

سنجش ارتباط طول گسل، بزرگی زمین‌لرزه، پهنه گسیختگی و جابجایی عمودی زمین (مطالعه موردی: دشت سیلاخور)

سیاوش شایان^{۱*}، حبیب سکوند^۲، محمد شریفی کیا^۳

۱- استادیار سنجش از دور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار سنجش از دور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت: ۸۹/۱۰/۲۷

پذیرش: ۹۰/۲/۲۴

چکیده

این مقاله بر آن است تا خطر گسلش ناشی از زمین‌لرزه در دشت سیلاخور را به کمک سنجش پارامترهای مؤثر (طول گسل، بزرگی زمین‌لرزه، پهنای گسیختگی و جابه‌جایی عمودی) مورد بررسی قرار داده پهنه‌بندی مناسبی از میزان خطرپذیری ناشی از آن را به عمل آورد.

در این پژوهش با استفاده از شواهد مربوط به این پارامترها گسیختگی در پهنه‌های لرزشی از رخدادهای قبلی تعیین و به کمک تکنیک‌های تحلیل آماری تحدید شد. نتایج نشان می‌دهد که از مجموع گسل‌های موجود در این دشت شش گسل توان بالقوه ایجاد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگا و دامنه‌ای بین ۵/۸ تا بیش از ۷ ریشتر دارند که بنا بر همین روابط زمین‌لرزه‌های با این بزرگا می‌توانند در پهنه‌ای به وسعت ۱ تا ۳ کیلومتری پیرامون گسل، گسیختگی‌هایی ایجاد کنند که ارتفاع مقادیر جابه‌جایی عمودی آن‌ها به بیش از ۱۰۷ سانتیمتر خواهد رسید.

شاخص‌های فوق مبنای پهنه‌بندی نواحی در معرض خطر گسلش قرار گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که شهر درود و ۵۳ روستا از ۱۶۳ روستای محدوده مورد مطالعه روی پهنه‌های پر خطر گسلش، ۲۲ روستا بر روی پهنه‌های با خطر متوسط گسلش و ۳۷ روستا بر روی پهنه‌های کم خطر گسلش قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: گسلش زمین، بزرگی زلزله، پهنه گسیختگی، دشت سیلاخور، جابه‌جایی عمودی زمین.

E-mail: shayan@modares.ac.ir

* نویسنده مسؤول مقاله:



۱- مقدمه

گسلش یکی از رخدادهای همزاد با زمین‌لرزه است که در زمان رویداد این پدیده می‌تواند منشأ ایجاد خسارت‌های فراوان به تأسیسات حیاتی مانند جاده‌ها، خطوط آهن، سازه‌های خطی زیرزمینی مانند خطوط انتقال نفت و گاز و کابل‌های برق مدفون، تونل‌ها، ساختمان‌ها و ... باشد (Kellert, 2002:24). اهمیت و تأثیرگذاری این پدیده از یک سو و قابلیت تحقیق‌پذیری آن از سوی دیگر انجام مطالعات به منظور شناسایی پهنه‌های واقع در معرض گسل و تبیین و سنجش ارتباط آن با سایر فاکتورهای پی‌آمد مانند طول گسل، بزرگای زمین‌لرزه، پهنای گسیختگی و جابه‌جای عمودی را اهمیت و ضرورتی خاص بخشیده است (Bachmanov, 2004:12 Tsutsumi, 2007:12). سنجش روابط و همبستگی گسلش با این فاکتورها واجد سابقه نسبتاً طولانی است، درعین حال این بررسی‌ها به طور عمده در مقیاس‌های کوچک و پهنه‌های وسیع صورت گرفته و کم‌تر به سنجش و تحلیل این روابط در واحدهای فضایی بزرگ مقیاس (۱:۱۰۰۰۰) پرداخته شده است (Gioetals, 2009, p:8). از جمله تحقیقات اولیه انجام شده روی این روابط می‌توان به بررسی‌های بربریان به عنوان پشرو این مقوله از پژوهش در ایران اشاره کرد. بربریان برای نشان دادن رابطه بین طول گسل مسبب زمین‌لرزه و ارتفاع و دامنه گسیختگی، ویژگی‌های ۱۵ زلزله در نقاط مختلف جهان را مورد بررسی قرار داده است (بربریان، ۱۳۷۱:۲۶۸). به استناد این رابطه برای گسله‌های با درازای ۱۰ کیلومتر، جابه‌جایی نیم متر در یک جهش و برای گسل‌های با درازای ۱۰۰ کیلومتر، جابه‌جایی پیرامونی در حدود ۴ متر دور از انتظار نخواهد بود (شکل ۱).

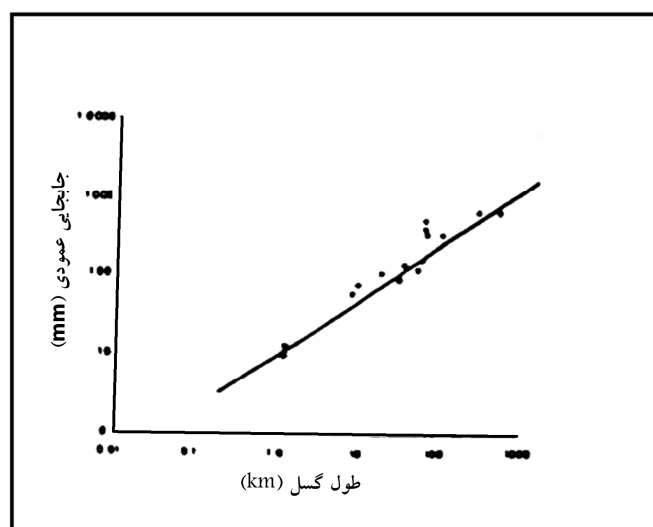
کیوین^۱ و دونالد^۲ در پژوهشی با استفاده از داده‌های تاریخی به بررسی ارتباط بین بزرگی زمین‌لرزه، طول گسیختگی، پهنای گسیختگی و میزان جابه‌جایی پرداختند؛ آن‌ها در این تحقیق موارد ذیل را به عنوان یافته تحقیق خود معرفی کردند:

- عموماً طول گسیختگی ناشی از یک زمین‌لرزه برابر با ۰/۷۵ طول گسل است؛
- میانگین جابه‌جایی عمودی در هر رخداد زمین‌لرزه نصف حداکثر جابه‌جایی در آن رخداد است؛

1. Kevin
2. Donald

- میانگین جابه جایی زیر سطحی از ماکزیمم جابه جایی سطحی کم تر است، اما از میانگین جابه جایی سطحی بیش تر است (Kevin & et. al, 1944, P: 3).

