

ارزیابی میزان جنبایی زمین‌ساختی و پویایی گسل‌های شمال باختری گستره ایران مرکزی، پهنه قم - ساوه

الهام قربانی*، دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

اصغر دولتی، استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

محسن پورکرمانی، استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۱۰

چکیده

گستره مورد مطالعه، حوضه قم-ساوه، واقع در حاشیه شمالی ایران مرکزی و پهنه آتشفشانی ارومیه-دختر بین گسل چپ‌بر کوشک-نصرت در شمال و شمال خاوری و گسل تلخاب در جنوب باختری است. مهم‌ترین گسل‌های پهنه مورد مطالعه، بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، شامل کوشک-نصرت، ساوه، ایندس، تفرش، نوبران، تلخاب، البرز و پهنه گسله کوه‌قرمز است. در پژوهش حاضر سعی شده میزان فعالیت زمین‌ساختی این پهنه، با استفاده از روش‌های ریخت‌زمین‌ساختی بررسی شود. برای مستندسازی داده‌های به‌دست‌آمده، از شواهد صحرایی و ریخت‌ساخت‌های موجود در منطقه استفاده شد. به منظور ارزیابی میزان فعالیت زمین‌ساختی گستره مورد مطالعه از اندازه‌گیری شاخص‌های ریخت‌سنجی و انطباق آن‌ها با محل گسل‌های اصلی بهره گرفته شد. به سه شاخص ریخت‌سنجی شامل گرادیان طولی (SL)، سینوسیته پیشانی کوهستان (Smf) و نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Vf) توجه شد و در محیط Arc GIS 10.1 و با کمک نرم‌افزار Arc hydro اندازه‌گیری شد. تفسیر نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بالا در نزدیکی گسل‌های کوشک-نصرت، نوبران، ایندس، پهنه گسله کوه‌قرمز و تفرش است. این موضوع با شواهد برداشت‌های صحرایی از منطقه منطبق بود.

کلیدواژه‌ها: شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی، گسل ایندس، گسل کواترنری، گسل کوشک-نصرت.

مقدمه

در این پژوهش سعی شده با روش ریخت‌زمین‌ساختی و بازدید صحرایی به ارزیابی میزان جنبایی زمین‌ساختی و فعالیت کواترنری گسل‌های پهنه قم-ساوه پرداخته شود. علم ریخت‌زمین‌ساخت به مطالعه فرایندهای پویا و مؤثر در شکل‌دهی چشم‌اندازهای زمین می‌پردازد (برای مثال، بوربانک و اندرسون، ۲۰۱۲؛ کلر و پینتر، ۱۹۹۶). در سال‌های اخیر مطالعه زمین‌ساخت فعال به‌طور چشمگیری یکی از ابزارهای مؤثر در تشخیص شکل‌های زمین‌ساختی فعال و تهیه نقشه‌های خطر لرزه‌ای استفاده شده است (کلر و پینتر، ۱۹۹۶). در این پژوهش سه شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره (Vf) و شاخص سینوسیته پیشانی کوهستان (Smf) به روش کمی اندازه‌گیری شده است که از جمله شاخص‌های پرکاربرد در مطالعات مربوط به ارزیابی فعالیت‌های زمین‌ساختی است. از ویژگی‌های شاخص‌های بررسی شده، حساسیت آن‌ها به حرکات گسل‌های شیب‌لغز و در نتیجه غالب بودن فرایش^۱ به فرسایش است. در ادامه، به‌منظور برداشت زمین‌ریخت‌های مربوط به مناطق تکتونیکی فعال برای مستندسازی نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات روش

*نویسنده مسئول: 68ghorbani@gmail.com، تلفن: ۰۹۱۸۷۴۴۵۵۹۳

کمی همچنین به دست آوردن شواهد بالآمدگی (گسل‌های نرمال یا معکوس) و حرکات راستالغزی گسل‌ها در پهنه، برای اثبات حرکات گسل‌ها در زمان کواترنری باز دیده‌های صحرایی انجام گرفته است. از آنجا که این ناحیه از مناطق صنعتی محسوب می‌شود و شهرهای مهم و پرجمعیتی مثل قم و ساوه و تفرش در آن جای گرفته، ارزیابی میزان فعالیت تکتونیک و شناخت گسل‌های فعال آن برای تعیین مناطق پرخطر از لحاظ لرزه‌خیزی ضروری است. این پژوهش در نظر دارد جنبایی امروزی گسل‌های گستره بین شهرهای قم، ساوه و تفرش، حوضه قم-ساوه، به مساحت تقریبی ۱۳۰۰۰ کیلومتر مربع را بررسی و شواهد فعالیت کواترنری گسل‌های پهنه را عنوان کند.

منطقه مورد مطالعه (حوضه قم-ساوه) در شمال باختری ایران مرکزی، بین طول‌های جغرافیایی $30^{\circ} 49'$ تا $00^{\circ} 51'$ خاوری و عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ} 34'$ تا $20^{\circ} 35'$ شمالی واقع شده است (شکل ۱). علت تشکیل این حوضه رسوبی و وفور سنگ‌های آتشفشانی ائوسن-الیگوسن با راستای عمومی شمال باختر-جنوب خاور، در باختر ایران مرکزی به فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر پوسته قاره‌ای جنوب باختری ایران مرکزی در زمان الیگوسن-میوسن نسبت داده شده است (برای مثال، مورلی و همکاران، ۲۰۰۹؛ عمرانی و همکاران، ۲۰۰۸). این پهنه، به دلیل حرکت مداوم رو به شمال صفحه عربی، متحمل کوتاه‌شدگی ۷-۸ میلی‌متر در سال شده (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ نیل‌فروشان و همکاران، ۲۰۰۳) و مسبب فعالیت گسل‌های اصلی محدوده مورد بررسی با روند عمومی شمال باختری-جنوب خاوری است. در حقیقت، تمامی گسل‌های اصلی محدوده در زمان ائوسن-الیگوسن به صورت گسل‌های عادی (فراپوم و فروپوم) تشکیل شده و به دلیل کشش غالب منطقه سنگ‌های آتشفشانی به وجود آمده است (مورلی و همکاران، ۲۰۰۹). اما این گسل‌ها از زمان میوسن به صورت معکوس با مؤلفه‌ای راست‌بر فعالیت داشته است (پورکرمانی و همکاران، ۱۳۹۱؛ مورلی و همکاران، ۲۰۰۹). در حقیقت، این منطقه جزئی از پهنه برشی میان دو گسل کوشک-نصرت (در شمال) و تبرته (در جنوب و خارج از منطقه مورد مطالعه) است. گسل‌های تفرش، ایندس و ساوه گسل‌های وابسته به سازوکار این دو گسل و حرکت آن‌هاست (شکل ۱؛ خداپرست و همکاران، ۱۳۹۱). اندازه‌گیری‌ها و بررسی شواهد فعالیت گسل‌ها در رسوبات کواترنری بیانگر تغییر روند گسل‌های یادشده و باعث تغییر سازوکار این گسل‌ها به صورت عموماً راستالغز راست‌بر شده است، هر چند حرکات چپ‌بری نیز در برخی گسل‌های فرعی یا غیراصلی به دلیل جهت‌گیری آن‌ها نسبت به تنش اصلی دیده می‌شود (مورلی و همکاران، ۲۰۰۹؛ اورنگ و همکاران، ۱۳۹۳؛ پورکرمانی و همکاران، ۱۳۹۱؛ الیاس‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱).

