ارزیابی خطر گسلش و رده‌بندی گسل‌های فعال اطراف سد شهید رجایی ساری براساس میزان فعالیت

مهدی سعیدیان*، دانشگاه صنعتی شاهرود
ناصر حافظی مقدس؛ دانشگاه فردوسی مشهد
رمضان رمضانی اومالی؛ دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ: دریافت ۹۲/۲/۳ **پذیرش** ۹۳/۲/۱

چکیده

تعیین میزان فعالیت گسل‌ها از جمله مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی خطر گسلش است. در این مقاله گسل‌های فعال محدودهٔ سد شهیدرجایی ساری به شعاع ۱۰۰ کیلومتر بر مبنای بُعد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه و هم‌چنین ارزیابی میزان لغزش رده‌بندی شده و میزان فعالیت آن‌ها بررسی شد. به‌منظور تعیین بُعد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه از روش مربع شمار[1] استفاده شد. برای برآورد میزان لغزش ابتدا پارامترهای لرزه‌خیزی (a,b) محدودهٔ بررسی شده تعیین، سپس این پارامترها برای هر گسل نرمالیزه شدند. براساس روابط موجود و با داشتن a و b برای هر گسل، میزان گشتاور لرزه‌ای گسل محاسبه شد. در نهایت طبق روابط موجود برای محاسبهٔ میزان گشتاور لرزه‌ای، میزان لغزش هر گسل تعیین و گسل‌های محدودهٔ بررسی شده بر این اساس رده‌بندی شدند. با درجه‌بندی براساس ابعاد فرکتالی، گسل‌های شمال البرز، دامغان و گرمسار طی ۱۰۰ سال گذشته از فعال‌ترین گسل‌های محدودهٔ بررسی شده بوده‌اند و براساس برآورد میزان فعالیت گسلش و زمین‌لرزه به‌روش تحلیل فرکتالی، عموماً در ردهٔ BD قرار گرفته و فعال بودن آن‌ها تأیید شده است. گسل‌های با میزان لغزش خیلی‌کم و با دورهٔ بازگشت طولانی رویداد زمین‌لرزه‌ها، سبب وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگی می‌شوند که زمین‌لرزه ۲۳۵ خورشیدی (۸۵٦ میلادی) کومس و گسل مسبب آن یعنی گسل دامغان نمونه‌ای از این گسل‌ها است. گسل‌های آستانه، رمه و چشمه‌علی میزان لغزش کم است و در نتیجه می‌توانند گشتاور لرزه‌ای بزرگتری ایجاد نمایند. با توجه به رویداد زمین‌لرزه‌ها در حریم گسل‌های جدید معرفی شده (خرم آباد، مجید و ...)، میزان فعالیت زیاد این گسل‌ها منطقی به‌نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: سد شهیدرجایی، ساری، بُعد فرکتالی، گشتاور لرزه‌ای، میزان لغزش

* **نویسندهٔ مسئول** m.saeidian@gmail.com

۱. Box-counting

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

مقدمه

توصیف کمی ساختارهای خطی، الگوهای پیچیده‌ای را در مقیاس‌های مختلف نشان می‌دهد. هندسهٔ جدید فرکتالی که مندل‌بروت[۱] (۱۹۸۲) ابداع کرده است [۱]، توصیف کمی الگوی پیچیدهٔ گسل‌ها را میسر می‌سازد. بر مبنای پژوهش‌های سوکمونو[۲] و همکاران (۱۹۹۷) که پهنهٔ گسلش سوماترا[۳] را تحلیل فرکتالی کرد [۲]، توزیع مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌ها در این پهنهٔ گسلش به‌شدت در ارتباط با توزیع هندسهٔ فرکتالی گسلش است. از روش‌های متداول در تشخیص هندسهٔ فرکتالی پهنه‌های گسلش، روش مربع‌شمار است و براساس این روش بعد فرکتالی در هر منطقه محاسبه و تفاوت‌های موجود در ابعاد فرکتالی مناطق مختلف مشخص می‌شود.

وجود اختلاف بُعد فرکتالی در بخش‌های متفاوت پهنهٔ گسلش نشان‌گر تفاوت هندسهٔ سیستم گسلش آن بخش‌ها با یک‌دیگر است [۳]. مقدار کم بُعد فرکتالی نشان‌گر این است که گسترهٔ سطحی سیستم گسل محدود است و دگرشکلی در آن به حد نهایی رسیده است [٤]. هم‌چنین مقدار زیاد بُعد فرکتالی نشان‌گر گسترهٔ سطحی زیاد سیستم گسلی و بلوغ کم‌تر آن است [۳].

برآورد میزان گشتاور روشی به‌نسبت نوین، در بررسی میزان فعالیت زمین‌ساختی مناطق مختلف به‌شمار می‌رود. روش معمولی تشریح چشمه‌های لرزه‌زا، توصیف این چشمه‌ها با استفاده از مدلی تقریبی از نیروهای معادل[٤] است که این نیروها با کمیت دیگری به نام تنسور گشتاور نمایش داده می‌شوند. روش گشتاور لرزه‌ای که به تخمینی از بزرگای زمین‌لرزه منجر می‌شود، بهترین انطباق را با نظریه و مشاهدات لرزه‌ای دارد. گشتاور لرزه‌ای را می‌توان براساس لرزه نگاشت‌ها و هم‌چنین با برقراری رابطهٔ بین گشتاور لرزه‌ای و اطلاعات زمین‌شناختی برآورد کرد [٥].

اسمیت[٥] (۱۹۷٦) پیشنهاد کرد تا از تخمین میزان لغزش برای برآورد زمین‌لرزهٔ بیشینه استفاده شود [٦]. او از رابطهٔ گشتاور- لغزش گسل برون[٦] [۷] و بزرگا-فراوانی گوتنبرگ[۷] و ریشتر[۸] (۱۹٤٤) برای توسعهٔ رابطهٔ خود بهره گرفت. براساس پژوهش‌های وسنوسکی[۹] (۱۹۸٦)

۱. Mandelbrot ۲. Sukmono ۳. Sumatra ٤. Equivalent forces
٥. Smith ٦. Brune ۷. Gutenberg ۸. Richter ۹. Wesnousky

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

گسل‌های با لغزش کم، که دورهٔ بازگشت رویداد زمین‌لرزه‌ها در آن‌ها طولانی است [۸]، می‌توانند زمین‌لرزه‌های بزرگی ایجاد کنند که کم‌تر رخ می‌دهند. این پژوهش به‌منظور شناسایی گسل‌های فعال گسترهٔ سد شهیدرجایی و برآورد میزان فعالیت این گسل‌ها در آینده انجام شده است.

