

تکتونیک فعال مرتبط با گسل جوان اصلی زاگرس در محدوده سد روبار لرستان

رضا علی‌پور، محسن پورکرمانی: دانشگاه شهید بهشتی
مهری زارع: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی

چکیده

ساختگاه سد روبار لرستان در ۱۰۰ کیلومتری جنوب الیگودرز در کمربند زاگرس مرتفع واقع شده است. در ۱/۶ کیلومتری جنوب این سد یک قطعه از گسل جوان اصلی زاگرس (MRF) به نام گسل سراوند-بزنود (SBF) رخمنون دارد. در این پژوهش برای بررسی نقش گسل سراوند-بزنود در منطقه پژوهش، ابتدا به روش استخراج اتوماتیک و بر پایه الگوریتم STA، خطواردهای منطقه از عکس‌های ماهواره‌ای و مدل سایه ارتفاعی استخراج شده است، سپس برای بررسی دقیق ساختارها، با استفاده از مشاهدات صحرایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه به سه زون گسل اسلام‌آباد، محور سد و گسل جوان اصلی تقسیم گردید. در زون گسل اسلام‌آباد، مهمترین ساختار گسل معکوس اسلام‌آباد است که ۱۵ کیلومتر طول دارد. این گسل از نوع شکستگی‌های نوع P در منطقه است. در زون (MRF) مهمترین ساختار گسل (SBF) است که در منطقه پژوهش سازوکار این گسل امتدادلغز با مؤلفه معکوس است. این گسل در ارتفاعات شمالی‌تر منطقه باعث جابجایی راستگرد ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متری در روند آبراهه‌ها شده است. در زون محور سد مهمترین و اصلی‌ترین ساختار گسل F1 است. سازوکار این گسل امتدادلغز راستگرد است، و ۱۵۰ متر طول دارد. سنیابی ترمولومینوسانس، صفحه گسلی بر جسته، جهتگیری آن و گرومک روى سطح گسل نشان دهنده جوان بودن این گسل است. جابجایی زیاد در طول گسل‌های امتدادلغز در منطقه، چون گسل F1 با دو مدل زون برشی و مدل پلکانی^۱ بررسی شده است، که به علت شبیه زیاد گسل‌های منطقه مدل پلکانی مناسب‌تر است. با این حال، مهمترین گسل موجود در منطقه گسل (SBF) است که با یک آرایش پلکانی نسبت به گسل لرزه‌ای درود قرار گرفته است و پتانسیل لازم جهت حرکت در آینده را دارد.

مقدمه

کمربند چین و راندگی زاگرس در جنوب غرب ایران با روند شمال باخته-جنوب خاور در نتیجه برخورد نتوزن بین صفحات عربی و اوراسیاست. همگرایی بین صفحات عربی و اوراسیا با میزان حدوداً ۳۵ تا ۴۰ میلی‌متر در سال است [۱۳]. این همگرایی به صورت کوتاه‌شدن و به صورت چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی معکوس در پوسته قاره‌ای ایران است. بخشی از این همگرایی صرف فرورانش پوسته اقیانوسی عمان به زیر

واژه‌های کلیدی: گسل جوان اصلی زاگرس، گسل سراوند-بزنود، سد روبار لرستان، امتدادلغز، گرومک
دریافت ۸۹/۶/۱۳ پذیرش ۸۹/۱۰/۱۲

^۱.En echelon

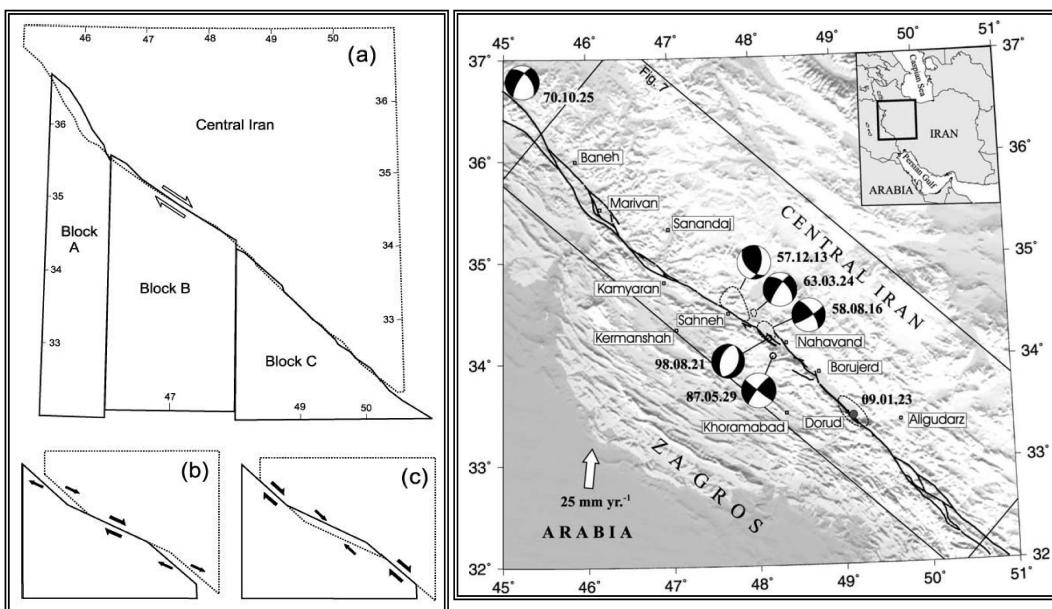
پوسته قاره‌ای مکران در جنوب ایران می‌گردد. البته اندازه‌گیری‌های (GPS) نشان می‌دهد که بلوک‌های عربی و اوراسیا با میزان ۲۱ میلی‌متر در سال و با شیب ۵۰ درجه به سوی جنوب خاور به هم نزدیک می‌شوند. به همین علت یک کوتاه‌شدگی با روند شمال، شمال خاور و حدود ۱۰ میلی‌متر در سال به وجود می‌آید که نسبت به کمربند چین و رانگی اصلی زاگرس مایل است [۷]. منطقه پژوهش در زیر پنهان رانگی یا زاگرس مرتفع واقع شده است. شواهدی از دو فاز چین‌خوردگی در زاگرس مرتفع وجود دارد که فاز اول در اواخر کرتاسه و فاز دوم از اواخر میوسن تا کنون بوده که شدت آن پلیوسن بیشترین مقدار بوده است. این دو فاز چین‌خوردگی، چین‌هایی با دامنه و طول موج متفاوت ایجاد کرده‌اند که طول موج چند صد متر تا بیش از ۱۰ کیلومتر و طول چند کیلومتر تا ده‌ها و حتی صدها کیلو متر دارند [۱۶].

همچنین مرحله اصلی چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی معکوس مربوط به آن، در کمربند زاگرس مرتفع در زمان میوسن و در یک رژیم فشارشی با روند شمال، شمال خاوری بوده است. مهم‌ترین تغییر شکل‌های چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی در کمربند زاگرس مرتفع به وسیله فشارش با روند شمال، شمال خاور در میوسن بوده است و به سمت جنوب در زاگرس چین خورده، چین‌خوردگی‌ها به علت فشارش با روند شمالی جنوبی از زمان میوسن تا عهد حاضر بوده است [۱۷].

ساختگاه سد روودبار لرستان نزدیک به دو ساختار بزرگ شناخته شده قرار دارد که یکی گسل اصلی معکوس زاگرس (MZRF) که در ۱۰ کیلومتری شمال خاور ساختگاه است و دیگری یک قطعه از گسل جوان اصلی زاگرس (MRF) به نام گسل سراوند بزنوید (SBF) است، که در فاصله ۱/۶ کیلومتری جنوب ساختگاه سد قرار دارد. (MZRF) که مرز شمالی کمربند زاگرس مرتفع است، براساس اندازه‌گیری‌های (GPS) و اسناد لرزه‌شناسی فعالیت لرزه‌ای مهمی ندارد [۹]. گسل جوان اصلی (MRF) عملکرد راستالغز راستگرد دارد و از چندین قطعه گسلی تشکیل شده است که از مرز ایران و ترکیه در ۳۷ درجه شمالی شروع، و به سمت جنوب با بیش از ۸۰۰ کیلومتر ادامه دارد (شکل ۱).