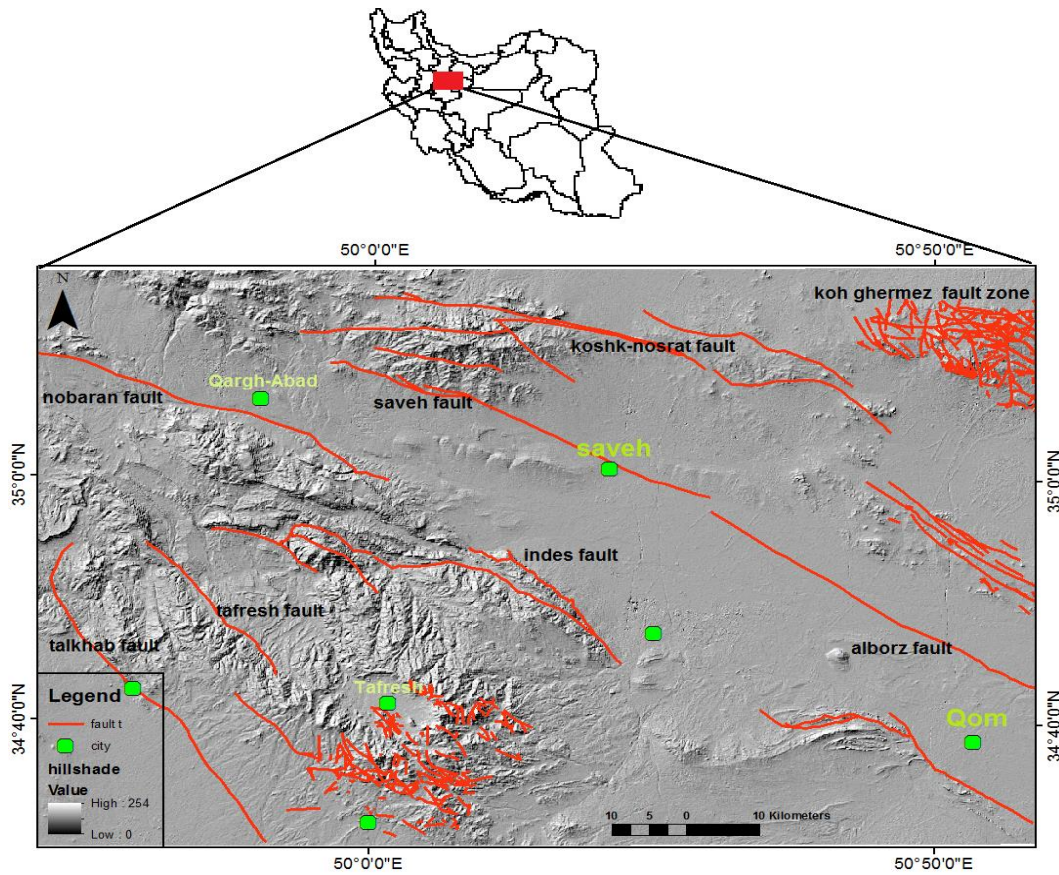
مواد و روش‌ها

در این پژوهش علاوه بر اندازه‌گیری شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی، به مطالعه شواهد صحرایی و تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شده است.

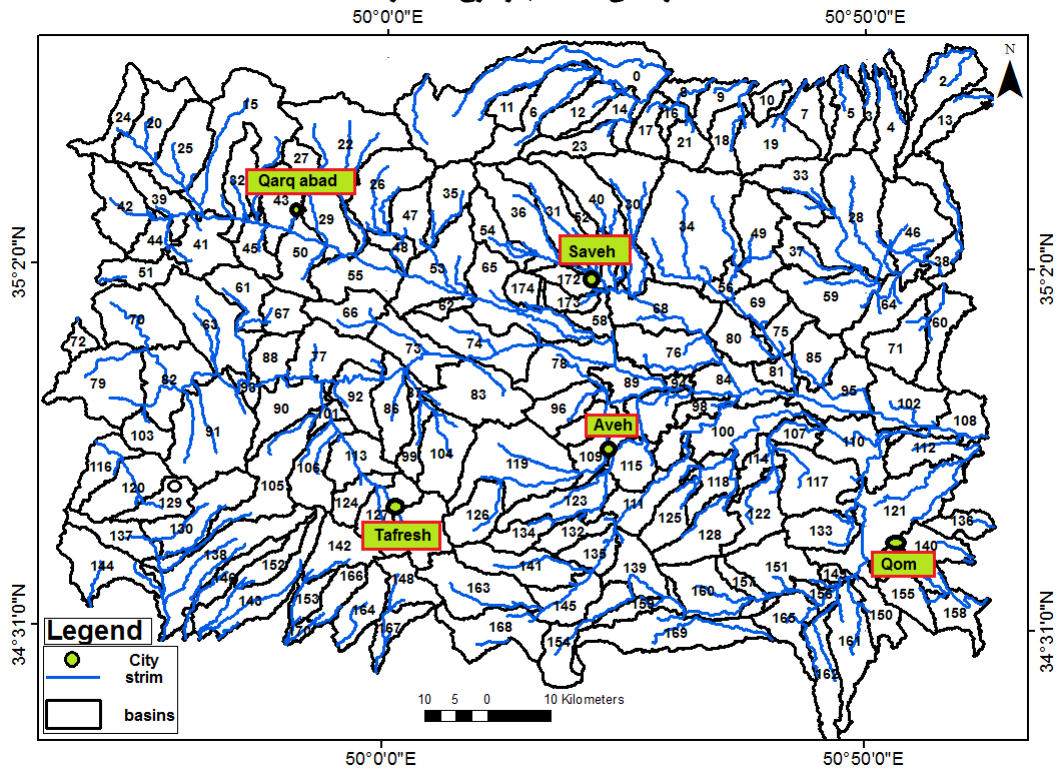
ریخت‌زمین‌ساخت گستره مورد مطالعه

با ارزیابی سه شاخص گرادیان طولی رود (SI)، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره (Vf) و شاخص سینوسی پیشانی کوهستان (Smf) در پهنه مورد مطالعه، سعی شده تا سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی آن برآورد شود. بدین منظور، در محیط نرم‌افزار ARC GIS 10.1 و با استفاده از برنامه Arc Hydro، همچنین مدل ارتفاعی رقومی منطقه (DEM) با وضوح ۱۰ متر، پس از طی مراحل پرکردن چاله‌های ارتفاعی رقومی^۱ و جهت جریان^۲، آبراهه‌های گستره مورد مطالعه از مدل ارتفاعی رقومی با روش ترسیم آبراهه‌ها^۳ تهیه شده است. در نهایت، مرز کلی، مرز زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های لازم برای بررسی به دست آمده است. پهنه مورد مطالعه بر اساس پارامترهای فیزیوگرافیکی استخراج‌شده حوضه‌ها به ۱۷۵ زیرحوضه تقسیم می‌شود. شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی به تفکیک برای هر یک از این حوضه‌ها اندازه‌گیری شده است (شکل ۲).

1. fill sinks
2. flow direction
3. stream definition



شکل ۱. موقعیت گسل‌های منطقه مورد مطالعه (خطوط قرمز) روی نقشه Hillshade برآمده از پردازش داده‌های رقومی ارتفاعی DEM با وضوح ۱۰ متر



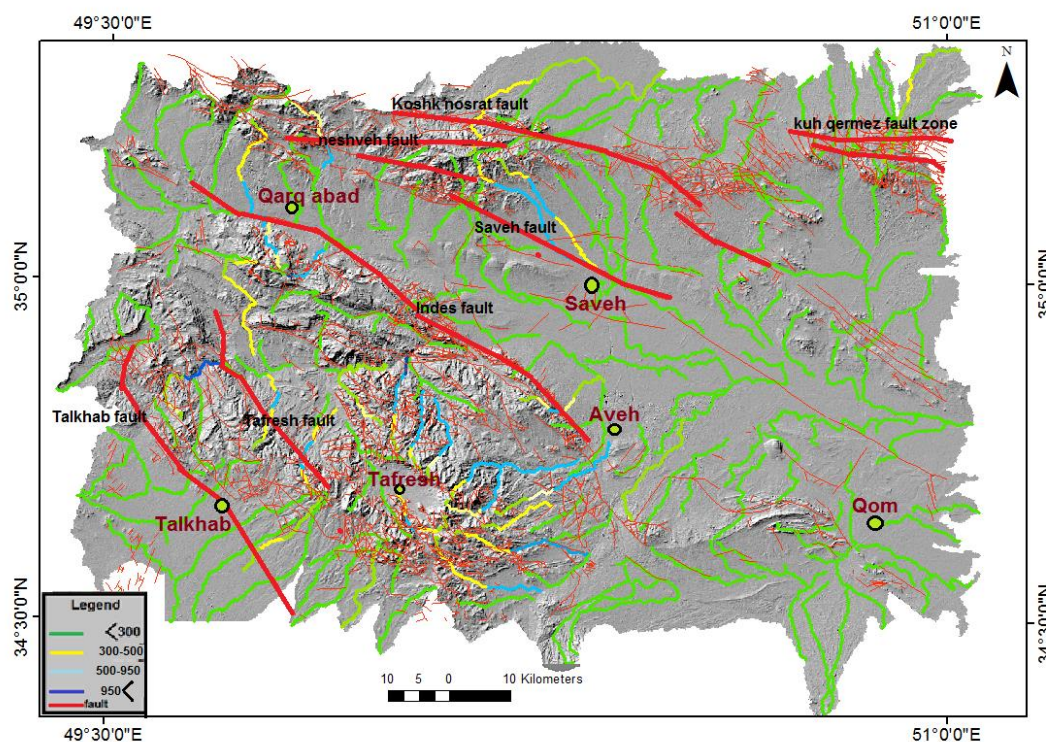
شکل ۲. نقشه توزیع مکانی ۱۷۵ زیرحوضه آبراهه‌ای استخراج‌شده از داده‌های رقومی ارتفاعی ۱۰ متر در گستره مورد مطالعه

