

ویژگی‌های لرزه‌خیزی دشت سیالاخور بروجرد بر اساس داده زمین‌لرزه‌های ثبت شده در یک شبکه لرزه‌نگاری موقت

طاهره شهرابی، غلام جوان دولویی: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و
مهندسی زلزله

Javandoloei@iies.ac.ir

تاریخ: دریافت ۸۸/۲/۲۷
پذیرش ۸۹/۳/۲۹

چکیده

دشت سیالاخور بروجرد بین دو زون زاگرس مرتفع و سنتنگ-سیرجان است و یکی از مناطق لرزه‌خیز کشور به شمار می‌رود. بررسی گسل‌های منطقه و کانون‌های سطحی زمین لرزه‌ها در منطقه نیز نشان دهنده وقوع زمین لرزه‌هایی با تعداد نسبتاً زیاد و بزرگی متوسط تا بزرگ است. بررسی زمین لرزه‌های تاریخی نیز نشان دهنده بروز زمین لرزه‌های متعددی در گستره بررسی شده درگذشته است و گستره بیشینه تخریب و صفحه گسل در سازوکارهای کانونی تعیین شده از روند شمال غربی-جنوب شرقی آن‌ها تعیت می‌کنند.

بررسی توزیع مکانی پس لرزه‌های زمین لرزه ۱۳۸۴/۲/۳۱ بروجرد بر روی نقشه توپوگرافی منطقه، نشان می‌دهد که اکثر پس لرزه‌ها در منطقه کانون سطحی زمین لرزه اصلی یعنی در ناحیه گسل قلعه حاتم به وقوع پیوسته‌اند. همچنین با تعیین محل پس لرزه‌های زمین لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۳ مشخص شد که اکثر پس لرزه‌ها در منطقه کانون سطحی زمین لرزه اصلی، یعنی گسل دورود بوقوع پیوسته‌اند. به عبارت دیگر، فعال شدن گسل مسبب زمین لرزه‌های اصلی ایجاد کننده پس لرزه‌ها بوده است. همچنین سازوکارهای محاسبه شده برای زلزله‌ها در این پژوهش، اکثراً امتدادلغز راست‌گرد را در کنار سازوکارهای فشارشی و

کششی نشان می‌دهند. وجود این سازوکارهای متفاوت در کنار همدیگر نشان دهنده وقوع پدیده افزای در این ناحیه از زاگرس است.

واژه‌های کلیدی: لرزه خیزی، دشت سیلانخور، گسله فعال

مقدمه

دشت بزرگ سیلانخور در استان لرستان در طول ۴۸/۳-۴۹ درجه شرقی و ۳۳/۳-۳۴ درجه عرض شمالی ما بین زون دگرگونه در امتداد زون سنندج- سیرجان در شمال و زاگرس خردش شده در جنوب واقع شده است. این دشت از اشترینان (شمال غرب بروجرد) تا دورود گسترش دارد و شهرهای اشترینان، بروجرد و دورود به ترتیب از شمال غرب به جنوب شرق در طول آن قرار دارند. دشت سیلانخور عمدتاً از رسوبات آبرفتی شامل پادگانه‌های بلند و قدیمی پادگانه‌های کوتاه و جوان و رسوبات رودخانه‌ای تشکیل شده که می‌توان رسوبات آنرا به صورت کفه مسطح رس در نظر گرفت. آب‌های سطحی موجود در این دشت شامل رودخانه‌های بزاپنا و چالانچولان می‌باشد.

در روزهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت ۱۳۸۴، هشت زمین‌لرزه حوالی شهرستان بروجرد به وقوع پیوست که بزرگ‌ترین آنها در ساعت ۵:۱۱ ظهر روز سه شنبه ۸۴/۲/۱۳ با بزرگی $ML=4.9$ در مقیاس ریشر رخ داد. در این راستا پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با طراحی و نصب یک شبکه موقع لرزه‌نگاری به ترتیب در شهرهای بروجرد، نهاوند، دورود، چغانوندی، الشتر و ناحیه توره اقدام به ثبت رویدادهای لرزه‌ای ناحیه دشت سیلانخور بروجرد نمود. هدف این مقاله بررسی ویژگی‌های لرزه‌خیزی دشت سیلانخور بروجرد براساس رویدادهای لرزه‌ای ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری موقع فوق الذکر است. علاوه بر آن خصوصیات پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۶/۱ ریشتری یازدهم فروردین ماه ۱۳۸۵ که در منطقه دشت سیلانخور به وقوع پیوست مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱).

گسل‌های بنیادی، جنا و کواترنر منطقه

از مهم‌ترین گسل‌های بنیادی، جنا و کواترنر منطقه می‌توان به گسل معکوس اصلی زاگرس و گسل عهد حاضر اشاره نمود (آقاباتی. ۱۳۸۳).

گسل معکوس اصلی زاگرس (MZRF): این گسل جدا کننده زون دگرگونه سنتندج-سیرجان از زون زاگرس است. این گسل در ناحیه دشت سیلانخور به صورت تراستی دارای شبی با میل به طرف شمال شرق پنهان می‌شود.

گسل اخیر (عهد حاضر) زاگرس (MRF): گسل اصلی جوان یک گسل منفرد نبوده، بلکه از تعدادی بخش‌های گسلی مجزا که اغلب به گونه یک الگوی نرده‌بانی راست‌گرد شکل گرفته‌اند تشکیل شده است. از جنوب شرق به شمال غرب قطعات گسل اصلی عبارتند از: گسل دورود، گسل نهاآنده، گسل صحنه، گسل دینور، گسل سرتخت، گسل مروارید و گسل پیرانشهر. شرح مختصر قطعه گسلی دورود و قطعه گسلی نهاآنده با توجه به این‌که دشت سیلانخور را در بر می‌گیرند، ضروری به نظر می‌رسد.

قطعه گسلی و لرزه‌زای دورود: دارای سازوکار راستالغز راست‌گرد همراه با یک مؤلفه قائم کوچک است به طوری که بخش جنوب غربی آن (واقع در محدوده شمال غرب شهر دورود و مرز جنوبی دشت سیلانخور) نسبت به بخش شمال شرقی به سمت بالا حرکت کرده است. دشت سیلانخور در شمال غرب به‌وسیله گسل نرمال قلعه حاتم (با راستای تقریبی شمال-جنوب) احاطه شده است. به عبارت دیگر گسل عادی قلعه حاتم قطعه گسلی دورود را از قطعه گسلی نهاآنده جدا می‌کند.