در امتداد این گسل (پاره‌های درود، نهادوند، گارون، صحنه و دینور)، گسل اصلی معکوس زاگرس چار یک جدایش^۱ راستگرد شده است [۱۲]. بررسی آبراهه‌ها و بازسازی آن‌ها میزان جابه‌جایی راستالغز راستگرد در راستای گسل جوان اصلی زاگرس را ۵۰ کیلومتر نشان می‌دهد و با فرض این که بیشترین جنبش در امتداد این گسل ۳ تا ۵ میلیون سال پیش شروع شده باشد، آهنگ لغزش افقی در امتداد این گسل ۱۰ تا ۱۷ میلی‌متر در سال برآورد می‌شود. همچنین امتداد گسل جوان اصلی زاگرس متغیر است، چنان‌که از ۳۳۰ درجه نزدیک مریوان در شمال غرب شروع شده باشد، آهنگ لغزش افقی در امتداد آن ۳۰۰ درجه می‌شود و در بخش‌های جنوبی و نزدیک درود امتداد آن به ۳۱۵ درجه می‌رسد. بنا بر این ممکن است، بردار لغزش به موازات قسمت میانی یا به موازات قسمت‌های شمال غربی و جنوب شرقی باشد، که در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۰].

^۱.Offset



شکل ۲. a- روندهای مختلف گسل جوان اصلی
b- بردار حرکت به موازات قسمت میانی
c- بردار حرکت به موازات قسمت‌های NW و SE [۱۰]

شکل ۱. پاره‌های مختلف گسل جوان اصلی زاگرس [۱۰]

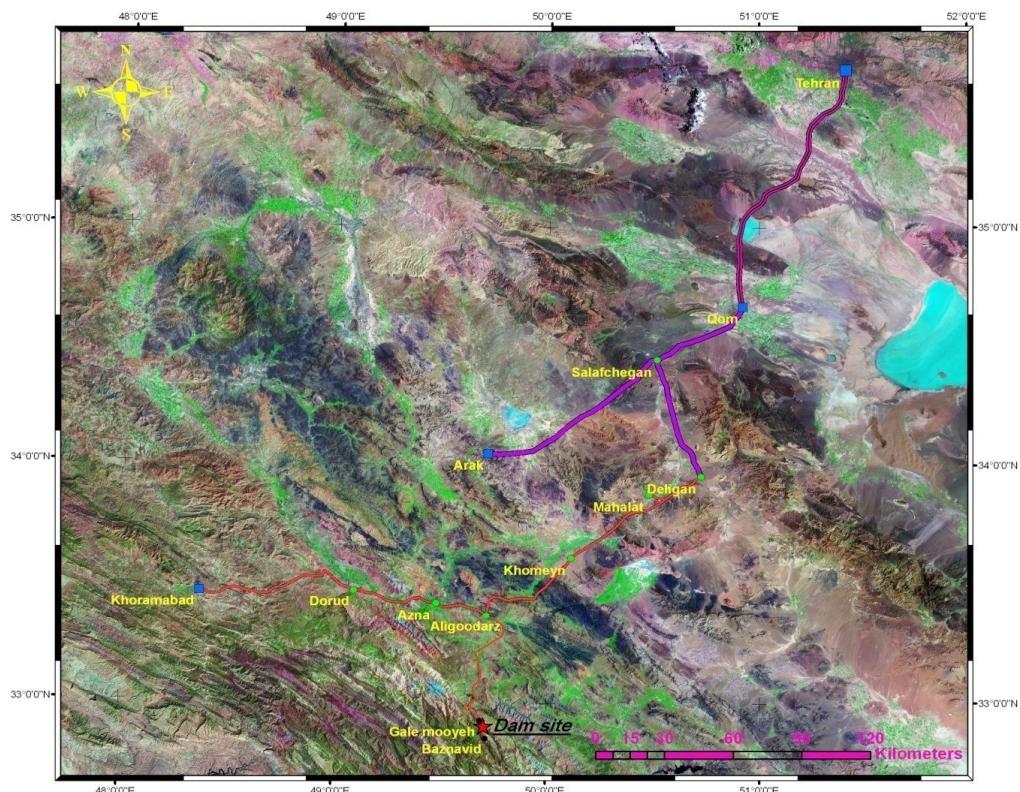
سد رودبار لرستان در ۱۰۰ کیلومتری جنوب الیگودرز بر روی رودخانه آبرودبار در مختصات جغرافیایی ۳۲°۵۴'۱۹" شمالی و ۴۹°۴۱'۰۵" شرقی به منظور استفاده از پتانسیل مناسب نیروی آب در تولید انرژی بر قابی در حال احداث است (شکل ۳).

در این پژوهش ابتدا با استفاده از بررسی تصاویر ماهواره‌ای، نقشه کلی خطواره‌های تهیه و روندهای کلی خطواره‌ها تشخیص داده شد. سپس با توجه به اهمیت گسل جوان اصلی زاگرس در منطقه، با استفاده از ترکیب باندی و تلفیق عکس‌های ماهواره‌ای جابه‌جایی موجود در روند آبراهه‌ها به‌وسیله این گسل تشخیص داده شد. همچنین با تقسیم‌بندی منطقه به سه زون ساختاری، ساختارهای موجود در هر زون شناسایی و بررسی شد و در نهایت مدل‌های جابه‌جایی برای شکستگی‌های منطقه پیشنهاد شده است.

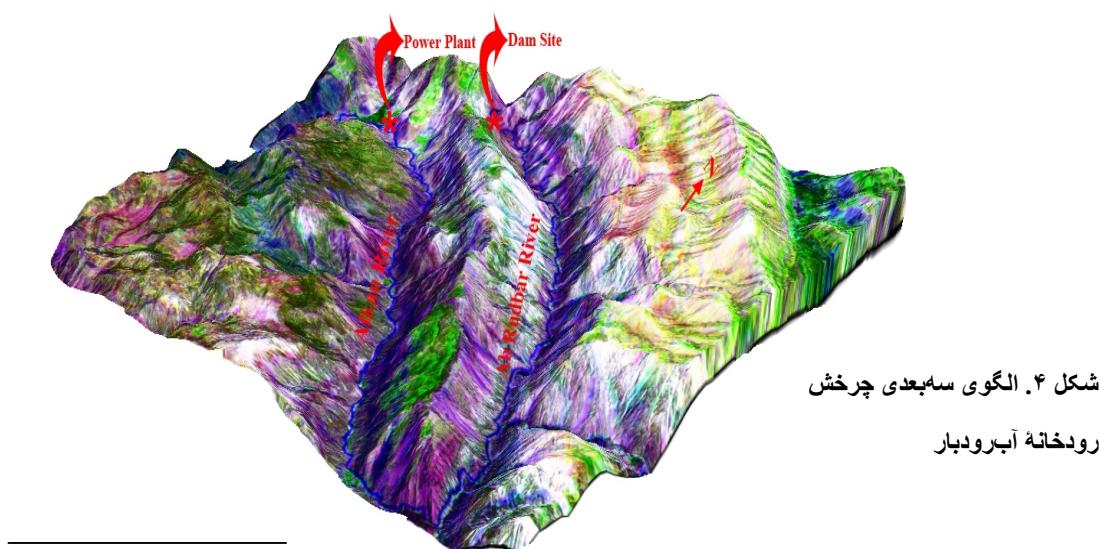
توبوگرافی منطقه، یک اختلاف ارتفاع طبیعی بین سد و نیروگاه ایجاد کرده است که این اختلاف ارتفاع ۳۰۰ متر و به علت چرخش طبیعی رودخانه آبرودبار است که پس از یک چرخش U شکل که از این پس رودخانه الکن نامیده می‌شود، به محل نیروگاه می‌رسد (شکل ۴).

از آنجا که سدها نقش بسیار مهمی در تنظیم و استفاده بهینه از منابع آب و تولید انرژی دارند، حفظ پایداری سد و مخزن آن، از عواملی است که باید بررسی شود. بنا بر این وضعیت ساختاری و تحلیل ساختارهای موجود، از قبیل گسل‌ها و درزها، نقش مهمی در پایداری سدها دارند. حرکات گسل‌ها و تکان‌های لرزه‌ای ممکن است باعث تغییر شکل و خرابی ساختاری در پی سد و همچنین ساختارهای وابسته شود؛ برای مثال سد،

شی کانگ^۱ در طی زلزله چیچی در سال ۱۹۹۹ در تایوان، به علت فعالیت گسل فعال در پی سد تخریب شد. از آنجا که منطقه پژوهش در زاگرس مرتفع قرار دارد، و نیز با وجود (MRF)، تحلیل ساختارها و تأثیر لرزه- خیزی این گسل بر ساختارهای موجود در محل سد، ضرورت انجام این پژوهش محزز می‌شود.



