقه روی داده است (Allen et al., 2002).

گستره مورد بررسی در میان طول‌های جغرافیایی 54° تا 55° خاوری و عرض‌های جغرافیایی $30' 36^{\circ}$ تا $30' 37^{\circ}$ شمالی قرار گرفته است. این ناحیه بخشی از دشت گرگان و زمین‌های پست کاسپین جنوبی به شمار می‌رود. دشت گرگان به عنوان یک پهنه انتقالی میان پهنه در حال فراخاست کپه‌داغ و پهنه در حال فرونشینی کاسپین

۲- موقعیت زمین‌ساختی منطقه

در منطقه گرگان، می‌توان سامانه گسلی کاسپین را به عنوان رانندگی‌هایی با شیب رو به جنوب در نظر گرفت که به‌طور محلی شیب‌های گرگان را در برابر نهشته‌های کواترنری قرار می‌دهد (Allen et al., 2003). سامانه گسلی یاد شده را می‌توان به قطعات بسیاری تقسیم کرد که هر یک ویژگی‌های زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی معینی دارند. پاره‌های مختلف این سامانه سبب رویداد زمین‌لرزه‌های بسیاری در گستره مورد مطالعه شده‌اند. بخشی از سامانه گسلی کاسپین جنوبی میان طول‌های جغرافیایی ۵۵° ۵۵' تا ۵۳° ۵۵' و ۵۵° ۵۵' تا ۵۳° ۵۵' و شامل چندین پاره گسلی با راستای خمیده در حاشیه جنوبی دریای کاسپین جنوبی است. این گسل، مرز میان جلگه کاسپین جنوبی و کوه‌های البرز است که می‌توان آن را گسل پیشانی شمالی رشته‌کوه البرز در نظر گرفت (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶). به نظر می‌رسد دگرشکلی رشته‌کوه‌های البرز خاوری، به وسیله روند کوتاه‌شدگی NNW روی گسل رانندگی کاسپین و برشی چپ‌گرد با روند NE-SW روی سامانه گسل شاهرود تفکیک شود (Hollingsworth et al., 2008). با استفاده از سرعت‌های GPS از هر دو سوی رشته‌کوه البرز خاوری، برش چپ‌گرد حدود ۳ میلی‌متر بر سال در سراسر دامنه رشته‌کوه برآورد شده است (Hollingsworth et al., 2008 & 2010; Rizza et al., 2011).

از دیگر پدیده‌های در ارتباط با ساختارهای زمین‌ساختی در این منطقه می‌توان به وجود چند گلفشان کوچک و بزرگ اشاره کرد که برخی از آنها جنباً، برخی دیگر نیمه‌جنباً و برخی مرده هستند. از آن جمله می‌توان به گلفشان نفت‌لیجه در عرض جغرافیایی ۲۱° ۷' ۳۷" شمالی و طول جغرافیایی ۵۴° ۲۳' ۵۴" خاوری و قارناریق‌تپه در عرض جغرافیایی ۵۷° ۶' ۳۷" شمالی و طول جغرافیایی ۵۸° ۲۳' ۵۸" خاوری که در دشت گرگان (در خاور گمیستان و شمال آق‌قلا) جای گرفته‌اند، اشاره کرد. بر پایه شکل ۱، ۳ گلفشان بزرگ (ستاره‌های زرد رنگ) در منطقه پدید آمده‌اند که در یک راستای WNW-ESE جای گرفته‌اند (انصاری و بلورچی، ۱۳۸۱). گلفشان باختری درون دریا جای داشته، بسیار جنباً بوده و تازه پدید آمده است. گلفشان میانی نیمه‌جنباست و هر چند گاه فرونشسته است یا می‌ریزد (Collapse) و دوباره گلفشانی می‌کند. گلفشان خاوری مرده است و گلفشانی نمی‌کند. این گلفشان‌ها در یک فاصله تقریبی ۵۰ کیلومتری در یک راستا قرار دارند (Heravi, 1993).

با توجه به پژوهش‌های انجام شده در زمینه خاستگاه گلفشان‌های این منطقه، می‌توان گفت که پدیده‌های یاد شده، در گروه گلفشان‌هایی با خاستگاه زمین‌ساختی-رسوبی قرار می‌گیرند. از ویژگی‌های این نوع گلفشان‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد: (۱) فرونشینی رسوبات در پدید آمدن آنها نقش بنیادین دارد؛ (۲) بیشتر با تشکیل دیپایرسم همراه هستند؛ (۳) احتمال انباشت گاز پر فشار در آنها زیاد است؛ (۴) دمای گل در حدود دمای محیط است؛ (۵) میزان گاز متان آنها بیش از دیگر گازهاست (Gallagher, 2003). حال با توجه به این مطالب و با در نظر گرفتن وضعیت زمین‌ساختی دریای کاسپین (Akhmedbeyli et al., 2006)، حالت فرونشینی رسوبات حاشیه جنوب‌خاوری دریای کاسپین (خسرو تهرانی، ۱۳۷۶)، دیپایر در حال بالآمدگی در کنار گلفشان قارناریق‌تپه بر پایه بررسی‌های لرزه‌نگاری (رضواندهی و همکاران، ۱۳۸۵) و میزان گاز متان که ۹۸٪ کل گازهای گلفشان‌های منطقه را تشکیل می‌دهد (موسوی روح بخش، ۱۳۸۰)، می‌توان اظهار کرد که گلفشان‌های منطقه خاستگاه زمین‌ساختی-رسوبی دارند (فصل بهار و همکاران، ۱۳۸۸).

۳- لرزه‌زمین‌ساخت منطقه

در زمان‌های اخیر هیچ زمین‌لرزه بزرگی در جبهه جنوبی البرز خاوری روی نداده است؛ اما پژوهش‌های گوناگون بیانگر فعالیت لغزش چپ‌بر در امتداد گسل‌های موازی و اصلی منطقه در داخل نیمه جنوبی محدوده است

با توجه به پژوهش‌های انجام شده در زمینه خاستگاه گلفشان‌های این منطقه، می‌توان گفت که پدیده‌های یاد شده، در گروه گلفشان‌هایی با خاستگاه زمین‌ساختی-رسوبی قرار می‌گیرند. از ویژگی‌های این نوع گلفشان‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد: (۱) فرونشینی رسوبات در پدید آمدن آنها نقش بنیادین دارد؛ (۲) بیشتر با تشکیل دیپایرسم همراه هستند؛ (۳) احتمال انباشت گاز پر فشار در آنها زیاد است؛ (۴) دمای گل در حدود دمای محیط است؛ (۵) میزان گاز متان آنها بیش از دیگر گازهاست (Gallagher, 2003). حال با توجه به این مطالب و با در نظر گرفتن وضعیت زمین‌ساختی دریای کاسپین (Akhmedbeyli et al., 2006)، حالت فرونشینی رسوبات حاشیه جنوب‌خاوری دریای کاسپین (خسرو تهرانی، ۱۳۷۶)، دیپایر در حال بالآمدگی در کنار گلفشان قارناریق‌تپه بر پایه بررسی‌های لرزه‌نگاری (رضواندهی و همکاران، ۱۳۸۵) و میزان گاز متان که ۹۸٪ کل گازهای گلفشان‌های منطقه را تشکیل می‌دهد (موسوی روح بخش، ۱۳۸۰)، می‌توان اظهار کرد که گلفشان‌های منطقه خاستگاه زمین‌ساختی-رسوبی دارند (فصل بهار و همکاران، ۱۳۸۸).

۲ ماه پس از شوک اصلی ۱۹۸۵، ۵ پس‌لرزه (۴/۳-۵/۰ MB) برگرفته از کاتالوگ NEIC روی داده است. زمین‌لرزه گرگان در ژرفای ۱۳±۵ کیلومتر روی صفحه گسلی است که در طول گسل کاسپین بوده نسبت به سطح برآمده است؛ به‌طوری که در امتداد لبه شمالی رشته‌کوه‌های البرز خاوری ادامه می‌یابد (Priestley et al., 1994) (شکل ۲).

با فرض اینکه این زمین‌لرزه گسل کاسپین را با شیبی به سوی جنوب گسیخته کرده است، سازوکار کانونی آن سوی کوتاه‌شدگی NNW را نشان می‌دهد، که عمود بر جبهه رشته‌کوه البرز است (Priestley et al., 1994). ایشان برای توجیه این مسئله، یک گسل رانندگی محض را برای تغییر شکل این ساختار پیشنهاد می‌کنند (زمین‌لرزه ۱ در شکل ۱).