شاخص گرادیان طولی رود

شاخص گرادیان طولی رود (SL) در محدوده و مسیر مشخص شبکه زهکشی بر پایه رابطه (۱) محاسبه و مشخص می‌شود (هاک ۱۹۸۲، ۱۹۷۳، ۱۹۵۷).

$$SL = (\Delta H / \Delta Lr) Lsc \quad (1)$$

که SL شاخص گرادیان طولی رود، ΔH ارتفاع تراز توپوگرافی، ΔLr فاصله افقی بین دو تراز توپوگرافی، $(\Delta H / \Delta Lr)$ شیب کانال یا گرادیان مسیر مشخص و Lsc طول کل کانال از نقطه شروع سرچشمه تا جایی است که شاخص ارزیابی شده محاسبه شده است. این شاخص به فرایش زمین در هر حوضه حساس است. در واقع، با توانایی رود در فرسایش کف بستر آن و حمل مواد حاصل از فرسایش (قدرت رود) ارتباط دارد. به همین دلیل این شاخص شرایط لازم برای ارزیابی مقدار ارتباط فعالیت زمین‌ساختی با مقاومت سنگ و توپوگرافی را فراهم می‌کند (برای مثال، کلر و پینتر، ۱۹۹۶؛ الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۷؛ بال، ۲۰۰۷). به منظور محاسبه شاخص SL برای آبراهه اصلی هر زیرحوضه، لایه نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ به لایه آبراهه‌ها در محیط Arc GIS 10.1 افزوده شد و مقادیر Lsc و $(\Delta H / \Delta Lr)$ با توجه به رابطه گفته شده، در هر قطعه از آبراهه اندازه‌گیری شد. در این پژوهش، آبراهه‌های با مقادیر کمتر از ۳۰۰ نشانه سطح فعالیت زمین‌ساختی خیلی کم (به رنگ سبز)، آبراهه‌های با مقدار SI ۳۰۰-۵۰۰ سطح فعالیت زمین‌ساختی کم (به رنگ زرد)، آبراهه‌های با مقدار SI ۵۰۰-۹۵۰ نشانه سطح فعالیت زمین‌ساختی متوسط (رنگ آبی روشن) و آبراهه‌های با SI بالاتر از ۹۵۰ نشانه سطح فعالیت زمین‌ساختی متوسط به بالا (به رنگ آبی تیره) است (تقسیم‌بندی بر اساس الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۷؛ شکل ۳).



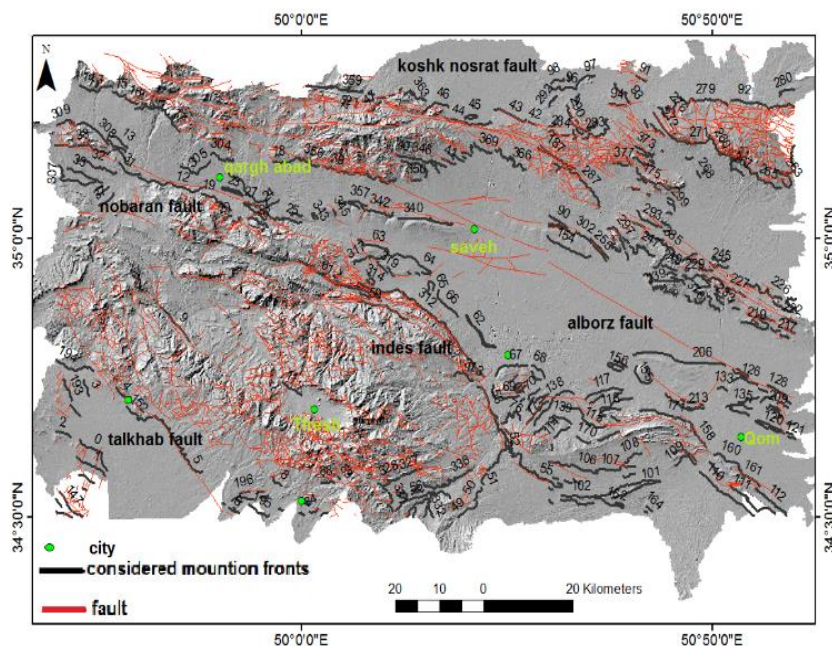
شکل ۳. نقشه شاخص گرادیان طولی در گستره مورد مطالعه

شاخص سینوسیتهی پیشانی کوهستان

شاخص سینوسیتهی پیشانی کوهستان از رابطه (۲) به دست می‌آید (بال، ۲۰۰۷؛ بال و مک‌فادن، ۱۹۷۷).

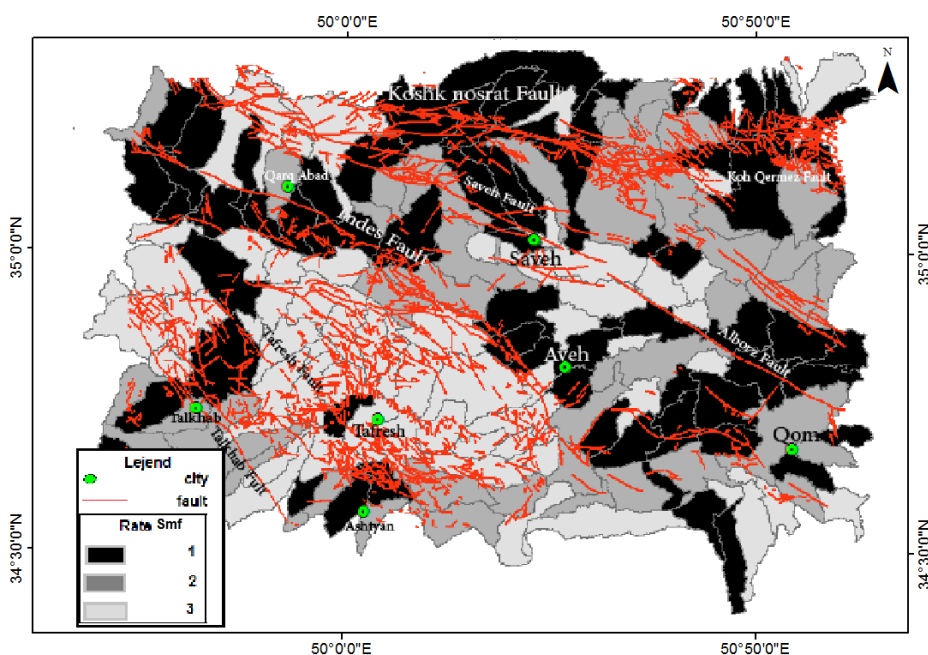
$$Smf = Lj/Ls \quad (2)$$

که Smf شاخص سینوسیتهی پیشانی کوهستان، Lj طول پیشانی کوهستان در امتداد کوهپایه و در محل شکست مشخص شیب و Ls طول خط مستقیم پیشانی کوهستان را نشان می‌دهد. شاخص سینوسیتهی پیشانی کوهستان، بیانگر تعادل بین نیروهای فرسایش‌دهنده است که به بریدن و ایجاد شکل‌های خلیجی شکل و برش به داخل پیشانی کوهستان از یک طرف، و به نیروهای زمین‌ساختی در ایجاد پیشانی کوهستانی مستقیم به‌طور هم‌زمان با گسل‌خوردگی متوالی و مرحله‌به‌مرحله تمایل دارد (کلر و پیتر ۱۹۹۶؛ بال، ۲۰۰۷؛ بال و مک‌فادن، ۱۹۷۷). پیشانی‌های کوهستانی که با فرایش زمین‌ساختی فعال همراه است، مستقیم است و مقادیر کمی Smf دارد (بال، ۲۰۰۷). اگر شدت فرایش کاهش‌یابد یا متوقف‌شود، فرسایش پیشانی کوهستان به‌طور قهقرایی خواهد شد و مقدار سینوسیتهی کوهستان (Smf) افزایش پیدا خواهد کرد. در این مطالعه با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی منطقه و کنتورهای ارتفاعی ۱۰۰ و ۲۰۰ متر، ۳۹۶ پیشانی کوهستان تعیین شده است (شکل ۴).



