

تحلیل مکانی - زمانی اثر متقابل فعالیت گسل های لرزه زا بر یکدیگر در بخش میانی ناحیه

زاگرس

عذرا حسن لو

دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه دامغان

سید ناصر هاشمی

استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۷

Hashemi@du.ac.ir

چکیده

ناحیه مورد مطالعه در این تحقیق، بخش میانی پهنه زمین ساختی زاگرس می باشد که یکی از پویاترین پهنه های لرزه زمین ساختی ایران است. گسل های سیستم گسلی کازرون (گسل های کازرون، برازجان و دنا)، واقع در این ناحیه، دارای مکانیسم حرکتی امتدادلغز از نوع راستالغز راستگرد بوده و به صورت راست پله نسبت به هم قرار دارند. برای بیان تأثیر متقابل فعالیت لرزه ای این گروه از گسل ها با استفاده از داده های لرزه ای دقیق به تحلیل زمانی - مکانی لرزه خیزی ناحیه پرداخته شد. تحلیل زمانی - مکانی لرزه خیزی و بررسی روند مهاجرت لرزه ای در محدوده مطالعاتی، نشانگر وجود تأثیر متقابل در فعالیت لرزه ای بین گسل های کازرون و برازجان از سیستم گسلی کازرون و همچنین بین سیستم گسلی کازرون و کره بس می باشد. در این تحقیق کوشش شده است بر اساس هندسه و مکانیسم گسل های مورد مطالعه، اثر متقابل لرزه ای آنها تحلیل و تفسیر گردد.

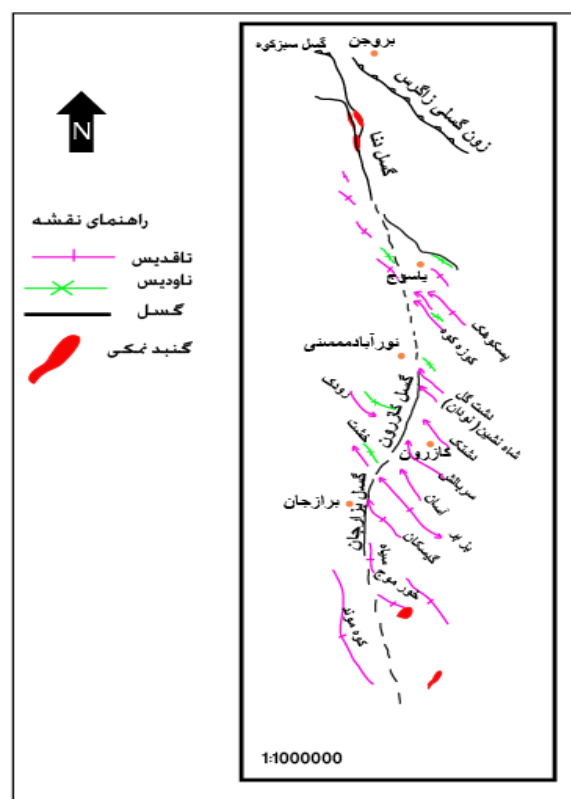
کلمات کلیدی: تحلیل مکانی-زمانی، تأثیر متقابل گسل ها، لرزه خیزی، لرزه زمین ساخت ناحیه، زاگرس

مقدمه

سروستان با همان راستا و مکانیسم حرکتی مطرح است. به لحاظ لرزه خیزی، زاگرس به عنوان یک پهنه لرزه خیز با زمین لرزه های فراوان و کم عمق مشهور است. فعالیت گسل ها در این محدوده به صورت تغییر در روند ساختارهای زمین ساختی (شکل ۱) همچون چین ها و شواهدی مانند ظهور چشمه های آب گرم و رخداد زمین لرزه ها اثبات گردیده است. با توجه به اینکه زمین لرزه شاهدهی قابل ثبت و تقریباً مطمئن از حرکات یک گسل است، می توان حرکت یک گسل را توسط لرزه خیزی آن پیگیری نمود. در هر سیستم گسلی امکان مهاجرت حرکت، همراه با لرزه زایی گسل و یا آزاد شدن انرژی ذخیره شده در یک نظم خاص، با توجه به وضعیت رژیم تنش ناحیه ای حاکم بر سیستم وجود دارد که چنین الگویی تابعی از موقعیت هندسی گسل های ناحیه و ویژگی های رئولوژیکی آن ناحیه می باشد.

نوار چین خورده - رانده زاگرس بخشی از کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا و یکی از جوان ترین و فعال ترین پهنه های برخورد قاره ای در روی زمین است که با طولی حدود ۱۵۰۰ کیلومتر از کوه های تاروس در شمال شرق ترکیه تا گسل میناب در شمال شرق جزیره هرمز در جنوب ایران امتداد دارد. بنا به نظر (Alavi, 1994) و (Berberian, 1995)، شکل گیری این ناحیه با جنبش همگرای مداوم صفحه عربی در جنوب غرب و خرده قاره ایران مرکزی در شمال شرق که خود حاصل حرکت به سوی شمال شرق صفحه افریقا - عربی نسبت به اوراسیا است، مرتبط می باشد. سیستم گسلی کازرون به عنوان یک سیستم امتدادلغز در بخش میانی زون زاگرس و در لبه صفحه عربی و به عنوان گسلی امتدادلغز در کنار گسل هایی همچون کره بس، سبزپوشان و

