



فصلنامه زمین ساخت

بهار ۱۴۰۵، سال هشتم، شماره ۲۹

doi 10.22077/jt.2026.10831.1217

مقاله پژوهشی

بررسی زمین ساخت فعال شرق کوهزاد زاگرس براساس شاخص های مورفوتکتونیک و شواهد سنجش ازدور

المیرا مصدق زاده^۱، علیرضا ندیمی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای تکتونیک، گروه زمین شناسی دانشگاه اصفهان
۲- دانشیار تکتونیک گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

کمر بند چین خورده-رانده زاگرس به عنوان بخش اصلی سامانه برخورد صفحه های عربی و اوراسیا، یکی از گسترده ترین و فعال ترین پهنه های تکتونیکی ایران به شمار می رود و مرز جنوب شرقی آن با پهنه فرو رانش مکران، ناحیه ای پیچیده با تغییرات سریع در رژیم تنش و نرخ بالا آمدگی را شکل می دهد. در این مطالعه به منظور ارزیابی میزان فعالیت زمین ساختی در بخش شرقی این کمر بند، سه شاخص مورفوتکتونیکی سینوسیته پیشانی کوهستان (Smf)، ضریب شکل حوضه (Ff) و گرادیان طولی رودخانه (SL) محاسبه و تحلیل شدند. داده های SRTM و شبکه آبراهه ها برای استخراج و پهنه بندی شاخص ها مورد استفاده قرار گرفت و سپس شاخص زمین ساخت فعال نسبی (IAT) برای تلفیق نتایج و طبقه بندی حوضه ها تعیین شد. نتایج نشان داد که بخش شرقی زاگرس به طور قابل توجهی فعال است. پیشانی های کوهستان دارای مقادیر پایین Smf بوده و هندسه مستقیم آن ها بیانگر نقش راندگی های اصلی نظیر راندگی اصلی زاگرس و گسل زاگرس مرتفع در حفظ لبه تکتونیکی است. شاخص Ff نیز نشان می دهد که حوضه های باریک و کشیده با Ff کمتر از ۰.۱۷ عمدتاً در مجاورت گسل های فعال میناب، گنو، دهران و بشاگرد قرار دارند. شاخص SL با دامنه وسیع گویای ناهمگنی شدید در میزان بالا آمدگی و کنترل ساختاری بر زهکشی است. تلفیق شاخص ها در قالب IAT نشان داد که بخش قابل توجهی از حوضه ها در رده های ۱ و ۲ (فعالیت بسیار زیاد و زیاد) قرار می گیرند. همخوانی این نتایج با الگوی خطواره های استخراج شده از تصاویر Landsat تأیید می کند که ناحیه گذار زاگرس-مکران از فعال ترین پهنه های تکتونیکی ایران بوده و تحت تأثیر شبکه ای پیچیده از گسل های فشاری-امتداد لغز در حال تکامل است.

کلمات کلیدی: زمین ساخت فعال، مورفوتکتونیک، کمر بند چین و رانده زاگرس، ماهواره لندست

* ایمیل: a.nadimi@sci.ui.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۳۱۱۳۴۴۲۳

Research Paper

Assessment of Tectonic Activity in the Eastern Zagros Based on Morphotectonic Indices and Remote Sensing Evidence

*Elmira Mosaddeghzadeh¹, Alireza Nadimi²

¹ PhD Candidate in Tectonics, Department of Geology, University of Isfahan

^{2*} Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan

Abstract

The Zagros Fold–Thrust Belt, a key component of the Arabia–Eurasia plate collision system, is one of the most extensive and active tectonic zones in Iran. Its southeastern boundary with the Makran subduction zone forms a complex region characterized by rapid changes in stress regime and uplift rates. This study assesses tectonic activity in the eastern Zagros using three morphotectonic indices: mountain-front sinuosity (Smf), basin shape factor (Ff), and stream length–gradient index (SL). SRTM data and the drainage network were used to extract and map these indices, and the Index of Active Tectonics (IAT) was calculated to integrate the results and classify the basins. The results indicate that the eastern Zagros is highly tectonically active. Low Smf values and relatively straight mountain fronts highlight the role of major thrusts, including the Main Zagros Thrust and the High Zagros Fault, in maintaining the tectonic margin. Narrow and elongated basins with Ff values lower than 0.17 are mainly located near the active Minab, Geno, Dehrahm, and Bashagard faults. The wide range of SL values reflects strong spatial variations in uplift rates and significant structural control on drainage development. Integration of the indices through the IAT shows that many basins fall within classes 1 and 2, corresponding to very high and high tectonic activity. These results, consistent with lineaments extracted from Landsat imagery, confirm that the Zagros–Makran transition zone is among the most tectonically active regions of Iran.

Keywords: active tectonics, morphotectonics, Zagros Fold–Thrust Belt, Landsat satellite

*Email: a.nadimi@sci.ui.ac.ir

Tel: +989131134423

مقدمه

(Taleblian and Jackson, 2002; Nissen et al., 2016).

در چنین محیط‌های تکتونیکی فعالی، ریخت‌زمین‌ساخت به‌عنوان پیوندی میان فرآیندهای درونی زمین و پاسخ‌های سطحی چشم‌انداز مطرح می‌شود (Mosadeghzadeh et al., 2026). مفهوم بنیادین ریخت‌زمین‌ساخت بر رقابت میان نیروهای تکتونیکی مولد توپوگرافی و فرآیندهای سطحی فرسایشی تأکید دارد (Burbank and Anderson, 2008). فعالیت گسل‌ها، بالاآمدگی پوسته و چین‌خوردگی‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم هندسه پیشانی کوهستان، الگوی زهکشی و شکل حوضه‌های آبریز را دگرگون سازند (Schumm et al., 2000; Holbrook and Schumm, 1999).

از سوی دیگر، توسعه سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مناسب، امکان استخراج ساختارهای خطی و تحلیل هندسه خطواره‌ها را به‌عنوان مکملی مهم برای مطالعات ریخت‌زمین‌ساخت فراهم کرده است. خطواره‌ها اغلب بازتاب مستقیم گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های برشی فعال بوده و تحلیل جهت‌گیری و تراکم آن‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره میدان تنش و الگوی تغییرشکل منطقه ارائه دهد (O'Leary et al., 1976; Dru-ry, 2001; Gupta, 2017).

با توجه به اهمیت ویژه شرق کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس از نظر لرزه‌خیزی فعال، پیچیدگی ساختاری و قرارگیری در ناحیه گذار زاگرس-مکران (Mosade-ghzadeh et al., 2026)، هدف این پژوهش به‌کارگیری یک رویکرد تلفیقی مبتنی بر سنجش‌ازدور و شاخص‌های زمین‌ریختی به‌منظور برآورد میزان زمین‌ساخت فعال نسبی، بارزسازی مجدد گسل‌ها و ساختارهای فعال، و ارزیابی نقش آن‌ها در تکامل ژئومورفولوژی منطقه است. در این راستا، تحلیل خطواره‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat به‌عنوان ابزاری برای شناسایی ساختارهای پنهان و فعال، همراه با محاسبه شاخص‌های زمین‌ریختی شامل پیچ و خم پیشانی کوهستان (S_{mf})، ضریب شکل حوضه (Ff) و گرادیان طولی رودخانه (SL) به‌عنوان بازتاب پاسخ ژئومورفیک چشم‌انداز به تکتونیک فعال، امکان ارزیابی هم‌زمان شواهد ساختاری و ریخت‌زمین‌ساختی را فراهم می‌کند.

از جمله مطالعاتی که با این روش‌ها صورت گرفته است می‌توان به تعیین فعالیت زمین‌ساخت نسبی در بخش البرز

در مقیاس جهانی، کمربندهای کوه‌زایی فعال حاصل برهم‌کنش و همگرایی صفحات لیتوسفری هستند و نقش اساسی در شکل‌گیری توپوگرافی، لرزه‌خیزی و تکامل پوسته زمین ایفا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین این کمربندها، سامانه کوه‌زایی آلپ-هیمالیا است که از اروپای جنوبی تا جنوب شرق آسیا امتداد دارد و نتیجه برخورد پیشرونده صفحه عربی و هند با صفحه اوراسیا محسوب می‌شود (Stampfli and Borel, 2002; Golonka, 2004; Agard et al., 2005; Allen et al., 2013). در این میان، کمربند چین-رانده زاگرس (Zagros Fold and Thrust Belt: ZFTB) به‌عنوان یکی از جوان‌ترین و فعال‌ترین بخش‌های این سامانه برخوردی، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات زمین‌ساخت فعال دارد.

کمربند زاگرس پیامد بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس و برخورد صفحه عربی با اوراسیا بوده و به‌دلیل نرخ بالای کوتاه‌شدگی، تنوع ساختاری و فعالیت لرزه‌ای قابل توجه، نمونه‌ای شاخص از یک کوه‌زایی برخوردی فعال محسوب می‌شود (Allen et al., 2004). این کمربند به‌طور کلی از دو پهنه ساختاری اصلی شامل زاگرس چین‌خورده ساده (Zagros Simple Fold and Belt: ZSFB) و زاگرس مرتفع (Zagros Belt: HZB High) تشکیل شده است که به‌وسیله گسل زاگرس مرتفع (High Zagros Fault: HZF) از یکدیگر جدا می‌شوند (Hessami et al., 2001). عمده تغییرشکل‌های تکتونیکی زاگرس در طول میوسن و پلیوسن رخ داده و این کمربند را به‌عنوان یک سامانه برخوردی نسبتاً جوان معرفی می‌کند (Spagnolo and Pazzaglia, 2005; Allen and Armstrong, 2008).

در مقیاس منطقه‌ای، زاگرس شرقی به‌عنوان ناحیه‌ای گذار، از پیچیده‌ترین بخش‌های این کمربند به‌شمار می‌رود؛ چراکه هم‌زمان تحت تأثیر دینامیک برخورد زاگرس و فرآیندهای فروانش مکران قرار دارد. مرز زاگرس-مکران یکی از نواحی کلیدی ایران از نظر تغییر رژیم تنش، تنوع ساختاری و تمرکز گسل‌های فعال است (Vernant et al., 2004; Nissen et al., 2011). در این ناحیه، ساختارهایی نظیر رانده اصلی زاگرس (Main Zagros Thrust: MZT)، گسل پیشانی کوهستان (Main Front Fault: MFF)، گسل‌های میناب، سبزواران و بشاگرد نقش اساسی در کنترل تغییرشکل پوسته و تکامل چشم‌انداز ایفا می‌کنند (Berberian, 1995).



مرکزی توسط شاخص های زمین ریختی توسط بابایی (۱۳۹۶) اشاره کرد که به بررسی شاخصهای ریخت زمین ساختی در شرق البرز پرداخته شده است و نتیجه گرفته اند که در امتداد ساختارهای گسلی همچون گسلهای شمال البرز و خزر فعالیت این گسلها تاثیر گذار بر شاخصهای زمین ریختی بوده اند. همچنین در مطالعه ای دیگر به بررسی خطواره های استخراج شده توسط سنجش از دور پرداخته شده است (صفری و همکاران، ۱۳۹۴). نتیجه این پژوهش نیز از عملکرد خوب این روش در تدقیق ساختارهای خطی و گسلی در محدوده زون سندج-سیرجان دلالت می کند. بر این اساس، با بهره گیری از مطالعات تلفیقی ریخت زمین ساختی و سنجش از دور ماهواره ای، لازم است این مطالعات در این بخش از زاگرس نیز انجام گیرد و چارچوبی جامع برای تفسیر رفتار نو تکنیکی و فعالیت تکنیکی معاصر ارائه داده شود.

زمین شناسی و موقعیت جغرافیایی

کمر بند چین-رانده زاگرس (ZFTB) یک کمر بند برخوردی جوان، فعال و خطی است که بخش کلیدی از سامانه بزرگ کوهزایی آلپ-همالیا را تشکیل می دهد. کمر بند چین-رانده زاگرس از دو زیرپهنه ساختاری با روند شمال غرب-جنوب شرق تشکیل شده است: کمر بند زاگرس مرتفع یا همبریده (HZB) و کمر بند زاگرس چین خورده ساده (ZSFB) که مرز بین آنها را گسل زاگرس مرتفع (HZF) تشکیل می دهد.

اصلی ترین مرحله دگرشکلی در ZFTB طی میوسن و پلیوسن رخ داده و از این رو این کمر بند، یک سیستم برخوردی نسبتاً جوان به شمار می رود (Spagnolo & Pazzaglia, 2005; Allen & Armstrong, 2008). ستون رسوبی در کمر بند ZSFB شامل حدود ۱۳ تا ۱۴ کیلومتر رسوبات پلاتفرمی است که از نظر رخساره ای مشابه رسوبات صفحه عربی اند. بر اساس مطالعات کلاسیک، واحدهای سنگی ZSFB پس از میوسن-پلیوسن چین خورده اند؛ هر چند برخی پژوهش ها زمان چین خوردگی را کمی قدیمی تر در نظر گرفته اند (Hessami et al., 2001).