شکل ۴. پیشانی‌های کوهستان مشخص شده برای اندازه‌گیری شاخص سینوسیتهی پیشانی کوهستان روی مدل ارتفاع رقومی گستره مورد مطالعه

شاخص ریخت‌سنجی فوق پس از محاسبه به سه رده زمین‌ساختی تقسیم شد: $Smf < 1.10$ رده ۱، $1.10 > Smf > 1.50$ رده ۲ و $Smf \geq 1.50$ رده ۳ (بال، ۲۰۰۷). از بین پیشانی‌های تعیین شده، پیشانی‌های ۴۲، ۵۴، ۹۱، ۹۹، ۱۱۸، ۱۵۱، ۱۶۷، ۲۲۴ و ۲۷۴ با مقادیر Smf اندازه‌گیری شده ۱/۰۰ دارای کمترین مقدار (بالاترین میزان فعالیت) بود؛ یعنی، رده ۱ شاخص سینوسیتهی کوهستان است (شکل ۵).



شکل ۵. رده بندی حوضه ها بر اساس میزان اندازه گیری شده پیشانی کوهستان. رده ۱ بالاترین و رده ۳ کمترین فعالیت زمین ساختی را نشان می دهد.

نسبت عرض کف بستر به ارتفاع دره (Vf)

شاخص نسبت عرض کف بستر دره به ارتفاع دره (Vf) از رابطه (۳) محاسبه می شود (کلر و پینتر، ۱۹۹۶).

$$Vf = Vfw / [(Ald - Asc) + (Ard - Asc) / 2] \quad (3)$$

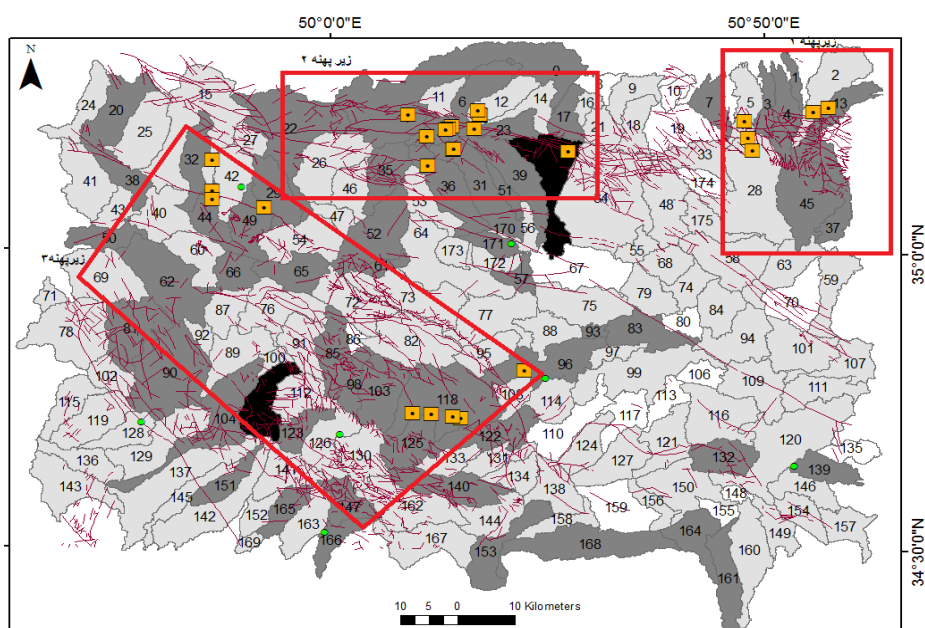
که Vf نسبت عرض به ارتفاع دره، Vfw پهنای دره، Asc، Ald و Ard، به ترتیب، ارتفاع خط تقسیم آب در قسمت بستر دره، چپ و راست دره است. این شاخص، دره های U شکل با مقادیر Vf نسبتاً زیاد را از دره های V شکل با مقادیر Vf کم تفکیک می کند. در این بررسی، به منظور محاسبه Vf، برش عرضی دره در حوضه های دارای دره که با بررسی نقشه Hillshad تعیین شده است، به فاصله حدود ۱۰ متر از پیشانی کوهستان، به داخل کوهستان ترسیم شده است. با استفاده از این برش ها و مدل ارتفاعی رقومی منطقه، همچنین نقشه های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ رقومی شده، مقادیر Vfw، Asc، Ald، Ard در هر کدام از حوضه ها به طور جداگانه اندازه گیری شده است. آنگاه شاخص زمین ریختی فوق، به ۱۳ رده Vf > 1، ۳ رده 0.5 < Vf < 1 و ۲ رده Vf < 0.5 تقسیم شده است. از میان چهل دره معین شده، دره های ۳۰، ۳۱، ۳۴ و ۳۵ به ترتیب با مقادیر Vf ۰/۱۰، ۰/۴۵، ۰/۲۷، ۰/۲۴، ۰/۴۶ واقع در حوضه های ۱۵، ۴۶، ۴۹، ۵۲، ۷۷ و ۹۵ دارای کمترین میزان نسبت کف بستر به ارتفاع دره یا به عبارتی بالاترین سطح فعالیت زمین ساختی در محدوده مورد مطالعه است (جدول ۱).

جدول ۱. رده بندی حوضه هایی که Vf در آن اندازه گیری شده است

Class Vf	Basin no.
1	15,46,49,52,77,95
2	49,54,0
3	13,2,4,5,20,44,90,128,137,145,129,169,6,37,53,35, 26,95,96,154,148,117

داده‌های ماهواره‌ای و صحرایی

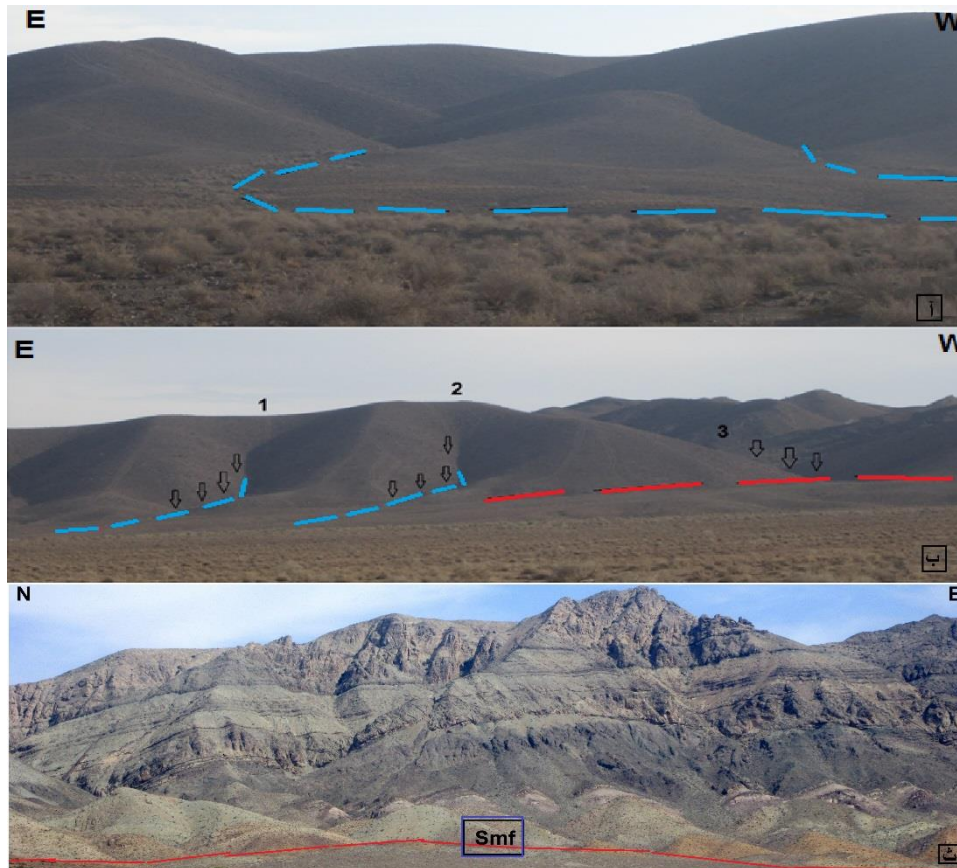
یکی از راه‌های بررسی فعالیت تکتونیکی گسل‌ها در کواترنری، توجه به مورفولوژی واحدهای کواترنری است. بر این اساس تأثیر مستقیم فعالیت تکتونیکی کواترنری منطقه بر لندفرم‌ها مثل آبراهه‌ها، به صورت انحرافات و بریدگی‌های آبراهه‌ها متناسب با سازوکار گسل‌ها وجود دارد که با کمک تصاویر ماهواره‌ای قابل برداشت است (بال، ۲۰۰۷؛ کلر و پینتر، ۱۹۹۶). بدین منظور، برای مستندسازی نتایج اندازه‌گیری‌های ریخت‌زمین‌ساختی پس از تهیه نقشه‌های ریخت‌زمین‌ساختی برای کل پهنه مورد مطالعه، به برداشت گسل‌ها و لندفرم‌ها پرداخته شد. در ابتدا، به دلیل بزرگی منطقه و سهولت برداشت از تلاقی حوضه‌های مجاور هم با رده فعالیت بالا یا خیلی بالا و منطبق بودن این حوضه‌ها با محل گسل‌های اصلی یا پهنه‌های گسلی، سه بخش مجزا به دست آمد که زیرپهنه‌های اصلی است (شکل ۶).