خاورمیانه شامل صفحه عربی، صفحه ایران و صفحه اوراسیا، عامل اصلی وقوع زمین لرزه های خاورمیانه می باشد. بنابراین غرب پاکستان، تمامی ایران، قفقاز، کپه داغ و کل ترکیه به دلیل داشتن مرزهای طولانی با صفحات عنوان شده (یا واقع شدن در این مرزها) لرزه خیزی بالایی دارند. مطالعه دقیق تر لرزه خیزی این ناحیه وجود صفحات کوچک تری در داخل این ناحیه وسیع را تأیید می کند. این صفحات با نرخ های مختلفی از سرعت و جهت نسبت به یکدیگر حرکت می کنند. جهت گیری شمال غرب - جنوب شرق کمربند چین خورده - رانده زاگرس از برخورد نئوژن صفحات عربی و اوراسیا حاصل شده است. مرز شمال شرق کمربند منطبق بر گسل معکوس اصلی زاگرس (MZRF) می باشد که نشانگر حد کنونی کمربند چین خورده - رانده زاگرس است. داده های GPS نشان می دهد که میزان همگرایی صفحات عربی و اوراسیا برابر با ۲۱ میلی متر در سال (شکل ۲ الف)) و راستای تقریبی $N 50^{\circ} E$ دارد (Authemayou, 2005) که این راستا میانگین راستای کلی حرکت صفحه عربی به سمت ایران می باشد که برای مجموع ۱۵۰۰ کیلومتر طول زاگرس توسط (Authemayou, 2005) در نظر گرفته می شود. این در حالی است که بر اساس بررسی محققین که بر اساس داده های GPS در ایستگاه های دو سوی گسل کازرون ارائه گردیده است، این راستا بین $N 20^{\circ} E$ تا $N 30^{\circ} E$ تعیین شده است. سیستم گسلی کازرون در بخش میانی زون زاگرس و در لبه صفحه عربی، به عنوان گسلی امتدادلغز در زون زاگرس مطرح می باشد که شامل سه زون گسلی در راستای شمالی - جنوبی با طول های تقریباً برابر (حدود ۱۰۰ کیلومتر طول) بوده و از سه گسل کازرون، برازجان و دنا تشکیل شده است. این زون های گسلی دارای هندسه های مشابه با راستای $N 170^{\circ} - 180^{\circ} E$ و پایانه جنوبی خمیده شده به سمت جنوب شرق می باشند (Authemayou, 2005). در کنار این سیستم گسلی، گسل های هم راستا و هم مکانیسم با این سیستم گسلی همچون کره بس و سبزپوشان حضور دارند (شکل ۲ ب)). گسل کره بس یک سامانه گسلی عرضی با راستای شمالی - جنوبی و یک گسل پی سنگی با مکانیسم راستالغز راستگرد می باشد که در زاگرس چین خورده قرار دارد و تاقدیس های زیادی را جایجا نموده است (Berberian et al., 1976). گسل کره بس با وجود اینکه سازوکار اصلی از نوع راستالغز دارد؛ سازوکار حرکتی آن به گونه ای است که دو مولفه حرکت امتدادلغز و راندگی با یکدیگر ارتباط نزدیکی را دارا می باشند (عندلیبی و اویسی، ۱۳۸۰). پهنه گسله سبزپوشان با پهنای $12/5 - 11$ کیلومتر و طول ۲۰۰ کیلومتر از شمال غرب شیراز تا جنوب شرق قیر با امتداد تقریبی $N 145^{\circ} E$ کشیده شده است و شامل یک زون از گسل هاست که ساختارهای کمربند زاگرس را دگرریخته نموده است. این زون یک زون دگرشکلی عرضی با روند شمال شمال غرب - جنوب جنوب شرق و یک گسلس راستالغز راستگرد می باشد که در شرق گسل کره بس و در غرب گسل سروسنان مشاهده می گردد (Yassaghi, 2006).



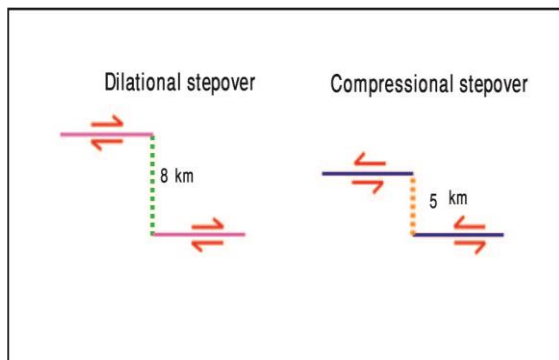
شکل ۱. تأثیر گسل های سیستم گسلی کازرون بر ساختارهای موجود در محدوده مطالعاتی

در مورد سیستم های گسلی امتداد لغز، چنین الگویی بیش تر مرتبط با طول گسل ها و آرایش هندسی گسل ها در کنار یکدیگر می باشد. بررسی زمانی - مکانی زمین لرزه های هر گسل امتدادلغز و مهاجرت آنها از یک گسل امتدادلغز به گسل مجاور آن، نمایشی از تأثیر متقابل دو گسل امتدادلغز بر یکدیگر می باشد. در این مقاله به بررسی الگوی زمانی - مکانی رخداد زمین لرزه ها به منظور تبیین تأثیر متقابل گسل های امتدادلغز در ناحیه زاگرس پرداخته می شود. درباره این موضوع مطالعه کمی صورت گرفته که از آن جمله می توان به تحقیقات غلامی و همکاران (۱۳۸۶) که بر روی شواهد ساختاری از تأثیر گسل ها در توسعه دگرریختی ها در پهنه سیستان و بررسی دیگر با کمک داده های مورفوتکتونیک بر روی گسل های تراستی مشا - فشم و گسل شمال تهران (Landgraf et al., 2009) اشاره نمود. از سوی دیگر بررسی هایی توسط محققین دیگر در ارتباط با تأثیر گسل ها بر یکدیگر در سیستم های گسلی فعال دنیا صورت گرفته است (Hariss et al., 1993, Bektas et al., 2007, Zhang et al., 2003, Pollitz et al., 2000, Scholz et al., 2000, Oglesby, 2005).

جایگاه زمین ساختی ناحیه مورد مطالعه

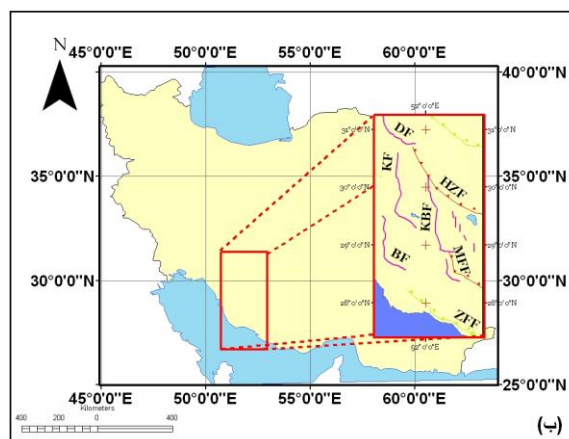
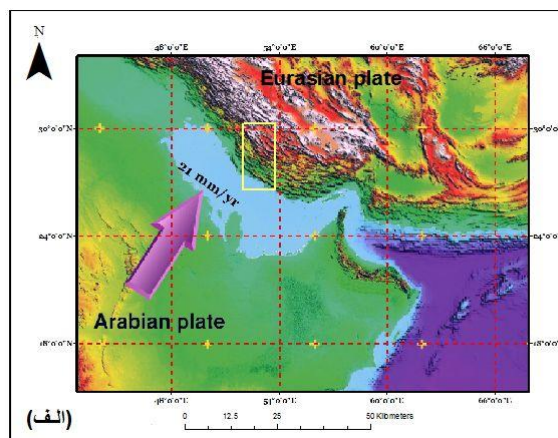
فعالیت های لرزه ای عمدتاً در مرز بین صفحات زمین ساختی یا در مجاورت این صفحات رخ می دهند. حرکت نسبی صفحات اصلی ناحیه

راستگرد یا راست پله چپ گرد) باعث افزایش استرس میانگین و افزایش استرس نرمال می شوند که این تغییرات استرس در پله های فشارشی باید به عنوان مانعی در گسترش و عاملی برای توقف زمین لرزه ها عمل کنند. پرش یا مهاجرت لرزه ای تنها در پله های فشارشی با عرض کمتر از ۵ کیلومتر و در پله های کششی با عرض کمتر از ۸ کیلومتر روی خواهند داد (شکل ۳). آنالیز نیمه استاتیک انجام شده در این مورد نشان می دهد که پرش در پله کششی خیلی راحت تر از پله فشارشی است. این تأثیر ناشی از وابستگی اصطکاک به استرس نرمال است (Hariss et al., 1993).