قدیمی ترین واحد سنگی رخنمون یافته در منطقه، تشکیلات هرمز با سن پر کامبرین است که به صورت گنبد های نمکی در بخش های گسترده ای از منطقه، به ویژه در مرکز و جنوب غرب پهنه دیده می شود و عمدتاً با کمر بند ZSFB مرتبط است. افزون بر این، واحدهای سنگی با سن غالباً

مزوزوئیک نیز بخش عمده منطقه را می پوشانند. به سمت شرق و شمال شرق، با نزدیک شدن به گسل های اصلی میان ZSFB و HZB و همچنین راندگی اصلی زاگرس (MZT) و پهنه زمین درز (Suture zone)، واحدهای سنگی قدیمی تر شامل پر کامبرین، پالئوزوئیک و مزوزوئیک نیز رخنمون یافته اند که غالباً به صورت کشیده و هم راستا با گسل های اصلی دیده می شوند. این ناحیه که به عنوان کمر بند زاگرس مرتفع (HZB) شناخته می شود، مشخصه بارز آن وجود گسل های معکوس تا راندگی های بزرگ است که موجب بالا آوردن واحدهای قدیمی و حتی سنگ های پی سنگ شده اند (Sarkarnejad & Ghanbarian, 2014). از نظر توپوگرافی نیز کمر بند HZB تفاوت آشکاری با بخش های شمالی و جنوبی خود دارد؛ ارتفاعات آن بیشتر و دامنه های آن شدید تر است. ساختارهای مهم در ZFTB شامل چین های بزرگ ZSFB هستند که روند آنها از شمال غرب-جنوب شرق در بخش های غربی، به شرق-غرب در جنوب و شمال شرق-جنوب غرب در بخش های مرکزی تغییر می کند. این تغییر روند چین ها بازتابی از هندسه پیچیده برخورد و چرخش های موضعی صفحات است. محدوده مورد مطالعه یکی از پیچیده ترین بخش های ایران از نظر زمین ساختی محسوب می شود؛ زیرا در محل تلاقی چندین پهنه ساختاری مهم قرار گرفته است. این منطقه در جنوب ایران و بخش جنوب شرقی ZFTB واقع شده و بین ZSFB، HZB، پهنه سندج-سیرجان (Sanandaj-Sir-)، (Uru-) (SSZ: Jan Zone)، کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر (mieh-Dokhtar magmatic arc: UDMA)، فروافتادگی جازموریان و پهنه مکران قرار دارد که همگی توسط گسل های عمده از یکدیگر جدا شده اند (شکل ۱).

الگوهای گسلی اصلی

برخورد عربی-اوراسیا موجب ایجاد شبکه ای بسیار پیچیده از ساختارهای تکنیکی فعال در زاگرس شده است. دگرشکلی در بخش های جنوب شرقی ZFTB طی ۳ تا ۵ میلیون سال اخیر عمدتاً به صورت گسلش امتداد لغز راست بر و تا حدی به صورت گسلش معکوس و چین خوردگی همراه بوده است (Bahroudi & Koyi, 2004; Berberian, 1995). با توجه به روند اصلی شمال غرب-جنوب شرق ساختارهای زاگرس، سه گروه عمده گسل را می توان شناسایی کرد (شکل ۱): گسل های طولی (هم روند با زاگرس)، گسل های عرضی

که مرز بین ZSFB و HZB را تشکیل می‌دهد. این گسل در شمال شرق بندرعباس به MZT و گسل Zen-(ZMP) (dan-Minab-Palami متصل می‌شود و زمین‌لرزه‌های متعددی در طول آن ثبت شده است (Berberian, 1995; Talebian and Jackson, 2002; Nissen et al., 2011; Walker et al., 2013).

- گسل پیشانی کوهستان (Main Foreland Fault: MFF)

این گسل، گذار توپوگرافی بین HZB و دشت پیشانی زاگرس را مشخص می‌کند. این گسل یک راندگی کور با جابه‌جایی تجمعی بیش از ۶ کیلومتر است (Berberian, 1989; Sherkati & Letouzey, 2004). وجود تراس‌های رودخانه‌ای بلند شده و سطوح فرسایشی فعال، شواهدی قوی از فعالیت کنونی این گسل ارائه می‌دهد (Ghorbani et al., 2018).

- گسل پیشانی زاگرس (Zagros Foredeep Fault: ZFF)

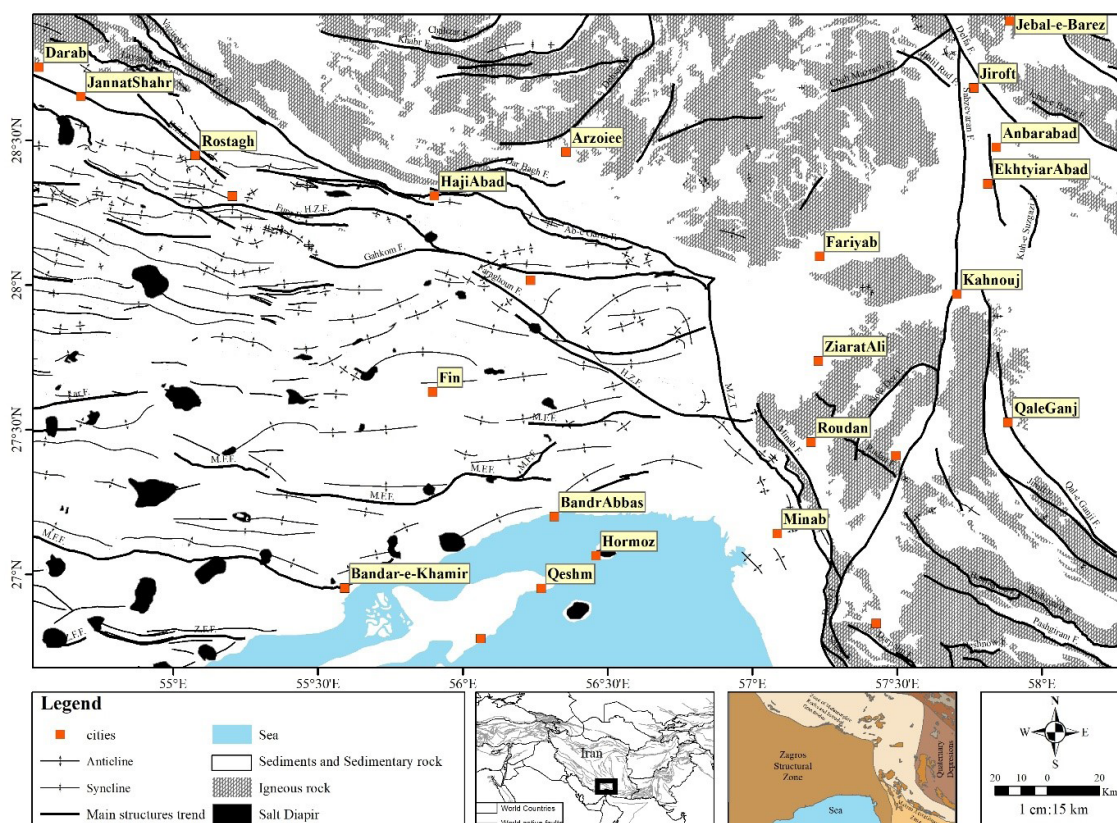
شمالی-جنوبی، گسل‌های مورب شرق-غرب. در محدوده مورد مطالعه، مهم‌ترین گسل‌ها شامل موارد زیر هستند:

- راندگی اصلی زاگرس (MZT)

MZT - یک گسل در پهنه برخوردی به طول حدود ۱۳۵۰ کیلومتر است که مرز میان صفحات عربی و اوراسیا را تعریف می‌کند (Agard et al., 2005). در شمال غرب ZFTB، شاخه‌ای از این راندگی با نام گسل جوان اصلی شناسایی شده که دارای حرکت امتدادلغز راست‌بر و فعال است (Talebian & Jackson, 2002). اگرچه برخی شواهد ژئودتیکی و لرزه‌ای نشان می‌دهند که MZT در بخش‌های مرکزی و جنوب شرقی کمتر فعال است (Vernant et al., 2007; Masson et al., 2004)، اما اهمیت ساختاری آن همچنان پابرجاست.

- گسل زاگرس مرتفع (HZF)

یکی از مهم‌ترین گسل‌های شمال غرب-جنوب شرق منطقه



شکل ۱: نقشه ساده شده زمین‌شناسی و ساختاری محدوده مورد مطالعه در جنوب شرقی زاگرس. موقعیت گسل‌های اصلی، ناودیس‌ها، گنبدی‌های نمکی هرمز، واحدهای آذرین و رسوبی و روندهای غالب ساختاری نمایش داده شده‌اند. همچنین پراکندگی شهرهای مهم منطقه مشخص است.



مرز جنوبی کمر بند زاگرس و دشت ساحلی خلیج فارس را مشخص می کند. این گسل هر چند کور است، ولی لرزه خیزی های کم عمق نشان دهنده فعال بودن نسبی آن است (Yaminifard et al., 2012).

- گسل زندان-میناب-پالامی (ZMP)

گسلی فعال با روند شمال شمال غرب-جنوب جنوب شرق است که از سواحل دریای عمان آغاز شده و در شمال شرق بندرعباس به HZF و MZT می پیوندد. این گسل مرز غربی پهنه فروانش مکران محسوب می شود (Berberian, 1995; Regard et al., 2004; Talebian and Jackson, 2004; Walker et al., 2013; Mouthereau et al., 2012).

- گسل سبزواران

از گسل های مهم بخش جنوب شرقی زاگرس می باشد که مرز شرقی چاله جازموریان را مشخص کرده و به سامانه نای بند در شمال می پیوندد. این گسل با مکانیزم راست بر فعال بوده و رسوبات کواترنری را قطع کرده است (Berberian, 1995; Talebian and Jackson, 2002; Walker et al., 2013; Regard et al., 2010).

مواد و روش ها

استفاده از شاخص های زمین ریختی در بررسی زمین ساخت شرق زاگرس از آن رو اهمیت دارد که این منطقه یکی از فعال ترین و پیچیده ترین بخش های پهنه برخوردی عربی-اوراسیا است و میزان فرسایش، نرخ بالا آمدگی و هندسه چشم انداز آن به شدت تحت کنترل فرآیندهای تکتونیکی قرار دارد. شاخص هایی مانند پیچ و خم پیشانی کوهستان، ضریب شکل حوضه و گرادیان طولی رودخانه ابزارهایی کمی برای آشکار سازی ناهنجاری های ناشی از فعالیت تکتونیکی هستند و قادرند تغییرات مربوط به بالا آمدگی، تحرک گسل ها و تغییر هندسه چین ها را در مقیاس منطقه ای آشکار کنند (Keller & Pinter, 1996; Burbank & Anderson, 2012). پژوهش های اخیر نشان داده اند که در کمر بند کوهزایی زاگرس، خصوصاً در ناحیه شرقی آن، واکنش چشم انداز به فعالیت تکتونیکی بسیار سریع تر از بسیاری از نواحی برخوردی مشابه است، به طوری که تغییرات کوچک در نرخ تکتونیکی معمولاً به صورت

تغییر شیب، برجستگی یا نامتقارنی حوضه ها نمود پیدا می کند (Ghorbani et al., 2018). بنابراین، شاخص های زمین ریختی یک رویکرد ضروری برای کمی سازی سطح فعالیت زمین ساختی در پهنه های هستند که داده های لرزه ای آن محدود یا پراکنده است.

در کنار این شاخص ها، استخراج خطواره ها مکمل مهمی برای تحلیل های ریخت زمین ساختی در شرق زاگرس به شمار می آید؛ زیرا خطواره ها بازتاب مستقیم شکستگی ها، گسل ها، پهنه های برشی و ناپیوستگی های ساختاری هستند. بررسی الگوهای خطواره ای می تواند روندهای اصلی و فرعی گسل ها، میزان شکستگی سنگ ها و نواحی بیشترین تمرکز تنش را مشخص کند (O'Leary et al., 1976; Gupta, 2017). مطالعات جدید نشان می دهد که تطابق میان نواحی با شاخص های زمین ریختی بالا و تراکم خطواره ای زیاد یکی از معتبرترین شواهد برای اثبات فعالیت تکتونیکی فعال و جوان است؛ زیرا این دو دسته داده مستقل، اما مکمل هستند و همزمان به وجود بالا آمدگی، گسلش فعال و ناهمخوانی های توپوگرافی اشاره می کنند (Costa et al., 2020). از این رو در این پژوهش، ترکیب شاخص های ریخت زمین ساخت با تحلیل خطواره ها، رویکردی مؤثر برای بررسی و تأیید فعالیت زمین ساختی شرق زاگرس فراهم می سازد. در ادامه به طور خلاصه این روش ها نام برده می شوند.