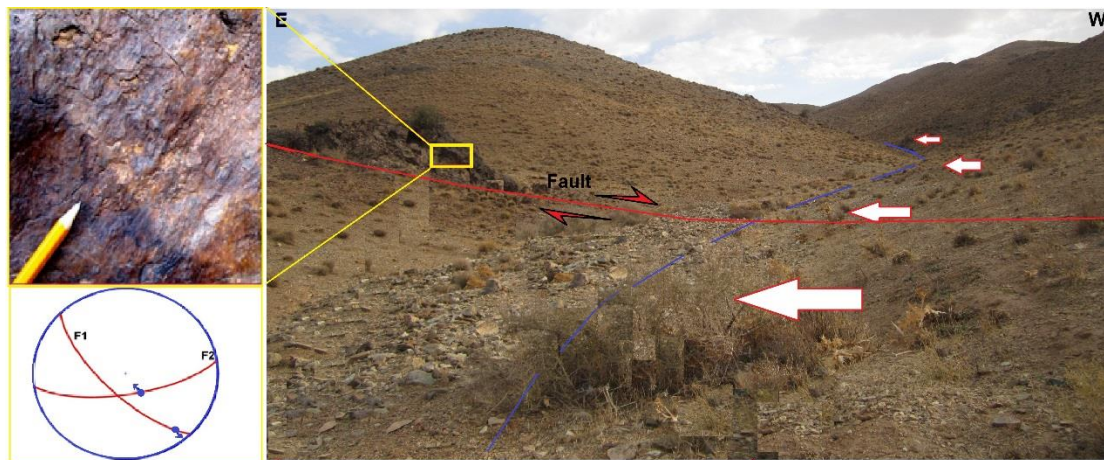
شکل ۶. موقعیت سه زیرپهنه به همراه موقعیت مکانی لندفرم‌های برداشت‌شده (مربع نارنجی‌رنگ) و گسل‌های اصلی روی نقشه حوضه‌های با فعالیت تکتونیکی بالا به رنگ تیره‌تر

زیرپهنه ۱، پهنه گسلی کوه‌قرمز، با داشتن کج‌شدگی فراوان و سیستماتیک در آبراهه‌ها (به سمت راست) و پیشانی‌های مستقیم کوهستان حاکی از فعالیت بالای راستالغزی (راستبر) و فرایش در این منطقه است (شکل ۷).
 زیرپهنه ۲ مربوط به گستره گسل‌های کوشک-نصرت، ساوه، نشوه و خلخاب است. این ناحیه فعال‌ترین بخش پهنه ساختاری قم-ساوه و دارای زمین‌ریخت‌های فراوان تکتونیکی از قبیل انحرافات در مسیر آبراهه‌هاست (شکل ۸). برداشت‌های انجام‌شده از گسل‌های مجاور با دشت دو سیستم گسلی معکوس با شیب کلی به سمت جنوب و راستالغز راست‌بر با امتداد کلی شمال‌باختر-جنوب‌باختر را نشان می‌دهد (شکل ۸).
 تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالا حاکی از جابه‌جایی کاملاً مشخص راستالغز راست‌بر در طول گسل کوشک-نصرت برای آبراهه‌های بزرگ است (شکل ۹) که خود دلیلی بر فعالیت امروزی گسل‌های راستالغز (شکل ۸) در این منطقه است. وجود گسلش در رسوبات کواترنری دلیل محکمی بر فعالیت بالای زمین‌ساختی در حال حاضر است. چندین گسل معکوس با مشخصات $135/44^{\circ} S$ و خش‌لغز حاصل روی قطعات درشت ماسه‌سنگی با ریک ۸۰ درجه از سمت باختر در شمال باختری زیرپهنه ۲، بین گسل‌های کوشک-نصرت و نشوه، حاکی از فعالیت بالای تکتونیکی این منطقه است (شکل ۱۰). انطباق راستا و جهت شیب کلی گسل‌های موجود در رسوبات کواترنری با گسل‌های اصلی این پهنه به‌خصوص گسل کوشک-نصرت حاکی از انشعاب گسل‌های کواترنری از گسل کوشک-نصرت و در نتیجه بیانگر فعالیت سیستم گسلی معکوس آن‌ها علاوه بر سیستم گسلی راستالغز است.

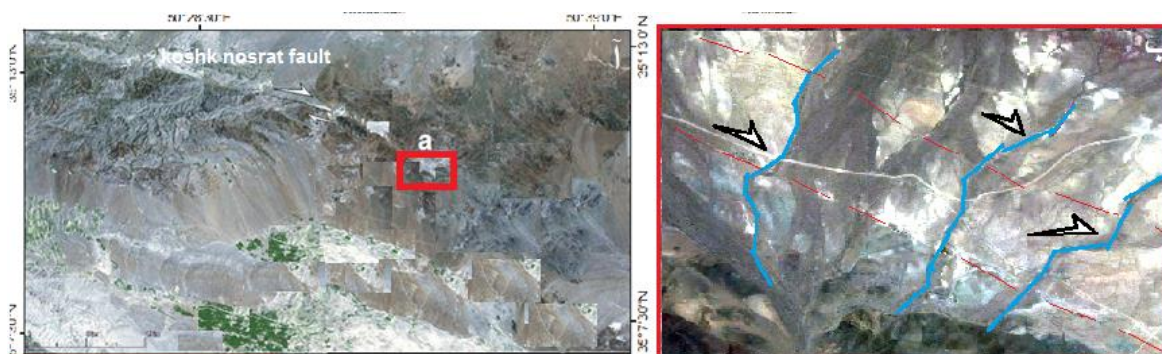
زیرپهنه ۳، بین گسل‌های ایندس و تلخاب (شکل ۶)، پهنه گسله و خردشده‌ای در سنگ‌های آتشفشانی و رسوبات آن‌ها با سن ائوسن-الیگوسن است. عمده گسل‌های این محدوده شامل گسل‌های معکوس و راستالغز با شیب زیاد (بیش از ۶۰ درجه) است (شکل ۱۱). از آنجا که مقدار اندیس SL در این منطقه بالاست، این گسل‌ها همچنان فعال و باعث فرایش در این منطقه شده است.



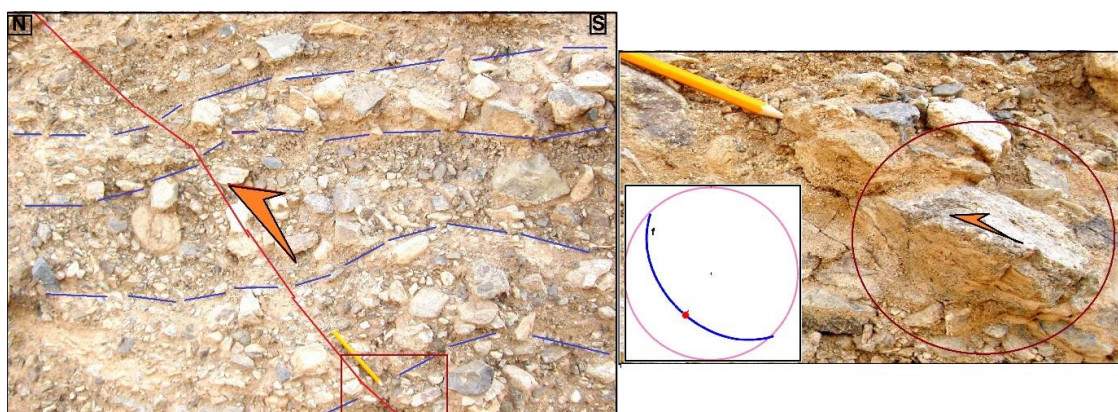
شکل ۷. آ و ب) آبراهه‌های منحرف‌شده در اثر فعالیت کواترنری پهنه گسله کوه قرمز، ث) پیشانی کوهستان. نزدیک روستای نظرآباد با موقعیت جغرافیایی $E 50^{\circ} 55' 40''$ و $N 35^{\circ} 14' 27''$