شکل ۱ را بطه طول گسل و حرکت عمودی زمین (بربریان ۱۳۷۱)



پژوهشگر ایرانی دکتر مهدی زارع نیز به بررسی خطر زمین لرزه و ساخت و ساز در حریم گسل شمال تبریز و حریم گسلش گسل های زمین لرزه ای ایران پرداخت. وی برای این کار از داده های مربوط به ۱۳ زمین لرزه تاریخی استفاده کرد و با استفاده از رابطه $M_W = a + b \log L_R + \sigma \cdot P$ بزرگای زمین لرزه احتمالی را برای گسل تبریز بین ۷ تا ۷/۸ ریشتر پیش بینی کرد و با استفاده از رابطه $W = 10^{(a+b \log L_R)} \sigma + P$ پهنه ای به وسعت 0.7 ± 3.1 کیلومتری پیرامون گسل را حریم گسل تعیین کرد (زارع، ۱۳۸۰: ۱۵).

هم چنین مبتنی بر یافته های دیگر محققان توان گسلش یک زمین لرزه و وابستگی آن به عواملی مانند بزرگای زمین لرزه، طول گسل، نوع گسل، نوع سنگ ها و عمق زمین مورد تأیید قرار گرفته است (Readdy, 2009:28; Dewoolkar, 2000: 44).

۲- منطقه مورد مطالعه

۲-۱- ویژگی‌های طبیعی

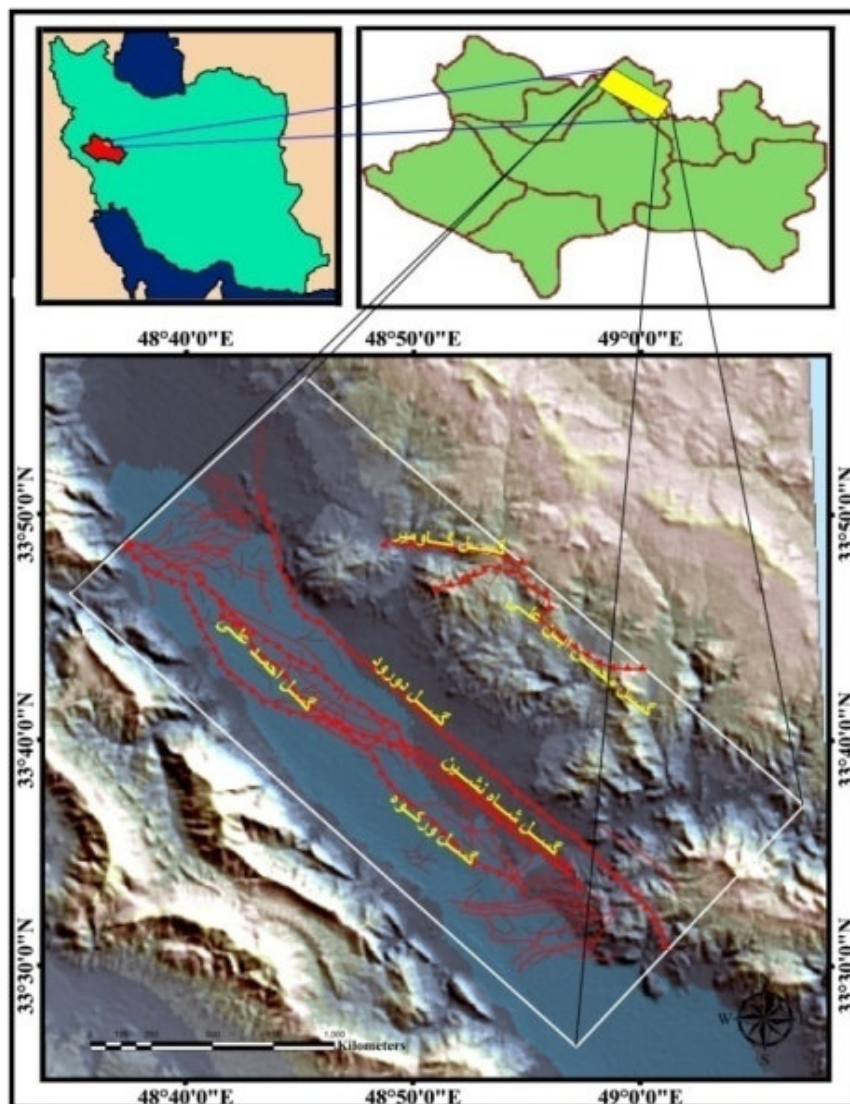
محدوده مورد مطالعه مشتمل بر حوضه فیزیکی دشت سیلاخور واقع در شمال شرقی استان لرستان با درازای ۵۰ کیلومتر و پهنای ۲۴ کیلومتر و مساحت ۱۲۱۴ کیلومتر مربع است. این ناحیه بین طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۲). از جهت ویژگی‌های زمین‌شناسی، محدوده مورد مطالعه به ۳ پهنه به نسبت متفاوت قابل تقسیم است:

الف) پهنه‌های واجد لیتولوژی آذرین و دگرگونی مانند گرانیت، اسلیت، شیست و میکاسیست. این پهنه‌ها با مساحتی در حدود ۳۳۶ کیلومتر مربع مشتمل بر تپه‌ها و بلندی‌های کم ارتفاع در نوار شمال و شمال شرقی است. کوه سر دره با ارتفاع ۲۶۱۳ متر در این منطقه قرار دارد.

ب) توده‌های رسوبی چین‌خورده و گاهی اوقات خرد شده از جنس آهک متعلق به سارند سورمه و آهک‌های خاکستری رنگ ژوراسیک و کرتاسه واقع در جنوب و غرب محدوده مورد مطالعه که به طور عمده ارتفاعات بلند و مرتفع را تشکیل می‌دهند، وسعت این محدوده حدود ۳۵۵ کیلومتر مربع است.

ج) پهنه‌های کوارترنری متشکل از کنگولومرا و آبرفت‌های جوان عرصه‌های میانی محدوده مورد مطالعه (دشت سیلاخور) با ارتفاع متوسط ۱۶۵۰ متر و مساحت ۵۵۲ کیلومتر مربع که عمده کانون‌های جمعیتی محدوده از جمله شهر بروجرд بر روی آن استقرار پیدا کرده‌اند.

محدوده مطالعه شده از جهت آب و هوایی در زمره نواحی نیمه خشک با شرایط اقلیمی نسبتاً متفاوت (متأثر از مورفولوژی خاص آن) است. شرایط نسبتاً مناسب آب و هوایی در قیاس با نواحی داخلی ایران، پهنه مورد بررسی را به کانون عمده‌ای از تجمع گروه‌های انسانی و فعالیت‌های اقتصادی مبتنی بر دسترسی مناسب به منابع آبی و زمین‌های زراعی تبدیل ساخته است. وجود این موهبت طبیعی مانع توجه و اندیشه گروه‌های انسانی به پایداری مکان و درجه خطرپذیری آن از مخاطرات طبیعی از جمله زلزله شده است.