موقعیت سد

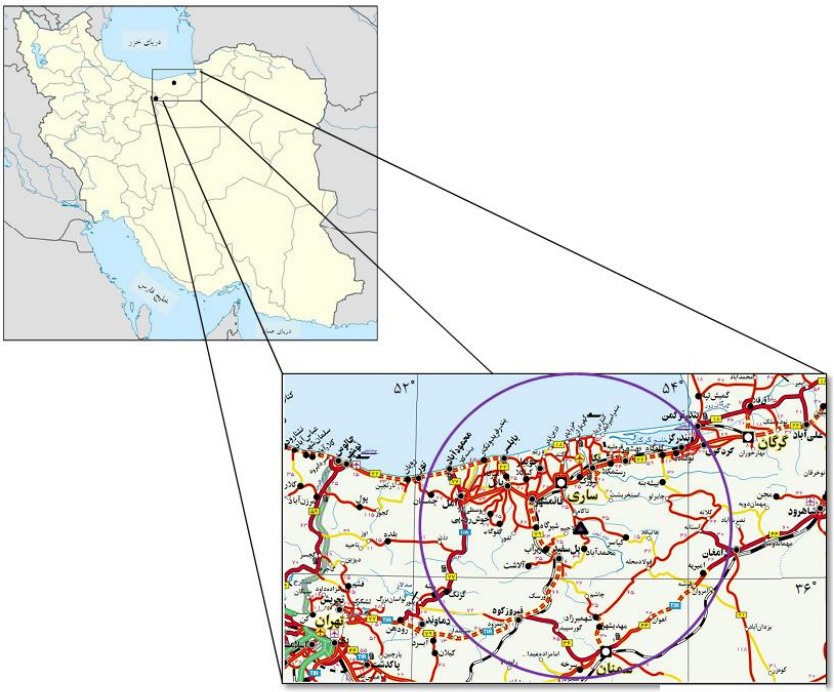
سد شهیدرجایی با مختصات ″۱۳′۰۷°۵۳ طول جغرافیائی و ″۱٤′۹٤°۳٦ عرض جغرافیایی حدود ٤۰ کیلومتری جنوب ساری احداث شده است. ارتفاع این سد ۱۳۸ متر و طول تاج ٤۲۸ متر و حجم مخزن ۱٦۲ میلیون مترمکعب است و از اصلی‌ترین سدهای استان مازندران به‌شمار می‌رود. محدودهٔ بررسی شده، شعاع ۱۰۰ کیلومتری ساخت‌گاه سد شهیدرجایی را دربر می‌گیرد. از جمله راه‌های دسترسی به ساخت‌گاه سد شهیدرجایی، جادهٔ فرعی آسفالتهٔ منشعب شده از روستای تاکام در محور اصلی ساری-کیاسر- دامغان است (شکل ۱).

تاریخچهٔ لرزه‌خیزی و سایز موتکتونیک منطقه

برای بررسی خصوصیات سایزموتکتونیکی، کاتالوگ لرزه‌ای شامل زمین‌لرزه‌های تاریخی (برگرفته از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی آمبرسیس[۱] و ملویل[۲] (۱۹۸۲) و بربریان (۱۳۷٤) و زمین‌لرزه‌های دستگاهی (برگرفته از کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (بازهٔ زمانی ۲۰۱۱-۱۹۰۰) و کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (بازهٔ زمانی ۲۰۱۱-۱۹۹٦)) استخراج شد. در این پژوهش گسل‌های محدودهٔ سد شهیدرجایی ساری به شعاع ۱۰۰ کیلومتر با نقشه‌های زمین‌شناسی گستره (به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰)، نگاره‌های ماهواره‌ای لندست ۷، نقشه‌های توپوگرافی (به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰)، نقشه‌های ساختاری و لرزه‌زمین‌ساختی منطقه، داده‌های SRTM، انجام بررسی‌های صحرایی و در نهایت تکمیل فهرست زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی محدودهٔ بررسی شده، به‌منظور انطباق گسل‌های شناخته شده و شناسایی شده با زلزله‌های ثبت شده، بررسی شدند. در این بررسی تمامی گسل‌های با طول بیش از ۱۰ کیلومتر که در نقشه‌های ساختاری و زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه ترسیم شده‌اند، بررسی شدند. لازم به‌ذکر است که با بررسی‌های انجام شده

۱. Ambraseys ۲. Melville

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی محدودهٔ بررسی شده و ساخت‌گاه سد شهیدرجایی (برگرفته از اطلس راه‌های کشور، مقیاس: ۱:۲۵۰۰۰۰۰ [۹])

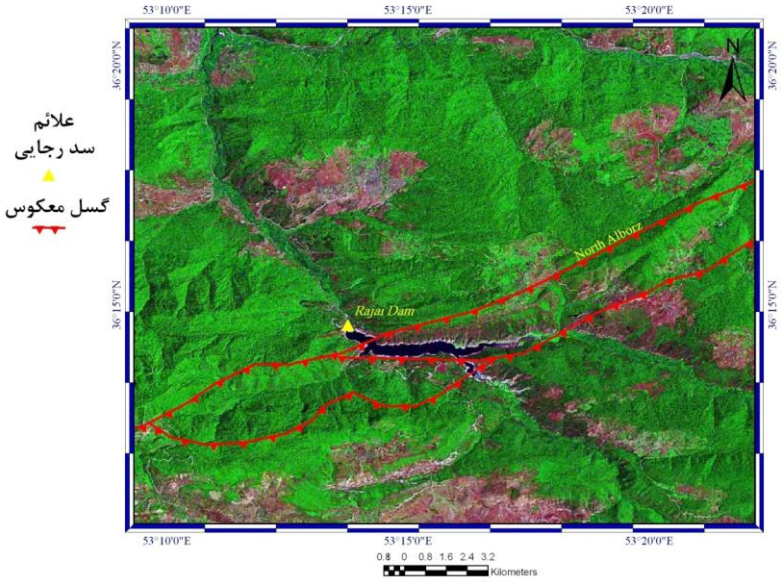
روی این گسل‌ها مشخص شد که تعدادی از این گسل‌ها در مناطقی نیاز به اصلاح خط اثر گسل نسبت به توپوگرافی دارند که این اصلاحات نیز انجام شد. براساس روش‌های بیان شده برای شناسایی گسل‌ها، گسل‌های جدیدی در محدودهٔ بررسی شده معرفی شدند. بررسی‌های انجام گرفته در حوزهٔ ۳۰ کیلومتری، منجر به‌شناسایی و معرفی گسل‌های مرگاو، تلاوک، شالمک، مجید، ولیک‌بن، جورجاده، خرم‌آباد و زیرآب با سازوکار غالب معکوس و گسل سوخته‌سرا با سازوکار غالب امتدادلغز چپ‌بر شد (شکل ۲). از مهم‌ترین گسل‌های بنیادی و فعال منطقه می‌توان به گسل‌های شمال البرز، خزر، مشا، عطاری، دامغان، فیروزکوه و آستانه اشاره کرد. در ادامه به معرفی اجمالی از این گسل‌ها و زمین‌لرزه‌های منتسب به آن‌ها می‌پردازیم.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

گسل شمال البرز

این گسل در دامنهٔ شمالی البرز به‌طول تقریبی ۵۵۰ کیلومتر، از لاهیجان تا جنوب گنبدکاووس و موازی ساحل خزر کشیده شده و در ناحیهٔ البرز مرکزی و حدود طول جغرافیایی ۵۳ درجه خاوری خمیده شده است. گسل شمال البرز نزدیک‌ترین گسل به ساخت‌گاه سد شهیدرجایی با فاصلهٔ حدود ۸۰۰ متر به‌صورت پهنهٔ گسلی در بخش جنوبی ساخت‌گاه قرار گرفته و یکی از شاخه‌های اصلی آن از میان دریاچهٔ سد عبور می‌کند (شکل ۲). طبسی و عباسی (۱۳۸۱)، گسل شمال البرز را به‌صورت یک پهنهٔ گسلی با عرض بیش از ۱۰ کیلومتر معرفی کرده‌اند [۱۲]. سازوکار اصلی آن در بخش خاوری به‌صورت معکوس همراه با مؤلفهٔ کوچک راستالغز راست‌بر و در بخش مرکزی جنبش راستالغز کوچک آن به چپ‌بر تغییر می‌کند.

داده‌های زمین‌لرزه‌ای تاریخی و عهد حاضر، دلالت بر جنبش بخش‌های خاوری این گسل دارد و زمین‌لرزهٔ سال ۱۱۲۷ میلادی فریم- چهاردانگه (شمال کیاسر) با بزرگی Ms=٦/٨ بربریان[۱] (۱۹۸۱) به این گسل نسبت داده شده است [۱۳].



شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای لندست[۲] از پهنهٔ گسلی شمال البرز در محدودهٔ ساخت‌گاه سد شهید رجایی و عبور شاخهٔ گسلی اصلی این پهنه از میان دریاچهٔ سد شهید رجایی

۱. Berberian ۲. Landsat

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

گسل خزر

گسل خزر، واقع در مرز ساختاری در حاشیهٔ جنوبی خزر با درازای بیش از ٦۰۰ کیلومتر است. این گسل با راستای خاوری- باختری، شیب به‌سوی جنوب و سازوکار فشاری با مؤلفهٔ راستالغز، در شمال کوه‌های البرز و جنوب دشت کرانه‌ای مازندران از گرگان تا لاهیجان کشیده شده است. بررسی داده‌های لرزه‌خیزی نشان می‌دهد که جنبش این گسل، رویداد زمین‌لرزه‌های متعددی را سبب شده است و گسل خزر، گسلی بسیار لرزه‌زا محسوب می‌شود. زمین‌لرزه‌های ۲٥۳ شمسی (۸۷٤ میلادی) گنبدکاووس با بزرگی Ms=٦ و شدت Io=VII+، ۱۳۲۲ گرگان با بزرگی Ms =٥/۲ و شدت Io=VII [١٤]، [١٥]، زمین لرزه‌های ۱۳۱۲ گرگان، ۱۳۳٦ سنگچال، ۱۳٦۸ رودبار و زمین‌لرزه ۱۳۸۳ بلده با بزرگی Mw =٦/۲ [١٦]، به این گسل نسبت داده می‌شوند.

گسل مشا

دلن‌باخ[1] (۱۹٦٤) [۱۷]، نخستین بار گسل مشا را به‌نام گسل مشا- فشم معرفی کرد و سپس بربریان و همکاران (۱۳٦٤) [۱۸]، نام آن را به گسل مشا تغییر دادند و آن را با شیب ۷۰-۳٥ درجه رو به‌شمال و درازای تا ۲۰۰ کیلومتر معرفی کردند. سلیمانی‌آزاد و همکاران (۱۳۸۲) بررسی‌های دورسنجی و ریخت زمین‌ساختی بر روی پهنهٔ گسلی مشا، این گسل را از شمال خاوری روستای امین‌آباد فیروزکوه آغاز و پس از گذر از دره‌های تار، مشا و آیگان در باختر با روند °۱۲٥-°N۱۱۰ درجه ادامه دادند [۱۹]. از انتهای دره شهرستانک-پل خواب نیز این گسل با تغییر روند به سوی جنوب باختر (در راستای°N۷٥E) به‌صورت چند شکستگی ناپیوسته قابل پیگیری است. براساس تحقیقات آمبرسیس و ملویل (۱۹۸۲) و هم‌چنین بربریان[2] و ییتز[3] (۱۹۹۹) [۲۰]، دست‌کم سه زمین‌لرزهٔ ویران‌گر تاریخی و یک زمین‌لرزهٔ سدهٔ بیستم روی گسل مشا در بخش‌های باختری و خاوری آن روی داده است.

گسل آستانه

گسل پویای آستانه با روند کلی شمال خاوری- جنوب باختری در بخش خاوری البرز مرکزی قرار دارد. نخستین بار بربریان (۱۳٦۳) این گسل را در باختر روستای آستانه (شمال

۱. Dellenbach ۲. Berberian ۳. Yeats

باختری دامغان) و در مجاورت روستای آستانه- فولاد محله به‌صورت دو گسل موازی در کنار هم شناسایی کرد [۲۱]. وی این گسل را با ذکر نشانه‌هایی از برش چپ‌بر در رسوبات آبرفتی کواترنر و با درازایی بیش از ۷۵ کیلومتر در جنوب باختری آستانه و چشمه علی معرفی، و سازوکار گسل آستانه را به‌صورت راندگی با مؤلفهٔ راستالغز چپ‌بر اعلام کرد. نظری (۲۰۰٦) بر سازوکار راستالغز چپ‌بر به‌همراه مؤلفهٔ عادی اعتقاد دارد [۲۲]. طی بررسی‌های صحرایی، دو خطوارهٔ گسلی به‌فاصلهٔ ۱۵ تا ۲۰ متر در بالای روستای آستانه قابل مشاهده‌اند که براساس زاویهٔ ریک برداشت شده از خش‌لغزهای سطح گسل، سازوکار راستالغز چپ‌بر قابل تشخیص است. براساس تصاویر ماهواره‌ای نیز جابه‌جایی چپ‌بر در نهشته‌های آبرفتی نمایان است.

گسل دامغان

کرینسلی[1] (۱۹۷۰) نخستین بار این گسل را نوعی گسل نرمال با شیب به‌سوی جنوب همراه با فرو افتادن بخش جنوبی دانست [۲۳]. امیدی (۱۳۸۰) با استفاده از پژوهش‌های پیشین و به استناد بررسی و برداشت روی زمین در پهنهٔ گسله، گسل دامغان را بررسی کرده‌اند [۲٤]. ایشان معتقدند که نظام گسلی دامغان یکی از عناصر تکتونیکی مهم در پهنهٔ برشی هم‌گرای چپ‌گرد آستانه- عطاری در نیمهٔ جنوبی البرز خاوری است که از شمال به گسل آستانه- طزره و از جنوب به گسل عطاری محدود، و قابل تفکیک به ٤ قطعه است.

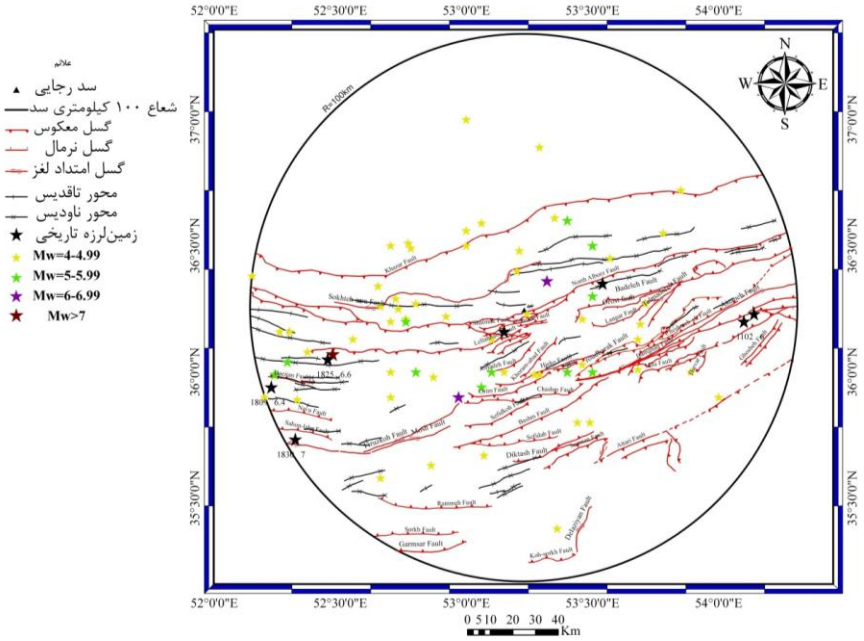
در ادامه نقشهٔ سایزموتکتونیکی محدودهٔ سد شهید رجایی به شعاع ۱۰۰ کیلومتر نشان داده شده است (شکل ۳).

روش پژوهش و معیارهای درجه‌بندی فعالیت گسل‌ها

روش‌ها و پارامترهای متعددی برای درجه‌بندی فعالیت گسل‌ها وجود دارد. برخی از این روش‌ها شامل درجه‌بندی براساس شواهد ریخت زمین‌ساختی، میزان وقوع زمین‌لرزه‌ها و اندازه‌گیری‌های GPS هستند. از جمله نوین‌ترین این روش‌ها، درجه‌بندی براساس بعد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه و درجه‌بندی براساس گشتاور لرزه‌ای و میزان لغزش است. نتایج این روش برای اولویت‌بندی مناسب چشمه‌های لرزه‌زا در روش تحلیل خطر بر مبنای سناریوهای

۱. Krinsley

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]



شکل ۳. نقشه سایزموتکتونیکی گستره سد شهید رجایی
(بر مبنای بررسی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰)

لرزه‌ای قابل استفاده است و به‌نوعی از مزیت‌های استفاده از این روش است. در ادامه این روش بحث و بررسی می‌شود.