استقرار یک شبکه GPS با ۵۴ ایستگاه در رشته‌کوه البرز نیز نشان داد که در بخش خاوری، لغزش بیشتر مؤلفه امتدادلغز چپ‌گرد دارد (Djamour et al., 2010). در بررسی‌های بیشتر و استقرار شبکه لرزه‌نگاری محلی در البرز خاوری، بیشینه ژرفای مربوط به لایه لرزه‌زا، ۲۰ کیلومتر برآورد شده است (Nemati et al., 2013). در چند سال گذشته در دشت شمال گرگان (شمال آق‌قلا) ۳ زمین‌لرزه روی داده است که عبارتند از: زمین‌لرزه‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ (با بزرگای ۵/۴، ۵/۵ و ۵/۲). این زمین‌لرزه‌ها دارای بردارهای لغزش به سوی شمال-شمال باختر هستند و در ژرفای تقریبی ۳۰ کیلومتری روی داده‌اند (Engdahl et al., 2006; HRVD, 2011). (Nemati et al., 2013) (جدول ۱ و شکل ۱). زمین‌لرزه ۲۰۰۴ در شمال آق‌قلا با

مورد استفاده قرار گرفته است. این روش با استفاده از داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، تانسور تنش را به دست می‌دهد.

مسئله وارون (inversion) شامل مشخص کردن تانسور اصلی تنش T با توجه به سوی لغزش روی گسل‌های متعدد است. فرض اصلی این است که هر لغزش گسلی که با خطوط لغزشی مشخص شده است، جهتی از تنش برشی τ را دارد که به یک تانسور تنش واحد مربوط می‌شود (Angelier, 1994). یکی دیگر از فرض‌ها این است که همه گسل‌ها در طی یک رویداد زمین‌ساختی همانند، به‌طور مستقل حرکت کرده‌اند ولی به‌طور یکپارچه تحت یک تانسور تنش واحد بوده‌اند.

استفاده از این روش، این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان محورهای تنش را بازسازی کرد و سوهای مربوط به کشش و فشارش را به دست آورد. همراه با محاسبه محورهای تنش یعنی σ_1 ، σ_2 و σ_3 ، مقدار نسبت Φ (نسبت اختلاف تنش‌های اصلی) متعلق به هر دسته از داده‌ها نیز به دست می‌آید (Anjelier, 2002). مهم‌ترین متغیرهای تحلیل وارون عبارتند از: ω_{acc} آستانه پذیرفتنی برای مؤلفه لغزش تنش برشی بر حسب درصد؛ N_{acc} درصد داده‌های شرکت‌کننده در تانسور تنش به دست آمده، $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ نسبت شکلی تنش؛ ω_m میانگین آستانه پذیرفتنی برای مؤلفه لغزش تنش برشی بر حسب درصد؛ τ^* میانگین نسبت تنش برشی به تنش برشی بیشینه، α_m میانگین زاویه میان بردار تنش برشی و مؤلفه لغزش تنش برشی بر حسب درجه و متغیر α_{sd} میزان انحراف استاندارد متغیر α .

در روش یاد شده تانسور تنش به ۴ مجهول کاهش داده می‌شود و با حل ۴ معادله چهار مجهولی به روش تحلیلی، به دست می‌آید. دو ویژگی مهم این روش عبارت است از: ۱) انتخاب میان صفحات گره‌ای نیاز نیست؛ ۲) محاسبات عددی را به کمترین میزان ممکن می‌رساند و سبب می‌شود که زمان لازم برای محاسبه ناچیز شود. این شیوه با یافتن تحلیل پایدار، روش مناسبی برای پالایش داده‌ها (با تکرار محاسبه و کنار گذاشتن داده‌های ناجور) نیز به شمار می‌رود (Angelier, 2002). روش یاد شده بر پایه تعریف مؤلفه لغزش تنش برشی (SSSC; Slip Shear Stress Component) که در سوی لغزش گسل عمل می‌کند، استوار است. در این مطالعه، تحلیل متوسط تنش با استفاده از نرم‌افزار Invigli (نوشته شده توسط Angelier (2004) صورت پذیرفته است.

۵- بحث

به منظور تعیین سوی تنش زمین‌ساختی در این منطقه، ابتدا زمین‌لرزه‌هایی که دارای حل سازوکار کانونی بودند، برای شرکت در تحلیل انتخاب شدند. با توجه به اینکه حل کانونی زمین‌لرزه‌ها در ایران بسیار کم و پراکنده است، برای کافی بودن داده‌ها برای انجام تحلیل تنش، از همه داده‌هایی که از منابع مختلف امکان گردآوری آنها وجود داشت، بهره گرفته شده است. در این ارتباط برخی از داده‌ها از کاتالوگ‌های برخط همچون CMT (HRVD, 2011) گردآوری شد. برخی دیگر از داده‌ها نیز از مقالات منتشر شده توسط پژوهشگرانی چون Priestley et al. (1994) و Nemati et al. (2013) گردآوری شده است. در پایان، قالب داده‌های به دست آمده یکسان‌سازی و پس از کنترل و اصلاح خطاهای ممکن در جدول ۱ ارائه شد. در این جدول، سوی حرکت صفحات گره‌ای به‌صورت عددی از ۱ تا ۸ آورده شده است. هر یک از اعداد شامل جنبش خاصی از صفحه گسلی است که در همه موارد، سازوکار اول، سازوکار چپ‌چرخه گسلی و سازوکار دوم، مؤلفه فرعی آن است. این اعداد در پانویس جدول ۱ آورده شده است.

پس از اعمال تحلیل وارون روی داده‌های لرزه‌ای منطقه، نتایج به دست آمده نشان از وجود یک رژیم تنش کششی در این ناحیه دارد. این تنش دارای روند $N132^{\circ}E$ است. شکل ۳ نتایج این تحلیل را به‌صورت گرافیکی و جدول ۲ نیز متغیرهای حاصل از آن را به نمایش می‌گذارد. بر پایه جدول ۲ بیشینه تنش زمین‌ساختی دارای میلی

بزرگای ۵/۵ دارای سازوکاری رانده با کمی مؤلفه چپ‌گرد است (سازوکار شماره ۵ در جدول ۱). با این وجود، تعدادی سازوکار وارون نیز در کنار این گسل به دست آمده است (سازوکارهای شماره ۲ و ۴ در جدول ۱). زمین‌لرزه‌های رخ داده نشان می‌دهند که گستره جنوب‌خاوری دریای کاسپین یکی از گستره‌های جنبی کشور به شمار می‌رود. در مقالات و نقشه‌های موجود هیچ گسل سطحی خاصی که بتوان این زمین‌لرزه‌ها را به آن نسبت داد، آورده نشده است. ولی وجود سازوکار رانده و امتدادلغز زمین‌لرزه‌ها در منطقه یاد شده، وجود دو رژیم فشارشی و امتدادلغز را در شمال آق‌قلا تقویت می‌کند. با این حال، وجود چنین رژیم فشارشی تأیید شده ولی هیچ‌گونه شواهدی از وجود گسل راندگی ارائه نشده است (Hollingsworth et al., 2007) (شکل ۲). شکل ۱، پراکندگی لرزه‌خیزی در دشت شمالی گسل کاسپین (به جز پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه سال ۱۹۸۵ گرگان که منطبق با گسل کاسپین بوده‌اند) را بیشتر به‌صورت فشرده روی یک خطواره شمال‌باختری- جنوب‌خاوری نشان می‌دهد. در این راستا زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بیش از ۵/۰ روی داده است که دارای سازوکاری رورانده و گاه با کمی مؤلفه راستالغز هستند. این روند لرزه‌خیزی احتمال دارد مربوط به انشعاب راندگی ژرف و به نسبت جوان در شمال جبهه رشته‌کوه و یا اینکه حاصل خمیدگی احتمالی قاعده بلوک کاسپین در زمان راندگی آن به زیر ایران مرکزی در طول رشته‌کوه البرز باشد (Hollingsworth et al., 2008).

از سوی دیگر، رسوبات قابل توجهی در سرتاسر منطقه پست جنوب کاسپین وجود دارد که سبب ابهام هرگونه فعالیت اخیر گسلی در سطح می‌شوند؛ ولی با استقرار یک شبکه لرزه‌ای موقت محلی به مدت ۶ ماه (بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰) توسط Nemati et al. (2013) در این منطقه، سازوکارهای کانونی که لرزه‌های روی داده به خوبی مکان‌یابی شدند. این زمین‌لرزه‌ها جزئی از که لرزه‌های کم‌ژرفا هستند که یک مؤلفه مشخص جنبشی امتدادلغز چپ‌گرد (لغزش روی داده در سطوح گسلی NE-SW، به‌طور خاص گسل‌های فعال در این منطقه) به همراه یک مؤلفه کوچک عادی دارند. نتایج پژوهش‌های ایشان، ارائه الگوی لرزه‌خیزی عادی کم‌ژرفا- راندگی ژرف است که به وسیله خم‌شدگی پوسته سخت کاسپین جنوبی هنگام رانش به زیر البرز خاوری توجیه می‌شود.