روش های ریخت زمین ساخت

- شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان (S_{mf})

پیچ و خم پیشانی کوهستان (S_{mf}) برای ارزیابی فعالیتهای تکتونیکی در امتداد جبهه های کوهستانی، جدای از وابستگی آنها به اقلیم و لیتولوژی به کار گرفته میشود. شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان از رابطه زیر به دست می شود (Bull, 1977):

$$S_{mf} = L_{mf} / L_s$$

در معادله فوق، S_{mf} نمایانگر شاخص سینوسی پیشانی کوهستان، L_{mf} طول پیشانی کوهستان در امتداد کوهپایه و در محل تغییر شیب و L_s طول خط مستقیم پیشانی کوهستان است.

- ضریب شکل حوضه (Ff)

حوضه های آبریز از نظر ظاهری به دلیل ویژگی های



میزان شاخص SL به هر قطعه آبراهه که شامل فاصله بین نقطه میانی دو خط تراز مجاور با ارتفاع معین (جایی که شاخص شروع به ارزیابی شده) تا مرتفعترین نقطه کانال می‌باشد، یک رنگ مشخص اختصاص یافته است (Ham-douni et al., 2007). در نهایت، لایه آبراهه‌ها با مقادیر معین شاخص SL بر روی مدل ارتفاع رقومی قرار داده شد و نقشه پراکندگی شاخص گرادیان طولی رود SL در گستره مورد مطالعه به کمک نرم افزار Arc GIS تهیه گردید (شکل ۵). مقادیر عددی برای شاخص گرادیان طولی رود در جدول ۱ آورده شده است.

استخراج خطوط آبراهه‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

Landsat 8

دریافت داده‌های مورد نیاز

برای شناسایی و تحلیل ساختارهای خطی و گسلی منطقه، از داده‌های ماهواره‌ای Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) استفاده شد. داده‌های این ماهواره به دلیل داشتن پوشش طیفی گسترده در نواحی مرئی (Visible) و فروسرخ نزدیک (NIR) و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، در مقیاس ناحیه‌ای ابزار بسیار مؤثری برای استخراج ساختارهای خطی محسوب می‌شوند (Roy et al., 2014).

تصاویر مربوط به محدوده از پایگاه داده‌ی United States Geological Survey (USGS, Earth Explorer) دریافت گردید. معیارهای انتخاب تصویر شامل موارد زیر بود:

۱. پوشش کامل منطقه در یک صحنه (Scene - Path/Row) متناسب با مختصات منطقه
 ۲. حداقل میزان پوشش ابر (Cloud Cover < 5%)
 ۳. جدیدترین تاریخ تصویربرداری در فصول خشک
- برای حذف اثرات رطوبت و پوشش گیاهی پس از دریافت داده‌ها، فایل‌ها در قالب (Level-1T) تصحیح هندسی اولیه با استفاده از نقاط کنترل زمینی و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) دانلود شدند تا نیازی به اصلاحات هندسی مجدد نباشد (Ilhen, 2019).

پیش پردازش داده‌ها

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای یکی از مهم‌ترین مراحل در مطالعات سنجش از دور است، زیرا دقت تحلیل‌های بعدی به کیفیت داده‌های ورودی وابسته است (Jensen, 2009). در این پژوهش، پیش‌پردازش شامل سه بخش اصلی بود:

توپوگرافی محیط اطراف، به اشکال مختلفی دیده می‌شوند. به دلیل تنوع زیاد در شکل حوضه‌ها و مشکل مقایسه صحیح آن‌ها، از روابطی استفاده می‌شود که در آن‌ها پارامترهای ثابت حوضه مدنظر قرار گرفته‌اند (مهدوی، ۱۳۹۶). یکی از این پارامترها، ضریب شکل است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Horton, 1932):

$$Ff = A / L^2$$

در رابطه بالا Ff ضریب شکل، A مساحت حوضه و L^2 مجذور طول حوضه است. طول حوضه از محل خروج آبراهه اصلی تا مرتفعترین نقطه در حوضه محاسبه می‌گردد. این شاخص نشان‌دهنده شدت جریان در یک منطقه مشخص است. هرچه مقدار ضریب شکل به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، حوضه به شکل مربع شبیه‌تر است و اگر ضریب شکل کمتر از ۱ باشد، حوضه کشیده‌تر خواهد بود (مهدوی، ۱۳۹۶). حوضه‌های آبریز در مناطق با فعالیت زمین‌ساختی فعال معمولاً دارای شکل کشیده‌تری هستند (Bull and McFadden, 1977) و حوضه‌هایی با ضریب شکل بزرگ‌تر، دبی اوج بالاتری دارند (Singh et al., 2014).

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)

این شاخص برای ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی فعال نسبی استفاده می‌شود (Keller and Pinter, 1996) و نشان‌دهنده تغییرات توپوگرافی در امتداد یک رودخانه است. این شاخص تأثیر تغییرات محیطی بر نیم‌رخ‌های طولی رودخانه را به‌طور کمی نشان می‌دهد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SL = (\Delta H / \Delta L)$$

در این رابطه SL شاخص شیب رودخانه، ΔH اختلاف ارتفاع در یک مقطع خاص از رودخانه، ΔL فاصله افقی همان محل و یا $H / \Delta L$ شیب بخشی از مجراست و L طول رودخانه از نقطه مرکزی همان محل تا سرچشمه رودخانه می‌باشد. شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) نسبت به تغییرات شیب کانال واکنش‌پذیری بالایی دارد و از این رو ابزاری مناسب برای بررسی ارتباط میان فعالیت زمین‌ساختی، مقاومت سنگ بستر و ویژگی‌های توپوگرافی به شمار می‌آید.

به منظور محاسبه شاخص گرادیان طولی رود برای هر کدام از آبراهه‌های موجود در ۶۶ زیرحوضه گستره مورد مطالعه، با استفاده از لایه آبراهه‌های استخراج شده در نرم‌افزار Arc GIS مقادیر مرتبط با $H / \Delta L$ و L محاسبه گردیده و آنگاه میزان شاخص مربوطه محاسبه گردیده است، سپس براساس



شدند تا فرآیند استخراج خودکار خطواره‌ها (Automat-ic Lineament Extraction) انجام شود. روش به کاررفته مبتنی بر تغییرات شدت بازتاب و گرادیان روشنایی بین پیکسل‌های مجاور است (Hung et al., 2005).

پس از استخراج خطوط، مرحله‌ی Thinning برای نازک‌سازی خطوط و سپس Vectorization جهت تبدیل آن‌ها به عوارض برداری (Shapefile) انجام شد. خطوط کوتاه‌تر از ۵۰ متر و خطوط تصادفی حاصل از نویز حذف گردیدند. در نهایت، نقشه‌ی حاصل با داده‌های زمین‌شناسی تطبیق داده شد تا خطوط واقعی مرتبط با گسل‌ها و شکستگی‌ها از خطوط غیرساختاری تفکیک شود (Drury, 2001).

نتایج و بحث

شاخص‌های ریخت‌زمین ساخت و برآورد زمین ساخت فعال نسبی

بررسی شاخص‌های زمین‌ریختی در گستره شرق زاگرس نشان می‌دهد که این منطقه تحت تأثیر شدید فرآیندهای تکتونیکی فعال قرار دارد و بخش‌های مختلف آن واکنش‌های متفاوتی نسبت به نرخ بالاآمدگی، جابه‌جایی گسل‌ها و تغییرات ساختاری نشان می‌دهند.

محاسبه شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان (S_{mf}) برای ۱۱۹ پیشانی کوهستان استخراج شده از مدل ارتفاعی SRTM بیانگر آن است که در بسیاری از بخش‌ها، پیشانی‌ها دارای هندسه تقریباً مستقیم تا نیمه‌مستقیم‌اند و مقادیر پایین S_{mf}

تصحیح رادیومتریکی، تصحیحات اتمسفری و PCI.

تصحیح رادیومتریکی (Radiometric Correction)

به منظور حذف اثرات اتمسفری و زاویه تابش خورشید، داده‌های خام Landsat در قالب (Digital Number (DN به بازتاب سطحی (Surface Reflectance) تبدیل شدند.

تصحیح اتمسفری

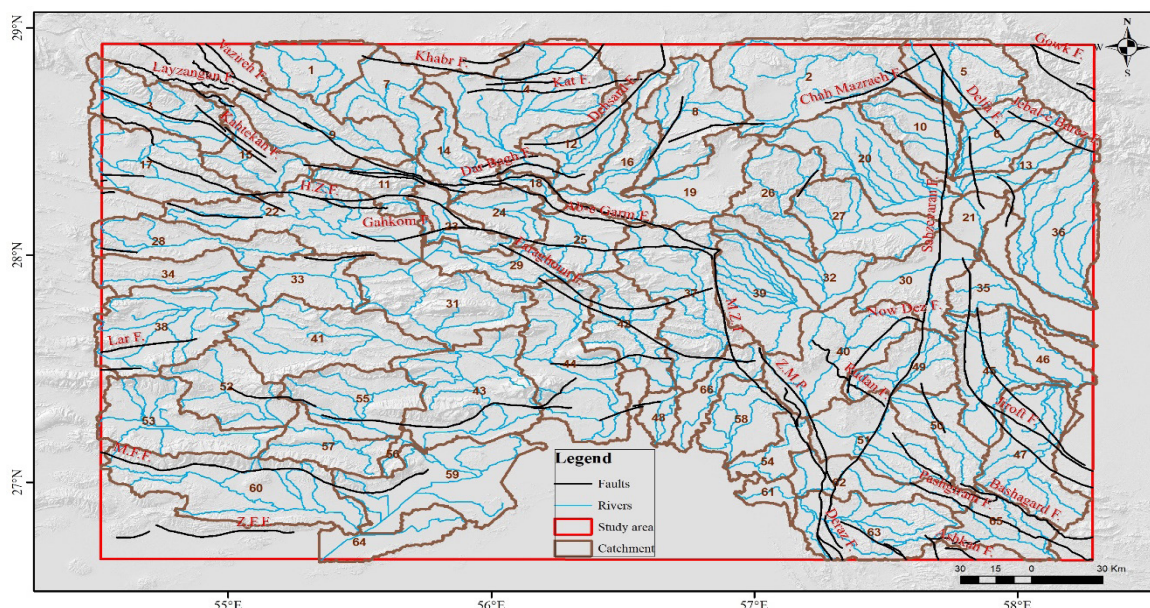
در نرم‌افزار انوی، داده‌های تصحیح شده از نظر طیفی و مکانی کنترل شدند. در این مرحله، ناهماهنگی‌های احتمالی در محدوده‌ی روشنایی (Histogram Stretching) اصلاح شد تا تمام باندها در محدوده دینامیکی یکواختی قرار گیرند. این کار سبب بهبود کنتراست و افزایش تشخیص پذیری خطوط سطحی گردید (Richards, 2006).