شکل ۲ موقعیت محدوده مطالعه شده (دشت سیلاخور)

۲-۲- پیشینه زلزله‌خیزی پهنه مورد مطالعه

قدیمی‌ترین زمین‌لرزه ثبت شده برای این محدوده به حدود یک‌صد سال قبل تعلق دارد. در سوم بهمن ماه ۱۲۸۷ ه. ش.، (۱۹۰۹ میلادی)، در دره سیلاخور زمین‌لرزه فاجعه باری به



بزرگای ۷/۴ ریشتر رخ داد که گسلشی به طول ۴۵ کیلومتر و پهنای ۳ کیلومتر ایجاد کرد. حرکت عمودی ناشی از این زمین‌لرزه در امتداد این گسل (گسل درود) به بیش از ۱ متر رسید که پلکان گسلی حاصل از آن هنوز هم در بخش‌هایی از این دشت قابل رؤیت است (امبرسیز و ملویل، ۱۳۷۰: ۴۱۲). بررسی‌های آماری در قرن جاری (داده‌های بانک اطلاعات سازمان جغرافیایی آمریکا - USGS) نشان‌دهنده وقوع ۲۱ زلزله با بزرگی بیش از ۴ ریشتر در محدوده مورد مطالعه است که ۱۱ زمین‌لرزه دارای بزرگای بین ۴ تا ۵ ریشتر، ۷ زمین‌لرزه دارای بزرگای بین ۵ تا ۶ ریشتر، دو زمین لرزه دارای بزرگای ۶ و ۷ ریشتر و یک زمین‌لرزه دارای بزرگای بیش از ۷ ریشتر بوده است. در سال‌های اخیر (۱۱ فروردین ۱۳۸۵) زمین لرزه به‌نسبت نیرومندی با بزرگای ۶/۱ درجه در مقیاس ریشتر حد فاصل درود تا بروجرد را به وسعت ۲۵۰ کیلومتر مربع را به لرزه درآورد و خسارت‌های زیادی بر جای گذاشت (Pevet, 2008, p:2)؛ پاکزاد و میرزایی، ۱۳۸۶: ۳).

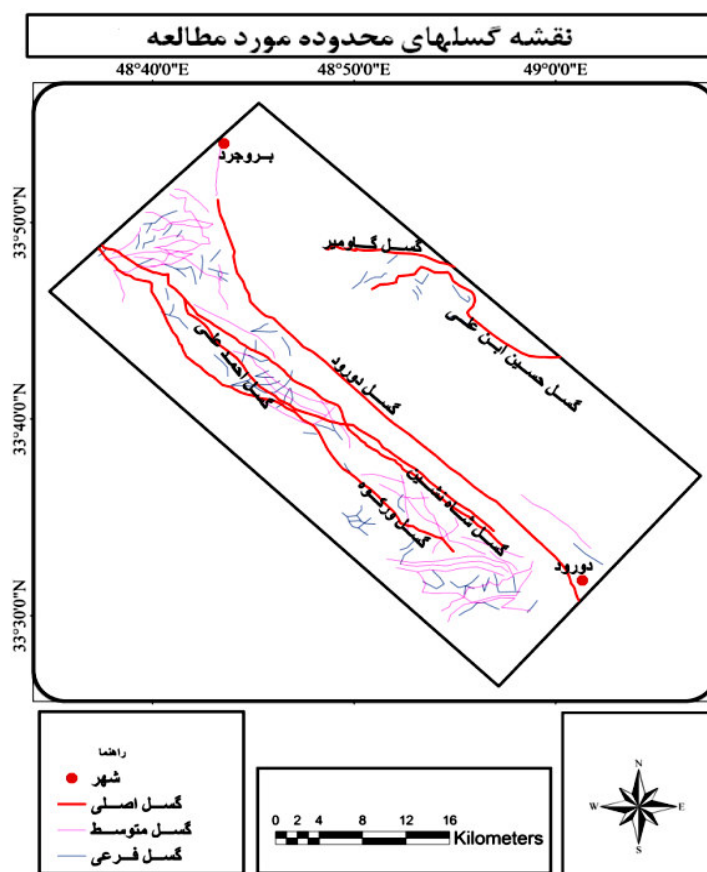
۲-۳- بررسی الگوی توزیع فضایی گسل های مؤثر در محدوده مطالعه شده

مهم‌ترین و اصلی‌ترین گسل ثبت شده در محدوده مطالعه شده گسل درود است که بخشی از گسل اصلی زاگرس به درازای ۶۵۵ کیلومتر به شمار می‌رود. گسل درود از نوع امتداد لغز راست گرد است که به واسطه دامنه و گسترش خود منشأ زایش مجموعه‌ای از گسل‌های فرعی و گاهی اوقات اصلی در مقیاس محلی شده است (فاطمی عقدا، ۱۳۸۵: ۳۰). مجموعه گسل‌های دارای رخنمون در محدوده مطالعه شده براساس الگوی سایزبندی گسل‌های کوآرترنری در گروه‌های ذیل قابل تقسیم‌بندی هستند (Villy et.al, 2003:3).

- گسله‌های اصلی (گسل با درازای بیش از ۱۰ کیلومتر): این گروه از گسل‌ها برابر داده‌های استخراج شده از نقشه زمین‌شناسی رقومی بروجرد، مشتمل بر گسل درود به عنوان اصلی‌ترین گسل با روند شمال غربی - جنوب شرقی با طول ۱۰۰ کیلومتر، گسل ورکوه با طول ۴۵ کیلومتر، گسل شاه‌نشین با طول ۴۳ کیلومتر، گسل احمد علی با طول ۴۱ کیلومتر، گسل حسین‌ابن‌علی با طول ۳۵ و گسل گاومیر با طول ۳۴ کیلومتر می‌باشند (شکل ۱، جدول ۲)؛

- گسله‌های متوسط (گسل با درازای بین ۲ تا ۱۰ کیلومتر): در محدوده مطالعه شده ۳۵ گسل متوسط وجود دارد که به صورت دو مجموعه گسل در شمال غرب و جنوب شرق منطقه واقع شده‌اند (شکل ۱)؛

- گسله‌های فرعی (گسل با طول کوتاه‌تر از ۲ کیلومتر): مبتنی بر نقشه رقومی مورد استفاده در این تحقیق، حدود ۱۰۰ گسل فرعی در محدوده مطالعه شده قابلیت استخراج دارند که به صورت سه مجموعه گسلی در نوار جنوبی با روند شمال غربی جنوب - شرقی و یک مجموعه در شمال شرق دیده می‌شوند (شکل ۱)؛