قطعه گسلی کواترنری نهاآنده: نیز بخش فعال دیگری از گسل اصلی جوان زاگرس است که با راستای شمال غربی-جنوب شرقی از غرب بروجرد آغاز و از ۲/۵ کیلومتری جنوب غربی شهر نهاآنده می‌گذرد و با راستای ۱۴۰ درجه در شمال غرب این شهر ختم می‌شود. این گسل با درازای حدود ۵۵ کیلومتر، دارای سازوکار راستالغز راست‌گرد با شبی زیاد به سمت جنوب غربی است (شکل ۲).

پیشینه لرزه‌خیزی دشت سیلاخور

دشت سیلاخور در طول تاریخ شاهد وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ بوده است که در این قسمت شرح مختصری از آن‌ها ارائه می‌شود (بربیریان، ۱۹۹۴).

۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی و سده بیستم

- زمین‌لغزه کهن سیمره (۱۱۰۰ سال پیش): زمین‌لغزه سیمره در زاگرس با حجمی وسیع از واریزه‌ها احتمالاً یکی از بزرگ‌ترین زمین‌لغزه‌های گزارش شده در نیم‌کره شرقی کره زمین است که احتمالاً در اثر فعالیت گسل جنبای کبیرکوه با ساز و کار معکوس همراه با وقوع زمین‌لرزه‌ای مخرب شکل گرفته است.
- زمین‌لرزه ۲ تیر ۲۵۱ هـ، سیمره: (۸۷۲/۶/۲۲) در این زمین‌لرزه که با وقوع چندین پیش‌لرزه بزرگ همراه بوده است، منطقه سیمره ویران شد و حدود ۲۰۰۰۰ تن جان باختنده.
- زمین‌لغزه کهن اشترانکوه: دریاچه گهر (۲۹ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان دورود) به احتمال زیاد در اثر وقوع یک زمین‌لرزه شدید و سنگ ریزش‌های پی در پی و بسته شدن دره اشترانکوه به وجود آمده است. دریاچه کوهستانی گهر که بر روی گسل اصلی امروزی زاگرس (بخش دورود) قرار دارد، بر پهنه رو مرکزی زمین‌لرزه فاجعه بار سیلاخور ۱۲۷۸/۱۱/۳ش. با بزرگی $M_s = 7/4$ منطبق است.
- زمین‌لرزه ۳ بهمن ۱۲۷۸ش. سیلاخور (۱۹۰۹/۱/۲۳): زمین‌لرزه فاجعه‌باری با بزرگی $M_s = 7/4$ در بامداد ۱۲۷۸/۱۱/۳ش. دره سیلاخور (جنوب شرق شهرستان بروجرد) را در هم کویید. در اثر این زمین‌لرزه به طور کلی ۱۲۸ آبادی آسیب دیده‌اند که از بین آن‌ها ۶۴ آبادی به طور کلی ویران شده و شمار کشته شدگان در آن‌ها بین ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰ نفر برآورد شده است.
- زمین‌لرزه ۱۰/۲۸ مهر ۱۹۶۱م حیدرآباد: این زمین‌لرزه با بزرگی $M_s = 4/6$ در ناحیه روستای حیدرآباد (واقع در ۳۵ کیلومتری شمال غربی دورود و ۲۱ کیلومتری جنوب بروجرد) و امتداد گسل دورود روی داده است.

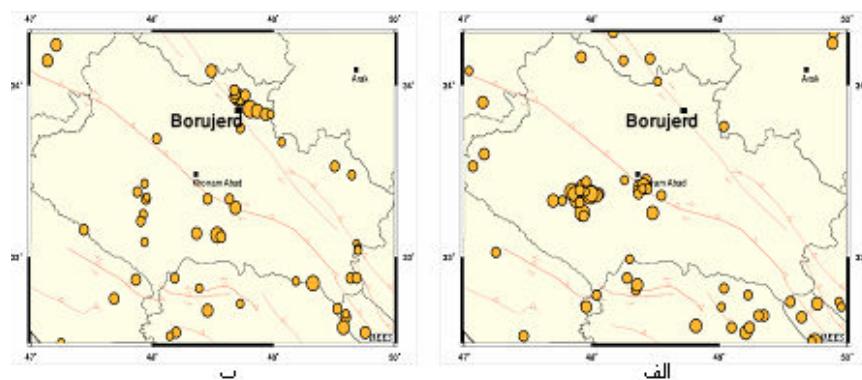
ویژگی‌های لرزه‌خیزی دشت سیلانخور بروجرد بر اساس داده زمین‌لرزه‌های ثبت شده...

- زمین‌لرزه ۱۹۶۳/۶/۳۰ تقدیم آباد: این زمین‌لرزه با بزرگی $4/9 \text{ mb}$ در ناحیه تقدیم آباد (۵ کیلومتری شمال غربی دورود) روی داد و در حدود ده دقیقه آسیب دیدند (بربریان، ۱۹۸۱).

مشاهده فراوانی و بزرگی متوسط به بالا وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی و سده بیستم در ناحیه دشت سیلانخور موئد توانمندی و جنبائی گسل‌های منطقه خصوصاً دشت سیلانخور است.