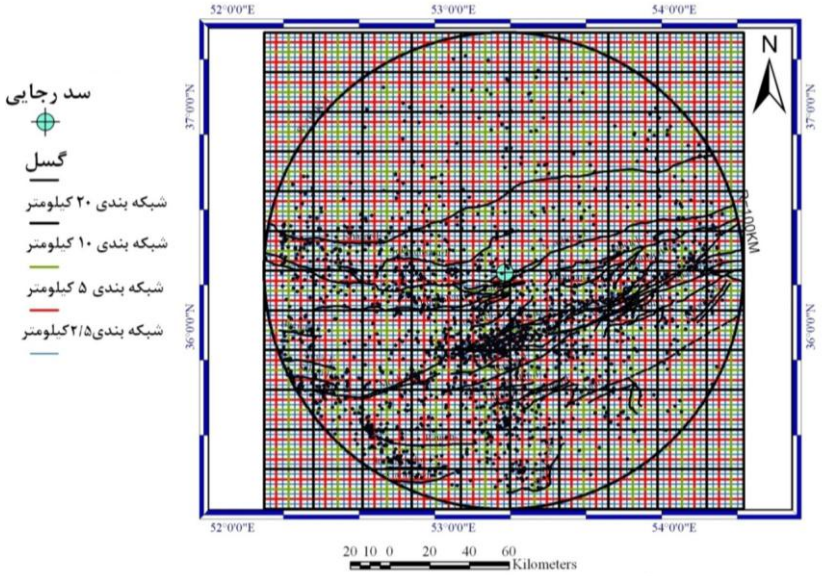
درجه‌بندی فعالیت گسل‌ها براساس بُعد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه

در این پژوهش، با تعیین بُعد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه و تقسیم‌بندی گسل‌ها براساس این ابعاد فرکتالی، درجهٔ فعالیت گسل‌های محدودهٔ سد شهید رجایی تعیین شد.

بُعد فرکتالی گسل‌های و زمین‌لرزه‌های محدودهٔ بررسی شده به‌روش مربع‌شمار محاسبه شد. برای تحلیل فرکتالی به‌روش مربع‌شمار لازم است ابتدا نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی به‌همراه بررسی‌های صحرایی بررسی شوند و خطوط ساختاری پهنهٔ گسلش به‌دقت برداشت شوند. برای تعیین بُعد فرکتالی، گسترهٔ ۱۰۰ کیلومتری سد به چهارگوش‌های اصلی با طول اضلاع ۲۰ کیلومتر شبکه‌بندی شد. در ادامه هر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

یک از این چهارگوش‌های مربعی در طی سه مرحله و با طول اضلاع متفاوت (S) ۱۰، ۵ و ۲/۵ کیلومتر از نظر فرعی شبکه‌بندی شدند (شکل ٤).



شکل ٤. شبکه‌بندی محدودهٔ ۱۰۰ کیلومتری سد برای تحلیل فرکتالی

در هر یک از مراحل چهارگانه، تعداد چهارگوش‌های مربعی که آثار خطی پهنهٔ گسلی از آن‌ها عبور می‌کند (Ns) شمارش شد و با استفاده از ترسیم نمودار لگاریتمی فراوانی (N) برحسب عکس طول اضلاع (۱/S) در هر مرحله، بُعد فرکتالی هر گسل محاسبه شد. برای تعیین بُعد فرکتالی زمین‌لرزه‌ها نیز بدین‌صورت عمل گردید که تعداد چهارگوش‌هایی که مراکز سطحی زمین‌لرزه‌ها در آن‌ها قرار گرفته و اثر خطی گسل نیز از آن شبکه می‌گذرد، شمارش شده، نمودار لگاریتمی برای آن ترسیم و بُعد فرکتالی زلزله محاسبه گردید.

براساس نمودار لگاریتمی، شیب خط رگرسیون (D) را به‌عنوان بُعد فرکتالی در نظر می‌گیریم که بدین‌صورت محاسبه می‌شود:

$$\text{Log}(Ns)=a+D\text{Log}(1/s) \qquad (۱)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

در این رابطه a عرض از مبدأ و D شیب خط و نشان‌دهندهٔ بُعد فرکتالی آن بخش از پهنهٔ گسلش است [۲۵]. برای درک نحوهٔ تعیین درجهٔ فعالیت هر گسل، محاسبات انجام شده برای قطعات سه‌گانهٔ گسل خزر به‌عنوان نمونه آورده شده است (جدول ۱).

برای بررسی درجهٔ فعالیت گسل‌های بزرگ، قطعه‌بندی این نوع گسل‌ها و تعیین درجهٔ فعالیت هر قطعه به‌صورت مجزا امری الزامی است، از این رو، در این بررسی براساس قطعه‌بندی در نظر گرفته برای گسل‌های شمال البرز، خزر، مشا و دامغان، ابعاد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه برای هر یک از قطعات آن‌ها جداگانه محاسبه شد.

جدول ۱. ابعاد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه و تعیین درجهٔ فعالیت قطعات سه‌گانه گسل خزر

درجهٔ فعالیت		N(F) بعد فرکتالی گسلش			N(EQ) بعد فرکتالی زمین‌لرزه		
S	۱/s	قطعهٔ ۱	قطعهٔ ۲	قطعهٔ ۳	قطعهٔ ۱	قطعهٔ ۲	قطعهٔ ۳
۲۰	۰/۰۵	٤	۳	٦	۱۰٦	۹۲	٤۰
۱۰	۰/۱	٦	۷	۱۳	۹۱	۳٤	۱۳
۵	۰/۲	۱۱	۱۳	۲۱	۳۰	۱۸	۸
۲/۵	۰/٤	۲۲	۲۵	٤۳	۱۹	۷	۵
	−۱/۳	۰/٦۰۲۱	۰/٤۷۷۱	۰/۷۷۸۲	۲/۰۲۵۳	۱/۹٦۳۸	۱/٦۰۲۱
	-۱	۰/۷۷۸۱	۰/۸٤۵۱	۱/۱۱۳۹	۱/۷۸۵۳	۱/۵۳۱۵	۱/۱۱۳۹
	−۰/٦۹۸۹	۱/۰٤۱٤	۱/۱۱۳۹	۱/۳۲۲۲	۱/٤۷۷۱	۱/۲۵۵۳	۰/۹۰۳۱
لگاریتمی	−۰/۳۹۷۹	۱/۳٤۲٤	۱/۳۹۷۹	۱/٦۳۳۵	۱/۲۷۸۸	۰/۸٤۵۱	۰/٦۹۹
بعد فرکتالی(D) براساس شیب نمودار		۰/۸۲۵	۱/۰۰۷	۰/۹۲۱	۰/۸٤٦	۱/۲۰٦	۰/۹۷
درجهٔ فعالیت		**A**	**B**	**B**	**C**	**D**	**D**

قطعه‌بندی

از جمله روش‌های متداول برای قطعه‌بندی گسل‌ها استفاده از ناپیوستگی‌های هندسی و داده‌های لرزه‌ای است. ناپیوستگی‌های هندسی گسل‌ها عبارتند از: پرش گسلی، خمش گسلی،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

انشعاب گسلی و اختتام گسلی. (پرش‌های گسلی مناطقی هستند که یک قطعه گسل در آن پایان و قطعه گسل نردبانی شکل بعدی با همان راستا در آن آغاز می‌شود)

قطعه‌بندی گسل شمال البرز

قسمتی از گسل شمال البرز که در محدودهٔ بررسی شده قرار می‌گیرد، قابل تقسیم به سه قطعه است. براساس قطعه‌بندی گسل‌ها بر پایهٔ ناپیوستگی‌های هندسی و هم‌چنین ویژگی‌های هندسی- جنبشی، قطعهٔ ۱ (بخش باختری)، از طول کلی گسل شمال البرز در محدودهٔ بررسی شده، تفکیک می‌شود (شکل ۵). با قطعه‌بندی گسل‌ها بر پایهٔ داده‌های لرزه‌ای و براساس دانسیتهٔ مراکز سطحی زمین‌لرزه‌های رویداده، دو قطعهٔ ۲ و ۳ نیز از هم تفکیک شدند. تفاوت در تعداد زمین‌لرزه‌های به‌وقوع پیوسته در این دو قطعه مؤید این قطعه‌بندی است (شکل ۵).