شکل ۳ نقشه گسل‌های دشت سیلاخور

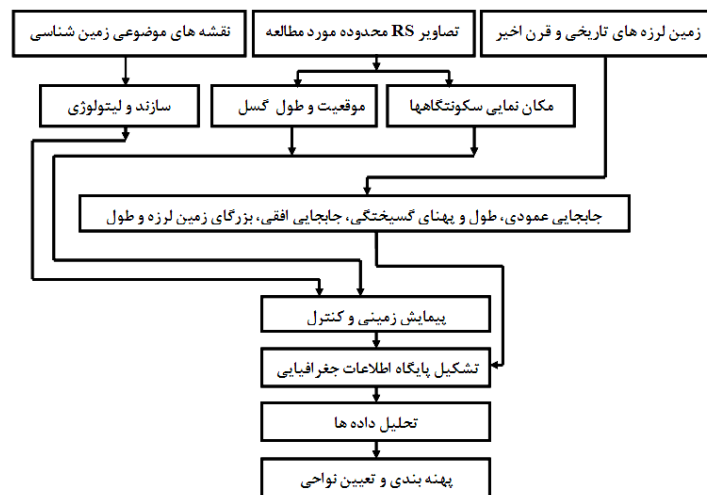
جدول ۱ گسل‌های اصلی دشت سیلاخور

نام گسل	طول گسل
درود	۱۰۰
ورکوه	۴۵
شاه‌نشین	۴۳
احمدعلی	۴۱
حسین‌ابن‌علی	۳۵
گاومیر	۳۴

۳- داده‌ها و روش تحقیق

داده‌های استفاده شده در این تحقیق مشتمل بر:

- ۱- تصاویر اخذ شده از ماهواره IRS-P5 و سنجنده Cartosat به شماره گذر ۳۷۱ و سطر ۲۳۴ مربوط به ۳۰ اگوست ۲۰۰۷ با دقت مکانی ۲/۵ متر؛
 - ۲- نقشه‌های زمین‌شناسی رقومی شده برو جرد با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰؛
 - ۳- DEM مستخرج از فتوگرامتری ماهواره‌ای با دقت ۵ متر؛
 - ۴- داده حاصل از پیمایش زمینی در ۳ مرحله هریک به میزان ۸ تا ۱۴ روز؛
 - ۵- داده‌های اخذ شده از منابع رسمی تولید آمار و اطلاعات، گزارش‌ها، اطلاعات تاریخی و مجموعه منابع علمی در رابطه با موضوع تحقیق.
- روش تحقیق به‌کار گرفته شده در این تحقیق مبتنی بر تحلیل و استدلال قیاسی در چارچوب یافته‌های حاصل از تکنیک‌های آزمایشگاهی به‌منظور پردازش داده و عملیات پیمایشی بوده که مراحل انجام آن در دیاگرام ذیل معرفی شده است (شکل ۴).



شکل ۴ مراحل انجام تحقیق

در این پژوهش برای تعیین نواحی پر خطر لرزشی و پهنه بندی منطقه بر مبنای درجه مجاورت آن با خطر زمین لرزه از ابزار تحلیل آماری، تعیین روابط خطی و ضرایب همبستگی بین فاکتورهای مشاهده شده در زمین لرزه های تاریخی بهره گرفته شده است. به این منظور تعداد ۴۴ مورد از زمین لرزه های به نسبت بزرگ (بزرگای بیش از ۵) روی داده در سرزمین ایران که دارای گزارش مشاهدات پیمایشی و برخوردار از ثبت فاکتورهای فیزیکی مانند طول گسلش، پهنای گسلش و مقادیر جابه جایی عمودی بوده اند، انتخاب و تجزیه و تحلیل شدند. در مرحله بعد اقدام به تعیین روابط ریاضی بین پارامترها منتخب شد و سپس اثرگذاری هریک از این پارامترها در زایش یا تغییرپذیری سایر پارامترها از طریق آزمون های تجربی مورد سنجش قرار گرفت. آنگاه با دستیابی به ضریب همبستگی و ابزار معادله خط پیش بینی اقدام به برآورد و پیش بینی این پارامترها در آتی شد. به این ترتیب با در اختیار داشتن مقادیر همبستگی و محاسبه آلفا و بتای بین دو پارامتر (به طور مثال طول و پهنای گسلش، بزرگای و طول گسل، بزرگای و پهنای گسلش و همچنین بزرگای و مقادیر جابه جایی) به کمک روابط تجربی اقدام به پیش بینی بزرگای گسل از طریق در اختیار داشتن طول گسل (مستخرج از تصاویر سنجش از دوری و DEM) شد. سپس با در اختیار داشتن ارقام برآوردی بزرگای



زمین‌لرزه و کنترل صحت آن از طریق ارقام مشاهده‌ای، مقادیر پهنای گسیختگی و جابه‌جایی عمودی تعیین گردید. در این صورت با در اختیار داشتن مقادیر پهنای گسیختگی حاصل از روابط فوق اقدام به پهنه‌بندی محدوده مورد مطالعه بر مبنای سناریوهای متفاوت از بزرگای زمین‌لرزه و دامنه‌ای حاصل از انحراف معیار به دست آمده، شد.

براساس داده‌های موجود از زمین‌لرزه‌های تاریخی واجد گزارش در دشت سیلاخور، در رویداد زمین‌لرزه ۱۹۰۹، طول گسیختگی در امتداد گسل درود ۴۵ کیلومتر، پهنای پهنه گسیخته شده حدود ۳ کیلومتر و ارتفاع گسیختگی ۱ متر گزارش شده است (رده، ۱۳۷۰: ۲۰۳).

پیرت^۱، پاکزاد و میرزایی در پژوهش‌هایی جداگانه طول گسیختگی ناشی از زمین‌لرزه سال ۲۰۰۵ سیلاخور را در طول گسل درود ۴۴ کیلومتر و ارتفاع گسیختگی را ۱۰ سانتی‌متر ذکر کرده‌اند (Pervret M. 2008:6، پاکزاد و میرزایی، ۱۳۸۶: ۳۴).

دونالد^۲ و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی رابطه بزرگای زمین‌لرزه، عرض، ارتفاع و طول گسیختگی پرداخته بودند. آن‌ها در مطالعه خود طول گسیختگی را ۷۵ درصد طول گسل در نظر گرفتند (Donald L. 1994:5). زارع^۳ در مطالعه‌ای نشان داد که براساس داده‌های مربوط به ۱۵ گسل زمین‌لرزه‌ای در فلات ایران، میانگین نسبت طول گسیختگی‌های سطحی به طول قطعه‌ای از گسل که گسیختگی به آن نسبت داده شده است، ۳۷ درصد می‌باشد (Zare. M., 1995:13). براساس یافته‌های این پژوهش از داده‌های حاصل از زلزله‌های رخ داده در سرزمین ایران، میانگین طول گسیختگی‌های سطحی به طول گسل مسبب گسلش در بین ۲۲ گسل زمین‌لرزه‌ای در سرزمین ایران ۳۷/۸ به دست آمد که تقریباً برابر با مورد اخیر است.