بهبود کنتراست داده PCI

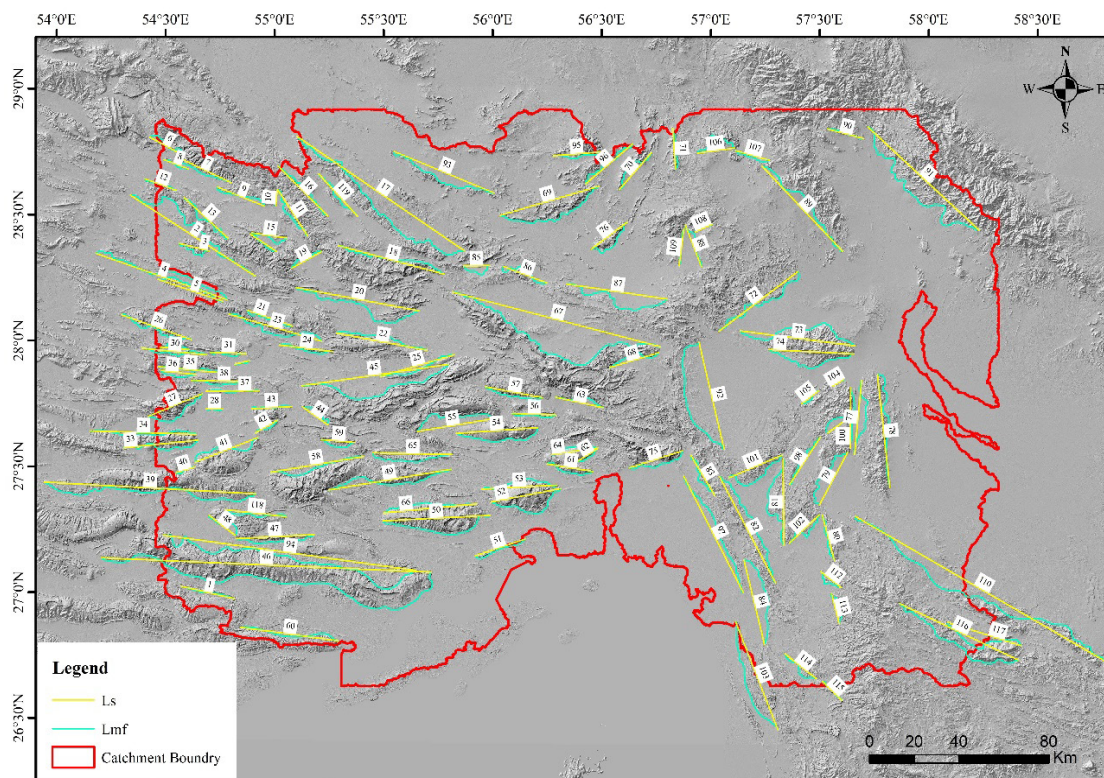
در گام بعد، تصاویر PCI شدند تا فیلترهای جهت‌دار و مؤلفه‌های اصلی بر روی آن‌ها اعمال شود. برای برجسته‌سازی ساختارهای خطی، ابتدا باندهای ۵، ۶ و ۷ ترکیب و تصویر رنگی کاذب (FCC) ساخته شد. سپس فیلترهای آشکارساز لبه (Edge Detection Filters) شامل Sobel و Filters Directional در زوایای ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه اعمال گردید (Sabins, 1999).

پردازش داده‌ها در Geomatics

در این مرحله، داده‌های حاصل از PCI Geomatica به محیط نرم‌افزاری Geomatics (PCI Geomatica Focus) منتقل



شکل ۲: نقشه حوزه‌های زهکشی و آبراهه‌های محدوده مورد مطالعه



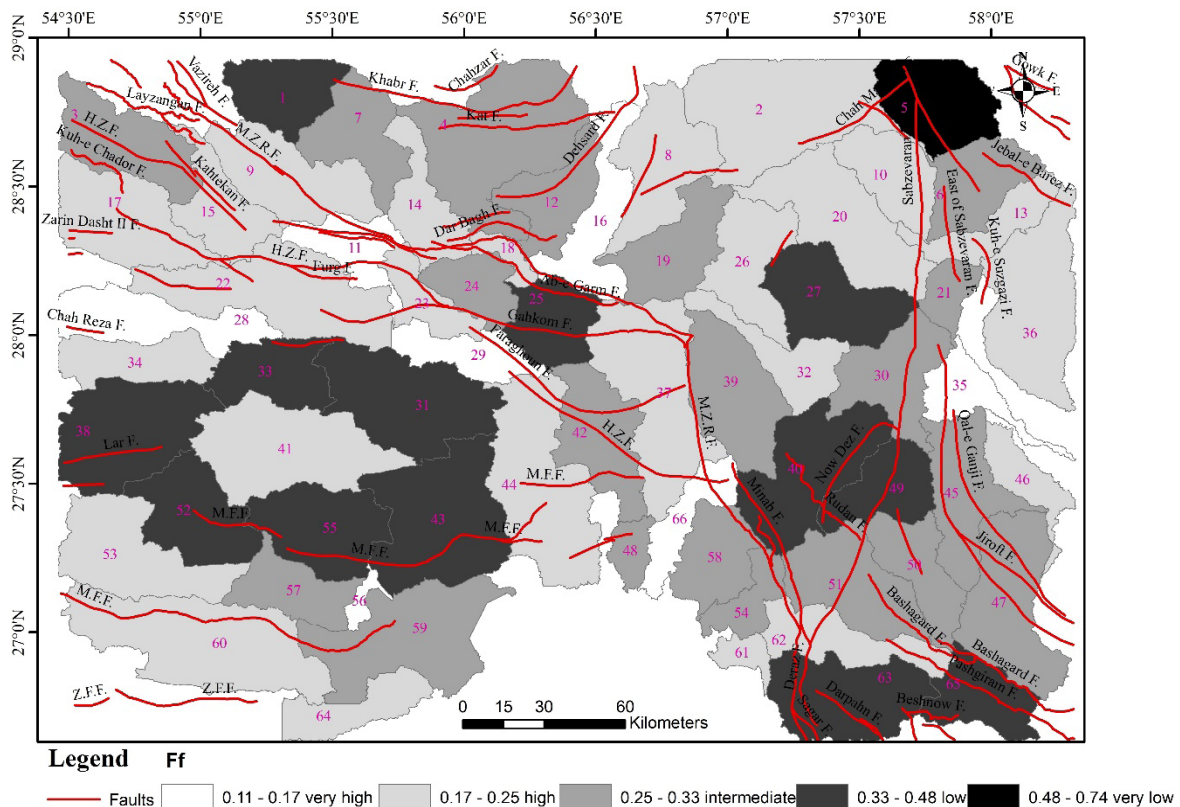
شکل ۳: موقعیت و هندسه پیشانی‌های کوهستان (S_{mf}) در ۱۱۹ حوضه شناسایی شده بر اساس مدل ارتفاعی SRTM. خطوط زرد بیانگر پیشانی‌های کوهستان و خطوط آبی نشان‌دهنده مرزهای فرسایشی هستند. پیشانی‌های مستقیم و کمتر سینوسی عمدتاً در مجاورت گسل‌های فعال قرار دارند و بیانگر نرخ بالا آمدگی بالا و تکتونیسم فعال‌اند.

فعال قرار دارند؛ مانند حوضه‌های ۲۲، ۲۴، ۳۳، ۵۵ و همچنین حوضه‌های واقع در جنوب شرق منطقه نزدیک به گسل‌های بشنو، بشاگرد، جیرفت و گسل سبزواران. این حوضه‌ها اغلب باریک، کشیده و دارای طول‌های بسیار بزرگ نسبت به مساحت خود هستند؛ هندسه‌ای که معمولاً در سامانه‌های در حال بالا آمدگی سریع و تحت تنش‌های مداوم مشاهده می‌شود. در مقابل، حوضه‌هایی با مقدار Ff بیش از ۰٫۴۸ (فعالیت بسیار کم) عمدتاً در بخش‌های جنوبی‌تر و غربی گستره واقع شده‌اند، جایی که ساختارهای اصلی تکتونیکی کمتر متمرکز هستند و فرسایش فرصت بیشتری برای تعدیل توپوگرافی داشته است (شکل ۴).

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) یکی از حساس‌ترین شاخص‌ها نسبت به تغییرات نرخ بالا آمدگی است. مقادیر SL در منطقه دارای دامنه‌ای بسیار گسترده بوده و از ۶۹ در حوضه شماره ۶۴ تا بیش از ۸۰۰۰ در حوضه شماره ۴۲ تغییر می‌کند (شکل ۵). چنین دامنه وسیعی به خوبی نشان‌دهنده گستره متنوع و ناهمگون فعالیت تکتونیکی در منطقه است. نواحی با مقدار SL بسیار بالا که عمدتاً در پهنه‌های

در آن‌ها، دلالت بر فعالیت تکتونیکی زیاد و نگهداشتن لبه تکتونیکی توسط راندگی‌ها دارد. این وضعیت در پهنه‌های نزدیک به گسل‌های فعال اصلی، به‌ویژه در امتداد HZF ، MZT ، گسل گنو، دهران، بستک و بخش شمالی گسل میناب بارزتر است؛ جایی که توپوگرافی‌های تند و پادگانه‌های فرسایشی جوان نیز این الگو را تقویت می‌کنند (شکل ۳). از آن جهت که این شاخص با میزان فرسایش ناشی از جنس سنگ نیز ارتباط دارد، سعی شده است در تحلیل نتایج به‌دست آمده مکان‌هایی را که دارای جنس سنگ‌های فرسایش‌پذیر مانند شیل و مارن هستند (از قبیل مناطق ساحلی) نادیده گرفته شده و فقط سنگ‌های مربوط به میوسن زاگرس که سخت‌تر هستند و در مقابل فرسایش مقاومت بیشتری دارند را در نظر گرفت.

شاخص ضریب شکل (Ff)، که برای ۶۶ حوضه زهکشی محاسبه شده است، مقادیر بین ۰٫۱۱ تا ۰٫۷۴ را نشان می‌دهد. توزیع مکانی این شاخص آشکار می‌سازد که بیشترین میزان فعالیت تکتونیکی (Ff کمتر از ۰٫۱۷) در حوضه‌هایی دیده می‌شود که در نزدیکی گسل‌های طولی و



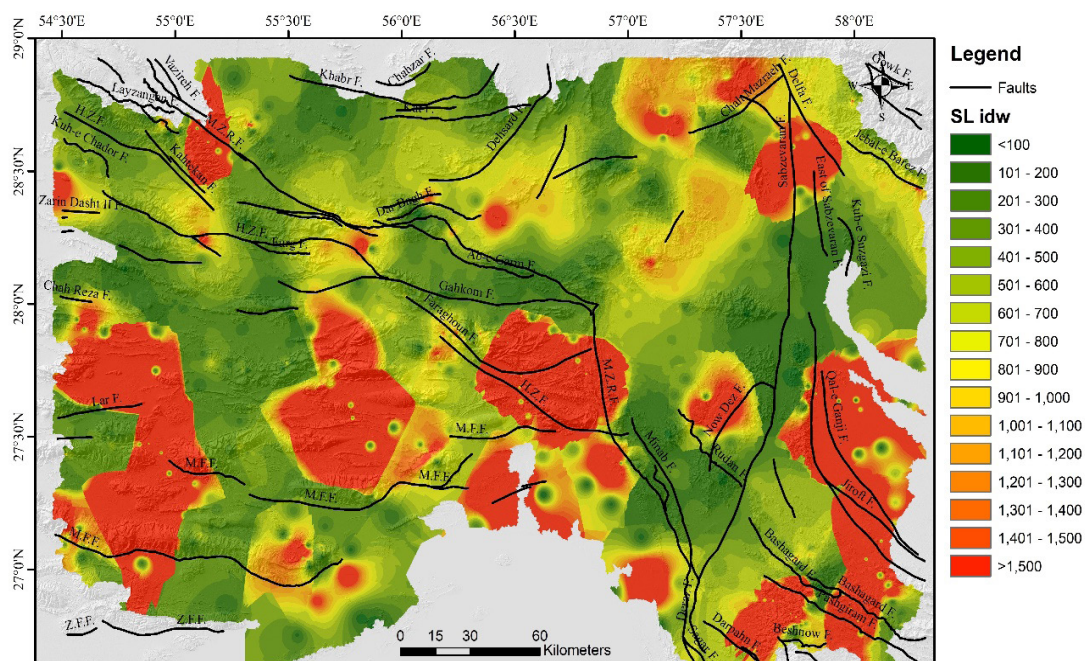
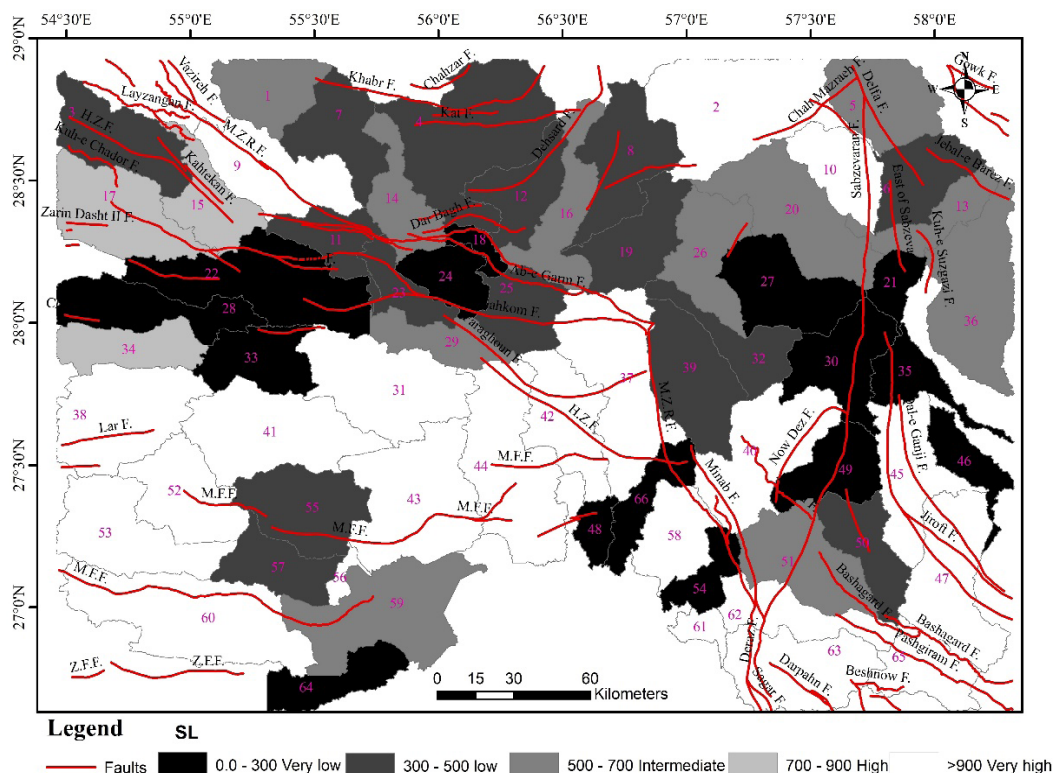
شکل ۴: نقشه پهنه‌بندی شاخص ضریب شکل (Ff) در حوضه‌های زهکشی شرق زاگرس. رده‌های مختلف Ff نشان‌دهنده میزان فعالیت زمین‌ساختی از بسیار زیاد تا بسیار کم هستند. مقادیر کم (نواحی تیره‌تر) بیانگر فعالیت تکتونیکی بالاتر و تأثیر مستقیم راندگی‌ها و ساختارهای خطی بر هندسه حوضه‌ها است. خطوط قرمز، گسل‌های اصلی منطقه را نشان می‌دهند.