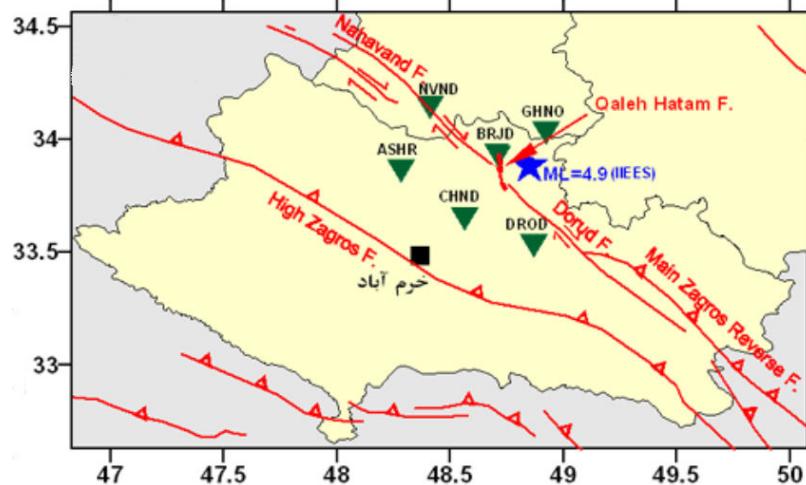
۲. تحلیل زمین‌لرزه‌های سال ۱۳۸۴ و سال ۱۳۸۳ استان لرستان

اگرچه آغاز فعالیت‌های لرزه‌ای استان لرستان را از نیمه دوم سال ۱۳۸۱ با وقوع دو زمین‌لرزه ۴/۶ ریشتری جنوب غرب دورود و ۴/۷ ریشتری جنوب شرق نهاوند به ترتیب در ۲۵ و ۲۷ اکتبر ۲۰۰۲ باید در نظر گرفت، اما این لرزه‌خیزی بیشتر در حاشیه جنوبی استان لرستان و استان‌های همجوار مشهود است. لذا در ادامه لرزه‌خیزی استان لرستان را در سال ۱۳۸۳ مطابق آنچه که در شبکه لرزه‌نگاری دائم باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ثبت و پردازش شده است بررسی می‌کنیم. شکل ۲-الف نقشه لرزه‌خیزی استان لرستان را نشان می‌دهد. بررسی شکل ۱-الف نشان می‌دهد که دو ناحیه پل دختر و جنوب خرم‌آباد در استان لرستان فعالیت بسیار زیادی خصوصاً در نیمه دوم سال ۱۳۸۳ از خود نشان داده‌اند. تعداد رویدادهای این دو خوش‌لرزه‌ای (Seismic Cluster) به بیش از ۴۰ رویداد می‌رسد. گویا در سال ۱۳۸۳ سایر نقاط استان لرستان از سکون لرزه‌ای چشم‌گیری برخوردار بوده است.



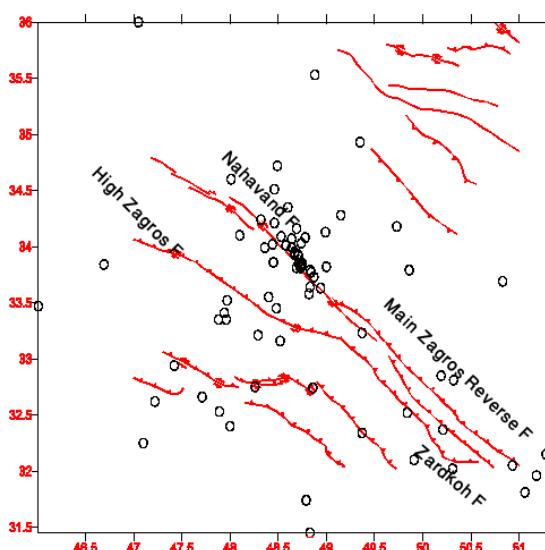
شکل ۱. لرزه‌خیزی استان لرستان؛ (الف) سال ۱۳۸۳، (ب) سال ۱۳۸۴

در روزهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت ۱۳۸۴، هشت زمین‌لرزه متوالی در دشت سیلاخور خصوصاً اطراف شهرستان بروجرد به وقوع پیوست که بزرگ‌ترین آن‌ها در ساعت ۱۱:۵۱ ظهر روز سه‌شنبه ۸۴/۲/۱۳ با بزرگی محلی $ML=4.9$ در مقیاس ریشتر محاسبه شده است. وقوع رویدادهای پی در پی در منطقه باعث ایجاد خرابی‌های مختصر و هراس مردم شد. در این راستا شبکه لرزه‌نگاری موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با توانمندی شش ایستگاه به ترتیب در شهرهای بروجرد، نهاوند، دورود، چلغوندی، الشتر و ناحیه توره به فاصله کوتاه چندین روز پس از زمین‌لرزه ۱۳۸۴/۲/۱۳ مطابق نقشه شکل ۲ نصب و راهاندازی شد. نوع تجهیزات لرزه‌نگاری مورد استفاده در شبکه موقت پژوهشگاه CMG-6TD سه مؤلفه‌ای با نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه بوده است و در مدت ۲۵ روز حدود ۸۰ پس‌لرزه و رویداد لرزه‌ای ثبت شده است.



شکل ۲. زمین‌لرزه ۱۳۸۴/۲/۱۳ بروجرد و نقشه شبکه لرزه‌نگاری موقت پژوهشگاه (اقتباس از سایت پژوهشگاه)

تعیین محل رویدادها بر اساس روش چند ایستگاهی صورت گرفته است. با این معیار که هر رویداد حداقل در چهار ایستگاه لرزه‌نگاری ثبت شده باشد و خطای محاسبات rms برای بازماندهای زمانی هر رویداد اگر کمتر از ۲۵٪ باشد در پژوهش لحاظ شده است. پردازش اطلاعات لرزه‌ای ثبت شده در شبکه موقت و ترسیم موقعیت مکانی آنها بر روی نقشه گسل‌های منطقه نشان می‌دهد که تعداد زیادی از رویدادهای ثبت شده پس از زمین‌لرزه ۱۳۸۴/۲/۱۳ در امتداد گسل نرمال قلعه حاتم رخ داده‌اند (شکل ۳). این نتیجه موید فعال شدن گسل قلعه حاتم در اثر زمین‌لرزه اصلی سیزدهم اردیبهشت ۱۳۸۴ علاوه بر قرارگرفتن توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها در ناحیه وقوع رویداد اصلی است. علاوه بر آن بررسی شکل ۱-ب نشان می‌دهد که در سال ۱۳۸۴ فعالیت لرزه‌ای استان لرستان برخلاف سال ۱۳۸۳ از غرب (ناحیه پل دختر) و مرکز استان (جنوب بروجرد) به شرق استان (ناحیه دشت سیلاخور، حدفاصل دورود - بروجرد) منتقل شده است.