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش



شکل ۴. الگوی سه بعدی چرخش

رودخانه آبرودبار

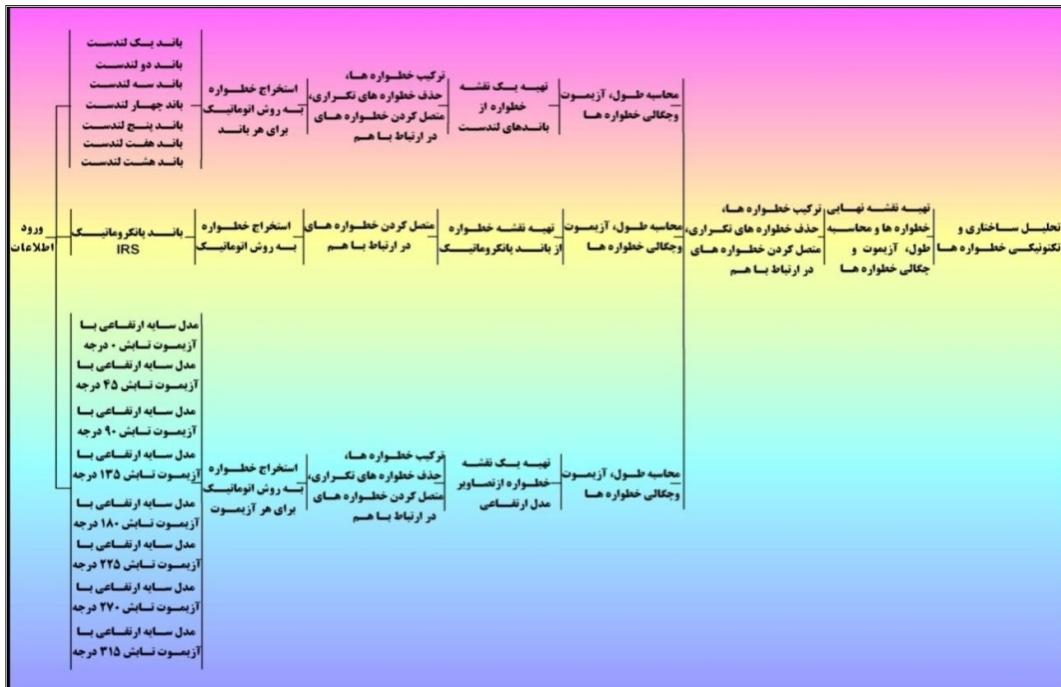
^۱.Shih-kang

تحلیل ساختاری منطقه

الف) تفسیر تصاویر ماهواره‌ای

برای استخراج شکستگی‌های منطقه، بهخصوص شکستگی‌های مرتبط با (MRF)، از روش استخراج اتوماتیک استفاده شده است. در این پژوهش، از تصاویر دو ماهواره لندست^۷ و ماهواره IRS و همچنین از الگوی سایه ارتفاعی (DEM) استفاده شده است. در مدل سایه ارتفاعی، نور مصنوعی از یک منبع نقطه‌ای با زاویه‌ای از سطح افق (Inclination) و زاویه‌ای با جهت شمال (آزیموت) بر سطح تابیده می‌شود و سایه‌ای از اطلاعات ارتفاعی سطح زمین تهیه می‌کند [۶].

در این پژوهش، هشت مدل سایه رقومی برای استخراج خطواره‌ها با زاویه تابش 30° درجه از سطح افق و آزیموت‌های $270^\circ, 225^\circ, 180^\circ, 135^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ و 315° درجه استفاده گردید. شکل (۵) الگوریتم نحوه تهیه نقشه کلی خطواره‌ها را نشان می‌دهد.



شكل ٥. الگوریتم نحوه تهیه نقشه کلی خطواره‌ها

برطبق الگوریتم بالا پس از استخراج خطوط اردها، سه نقشه تهیه شد که این نقشه‌ها در محیط GIS با هم ترکیب شدند و نقشه نهایی به دست آمد. سپس ناحیه زون گسلی جوان زاگرس به سه زیرناحیه تقسیم شد. با ترسیم آزمیوت طول خطوط اردها، برای سه زیرناحیه، نتایج زیر به دست آمد که در شکل ۶(a) دیده می‌شود.

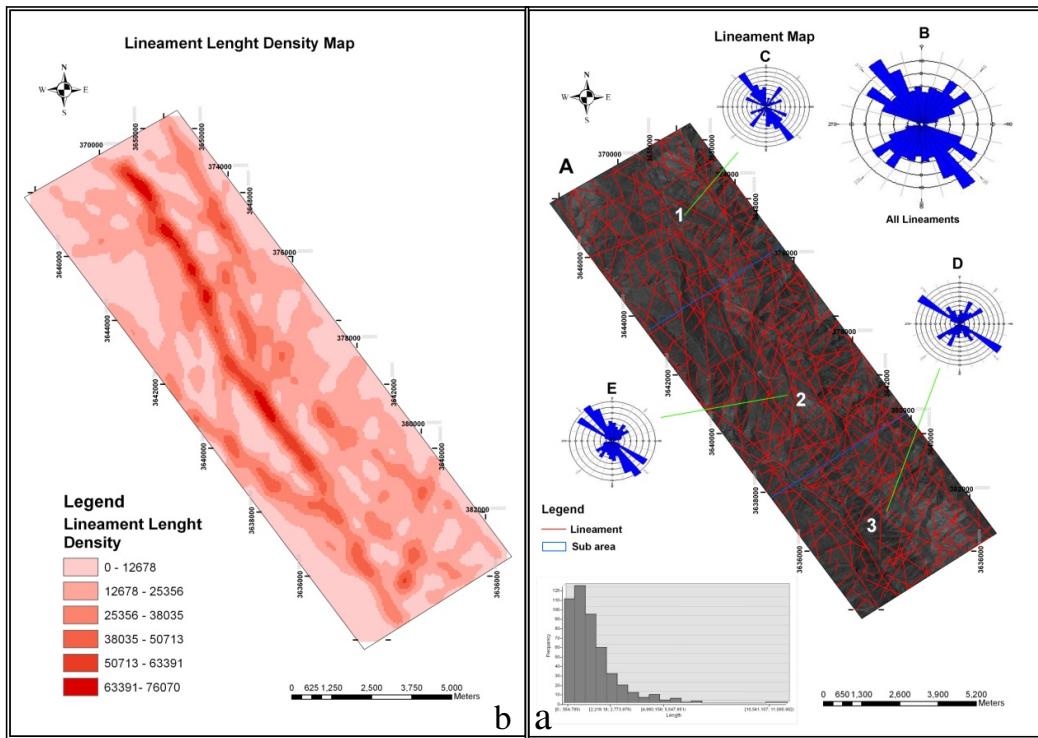
۱) در زیر ناحیه یک، خطواره‌ها دارای یک جهتگیری اصلی در N40W و جهتگیری‌های فرعی S-N و N35E هستند.

۲) در زیر ناحیه دو، خطوارهای دارای دو جهتگیری اصلی N35W و N55W و جهتگیری فرعی E N35E هستند.

۳) در زیر ناحیه سه، خطوارهای دارای جهتگیری اصلی N55W و جهتگیری های فرعی N25E و (N55E) هستند.

۴) جهتگیری کلی خطوارهای دارای دیاگرام گل سرخ آن نشان داده شده است، دارای امتدادهای N55W و N35W است که جهتگیری های N35E و N50E نیز چشمگیرند.

پس از تهیه نقشه نهایی خطوارهای، نقشه چگالی خطوارهای و نقشه چگالی طولی خطوارهای (طول آن در میزان محاسبه چگالی اعمال می شود) نیز تهیه شد. با توجه به نقشه چگالی خطوارهای، بیشینه چگالی، الگویی نسبتاً خطی با روندهای شمال باختر- جنوب خاور نشان می دهد و همچنین در نقشه چگالی طولی خطوارهای شکل ۶(b)، بیشینه چگالی نسبی در امتداد گسل جوان اصلی زاگرس و گسل اسلام آباد چشمگیر است.



شکل ۶. نقشه نهایی خطوارهای (a)، نقشه چگالی طولی خطوارهای (b)

ب) آنالیز داده های صحرایی

در این پژوهش بر طبق بررسی های صحرایی و نقشه زمین شناسی (شکل ۷)، منطقه به سه زون تقسیم بندی

شده است که از شمال خاور به جنوب باخترا عبارتند از: زون محور سد^۱، گسل جوان اصلی^۲ و زون گسل اسلامآباد^۳. شکل ۸ تقسیم‌بندی منطقه به سه زون و گسل‌های مرتبط با آن را نشان می‌دهد.

در زون گسل اسلامآباد، مهمترین ساختار، گسل اسلام آباد است. طول این گسل ۱۵ کیلومتر است که در شکل ۹(a) نشان داده شده است. شبیه این گسل زیاد و به سمت جنوب باخترا است. گسل‌های این زون، غالباً گسل‌های معکوس هستند که روند زاگرسی دارند و گاهی به موسیله گسل‌های امتدادلغز با روند شمال خاور-جنوب باخترا قطع شده‌اند. موقعیت بعضی از صفات گسلی برداشت شده برای گسل‌های این زون بدین صورت است (شکل ۹): موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از گسل F91، برابر با N79W-88SW، موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از گسل F96، برابر با N56E-86SE، موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از گسل F77، برابر با N15E-85SE، موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از گسل F87 برابر با N62W-65NE، موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از گسل F80 برابر با N45W-76NE است.