که حوضه‌های با فعالیت بسیار بالا (رده ۱) عمدتاً در امتداد پهنه‌های گسلی اصلی، به‌ویژه MZT، HZF، گسل دهران، گسل گنو، و پهنه‌های جنوب‌شرقی نزدیک به گسل‌های بشاگرد و جیرفت قرار گرفته‌اند. این حوضه‌ها در نقشه IAT با رنگ سفید مشخص شده‌اند و از نظر مورفولوژی، اغلب دارای پیشانی‌های مستقیم، شیب‌های تند و آبراهه‌های با شیب بسیار زیاد هستند. در مقابل، حوضه‌های رده ۴ (فعالیت کم) در بخش‌های غربی و جنوب‌غربی گستره تجمع دارند؛ جایی که گسل‌های فعال کمتر متمرکز بوده و نرخ بالآمدگی کمتر است (شکل ۶).

ترکیب و همپوشانی شاخص‌ها نشان می‌دهد که الگوی فعالیت تکتونیکی شرق زاگرس بسیار ناهمگن، اما به شدت کنترل‌شده توسط شبکه گسلی است. تطابق نواحی با Ff کم، S_{mf} پایین، SL بسیار بالا و IAT رده ۱ گویای آن است که این بخش از زاگرس همچنان در حال تجربه تغییر شکل‌های فعال است. این همگرایی چندشاخصه همچنین بیانگر آن است که ساختارهایی نظیر HZF، MZT

نزدیک به MZT، گسل‌های میناب، بشاگرد، رودان و همچنین در بخش‌های پیرامون گسل پیشانی کوهستان (MFF) دیده می‌شوند، نشانگر وجود بالآمدگی سریع، شکستگی‌های فعال و کنترل ساختاری بر مسیر آبراهه‌ها هستند. نقشه میان‌یابی IDW شاخص SL (شکل ۵) نیز با ایجاد سطوح هم‌ارزش، مناطقی با شدت فعالیت بالا را به صورت لکه‌های قرمز و نارنجی مشخص کرده است؛ این مناطق تطابق قابل توجهی با پهنه‌های گسلی و نواحی دارای پیشانی‌های مستقیم کوهستان دارند و یک همبستگی قوی ساختاری-ژئومورفیک را تأیید می‌کنند.

به‌منظور یکپارچه‌سازی و کمی‌سازی این شاخص‌ها، شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (IAT) محاسبه شد. هر سه شاخص S_{mf} ، Ff و SL ابتدا در پنج رده فعالیت تکتونیکی طبقه‌بندی و سپس میانگین رده‌های هر حوضه محاسبه گردید تا مقدار نهایی IAT تعیین شود (Hamdouni et al., 2007). نقشه پهنه‌بندی IAT (شکل ۶) نشان می‌دهد



شکل ۵: بالا: نقشه میان‌یابی شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) با روش IDW در گستره شرق زاگرس. نواحی دارای مقادیر SL بالا (قرمز و نارنجی) مناطقی با بالاآمدگی سریع، شکستگی‌های فعال و کنترل شدید ساختاری بر مسیر آبراهه‌ها را نشان می‌دهند. هم‌پوشانی این نواحی با گسل‌های اصلی، نقش تکتونیک فعال را تأیید می‌کند. پایین: نقشه پهنه‌بندی شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) بر اساس رده‌بندی پنج‌گانه فعالیت تکتونیک. مقادیر پایین تا میانگین نشان‌دهنده فعالیت کم تا متوسط بوده و نواحی با مقدار بسیار زیاد (به‌ویژه در نزدیکی گسل‌های بزرگ) بیانگر بالاآمدگی جوان و تکتونیسم فعال هستند. خطوط قرمز گسل‌های فعال منطقه را نشان می‌دهند.



MFF، گسل میناب، گنو و بشنو نه تنها در گذشته فعال ژئومورفولوژیک و زمین ساختی منطقه ایفا می کنند. بوده اند، بلکه در حال حاضر نیز نقش اصلی را در تکامل

جدول ۱: مشخصات مربوط به شاخص های زمین ریختی اندازه گیری شده در محدوده شرق زاگرس و طبقه بندی براساس شاخص IAT

Catchment	Smf	Ff	SL	Class Smf	Class Ff	Class SL	IAT	IAT class
1	1.16	0.36	587.12	2	2	3	2.3	2
2	1.15	0.22	1043.50	2	1	3	2.0	2
3	1.15	0.28	319.24	2	2	3	2.3	2
4	1.09	0.33	463.45	1	2	3	2.0	2
5	1.17	0.75	656.66	2	3	3	2.7	3
6	1.32	0.32	491.39	2	2	3	2.3	2
7	1.12	0.32	307.30	2	2	3	2.3	2
8	1.14	0.25	487.08	2	1	3	2.0	2
9	1.10	0.25	2761.33	2	1	2	1.7	2
10	1.12	0.24	1622.98	2	1	2	1.7	2
11	1.11	0.12	484.93	2	1	3	2.0	2
12	1.17	0.26	499.43	2	1	3	2.0	2
13	1.32	0.20	632.29	2	1	3	2.0	2
14	1.19	0.20	619.48	2	1	3	2.0	2
15	1.13	0.22	745.30	2	1	3	2.0	2
16	1.21	0.16	560.17	2	1	3	2.0	2
17	1.28	0.21	737.39	2	1	3	2.0	2
18	1.42	0.23	125.35	2	1	3	2.0	2
19	1.14	0.28	490.06	2	1	3	2.0	2
20	1.12	0.21	644.43	2	1	3	2.0	2
21		0.26	161.87		1	3	2.0	2
22	1.08	0.20	206.38	1	1	3	1.7	2
23	1.11	0.22	391.02	2	1	3	2.0	2
24	1.17	0.33	219.52	2	2	3	2.3	2
25	1.17	0.40	303.52	2	2	3	2.3	2
26	1.19	0.24	579.25	2	1	3	2.0	2
27	1.17	0.46	226.63	2	2	3	2.3	2
28	1.10	0.13	222.31	1	1	3	1.7	2
29	1.06	0.16	666.86	1	1	3	1.7	2
30	1.10	0.34	153.04	1	2	3	2.0	2
31	1.07	0.37	981.36	1	2	3	2.0	2
32	1.18	0.18	452.03	2	1	3	2.0	2
33	1.06	0.37	268.67	1	2	3	2.0	2
34	1.06	0.22	845.56	1	1	3	1.7	2
35	1.09	0.14	124.37	1	1	3	1.7	2
36	1.32	0.19	592.48	2	1	3	2.0	2
37	1.16	0.23	3978.25	2	1	1	1.3	1
38	1.08	0.41	3832.36	1	2	1	1.3	1
39	1.23	0.27	433.52	2	1	3	2.0	2
40	1.21	0.36	1002.17	2	2	3	2.3	2



Catchment	Smf	Ff	SL	Class Smf	Class Ff	Class SL	IAT	IAT class
41	1.12	0.24	2146.21	2	1	2	1.7	2
42	1.07	0.26	8076.48	1	1	1	1.0	1
43	1.09	0.35	1521.44	1	2	2	1.7	2
44	1.08	0.23	1183.73	1	1	3	1.7	2
45	1.08	0.27	5079.46		1	1	1.0	1
46		0.22	239.43		1	3	2.0	2
47	1.14	0.32	2592.93	2	2	2	2.0	2
48		0.32	0.00		2	3	2.5	3
49	1.14	0.41	153.02	2	2	3	2.3	2
50	1.07	0.26	465.05	1	1	3	1.7	2
51	1.22	0.31	509.39	2	2	3	2.3	2
52	1.05	0.38	2420.87	1	2	2	1.7	2
53	1.13	0.23	3078.44	2	1	1	1.3	1
54	1.08	0.28	158.09	1	2	3	2.0	2
55	1.06	0.49	369.18	1	3	3	2.3	2
56	1.13	0.18	1147.57	2	1	3	2.0	2
57	1.13	0.27	327.55	2	1	3	2.0	2
58	1.15	0.34	1289.03	2	2	3	2.3	2
59	1.11	0.30	636.60	2	2	3	2.3	2
60	1.06	0.21	1100.44	1	1	3	1.7	2
61	1.06	0.19	2007.59	1	1	2	1.3	1
62	1.10	0.21	1555.79	2	1	2	1.7	2
63	1.14	0.42	4184.93	2	2	1	1.7	2
64		0.20	69.52		1	3	2.0	2
65	1.14	0.36	2720.91	2	2	2	2.0	2
66	1.11	0.15	158.70	2	1	3	2.0	2

استخراج خطواره‌ها و شکستگی‌های ساختاری محدودده مورد مطالعه

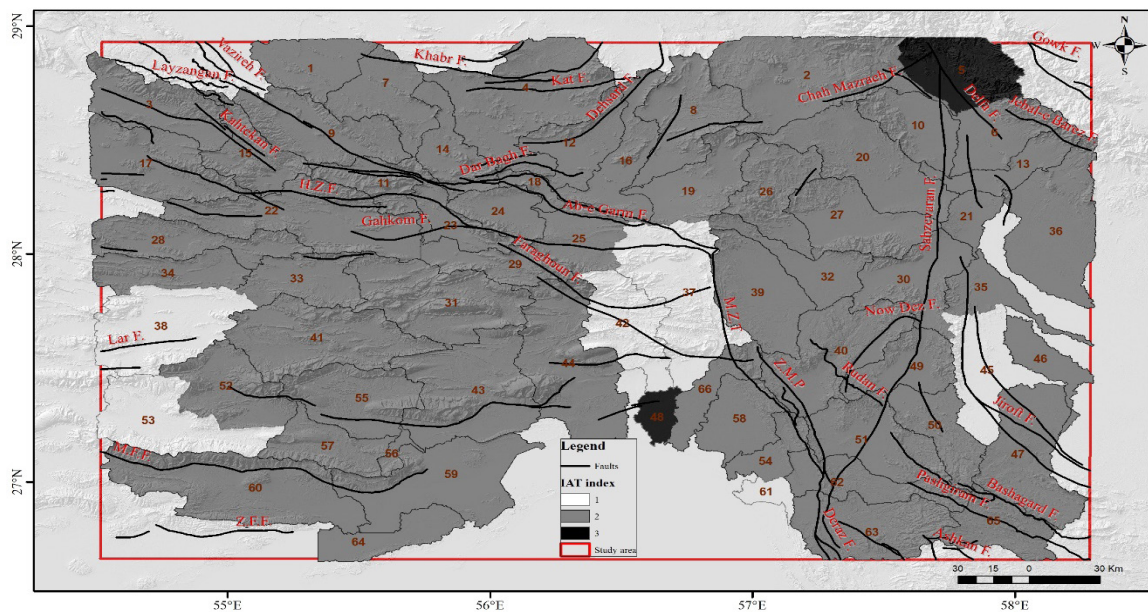
استخراج خطواره‌ها از صحنه‌های مختلف تصاویر Landsat نشان داد که الگوی شکستگی‌ها و ساختارهای خطی در شرق زاگرس نه تنها گسترده و پیچیده است، بلکه از یک منطقه به منطقه دیگر نیز تغییر محسوسی دارد. تحلیل گلسرخی هر صحنه امکان مقایسه جهت‌گیری‌های غالب و تعیین نقش احتمالی گسل‌های فعال در کنترل این الگوها را فراهم می‌کند.