شکل ۳. توزیع مکانی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۳۸۴/۲/۱۳ بروجرد و رویدادهای لرزه‌ای لرستان ثبت شده در شبکه موقعت لرزه‌نگاری پژوهشگاه از ۱۳۸۴/۲/۱۵ به مدت یک ماه

به منظور ارزیابی اولیه از عمق کانونی پس‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه موقعت لرزه‌نگاری، دو مقطع عمود برهم با راستاهای شرقی- غربی و شمالی- جنوبی انتخاب و بررسی شدند. بر اساس این بررسی مشخص گردید که بیش از ۵۰٪ پس‌لرزه‌ها دارای عمق کمتر از ۱۵ کیلومتر بوده‌اند. حدود ۲۰٪ آن‌ها که عمق بیش از ۲۰ کیلومتر را نشان می‌دهند ناشی از خطای محاسباتی برای تعیین محل رویدادهای است که خارج از محدوده شبکه لرزه‌نگاری رخ داده‌اند. عامل دوم مؤثر بر افزایش خطای در محاسبه عمق فاصله نسبتاً زیاد بین ایستگاه‌ها است. استنتاج اولیه از برآورد عمق تقریبی برای زون لرزه‌زا در این منطقه حدود ۱۴ کیلومتر و حتی کمتر از آن است.

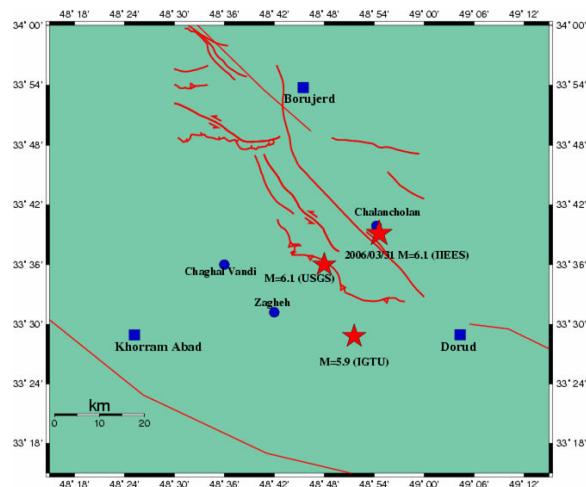
تحلیل زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه سیلانخور با بزرگی $ML=6.1$ و پس‌لرزه‌های آن

1. موقعیت مکانی، بزرگی و سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه سیلانخور: وقوع زمین‌لرزه ۴:۴۷ با مداد روز ۸۵/۱/۱۱ در جنوب بروجرد ۶۶ کشته و حدود ۱۲۸۰ نفر مجروح داشت و به سیصد و سی روستا در منطقه دشت سیلانخور (از توابع بروجرد

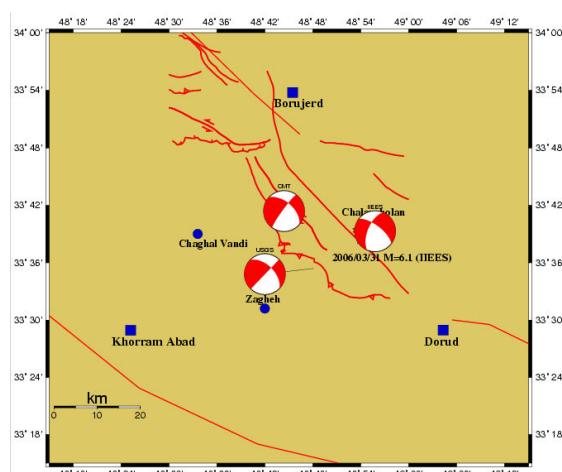
و دورود) آسیب رساند. همه روستاهای دشت سیلانخور حد فاصل دورود و بروجرد محل وقوع این زلزله، بین سی تا صد درصد تخریب شدند. وقوع این زمین‌لرزه در نزدیکی روستای گسل اصلی جوان زاگرس(قطعه گسلی دورود) بیان‌گر فعالیت مجدد این قطعه گسلی است. با توجه به مشاهده بیشترین تلفات انسانی و خرابی‌های بیش از ۸۰٪ در سازه‌های مهندسی در روستای درب آستانه واقع در سه کیلومتری شمال غرب بخش چالان چولان دشت سیلانخور، این زمین‌لرزه به نام همان روستا مشهور شده است. بزرگی زمین‌لرزه یازدهم فروردین ماه ۱۳۸۵ درب آستانه سیلانخور بر اساس لرزه نگاشتهای ثبت شده در چهارده ایستگاه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله $ML=6/1$ در مقیاس محلی ریشرتر محاسبه شد. علاوه بر آن موقعیت مکانی آن در $33/65$ درجه عرض شمالی و $48/91$ درجه طول شرقی و عمق 14 کیلومتری تعیین شد. مقایسه گزارش‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES)، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IGTU) و سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) برای تعیین محل زمین‌لرزه و بزرگی آن در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به فاصله کمتر از 200 کیلومتری سه ایستگاه شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه به موقعیت زمین‌لرزه، پوشش نسبتاً مناسب با ایستگاه‌ها در اطراف منطقه آسیب دیده و مقایسه میزان آسیب و خسارات ناشی از زمین‌لرزه در حد فاصل بخش چالان‌چولان و شهر بروجرد، منطقی ترین موقعیت اعلان شده، محاسبه براساس لرزه‌نگاشتهای ثبت شده در ایستگاه‌های شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه است. گزارش سازمان زمین‌شناسی آمریکا و دانشگاه هاروارد نیز با توجه به فاصله بیش از پانصد کیلومتری ایستگاه‌های آن‌ها مستقر در کویت و برخی کشورهای همسایه ایران با خطای چشم‌گیر 40 کیلومتر انحراف به غرب از کانون مهلرزه‌ای همراست.