۴- یافته‌ها

با توجه به فهرست زمین‌لرزه‌های تاریخی در قرن اخیر (۱۹۰۰ تا ۲۰۱۰ میلادی) و به منظور مطالعه و تعیین حریم گسیختگی پیرامون گسل‌ها و ارتباط آن با سایر فاکتورهای هندسی

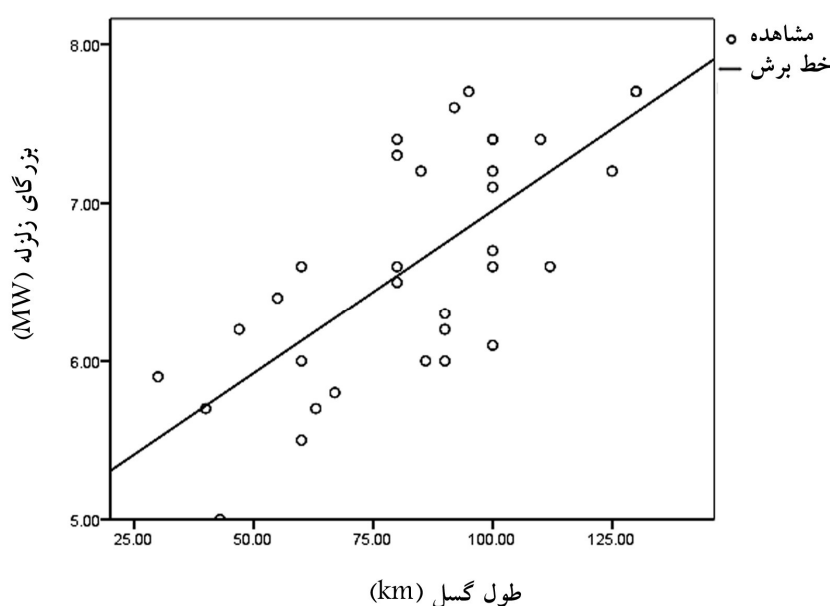
1. Peyret
2. Donald
3. Zare

گسل، گسیختگی‌های سطحی پیرامون ۴۴ گسل از گسل‌های شناخته شده و مسبب زمین‌لرزه در ایران که واجد گزارش علمی بوده است، انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفت (یادآوری این نکته لازم است-گسل‌های زمین‌لرزه‌ای که داده مطمئنی از طول گسل، طول گسلش، طول و پهنه گسیختگی سطحی از آن‌ها در دسترس نبود- از مطالعه حاضر حذف شدند).

در این بررسی پارمترهایی مانند طول، عرض و ارتفاع گسیختگی به همراه معرفی گسل مسبب مورد توجه قرار گرفت و اطلاعات آن از گزارش‌های مربوطه استخراج شد. سپس تحلیلی آماری مناسب برای تعیین همبستگی بین این فاکتورها صورت گرفت.

۴-۱- سنجش بزرگای زمین‌لرزه و طول گسلش

یافته‌های حاصل از تحلیل آماری نشان‌دهنده همبستگی خطی و به نسبت معناداری (در سطح ۰/۰۱) بین بزرگای زمین‌لرزه و طول گسل است (شکل ۵).



شکل ۵ ارتباط بین طول گسل و بزرگای زمین‌لرزه

براساس این این یافته و به منظور تعیین رابطه بین طول گسل و بزرگی زمین‌لرزه در ناحیه مورد بررسی، اقدام به اعمال ضرایب رگرسیون خطی از طریق رابطه‌های تجربی (M_w) شده است:

$$M_w = a + bL + \sigma.P \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، σ انحراف معیار، L طول گسل و M_w پتانسیل بزرگای زمین‌لرزه است. براساس داده‌های زمین‌لرزه‌های تاریخی مقادارهای a ، b و σ و ضریب همبستگی (R) مطابق رابطه (۲) به دست آمده است:

رابطه (۲)

$$\begin{aligned} a &= .521 & b &= .018 \\ R &= .512 & \sigma &= .82001 \end{aligned}$$

مبتنی بر ارقام رابطه (۲) و با در نظر گرفتن ضریب همبستگی معنادار در سطح ۰/۵۲، ارقام بزرگای زمین‌لرزه برای گسل اصلی درود قابلیت پیش‌بینی و برآورد دارد:

$$\text{Error! Bookmark not defined. } M_w = 5.21 + (.018 \times 100) = 7.01 \pm .82$$

ارقام نشانگر توان‌مندی گسل درود در ایجاد زمین‌لرزه‌ای با بزرگای بین ۶/۲ تا ۷/۸ ریشتر است. کنترل صحت این ارقام نشان‌دهنده مجاورت و همخوانی آن با ارقام مشاهده شده در زمین‌لرزه‌های تاریخی است (ارقام ثبت شده برای بزرگای دو زمین‌لرزه رخ داده و منتسب به این گسل در سال‌های ۱۹۰۹ و ۲۰۰۵ به ترتیب ۷/۴ و ۶/۱ است). هم‌چنین اعمال این ضرایب برای سایر گسل‌های مطرح ناحیه نشان‌دهنده برآورد ارقام بزرگای زمین‌لرزه به شرح ذیل است:

- گسل ورکوه با طول ۴۵ کیلومتر : $M_w = 5.21 + (.018 \times 45) + .82 = 6.2 \pm .82$
- گسل شاه نشین با طول ۴۳ کیلومتر: $M_w = 5.21 + (.018 \times 43) + .82 = 5.98 \pm .82$
- گسل احمد علی با طول ۴۱ کیلومتر: $M_w = 5.21 + (.018 \times 41) + .82 = 5.94 \pm .82$
- گسل حسین ابن علی با طول ۳۵ کیلومتر: $M_w = 5.21 + (.018 \times 35) + .82 = 5.84 \pm .82$
- گسل گاومیر با طول ۳۴ کیلومتر: $M_w = 5.21 + (.018 \times 34) + .82 = 5.82 \pm .82$

۴-۲- سنجش بزرگای زمین لرزه و پهنای گسلش

محاسبه پهنای گسیختگی نیز از طریق داده‌های مربوط به زمین لرزه‌های مذکور صورت پذیرفته است. یافته‌های حاصل از اعمال رگرسیون خطی بین بزرگای زمین لرزه و پهنای پهنه گسیخته شده نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین این دو فاکتور است؛ یعنی که با افزایش بزرگای زمین لرزه بر پهنای محدوده گسیخته شده افزوده می‌شود.