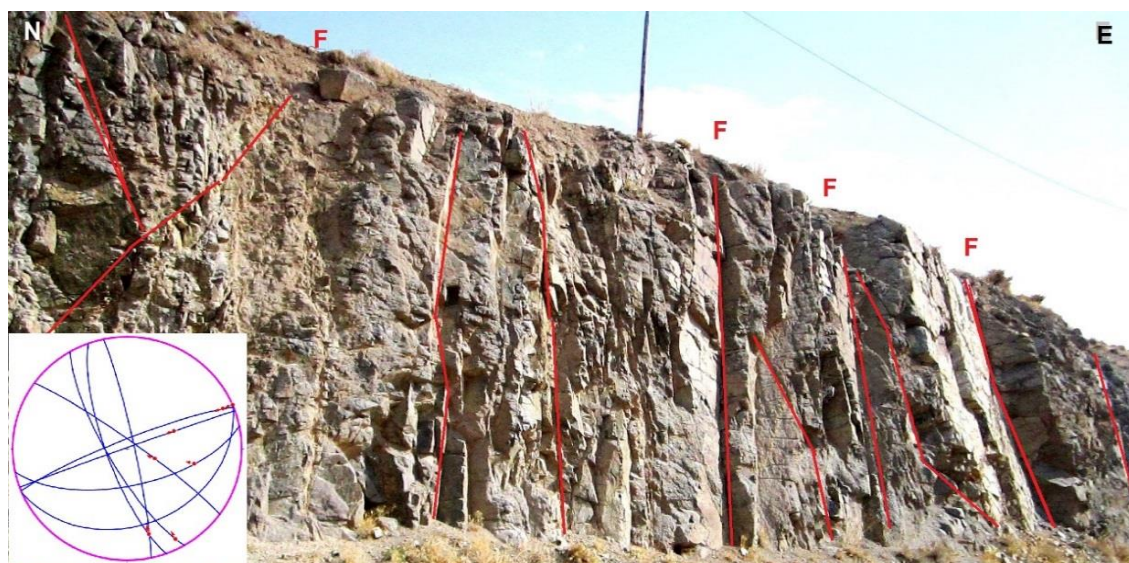
شکل ۸. انحراف رودخانه به راست در اثر حرکت انشعابات گسل امتدادلغز کوشک-نصرت یا نشوه، در شمال باختری پهنه مورد بررسی (نزدیکی روستای نشوه، با مختصات جغرافیایی $E 50^{\circ} 13' 39''$ و $N 35^{\circ} 12' 33''$)



شکل ۹. (آ) تصویر کلی از گسل کوشک-نصرت روی تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث؛ (ب)، انحراف آبراهه‌ها به سمت راست در امتداد گسل‌های فرعی زیردشت که گویای عملکرد مؤلفه راست‌الغز راست‌بر و واحدهای سنگی آتشفشانی و رسوبات آن است (شمال خاوری ساوه).

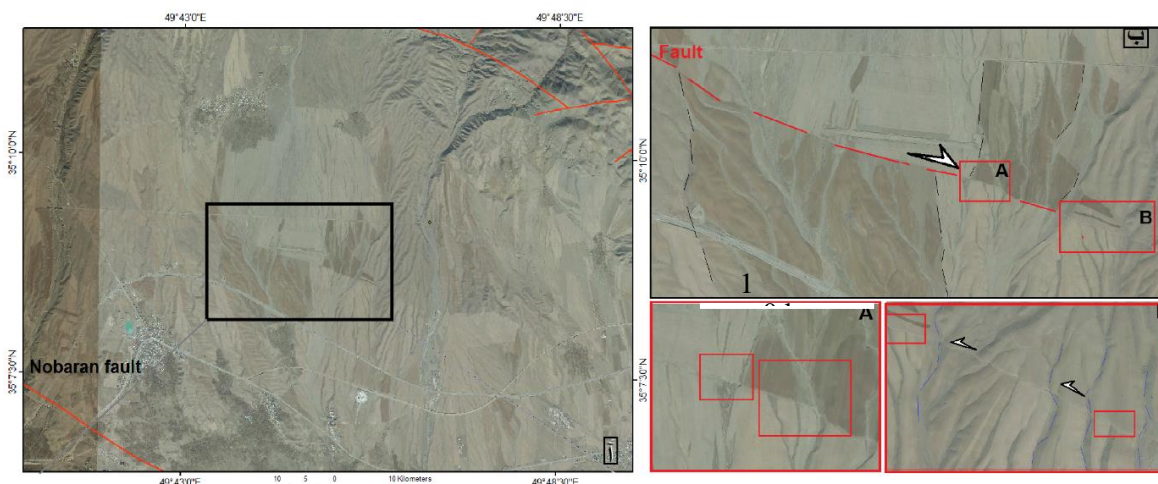


شکل ۱۰. گسل معکوس با شیب به سمت جنوب و خش‌لغز با ریک زیاد (در استریونت به صورت دایره مشخص شده) در رسوبات کواترنری نزدیک گسل‌های نشوه و کوشک-نصرت، با موقعیت جغرافیایی "N 35° 12' 33" و E 50° 13' 39"



شکل ۱۱. گسل‌های برداشت‌شده از پهنا گسلی جنوب ایندس به مختصات جغرافیایی "N 34° 43' 50" و E 50° 09' 56" به همراه استریونت (نیمکره پایینی) تهیه‌شده از مشخصات گسل‌های این قسمت (ولکانیک‌های ائوسن)

در تصویر ماهواره‌ای برداشت‌شده از شمال گسل نوبران (قطعه شمال باختری ایندس) انحراف‌ها کاملاً منظم در آبراهه‌ها (به سمت راست) به همراه بریدگی در مسیر آن‌ها دیده می‌شود که خاص مناطق گسلی با سازوکار راستالغز است (شکل ۱۲). مشاهدات صحرائی و تصاویر ماهواره‌ای روی همین پهنه گسله انحراف‌های منظم آبراهه‌های کوچک‌تر به سمت چپ (شکل ۱۲) به عبارتی حرکت راستالغز چپ‌بر را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱۲. موقعیت گسل‌های موازی با گسل نوبران (قطعه شمال باختری ایندس) روی تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث و بریدگی رسوبات کواترنری در اثر فعالیت آن (شکل بالا): آبراهه‌های سربریده و انحراف آن‌ها به سمت راست (پایین سمت چپ) و انحراف آبراهه‌ها به سمت چپ (پایین سمت راست)

در شمال زیرپهنه ۳ در آبرفت‌های کواترنری شمال قطعه باختری گسل ایندس (گسل نوبران) آثار گسل‌های حاکی از فعالیت تکتونیکی بالای این منطقه قابل مشاهده است. حداقل دو سری گسل با سازوکار عادی و معکوس در موقعیت $N 35^{\circ} 09' 15''$ و $E 49^{\circ} 46' 37''$ برداشت شده است. گسل معکوس دارای مشخصات $E 175/31$ (امتداد/شیب جهت شیب) با خش‌لغزهایی که ریک بیش از ۸۰ درجه دارد، جابه‌جایی در حدود ۲۰-۳۰ سانتی‌متر ایجاد کرده است (شکل ۱۳). با توجه به اینکه راستای این گسل معکوس با گسل اصلی منطقه نوبران اختلاف زیادی دارد (تقریباً اختلاف راستای ۷۵ درجه) و با توجه به اینکه به موازات گسل اصلی راستالغز راست‌بر نوبران نیز گسل راستالغز راست‌بری در شمال آن مشاهده شده (شکل ۱۲)، به نظر می‌رسد تشکیل گسل‌های معکوس در آبرفت‌های کواترنری در حوضه‌های فشارشی در ارتباط با خم گسلی یا پله گسلی باشد (شکل ۱۳ ب).

در نزدیکی همین گسل معکوس به سمت خاور (با فاصله حدود ۱۰۰ متر) گسل‌های عادی در فرادیواره با مشخصات $W 23/52$ با خش‌لغزهای ریک بیش از ۸۰ درجه و جابه‌جایی کمتر از ۵-۷ سانتی‌متر نیز رخنمون دارد (شکل ۱۴). تشکیل گسل‌های عادی با حرکت مواد در فرادیواره گسل معکوس به دلیل حرکت مواد به سمت پیشانی و در نتیجه ایجاد کشش در رسوبات نرم واقع در قسمت‌های پشت (فرادیواره) به وجود آمده باشد (شکل ۱۴ ج).