در این پژوهش سازوکار کانونی بزرگ‌ترین پیش‌لرزه و پس‌لرزه همراست این زمین‌لرزه بر اساس روش قطبش اولین جنبش موج تراکمی (P) لرزه نگاشتهای ثبت شده در چهارده ایستگا لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بر اساس

به صورت امتداد لغز راست‌گرد با مؤلفه کوچک فشاری یا کششی با شیب به سوی شمال شرق محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴. بزرگی و موقعیت مکانی آستانه زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۱ درب آستانه سیلاخور



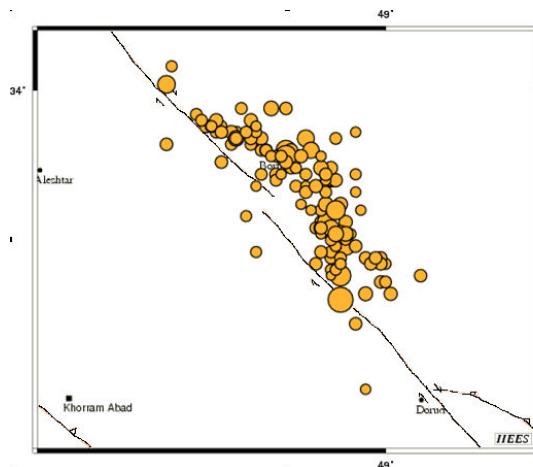
شکل ۵. سازوکار کانونی بزرگ‌ترین پیش‌لرزه و پس‌لرزه همراه با زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۱ درب آستانه سیلاخور

مقادیر محاسبه شده پارامترهای امتداد، شبیب و ریک گسله مسبب پیش‌لرزه، زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه ارائه شده است. علاوه بر آن نتایج با محاسبات سازمان زمین‌شناسی آمریکا و دانشگاه هاروارد (بر اساس روش مدل‌سازی شکل موج دورلرز) مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که ساز و کار کانونی محاسبه شده در جدول ۱ با هم تطابق نسبتاً خوبی دارند. با توجه به خطای چشم‌گیر در تعیین مختصات کانونی توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا و دانشگاه هاروارد، تحلیل ساز و کار کانونی و انتساب آن به قطعه گسلی دورود با مشکل جدی همراه است. همان‌طوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود موقعیت زمین‌لرزه اصلی در مجاورت گسله اصلی زاگرس گزارش شده است که فاصله‌ای چشم‌گیر با قطعه گسلی دورود دارد. بنا بر این ساز و کار کانونی امتداد لغز راست‌گرد محاسبه شده برای زمین‌لرزه فوق بر اساس موقعیت مکانی روستای درب آستانه سیالاخور که قطعه گسلی دورود از ضلع شرقی آن می‌گذرد کاملاً توجیه‌پذیر است.

۲. بررسی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه سیالاخور

ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه به گونه‌ای است که پیش از زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۰۱/۱۱ درب آستانه سیالاخور، چندین پیش‌لرزه رخ داده است که دو پیش‌لرزه با بزرگای بیش از $M>4$ ثبت شده است. نخستین پس‌لرزه قابل توجه چهارده دقیقه پس از وقوع رویداد اصلی در ساعت ۰۵:۰۱ بامداد روز ۸۵/۱/۱۱ با بزرگی محلی $ML=4.9$ در مقیاس ریشتر به وقوع پیوست. علاوه بر آن بیش از ۴۰۰ پس‌لرزه در شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهنه پژوهشگاه ثبت شده است که بزرگ‌ترین آن‌ها با بزرگی $ML=5.3$ در ساعت ۱۵:۲۶ عصر روز ۱۳۸۵/۱/۱۱ در جنوب شرقی بروجرد رخ داده است. توزیع مکانی 13° پس‌لرزه که در شعاع 30 کیلومتری شهر بروجرد تعیین محل شده‌اند در شکل ۶ نشان داده شده است. این رویدادهای لرزه‌ای به مدت دو ماه (۱۱/۱/۸۵-۱۱/۳/۸۵) در گستره دشت سیالاخور از شمال دورود تا شمال‌غرب بروجرد به وقوع پیوسته است. بررسی توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که همه پس‌لرزه‌ها (به استثنای دو مورد) در ناحیه شمال کانون زمین‌لرزه اصلی به وقوع پیوسته‌اند. رویداد پس‌لرزه‌ها بیان‌گر فعل بودن ناحیه بروجرد و جنوب شرق آن است. انحراف مشهود توزیع

پس‌لرزه‌ها به سوی شرق قطعه گسلی دورود می‌تواند دلیلی بر شیب‌دار بودن صفحه گسل باشد. این نتایج با نوع ساز و کار کانونی محاسبه شده شکل ۵ هم‌خوانی دارد. بررسی عمق پس‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که اکثر آن‌ها در عمق ۱۴ کیلومتری واقع شده‌اند. بنا بر این با توجه به شیب متوسط ۵۵ درجه (شکل ۵) و عمق متوسط ۱۴ کیلومتر، میزان انحراف پس‌لرزه‌ها از امتداد قطعه گسلی دورود به سوی شرق تا حدود ۱۰ کیلومتر کاملاً توجیه‌پذیر است.



شکل ۶. توزیع مکانی پس‌لرزه‌های
دوماهه زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۱ درب
آستانه سیلاخور

تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های دشت سیلاخور و ناحیه‌های هم‌جوار

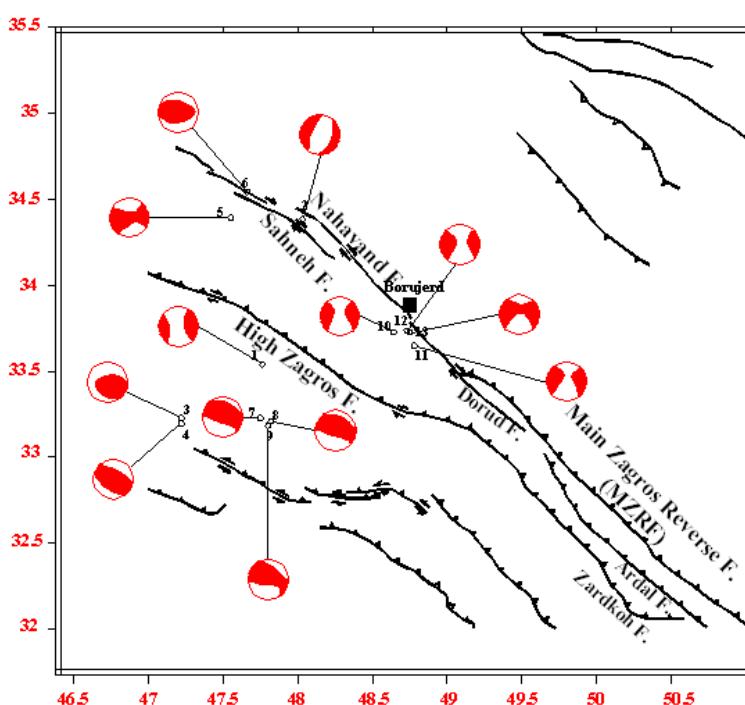
در این پژوهش ابتدا سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ای ۲۰ سال اخیر (بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۶) از کاتالوگ دانشگاه هاروارد استخراج و در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. بررسی شکل ۷ نشان می‌دهد که اکثر ساز و کارهای کانونی محاسبه شده ارتباط نزدیکی با گسل‌های موجود در منطقه دارند و از نوع امتداد‌لغز راست‌گرد با مؤلفه کوچک فشارشی یا کششی هستند (جدول ۲). شماره‌های حاشیه ساز و کارها در شکل ۷ مرتبط با آن زمین‌لرزه در جدول ۲ است.