پژوهشگران دیگری همچون نواب مطلق (۱۳۷۸)، قاسمی و همکاران (۱۳۸۲)، شاه‌پسندزاده (۱۳۸۳)، رحیمی جعفری و همکاران (۱۳۸۳)، نعمتی و همکاران (۱۳۸۹) (Priestley et al. (1994), Jackson et al. (2002), Shahpasandzadeh (2005), Nemati & Gheitanchi (2010), Hollingsworth et al. (2007, 2008 & 2010) پژوهش‌هایی را در رابطه با لرزه‌زمین‌ساخت البرز خاوری انجام داده‌اند.

۴- روش مطالعه

بسته به مکان گردآوری داده‌های تنش، روش‌های بسیاری برای تعیین سوی تنش در یک منطقه وجود دارد که به‌طور خلاصه شامل: سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، بیش‌مغزه‌گیری (over coring)، ریزش‌ها و شکستگی‌ها در گمانه‌ها (borehole breakout)، درزه‌برداری هیدرولیکی (hydraulic fracturing)، داده‌های صحرائی لغزش گسل، الگوی دهانه‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی است (Zamani, 2009).

تعیین سوگیری تنش از راه داده‌های زمین‌ساختی (داده‌های صحرائی لغزش گسل‌ها و حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها) از ۱۹۶۰ پایه‌ریزی شده و از دهه ۱۹۷۰ تکامل یافته است. در این زمینه Angelier طی مقاله‌هایی (Angelier & Mechler, 1977) و Angelier & Gheitanchi (2010), Hollingsworth et al. (2007, 2008 & 2010) به این روش‌ها جامعیت بخشید و در آنها روش تعیین تانسور تنش را بهبود داد. به‌طوری که به شکل عملی می‌توان با داده‌های مختلف صحرائی و یا داده‌های زمین‌لرزه بسته به گستردگی کار، تانسور تنش را تعیین کرد. در این مطالعه روش تحلیل وارون (Angelier (2002)

با بررسی مطالعات پیشین و نتایج به دست آمده از آنها، تلاش برای ارائه یک مدل کینماتیکی در این منطقه بیشتر شد. فرض بر این است که سامانه گسلی قرناوه که شامل گسل مراوه‌تپه در جنوب و گسل اینچه‌برون در شمال است و بر پایه تازه‌ترین برداشت‌های زمین‌شناسی این گسل‌ها راستالغز چپ‌گرد با شیب رو به جنوب هستند (Hollingsworth et al., 2010) در زیر رسوبات دشت گرگان ادامه پیدا کرده و تا نزدیکی دریای کاسپین کشیده شده است. نقشه جهانی تنش نیز نشان می‌دهد که در این منطقه فشارشی در سوی S158E حاکم است (GFZ, 2011). رژیم فشارشی یاد شده، می‌تواند به شکل‌گیری و امتداد گسل‌های امتدادلغز چپ‌گرد در راستای تقریبی خاوری-باختری (مراوه‌تپه و اینچه‌برون) در زیر رسوبات دشت گرگان کمک کند. فرض بر این است که گسل‌های یاد شده، یک پهنه برشی را به وجود آورده‌اند که با حرکت امتدادلغز و چپ‌گرد خود سبب ایجاد چرخشی در سوی حرکت عقربه‌های ساعت در پهنه میان خود شده‌اند (شکل ۴- الف). البته ممکن است چرخش یاد شده، جزئی از چرخش حوضه کاسپین جنوبی باشد، که در سوی حرکت عقربه‌های ساعت و حرکت رو به شمال باختری نسبت به اوراسیاست. چرخش مربوطه، کشش کلی را در منطقه ایجاد کرده و از این دید با نتیجه‌ای که از تحلیل وارون در منطقه حاصل شد مطابقت دارد. همچنین وجود ساختارها و سطوح کششی محلی در دامنه شمالی البرز و کرانه‌های جنوبی کاسپین به وسیله تفاوت در آهنگ حرکت به سوی شمال-شمال باختری بلوک البرز و پوسته کاسپین جنوبی قابل توجیه است که با نظر Ritz et al. (2006) همخوان است.

نتایجی که Nemati et al. (2013) از انطباق رومرکز برخی از زمین‌لرزه‌های کم‌ژرفا با توپوگرافی بخش خاوری منطقه به دست آورده‌اند، نشان از وجود بالاآمدگی در این بخش دارد. بالاآمدگی یاد شده در اواخر کواترنر، سبب اختلال در شبکه زهکشی منطقه شده است. این احتمال وجود دارد که عملکرد گسلی مدفون، با حرکت جانبی چپ‌لغز همراه با مؤلفه‌ای نرمال سبب به وجود آمدن چنین توپوگرافی شده باشد. بالا آمدن بخش کمر پایین این گسل پنهان، سبب این امر شده است. به علت کشش و خمیدگی در رسوبات این ناحیه، گسلش توانسته است به سطح زمین انتشار یابد. این مسئله با سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های کوچک در این منطقه سازگار است (شکل ۴- پ). با توجه به راستا و نوع حرکت گسل‌های مراوه‌تپه و اینچه‌برون و امتداد این ساختارها در زیر پوشش رسوبی دشت گرگان، همچنین راستا و نوع حرکت ساختار کنونی می‌توان ساختار یاد شده را به شکستگی‌های نوع ریدل R نسبت داد که در پهنه برشی ایجاد شده در میان دو گسل که دارای حرکت امتدادلغز چپ‌گرد و یک مؤلفه فرعی عادی هستند، شکل گرفته‌اند. گسلش پنهان دارای مؤلفه‌ای عادی است و کشش در رسوبات این ناحیه همخوانی خوبی با سوی رژیم کششی به دست آمده در این پژوهش دارد.

با ارائه الگوی زمین‌ساختی یاد شده می‌توان برای بیشتر سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی داده و همچنین ژرفای رویداد آنها توجیهی داشت. بیشتر زمین‌لرزه‌های شرکت‌کننده در تحلیل وارون، دارای مؤلفه‌های عادی و امتدادلغز چپ‌گرد هستند. البته ممکن است که خردلرزه‌هایی نیز در ارتباط با فرونشینی رسوبات این منطقه با سازوکار اصلی یا فرعی عادی رخ بدهد که با رژیم تنش به دست آمده در تحلیل وارون همخوانی دارد.

یکی از نشانه‌های چرخش در پهنه میان دو گسل مراوه‌تپه و اینچه‌برون میزان فعالیت گلفشان‌ها در این ناحیه است. ۳ گلفشان بزرگ موجود در دشت شمالی گرگان از باختر به خاور فعالیتشان کمتر می‌شود؛ به گونه‌ای که گلفشان خاوری (در طول خاوری ۵۴/۴°) کاملاً مرده است و فعالیتی ندارد. کم‌فعالیت شدن و سرانجام رمبش گلفشانها در پی تحکیم یافتگیشان دلیل بر لرزه‌خیز شدن تدریجی گستره است (نعمتی، ۱۳۹۳). گرچه نبود داده‌های زیرسطحی ژئوفیزیکی در این منطقه ارائه این مدل را با حدس و گمان همراه می‌سازد.

برابر با ۶۵° است که این امر نشان از نزدیک به قائم بودن تنش بیشینه دارد. همچنین، تنش کمینه نیز با میلی برابر ۱۱° (نزدیک به افق بودن این تنش) نمود پیدا کرده است؛ این امر چیره بودن ساختارهای کششی محلی همانند گسل‌های عادی کم‌ژرفا را در این منطقه نشان می‌دهد. همچنین تنش میانگین نیز همانند تنش کمینه نزدیک به افق و بیانگر وجود ساختارهایی همچون گسل‌های امتدادلغز در منطقه است. این مسئله با سازوکار بیشتر داده‌های لرزه‌ای شرکت‌کننده در تحلیل وارون همخوانی دارد. مقدار نسبت شکلی تنش (Φ) برابر ۰/۵۱ به دست آمده است. مقادیر بالای ω_m و τ_m^* و مقدار کم α_m نشان از پایدار بودن تحلیل در ω_{acc} با ۲۵ درصد دارد. از سوی دیگر، در راستای پی بردن به یک الگوی زمین‌ساختی در دشت گرگان، نعمتی (۱۳۹۳) با استقرار شبکه لرزه‌نگاری موقتی به مدت ۹ ماه در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ در این ناحیه، به این نتیجه رسید که پراکندگی زمین‌لرزه‌ها، نشانگر جنبه بودن نسبی گسل کاسپین و به گمان، جنبه بودن پایانه پنهان گسل مراوه‌تپه و گسل اینچه‌برون و همچنین دشت جنوب خاوری دریای کاسپین است. شاید خردلرزه‌های مکان‌یابی شده کم‌ژرفا به پایانه باختری و پنهان سامانه گسلی قرناوه وابسته باشند. در صورتی که این گونه باشد، گسل‌های راستالغز چپ‌گرد اینچه‌برون و مراوه‌تپه در زیر دشت شمالی گرگان جنبایی دارند و تا نزدیکی دریای کاسپین پیش می‌روند. در اینجا نیز سازوکار آنها راستالغز چپ‌گرد است.