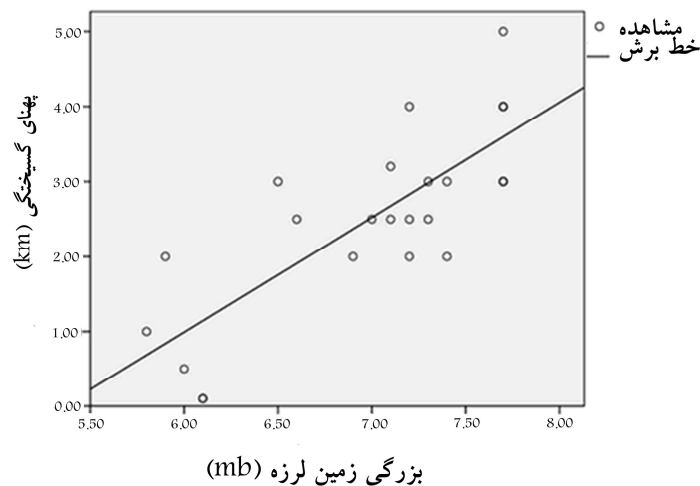
$$M_w = a + b M + \sigma.P \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳) σ انحراف معیار است که با قرار دادن $P=1$ به مقدار به دست آمده اضافه و با قرار دادن $P=-1$ از آن کم می‌شود ($P=0$ برای محاسبه مقدار میانگین). مقدارهای a , b , و σ و ضریب همبستگی (R) زمین لرزه‌های مذکور برای بزرگی زمین لرزه و پهنای گسیختگی مطابق رابطه (۴) به دست آمده است:

رابطه (۴)

$$\begin{aligned} b &= 1.532 & a &= -8.2 \\ \sigma &= .67 & R &= .784 \end{aligned}$$

رابطه (۴) را می‌توان در شکل ۶ که خط برازش بین مقدار پهنه‌های گسیختگی و بزرگی زمین لرزه را نشان می‌دهد، مشاهده کرد. نمودار نشان‌دهنده آن است که با افزایش بزرگای زمین لرزه بر پهنای پهنه گسیخته شده، اضافه می‌شود. این مهم در زمین لرزه‌های با بزرگای کم‌تر از ۵/۵ ریشتر معنادار نبوده و از همبستگی بسیار اندکی برخوردار است. به بیان دیگر احتمال ایجاد پهنه گسیخته شده در این گروه زمین لرزه‌ها بسیار کم است.



شکل ۶ ارتباط بین بزرگی زمین‌لرزه و پهنای پهنه گسیخته شده

بنابراین با لحاظ کردن میانگین ارقام استخراجی از بزرگای زمین‌لرزه برای گسل‌های منطقه (رابطه ۱)، شعاع گسلش (W) برای مراکز زمین‌لرزه‌های واقع در امتداد گسل‌های منطقه به شرح ذیل خواهد بود:

$$W = 8.2 - (1.532 \times 7) = 2.5 \text{ km} \pm 67 \quad \text{گسل درود:}$$

$$W = 8.2 - (1.532 \times 6.2) = 1.3 \text{ km} \pm 67 \quad \text{گسل ورکوه:}$$

$$W = 8.2 - (1.532 \times 6) = 1 \text{ km} \pm 67 \quad \text{گسل شاه‌نشین:}$$

$$W = 8.2 - (1.532 \times 5.9) = 0.9 \text{ km} \pm 67 \quad \text{گسل احمدعلی:}$$

$$W = 8.2 - (1.532 \times 5.8) = 0.7 \text{ km} \pm 67 \quad \text{گسل حسین‌ابن‌علی:}$$

$$W = 8.2 - (1.532 \times 5.8) = 0.7 \text{ km} \pm 67 \quad \text{گسل گاومیر:}$$

۴-۳- سنجش بزرگای زمین‌لرزه و میزان جابه‌جایی

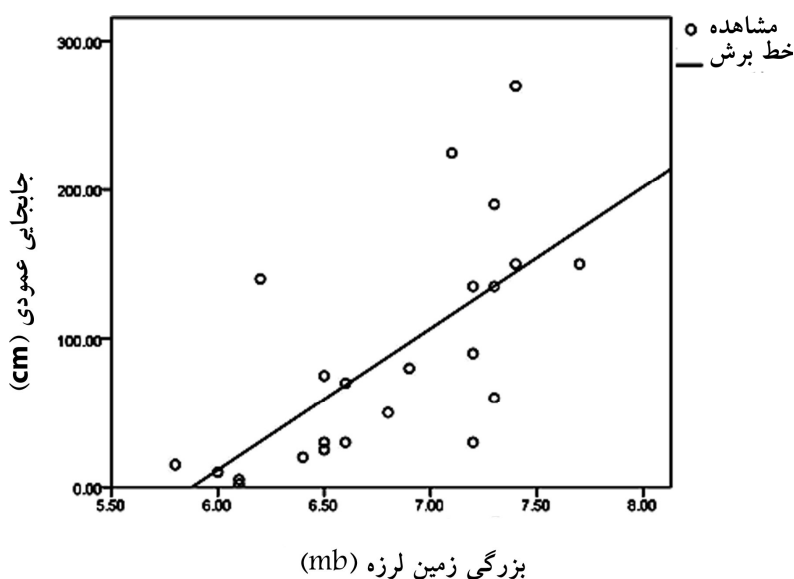
میزان جابه‌جایی عمودی یکی دیگر از فاکتورهای مؤثر در افزایش میزان خسارت زمان رخداد زمین‌لرزه است. برای محاسبه میزان جابه‌جایی عمودی از تکنیک‌های تحلیلی آماری در جامعه

آماري مورد مطالعه بهره گرفته شده است. اعمال رگرسيون خطي حاصل از رابطه‌هاي تجربی بين بزرگاي زمين‌لرزه و جابه‌جايی عمودی بر اساس رابطه (۵) به دست آمد.

$$U = a + b M_w \quad \text{رابطه (۵)}$$

در اين رابطه U ميزان جابه‌جايی برحسب سانتيمتر است و M_w بزرگاي زمين‌لرزه برحسب ريشتر است.

شکل ۷ نشان‌دهنده رابطه بين بزرگاي زمين‌لرزه و حرکت عمودی زمين است. همان طور که در اين شکل ديده می‌شود با افزايش بزرگاي زمين‌لرزه بر ارتفاع گسيختگی اضافه می‌شود. بر پايه یافته‌هاي اين تحقيق زمين‌لرزه‌هاي با بزرگاي کوچک‌تر از ۵/۵ ريشتر توان ايجاد جابه‌جايی عمودی در زمين را ندارند.