قطعه‌بندی گسل خزر

بخشی از گسل خزر که در محدودهٔ بررسی شده قرار می‌گیرد، قابل تقسیم به سه قطعه است. براساس قطعه‌بندی گسل‌ها بر پایهٔ ناپیوستگی‌های هندسی، قطعهٔ ۱ (بخش باختری) قابل تفکیک است (شکل ۵). براساس قطعه‌بندی گسل‌ها بر پایهٔ داده‌های لرزه‌ای می‌توان اظهار کرد که گسل خزر در راستای بخش خاوری خود دارای سابقه و پتانسیل لرزه‌خیزی متفاوتی هستند. از این رو، براساس مراکز سطحی زمین‌لرزه‌های دستگاهی روی‌داده در نزدیکی اثر سطحی این گسل‌ها و هم‌چنین دانسیتهٔ مرکز سطحی زمین‌لرزه‌ها، می‌توان قطعات ۲ و ۳ را از هم تفکیک کرده و به‌عنوان قطعات مجزایی در نظر گرفت (شکل ۵).

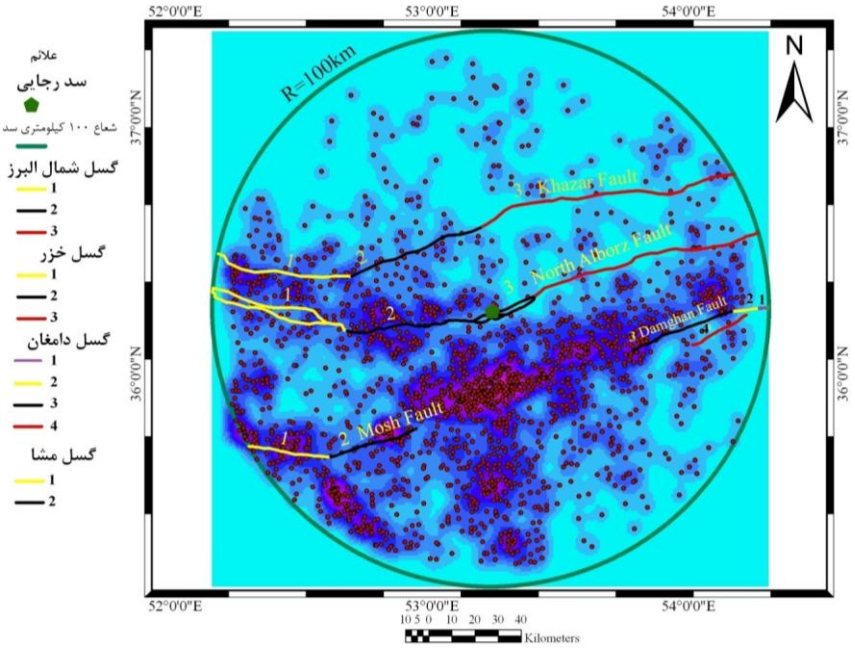
قطعه‌بندی گسل مشا

گسل مشا در محدودهٔ بررسی شده قابل تقسیم به دو قطعه است که براساس تغییر روند گسل از هم تفکیک می‌شوند. قطعهٔ خاوری روند تقریبی شمال خاوری- جنوب باختری (در راستای N۷۰°E) و قطعهٔ باختری روند شمال باختری- جنوب خاوری (در راستای N۸۰°W) دارند (شکل ۵).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

قطعه‌بندی گسل دامغان

امیدی و همکاران (۱۳۸۰) به استناد مشاهدات مستقیم روی زمین و جمع‌آوری داده‌های ساختاری و تلفیق آن‌ها با داده‌های دورسنجی، گسل دامغان را به ٤ قطعه تقسیم‌بندی کردند (شکل ۵). این قطعات عبارتند از قطعهٔ ده‌ملا–سیاه‌کوه، قطعهٔ سیاه‌کوه-رودبار، قطعهٔ رودبار–فولاد محله و قطعهٔ لبرود– شترگردن.

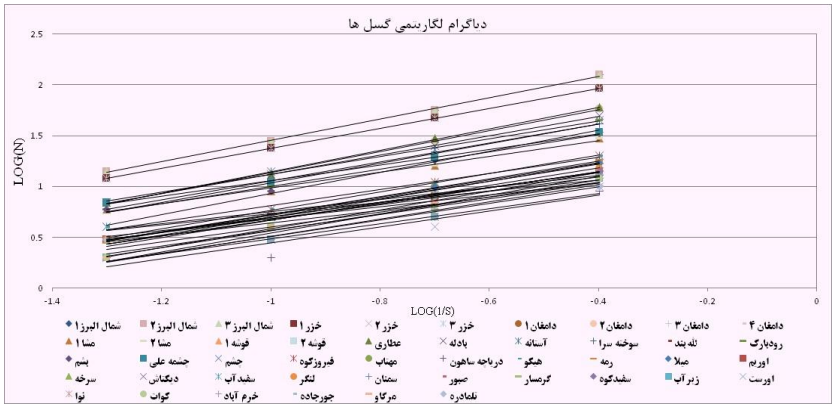


شکل ۵. قطعه‌بندی گسل‌های شمال البرز، خزر، دامغان و مشا بر پایهٔ ناپیوستگی‌های هندسی و داده‌های لرزه‌ای

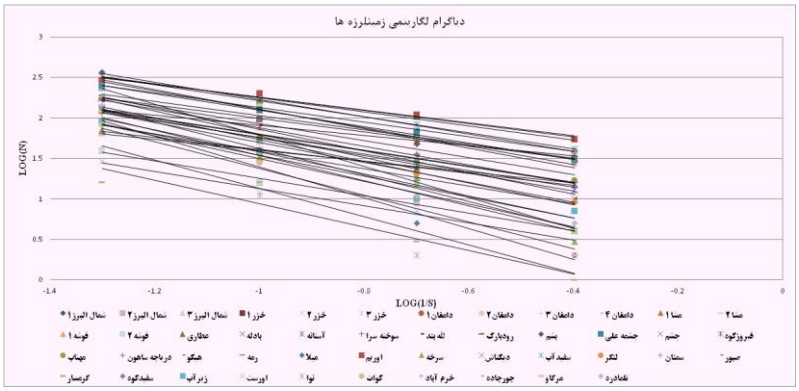
تعیین درجهٔ فعالیت

برای ارزیابی درجهٔ فعالیت گسلش در محدودهٔ سد شهید رجایی، تحلیل فرکتالی از گسلش و زمین‌لرزه در این محدوده انجام گرفت (شکل‌های ٦ و ۷). برای ارزیابی درجهٔ فعالیت هر گسل، تقسیم‌بندی بر مبنای میزان بعد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه تهیه شد (جدول ۲) و براساس این تقسیم‌بندی درجهٔ فعالیت هر یک از گسل‌های شناسایی شده در گسترهٔ ۱۰۰ کیلومتری سد شهید رجایی تعیین شد (جدول ۳).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]



شکل ٦. دیاگرام لگاریتمی 1/S به N_F برای گسل‌های گستره ۱۰۰ کیلومتری سد شهید رجایی



شکل ۷. دیاگرام لگاریتمی 1/S به N_{EQ} برای زمین‌لرزه‌های گستره ۱۰۰ کیلومتری سد شهید رجایی

جدول ۲. نحوهٔ تقسیم‌بندی بُعد فرکتالی گسلش و زمین‌لرزه و تعیین درجهٔ فعالیت

درجه فعالیت Activity grade(A.g)		بعد فرکتالی زمین‌لرزه	
		C (D<۰/۹)	D (D>۰/۹)
بعد فرکتالی گسلش	A (D<۰/۹)	AC (کم)	AD (متوسط)
	B (D>۰/۹)	BC (زیاد)	BD (خیلی زیاد)