بر پایه بررسی‌های لرزه‌نگاری که در سال ۱۳۸۵ توسط پژوهشگران دانشگاه سهند صورت گرفته، در نزدیکی گلفشان قارناریق‌تپه دیابیری در حال رشد است. همین بررسی‌ها یک سری گسل‌های پنهان را نیز در جهات مختلف به اثبات رسانده است (رضواندهی و همکاران، ۱۳۸۵). همچنین وجود یک سری تاق‌دیس‌ها و ناودیس‌های بزرگ و کوچک در ابعاد چند کیلومتر در بستر دریای کاسپین نشان از فرونشینی رسوبات بستر دریا دارد. اثر محوری این چین‌ها، در محدوده بابلسر تا بندر ترکمن، خاوری-باختری است و از شمال بندر ترکمن تا مرز ترکمنستان، محور تاق‌دیس‌ها و ناودیس‌ها به سوی شمال خاوری-جنوب باختری متمایل می‌شوند (موسوی روح‌بخش، ۱۳۸۰). البته با توجه به اثر محوری چین‌های شمال آق‌قلا (روستائی و همکاران، ۱۳۹۱) و تاق‌دیس‌های موجود در بستر دریای کاسپین و همچنین اثر محوری چین‌ها در کشور ترکمنستان می‌توان به چرخش کلی این بلوک در سوی حرکت عقربه‌های ساعت پی برد.

از سوی دیگر، با توجه به بررسی‌های صحرائی انجام شده (روستائی و همکاران، ۱۳۹۱) در شمال آق‌قلا، چین‌هایی (رانندگی لس به روی رسوبات عهدحاضر) به صورت کشیده دیده می‌شوند که نسبت به یکدیگر به صورت پلکانی قرار گرفته‌اند. این چین‌ها که احتمالاً مرتبط با گسلش هستند، طولی حدود ۶ تا ۱۰ کیلومتر دارند و در سوی شمال خاور-جنوب باختر گسترش پیدا کرده‌اند. مقطع این چین‌ها که در ترانشه جاده دیده می‌شود، نشان می‌دهد بیشتر این چین‌ها نامتقارن هستند و شیب ملایم آنها به سوی شمال باختر است که منطبق بر الگوی چین‌های مرتبط با گسلش است (شکل ۴- ب).

ولی مدل‌های کینماتیکی مختلفی برای گستره پیشنهاد شده است که نشان از کوتاه‌شدگی عربستان-اوراسیا با دو رانندگی و سامانه گسلی راستالغز، در کپه‌داغ و دامنه‌های البرز خاوری، با مؤلفه جزئی کشش به سوی باختر از منطقه باختر کپه‌داغ، میان گسل راست‌گرد عشق‌آباد و سامانه چپ‌گرد گسل شاهرود دارد (Jackson et al., 2002). با این حال، این مدل به خوبی نمی‌تواند تغییر شکل فعال روی داده در زمین‌های پست کاسپین جنوبی و یا باختر مناطق کپه‌داغ را نشان دهد. جایی که زمین‌لرزه‌های بزرگی مانند زمین‌لرزه ۱۹۷۰ قره‌ناوه (Ambraseys et al., 1971) روی داده است. به علت پوشش گسترده گیاهی و رسوبات لس گسترده، دانسته‌های کمی درباره چگونگی لغزش گسل‌ها در این منطقه و اینکه چند گسل دارای اثرات سطحی پوسته به طول بیش از چند کیلومتر هستند، وجود دارد (Nemati et al., 2013).

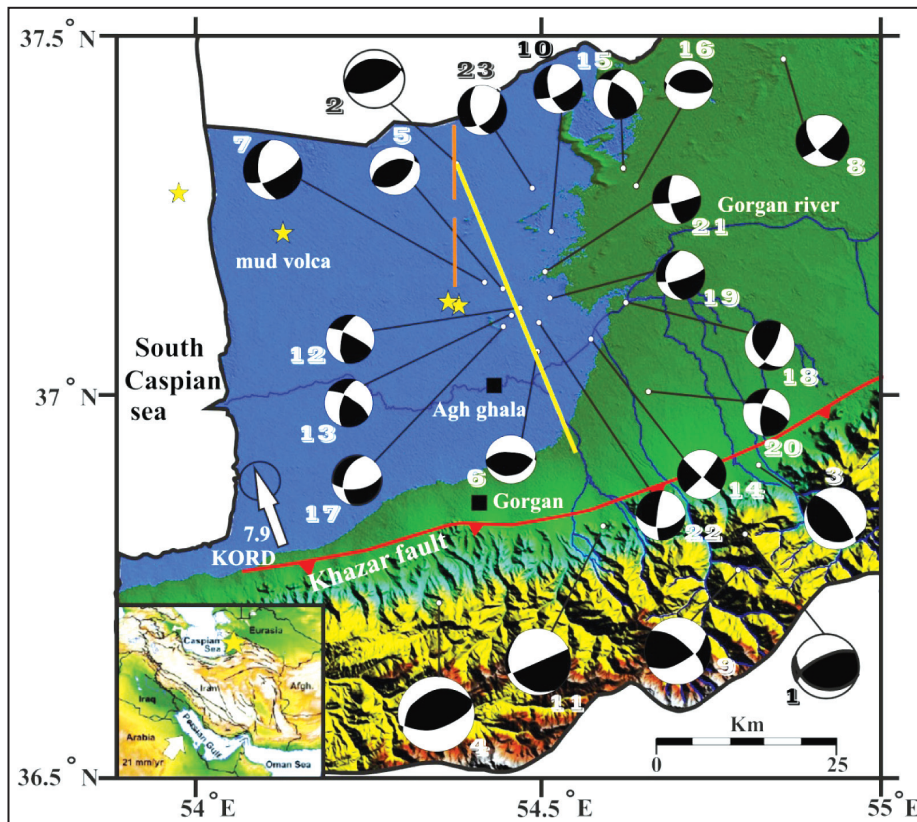
۶- نتیجه گیری

شده است، در پایانه خاوری خود در سطح زمین، به صورت پنهان در زیر رسوبات دشت گرگان و تازندگی دریای کاسپین با راستای تقریبی خاوری-باختری امتداد دارد. حرکت این دو گسل در زیر رسوبات سبب ایجاد چرخشی در سوی حرکت عقربه‌های ساعت در پهنه میان دو صفحه گسلی می‌شود. راستای این پهنه که تحت تأثیر گسل‌های یاد شده است با روند لرزه‌خیزی منطقه همسو است. از نشانه‌های تأثیر این چرخش می‌توان به میزان فعالیت گلفشان‌ها در دشت شمالی گرگان (کم شدن فعالیت از باختر به خاور) و روند اثر محوری چین‌های شمال آق‌قلا اشاره کرد. در پهنه میان دو گسل، شکستگی‌هایی از نوع ریدل (R) در بخش خاوری منطقه ایجاد شده است که حرکت امتدادلغز چپ‌گرد و یک مؤلفه فرعی عادی دارند. این شکستگی‌ها سبب انحراف و اختلال در شبکه زهکشی این منطقه شده‌اند.

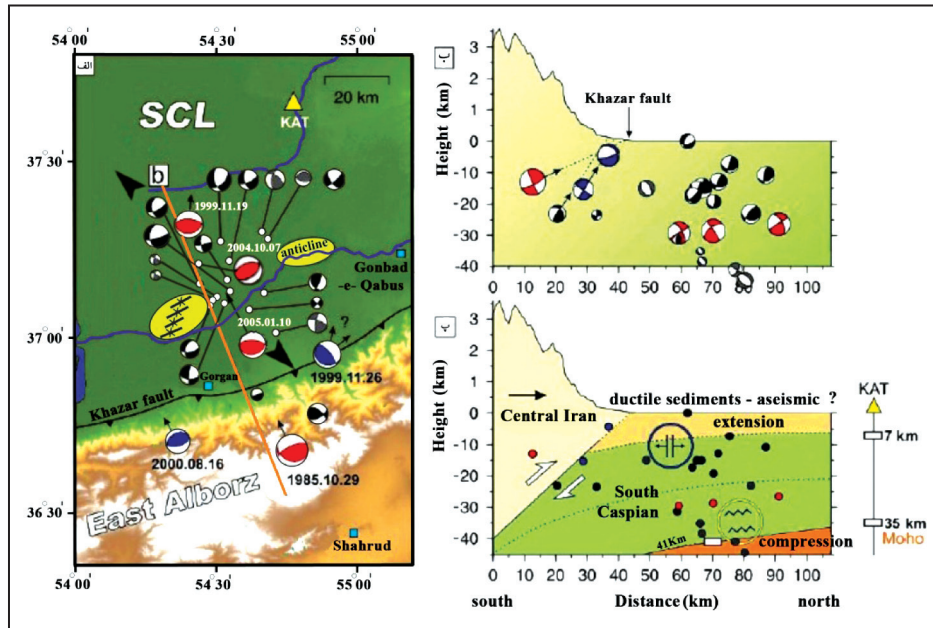
با ارائه مدل یاد شده می‌توان برای بیشتر سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی داده و همچنین ژرفای رویداد آنها توجیهی داشت. بیشتر زمین‌لرزه‌های روی داده در این ناحیه مؤلفه‌های عادی و یا چپ‌گرد دارند. البته ممکن است که خردلرزه‌هایی نیز در ارتباط با فرونشینی رسوبات این منطقه با سازوکار اصلی یا فرعی عادی رخ بدهد که با رژیم تنش به دست آمده در تحلیل وارون همخوانی دارد. گرچه نبود داده‌های زیرسطحی ژئوفیزیکی در این منطقه ارائه این الگو را با حدس و گمان همراه می‌سازد.