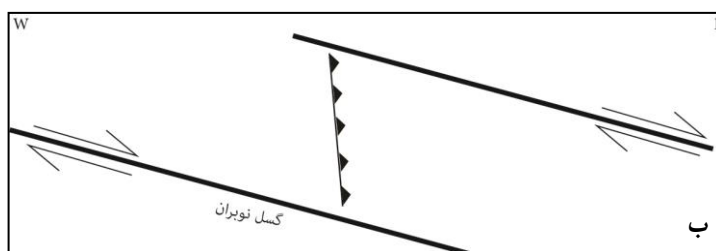
بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های ریخت‌زمین‌ساختی، بالاترین نرخ شاخص SL برای حوضه‌های ۰، ۲۲، ۳۱، ۳۶، منطبق بر گسل کوشک-نصرت، حوضه‌های ۳۲، ۴۴، ۴۹ منطبق بر گسل نوبران و حوضه‌های ۹۵، ۱۲۲، ۱۱۴، ۱۴۰، ۱۶۲، ۱۳۰، ۱۰۳، ۹۸، ۸۵، ۸۶، ۱۱۸، ۱۲۵، ۱۳۳، ۱۰۵، ۸۹، و ۸۱ بر پهنه خردشده حد فاصل گسل‌های ایندس و تفرش به‌دست آمده است (شکل ۳). بر این اساس، می‌توان این نواحی را حوضه‌های با شیب‌گرادیان رودخانه‌ای بالا دانست که خاص نواحی فرسایش‌یافته و فرایش بالاست. این مطلب به فعالیت کواترنری گسل‌های با مؤلفه شیب‌لغز مجاور یا منطبق بر حوضه‌ها مرتبط است. از طرف دیگر، انحراف منظم و سیستماتیک آبراهه‌ها به‌خوبی بیانگر فعالیت سیستم

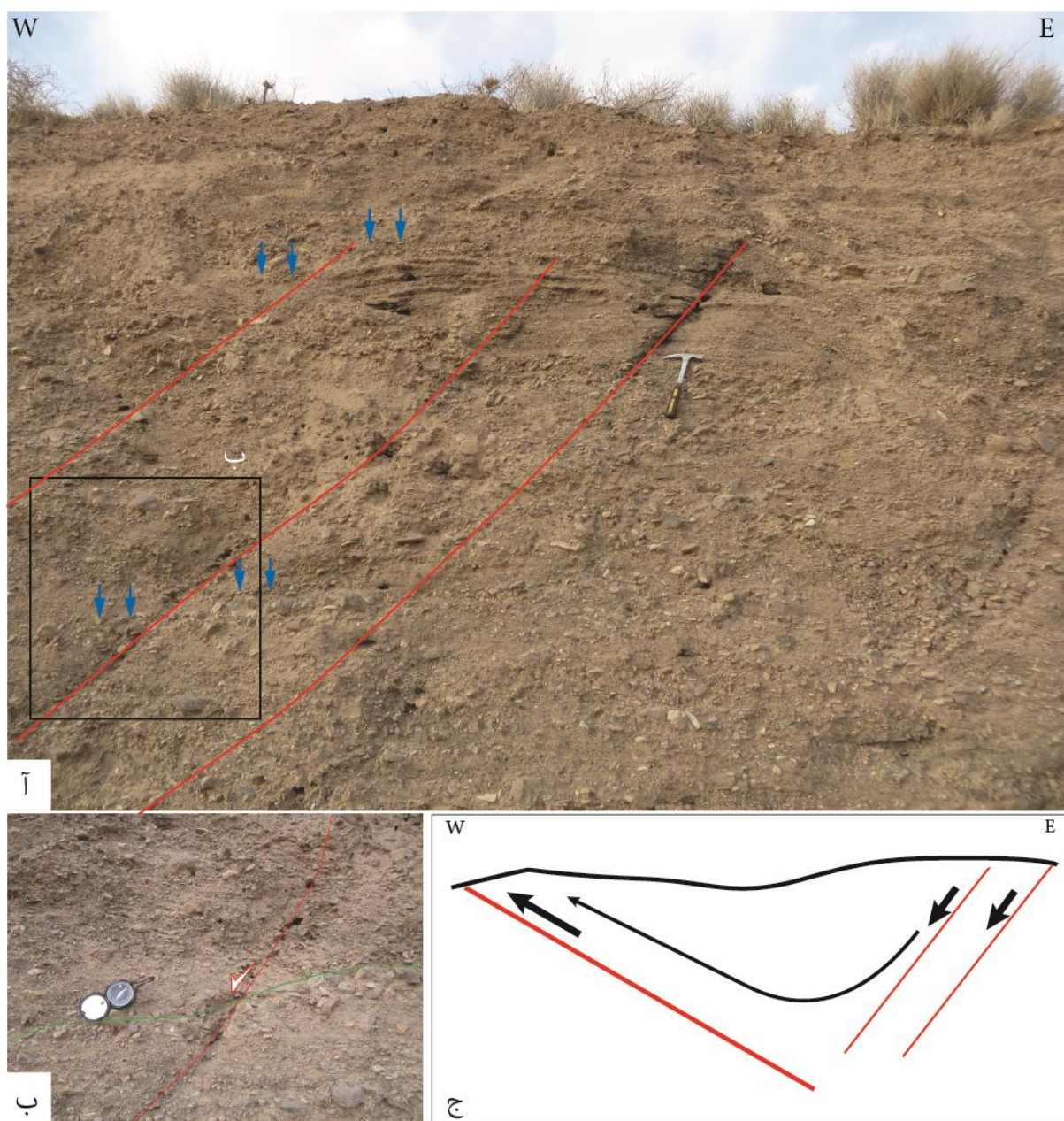
گسلی راستالغز نیز است. از آنجا که عموماً این مناطق گسل‌هایی با سازوکار راستالغز (ریک خش‌لغز با شیب کمتر از ۱۰ درجه) و شیب لغز (ریک خش‌لغز بالای ۷۰ درجه) است، به نظر می‌رسد هر دو سیستم گسلی فعال باشد. طی بررسی پیشانی‌های کوهستان که به وسیله تصویر Hill shad و کنتورهای ارتفاعی حاصل از DEM ۱۰ متر منطقه به‌دست‌آمد، زیرحوضه‌های مجاور یا در امتداد گسل‌های اصلی دارای بالاترین میزان فعالیت Smf است. همچنین، بیشترین تمرکز زیرحوضه‌های فعال از نظر میزان سینوسی پیشانی کوهستان در امتداد گسل‌های کوشک-نصرت، نوبران و پهنه گسلی کوه‌قرمز است.

بالا بودن شاخص Vf در پهنه، وجود دره‌های تنگ و باریک را نشان می‌دهد که از جمله لندفرم‌های نواحی تکتونیکی فعال محسوب می‌شود. طبق جدول ۱، حدود ۴۳٪ از دره‌های اندازه‌گیری شده در کل پهنه دارای مقادیر نسبت عرض کف بستر دره به ارتفاع دره (Vf)، بین ۰/۰۳ تا ۱ است که نشان‌دهنده دره‌های تقریباً ژرف با میزان بالآمدگی نسبتاً بالاست. بر اساس اندازه‌گیری‌ها، دره‌های ۱۳، ۳۰، ۳۱، ۳۴ و ۳۵ رده ۱ شاخص Vf را داراست که در اطراف گسل‌های ساوه و ایندس واقع است. همچنین، دره‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶ دارای رده ۲ شاخص Vf روی گسل نوبران و کوشک-نصرت واقع شده است.

نتایج برداشت‌های صحرائی که به صورت لندفرم‌های تکتونیکی در مجاورت گسل‌های اصلی عنوان شد، سرعت بالای فعالیت تکتونیکی در منطقه را نشان می‌دهد که در پی حرکات کواترنری گسل‌های اصلی حاصل شده است. انطباق محل این لندفرم‌ها در حوضه‌های با شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی بالا و مجاور گسل‌های اصلی، به‌خصوص وجود گسل‌های معکوس متعدد در رسوبات آبرفتی از جمله شواهد فعالیت کواترنری گسل‌های پهنه، به‌خصوص گسل کوشک-نصرت، ساوه، ایندس، نفرش و پهنه گسل کوه‌قرمز است. همچنین، پویایی زمین‌ساختی حوضه قم-ساوه با تأثیر مستقیم بر مورفولوژی منطقه در تصاویر ماهواره‌ای به‌صورت کج‌شدگی‌ها و بریدگی‌ها در مسیر آبراهه‌ها نمایان است.