روند گسل‌های موجود در زون گسل اسلام آباد در دیاگرام گل‌سرخی در شکل ۱۰(a) نشان داده شده است. همچنین درزه‌های موجود در این زون در چند قسمت برداشت و دیاگرام گل‌سرخی آن‌ها در شکل ۱۰(b) نشان داده شده است. با توجه به دیاگرام گل‌سرخی و نقشه زمین‌شناسی، روند غالب گسل‌های منطقه N40W تا N50W و غالباً از نوع معکوس است و روند غالب درزه‌های موجود در این زون W15N تا N35W است که با زاویه‌ای حدوداً ۳۰ تا ۳۵ درجه نسبت به روند گسل‌های منطقه قرار گرفته‌اند.

در زون گسل جوان اصلی (MRF) مهمترین ساختار گسل سراوند-بزنود است. این گسل یکی از پاره‌های گسل جوان اصلی زاگرس است، که با یک آرایش پلکانی^۴ نسبت به گسل لرزه‌ای درود قرار گرفته است و به عنوان نزدیکترین گسل اصلی به ساختگاه سد و نیروگاه رویدار لرستان شناخته می‌شود. طول این گسل حدوداً ۱۰۰ کیلومتر است و ریک‌های برداشت شده از صفحه این گسل، حرکت امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه معکوس را نشان می‌دهد. موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از این گسل N32W-74SW است.

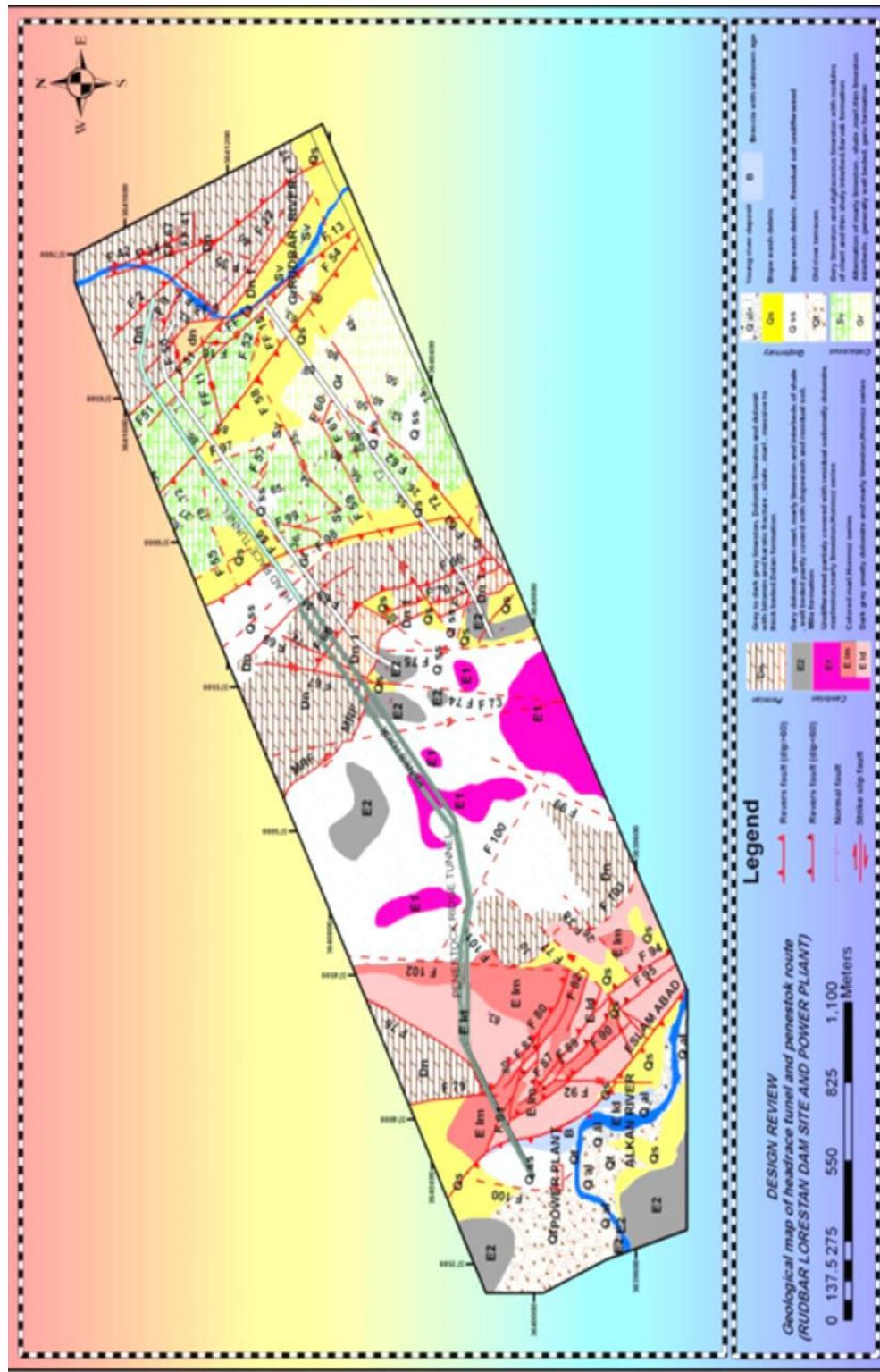
با این حال، گسل‌های معکوس و امتدادلغز متعددی در این زون وجود دارند که صفات گسلی برداشت شده تعدادی از آن‌ها بدین ترتیب است که موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از گسل F67 برابر با N15E-70NW، موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از گسل F68 برابر با N10E-85NW و همچنین گسل F59 باعث جابه‌جایی حدوداً ۲۰ متری SBF شده است، که صفحه آن قابل تشخیص نیست (شکل ۱۱).