در این بررسی، با استفاده از روش تحلیل وارون و با استناد بر حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه، رژیم تنش حاکم بر این منطقه به دست آمد. نتایج به دست آمده پس از اعمال تحلیل وارون روی داده‌های لرزه‌ای منطقه، نشان از وجود یک رژیم تنش کششی با روند $N42^{\circ}W$ دارد. تنش کمینه به دست آمده از تحلیل وارون میلی برابر 11° دارد؛ این امر چیره بودن ساختارهای کششی محلی همانند گسل‌های عادی کم‌ژرفا در این منطقه را نشان می‌دهد. همچنین تنش متوسط نیز همانند تنش کمینه نزدیک به افق و بیانگر وجود ساختارهایی چون گسل‌های امتدادلغز در منطقه است. این مسئله با سازوکار بیشتر داده‌های لرزه‌ای شرکت‌کننده در تحلیل وارون همخوانی دارد. رژیم تنشی به دست آمده، با نظر برخی پژوهشگران که به فعالیت گسل‌های عادی کم‌ژرفا پنهان در این منطقه باور دارند، همخوانی دارد. مهم‌ترین متغیرهای تحلیل عبارتند از: مقدار نسبت شکلی تنش (Φ) که برابر 0.51 به دست آمده است و مقادیر بالای ω_m و t_m^* و مقدار کم α_m که نشان از پایدار بودن تحلیل در ω_{acc} با 25 درصد دارد.

با توجه به پوشش گسترده رسوبات در دشت گرگان و نبود اثرات گسلی در سطح زمین، احتمال وجود ساختارهای زمین‌ساختی پنهان (با توجه به مطالعات پیشین) بالاتر می‌رود. بر اساس مدل ارائه شده، فرض بر این است که سامانه گسلی قرناوه که از دو گسل مراوه تپه و اینچه برون (دارای حرکت امتدادلغز و چپ‌گرد) تشکیل

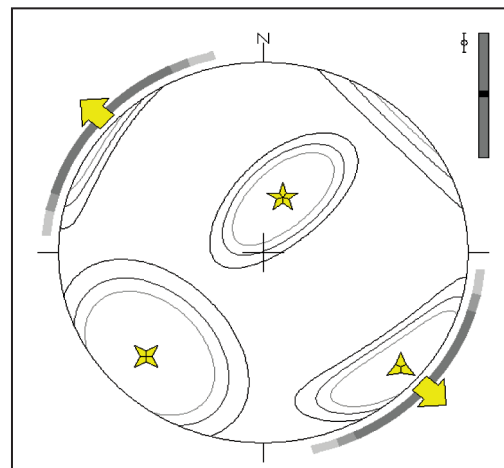


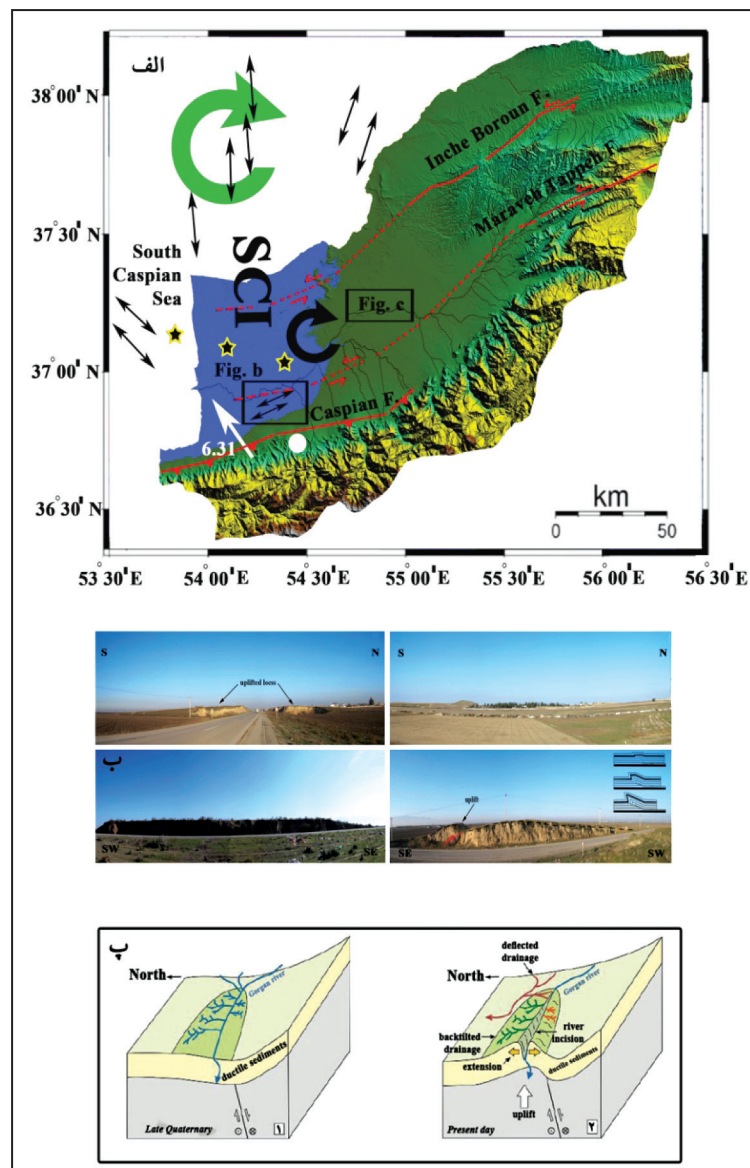
شکل ۱- نقشه توپوگرافی ناحیه مورد مطالعه به همراه حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در تحلیل وارون. خطواره مغناطیسی با خط چین نارنجی به نمایش درآمده است (بر گرفته از نقشه زمین‌ساخت ایران (NIOC, 1977) با مقیاس $1:500,000$). روند لرزه‌خیزی دشت گرگان نیز با خط پیوسته زرد رنگ مشخص شده است. پیکان سفید راستا و اندازه جابه‌جایی پوسته را نشان می‌دهد. نقشه معرفی (راهنما) بر گرفته از Nemati et al. (2013) است.



شکل ۲- نمایش لرزه‌خیزی دستگاهی در پایانه خاوری گسل کاسپین. الف) گسل کاسپین به وسیله خط مشکی نمایش داده شده است. خط آبی نمایشگر رودخانه اصلی است. زمین لرزه‌های اصلی منطقه به صورت حل سازوکارهای سرخ رنگ به همراه زمان رخداد آنها به نمایش گذاشته شده است. حل سازوکارهای آبی رنگ از کاتالوگ جهانی CMT و نمایشگر دیگر زمین لرزه‌های بزرگ این ناحیه هستند. حل‌های خاکستری و مشکی مربوط به خردزمین لرزه‌های گزارش شده توسط شبکه محلی (Nemati et al., 2013) هستند. مثلث زرد رنگ KAT ایستگاه GPS است و برآوردهای حرکتی دریافتی از موقعیت ساختاری پوسته‌ای را نشان می‌دهد (Mangino & Priestley, 1998; Raven, 2005). اثر محوری چین‌های مرتبط با گسل نیز در بخش الف وجود یک رژیم فشارشی محلی سطحی را در ناحیه آق‌فلا نشان می‌دهد. پیکان‌های مشکی بردار لغزش زمین لرزه‌ها را به طور تقریبی نشان می‌دهند؛ ب) مقطع عرضی از سرتاسر پوسته و سازوکارهای صفحه گسلی در امتداد خط مشکی در بخش الف که توزیع ژرفی زمین لرزه‌ها را نشان می‌دهد؛ پ) تفسیر زمین ساخت مقطع پوسته‌ای در بخش ب. پیکان سیاه رنگ سوی حرکت ایران مرکزی نسبت به جنوب کاسپین را نمایش می‌دهد.