درجه‌بندی فعالیت گسل‌ها براساس گشتاور لرزه‌ای و میزان لغزش

در این پژوهش براساس رابطهٔ تجربی بین گشتاور لرزه‌ای و اطلاعات زمین‌شناسی، میزان لغزش مربوط به گسل‌های محدودهٔ سد شهیدرجایی به شعاع ۱۰۰ کیلومتر تخمین و ارزیابی شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

جدول ۳. درجهٔ فعالیت گسل‌های محدودهٔ سد شهید رجایی براساس بُعد فرکتالی

گسل	درجهٔ فعالیت	گسل	درجهٔ فعالیت	گسل	درجهٔ فعالیت
قطعهٔ ۱ شمال البرز	BD	قطعه۱ خزر	AC	قوشه ۱	AD
قطعهٔ ۲ شمال البرز	BD	قطعه ۲ خزر	BD	قوشه ۲	AC
قطعهٔ ۳ شمال البرز	BC	قطعه ۳ خزر	BD	نوا	AD
قطعهٔ ۱ دامغان	BD	قطعه ۱ مشا	AC	کوات	AD
قطعهٔ ۲ دامغان	BC	قطعه ۲ مشا	AC	خرم آباد	AD
قطعهٔ ۳ دامغان	AD	چشم	AC	اوریم	AC
قطعهٔ ٤ دامغان	AD	سرخه	AD	بادله	BD
آستانه	AD	دیکتاش	AD	جورجاده	AD
عطاری	BC	سفیدآب	AD	مرگاو	AD
سوخته سرا	BD	لنگر	AD	مهتاب	AD
لَله بند	BD	سمنان	AD	دریاچه ساهون	AC
رودبارک	BC	صبور	AD	هیکو	AD
بشم	AD	گرمسار	BD	رمه	AD
چشمه‌علی	AD	سفیدکوه	BD	میلا	AD
اورست	AD	زیرآب	AD	تلمادره	AD
فیروزکوه	BC				

و برای برآورد بیشینهٔ بزرگا زمین‌لرزه‌ها نیز براساس میزان لغزش گسل‌ها از رابطهٔ اسمیت[1] (۱۹۷٦) استفاده شد. برای برآورد میزان لغزش ابتدا پارامترهای لرزه‌خیزی (a و b) محدودهٔ بررسی شده تعیین شد. در مرحلهٔ بعد، پارامترهای لرزه‌خیزی هر گسل براساس زمین‌لرزه‌های روی‌داده در حریم آن گسل، محاسبه شد. براساس روابط موجود و با در دست داشتن مقادیر a و b برای هر گسل، مقدار ممان لرزه‌ای آن گسل محاسبه شد. طبق روابط ارائه شده برای محاسبهٔ میزان گشتاور لرزه‌ای و با داشتن پارامترهای طول گسیختگی و عرض گسیختگی، مقدار لغزش هر گسل طبق میزان فعالیت آن تعیین شد. در نهایت، مقدار فعالیت هر گسل نسبت به مقدار فعالیت کلی (براساس بررسی‌های ژئودتیکی) مقایسه، درصد میزان فعالیت هر گسل محاسبه و گسل‌های محدودهٔ بررسی شده بر این اساس رده‌بندی شدند. پس از برآورد مقدار لغزش هر گسل، بیشینه بزرگای زمین‌لرزه‌ها برای هر گسل طبق این میزان لغزش تعیین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

شد. برای تعیین میزان فعالیت هر گسل از رابطهٔ بین پارامترهای گسل و گشتاور لرزه‌ای استفاده شده که بدین‌صورت است:

$$\overline{M_{\cdot}} = \mu L W \overline{D} \qquad (۲)$$

در این رابطه $M_{\cdot}$ گشتاور لرزه‌ای بر حسب (dyn-cm)، L طول گسیختگی گسل (Cm)، W عرض گسل (Cm)، D تغییر مکان میانگین در طول گسیختگی (Cm) و μ سختی (مدول برشی) ($۳/۵\times۱۰^{۱۱}$ dyn/cm^{۲} تا ۳ برای سنگ‌های پوسته) است [۵].

برای تعیین مقدار لغزش هر گسل، پارامترهای گشتاور لرزه‌ای، طول گسیختگی و عرض پهنهٔ گسیختگی هر گسل را برآورد و نهایتاً مقدار D (تغییر مکان میانگین یا مقدار لغزش گسل) محاسبه می‌شود. در این راستا به تشریح پارامترهای رابطهٔ (۲) می‌پردازیم.

۱. گشتاور لرزه‌ای ($M_{\cdot}$)

برای تعیین مقدار گشتاور لرزه‌ای مراحل زیر صورت می‌پذیرد:

- برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی ناحیه (a وb)

پارامترهای لرزه‌خیزی محدودهٔ بررسی شده براساس روش مقدماتی گوتنبرگ- ریشتر (۱۹۵۶) برآورد شد. در این رابطه فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها (N_C) به‌طور خطی و با در نظر گرفتن این رابطهٔ به بزرگا نسبت داده می‌شود:

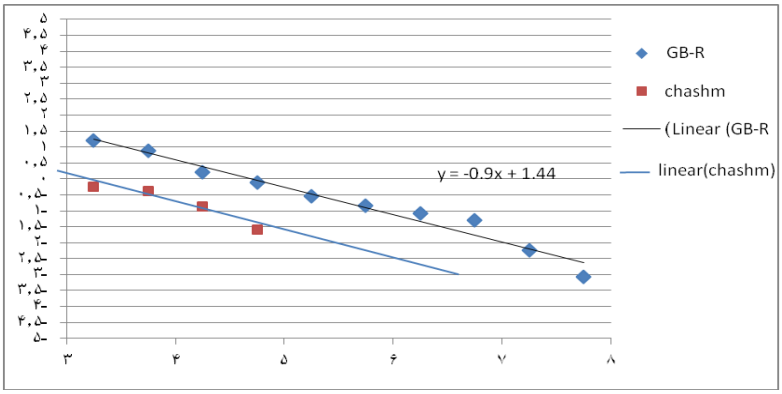
$$\mathrm{Log}(N_C) = a - bm \qquad (۳)$$

که a آهنگ رویداد سالیانه و b معرف میزان لرزه‌خیزی ناحیهٔ بررسی شده است.

شکل ۷ نشان‌دهندهٔ رابطهٔ گوتنبرگ- ریشتر براساس توزیع داده‌های واقعی در گسترهٔ ۱۰۰ کیلومتری ساخت‌گاه سد شهید رجایی است. برای برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی هر گسل و نرمالیزه کردن این پارامترها بدین‌صورت عمل گردید که تعداد زمین‌لرزه‌های موجود در حریم هر گسل را به‌عنوان زمین‌لرزه‌های متأثر از آن گسل در نظر گرفته و پارامترهای لرزه‌خیزی بر مبنای آن‌ها محاسبه شد. در این راستا پارامتر β که لرزه‌خیزی ناحیه‌ای را نشان می‌دهد، به‌صورت ثابت در نظر گرفته و پارامتر a را با مماس کردن خط گوتنبرگ- ریشتر بر داده‌های هر گسل (زمین‌لرزه‌های منتسب به هر گسل) و موازی با خط گوتنبرگ- ریشتر به‌دست آمده از داده‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

کلی (زمین‌لرزه‌های کلی ناحیه) به‌دست می‌آید. مقدار a به‌دست آمده از خط گوتنبرگ-ریشتر هر گسل را مقدار a برای کم‌ترین میزان زمین‌لرزهٔ روی‌داده (Ms=۳) در نظر می‌گیریم. در شکل ۸ نمونه‌ای از نرمالیزه کردن پارامترهای لرزه‌خیزی برای گسل چشم نشان داده شده است.