۱.Dam Axis Zone

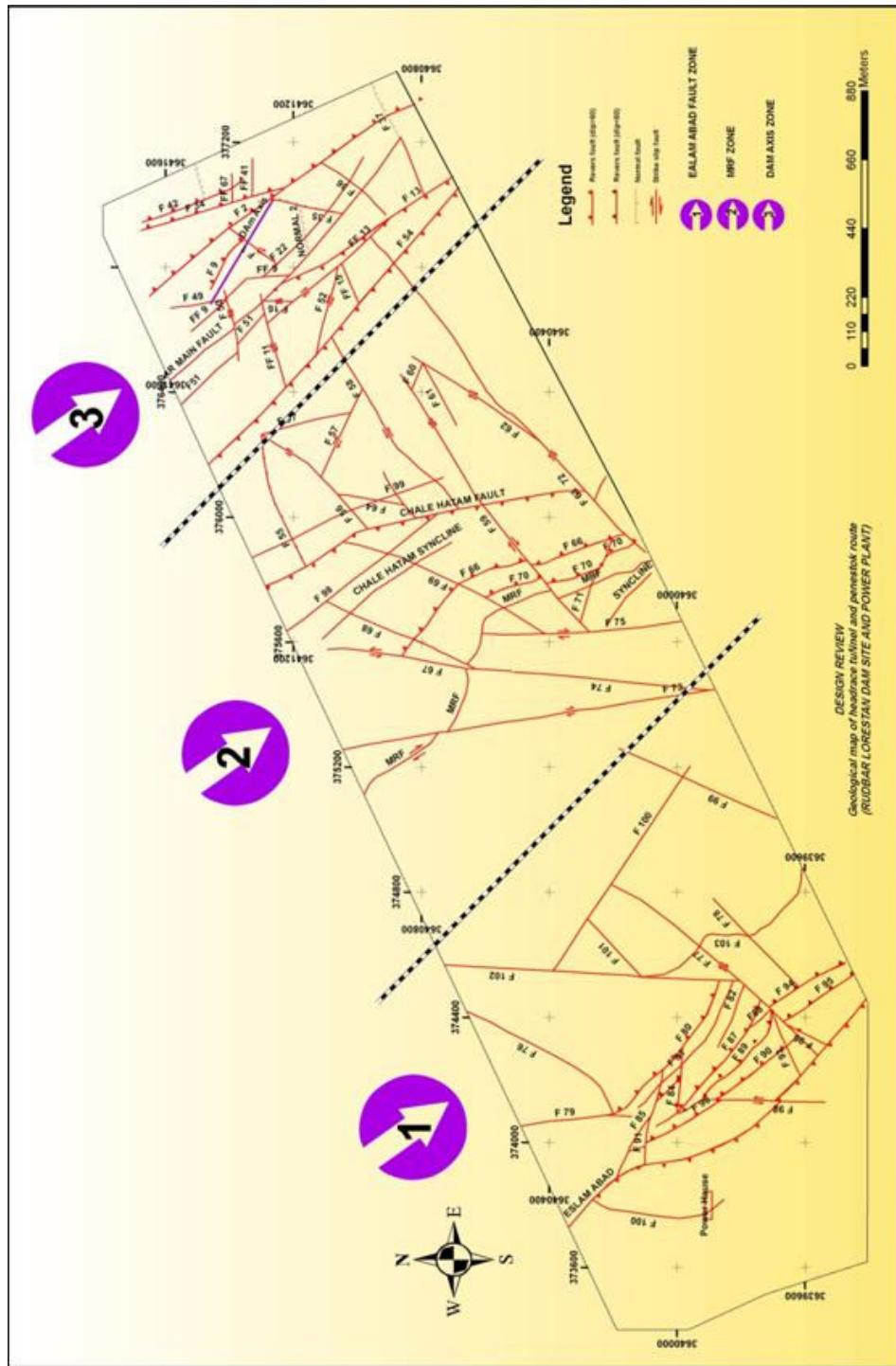
۲. MRF Zone

۳.Esalamabad Fault Zone

۴.En echelon



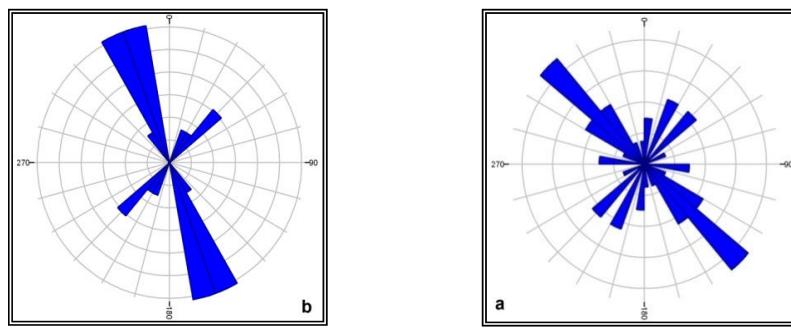
شکل ۷. نقشه زمین‌شناسی منطقه پژوهش



شکل ۸. تقسیم‌بندی منطقه به سه زون



شکل ۹. پرتوگاه گسلی، اسلام آباد(a)، صفحه گسل F91 (b)، صفحه گسل F77 (b)
صفحة گسل F80 (c)، صفحه گسل F87 (c) و صفحه گسل F96 (e) و صفحه گسل F80 (f)

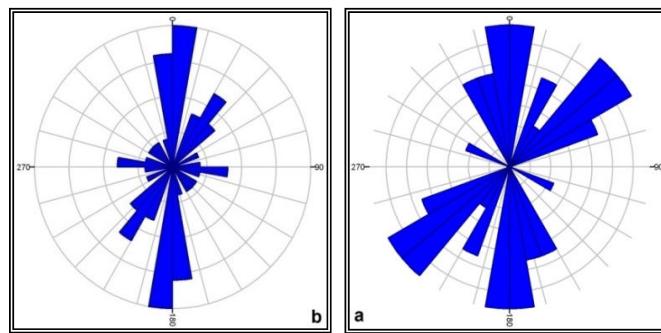


شکل ۱۰. دیاگرام‌گل‌سرخی‌گسل‌ها(a) و درزهای(b) زون‌گسل‌اسلام‌آباد



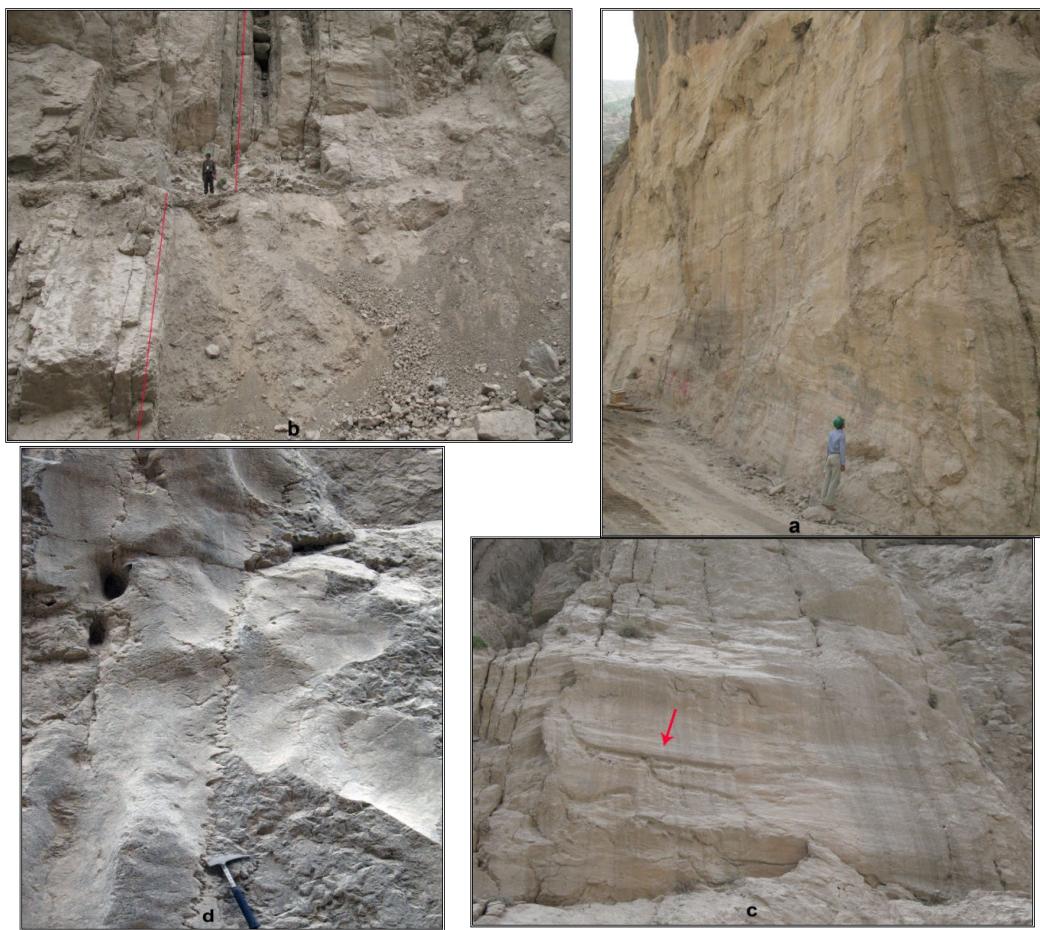
شکل ۱۱. صفحه گسلی SBF (a)، صفحه گسلی F67 (b)، صفحه گسلی F68 (c)، گسل F59 (d)

به طور کلی روند گسل‌های موجود در زون اصلی گسل جوان (MRF)، در دیاگرام گل‌سرخی شکل ۱۲(a) نشان داده شده است. همچنین روند درزهای برداشت شده در این زون، در دیاگرام گل‌سرخی شکل ۱۲(b) نشان داده شده است. با توجه به برداشت‌ها و نقشه‌های زمین‌شناسی و همچنین دیاگرام گل‌سرخی، روند غالب گسل‌های منطقه شمالی-جنوبی، N30E تا N40E و N30W است، که غالباً از نوع معکوس و امتداد لغز هستند. روند غالب درزهای برداشت شده در این زون، دردو جهت N5E و N35E غالب است که زاویه‌ای حدوداً ۳۰ درجه نسبت به روند گسل‌های منطقه دارد.