شکل ۳. ارتباط بین گسل های امتدادلغز و تشکیل پله های کششی و فشارشی

در گسل های با الگوی پلکانی، یک فاکتور مهم، جهت پله به نسبت حالت لغزش در روی گسل امتداد لغز است: گسل های راستگرد با پله راست و گسل های چپ گرد با پله چپ ایجاد کشش در منطقه پله می کند. در حالی که گسل های چپ گرد با پله راست و گسل های راستگرد با پله چپ ایجاد مناطق فشارشی را در پله می کنند (Aydin et al., 1990). در همین ارتباط همپوشانی بیش تر دو گسل نشانگر گسترش شکستگی در سر تاسر پله است. همچنین اندازه افت استرس تا حدی در تعیین فاصله پله ای که می تواند شکستگی در گسل جهش یابد، موثر است. هنگامی که دو گسل با راستای یکسان در منطقه ای بررسی می شود، پایانه های در حال رشد گسل ها در حقیقت مناطقی هستند که بیش از حد در افت استرس در هنگام جابجایی به همراه دگرشکلی نقش دارند. برای هر گسل ترازهایی از افت استرس را در اطراف آن گسل می توان تصور نمود و اثر متقابل بین گسل ها در صورتی قابل قبول است که انتهای گسل اول در داخل تراز های افت استرس گسل دوم قرار گیرد که این موضوع خود مستلزم هم پوشانی بین دو گسل به اندازه لازم برای تأثیر دو گسل و تعیین جهت گسترش شکستگی می باشد (Scholz et al., 2000). پارامتر تأثیر گذار دیگر در این رابطه، وجود گسل های متصل کننده در بین دو گسل امتدادلغز می باشد. در صورتی که دو گسل امتداد لغز توسط گسل متصل کننده بر هم اثر بگذارند عرض پله بین دو گسل بی اهمیت خواهد شد؛ چرا که گسل متصل کننده دارای افت استرس استاتیک غیر صفر است و می تواند گسترش شکستگی را در فاصله بیش تری حمایت کند (Oglesby, 2000). از دیگر مواردی که می تواند رئولوژی سنگ ها مرتبط را تغییر دهد، وجود فشار منفذی در سنگ های محدوده گسل هاست. بر این اساس فشار منفذی در شکستگی های کششی تا زمان رسیدن به تعادل دوباره در طول



شکل ۲. (الف) جایگاه زمین ساختی ناحیه مورد مطالعه در ارتباط با حرکت صفحات زمین ساختی ناحیه (اقتباس و اصلاح بر اساس داده های Authemayou, 2005) و (ب): موقعیت ناحیه مورد مطالعه در گستره ایران به همراه موقعیت گسل های مورد مطالعه و علائم اختصاری آنها

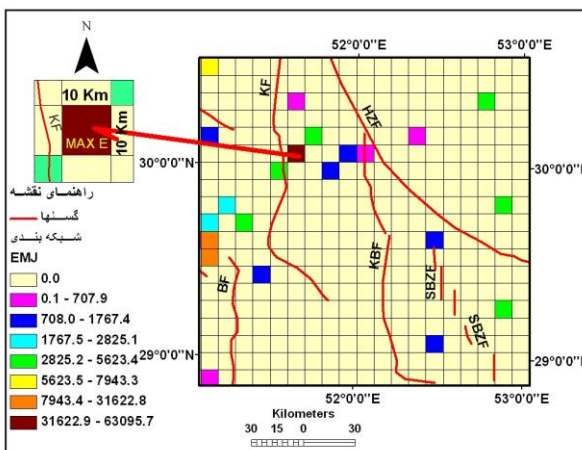
تأثیر متقابل فعالیت لرزه خیزی گسل ها

اثر متقابل فعالیت لرزه ای گسل ها، ارتباط میان آنها را بازگو می کند. زمین لرزه باعث افزایش یا کاهش استرس در گسل های مجاور شده و بنابراین باعث تسریع و یا تأخیر در رها شدن انرژی لرزه ای ذخیره شده در آنها به صورت زمین لرزه می شود. در بررسی های مربوط به زمین شناسی و در ارتباط با گسل ها و بویژه در بررسی ها و تحلیل های هندسی مربوط به گسل ها پارامترهای مختلفی مد نظر قرار می گیرد و هر پارامتر تأثیر خاصی در تحلیل ارتباط گسل ها خواهد داشت. در مورد تأثیر گسل ها بر یکدیگر نه تنها گسل و تحلیل هندسی آن، بلکه روابط هندسی پیچیده مربوط به گسل های موجود در کنار هم و یا در یک سیستم گسلی، نیز پارامترهایی را به مجموع پارامترهای ضروری برای بررسی لرزه ای یک گسل خواهد افزود. پارامترهای موثر بر تأثیر متقابل گسل ها شامل ساختارهای هندسی هر یک از گسل ها و ویژگی های رئولوژیکی محدوده گسل های مجاور هم می باشد. بر اساس بررسی های صورت گرفته ارتباط بین گسل های امتدادلغز و الگوی پله ای آنها به این صورت بیان می گردد که در حالت دو بعدی اگر پله ها فشارشی باشند (گسل های چپ پله

و پارامترهای مختلف لرزه ای برای سلول ها محاسبه گردیده است. در این تحقیق انرژی زلزله ها با توجه به فرمول زیر (Gutenberg and Richter, 1954) محاسبه شده است:

$$\text{Log } E = 4.8 + 1.5 M$$

در این فرمول M بزرگی محلی زلزله های رخ داده بر حسب ریشتر و E انرژی زلزله بر حسب ژول است. در این تحقیق بر اساس زلزله های جدا شده، برای هر سلول تعداد زلزله های رخ داده در بازه های زمانی معین و همچنین کل انرژی لرزه ای آزاد شده در آن سلول محاسبه و ثبت گردیده است. بر اساس این مقادیر می توان در هر بازه زمانی سلول یا سلول هایی که دارای بیش ترین تعداد زلزله های رخ داده و یا بیش ترین انرژی لرزه ای آزاد شده هستند را تعیین نمود (شکل ۵). بر این اساس، مقدار کل انرژی لرزه ای آزاد شده به عنوان معیاری از بررسی تغییرات زمانی و مکانی لرزه خیزی ناحیه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به بازه های زمانی انتخاب شده، در مجموع ۳۰ نقشه معرف انرژی لرزه ای آزاد شده برای ناحیه تهیه گردید. در هر کدام از این نقشه ها می توان نقطه و یا نقاط با بیش ترین انرژی لرزه ای آزاد شده یا لرزه خیزی را مشخص نمود. این نقاط در مقالات تخصصی لرزه خیزی به نام نقاط داغ (Hot Spots) معروفند. با بررسی نقشه های لرزه خیزی تهیه شده برای بازه های زمانی شش ماهه متوالی می توان جابجایی یا مهاجرت این نقاط را مورد بررسی قرار داد. علاوه بر این، با بر هم نهش نقشه های لرزه ای تهیه شده در بازه های متوالی و کنار هم قرار گرفتن نقاط پر انرژی و همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری گسل های فعال ناحیه، نقشه معرف ترازهای انرژی لرزه ای آزاد شده در ناحیه مورد مطالعه تهیه گردید. همچنین، نقشه های تراز انرژی لرزه ای برای هر بازه زمانی بطور مجزا تهیه شد و با بررسی توالی این نقشه ها با توجه به نقاط پر انرژی هر نقشه، مهاجرت و انتقال مکانی این نقاط پر انرژی در ناحیه مورد مطالعه مورد بررسی دقیق قرار گرفت (شکل ۶). بر این اساس، راستای این مهاجرت ها در بازه های زمانی متفاوت تعیین گردید و با توجه به موقعیت گسل های فعال ناحیه، مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفت.

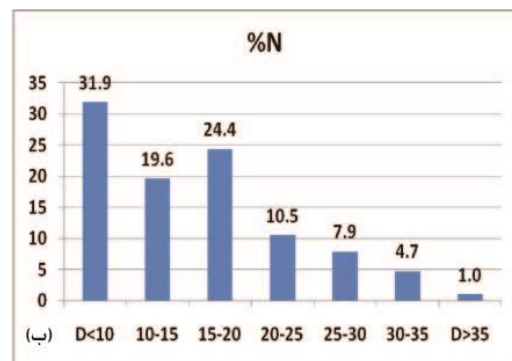
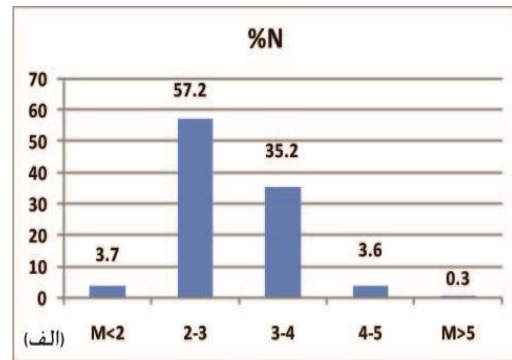


شکل ۵. شبکه بندی و تعیین مناطق پر انرژی جهت بررسی زمانی - مکانی شش ماه دوم سال ۲۰۰۱

زمین لرزه ادامه خواهد داشت. بنابراین استرس نرمال مؤثر باعث افزایش نیروی مؤثر در پله گسل ها گردیده و این عامل باعث تأخیر در شکست در پله های کششی می شود (Sibson, 1985).

روش تحقیق

در این تحقیق از داده های لرزه ای ناحیه مورد مطالعه در یک دوره زمانی ۱۵ ساله (داده های لرزه ای ژانویه ۱۹۹۶ تا نوامبر ۲۰۱۰، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) جهت بررسی تأثیر متقابل گسل های لرزه زای ناحیه استفاده شد. این داده ها شامل ۲۱۹۵ رخداد لرزه ای بوده که زلزله های با بزرگی مساوی و بیش از ۲ ریشتر را شامل می شود و بیش ترین بزرگی زلزله ها در این داده ها نیز ۶/۱ ریشتر می باشد. در شکل ۲ نمودار فراوانی بزرگی و عمق کانونی زلزله های مورد مطالعه نمایش داده شده است. بیش ترین عمق کانونی ثبت شده برای داده ها برابر با ۳۶ کیلومتر بوده است. بیش تر زمین لرزه های رخ داده در محدوده مورد مطالعه دارای بزرگی ۲/۶ ریشتر می باشند. در مورد عمق زمین لرزه ها نیز باید به این نکته توجه نمود که اکثر زمین لرزه ها دارای عمق کمتر از ۱۰ کیلومتر (۳۱/۹ درصد) می باشند (شکل ۴).



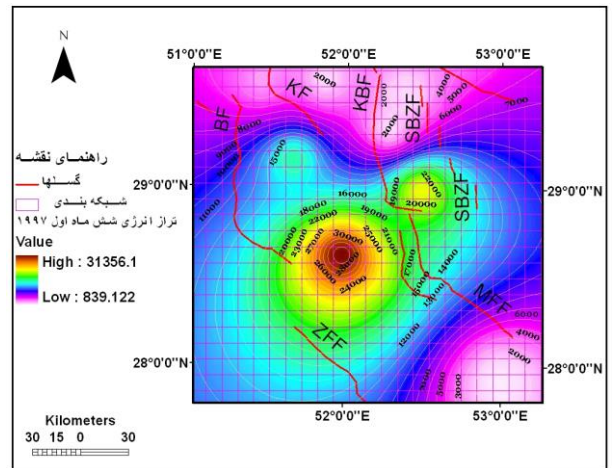
شکل ۴. (الف) نمودار فراوانی بزرگی و (ب) عمق کانونی زلزله های رخ داده در ناحیه مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۱۰-۱۹۹۶

برای بررسی زمانی - مکانی داده های لرزه ای و به منظور بررسی دقیق تر، داده های لرزه ای به بازه های زمانی شش ماهه تقسیم گردید. به منظور تقسیم بندی مکانی داده ها نیز شبکه بندی منظم ناحیه مورد مطالعه به سلول هایی با طول و عرض ۱۰ کیلومتر صورت گرفت. ابعاد این سلول ها با توجه به خطای مکان یابی رومرکز زلزله ها در هنگام ثبت داده ها در مراکز لرزه نگاری انتخاب شده است. سپس زلزله های رخ داده در هر سلول جداسازی شده

جدول ۱. تعداد و درصد تعداد مهاجرت (جابجایی) لرزه ای رخ داده در موقعیت نقاط پر

لرزه در راستاهای اصلی و فرعی جغرافیایی

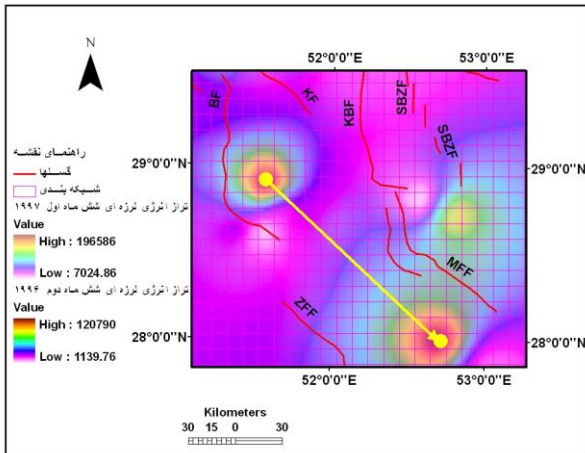
راستاهای مهاجرت	تعداد مهاجرت	تعداد مهاجرت %
شمال به جنوب	۰	۰
جنوب به شمال	۱	۳/۵
شرق به غرب	۰	۰
غرب به شرق	۰	۰
شمال غرب به جنوب شرق	۷	۲۴/۱
جنوب شرق به شمال غرب	۷	۲۴/۱
شمال شرق به جنوب غرب	۱۰	۳۴/۵
جنوب غرب به شمال شرق	۴	۱۳/۸