در صحنه ۱۵۹۴۰، خطواره‌ها بیشترین تراکم را در راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق نشان می‌دهند. این الگو کاملاً با روند عمومی زاگرس و گسل‌های اصلی پهنه مانند MZT، HZF و گسل‌های راندگی همخوانی دارد. در این تصویر، وجود مجموعه‌ای از شکستگی‌های مورب با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب نیز مشاهده می‌شود که می‌تواند

بیانگر تأثیر گسل‌های امتدادلغز و مؤلفه‌های دینامیکی پیچیده در بخش شمال‌شرقی منطقه باشد (شکل ۷_ A).

در صحنه ۱۵۹۴۱، هرچند تراکم خطواره‌ها مشابه صحنه قبلی است، اما جهت غالب در این صحنه کمی به سمت شرق-غرب و شمال‌شرق-جنوب‌غرب متمایل‌تر است. افزایش شکستگی‌های با این روند می‌تواند بازتاب کنترل ساختاری گسل‌هایی مانند سبزواران و نودز باشد. نمودار گلسرخی این صحنه تمرکز قابل توجه شکستگی‌ها را در نیمه شرقی نمونه نشان می‌دهد که دلالت بر تنش‌های جدیدتر و احتمالاً حرکات پس‌لرزه‌ای یا فرورانش مکران دارد (شکل ۷_ B).

در صحنه ۱۶۰۴۰، ساختارهای خطی بار دیگر با روند غالب شمال‌غرب-جنوب‌شرق ظاهر شده‌اند، اما وجود تعداد زیادی شکستگی کوتاه مقیاس در جهت شمال-جنوب نیز قابل توجه است. این گروه دوم می‌تواند بر اثر تغییر میدان



شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی شاخص زمین ساخت فعال نسبی (IAT) در ۶۴ حوضه زهکشی شرق زاگرس. این شاخص حاصل ترکیب سه شاخص S_{mf} ، F_f و SL بوده و سه رده فعالیت تکتونیکی را از بسیار زیاد (رده ۱) تا کم (رده ۳) نشان می‌دهد. تمرکز رده‌های ۱ و ۲ در امتداد پهنه‌های گسلی اصلی مانند MZT ، HZF ، گسل میناب، سبزواران و بشاگرد، تأییدکننده نقش ساختارهای فعال در کنترل تکامل ریخت‌زمین ساختی منطقه است.

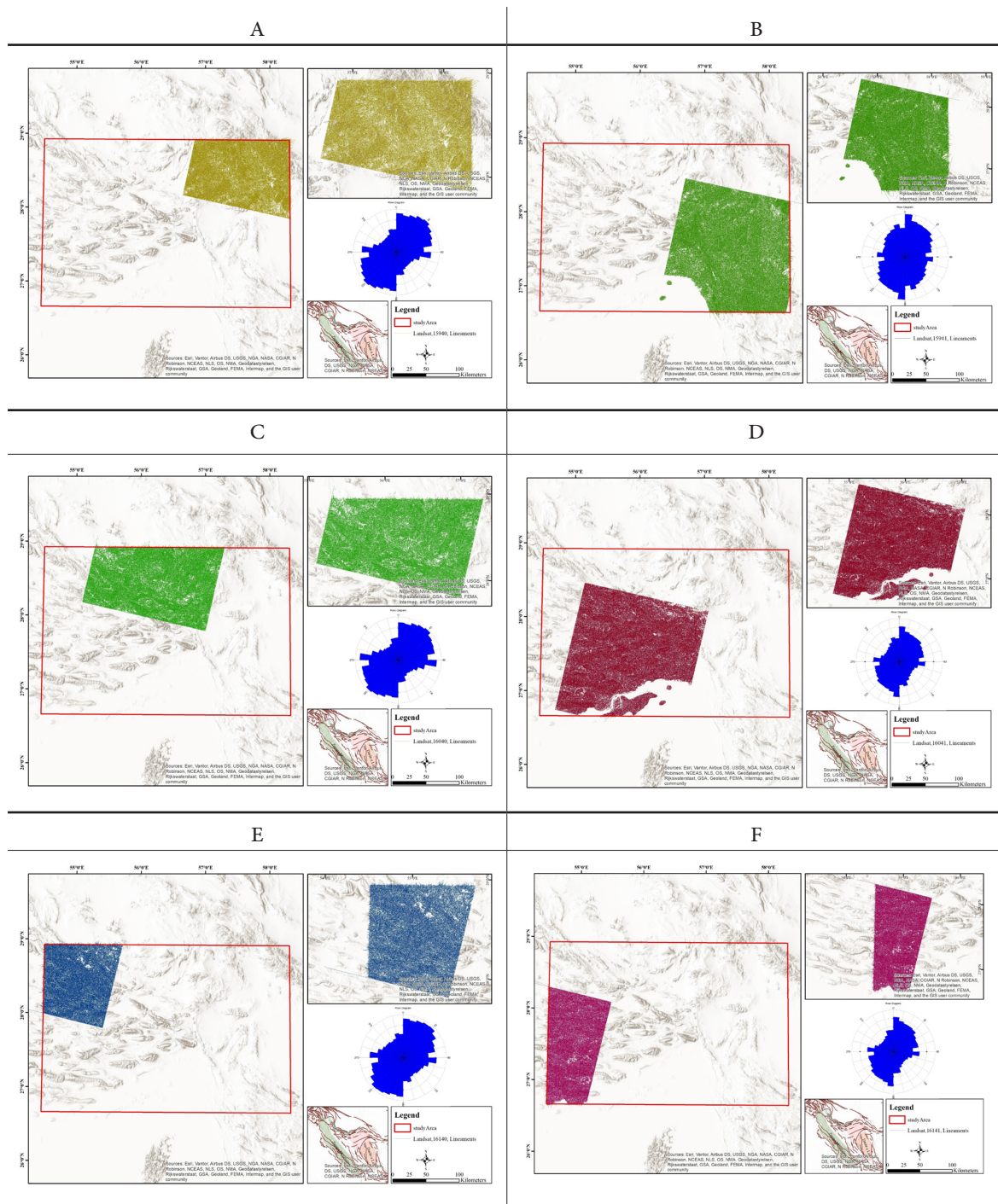
در نهایت، صحنه ۱۶۱۴۱ نسبت به سایر صحنه‌ها بیشترین حضور خطواره‌های مورب با روند شمال شرق-جنوب غرب را دارد. این روند معمولاً در بخش‌هایی از شرق زاگرس مشاهده می‌شود که تحت تأثیر مؤلفه‌های امتداد لغز ناشی از برخورد مایل صفحه عربی با اوراسیا هستند. گل‌سرخ این صحنه نیز به وضوح تأکید می‌کند که شکستگی‌ها بیشتر در نیمه شمال شرقی متمرکز شده‌اند. این امر ممکن است با فعالیت گسل‌های جوان‌تر مانند گسل‌های بشاگرد، جیرفت و رودان مرتبط باشد (شکل ۷_F).

به منظور افزایش اطمینان از دقت هندسی و زمین ساختی خطواره‌های استخراج شده، مرحله راستی آزمایی و پالایش (Validation & Refinement) براساس اصول تفسیر ساختاری و معیارهای ارائه شده در ادبیات تخصصی انجام گرفت. مطابق با تعریف کلاسیک خطواره از سوی O'Leary (1976 et al.)، تنها آن دسته از عناصر خطی که دارای منشأ زمین شناسی باشند، اعم از گسل‌ها، شکستگی‌های تکتونیکی، زون‌های برشی، مرزهای لیتولوژیک یا روندهای ساختاری، می‌توانند به عنوان خطواره واقعی در تحلیل‌های ساختاری مورد استفاده قرار گیرند. افزون بر این، مطالعات جدیدتر مانند (Drury 2001)، (Jordan & Schott 2005) و (Gupta 2017) تأکید می‌کنند که حضور عناصر مصنوعی در تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی

تنش در بخش جنوبی منطقه یا تأثیر گسل‌های عرضی مانند ZMP شکل گرفته باشد. تراکم این خطواره‌ها در بخش مرکزی صحنه بیانگر فعالیت تکتونیکی جوان و افزایش شکستگی‌های سطحی است (شکل ۷_C).

در صحنه ۱۶۰۴۱، الگوی خطواره‌ها پیچیده تر دیده می‌شود و سه روند اصلی قابل مشاهده است: شمال غرب-جنوب شرق، شمال شرق-جنوب غرب و شرق-غرب. وجود این سه روند به طور همزمان نشان دهنده تداخل چندین رژیم تنشی در منطقه است؛ موضوعی که با قرارگیری صحنه در محدوده گذار میان زاگرس و مکران همخوانی دارد. در گل‌سرخ این صحنه، بیشترین تراکم شکستگی‌ها در ربع‌های شرقی دیده می‌شود که با جهت کششی-گسلی منطقه مطابقت دارد (شکل ۷_D).

صحنه ۱۶۱۴۰ یکی از بالاترین تراکم‌های خطواره را نشان می‌دهد. در این تصویر، روند شمال غرب-جنوب شرق نسبت به صحنه‌های دیگر قوی تر است و تقریباً تمامی خطواره‌های اصلی این روند را دنبال می‌کنند. این امر نشان دهنده نقش مستقیم گسل‌های بزرگ و فعال مانند MZF ، HZF و گسل میناب در کنترل شکل گیری شکستگی‌هاست. در عین حال، چندین خطواره بلند با جهت شمال-جنوب نیز مشاهده می‌شود که احتمالاً نشان دهنده فعالیت گسل‌های امتداد لغز ثانویه است (شکل ۷_E).



شکل ۷: A: خطواره‌های استخراجی با استفاده از تصاویر لندست و صحنه ۱۵۹۴۰، B: خطواره‌های استخراجی با استفاده از تصاویر لندست و صحنه ۱۶۰۴۰، C: خطواره‌های استخراجی با استفاده از تصاویر لندست و صحنه ۱۵۹۴۱، D: خطواره‌های استخراجی با استفاده از تصاویر لندست و صحنه ۱۶۰۴۱، E: خطواره‌های استخراجی با استفاده از تصاویر لندست و صحنه ۱۶۱۴۰، F: خطواره‌های استخراجی با استفاده از تصاویر لندست و صحنه ۱۶۱۴۱

کارشناس تکتونیک و با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، DEM، و تصاویر با قدرت تفکیک بالاتر مورد راستی‌آزمایی قرار گرفت. در این مرحله، خطواره‌هایی که ویژگی‌های زیر را داشتند، از مجموعه نهایی حذف شدند:

- روندهای کاملاً مستقیم و یکنواخت بدون شکستگی

موجب اغتشاش در تحلیل روندهای ساختاری شود، به‌ویژه در مناطقی چون زاگرس که تراکم عوارض خطی طبیعی بسیار زیاد است. بر این اساس، مجموعه خطواره‌های استخراج‌شده از تصاویر Landsat در این پژوهش، به‌صورت گام‌به‌گام و با مشارکت



یا تغییر جهت که با الگوی طبیعی ساختارهای زمین‌شناختی سازگار نبودند.

- عناصر مرتبط با فعالیت‌های انسانی مانند خطوط انتقال نیرو، لبه جاده‌ها، مسیرهای کشاورزی، مرزبندی قطعات زمین، مسیرهای دسترسی معادن و شبکه‌های مصنوعی زهکشی.
- خطواره‌هایی که فاقد تداوم مکانی، تطابق با شیب و ویژه توپوگرافی یا انطباق با زون‌های گسلی شناخته شده بودند (Bishop et al., 2003).
- مواردی که به دلیل وجود سایه‌روشن، نویزهای رادیومتریکی یا بازتاب‌های سطحی ایجاد شده بودند (Sabins, 1999).

پس از حذف این موارد، خطواره‌های باقی‌مانده با چند معیار ساختاری تطبیق داده شدند، از جمله:

- پیوستگی در امتداد ساختارهای اصلی منطقه مانند MFF, HZF, MZT و گسل میناب؛
- همخوانی روند با جهت‌های غالب زمین‌ساختی شرق زاگرس (NW-SE و NE-SW) که در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Talebian & Jackson, 2002; Agard et al., 2005)؛
- همراهی با عوارض ژئومورفیک نظیر بریدگی‌های تند، شکستگی‌های دامنه، پادگانه‌های گسلی و تغییرات ناگهانی زهکشی.