شکل ۱۲. دیاگرام گلسرخی گسل‌ها(a) و درزهای(b) زون SBF

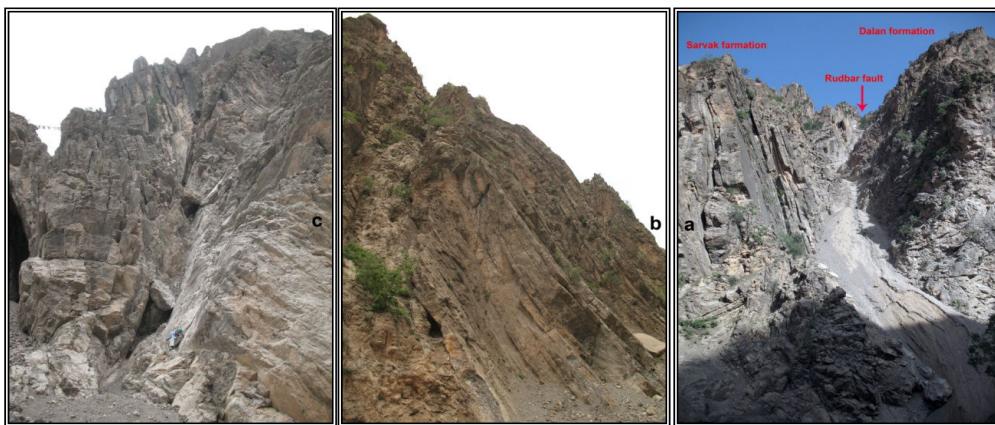
در زون محور سد، مهمترین و اصلی‌ترین ساختار، گسل F1 است. این گسل در تکیهگاه سمت چپ سد با روند NNE-SSW، پی سد را می‌برد. سازوکار این گسل امتدادلغز راستگرد است و طول آن گسل حدود ۱۵۰ متر است؛ ولی با این حال، این گسل دارای جابه‌جایی زیاد حدود ۷ متر در بالادست و حدوداً ۲۰ متر در پایین‌دست محور است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. صفحه گسلی F1(a)، جابه‌جایی ۲ متری در جنوب گسل F1(b)، گرومارک حدوداً یک متری روی سطح گسل F1(c) و استیلویلت روی سطح گسل F1(d)

این گسل در منطقه، یک آینه لغزش برجسته دارد که امتداد آن N25W و شیب آن تقریباً قائم است. همچنین استیلویلت برداشت شده روی این گسل، حرکت امتداللغز را برای آن تأیید می‌کند. شکستگی‌های متعددی با روندهای مختلف در زون محور سد وجود دارد که با توجه به جایگیری محور سد در این زون تحلیل رفتار و نحوه حرکت این شکستگی‌ها اهمیت خاصی دارد. از دیگر گسل‌های مهم در این زون، می‌توان گسل روودبار را نام برد که در جنوب ساختگاه سد، مرز بین سازند دلان با سن پرمین در شمال خاور و سازند سروک با سن کرتاسه در جنوب باخترا را تشکیل می‌دهد. طول گسل روودبار حدوداً پنج کیلومتر است و در منطقه پژوهش، بهوسیله گسل‌های جوان‌تر بریده شده است. همچنین سطح این گسل بسیار نامنظم است و بنا بر این صفحه گسلی آن قابل برداشت نیست. شکل (a) رخمنون این گسل را نشان می‌دهد.

از دیگر گسل‌های مهم در این زون، گسل F2 است که یک گسل معکوس است و در بالا دست محور سد، مرز بین دو بخش سازند دلان (Dn1 و Dn2) را تشکیل می‌دهد. در تکیهگاه سمت راست سد، سطح این گسل صاف است، ولی در تکیهگاه سمت چپ دارای پنهان خرد شده است. موقعیت صفحه گسلی برداشت شده از این گسل N40W-65NE است. شکل (b)، صفحه گسلی این گسل را نشان می‌دهد.



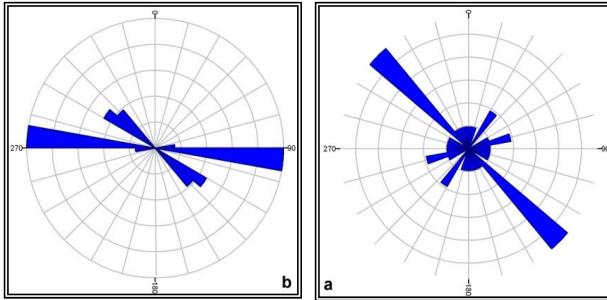
شکل ۱۴. گسل روودبار(a)، گسل F2 در تکیهگاه راست(b) و تکیهگاه چپ(c)

به طورکلی روند گسل‌ها و درزهای موجود در زون محور سد به ترتیب در دیاگرام‌های گل‌سرخی شکل ۱۵ (a) و (b)، نشان داده شده است. بیشتر گسل‌های منطقه در این زون، روند N35W تا N45W دارند هرچند که روندهای فرعی NE-SW نیز مشاهده می‌شود و روند غالب درزهای در این زون N40W تا N50W است.

ج) تلفیق اطلاعات صحرایی با داده‌های ماهواره‌ای

دیاگرام گل‌سرخی به دست آمده از نقشه نهایی خطواره‌ها در منطقه، سه روند را نشان می‌دهد. روند N35W که در نقشه نهایی خطواره‌ها دیده می‌شود، مربوط به گسل سراوند-بزنوید (SBF) و شکستگی‌های با

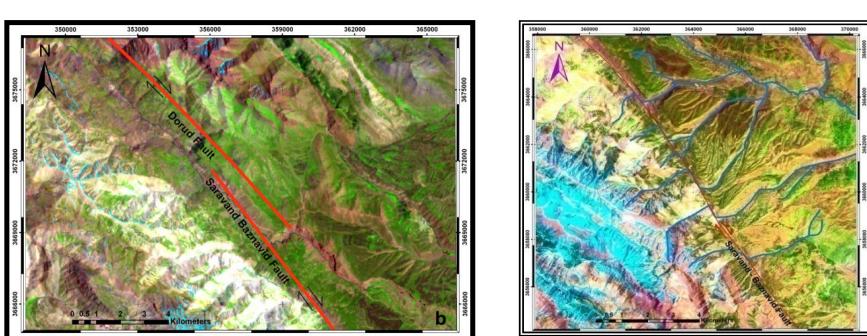
امتداد مشابه و همراه این گسل است. روند N55W مربوط به شکستگی‌های P در منطقه پژوهش مانند گسل اسلامآباد است که در این امتداد جهتگیری کرده‌اند. نوع سوم روندهای مشاهده شده در دیاگرام گل‌سرخی، روندهای N50E تا N35E است که با توجه به مشاهدات صحرایی و برداشت صفحات گسلی، این روندها غالب گسل‌های امتداد لغز راستگرد یا چپگرد هستند، که در بین قطعات گسل‌های معکوس یا تراستی قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۵. دیاگرام گل‌سرخی گسل‌ها(a) و درزهای(b) زون محور سد

SBF از نوع شکستگی‌های ریدل در بررش زاگرس است که در مراحل اولیه دگرگیختی تشکیل می‌شوند و باعث ایجاد برش‌های نوع دوم می‌شوند. گسل اسلامآباد که از نوع شکستگی‌های نوع دوم P است و به نظر می‌رسد که یک شاخه جانی از SBF باشد. همچنین بر اساس سن‌بابی به روش ترمولومینوسانس از دو نمونه برداشت شده از سطح گسل اسلامآباد، سن آخرین فعالیت گسل بر طبق دو نمونه $S6 = 13800 \pm 800$ و $S7 = 14000 \pm 950$ را نشان می‌دهد [۹].

SBF یک گسل جوان و فعال است و به عنوان یک گسل کواترنری شناخته می‌شود؛ زیرا این گسل در ارتفاعات شمالی‌تر منطقه پژوهش، یک جایه‌جایی ۵۰۰ متری راستگرد را در روند آبراهه‌ها ایجاد کرده است (شکل ۱۶ a). همچنین براساس سن بابی انجام شده به روش ترمولومینوسانس از دو نمونه برداشت شده از سطح SBF، سن آخرین فعالیت گسل بر طبق دو نمونه $S8 = 3600 \pm 400$ و $S9 = 17600 \pm 1400$ را نشان می‌دهد [۹]. گسل سراوند-بنزونید با یک آرایش پلکانی نسبت به گسل لرزمزای دورود قرار گرفته است (شکل ۱۶ b). گسل دورود در طی زمین‌لرزه ۲۳ ژانویه ۱۹۰۹ سیلانخور با بزرگای سطحی ۷/۴ گسیخته شده است.

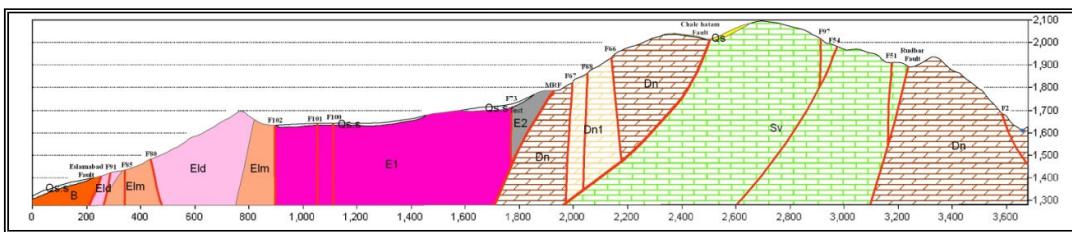


شکل ۱۶. جایه‌جایی راستگرد در آبراهه‌ها به وسیله SBF (a)، الگوی پلکانی SBF نسبت به گسل درود(b)

نوع سوم روندهای مشاهده شده در نقشه کلی خطوارهای ماهواره‌ای استخراج شده است، مربوط به گسل‌های امتدادلغز است که از بارزترین این گسل‌ها، گسل F1 است؛ زیرا در تکیهگاه چپ سد قرار گرفته است. بر اساس سن‌یابی به روش ترمولومینوسانس از پنج نمونه برداشت شده از سطح گسل F1، سن آخرین فعالیت گسل برطبق این پنج نمونه $S1=6100\pm 700$ ، $S2=6500\pm 650$ ، $S3=12500\pm 100$ ، $S4=13600\pm 150$ و $S5=6800\pm 750$ بدست آمده است [۹]. این گسل همچنین تماس‌های تکتونیکی با دیگر شکستگی‌ها در محور سد دارد که در این میان، در سمت شمال یک تماس بین گسل F1 و گسل F30 وجود دارد. سطح گسل F1 یک سطح ناهموار و شیاردار است، به طوری که طول گرومکار^۱ مشاهده شده روی صفحه این گسل حدوداً یک متر است.