شکل ۶. نقشه تراز انرژی لرزه ای آزاد شده مربوط به بازه زمانی شش ماه اول ۱۹۹۷

تجزیه و تحلیل داده ها

ملاحظه می شود که ۳۴/۵ درصد از جابجایی انرژی در راستای-NE می باشد که بیش ترین انرژی رها شده می باشد. این راستا در امتداد عمود بر زاگرس می باشد. کمترین درصد مربوط به راستای W-E می باشد. ۲۴/۱ درصد انرژی در راستای زاگرس منتقل شده است و تقریباً هیچ زمین لرزه ای در راستای شرقی - غربی جابجا نشده است. با توجه به نمودار گل سرخی راستاهای مهاجرت لرزه ای (شکل ۸) بیش ترین راستای این مهاجرت $N20^{\circ}E$ یا $S20^{\circ}W$ بوده است.



شکل ۷. نقشه لرزه خیزی ناحیه حاصل بر هم نهش لرزه خیزی ناحیه مورد مطالعه در دو بازه متوالی شش ماهه دوم سال ۱۹۹۶ و شش ماه اول سال ۱۹۹۷ در این نقشه نحوه تعیین راستای مهاجرت نقاط داغ لرزه ای (مناطق با لرزه خیزی بیش تر) نمایش داده شده است.

بر اساس نقاط تمرکز انرژی لرزه ای آزاد شده در هر بازه زمانی، بررسی مهاجرت لرزه ای برای هر دو شش ماه متوالی قابل تحلیل است (شکل ۷). با توجه به راستاهای مهاجرت انرژی لرزه ای مربوط به هر بازه شش ماهه، جابجایی انرژی برای ۳۰ بازه زمانی را می توان به عنوان راستای غالب برای مهاجرت لرزه ای در محدوده مطالعاتی در نظر گرفت. برای تعیین راستای غالب در مهاجرت لرزه ای تعداد مهاجرت ها در ۲۹ مهاجرت لرزه ای بین ۳۰ بازه زمانی در نظر گرفته شده و به صورت درصد بیان گردیده است. در مجموع با توجه به راستاهای جابجایی انرژی در سلول دارای بیش ترین انرژی در بازه ۱۵ ساله مورد بررسی، درصد هر یک از راستاها در جدول ۱ ارائه شده است که در این جدول تعداد دفعات مهاجرت لرزه ای در ۳۰ بازه (در مجموع ۲۹ مهاجرت) و تعداد مهاجرت لرزه ای به صورت درصد می باشد. در این ارتباط هر راستا با توجه به مقایسه سلول پراثری هر بازه با بازه شش ماهه بعدی راستا با توجه به راستاهای جغرافیایی بیان گردیده است. ذکر این نکته ضروری به نظر می رسد که وجود راستاهای با تعداد مشابه همچون شمال غرب به جنوب شرق و یا جنوب شرق به شمال غرب با توجه به زمین ساخت حاکم بر محدوده مطالعاتی قابل بررسی است. ارتباط راستای شمال غرب به جنوب شرق با توجه به فشار حاصل از بازشدگی مورب دریای سرخ و فشار زمین ساختی صفحه آفریکن به عنوان نیروی پیشران مهاجرت و راستای جنوب شرق به شمال غرب به عنوان حاصل فرورانش صفحه اقیانوسی عمان به زیر صفحه اوراسیا مطرح است که در مقایسه با راستای شمال شرق به جنوب غرب یا همان راستای قائم فشار صفحه عربی به سمت ایران، دارای تأثیر کمتری می باشند و راستای غالب همان راستای حرکت صفحه عربی به سمت اوراسیا می باشد.

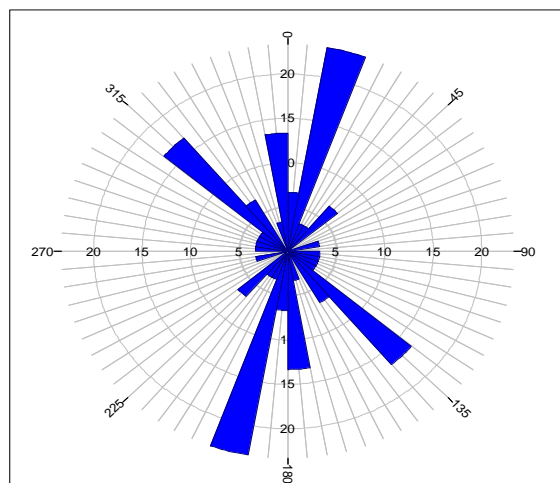
با توجه به راستاهای مهاجرت نقاط داغ لرزه ای، تعیین شده در این تحقیق و با توجه به بررسی زمانی - مکانی لرزه خیزی ناحیه می توان تغییرات لرزه خیزی هر بازه را با توجه به مهاجرت نقاط داغ لرزه ای و ارتباط مکانی آنها نسبت به موقعیت گسل های محدوده مورد بررسی قرار داد. بر این اساس فراوانی رخداد مهاجرت لرزه ای بر روی هر گسل یا انتقال این مهاجرت از یک گسل به گسل مجاور مورد بررسی دقیق قرار گرفت. به این منظور، گسل های درگیر در تأثیر متقابل فعالیت لرزه خیزی با توجه به موقعیت مکانی هر یک از نقاط تمرکز انرژی لرزه ای نسبت به بازه زمانی بعد مورد تفسیر قرار گرفت و بر این اساس تعداد مهاجرت های رخ داده در بین گسل های بخش میانی زاگرس تعیین گردید. نتیجه این بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس داده های ارائه شده در این جدول می توان چنین نتیجه گیری نمود که بیشترین مهاجرت لرزه خیزی در این ناحیه، در بین دو گسل کازرون و برازجان (دارای ۸ مهاجرت لرزه ای) رخ داده است و در درجه دوم اهمیت نیز تأثیر متقابل گسل های کره بس و کازرون در مهاجرت لرزه ای قابل توجه است.