جدول ۱. محاسبه سازوکارهای کانونی محاسبه شده در این پژوهش و مقایسه آن با سایر گزارش‌ها

	Year	Month	Day	Hour	Minute	Second	Error	Latitude	Longitude	Error	Depth	Error	NST	NPH	Gap	Dmin	RMS	ML	Fault Characteristic
													STRIK	DIP	RAKE				
IEES	2006	3	30	19	36	18	2.02	33.692	5.7	48.909	6.4	15	10.2	8	10	134	140.1	0.7	5.1
IEES	2006	3	31	1	17	2.3	1.71	33.652	9.1	48.912	6.4	14.1	13.3	7	10	210	143	0.5	6
IEES	2006	3	31	11	54	2.6	1.4	33.891	5.2	48.795	4.9	17.3	15.8	5	7	136	134.8	0.5	5.2
CMT	2006	3	31	1	17	10.8		33.69		48.78		12				230	30		-180
USGS	2006	3	31	1	17	1		33.59	5.4	48.8	5.4	10		95	95	54	365	1	6.1
																314	54	180	

جدول ۲. مشخصات زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر دشت سیلاخور و نواحی اطراف آن

No.	Date	Lat.	Long.	Depth	M _w	Strike1	Dip1	Slip1	Strike2	Dip2	Slip2
1	1987/5/29	33.54	47.76	15	5.3	218	80	2	128	88	170
2	1998/8/21	34.38	48.03	22	4.9	25	39	-84	197	51	-95
3	1998/10/04	33.23	47.22	15	5.3	126	31	121	270	64	73
4	1998/10/05	33.20	47.22	38	5.4	131	41	103	294	50	79
5	2002/04/24	34.39	47.55	33	5.4	36	74	16	302	75	163
6	2002/12/24	34.54	47.66	27	5.2	284	45	105	82	47	75
7	2004/11/21	33.23	47.75	12	5.2	310	26	112	106	66	80
8	2004/11/22	33.21	47.82	12	5.0	308	29	111	105	63	79
9	2004/11/27	33.18	47.80	20	4.9	330	38	145	89	69	57
10	2005/05/03	33.73	48.64	22	4.9	220	71	-17	316	74	-161
11	2006/03/30	33.65	48.78	20	5.1	321	70	-167	226	77	-20
12	2006/03/31	33.74	48.73	17	6.1	313	78	-174	222	84	-12
13	2006/03/31	33.73	48.75	26	5.1	319	67	-168	224	79	-24



شکل ۷. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های مهم دشت سیلاخور و نواحی هم‌جوار بر اساس نتایج دانشگاه هاروارد

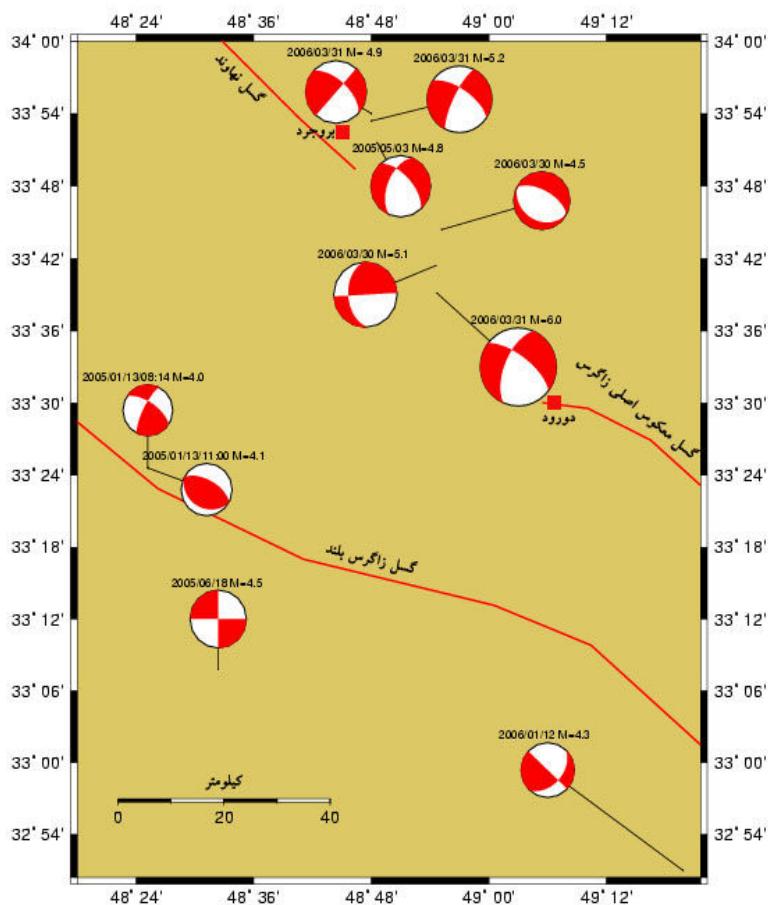
بررسی جدول) نشان می‌دهد که زمین‌لرزه ۲۱ آوت ۱۹۹۸ با بزرگی $Ms=5$ در زون گسلی نهادوند نشان‌دهنده گسلش نرمال است که در یک زون بر Shi امتدادلغز راست‌گرد چنین ساز و کاری توجیه‌پذیر است. زمین‌لرزه ۲۴ آوریل ۲۰۰۲ با بزرگی $Ms=5.2$ ساز و کار غالباً امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه فشارشی را نشان می‌دهد و زمین‌لرزه ۲۴ دسامبر ۲۰۰۲ با بزرگی $Ms=4.4$ دارای ساز و کار فشارشی است. با توجه به این‌که هر دو زمین‌لرزه فوق متأثر از جنبش گسل صحنه‌اند و از طرفی وجود ساز و کار با مؤلفه فشارشی در کنار گسلش غالب امتدادلغز را تأیید می‌کنند پدیده افزار در این قسمت مشهود است.