شکل ۱۳. گسل معکوس واقع در شمال باختری ایندس (نوبران) باعث خمش و بریدگی رسوبات کواترنری شده است. (آ) شمایی از ارتباط و نحوه قرارگیری گسل معکوس با گسل راستالغز، (ب) راست‌بر نوبران



شکل ۱۴. گسل عادی در رسوبات کواترنری واقع در شمال باختری گسل ایندس (نوبران) (آ و ب) و ارتباط و نحوه تکامل گسل‌های عادی با گسل معکوس واقع در شمال گسل اصلی نوبران ($35^{\circ} 09' 15'' N$ و $49^{\circ} 46' 37'' E$)

وجود گسل‌های معکوس در آبرفت‌های کواترنری که به موازات و مجاورت گسل کوشک-نصرت است، به دلیل فعالیت شیب‌لغز این گسل پدیدار شده و گسل‌های معکوس در آبرفت‌های کواترنری موجود در شمال گسل امتداد لغز نوبران احتمالاً به دلیل خم گسلی یا همپوشانی پله‌ای این گسل ایجاد شده است. گسل‌های عادی در رسوبات کواترنری در همین محدوده، در مجاورت گسل‌های معکوس موجود در شمال گسل نوبران، احتمالاً به دلیل حرکت مواد در رسوبات نرم و سست کواترنری در اثر فعالیت گسل‌های معکوس تشکیل شده است، هر چند مطالعات ساختاری بیشتری درباره این منطقه پیشنهاد می‌شود.

با اینکه گسل‌های راستالغز پهنه مورد مطالعه باعث انحراف رودخانه‌ها و آبراهه‌ها به صورت بارز به سمت راست می‌شود که مبین سازوکار راست‌بر است، در راستای همین گسل‌های راستالغز به‌خصوص کوشک-نصرت و نوبران

انحراف سیستماتیکی آبراهه‌های کوچک به سمت چپ، به عبارتی چپ‌بر، نیز مشاهده شده است. این پژوهش قادر به حل این تضاد نیست و پیشنهاد می‌کند مطالعات دقیق‌تری در زمینه سازوکار گسل‌های یادشده انجام گیرد.

مسائل عنوان‌شده شواهد و مدارک قابل استنادی برای حرکات اخیر زمین‌ساختی در منطقه است. نتایج ارزیابی مقادیر شاخص‌های گرادیان طولی رود، شاخص سینوسی پیشانی کوهستان، شاخص نسبت عرض کف بستر به ارتفاع دره، برداشت‌های صحرائی و لندفرم‌ها به همراه گسل‌های کواترنری، گویای این مطلب است که گسل‌های شناخته‌شده منطقه از جمله گسل‌های ایندس، تفرش، نوبران، کوشک-نصرت و ساوه امروزه فعال و از لحاظ رخداد زلزله خطرآفرین است. با توجه به مقادیر کمی شاخص‌های زمین‌ریختی و همراهی آن با اشکال زمین‌ریختی مرتبط (لندفرم‌ها)، از جمله، افزای گسلی، قطع‌شدگی آبراهه‌ها و رودخانه‌های منحرف‌شده، پیشانی‌های مستقیم، تراس‌های رودخانه‌ای، و مهم‌تر از همه وجود گسل‌های کواترنری و انطباق نتایج حاصل با محل گسل‌ها و سازوکار حرکتی آن‌ها (راستالغز با مؤلفه شیب‌لغز معکوس) می‌توان نتایج کلی زیر را عنوان کرد.

- از میان گسل‌ها و پهنه‌های گسلی کل منطقه، گسل‌های کوشک-نصرت، ساوه و مناطق حدفاصل این دو گسل فعالیت زمین‌ساختی کواترنری بسیار بالایی دارد.
- گسل ایندس و تفرش و پهنه‌های گسل بین این دو به همراه پهنه گسل کوه‌قرمز رده‌های بالای فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهد و با بالآمدگی شدید همراه است.
- گسل البرز و گسل‌های جنوب خاوری منطقه (اطراف قم) سطح فعالیت پایین را از نظر ریخت‌زمین‌ساختی نشان می‌دهد. از آنجا که شاخص‌های برداشت‌شده در این پژوهش از نوع شاخص‌های حساس به حرکات شیب‌لغز است، حرکات راستالغزه شیب‌لغز غالب را بیان می‌کند.

منابع

- الیاس‌زاده، ر.؛ محجل، م.؛ فراهانی، ب. و جعفری، ر. (۱۳۹۱). سازوکار گسل جوان البرز (منطقه شمالی قم)، شاهدهی بر انتقال وارون‌شدگی گسل‌های پهنه البرز مرکزی-باختری به گسل‌های هم‌راستای آن‌ها در جنوب این پهنه، *فصلنامه علوم زمین*، ۸۳: ۱۳-۲۲.
- اورنگ، ک.؛ محجل، م. و تاج‌بخش، غ.ر. (۱۳۹۳). شواهد وارونگی بردار لغزش در گسل کوشک-نصرت، شمال ساوه، *فصلنامه علوم زمین*، ۹۴: ۳۱۵-۳۲۸.
- پور کرمانی، م.؛ محجل، م.؛ سلگی، ع.؛ آری، م. و ندری، ر. (۱۳۹۱). زمین‌ساخت جنبای جنوب قم تهدیدی برای مناطق جدید شهری، *فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی*، ۳: ۲۰۳-۲۱۳.
- خداپرست، س.؛ محجل، م. و حاج‌امینی، س. (۱۳۹۱). بررسی ساختاری و تأثیر تغییر ستبرای قم بر هندسه ساختارها، منطقه دخان در باختر ساوه، *فصلنامه علوم زمین*، ۹۳: ۲۳۵-۲۴۴.
- Bull, W.B. and McFadden, L.D. (1977). *Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California*. In: Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions. Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium*. State University of New York, Binghamton: 115-138.
- Bull, W.B. (2007). *Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology*, Blackwell, Malden.
- Burbank, D. and Anderson, R. (2012). *Tectonic Geomorphology Book, Second Edition*, Wiley-Blackwell, 454pp.
- El Hamdouni, R.; Irigaray, C.; Fernandez, T.; Chacon, J. and Keller, E.A. (2007). Assessment of relative tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain), *Geomorphology*, 96: 150-173.
- Elyaszadeh, R.; Mohajel, M.; Farahani, B. and Jafari, R. (2012). Young Alborz Fault (northern region Qom), evidence of the transfer Varvn→Shdgy Central-West Alborz faults are faults to them in the south of the zone, *Scientific Quarterly Journal Geosciences*, 83:13-22.
- Hack, J.T. (1982). Physiographic division and differential uplift in the piedmont and Blue Ridge, *U.S. Geological Survey Professional*, 1265: 1-49.
- Hack, J.T. (1973). Stream-profiles analysis and stream-gradient index, *U.S. Geological Survey*, 1: 421-429.
- Hack, J.T. (1957). Studies of longitudinal stream-profiles in Virginia and Maryland, *U.S. Geological Survey Professional*, 294B: 45-97.
- Hajiyani, J. and Amini, B. (2011). *Department of Geological map quadrangle, with a scale of 1:100,000 Tafresh*, Department of Geological and Mineral Exploration Organization of Iran.
- Khodaparast, S.; Mohajel, M. and Hajamini, S. (2012). Structural analysis and the impact of changing the structural geometry of the structural review to Qom, the Dokhan area in west Saveh, *Scientific Quarterly Journal Geosciences*, 93: 235-244.
- Keller E.A. and Pinter, N. (1996). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Prentice Hall, New Jersey, 359pp.
- Morley, C.; Kongwung, B.; Julapour, A.; Abdolghafourian, M.; Hajian, M.; Waples, D.; Warren, J.; Otterdoom, H.; Srisuriyon, K. and Kazemi, H. (2009). Structural development of a major late Cenozoic Basin and transpressional belt in central Iran: The Central Basin in Qom-Saveh area, *Geosphere*, 5(4): 325-362.

- Nilforoushan, F.; Masson, F.; Vernant, P.; Vigny, C.; Martinod, J.; Abbassi, M.; Nankali, H.; Hatzfeld, D.; Bayer, R.; Tavakoli, F.; Ashtiani, A.; Doerflinger, E.; Daignières, M.; Collard, P. and Chéry, J. (2003). GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran, *Journal of Geodesy*, 77(7-8): 411-422.
- Omrani, J.; Agard, P.; Whitechurch, H. and Benoit, M. (2008). Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences, *Lithos*, 106: 380-398.
- Orang, K.; Mohajel, M. and Tajbakhsh, G.R. (2014). Evidence vector inversion of fault slip in Kushk-N, north of Saveh, *Scientific Quarterly Journal Geosciences*, 94: 315-328.
- Pourkermani, M.; Mohajel, M.; Aryan, M. and Nadri, R. (2011). Active Zmyn-Sakht south of Qom threat to new urban areas, *Quarterly Applied Geology*, 3: 203-213.
- Vernant, P.h.; Nilforoushan, F.; Hatzfeld, D.; Abbassi, M.R.; Vigny, C.; Masson, F.; Nankali, H.; Martinod, J.; Ashtiani, A.; Bayer, R.; Tavakoli, F. and Chery, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophysical Journal International*, 157(1): 381-398.