جدول ۲. تعداد مهاجرت های لرزه ای صورت گرفته بر روی و یا بین گسل های لرزه زا در ناحیه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۵ سال (از ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰)

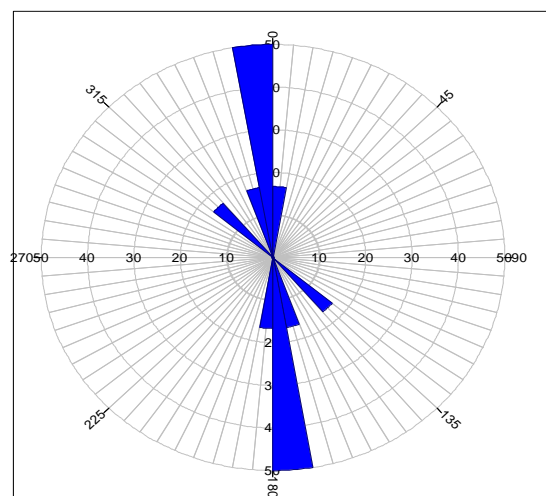
تعداد مهاجرت های لرزه ای در بازه زمانی ۱۵ سال	راستای مهاجرت لرزه ای بر روی گسلی و یا بین گسلی
۸	جابجایی بین گسل های کازرون و برازجان
۷	جابجایی بین گسل های کازرون و کره بس
۳	جابجایی بین گسل های برازجان و کره بس
۱	جابجایی بین گسل های سبزپوشان و کره بس
۳	جابجایی بر روی گسل کازرون
۲	جابجایی بر روی گسل برازجان
۲	جابجایی بر روی گسل دنا
۱	جابجایی بر روی گسل کره بس
۲	جابجایی بین گسل های ZFF, MFF

بحث

با بکارگیری روش های تحلیلی زمانی - مکانی در مطالعه لرزه خیزی نواحی می توان به بررسی مهاجرت لرزه ای و انتقال زمانی و مکانی مناطق با لرزه خیزی بیش تر در بخش میانی زاگرس و احتمال وجود تأثیر متقابل بین فعالیت گسل های لرزه زا در این ناحیه پرداخت. سیستم گسلی کازرون در بخش مرکزی زاگرس مرکزی قرار دارد که با سه گسل کازرون، برازجان و دنا شناخته می شود. در کنار این سیستم گسلی، گسل های فعالی همچون گسل کره بس، گسل سبزپوشان و گسل های متعلق به کوهزاد زاگرس همچون گسل پیشانی کوهستان و گسل پیش ژرفای زاگرس وجود دارد که هر یک به نحوی در رخداد زمین لرزه ها و همچنین مهاجرت های لرزه ای ناحیه تأثیر گذار است. گسل های کازرون و برازجان به عنوان گسل هایی با الگوی راست پله و مکانیسمی راستگرد، نمادی از گسل های تقریباً امتداد لغز مطلق در سراسر

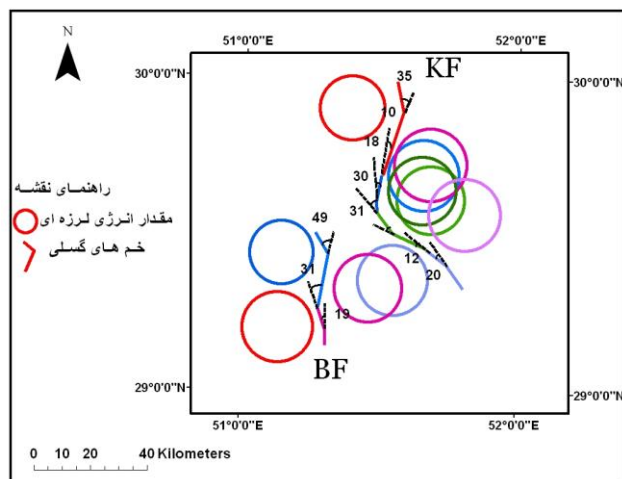


شکل ۸. نمودار گل سرخی معرف توزیع جهت های راستاهای مهاجرت لرزه ای در ناحیه مورد مطالعه تعیین شده برای بازه های متوالی شش ماهه در صورت ارائه گسل های اصلی در محدوده مطالعاتی به صورت راستای بیشترین طول از گسل به صورت دیاگرام گلسرخی مشاهده می گردد که راستای گسل ها اکثراً نزدیک به راستای شمالی و جنوبی می باشند و با مقایسه راستاهای گسل های اصلی و غالب مهاجرت لرزه ای، ارتباط بیش تر راستاهای مهاجرت لرزه ای با گسل های محدوده مطالعاتی آشکار خواهد شد (شکل ۹).



شکل ۹. نمودار گل سرخی معرف راستاهای گسل های اصلی در ناحیه مورد مطالعه در بررسی هایی که توسط محققان پیشین در ارتباط با زاگرس صورت گرفته است (برای مثال Lacombe et al., 2011)، راستای فشارش حاکم بر این ناحیه بطور تقریبی N 020 تا N 030 ذکر شده است (Talebian et al., 2004). پس از بررسی داده های لرزه ای مربوط به زاگرس بیان می کنند که میدان استرس حاکم بر ناحیه از ۵ میلیون سال قبل تا کنون حالت یکنواختی داشته و راستای فشارش در این مدت تقریباً N 020 تا N 030 بوده است. همچنین Tatar et al. (2003) نیز راستای کوتاه شدگی و فشارش را بر اساس داده های GPS منطبق بر راستای N 020 معرفی نموده اند.

گسلی مقدار لغزش کوچکتر خواهد شد. گسترش شکستگی در امتداد خم گسلی آهسته تر از یک گسل با امتداد مستقیم است و همچنین جلوی یک خم حالت پیش راننده لغزش و در پشت خم حالت متوقف کننده لغزش را دارد (Kase et al., 2006). با توجه به زاویه ای که هر یک از خم ها نسبت به تقسیمات صورت گرفته در طول دو گسل کازرون و برازجان می سازند، می توان راستای لغزش و همچنین نحوه تجمع انرژی لرزه ای را در دو سمت هر یک از این گسل ها توجیه کرد چرا که بیش تر خم های گسل کازرون با زاویه کوچک دارای زاویه ای به سمت شرق گسل می باشند که موجب تجمع انرژی در این بخش می گردد. همچنین تعداد ۲ خم با زاویه بزرگتر از بقیه خم ها دارای زاویه بزرگتر (نسبت به ۵ خم دیگر) به سمت غرب می باشد که به همراه یکی از سه خم گسل برازجان موجب تجمع انرژی و مهاجرت لرزه ای در بین دو گسل خواهد شد که به همراه بیش ترین راستاهای مهاجرت لرزه ای در دوره ۱۵ ساله مورد بررسی (۸ رویداد مهاجرت لرزه ای) نشانگر تأثیر متقابل لرزه ای در بین دو گسل کازرون و برازجان و در محدوده پله کششی و همپوشان بین این دو گسل می باشد. همچنین بررسی لرزه خیزی مربوط به دوره ۱۵ ساله نشان می دهد که بیش ترین انرژی لرزه ای آزاد شده به بخش شرقی گسل کازرون تعلق دارد که با توجه به خم های موجود در گسل کازرون، بخشی از این انرژی آزاد شده قابل توجیه می باشد.