شکل ۳- نتیجه تحلیل انجام شده برای به دست آوردن رژیم تنش محلی در منطقه مورد مطالعه. در این تصویر تنش کششی با پیکان‌های توپر زرد رنگ نشان داده شده است. (محدوده فشارش و کشش نیز با کنتورهایی از بیضی‌های انطباق (confidence-ellipse) با مقادیر افزایشی به سوی محورهای تنش به ترتیب ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد مشخص شده است. همچنین مقدار D برای هر مورد به صورت مقیاس خاکستری رنگ که میان ۰ (خاکستری) و ۱ (سفید) متغیر است، نشان داده شده است. موقعیت‌های σ_1 ، σ_2 و σ_3 به ترتیب با ستاره‌های ۵پر، ۴پر و ۳پر مشخص شده است.





شکل ۴- الف) نمایش مدل کینماتیکی در دشت گرگان، شمال خاوری ایران. پیکان سفید راستا و اندازه جابه‌جایی پوسته کاسپین جنوبی را نسبت به اوراسیا در ایستگاه ژئودتیک (Vernant et al., 2004) نشان می‌دهد. ادامه گسل‌های اینچ‌برون و مراوه‌تپه (با حرکت امتدادلغز چپ‌گرد) در زیر رسوبات دشت گرگان با خط‌چین سرخ رنگ نشان داده شده است، فضای میان این گسل‌ها در این منطقه، با چرخش در سوی حرکت عقربه ساعت پهنه‌ای را ایجاد کرده است. ستاره‌ها موقعیت گلفشان‌ها و پیکان‌های دو سر سیاه رنگ اثر محوری چین‌ها در دشت گرگان، حوضه خزر جنوبی و ترکمنستان را نشان می‌دهند. پیکان سبز مدور بیانگر چرخش حوضه کاسپین جنوبی در سوی حرکت عقربه‌های ساعت است. خط آبی در این شکل رودخانه گرگان‌رود را نشان می‌دهد؛ ب) مقطع برخی از چین‌های دیده شده در ترانشه جاده در شمال آق‌قلا را نشان می‌دهد؛ پ) بلوک‌نمودارهای ۱ و ۲ علت اختلال در شبکه زهکشی گرگان‌رود را به نمایش می‌گذارند. به نظر می‌رسد که این امر در اثر وجود نوعی از شکستگی‌های ریدل R با حرکت امتدادلغز چپ‌گرد همراه با مؤلفه کوچک عادی باشد (برگرفته از (Nemati et al. (2013).

جدول ۱- داده‌های لرزه‌ای مربوط به منطقه مورد مطالعه.

Ref. No.	Date	Time (GMT)	Lat. (°E)	Lon. (°N)	Depth (km)	Mag.	Nodal plane 1				Nodal plane 2				Source
							S. M	Str.(°)	Dip(°)	Rake(°)	S. M	Str.(°)	Dip(°)	Rake(°)	
۱	۱۹۸۵/۱۰/۲۹	۱۴:۲۳:۰۵	۳۶/۸۳	۵۴/۸۷	۱۳	۶/۲ (M _w)	5	۲۴۶	۶۶N	۷۴E	6	۱۰۶	۳۰S	۵۰E	۱
۲	۱۹۹۹/۱۱/۱۹	۴:۴۰:۲۵	۳۷/۳۰	۵۴/۳۹	۲۶	۵/۴ (M _w)	6	۰۸۰	۳۲N	۷۶W	5	۰۶۶	۵۹S	۸۰W	۲
۳	۱۹۹۹/۱۱/۲۶	۴:۲۷:۲۲	۳۶/۹۲	۵۴/۸۹	۴	۵/۳ (M _w)	5	۱۰۶	۲۲SW	۶۲W	6	۳۲۰	۷۱NE	۷۶N	۳
۴	۲۰۰۰/۰۸/۱۶	۱۲:۵۳:۰۱	۳۶/۷۳	۵۴/۳۸	۱۵	۴/۹ (M _w)	5	۲۴۰	۳۴N	۷۸E	6	۰۷۴	۵۷S	۸۴E	۳
۵	۲۰۰۴/۱۰/۰۷	۲۱:۴۶:۱۹	۳۷/۱۴	۵۴/۴۷	۲۸	۵/۵ (M _w)	5	۰۴۷	۴۴°SE	۷۲S	6	۲۵۲	۴۹N	۷۲W	۲
۶	۲۰۰۵/۰۱/۱۰	۱۸:۴۷:۳۰	۳۷/۰۶	۵۴/۵۳	۲۹	۵/۲ (M _w)	5	۰۶۹	۳۱S	۶۸W	6	۲۷۴	۶۱N	۸۰W	۲
۷	۲۰۰۷/۰۸/۳۰	۱۶:۴۹:۲۹	۳۷/۱۵	۵۴/۴۴	۱۳	۴/۰ (M _L)	8	۰۶۳	۶۷S	-۴۶E	7	۱۷۴	۴۸W	-۳۲N	۲
۸	۲۰۰۸/۰۵/۱۵	۵:۲۲:۰۶	۳۷/۴۴	۵۴/۹۱	۱۰/۸	۴/۱ (M _L)	2	۰۴۷	۷۸SE	-۳۳E	1	۱۴۴	۵۷SW	-۲۰W	۲
۹	۲۰۰۸/۰۸/۲۵	۳:۳۷:۴۵	۳۶/۷۸	۵۴/۸۶	۲۳/۱	۴/۰ (M _L)	4	۰۵۸	۵۷S	۳۳S	3	۳۰۹	۶۳N	۴۴N	۲
۱۰	۲۰۰۹/۰۲/۲۰	۱۹:۴۸:۲۵	۳۷/۲۱	۵۴/۵۴	۷/۴	۴/۰ (M _L)	2	۰۶۳	۷۱S	-۳۶E	1	۱۶۶	۵۶W	۲۶-N	۲
۱۱	۲۰۰۹/۰۸/۲۱	۹:۲۷:۱۲	۳۶/۸۳	۵۴/۶۴	۲۳/۵	۲/۴ (M _L)	5	۲۴۶	۹۰	۷۵E	3	۱۵۶	۱۵W	۰۱N	۲
۱۲	۲۰۰۹/۱۰/۱۵	۲۱:۵۴:۱۰	۳۷/۱۰	۵۴/۴۸	۳۵/۱	۱/۹ (M _L)	4	۲۹۵	۷۶NE	۳۰E	3	۱۹۶	۵۸W	۲۰S	۲
۱۳	۲۰۰۹/۱۰/۱۵	۲۳:۲۴:۲۱	۳۷/۱۱	۵۴/۴۹	۳۸/۳	۲/۲ (M _L)	4	۳۰۰	۷۰NE	۲۶E	3	۱۹۸	۶۲W	۲۴S	۲
۱۴	۲۰۰۹/۱۰/۱۷	۱۴:۰۴:۱۹	۳۷/۰۷	۵۴/۶۱	۳۱/۳	۲/۲ (M _L)	2	۰۴۱	۸۱SE	-۱۰N	1	۱۳۱	۸۴SW	-۱۴N	۲
۱۵	۲۰۰۹/۱۰/۲۶	۱۷:۲۱:۱۲	۳۷/۳۰	۵۴/۶۶	۴۴/۳	۳/۸ (M _L)	4	۳۰۵	۶۰NE	۴۲E	3	۱۹۱	۵۴W	۳۶S	۲
۱۶	۲۰۰۹/۱۱/۰۶	۵:۱۹:۲۰	۳۷/۲۷	۵۴/۶۸	۴۰/۹	۳/۳ (M _L)	5	۲۵۷	۳۱N	۷۱N	6	۰۹۹	۶۰S	۷۸S	۲
۱۷	۲۰۰۹/۱۱/۱۶	۱۹:۴۰:۳۷	۳۷/۰۹	۵۴/۴۷	۱۵	۳/۶ (M _L)	8	۰۸۰	۶۲S	-۴۹/۵E	7	۱۹۸	۴۷W	۳۶N	۲
۱۸	۲۰۰۹/۱۱/۱۶	۲۳:۴۶:۲۰	۳۷/۱۲	۵۴/۶۷	۱۵	۳/۵ (M _L)	4	۱۴۳	۳۵W	۳۱W	3	۰۲۸	۷۲E	۵۸N	۲
۱۹	۲۰۰۹/۱۲/۰۳	۱۵:۰۵:۱۳	۳۷/۱۳	۵۴/۵۴	۱۵	۴/۸ (M _L)	8	۰۷۳	۷۸S	-۵۴E	7	۱۷۹	۳۷W	-۱۸N	۲
۲۰	۲۰۰۹/۱۲/۳	۲۰:۳۳:۰۰	۳۷/۰۱	۵۴/۷۱	۱۵	۳/۹ (M _L)	4	۲۸۹	۶۹N	۲۲E	3	۱۹۰	۶۹W	۲۵S	۲
۲۱	۲۰۰۹/۱۲/۱۴	۱۹:۰۵:۲۳	۳۷/۱۶	۵۴/۵۳	۱۹/۳	۳/۴ (M _L)	2	۰۷۸	۸۱S	-۲۴E	1	۱۷۲	۶۶W	-۱۲N	۲
۲۲	۲۰۰۹/۱۲/۱۸	۱۴:۴۶:۳۹	۳۷/۰۹	۵۴/۵۳	۱۷/۳	۳/۸ (M _L)	2	۰۸۷	۴۷S	-۱۵E	7	۱۸۷	۷۹W	-۴۸N	۲
۲۳	۲۰۱۰/۰۳/۰۴	۳:۲۴:۲۲	۳۷/۲۷	۵۴/۵۱	۲۳/۱	۴/۶ (M _L)	8	۰۴۵	۵۴SE	-۴۶E	7	۱۶۵	۵۴W	-۵۰N	۲