این فرایند نه تنها موجب حذف خطواره‌های غیرواقعی شد، بلکه باعث تقویت کیفیت هندسی و تکنیکی لایه نهایی گردید و امکان تحلیل دقیق‌تری از نقش ساختارهای فعال در شکل‌گیری ریخت‌زمین ساخت منطقه را فراهم ساخت. شبکه خطواره‌های معتبر و پالایش شده در شکل ۸ ارائه شده است که بازتاب‌دهنده ساختارهای اصلی و ثانویه حاکم بر منطقه بوده و مبنای تحلیل‌های بعدی این پژوهش قرار گرفته است.

تحلیل نمودار گلسرخی خطواره‌های ساختاری این تصویر نشان می‌دهد که جهت‌گیری غالب خطواره‌ها در محدوده مورد مطالعه دارای روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق است؛ روندی که با بیشترین فراوانی و بیشترین طول تجمعی در نمودار مشخص شده و به‌خوبی با راستای عمومی ساختارهای اصلی کمر بند چین‌خورده-رانده زاگرس

همخوانی دارد. این روند غالب بیانگر کنترل اصلی میدان تنش فشاری-برشی حاکم بر منطقه و نقش ساختارهای طولی عمده نظیر گسل‌های پیشانی کوهستان، گسل‌های راندگی و امتدادلغز وابسته به سامانه زاگرس است.

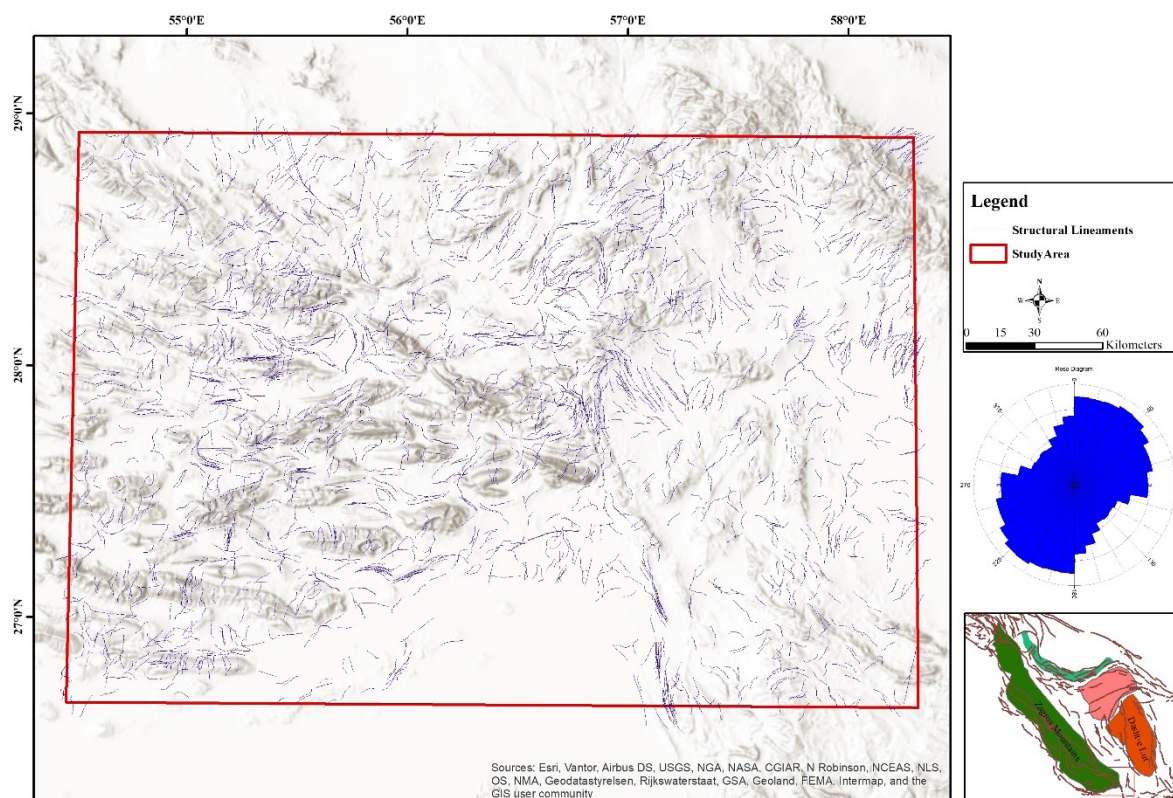
در کنار این روند اصلی، یک روند فرعی با راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب نیز در نمودار گلسرخی قابل تشخیص است که اگرچه فراوانی کمتری نسبت به روند غالب دارد، اما به‌صورت معنی‌دار حضور دارد. این مجموعه خطواره‌ها احتمالاً بازتاب‌دهنده گسل‌ها و شکستگی‌های عرضی یا مورب هستند که در پاسخ به تغییرات محلی میدان تنش، چرخش تنش‌ها در نواحی انتقالی زاگرس-مکران، یا عملکرد گسل‌های امتدادلغز راست‌بر و چپ‌بر ثانویه شکل گرفته‌اند. وجود این روند فرعی نشان‌دهنده پیچیدگی رژیم تنش و چندمرحله‌ای بودن تغییر شکل تکنیکی در منطقه است.

همچنین، حضور محدود خطواره‌ها با راستای تقریباً شرق-غرب و شمال-جنوب در نمودار قابل مشاهده است که معمولاً به‌عنوان شکستگی‌های ثانویه، زون‌های کششی موضعی یا ساختارهای مرتبط با تعدیل تنش در حاشیه گسل‌های اصلی تفسیر می‌شوند. این مجموعه‌ها اغلب کوتاه‌مقیاس‌تر بوده و نقش تکمیلی در شبکه شکستگی‌ها ایفا می‌کنند.

در مجموع، الگوی گلسرخی خطواره‌ها نشان می‌دهد که شبکه ساختاری منطقه به‌شدت ناهمسانگرد بوده و تحت کنترل مستقیم ساختارهای فعال کوهزاد زاگرس است. همخوانی روند غالب NW-SE با گسل‌های شناخته شده و همچنین حضور روندهای فرعی NE-SW، تأیید می‌کند که خطواره‌های استخراج شده ماهیت زمین‌ساختی واقعی داشته و به‌خوبی بازتاب‌دهنده رژیم تنش فعال و تکامل ریخت‌زمین ساختی شرق زاگرس هستند (شکل ۸).

اعتبارسنجی میدانی نتایج سنجش‌ازدور و شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی

به‌منظور تطبیق نتایج سنجش‌از دور و اطمینان از درستی خطواره‌های استخراج شده و همچنین بررسی میدانی میزان فعالیت ریخت‌زمین‌ساختی، عملیات برداشت صحرایی در بخش‌های کلیدی محدوده مورد مطالعه انجام گرفت. طی این بازدیدهای میدانی، روند و امتداد شکستگی‌ها، شواهد گسلش جوان، جابه‌جایی لایه‌ها، حضور پله‌های تکنیکی، گسیختگی‌های دامنه‌ای و تطابق آن‌ها با خطواره‌های



شکل ۸: خطواره‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat پس از پالایش و حذف عناصر مصنوعی، به‌منظور جداسازی خطواره‌های طبیعی مرتبط با ساختارهای تکتونیکی منطقه.

زاویه‌داری آن‌ها با روند کلی زاگرس سازگاری داشت و با جهت‌گیری خطواره‌های استخراج شده همخوانی کامل نشان می‌داد. این لایه‌ها غالباً دارای تغییر رنگ، شکستگی‌های موازی و زون‌های برشی باریک بودند که بیانگر فعالیت تکتونیکی مکرر و طولانی مدت است. همچنین وجود صفحات خردشده و ریزلغزش‌های بین لایه‌ای، نشانه‌ای از چرخش بلوکی و فعالیت امتدادلغزش‌های فرعی در حاشیه ساختارهای اصلی است (شکل ۹، نمای بالا راست).

در بخش‌های پایین دست، پادگانه‌های رودخانه‌ای جوان و جابه‌جاشده مشاهده شد. اختلاف ارتفاع چند متری بین پادگانه‌های دو سوی رودخانه و نیز تغییر مسیر جریان، به‌ویژه در مجاورت شکستگی‌های آشکار، نشان می‌دهد که فعالیت گسل‌ها موجب بالا آمدگی موضعی و تنظیم دوباره شبکه زهکشی شده است؛ موضوعی که با نتایج شاخص‌های S_{mf} و SL که نشان‌دهنده شیب زیاد آبراهه‌ها و مستقیم بودن پیشانی‌ها بود، هم‌خوانی کاملی دارد (شکل ۹، نمای بالا چپ).

از دیگر شواهد بارز در میدان، تشخیص ردپای گسترده

استخراج شده از تصاویر Landsat مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج صحرایی نشان داد که بخش عمده‌ای از خطواره‌های اصلی شناسایی شده، با گسل‌ها و شکستگی‌های واقعی موجود در طبیعت همخوانی داشته و بیانگر نقش مستقیم تکتونیک فعال در شکل‌گیری هندسه ریخت‌زمین ساختی منطقه هستند. این مرحله، ضمن افزایش دقت تفسیرهای ساختاری، اعتبار نتایج ریخت‌زمین ساختی حاصل شده را نیز تقویت نمود.

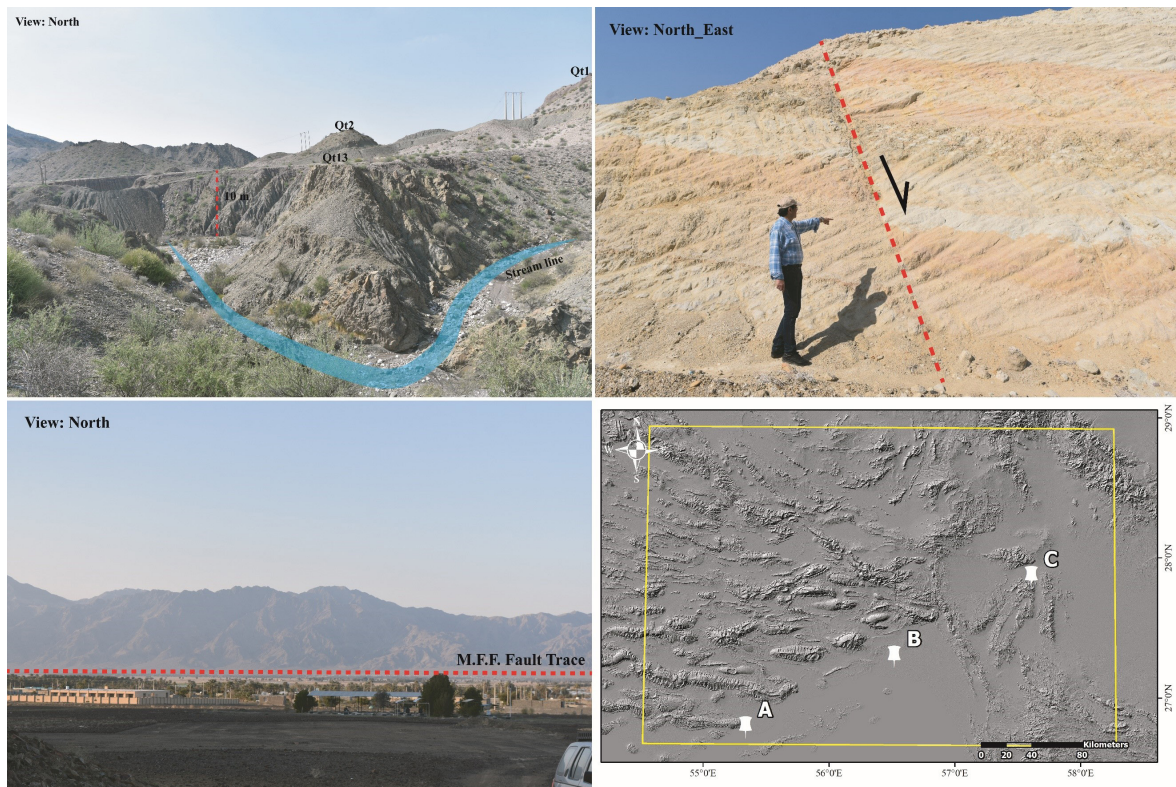
به‌منظور تکمیل فرایند استخراج خطواره‌ها و ارزیابی میزان اعتبار شاخص‌های ریخت‌زمین ساختی، مجموعه‌ای از برداشت‌های میدانی هدفمند در نقاطی انجام شد که بر اساس تحلیل داده‌های Landsat، مدل ارتفاعی SRTM و نقشه‌های خطواره‌ای، دارای بیشترین احتمال برای بروز ساختارهای فعال بودند. این مشاهدات صحرایی شواهد روشنی از تغییر شکل‌های جوان، فعالیت گسل‌ها و کنترل ساختاری بر ریخت‌زمین ساخت منطقه ارائه کردند (شکل ۹).