شکل ۱۰. نقشه معرف الگوی تجمع انرژی لرزه ای در اطراف خم های موجود بر روی گسل های کازرون و برازجان

همچنین بر اساس بررسی های صورت گرفته بر روی گسل کره بس، شیب گسل کره بس در حدود ۷۰ درجه و به سمت غرب در نظر گرفته شده است (صفری، ۱۳۷۹). با توجه به این موضوع می توان عنوان کرد که فاصله بین دو صفحه گسلی در عمق کمتر از سطح است و لذا احتمال تأثیر متقابل دو گسل نیز در عمق بیش تر از سطح می باشد. البته به این نکته نیز باید توجه نمود که ساختار گسل ها در عمق بسیار پیچیده تر از تصور ما است. اگرچه احتمال این که دو گسل کازرون و کره بس در عمق متعارف مربوط به زون لرزه زایی لیتوسفر (حدود ۱۵ کیلومتر) به یکدیگر پیوندند بسیار ضعیف است، اما وجود شیب در گسل کره بس و همچنین وجود خم هایی در گسل کازرون نیز بر تأثیر متقابل بین این گسل ها خواهد افزود.

ایران می باشند و برخی از محققین شیبی بیش از ۸۵ درجه و در تقریباً قائم برای گسل کازرون در نظر می گیرند و حرکت آن را در اغلب بخش های آن امتداد لغز می دانند (صفری، ۱۳۷۹). این دو گسل از سیستم گسلی کازرون دارای فاصله ای بین ۲۲ تا ۲۷ کیلومتر در بخش های مختلف طول خود با یکدیگر می باشند. در بیان ویژگی های تئوری تأثیر متقابل گسل ها، برای گسل های دارای پله های کششی فاصله مطلوب برای تأثیر متقابل در حدود ۸ کیلومتر بیان گردید که این فرض در ارتباط با گسل های کازرون و برازجان صادق نیست. اما در این رابطه شرایط تأثیر گذار دیگری (مثل حضور گسل های متصل کننده و ...) بر روی این موضوع تأثیر گذار است که می تواند احتمال اثر متقابل گسل ها حتی در شرایط وجود فاصله زیاد بین قطعات گسلی را ممکن سازد.

در خصوص مهاجرت لرزه ای از یک گسل به گسل مجاور، که می تواند نمودی از انتقال شکستگی لرزه زا در گسل های مجاور باشد، می توان چنین گفت که تغییرات استرس برشی در طول یک سیستم گسلی فعال به همراه گسل های مجاور آن می تواند دلیل چنین مهاجرت هایی که وابستگی شدید به جهت گیری سیستم های گسلی دارد، باشد (Aochi et al., 2002). همچنین انتقال و مهاجرت جابجایی در سرتاسر جلو آمدگی ها و عقب رفتگی های موجود در بین قطعات سیستم های گسلی می تواند روی دهد (Harris et al., 1999). از سوی دیگر انتقال و مهاجرت های لرزه ای بر روی گسل ها ترجیحاً بر روی سطح آزاد استرسی روی می دهد که به دلیل تغییرات دینامیک در استرس نرمال بزرگتر در نزدیکی سطح می باشد. بنابراین در بررسی اثر متقابل فعالیت گسل ها تأثیر تغییرات استرس نرمال در خم های گسلی نیز باید در نظر گرفته شود. در صورتی که راستای دو گسل کازرون و برازجان به صورت دقیق بررسی گردد، تعدادی خم در این دو گسل مشاهده خواهد شد که مهمترین آنها خم بزرگی است که در نزدیکی پایانه جنوبی این گسل مشاهده می شود و خود شامل ۷ خم کوچکتر می باشد. همچنین گسل برازجان علاوه بر خم هایی که در طول آن قابل تشخیص است در بخش پایانه شمالی خود دارای ۳ خم گسلی می باشد (شکل ۱۰).

بیش ترین انرژی لرزه ای آزاد شده در گسل های فعال معمولاً به بخش هایی از گسل با هندسه پیچیده تعلق دارد. در یک خم گسلی تنوع افت استرس دینامیک تابعی از استرس برشی اعمالی و دامنه و طول موج خم گسلی است. برای خم های بزرگ گسلی تخمین تأثیر خم به دلیل دامنه بیش تر و طول موج کوتاه تر دشوار تر خواهد بود (Kase et al., 2006). انرژی بیش تری برای رخداد حرکت در اطراف یک خم گسلی نسبت به حالت مستقیم مورد نیاز است. بررسی زمین لرزه ها نشان می دهد که تجمع استرین ارتباط مستقیم با هندسه گسل دارد و میزان لغزش در اثر زمین لرزه با میزان تغییر امتداد گسل متناسب است. سرعت شکستگی در امتداد خم گسلی تغییر می کند که وابسته به میزان استرس اولیه، تغییرات استرس نرمال و افت استرس است که خود وابسته به تغییرات استرس استاتیکی است که توسط هندسه گسل ایجاد می گردد. در امتداد خم گسلی سرعت شکست کاهش می یابد.

شکستگی و توزیع بزرگ مقیاس لغزش در روی گسل وابسته به زاویه ایجاد شده توسط خم گسل با استرس های اصلی دارد. با افزایش زاویه خم