شکل ۸. خط گوتنبرگ- ریشتر برای زمین‌لرزه‌های محدودهٔ بررسی شده و خط موازی آن برای تعیین ضرایب لرزه‌خیزی گسل چشم

پس از تعیین پارامترهای a و b، میزان گشتاور لرزه‌ای هر گسل براساس روابط (٤) و (٥) محاسبه شد:

$$\overline{M_{۰}} = \mu L W \overline{D} \qquad (٤)$$

$$\overline{M_{۰}} = \sum_{M_{۰}}^{M_{\max}} N(m) M_{۰} = \sum_{M_{۰}}^{M_{\max}} ۱۰^{a-bm} ۱۰^{۱/۵m+۱۶}. \qquad (٥)$$

- طول گسیختگی (L)

طولی از گسل را که گسیختگی در آن صورت می‌گیرد و معمولاً معادل با ۰/۳۷ طول کل گسل است، به‌عنوان طول گسیختگی در نظر گرفته می‌شود [٢٦].

- عرض گسلش (w)

در این تحقیق برای برآورد عرض گسلش از رابطهٔ تجربی که زارع (۱۳۸۰) ارائه کرده (بین عرض پهنهٔ گسیختگی سطحی با طول گسیختگی سطحی گسل زمین‌لرزه‌ای (هر دو به کیلومتر) استفاده شد [٢٦]:

$$W = ۱۰^{(a-bmLR)} + \sigma.P_{۰} \qquad (٦)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

$$a = -۰/٤٥ \quad b = ۰/٤٨ \quad \sigma = ۰/۷ \quad P = ۰/۷۱$$

در این رابطه a، b، σ و P به‌صورت ضرایب ثابتند و خطای استاندارد برای ضریب a=۰/٤۲ و هم‌چنین برای ضریب b=۰/۲ است.

با تعیین پارامترهای .M، L و W هر گسل، مقدار D (تغییر مکان میانگین یا میزان لغزش گسل) محاسبه شده و این مقدار D نسبت به پژوهش‌های ژئودتیکی مقایسه شده است.

ورنانت[1] (۲۰۰٤) با اندازه‌گیری‌های GPS صورت گرفته بر روی ناحیهٔ البرز، میزان ۲± ۸ میلی‌متر کوتاه‌شدگی در سال را برای ناحیهٔ البرز و در راستای تقریباً شمالی- جنوبی برآورد کرد [۲٤]. در این پژوهش نیز مقدار لغزش کلی در ناحیهٔ را ۸ میلی‌متر در سال در نظر گرفته و محاسبات بر مبنای آن انجام پذیرفت. پس از تعیین درصد میزان لغزش، گسل‌های محدودهٔ بررسی شده براساس نسبت مقدار لغزش رده‌بندی شدند. برای رده‌بندی گسل‌ها طبق جدول (٤) عمل شده است. در جدول ۵ مقدار پارامتر a برای هر گسل ($a_{m.}$)، درجهٔ فعالیت یا مقدار لغزش (D)، نسبت میزان لغزش به لغزش کل در منطقه (D/Dt)، درصد درجهٔ فعالیت (%D) و ردهٔ هر یک از گسل‌های محدودهٔ بررسی شده نشان داده شده است.

جدول ٤. رده‌بندی صورت گرفته برای گسل‌های محدودهٔ بررسی شده براساس میزان لغزش آن‌ها

رده	میزان فعالیت	بازه
A	کم	D<۰/۳ mm/y
B	متوسط	۰/۳mm/y≤ D <۰/٤mm/y
C	زیاد	D ≥۰/٤ mm/y

۲. بیشینهٔ بزرگای زمین‌لرزه

برای برآورد بیشینه بزرگای زمین‌لرزه براساس میزان لغزش صورت گرفته، از رابطهٔ (۷) (اسمیت[2]، ۱۹۷٦) استفاده شد که بدین‌صورت است:

$$Ms = ۷/۲۲۳ + ۱/۲۶۳ \log s \qquad (۷)$$

در این رابطه s مقدار لغزش برحسب میلی‌متر در سال است. در جدول ۵ بیشینه بزرگای زمین‌لرزهٔ مربوط به هر یک از گسل‌های محدودهٔ بررسی شده آورده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

جدول .۵ رده‌بندی گسل‌های اطراف سد شهید رجایی براساس میزان لغزش آن‌ها

گسل	($a_{m.}$)	میزان لغزش	نسبت میزان لغزش	درصد درجه فعالیت	رده	بزرگی
خزر	۰/۲	۰/۳۲٤	۰/۳٤	٤/۹	B	٦/٦
بادله	۰/۲	۰/۲۱۷	۰/۲۳	۳/۳	A	٦/٤
عطاری	۰/۱۵	۰/۲۲۱	۰/۲٤	۳/٤	A	٦/٤
سوخته‌سرا	۰/۱	۰/۳۲۸	۰/۳۵	۵	B	٦/٦
شمال البرز	۰/۲۵	۰/۳۲۲	۰/۳٤	٤/۹	B	٦/٦
فیروزکوه	۰/۱۵	۰/۱۹۳	۰/۲۱	۲/۹	A	٦/۳
دیکتاش	۰/۱	۰/۲۲	۰/۲۳	۳/۳	A	٦/٤
چشم	۰/۲	۰/۵۳۷	۰/۵۷	۸/۲	C	٦/۹
چشمه‌علی	۰/۱۵	۰/۰۸۹	۰/۱	۱/۳	A	۵/۹
بایجان	۰/۱۵	۰/۲۱۱	۰/۲۲	۳/۲	A	٦/٤
هیکو	۰/۲	۰/۱۰۸	۰/۱۲	۱/٦	A	٦
مجید	۰/۱۵	۰/٤۲۳	۰/٤۵	٦/٤	C	٦/۷
رودبارک	۰/۱۵	۰/۰۹۹	۰/۱۱	۱/۵	A	۵/۹
لنگر	۰/۱۵	۰/۲۸۲	۰/۳	٤/۳	A	٦/۵
کوه سرخ	۰/۱۵	۰/۱٦	۰/۱۷	۲/٦	B	٦/٤
دامغان	۰/۱۵	۰/۰۲٦	۰/۰۳	۰/٤	A	۵/۲
مشا	۰/۲	۰/۰۹	۰/۱	۱/٤	A	۵/۹
ساهون	۰/۱	۰/٤۷	۰/۵	۷/۱	C	٦/۸
اوریم	۰/۲	۰/٤۳۷	۰/٤۷	٦/٦	C	٦/۸
آستانه	۰/۱۵	۰/۱۰۱	۰/۱۱	۱/۵	A	٦
خرم‌آباد	۰/۱۵	۰/٦۷۷	۰/۷۲	۱۰/۳	C	۷
جورجاده	۰/۱	۰/۱۷٦	۰/۱۹	۲/۷	A	٦/۳

نتیجه‌گیری

این پژوهش برای ارزیابی خطر گسلش و رده‌بندی گسل‌های فعال اطراف سد شهید رجایی ساری در قالب دو بحث ارزیابی بُعد فرکتالی و میزان جابه‌جایی انجام شد.

در بحث تحلیل فرکتالی، گسل‌های شمال البرز، دامغان و گرمسار از جمله فعال‌ترین گسل‌های محدودهٔ بررسی شده طی ۱۰۰ سال گذشته بوده‌اند. در مورد گسل‌های لَله‌بند، بادله

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

و سوخته‌سرا نیز می‌توان به‌فعالیت قریب‌الوقوع همراه با روی‌داد لرزه‌ای با بزرگی قابل ذکر آن‌ها اشاره کرد.

با ارزیابی میزان فعالیت براساس بیشینهٔ بزرگای زمین‌لرزه این نتیجه به‌دست می‌آید که میزان فعالیت برآورد شده برای گسل‌های با مقدار لغزش زیاد دقیق‌تر از میزان فعالیت برآورد شده برای گسل‌های با مقدار لغزش کم است.