شکل ۷ ارتباط بين بزرگاي زمين‌لرزه و حرکت عمودی زمين

بنا بر رابطه ۵، شکل ۷ و هم‌چنین براساس توان بالقوه هر گسل در ایجاد زمین‌لرزه مبتنی بر رابطه ۲ در تعیین بزرگای زمین‌لرزه، میزان جابه‌جایی عمودی برای گسل‌های عمده منطقه محاسبه شده است:

$$U = 559.589 - (95.18 \times 7) = 106 \text{ cm} \quad \text{گسل درود:}$$

$$U = 559.589 - (95.18 \times 6.2) = 30 \text{ cm} \quad \text{گسل ورکوه:}$$

$$U = 559.589 - (95.18 \times 6) = 11 \text{ cm} \quad \text{گسل شاه‌نشین:}$$

$$U = 559.589 - (95.18 \times 5.94) = 6 \text{ cm} \quad \text{گسل احمدعلی:}$$

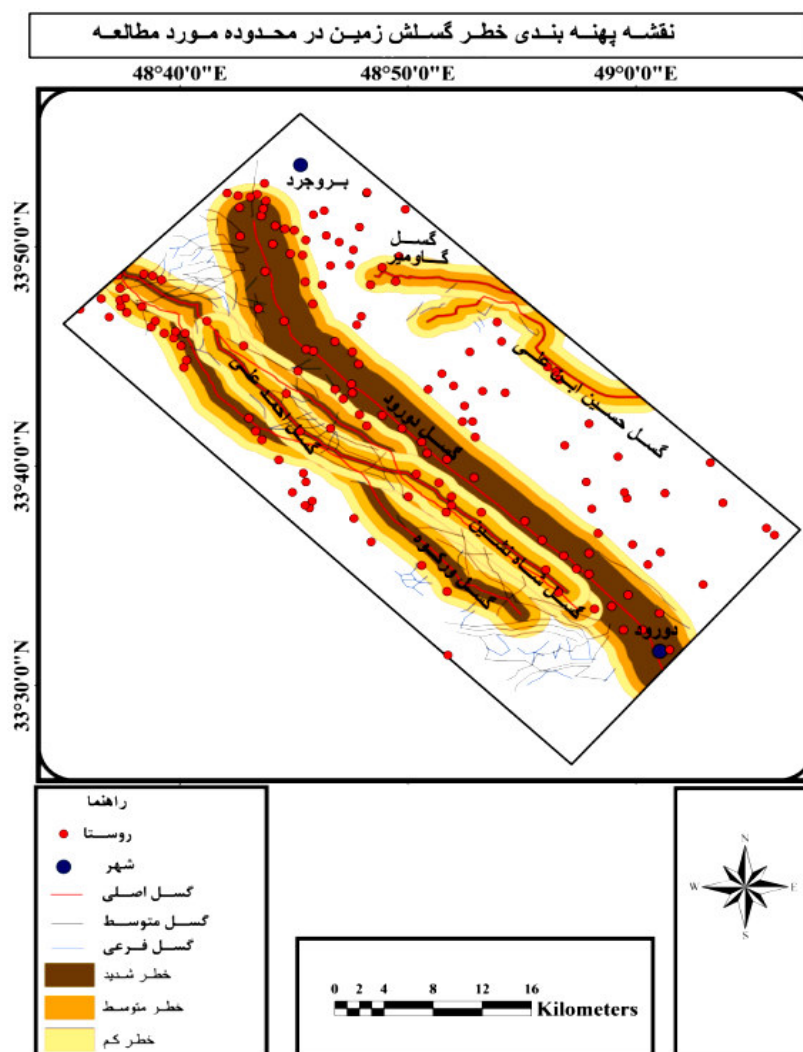
$$U = 559.589 - (95.18 \times 5.84) = 0 \text{ cm} \quad \text{گسل حسین‌ابن‌علی:}$$

$$U = 559.589 - (95.18 \times 5.82) = 0 \text{ cm} \quad \text{گسل گاومیر:}$$

کنترل صحت ارقام یافته شده مستلزم بررسی ارقام واقعی حاصل از رویداد آن در زمین‌لرزه‌های تاریخی است. در قدیمی‌ترین گزارش، امبرسیز و همکارش جابه‌جایی عمودی ناشی از زمین‌لرزه ۷/۴ ریشتری سال ۱۲۸۷ ه. ش. دشت سیلاخور را ۱۰۰ سانتی‌متر ذکر کرده‌اند (امبرسیز و ملویل، ۱۳۷۰: ۴۱۲). هم‌چنین در سال ۱۳۸۵، پیرت و پاکزاد در دو تحقیق جداگانه، میزان جابه‌جایی عمودی ناشی از زمین‌لرزه ۶/۱ ریشتری دشت سیلاخور را ۱۰ سانتیمتر محاسبه کرده‌اند (Pevet M, 2008:3; پاکزاد و میرزایی، ۱۳۸۶: ۲). این ارقام با داده‌های برآوردی این تحقیق که میزان جابه‌جایی را برای زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۷ ریشتر ۱۰۶ سانتی‌متر و میزان جابه‌جایی را برای زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۶/۱ ریشتر بین ۱۱ تا ۲۱ سانتیمتر پیش‌بینی کرده است؛ تاحدود زیادی هم‌خوانی داشته و پاسخ نزدیک به واقع ارائه می‌نماید.

برپایه یافته‌های فوق و با توجه به امکان محاسبه و تعیین پهنه‌های در معرض خطر لرزش میسر می‌شود. مبتنی بر این قابلیت و با توجه به این‌که گسیختگی سطحی زمین با آسیب‌پذیری تأسیسات و ساختمان‌ها از زمین‌لرزه رابطه و همبستگی معناداری دارد (گسیختگی بیش‌تر، آسیب‌پذیری افزون‌تر) اقدام به پهنه‌بندی خطر لرزش بر مبنای شدت گسیختگی ناشی از زمین‌لرزه احتمالی با پتانسیل و بزرگای برآورد شده در رابطه ۲ شد.

بر این اساس مناطق در معرض خطر گسلش زمین در سه طبقه مناطق با احتمال گسیختگی شدید $P=0$ (میانگین بزرگای زمین لرزه برآورد شده است)، مناطق با احتمال گسیختگی متوسط و $P=1$ ، (حداکثر بزرگای برآورد شده) و مناطق با احتمال گسیختگی کم $P=-1$ (حداقل بزرگای برآورد شده) مشخص شدند (شکل ۸).



شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی خطر گسیختگی زمین در دشت سیلاخور

۵- نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده روی زمین‌لرزه‌های تاریخی انتخاب شده برای ناحیه مطالعه شده نشان‌دهنده یافته‌های ذیل است:

- طول گسل با بزرگای زمین‌لرزه همبستگی مثبت و معناداری دارد و از طریق تعیین طول گسل می‌توان بزرگای آن را برآورد کرد.

- رخداد زمین‌لرزه ناشی از گسل با طول کم‌تر از ۲۵ کیلومتر از احتمال اندک و ناچیز برخوردار است. به بیان دیگر گسل مسبب یک زمین‌لرزه باید طول بیش از ۲۵ کیلومتر داشته باشد.

- تحقیق روشن کرد که گسل درود با قابلیت رخداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۷/۰۱ ریشتر، اصلی‌ترین و پر خطرترین گسل ناحیه است. گسل‌های ورکوه با بزرگای ۶/۲ و گسل شاه‌نشین با بزرگای ۶ ریشتر در رده‌های بعدی قرار دارند.