سازوکار زمین‌لرزه سوم مه ۲۰۰۵ (۱۳۸۵/۲/۱۳) از نوع کششی است. با توجه موقعیت این رویداد در مجاورت گسل نرمال قلعه حاتم، ساختار کششی محاسبه شده مورد تأیید است. زمین‌لرزه‌های ۳۰ و ۳۱ مارس ۲۰۰۶، نیز دارای ساز و کار کانونی امتدادلغز راست‌گرد با اندکی

مؤلفه کشش هستند. بنا بر این می‌توان مدعی شد که هر سه رویداد در اثر فعالیت مجدد قطعه گسلی امتدادلغز دورود به وقوع پیوسته‌اند.

در بخش دوم این پژوهش زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴ منطقه که طی سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ در شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهنه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ثبت شده‌اند، استخراج و بررسی شدند. بر اساس روش قطبش اولین جنبش نیرومند زمین (اسنوکه، ۱۹۹۲) و به کمک نرم‌افزار Focmec پارامترهای ساز و کار کانونی آن‌ها مطابق شکل ۸ به دست آمد. علاوه بر آن، دو پیش‌لرزه و دو پس‌لرزه زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۱ نیز تعیین محل شده‌اند.

- با توجه به شکل ۸ دو زمین‌لرزه در روز سیزدهم ژانویه ۲۰۰۵ با اختلاف تقریباً سه ساعت و به ترتیب در ساعت ۱۴:۰۸ با بزرگی ۴ و در ساعت ۱۱:۰۰ با بزرگی ۴/۱ در منطقه غرب سیلانخور به وقوع پیوسته است که دارای ساز و کار امتدادلغز با مؤلفه فشارشی و ساز و کار فشارشی خالص هستند. ساز و کار فشارشی آن‌ها با توجه به گسل زاگرس بلند که گسلی معکوس است و مؤلفه امتدادلغز آن با توجه به پدیده افزار توجیه‌پذیر است. شایان ذکر است با توجه به تعداد محدود ایستگاه‌های لرزه‌نگاری موجود در زمان وقوع رویداد و کوچک بودن آن، احتمال بزرگ بودن خطای تعیین محل وجود دارد. بنا بر این نسبت دادن زمین‌لرزه با ساز و کار فشارشی خالص به گسل زاگرس بلند منطقی به نظر نمی‌رسد.
- زمین‌لرزه سوم می (۱۳۸۴/۲/۱۳) نیز که دارای ساز و کار نرمال با مؤلفه امتدادلغز است با ساختار گسل قلعه حاتم که یک گسل نرمال است مطابقت دارد. این ساز و کار با ساز و کار به دست آمده از CMT هم خوانی می‌کند.



شکل ۸ نقشه موقعیت زمین‌لرزه‌های مهم ثبت شده در شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهنه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و ساز و کار کانونی آن‌ها براساس روش قطبیش اولین جنبش موج طولی

- مکانیسم زمین‌لرزه ۱۴ ژانویه ۲۰۰۶ که امتدادلوز خالص است در جهت امتداد گسل زاگرس بلند استو با توجه به این‌که گسل مذکور یک گسل معکوس است می‌توان وقوع افزار را دلیلی برای این ساز و کار دانست.
- دو زمین‌لرزه مارس ۲۰۰۶ که با بزرگی $ML=4.5$ و $ML=5.1$ اتفاق افتاده است به ترتیب دارای ساز و کار نرمال و ساز و کار امتدادلوز چپ گردند که این موضوع ظاهراً با

تکتونیک منطقه هم‌خوانی ندارند. ولی زمین‌لرزه‌های ۳۱ مارس ۲۰۰۶ دارای ساز و کار امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه کوچک کششی هستند که با ساختار منطقه که دارای ساز و کار امتدادلغز است قابل توجیه است.

بنابراین ساز و کار کانونی امتدادلغز برخی از زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بردار لغزش بر روی گسل‌های امتدادلغز به موازات گسل و امتداد ساختارهای ناحیه‌ای است، و در آن بخش از گسل، گسلش امتدادلغز راست‌گرد رخ می‌دهد. ساز و کار فشارشی برخی از زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بردار لغزش عمود بر روند گسل و ساختارهای منطقه است و با توجه به ساز و کار غالب امتدادلغز که در پژوهش‌های صحرایی و در ساز و کارهای کانونی تعیین شده مشخص است، در این قسمت از گسل کوتاه شدگی و مؤلفه‌های امتدادلغز ناشی از هم‌گرایی مایل از یک‌دیگر افزایش شده‌اند. وجود ساز و کار کششی در برخی مناطق نیز نشان می‌دهد که آن قسمت از گسل با هندسه حوضه‌های کششی در یک زون برشی امتدادلغز راست‌گرد تطابق دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

هم‌گرایی مایل دو بلوك باعث ایجاد گسلش معکوس عمود بر روند ساختاری و نیز گسلش امتدادلغز به موازات ساختارهای منطقه می‌شود. در مرزهای هم‌گرایی صفحات وقتی سنگ کره اقیانوسی کاملاً در گوشته زمین فروزانده می‌شود، دو قاره با هم برخورد می‌کنند و با برخورد آن‌ها از طریق روراندگی رشته کوه‌هایی به وجود می‌آید. (مکنزی و مورگان، ۱۹۶۹). در مراحل تکامل زون‌های برخوردهای قاره-قاره علاوه بر دگرگشکلی‌هایی نظیر راندگی، کوتاه شدگی به مرحله‌ای از تحول تکتونیکی می‌رسد که فرار جانبی صورت می‌گیرد. به عنوان نمونه هنگام هم‌گرایی صفحه عربستان و اوراسیا در محل اتصال گسل‌های شرق و شمال آناتولی در مجاورت مرز ایران و ترکیه برخورد دو قاره یک زوج گسل به طور همزمان ایجاد شده است. در اثر این گسل سرزمین ترکیه به سمت غرب رانده می‌شود و در مقابل در شمال غرب ایران شواهدی مبنی بر رانده شدن این بخش ایران به سمت شرق مشاهده می‌شود.