گسل‌های معرفی شده در بخش جنوبی ساخت‌گاه سد شهید رجایی، از جمله گسل‌های مجید و باد دارای لغزش زیاد و به‌تبع آن بیشینهٔ زمین‌لرزهٔ چشم‌گیری دارند. با توجه به روی‌داد زمین‌لرزه‌ها در حریم گسل‌های جدید معرفی شده (خرم‌آباد، مجید و ...)، زیاد بودن میزان فعالیت این گسل‌ها منطقی به‌نظر می‌رسد.

با توجه به این‌که گسل‌های با مقدار لغزش کم که دورهٔ بازگشت روی‌داد زمین‌لرزه‌ها در آن‌ها طولانی است، می‌توانند زمین‌لرزه‌های بزرگی ایجاد کنند که کم‌تر به‌وقوع می‌پیوندند، در نتیجه زمین‌لرزهٔ سال ۸۵٦ میلادی کومس و گسل مسبب آن یعنی گسل دامغان را می‌توان از این نوع گسل‌ها دانست. هم‌چنین گسل‌های با مقدار لغزش خیلی کم، می‌توانند لغزش‌های بزرگ‌تر و به تبع آن گشتاور لرزه‌ای بزرگ‌تری ایجاد کنند. در نتیجه انتظار لغزش‌های بزرگ‌تر در آینده بر روی گسل‌هایی مانند آستانه، رمه، چشمه‌علی و ... را خواهیم داشت.

با توجه به‌مقدار لغزش کلی به‌دست آمده از روش گشتاور لرزه‌ای (٦/۵ میلی‌متر در سال) و میزان لغزش کلی بیان شده برای منطقه (۸ میلی‌متر در سال)، مشخص می‌شود که میزان لغزش کلی منطقه منتسب به گسل‌های اصلی منطقه نیست و حدود ۱/۵ میلی‌متر از این لغزش را می‌توان متأثر از سایر ساختارهای زمین‌شناسی از جمله گسل‌های فرعی و پنهان دانست.

منابع

1] Mandelbrot B. B, "The Fractal Geometry of Nature", W. H. Freeman, San Francisco, California (1982).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

2. Sukmono M. T. Z., Hendrajaya L. Kadir W. G. A., Santoso D., Dubois J., Fractal pattern of the Sumatra fault seismicity and its possible APP (1997).

۳. شهریاری س.، خطیب م. م.، *تحلیل فرکتالی سیستم گسلی نهبندان*، فصل‌نامهٔ علوم زمین، شمارهٔ ۲۳-۲٤ (۱۳۷٦) ۳۳-۳۹.

4. Cowie P. X., "Scaling laws for fault and fracture populations analysis and applications", J. Structural Geology (1996) 18.

5. Aki K., "Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, Part 2: Estimation of the earthquake moment", released energy and stress drop from the G wave spectra, Bull, Earthq, Res. Inst., 44, Japan: Univ. Tokyo (1966) 73-88.

6. Smith S. W., "Determination of maximum earthquake magnitude", Geophys, Res, Letters, 33 (1976) 351-354.

7. Brune J. N., "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake", Journal of Geophysical Research, Vol. 75, No. 26 (1970).

8. Wesnoosky S. G., "Earthquake quaternary fault and seismic hazards in California", Journal of Geophysical Research, Vol. 91(1986) 12587-12632.

۹. سازمان نقشه‌برداری کشور،*اطلس راه‌های ایران*، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰۰ (۱۳۸٤).

10. Ambraseys N. N, Melville C. P, "A history of Persian earthquakes", Cambridge University press, Cambridge, UK.2 (1982).

۱۱. بربریان م.، *نخستین کاتالوگ زلزله و پدیده‌های طبیعی ایران زمین، جلد نخست: خطرهای طبیعی پیش از سدهٔ بیستم*، موسسهٔ بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۷٤).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

۱۲. طبسی ه.، عباسی م. ر.، *الگوی دگرریختی و هندسهٔ پهنهٔ گسل شمال البرز (بین طول‌های جغرافیایی ۵۲ تا ٥٤ درجهٔ خاوری)*، فصل‌نامهٔ علوم زمین، شمارهٔ ٤٣-٤٤ (۱۳۸۱) ٢٤-٣٥.

13. Berberian M., "Active tectonics and faulting in Iran, Zagros", Hindu Kush, Himalaya Geodynamic Evaluation, American Geophysical union, Washington dc. Geodyn. ser. Vol. 3 (1981).

١٤. بربریان م.، قرشی م.، *بررسی‌های لرزه زمین‌ساختی و مهندسی زمین‌لرزه طرح سد مخزنی فجن شاهرود*، سازمان آب منطقه‌ای تهران، امور آب استان سمنان، دفتر مشاورین لار (١٣٦٧).

١٥. بربریان م.، *فرگشت تکتونیکی رشته کوه‌های ایران زمین*، مجموعه مقالات هفتمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، (١٣٦٨) ٢٨-٣٣.

16. Tatar M., Jackson J., Hatzfeld D., Bergman E, "The 2004 may Baladeh earthquake (M_w=6.2) in the Alborz, Iran: overthrausting the south Caspian Basian margin, partitioning of oblique convergence and seismic hazard of Tehran", Geiphysis .J.Doi:10.1111/J.165-246X.2007.3386.X (2007).

17. Dellenbach J., "Contribution a' L' etude geologique de la region situee a" Lest de Tehran (Iran), fac. Sci. Uniiv. Strasbourg (France) (1964).

١٨. بربریان م.، قرشی م.، ارژنگ روشن ب.، مهاجراشجعی ا.، *پژوهش و بررسی ژرف نوزمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون*، (پژوهش و بررسی لرزه‌زمین‌ساخت ایران زمین، بخش پنجم) سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش شمارهٔ ٥٦ (١٣٦٤).

١٩. سلیمانی‌آزاد ش.، فقهی خ.، شبانیان بروجنی ا.، عباسی م.، ریتز ژ. ف.، *نتایج مقدماتی حاصل از بررسی‌های دیرینه لرزه‌شناسی گسل مشا در درهٔ مشا*، پژوهش‌نامهٔ زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال ششم، شمارهٔ سوم و چهارم، (١٣٨٢) ٤٦-٦١.

20. Berberian M., Yeats R. S., "Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau", Bull. Seismol, Soc. Am., 89 (1999) 120-139.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]

۲۱. بربریان م.، *بررسی و پژوهش نو زمین‌ساخت، لرزه زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه- گسلش در ناحیهٔ باختر دامغان*، مهندسین مشاور کوبانکو، سازمان آب منطقه‌ای سمنان (۱۳٦۳).

22. Nazari H., "Analyse de la tectonique recent et active dans lAlborz central" et.la region de Tehran: APproche morphtectonique et paleoseismologique, Science de la terre et de l eau. Montpellier, Montpellier II:247 (2006).

23. Krinsley D. B., "A geomorphological and paleoclimatological study of the playas of Iran", V. 2, Air force Cambridge Res, Rep. 70. 0503 (1970).

۲٤. امیدی پ.، *تحلیل ساختاری و دینامیکی تفصیلی زون‌های گسلی در حاشیهٔ جنوبی البرز خاوری (گستره سمنان ـ دامغان)*، رسالهٔ دکتری، دانشگاه تربیت مدرس(۱۳۸۰).

25. Hiraia T., "Frctal Dimantion of fault system in Hapan: Fractal structure in Roke fracture Geomtry at various scales", Pageoph, Vol. 131, No. 1, (1989) 157-170.

۲٦. زارع م، *خطر زمین‌لرزه و ساخت و ساز در حریم گسل شمال تبریز و حریم گسلش گسل‌های زمین‌لرزه‌ای ایران*، پژوهش‌نامهٔ زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال چهارم، شماره دوم و سوم (۱۳۸۰).

27. Vernant Ph., Nilforoushan F., Hatzfeld D., Abbassi M. R., Vigny C., Masson F., Nankali H., Martinod J., Ashtiani A., Bayer R, Tavakoli F., Chery J., "Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman", Geophys. J. Int., Vol. 157 (2004a) 381-398.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2653]