صفحه اصلی گسلی با Nodal plane 1 مشخص شده و Nodal plane 2 صفحه کمکی به شمار می‌آید: S. M. (سوی حرکتی صفحه گسلی)؛ عدد ۱: حرکت راست‌الغز راست‌گرد به همراه مؤلفه شیب لغز شمال؛ عدد ۲: حرکت راست‌الغز چپ‌گرد به همراه مؤلفه شیب لغز عادی؛ عدد ۳: حرکت راست‌الغز راست‌گرد به همراه مؤلفه شیب لغز وارون؛ عدد ۴: حرکت راست‌الغز چپ‌گرد به همراه مؤلفه شیب لغز وارون؛ عدد ۵: حرکت شیب‌لغز وارون به همراه مؤلفه راست‌الغز چپ‌گرد؛ عدد ۶: حرکت شیب لغز وارون به همراه مؤلفه راست‌الغز راست‌گرد؛ عدد ۷: حرکت شیب‌لغز عادی به همراه مؤلفه راست‌الغز راست‌گرد؛ عدد ۸: حرکت شیب‌لغز عادی به همراه مؤلفه راست‌الغز چپ‌گرد؛ Str: امتداد صفحه گسلی؛ Dip: شیب صفحه گسلی؛ Rake: زاویه ریک لغزش (زاویه میان بردار لغزش روی سطح گسل و سطح افق. این زاویه $0^\circ < \text{Rake} < 90^\circ$ متغیر است. ریک لغزش عادی با علامت منفی و لغزش وارون با علامت مثبت مشخص می‌شود. برای زوایای $45^\circ < \text{Rake}$ مؤلفه چیره راست‌الغز و مؤلفه چیره شیب‌لغز است. در پایان نیز اگر مرکز استریوپلات در بخش سفید (کششی) جای گیرد، هر دو صفحه گرهی دارای Rake منفی و اگر مرکز استریوپلات در بهش سیاه (فشارشی) باشد، هر دو صفحه دارای Rake مثبت خواهند بود)؛ منابع داده‌ها برگرفته شده از (1994) Prestley et al. (2013) Nemat et al. و (2011) HRVD است.

جدول ۲- مهم‌ترین متغیرهای تحلیل وارون بر روی حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در منطقه. مشخصات محورهای اصلی تنش نیز به صورت trend (سهرقم) و plunge (دورقم) بر حسب درجه است. توضیحات مربوط به متغیرهای دیگر در متن آورده شده است.

$\omega_{acc} \%$	$N_{acc} \%$	σ_1	σ_3	Φ	$\omega_m \%$	τ_m^*	α_m	α_{sd}
۲۵	۶۱	۰۱۸	۶۵	۱۳۲	۱۱	۰/۵۱	۷۴	۸۲

کتابنگاری

- اشتری جعفری، م.، ۱۳۸۷- بررسی تغییرات کوتاه دوره لرزه خیزی گستره تهران با استفاده از متغیرهای a و b ، مجله فیزیک زمین فضا، دوره ۳۵ شماره ۱، صص. ۴۵ تا ۵۷.
- انصاری، ف.، و بلورچی، م. ج.، ۱۳۸۱- گل فشانها در دریای کاسپین جنوب خاوری، گزارش داخلی سازمان زمین شناسی کشور، ۴ ص.
- خسرو تهرانی، خ.، ۱۳۷۶- زمین شناسی ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور.
- رحیمی جعفری، ر.، عکاشه، ب. و قیطانچی، م. ر.، ۱۳۸۳- لرزه خیزی و برآورد خطر برای استان گلستان، دانشگاه تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۲۱ ص.
- رده، ا.، ۱۳۷۰- تاریخ زمین لرزه های ایران، ترجمه کتاب امبرسز و ملویل (۱۹۸۴)، انتشارات آگاه، تهران، ۶۷۴ ص.
- رضواندهی، م.، آقابابائی، ح.، طباطبائی، س. ه. و کوشاوند، ب.، ۱۳۸۵- کاربرد نشانگرهای لرزه ای در تفسیر مخزن هیروکربنی دشت گرگان، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین.
- روستائی، م.، آق آتابای، م.، رقیمی، م.، رحیمی چاکدل، ع. و نعمتی، م.، ۱۳۹۱- تحلیل فعالیت های نوزمین ساختی با استفاده از شواهد ریخت زمین ساختی در حوضه آبریز قره سو، جنوب باختر استان گلستان، فصلنامه زمین شناسی ایران. سال ششم. شماره ۲۴، صص. ۵۵ تا ۶۵.
- شاه پسندزاده، م.، ۱۳۸۳- زمین لرزه خیزی و لرزه زمین ساخت گستره استان گلستان، شمال خاوری ایران، مقالات کنفرانس بین المللی زمین لرزه (یادواره فاجعه بم)، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- فصل بهار، ج.، پور کرمانی، م. و فصل بهار، ش.، ۱۳۸۸- بررسی زمین شناسی گل فشان های حاشیه جنوب خاوری دریای خزر. مجله علوم زمین، سال بیستم، شماره ۷۷، ۹ ص.
- قاسمی، م. ر.، محمدخانی، ح. و عبدالهی، ع.، ۱۳۸۶- گذر از برپایی در کبه داغ به فرونشینی در کاسپین جنوبی، معرفی گسله های نوشناخته گنبد کاووس و یساقی، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین.
- قاسمی، م. ر.، قرشی، م. و سعیدی، ع.، ۱۳۸۲- گسله های لرزه زای بنیادی البرز، گزارش طرح پژوهشی شورای پژوهش های علمی کشور، ۸۲ ص.
- موسوی روح بخش، س. م.، ۱۳۸۰- گل فشان های قارنیاریق تپه و نفتلیجه، گزارش نفت خزر.
- نعمتی، م.، ۱۳۹۳- لرزه خیزی و هندسه گسل های پنهان در دشت شمالی گرگان، نشریه زمین شناسی ژئوتکنیک، سال دهم، شماره ۱، ۱۵ ص.
- نعمتی، م.، هتسفلد، د.، قیطانچی، م. ر.، طالبیان، م.، میرزایی، ن. و سدیدیخوی، ا.، ۱۳۸۹- لرزه زمین ساخت البرز خاوری و دامنه جنوبی آن با نگرشی بر زمین لرزه $M_w = 5.7$ جنوب دامغان، مجله علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نواب مطلق، ا.، ۱۳۷۸- تجزیه و تحلیل پراکندگی مکانی- زمانی کانون زمین لرزه ها در پهنه البرز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ۱۷۱ ص.