نتیجه گیری

در این بررسی با توجه به بررسی زمانی و مکانی داده های لرزه ای بازه ۱۵ ساله به بحث پیرامون تأثیر متقابل گسل های منطقه پرداخته شد که با در نظر گرفتن راستاها و محاسبه انرژی لرزه ای منتقل شده و توزیع انرژی با توجه به گسل های موجود در منطقه و هندسه و نوع مکانیسم حرکتی هر یک از آنها و با توجه به زمین ساختی کلی حاکم بر محدوده مطالعاتی می توان به بیان تأثیر متقابل در منطقه پرداخت. در بین گسل هایی که بررسی گردید، بیش ترین مهاجرت لرزه ای در این مدت مربوط به راستای NE-SW یا همان راستای حرکت غالب زمین ساختی منطقه بوده است که ۳۴/۵ درصد انرژی لرزه ای را در راستای NE به SW منتقل نموده است. همچنین با توجه به زمین لرزه های خاصی از این بازه زمانی راستای فشارشی حاکم بر منطقه مطالعاتی $27/5^{\circ}$ بدست آمد که انطباق خوبی با راستای حرکت صفحه عربی به سمت صفحه اوراسیایی داشته و راستای مهاجرت لرزه ای بین گسل ها را توجیه نموده و زمینه تأثیر گسل ها را در این راستا فراهم می آورد. با توجه به بررسی آماری تعداد رویدادهای مهاجرت در محدوده مطالعاتی بیش ترین تعداد پرش یا انتقال انرژی مربوط به گسل کازرون و گسل برازجان همچنین گسل کازرون و گسل کره بس و انتقال در طول راستای این گسل ها می باشد. با توجه به داده های آماری مهاجرت لرزه ای، امکان مهاجرت لرزه ای برای تمامی گسل ها متصور است اما با توجه به فراوانی آماری تعداد مهاجرت لرزه ای تنها مهاجرت لرزه ای مربوط به گسل های کازرون و برازجان و گسل کازرون و گسل کره بس توسط روش تحلیل مکانی - زمانی به اثبات می رسد. راستای انتقال انرژی لرزه ای و تأثیر دو گسل بر یکدیگر در مورد گسل های کازرون و برازجان با توجه به وجود خم های موجود در روی هر دو گسل و بویژه بر روی گسل کازرون و قوانین انتقال انرژی در شرایط وجود خم گسلی در یک گسل و شرایط پرش انرژی به گسل دیگر توجیه پذیر است و این شرایط تأثیر متقابل این دو گسل را بیان می دارد. با توجه به زوایای انحراف از راستای گسل کازرون و با توجه به اینکه بیش ترین انرژی در بازه زمانی مورد بررسی در محل خم گسلی کازرون متمرکز بوده است، این تجمع لرزه ای خود دلیلی بر بالا بودن انرژی تأثیر متقابل در گسل های اطراف این خم می باشد. در ارتباط با گسل های کازرون و کره بس با توجه به روابط هندسی بین آنها می توان بیان کرد که شیب غرب سوی سطح گسلی کره بس خود عاملی در رانش و توزیع انرژی لرزه ای به سمت غرب یعنی گسل کازرون و بخش میانی و خم مربوط به این گسل می باشد و در صورتی که تأثیر سطحی اثر متقابل بین این دو گسل به دلیل فاصله بین آنها وجود نداشته باشد، قطعاً این دو گسل به دلیل نزدیک شدن سطحشان در عمق بر یکدیگر تأثیر گذار خواهند بود.

منابع

- غلامی، ابراهیم، نوگل سادات، میر علی اکبر، خطیب، محمد مهدی و یساقی، علی، ۱۳۸۸، شواهد ساختاری از تأثیر گسل های شمالی - جنوبی در توسعه دگرریختی های جنوب خاوری بیرجند، پهنه سیستان، مجله علوم زمین، شماره ۷۱، ص ۱۳-۱۸.
- Alavi, M., 1994, Tectonics of Zagros orogenic belt of Iran: new data interpretation, Tectonophysics, vol. 229, p. 211-238.
- Aochi, H., and Fukuyama, E., 2002, Three-dimensional nonplanar simulation of the 1992 Landers earthquake", J. Geophys. Res., Vol. 107, doi10.1029/2000JB000061.
- Authemayou, C., 2005, Role of the Kazerun fault system in active deformation of the Zagros fold-and-thrust belt (Iran), Geoscience, Vol. 337, P. 539-545.
- Aydin, A., and Schultz, R. A., 1990, Effect of mechanical interaction on the development of strike-slip faults with echelon pattern, J. Struct. Geol., Vol. 12, p. 123-129.
- Bektas, O., EY.Boúlu, Y. and Maden, N., 2007, Different Modes of Stress Transfer in Strike-slip Fault Zone: an Example From the North Anatolian Fault System in Turkey, Turkish Journal of Earth Sciences, Vol. 16, pp. 1-12.
- Berberian, M., 1976, An explanatory note on the first seismotectonic map of Iran; A seismo - tectonic review of the country", Geol. Surv. Iran, Vol. 39, p. 7-141.
- Berberian, M., 1995, Master blind thrust fault hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics," Tectonophysics, Vol. 241, p. 193-224.
- Gutenberg, B., and Richter, C.F., 1954, Seismicity of the Earth. 2nd ed., Princeton University Press, Princeton, NJ, 310 p.
- Hariss, R.A. and Day, S. M., 1993, Dynamics of fault interaction: parallel strike slip faults, J. Geophys. Res., Vol. 98, p. 4461-4472.
- Harris, R. A., and Day, S. M., (1999), Dynamic 3D simulations of earthquakes on an echelon faults, Geophys. Vol. 26, p. 2089-2092.
- Kase, Y. and Day, S. M., (2006), " Spontaneous rupture processes on a bending fault", Geophys. Res., Vol. 33, doi: 10.1029/2006GL025870.

صفری، حجت ا...، ۱۳۷۹، تحلیل دگر ریختی پهنه گسل سبز پوشان، رساله دکتری دانشگاه تربیت مدرس.

عندلیبی، محمد جمیل. و اویسی، بهنام، ۱۳۸۰، سائیزموتکتونیک مدرن، انتشارات تخت جمشید، شیراز، چاپ اول.

- Lacombe, O., Bellahsen, N. and Mouthereau, F., 2011, Fracture patterns in the Zagros Simply Folded Belt (Fars, Iran): constraints on early collisional tectonic history and role of basement faults, *Geol. Mag.* Cambridge University Press, doi10.1017/S001675681100029X.
- Landgraf, A., Ballato, P., Strecker, M. R., Friedrich, A., Tabatabaei, S. H. and Shahpasandzadeh, M., 2009, Fault-kinematic and geomorphic observations along the NorthTehran Thrust and Mosha Fasham Fault, Alborz Mountains Iran: implications for fault-system evolution and interaction in a changing tectonic regime, *J. of Geophys. Res.*, Vol. 177, pp.676 – 690.
- Oglesby, D., 2005, The Dynamics of Strike-Slip Step-Overs with Linking Dip-Slip Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 5, pp. 1604–1622.
- Pollitz, F., Vergnolle, M. and Calais, E., 2000, Fault interaction and stress triggering of twentieth century earthquakes in Mongolia, *J. of Geophys.*, Vol.108.
- Scholz, C.H. and Gupta, A., 2000, Fault interactions and seismic hazard" *Journal of Geodynamics*, Vol.29, pp. 459-467.
- Sibson, R. H., 1985, Stopping of earthquake ruptures at dilational fault Jogs", *Nature*, Vol. 316, p. 248-251.
- Talebian, M. and Jackson, J., 2002, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountain of Iran, *J. Geophys. Res.*, Vol. 156, P. 506-526.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., and Ghafori-Ashtiany, M., 2004, Tectonics of the central Zagros (Iran) deduced from microearthquakes seismicity, *Geophys. J. Int.*, Vol. 156, pp.255 – 266.
- Yassaghi, A., 2006, Integration of Landsat imagery interpretation and geomagnetic data on verification of deep seated transverse fault lineaments in SE Zagros, Iran, *Remote Sensing*, Vol. 27, p. 4529-4544.
- Zhang, Q., Zhang, P. Wang, C., Yi-peng, W and Ellis, M., 2003, Earthquake triggering and delaying caused by fault interaction on Xianshuihe fault belt southwestern China, *ACTA Seismologica SINICA*, Vol16, No.2, pp 156-165.