یکی از بارزترین شواهد مشاهده شده در میدان، وجود سطوح گسلی آشکار و لایه‌های به شدت متمایل بود که



سطوح گسلی فعال، لایه‌های متمایل و برشی‌شده، پادگانه‌های جابه‌جاشده، الگوهای زهکشی منحرف‌شده و مرزهای ساختاری مشخص، نشان می‌دهد که بخش شرقی زاگرس هنوز هم تحت تأثیر یک رژیم تشری پویا و فعال قرار دارد. همخوانی کامل این شواهد با خطواره‌های استخراج‌شده، روندهای غالب ساختاری و رده‌بندی‌های ریخت‌زمین‌ساختی (S_{mf} , F_f , SL و IAT)، اعتبار نتایج این پژوهش را تأیید کرده و نقش تعیین‌کننده گسل‌هایی همچون MFF ، HZF ، میناب، رودان، گنو و ساختارهای بشاگرد-جیرفت را در شکل‌دهی چشم‌انداز کنونی منطقه نشان می‌دهد.

گسل پیشانی کوهستان (MFF) بود که به‌صورت یک مرز کاملاً خطی و مستقیم در پای ارتفاعات، چشم‌اندازی واضح از تفاوت ناگهانی توپوگرافی ایجاد کرده است. این ساختار در میدان با اختلاف ناگهانی ارتفاع، شکستگی‌های طویل، و وجود سنگ‌های خردشده در زونه گسلی شناخته شد. مشاهده این ویژگی‌ها با نتایج شاخص IAT که رده‌های ۱ و ۲ فعالیت تکتونیکی را در مجاورت MFF نشان داد، سازگاری دارد و بیانگر نقش غالب این گسل در کنترل هندسه حوضه‌ها و پیشانی کوهستان است (شکل ۹، نمای پایین چپ). در مجموع، شواهد حاصل از مطالعات صحرایی، از جمله



شکل ۹: نمای بالا-چپ: مشاهده جابه‌جایی و بالاآمدگی نهشته‌های کواترنری ($Qt1$, $Qt2$, $Qt3$) در مجاورت یک بریدگی تکتونیکی فعال. مسیر انحراف یافته آبراهه و اختلاف ارتفاع میان سطوح نهشته‌ای نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت گسلی بر تکامل مورفولوژی حوضه است. نمای بالا-راست: رخنمون یک صفحه گسلی با شیب زیاد و لایه‌های متمایل و برشی‌شده. خطواره مشخص‌شده (خط چین قرمز) بیانگر امتداد سطح گسل و تغییر شکل تکتونیکی جوان در حاشیه ارتفاعات است. نمای پایین چپ: منظر گسترده از رد پای گسل پیشانی کوهستان ($M.F.F$) در پای رشته‌کوه‌های جنوبی. خطواره مستقیم و طولانی گسل، مرز تکتونیکی مشخصی میان کوهستان و دشت ایجاد کرده و یکی از شواهد اصلی فعالیت زمین‌ساختی معاصر در منطقه محسوب می‌شود. نقشه پایین راست: موقعیت ایستگاه‌های برداشت داده‌های صحرایی

نتیجه‌گیری

ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی در شرق کمر بند چین‌خورده و رانده زاگرس با استفاده از شاخص‌های زمین‌ریختی S_{mf} و Ff نشان داد که این پهنه یکی از فعال‌ترین بخش‌های زاگرس است و آشفتگی ژئومورفیک آن مستقیماً تحت کنترل شبکه گسترده‌ای از گسل‌های اصلی و فرعی قرار دارد. نتایج شاخص S_{mf} برای ۱۱۹ پیشانی کوهستان، وجود پیشانی‌های تقریباً مستقیم و مقادیر پایین این شاخص را در بخش‌های وسیع منطقه نمایان ساخت؛ وضعیتی که نشان‌دهنده نقش مستمر راندگی‌ها و جوان‌بودن لبه‌های تکتونیکی است. شاخص ضریب شکل در ۶۶ حوضه زهکشی نیز نشان داد که حوضه‌های باریک و کشیده با Ff کمتر از ۰٫۱۷ عمدتاً در مجاورت گسل‌های فعال مانند MZT ، HZF ، میناب، گنو، دهران و بشاگرد قرار دارند؛ این حوضه‌ها معمولاً در مناطقی شکل گرفته‌اند که تنش‌های فشاری و نرخ بالاآمدگی بالا غالب است.

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) با دامنه بسیار گسترده‌ای از ۶۹ تا بیش از ۸۰۰۰ ناهمگنی قابل توجهی در شدت بالاآمدگی را نشان می‌دهد. مناطق با SL بالا، که عمدتاً در پیرامون گسل‌های MZT ، میناب، بشاگرد، رودان و MFF دیده می‌شوند، بیانگر کنترل مستقیم ساختارهای فعال بر الگوی زهکشی و پایداری شیب‌ها هستند. تلفیق این سه شاخص در قالب شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (IAT) نشان داد که بخش عمده حوضه‌ها در رده‌های ۱ و ۲ (فعالیت بسیار بالا و بالا) قرار دارند؛ تمرکز این رده‌ها نیز به روشنی با پهنه‌های گسلی اصلی هم‌خوان است.

بررسی خطواره‌های استخراج شده از تصاویر Landsat نیز این نتایج را تأیید کرد. روند غالب خطواره‌ها شمال‌غرب-جنوب‌شرق، هم‌سو با روند اصلی زاگرس، و روندهای فرعی شمال‌شرق-جنوب‌غرب و شمال-جنوب نشان‌دهنده پیچیدگی رژیم تنشی و نقش ترکیبی گسل‌های فشاری و امتدادلغز است. تطابق مکانی نواحی با تراکم بالای خطواره‌ها، Ff پایین، S_{mf} پایین، SL بالا و IAT رده ۱ نشان داد که این پهنه همچنان در حال تجربه تغییر شکل‌های فعال است.

به‌طور کلی، ترکیب شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساخت و تحلیل خطواره‌ها روشی قدرتمند برای آشکارسازی زون‌های فعال تکتونیکی در شرق زاگرس ارائه کرد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، این نتایج با داده‌های GPS، In-

SAR و مطالعات میدانی گسل‌ها ادغام شود تا نرخ‌های دقیق لغزش و بالاآمدگی و تکامل نوزمین‌ساختی منطقه با دقت بیشتری تعیین گردد.

منابع

- بابایی، ش. (۱۳۹۶). بررسی تکتونیک فعال با استفاده از شاخصهای رودخانه‌ای در حوضه‌های آبریز هراز، نور و نوشهر، البرز مرکزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی.
- صفری، حجت‌اله، مجلل، مهدی و حاجی، عرفان. (۱۳۹۴). راستی‌آزمایی خطواره‌های استخراج شده توسط روش‌های نیمه‌خودکار سنجش از دور: مطالعه موردی منطقه شمال‌غرب زون سنج-سیرجان. زمین‌ساخت، ۱ (شماره ۳)، ۳۹-۵۶. doi: 10.22077/jt.2016.403
- مهدوی، م. (۱۳۹۶). هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., & Mouthereau, F. (2005). Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International journal of earth sciences*, 94(3), 401-419.
- Allen, M. B., & Armstrong, H. A. (2008). Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 265(1-2), 52-58.
- Bahroudi, A., & Koyi, H. A. (2004). Tectono-sedimentary framework of the Gachsaran Formation in the Zagros foreland basin. *Marine and Petroleum Geology*, 21(10), 1295-1310.
- Berberian, M. (1995). Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241(3-4), 193-224.
- Bull, W. B. (2008). Tectonic geomorphology



- lin Heidelberg.
- Hessami, K., Koyi, H. A., & Talbot, C. J. (2001). The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt. *Journal of petroleum Geology*, 24(1), 5-28.
 - Holbrook, J., & Schumm, S. A. (1999). Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics*, 305(1-3), 287-306.
 - Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American geophysical union*, 13(1), 350-361.
 - Hung, L. Q., Batelaan, O., & De Smedt, F. (2005, October). Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. In *Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology V* (Vol. 5983, pp. 182-193). SPIE.
 - Ihlen, V. (2019). *Landsat 8 data users handbook*, US geological survey.
 - Jensen, J. R. (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*. Pearson Education India.
 - Jordan, G., & Schott, B. (2005). Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. *Remote Sensing of Environment*, 94(1), 31-38.
 - Keller, E. A., & Pinter, N. (1996). *Active tectonics* (Vol. 338). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
 - Koop, W. J., & Stoneley, R. (1982). Subsidence history of the Middle East Zagros
 - gy of mountains: a new approach to paleoseismology. John Wiley & Sons.
 - Bull, W. B., & McFadden, L. D. (2020). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In *Geomorphology in arid regions* (pp. 115-138). Routledge.
 - Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2013). *Tectonic geomorphology*.
 - Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.
 - Dewey, J. F., & Burke, K. C. (1973). Tibetan, Variscan, and Precambrian basement reactivation: products of continental collision. *The Journal of Geology*, 81(6), 683-692.
 - Drury, S. A. (2001). *Image Interpretation in Geology*, Cheltenham. UK: Nelson Thornes.
 - El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173.
 - Ghorbani Roštam, G., Pakzad, M., Mirzaei, N., & Sakhaei, S. R. (2018). Analysis of the stress field and strain rate in Zagros-Makran transition zone. *Journal of Seismology*, 22(1), 287-301.
 - Golonka, J. (2004). Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics*, 381(1-4), 235-273.
 - Gonzalez, R. C. (2009). *Digital image processing*. Pearson education india.
 - Gupta, R. P. (2003). *Multispectral Imaging Systems*. In *Remote Sensing Geology* (pp. 75-122). Berlin, Heidelberg: Springer Ber-



- sensing digital image analysis: an introduction. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Ce, W., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145, 154-172.
 - Sabins, F. F. (1999). *Remote Sensing: principles and interpretation*. 3. rd. New York: WF Freeman and Company.
 - Sarkarinejad, K., & Ghanbarian, M. A. (2014). The Zagros hinterland fold-and-thrust belt in-sequence thrusting, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85, 66-79.
 - Schumm, S. A., Dumont, J. F., & Holbrook, J. M. (2000). *Active tectonics and alluvial rivers* (Vol. 276). Cambridge: Cambridge University Press.
 - Sherkati, S., & Letouzey, J. (2004). Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. *Marine and petroleum geology*, 21(5), 535-554.
 - Singh, O., & Sarangi, A. (2008). Hypsometric analysis of the lesser Himalayan watersheds using geographical information system. *Indian Journal of Soil Conservation*, 36(3), 148-154.
 - Spagnolo, M., & Pazzaglia, F. J. (2005). Testing the geological influences on the evolution of river profiles: a case from the Northern Apennines (Italy). *Geografia fisica e dinamica quaternaria*, 28(1), 103-113.
 - Stampfli, G. M., & Borel, G. D. (2002). A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary science letters*, 196, 137-150.
 - basin, Permian to recent. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 305(1489), 149-168.
 - Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignieres, M., ... & Van Gorp, S. (2007). Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophysical Journal International*, 170(1), 436-440.
 - Mosadeghzadeh, E., Nadimi, A., & Tatar, M. (2026). Tectonic activity and geomorphic evolution of the southern Iran during the Quaternary. *Journal of African Earth Sciences*. 238, 1-14.
 - Mouthereau, F., Lacombe, O., & Vergés, J. (2012). Building the Zagros collisional orogen: timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence. *Tectonophysics*, 532, 27-60.
 - Nissen, E., Karasözen, E., Karasözen, E., Nissen, E., Bergman, E. A., Ghods, A., ... & Shahvar, M. P. (2016). Seismotectonics of the Zagros (Iran) from orogen-wide earthquake relocations. NSF Award Number 1524815. Directorate for Geosciences, 15(1524815), 24815.
 - Nissen, E., Tatar, M., Jackson, J. A., & Allen, M. B. (2011). New views on earthquake faulting in the Zagros fold-and-thrust belt of Iran. *Geophysical Journal International*, 186(3), 928-944.
 - O'LEARY, D. W., FRIEDMAN, J. D., & POHN, H. A. (1976). Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87(10), 1463-1469.
 - Richards, J. A., & Jia, X. (2006). Remote

ters, 196(1-2), 17-33.

- Talebian, M., & Jackson, J. (2002). Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International*, 150(2), 422-439.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., ... & Chéry, 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.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., ... & Chéry, 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.
- Yaminifard, F., Sedghi, M. H., Gholamzadeh, A., Tatar, M., & Hessami, K. (2012). Active faulting of the southeastern-most Zagros (Iran): Microearthquake seismicity and crustal structure. *Journal of Geodynamics*, 55, 56-65.