بحث

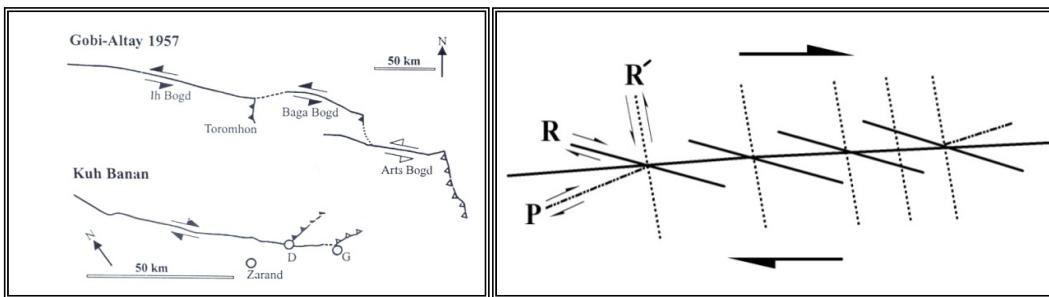
ایجاد گسلش و چین خورده‌گی در زاگرس، به علت همگرایی بین صفحات عربی و اوراسیا با میزان ۳۵ تا ۴۰ میلی‌متر در سال است [۱۲]. البته اندازه‌گیری‌های GPS نشان می‌دهد که بلوك عربی و اوراسیا با میزان ۲۱ میلی‌متر در سال به هم نزدیک می‌شوند [۷]. روندهای N135-۱۴۵ در زاگرس، به علت وجود شواهد لرزه‌ای، خش لغزش‌های فراوان و جابه‌جا کردن روندهای زاگرسی جدید، دارای سازوکار راستالغز راستگرد هستند و در واقع، شکستگی‌های ریدل (R) حاصل از سیستم برش زاگرس هستند و سبب شده‌اند که شکستگی‌های مرتبه دوم R'، P' و T که جوان‌تر هستند، تشکیل شود [۸]. مهمترین و نزدیکترین ساختار فعال و لرزه‌زا به سد، یک قطعه از گسل جوان اصلی زاگرس به نام گسل سراوند-بزنوید (SBF) است، که تحت عنوانین بختیاری و قالی‌کوه نیز از آن‌ها پاد شده است. ساختگاه سد روودبار لرستان، در دره‌ای تنگ و با دیوارهای پرشیب از جنس آهک‌های دولومیتی سازند دلان با سن پرمین قرار گرفته است. همچنین مهمترین ساختار در ساختگاه سد، گسل F1 است که در تکیهگاه چپ قرار دارد و محور سد را قطع می‌کند. با ملاحظه برش زمین‌شناسی منطقه پژوهش در شکل ۱۷، مشخص می‌شود که SBF از منطقه بین ساختگاه سد و نیروگاه عبور می‌کند و شکستگی‌هایی با روندهای مختلف در منطقه ایجاد کرده است.



شکل ۱۷. برش زمین‌شناسی در امتداد تونل و لوله‌های آببر

۱.Groove mark

به هر حال، وجود SBF و شکستگی‌های مرتبط با آن از قبیل گسل اسلام‌آباد، در محدوده سد روبار لرستان از اهمیت خاصی برخوردار است و اثرات لرزه‌ای ناشی از یک زلزله احتمالی در آینده و القای آن در طول گسل‌های دیگر، می‌تواند باعث آسیب سازه‌ای بر ساختگاه سد، نیروگاه، تونل‌ها و لوله‌های آب شود. برای نمونه، قرارگیری گسل اسلام‌آباد نسبت به SBF، طوری است که حرکت در طول SBF می‌تواند مسبب حرکت در گسل اسلام‌آباد شود. مثلاً در زلزله گب-آلتاو^۱ در سال ۱۹۵۷ با بزرگی $Mw=8$ در مغولستان، طبق شکل ۱۸ اسلام‌آباد شود. به عبارت دیگر، با این که گسل ترومهن در انتهای گسل امتدادلغز قرار ندارد، ولی مقداری از حرکت شده است. به عبارت دیگر، با این که گسل معکوس ترومهن چپ‌گرد در طول گسل‌های اینبیگ^۲ و بگابگ^۳ باعث القای حرکت در گسل معکوس ترومهن^۴ حرکت امتدادلغز چپ‌گرد در طول گسل معکوس شده، گسل کوهبنان است که مسبب زلزله ۲۰۰۵ در داهویه که از شاخه‌های این باعث حرکت گسل معکوس شده، گسل کوهبنان است که مسبب زلزله ۲۰۰۵ در داهویه که از شاخه‌های این گسل است شده و شبیه زلزله گب-آلتاو بوده که در شکل ۱۹ نشان داده شده است. حرکت در گسل کوهبنان باعث القای حرکت در گسل داهویه شده است [۱۵].



شکل ۱۹. مقایسه بین گسل مسبب زلزله Gobi-Altay ۱۹۵۷ و گسل کوهبنان [۱۵]

شکل ۱۸. تشکیل شکستگی‌های R و R'

در منطقه پژوهش، همچنین حرکت در گسل‌های امتدادلغز و Tear که در بین قطعات تراستی و معکوس جای گرفته‌اند، بسیار حائز اهمیت است. برای نمونه، جابه‌جایی گسل F1 که در تکیه‌گاه سمت چپ سد واقع شده و با شواهد سن‌یابی ترمولومینوسانس، آینه گسلی بر جسته و جابه‌جایی زیاد در طول آن حائز اهمیت است. هر چند که این گسل و گسل‌هایی از این نوع به تنهایی خط‌ساز نیستند، ولی حرکت در طول گسل‌های بزرگ می‌تواند باعث جابه‌جایی زیاد آن‌ها گردد. جابه‌جایی زیاد در طول گسل F1 که جابه‌جایی ۶ متری در شمال و ۲ متری در جنوب خود دارد و پی سد را می‌برد، به وسیله الگوی زون برشی و الگوی پلکانی (En echelon) بررسی شده که این دو الگو در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

در مدل زون برشی یک گسل راستالغز، حرکت را از یک زون برشی به زون برشی دیگر منتقل می‌کند و بنا بر این با این که طول زیادی ندارد، ولی می‌تواند جابه‌جایی زیادی داشته باشد. در کمربنده‌های چین خورده مثل زاگرس نمونه‌های زیادی از این نوع گسل‌ها به چشم می‌خورد. در شکل ۲۱ الگوی حرکتی گسل F1 که بین