References

- Akhmedbeyli, F. S., BerlinYu, M., Bogdanov, N. A., Chekhovich, P. A., Gassemi, M., Guliyev, I. S., Ismalizadeh, A. J., Kengerli, T. N., Khain, V. Ye., Korobanov, V. V., Koronovsky, N. V., Koslyuchenko, S. L., Levin, L. E., Mamedov, A. V., Maina, M. N., Mirzoes, D. A., Odekov, O. A., Pilifosov, V. M., Pirbudagov, V. M., Popkov, V. I., Shlygin, D. A., Volchegarsky, L. E., Votsalevsky, E. S. & Zakpidov, A. U., 2006- International tectonic map of the Caspian sea Region scale 1: 2500.000 explanatory Notes Moscow, seien tipic word, 104 P- 16 color page.
- Allen, M. B., Vicent, S. J., Alsop, G. I., Ismail-zadeh, A. & Flecker, R., 2003- Late Cenozoic deformation in south Caspian region: effects of a rigid basement block within a collision zone. *Tectonophysics* 366. 223-23.
- Allen, M. B., Jones, S., Ismail- zadeh, A., Simmons, M. & Anderson, L., 2002- Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene- Quaternary subsidence in the South Caspian Basin, *Geology*, 30, 775- 778.
- Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982- A history of Persian Earthquakes. Cambridge University Press, New York.
- Ambraseys, N., Moïnfar, A. & Tchalenko, J., 1971- The Kamaveh (Northeast Iran) earthquake of 30 July 1970, *Ann. Geof.*, 24, 475- 495.
- Angelier, J. & Mechler, P., 1977- Sur une m'ethode graphique de recherché des contraintes principales 'egalement utilisable en tectonique et en s'eismologie: la m'ethode des di'edres droits. *Bull. Soc. G'eol. France*, 7, 1309-1318.
- Angelier, J., 1984- Tectonic analyses of fault slip data sets. *Journal of Geoph. Res.*, Vol. 89, No. B7, pp. 5835-5848.
- Angelier, J., 1989- From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data, *J. Struct. Geol.*, 11, 37-50.
- Angelier, J., 1990- Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress III. A new rapid direct inversion method by analytical means, *Geophys. J. Int.*, 103, 363-376.
- Angelier, J., 1994- Fault slip Analysis & paleostress reconstruction In: Hancock, P. L. 1994. *ContiNental Deformation*, pergamon press Ltd. Chapter4, pp. 53- 100.
- Angelier, J., 2002- Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress (a new method free of choice among nodal planes) IV. *Geophys. J. Int.*, 150: 588-609.
- Angelier, J., 2004- Inversion of earthquake focal mechanisms to reconstruct multiple seismotectonic stress regimes: Refinig and separation processes. *Geophy. Research Abst.*, Vol. 6, 03901.
- Angelier, J., Tarantola, A., Manoussis, S. & Valette, B., 1982- Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. 1: single phase fault populations: a new method of computing the stress tensor, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 69, 607-621.

- Berberian, M., & Yeats, R., 1999- Patterns of Historical Earthquake Rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological society of America*, 89: 120-139.
- Brunet, M. F., Korotaev, M., Ershov, A. & Nikishin, A., 2003- The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modeling Sediment. Geol., 156 (1- 4), 119- 148.
- 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 1287-1301.
- Engdahl, E. R., Jackson, J., Myers, S. C., Bergman, E. A. & Priestly, K., 2006- Relocation and assessment of seismicity in the Iran region, *Geophysical Journal International*. 167, 761-778.
- Gallagher, R., 2003- Mysterious Fascinate scientists and tourisms, *Azerbaijan International*, P.44-49.
- GFZ (Deutsches GeoForschungs Zentrum), 2011- available online at: http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/pub/stress_data/stress_data_frame.html.
- HRVD (Harvard catalogue), 2011- CMT, Centroid Moment Tensor catalogue, available online at: <http://www.seismology.harvard.edu/CMTcatalogsearch.html>.
- Heravi, M., 1993- Tectonic map of Iran, scale 1:1000000, Geological survey of Iran, Tehran.
- Hollingsworth, J. Ritz, J. & White, N., 2007- Active Tectonic of NE Iran, Ph.D Thesis, University of Cambridge. p 239.
- Hollingsworth, J., Jackson, J. & Walker, R., 2010- Active tectonics of the East Alborz mountains, NE Iran; rupture of the left- lateral Astaneh fault system during the great 856AD Qumis earthquake, *J. geophys. Res.*, 115, B12313, doi: 10.1029/2009 JB007185.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R. & Nazari, H., 2008- Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma. *Geology* 36. 763-766.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., Gheitanchi, M. & Bolourchi, M., 2006- Strike- slip faulting, rotation, and along- strike elongation in the Kopeh Dagh mountains, NE Iran, *Geophys. J. Int.*, 166, 1161- 1177.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. & Berberian, M., 2002- Active tectonics of the South Caspian Basin, *Geophysical Journal International*., 148. 214-245.
- Mangino, S. & Priestley, K., 1998- The crustal structure of the southern Caspian region, *Geophys. J. Int.*, 133, 630-648.
- Nemati, M. & Gheitanchi, M., 2010- Compressional regime in seismotectonics of the east of South Caspian Basin, Iran, based on recent regional and local seismicity and 1985 Gorgan earthquake waveform modeling, ESC (France).
- Nemati, M., Hollingsworth, J., Zhan, Z., Bolourchi, M. & Talebian, M., 2013- Microseismicity and seismotectonics of the South Caspian Lowlands, NE Iran. *Geophys.J. Int.*, 1- 18.
- NIOC (National Iranian Oil Company), 1977- Geological, tectonic maps and cross- sections of Iran, scale 1: 500,000, Exploration and production Division, Tehran.
- Priestley, K., Baker, C. & Jackson, J., 1994- Implication of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the South Caspian Basin and surrounding regions. *Geophys. J. Int.*, V. 118, P. 111- 141.
- Raven, K., 2005- The nature of oceanic basins trapped within the Alpine Himalayan Belt, and their relationship to Tethys, PhD thesis, University of Cambridge.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S. & Vernant, P., 2006- Active transtension inside central Alborz: a new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics, *Geology*, 34 477-480.
- Rizza, M., Mahan, S., Ritz, J. F., Nazari, H., Hollingsworth, J. & Salamati, R., 2011- Using luminescence dating from coarse matrix material to estimate fault slip- rate in arid domain: example of the Astaneh Fault (Iran), *Quarter. Geochronol.*, 6 (3- 4), 390- 406.
- Shahpasandzadeh M., 2005- The role of seismogenic activities on the fluvial sediment flux of Gorgan-Rud River in the active Alborz mountain belt, NE Iran: A new approach to long- term earthquake prediction. 2th annual meeting of Asia oecania Geosciences Society conference Singapore.
- Stocklin, J., 1974- Possible ancient continental margins in Iran, in *Geology of continental Margins*, pp. 873- 877, eds Burke, C. & Drake, C., Spinger Verlag, New York.
- Tatar, M., Jackson, J., Hatzfeld, D. & Bergman, E., 2007- The 2004 May 28 Baladeh earthquake (Mw 6.2) in the Alborz, Iran: overthrusting the South Caspian Basin margin, partitioning of oblique convergence and the seismic hazard of Tehran, *Geophys. J. Int.*, 170, 249- 261.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Che'ry, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J. F., Sedighi, M. & Tavakoli, F., 2004- Deciphering Oblique Shortening of Central Alborz in Iran using Geodetic Data, *Earth and Planetary Science Letters*, 223, 177-185.
- Zamani, B., 2009- State of tectonic stress in the Iranian crust, indicated by focal mechanisms of earthquakes, PhD thesis. University of Shiraz, Iran (in Farsi), pp: 120.
- Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M. & Sabouri, J., 2006- Inversion tectonics in central Alborz, Iran, *J. Struct. Geol.*, 28, 2023- 2037.

Investigation of the neo-tectonic stress state and proposing a kinematic model for the Gorgan plain, NE Iran

M. Rustaei ^{1*}, M. Rustaei ², B. Zamani ³ & M. Nemati ⁴

¹M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran

²M.Sc., Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

³Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

⁴Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science and Earthquake Research Center, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

Received: 2015 February 26

Accepted: 2015 September 21

Abstract

In this study, the stress regime governing the Gorgan plain area (NE Iran) is calculated using inversion analysis based on earthquake focal mechanism solutions. In addition, a kinematic model is presented for hidden faults in this area. To gain this goal, the earthquakes occurred in this region and had available focal mechanism solutions were first selected for the inversion analysis. After applying the inverse analysis on the seismic data, the results indicate that there is a NW-SE (N42W)-trending tensional stress regime over the area. This is represented by the dominant local extensional structures such as shallow normal faults. Also the intermediate and minimum stress axes are close to horizontal direction, and indicate structures such as strike slip faults in the region. This is in agreement with most of the seismic dataset involved in the inversion analysis. By examining the previous studies and their results, more attempts were made to provide a kinematic model for this area. The Gharnaveh fault system comprises two sinistral faults (Marave-tappeh and Incheboroun), which are assumed to extend at eastern termination along an E-W direction under the Gorgan plain sediments up close to the Caspian Sea. Movement along these two faults under the sediments cause a clockwise rotation in the zone enclosed between them. Direction of this zone, which is affected by the faults, is consistent with the trend of regional seismicity. The proposed model can be used to account for many of the focal mechanism solutions of the earthquakes occurred, as well as the depth of the events. Most earthquakes occurred in this region are associated with the normal or left-lateral components. On the other hand, superficial structures such as mud volcanoes and fault-related folds (in the north of Aq qala) can be explained by this model, although lack of subsurface geophysical data in this area makes this model somehow speculative.

Keywords: Neo tectonic stress, Gorgan plain, State of stress, Inversion analysis.

For Persian Version see pages 375 to 384

*Corresponding author: M. Rustaei; E-mail: rustaeimasomeh@yahoo.com