- بزرگای زمین‌لرزه می‌تواند تعیین‌کننده میزان گسیختگی سطحی و دامنه آن باشد. این مسأله مهم در مورد زمین‌لرزه‌های ۵/۵ ریشتر و بالاتر معنا دار بوده و احتمال رخداد گسیختگی ناشی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای کم‌تر از ۵/۵ ریشتر کم است.

- یافته‌های تحقیق نشان داد که گسل درود با قابلیت رخداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۷/۰۱ واجد پهنای گسیختگی به شعاع ۲/۵ کیلومتر در امتداد طول خود خواهد بود. این رقم برای گسل ورکوه ۱/۵۳ کیلومتر، گسل شاه‌نشین ۱ کیلومتر تعیین شد.

- پژوهش حاضر نشان‌دهنده آن است که دامنه گسیختگی تابعی از طول گسل بوده و یک گسل با قابلیت زمین‌لرزه ۷/۱ ریشتری قادر به ایجاد گسیختگی مؤثر در امتداد خطی به طول ۳۸ درصد طول خود است.

- یافته‌های تحقیق نشان‌دهنده عدم امکان جابه‌جایی عمودی در زمین‌لرزه با شدت کوچک‌تر از ۶ ریشتر است. در این صورت گسل‌های درود، ورکوه، شاه‌نشین، واجد توانمندی احتمالی برای ایجاد جابه‌جایی ارتفاعی به میزان ۱۰۶، ۲۱ سانتی‌متر می‌باشند. هم‌چنین این میزان جابه‌جایی تنها برای ۳۷ درصد از طول گسل قابلیت مشاهده و رخداد خواهد داشت. هم‌نهادسازی یافته‌های تحقیق به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر لرزش و تجزیه و تحلیل آن نشان می‌دهد که ۲۳/۳ درصد (۲۸۴ کیلومترمربع) از محدوده مورد مطالعه در معرض

خطر گسلش شدید، ۲۳/۷ درصد (۲۸۸ کیلومتر مربع) از محدوده مورد مطالعه در معرض خطر گسلش متوسط و ۲۵/۷ درصد (۳۱۲ کیلومتر مربع) از محدوده مورد مطالعه در معرض خطر گسلش کم قرار دارد. استخراج بررسی‌ها روی نقشه پهنه‌بندی خطر گسلش در منطقه نشان می‌دهد که شهر درود و ۵۳ روستا از ۱۶۳ روستای محدوده در منطقه خطر گسلش شدید ۲۲ روستا در معرض خطر گسلش متوسط و ۳۷ روستا در معرض خطر گسلش کم قرار دارند. همچنین بخشی از جاده خرم‌آباد - بروجرد و بروجرد - درود در معرض خطر گسلش شدید و بخش‌های از این جاده‌ها در معرض خطر متوسط و کم و بخش‌های زیادی از جاده‌های فرعی توابع شهرستان درود و بروجرد در معرض خطر گسلش شدید تا کم قرار دارند.

۶- منابع

- بربریان و همکاران؛ پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت، لرزه زمین‌ساخت و خطر زلزله - گسلش در گستره تهران و پیرامون، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش شماره ۵۶، ۱۳۶۴.
- پاکزاد م.، میرزایی؛ بررسی سازوکار کانونی زلزله ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه سیلاخور؛ مجله فیزیک زمین فضا، شماره ۳۳ پیاپی (۳)، صص ۷۳-۸۶، ۱۳۸۶.
- زارع م.؛ خطر زمین‌لرزه و ساخت‌وساز در حریم گسل شمال تبریز و حریم گسلش گسل‌های زمین‌لرزه‌ای ایران؛ پژوهشکده زلزله و مهندسی زلزله، سال چهارم شماره دوم و سوم تابستان و پاییز ۸۰، ۱۳۸۵.
- فاطمی عقدا س. م؛ شناسایی روند گسل درود در مناطق آبرفتی؛ بنیاد مسکن انقلاب اسلامی (پژوهشکده سوانح طبیعی).
- معماریان ح.؛ هندسی زمین‌شناسی و ژئوتکتونیک؛ دانشگاه تهران، چاپ اول، ۱۳۷۴.
- امبرسیز. ن. ن.؛ چ. پ. ملویل؛ تاریخ زلزله‌های ایران؛ ترجمه ابولحسن رده، انتشارات آگاه، چاپ اول، پاییز ۱۳۷۰.
- Donald L. Wells, Coppersmith Kevin. J; New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface

- displacement; Bulletin of The Seismological Society of America; Vol. 84, No. 4, pp: 947-1002, 1994.
- Peyret M., Rolandone F., Dominguez S., Djamour⁵ Y., Meyer B.; Source model for the Mw 6. 1, 31 March 2006; Chalan-Chulan, Earthquake (Iran) from InSAR, Terra Nova, 20, pp: 126–133, 2008.
 - Zare M.; Site dependent attenuation of strong ground motions in Iran; Seismic Zonation, 5th International Conference. Proceeding. Vol. 2, pp: 1221- 1227, 1995.
 - Villy A. Konogianny & Stathis C. Stiros; Earthquakes and seismic faulting effects on Tunnels; *Turkish Journal of Earth Sciences* (Turkish J. Earth Sci.), Vol. 12. 2003.
 - Keller E. A., Pinter, N.; Active tectonics: Earthquakes, uplift and landscape; Prentice Hall, 2002.
 - Bachmanov D. M., V. G. Trifonov, Kh. T. Hessami, A. I. Kozhurin, T. P. Ivanova, E. A. Rogozhin, M. C. Hademi, F. H. Jamali. : Active faults in the Zagros and central Iran; *Tectonophysics* 380, 2004.
 - Gioetals M. M., S. Niedermann, R. Hetzel, C. R. FENton.; Determining the impact of faulting on the rate of erosion in a low-relief landscape: A case study using in situ produced Ne on active normal faults in the Bishop Tuff; California, *Geomorphology* 103, 2009.
 - Tsutsumi H., Yasuhiro S., Andrei I. Kozhurin, Mihail I. Streltove, Takeyuki Ueki, Hideaki Goto, Koji Okumura, Rustam F. Bulgakov, Hiroyuki Kitagava, (2007): Late Quaternary faulting along the western margin of the Poronaysk Lowland in central Sakhalin, Russia, *Tecnophysics* 405.
 - Rezanian M., Akbar A. Javadi, Orazio Giustolisi; Evaluation of liquefaction potential based on CPT results using evolutionary polynomial regression; *Computer and Geotechnics* 37.

- Dewoolkar M. M., H. -Y. Ko, R. Y. S. Pak., Experimental developments for studying walls with liquefiable backfills; Soil Dynamics And Earthquake Engineering 19, 2000.
- Readdy D. V., P. Nagabhushanam, Devender Kumar, B. S. Sukhija, P. J. Thomas., Anan K. Pandey, R. N. Sahoo, G. V. Ravi Prasad, K. Datta, Tectonophysics 474, 2009.