۱.Gob-Altai

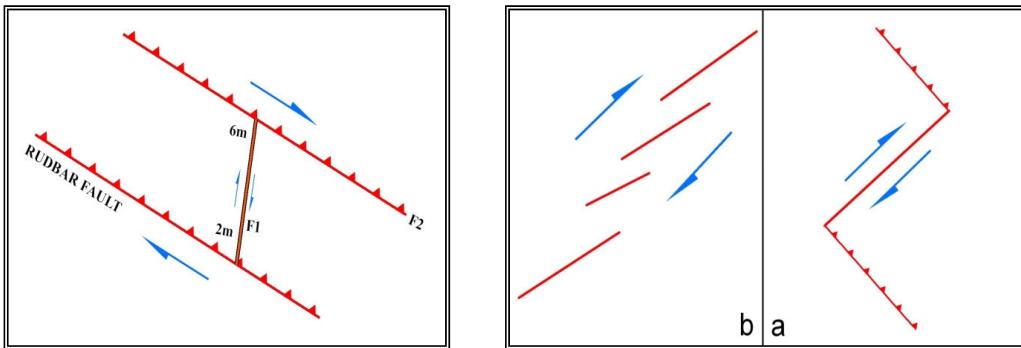
۲.In Bogd

۳.Boga Bogd

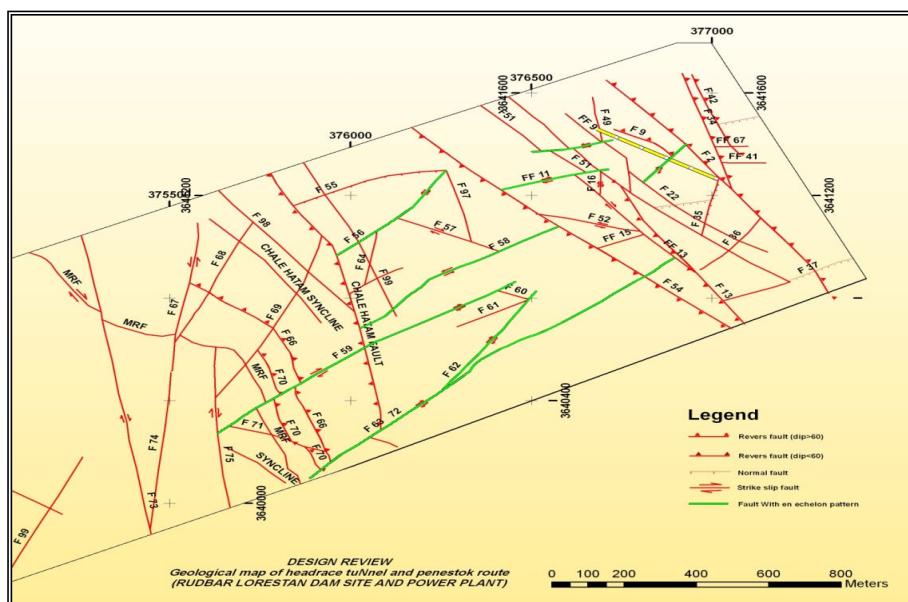
۴.Toromhon

گسل‌های F2 و F30 در شمال و گسل روبار در جنوب که در یک زون برشی قرار گرفته، ارائه شده است و می‌تواند جابه‌جایی زیاد در طول خود داشته باشد که در شمال گسل ۶ متر، و در جنوب آن ۲ متر جابه‌جایی مشاهده می‌شود. در الگوی پلکانی طبق شکل ۲۰، گسل‌ها با یک آرایش پلکانی نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند و بنابر این گسلی با طول کم، می‌تواند جابه‌جایی زیادی داشته باشد. در منطقه پژوهش، از روی نقشه زمین‌شناسی این الگو قابل بررسی است و در شکل ۲۲ نشان داده شده است که گسل‌های راستالغز به صورت الگوی پلکانی نسبت به هم قرار گرفته‌اند.

به طور کلی با توجه به شبیه زیاد گسل‌های معکوس منطقه، به نظر می‌رسد الگوی پلکانی برای جابه‌جایی در طول گسل‌های امتدادلغزی که به صورت Tear می‌توانند طبق الگوی پلکانی در یک زلزله احتمالی شکل ۲۲، گسل‌های F2، F62، F63، F59، F72 و F1 و FF11 می‌توانند طبق الگوی پلکانی در مسیر خود شوند.



شکل ۲۰. الگوی زون برشی(a) و الگوی پلکانی(b)



شکل ۲۱. الگوی پلکانی در گسل‌های امتدادلغز منطقه پژوهش

نتیجه گیری

روند اصلی به دست آمده از نقشه نهایی خطواره‌ها، بهطور کلی در زاگرس به علت وجود شواهد لرزه‌ای، خش لغزش‌های فراوان و جابه‌جا کردن روندهای زاگرسی جدید، دارای سازوکار راستالغز راستگرد هستند و در واقع، شکستگی‌های ریدل(R)، حاصل از سیستم برش زاگرسند و سبب شده‌اند که شکستگی‌های مرتبه دوم P، R' و T که جوانتر هستند، تشکیل شود [۸].

مهمترین گسل منطقه، گسل SBF است که از شکستگی‌های ریدل حاصل از برخورد زاگرس است و با یک آرایش پلکانی نسبت به گسل لرزه زای دورود قرار گرفته و باعث جابه جایی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متری راستگرد در روند آبراهه‌ها شده است. عوامل ذکر شده و سنیابی ترمولومینوسانس، نشانگر جوان بودن این گسل است. سنیابی ترمولومینوسانس، خش لغزش‌های فراوان، روند و صفحات گسلی بارز، نشان از جوان بودن غالب گسل‌های منطقه دارد که در طی یک زلزله احتمالی می‌توانند به حرکت در آیند.

نحوه قرارگیری گسل اسلام‌آباد نسبت به SBF طوری است که می‌تواند مقداری از حرکت احتمالی در را به خود جذب کرده و برای سازه‌های در مسیر خود خطرساز شود.

در طول گسل‌های امتدالغز منطقه که بین قطعات رانده و معکوس جای گرفته‌اند، طبق دو الگوی زون برشی و الگوی پلکانی جابه‌جایی می‌تواند زیاد باشد؛ مثل گسل F1 که با طول کم، جابه‌جایی زیادی را متحمل شده است و می‌تواند برای ساختگاه سد خطرناک باشد. همچنین ماسه‌ها و رس‌های قوه‌های رنگ مشاهده شده روی سطح گسل F1، اگر منشا آبرقی داشته باشد، می‌تواند سند دیگری بر فعالیت جدید این گسل باشد. با توجه به شبیه زیاد گسل‌های معکوس در منطقه به نظر می‌رسد که الگوی پلکانی، الگوی مناسبتری برای حرکت گسل‌های امتداد لغز موجود در منطقه باشد.

با این حال، مهمترین مسئله موجود در محدوده سد، حرکت احتمالی SBF است که می‌تواند حرکت را به گسل‌های کوچک دیگر القا کند و باعث حرکت مجدد آن‌ها گردد. زیرا این گسل‌ها نقاط ضعفی هستند که احتمال فعال شدن دوباره آن‌ها بیشتر است.

منابع

- ۱- آقانباتی، ع، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۳).
- ۲- پورکرمانی، م، آرین، م، زمین‌شناسی ساختمانی کاربردی (۱۳۸۵).
- ۳- ذاکر شبستری، ح، نفوذ پذیری و رفتار هیدرو مکانیکی پی سد روبار لرستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۵).
- ۴- فرهودی، ق، رهنمازد، ج، طبیی، م، استخراج خطواره‌های البرز باختری به کمک داده‌های اس آر تی ام نود متر و سیستم اطلاعات جغرافیایی (۱۳۸۶).

5. A. G. Sylveter, Strike-slip faults, *GSA Bulletin*, 100 (1988).
6. A. Masoud and K. Koike, Tectonic architecture through Landsat-7 ETM⁺/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt, *African EarthSciences*, 45 (2006) 467.
7. C. Authemayou, O. Bellier, D. Chardon, Z. Malekzade and M. Abbassi, Role of the Kazerun fault system in active deformation of the Zagros fold-and-thrust belt (Iran), *Geoscience*, 337 (2005) 539.
8. F. Tavakoli, A. Walpersdorf, C. Authemayou, H. R. Nankali, D. Hatzfeld, M. Tatar, Y. Djamour F. Nilforoushan and N. Cotte, Distribution of the right-lateral strike-slip motion from the Main Recent Fault to the Kazerun Fault System (Zagros, Iran): Evidence from present-day GPS velocities, *Earth and Planetary Science Letters*, 275 (2008) 342.
9. Ghodsniroo consulting engineers, Tectonic and seismotectonic report on Rudbar Lorestan dam site and power plant (2005).
10. J. S. Tchalenko and J. Braud, Seismicity and structure of the Zagros (Iran): The main recent fault between 33° and 35°. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 227 (1974).
11. K. Koike, S. Nagano, and K. Kawaba, Construction and analysis of interpreted fracture plans through combination of satellite image derived lineaments and digital elevation model date, *Computer and geosciences*, 24 (1998) 573.
12. M. Berberian and G. C. King, Towards a Paleogeography and Tectonic Evolution of Iran, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18 (1981) 210.
13. M. Berberian, Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics*, 241 (1995) 193.
14. M. Talebian and J. Jackson, Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implication for the late Cenozoic tectonics of the Arabian-Eurasia collision zone, *Geophys*, 150 (2002) 422.
15. M. Talebian, J. Biggs, M. Bolourchi, A. Copley, A. Ghassemi, M. Ghorashi, J. Hollingsworth, J. Jackson, E. Nissen, B. Oveisi, B. Parsons and K. Priestley, The Dahuiyeh (Zarand) earthquake of 2005 February in central Iran: reactivation of an intramountain reverse fault, *Geophys*, 164 (2006) 137.
16. N. J. Price, J. W. Cosgrove, Analysis of geological structures, Cambridge University Press, Cambridge, 502 (1990).

17. P. Navabpour, J. Angelier and E. Barrier, Cenozoic post-collisional brittle tectonic history and stress reorientation in the High Zagros Belt (Iran, Fars Province), *Tectonophysics*, 432 (2007) 101.