از طرف دیگر با توجه به این که اگر بلوک‌های دارای مرز گسل در پاسخ به نیروهای ناشی از جریان‌های پیوسته سیال در گوشته که بر پوسته بالایی اعمال می‌شود حرکت کنند گسل‌هایی که به صورت مایل در زون تغییر شکل قرار دارند قادر به ایجاد دگرشکلی که در منطقه اعمال می‌شود نیستند. (زیرا فرض بر اینست که بلوک‌ها در زمان حرکت حول محور قائم می‌چرخند) در این حالت ساده‌ترین راه برای این که گسل‌ها قادر به ایجاد دگرشکلی در منطقه باشند این است که حرکت آن‌ها به کوتاه شدن م Hispan و امتدادلغز م Hispan افزار شود (جکسون و مکنزی، ۱۹۸۳؛ جکسون، ۱۹۹۲؛ پریستلی و همکاران، ۱۹۹۴). به طور کلی در یک زون گسلی امتدادلغز که ناهمگنی‌های زمین و خمیدگی‌های ساختاری چپگرد^۱ و راستگرد^۲ وجود داشته باشد، ساختارهای دیگری مانند کشش و فشارش نیز به صورت فرع بر ساختار امتدادلغز می‌تواند ایجاد شود. یعنی مؤلفه غالب امتدادلغز است که کشش یا فشارش هم در آن‌ها ایجاد می‌شود. محیط‌های امتدادلغز کششی که ساختار گل لاله‌ای دارند^۳ و محیط‌های امتدادلغز فشارشی که ساختار نخلی^۴ شکل دارند (دیویس و رینولدز، ۱۹۹۶) نمونه‌هایی از این ساختارها است. ساختارهای نخلی شکل را در گسل صحنه که یکی از قطعات گسل اصلی عهد حاضر زاگرس است می‌توان مشاهده کرد.

به طور کلی دشت سیلانخور پهنه‌ای است با پیشینه لرزه‌خیزی فعال و شاهد زمین لغزش‌های عظیم و زمین‌لرزه‌های تاریخی مخرب که بین دو زون ساختمانی متفاوت (الف) زاگرس مرتفع، ب) زون سنتنج-سیرجان قرار گرفته است. بنا بر این ناحیه مورد نظر دارای توان بالای لرزه‌خیزی است.

- با توجه به ضخامت رسوبات کواترنر و دانه‌بندی آن‌ها، امکان رویداد پدیده روان‌گرایی وجود خواهد داشت که این امر بر میزان خسارات واردۀ خواهد افزود.

¹ -Left bending

² - Right bending

³ -Tulip structure

⁴ -Palm-tree structure

- در مقایسه با کاتالوگ زلزله‌های ثبت شده در باند پهن پژوهشگاه زلزله‌شناسی، مشخص شد که تعداد زیادی از رویدادهای ثبت شده در شبکه موقت پژوهشکده زلزله‌شناسی پژوهشگاه با بزرگی کمتر از $2/5$ در مدت زمان بررسی شده در کاتالوگ‌های فوق وجود ندارد. این امر نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های کوچک در شبکه کشوری و جهانی ثبت نشده‌اند. بنا بر این ضرورت نصب شبکه محلی برای ثبت پس‌لرزه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است.
- ساز و کار کانونی امتدادلغز برخی از زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بردار لغزش بر روی گسل‌های امتدادلغز به موازات گسل و امتداد ساختارهای ناحیه‌ای است، بنا بر این می‌توان گفت در آن قطعه، گسل‌ش امتدادلغز راست‌گرد رخ می‌دهد.
- ساز و کار فشارشی برخی از زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بردار لغزش عمود بر روند گسل و ساختارهای منطقه است. بنا بر این، با توجه به ساز و کار غالب امتدادلغز که در بررسی‌های صحراوی و در ساز و کارهای کانونی تعیین شده مشخص است، می‌توان پیشنهاد کرد که در این قسمت از گسل کوتاه شدگی و مؤلفه‌های امتدادلغز ناشی از هم‌گرایی مایل از یکدیگر افزایش شده‌اند.
- وجود ساز و کار کششی در برخی مناطق نشان می‌دهد که آن قسمت از گسل با هندسه حوضه‌های کششی در یک زون برشی امتدادلغز راست‌گرد تطابق دارد.

منابع

1. آفتابی، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، خرداد (۱۳۸۳).
2. Berberian, M., Active Faulting and Tectonics of Iran. In: Gupta, H. K. and Delany, F. M., (eds.) Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution. Am. Geophys. Union, and Geol. Soc. Am. Geodynamics Series (1981) 33-69.

- 3.Berberian M., Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran, V.I: Historical hazards in Iran prior to 1908, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) (1994) 603.
- 4.Mckenzie, D. P. and Morgan, J.W. Evolution of Triple Junctions. *Nature*, 224, (1969) 125-133.
- 5.Mckenzie, D. P. and Jackson, J. A. The relationship between strain rates, crustal thickening, Paleomagnetism, finite strain and fault movements within a deforming zone, *Earth planet. Sci. Lett.*, 65 (1983) 182-202.
- 6.Jackson, J. A, Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia & Arabia in eastern Turkey & the Caucasus. *J. Geophys. Res.*, 97, (1992) 12471-12479.
- 7.Priestley, K., Baker, C. and Jackson, J. Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the South Caspian Basin and surrounding regions. *Geophysics Journal International* 118 (1994) 111-141.
- 8.Davis, G. H. and Reynolds, S, structural geology of rocks & regions, John Wiley & sons Inc., New York, (1996) 776pp.