



فصلنامه زمین ساخت

بهار ۱۴۰۵، سال هشتم، شماره ۲۹

doi 10.22077/jt.2026.11065.1222

مقاله پژوهشی

ارزیابی زمین ساخت فعال با استفاده از روش نوین فرکتالی گرادیان شیب رودخانه‌ها در شمالغرب صحنه

مهناز ندائی^{۱*}، لیلی ایزدی کیان^۲، سید حسن میراحمدی^۳

۱. استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. عضو هیئت رئیسه انجمن زمین شناسی ایران

۳. استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۴. دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

شاخصهای ریخت زمین ساختی ابزارهای ارزشمندی هستند که جهت شناسایی مناطق فعال زمین ساختی بکار می‌روند. شاخص گرادیان رودخانه (SL) یکی از شاخص‌های مهم جهت تفکیک مناطق فعال می‌باشد. در مقایسه با سایر شاخصهای ریخت شناسی، حساسترین شاخص نسبت به بالا آمدگی است. این شاخص نسبت به مقاومت سنگها در طول مسیر جریان حساس است و بنابر این جنس لیتولوژی هم می‌تواند بر مقدار SL مؤثر باشد. در این تحقیق برای اولین بار خصوصیت فرکتالی گرادیان رودخانه را معرفی و از آن برای بررسی زمین ساخت فعال و نیز بررسی وضعیت ساختاری غرب ایران بهره جستیم. برای مقایسه تأثیر گسل و مقاومت سنگها بر این دو پارامتر و شناسایی عملکرد آنها در تشخیص مناطق فعال، ابتدا واحدهای سنگ‌شناسی منطقه در پنج کلاس مقاومتی گروه‌بندی شدند. سپس رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) برای بررسی تغییرات محلی داده‌های SL/FD نسبت به فاصله از گسل اعمال شد تا تأثیر گسل را آشکار کند. ابعاد فرکتالی بدست آمده، نقاط ضعف شاخص SL، از جمله حساسیت به مقاومت سنگها و دانه بندی را نداشته، علاوه بر مشخص کردن گسلهای راندگی، گسلهای امتداد لغز را نیز نمایان می‌سازد که تطبیق خوبی با گسلهای برداشت شده در منطقه دارند. همچنین آنالیز مربوطه ساختارهای فعالی را مشخص می‌سازد که گاهی از دید زمین شناسان مخفی مانده‌اند. احتمالاً این ساختارها گسلهای آنتی ریدل از گسل صحنه باشند. همجواری این ساختارها با شهرهایی چون کامیاران، سنقر، موچش و ستار نیازمند بررسیهای بیشتر جهت خطر پذیری زمین لرزه است.

کلید واژه‌ها: آنالیز فرکتالی گرادیان شیب رودخانه، شاخص ریخت زمین ساختی SL، رگرسیون وزنی جغرافیایی، ریخت زمین ساخت، گسل صحنه



Research Paper

Assessment of Active Tectonics Using a Novel Fractal Method of Stream Gradient in Northwestern Sahneh

Mahnaz Nedaei ^{1&2*}; Leili Izadikian ³; Seyed Hasan Mirahadi ⁴

1. Assistant Professor, Geology Department, Faculty of Basic Sciences, Payame Noor University

2. Board of Directors of Geological Society of Iran

3. Assistant Professor, Geology Department, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

4. PhD student, Department of Natural Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

Abstract

Morphometric indices are valuable tools for identifying tectonically active areas. The stream length–gradient index (SL) is one of the most important indices for distinguishing active regions. Compared with other morphometric indices, it is highly sensitive to uplift. However, this index is also sensitive to rock resistance along the flow path; therefore, lithology can significantly influence SL values. In this study, we introduce the fractal characteristics of river gradients for the first time and apply them to evaluate active tectonics and investigate the structural setting of northwestern Sahneh. To compare the effects of faulting and rock resistance on these two parameters and to assess their performance in identifying active areas, the lithological units of the region were first classified into five resistance classes. Geographically weighted regression (GWR) was then applied to examine local variations in SL and FD relative to distance from faults to clarify fault-related influences. The obtained fractal dimensions do not exhibit the limitations of the traditional SL index, such as sensitivity to rock strength and grain size. In addition to identifying thrust faults, the method also reveals strike-slip faults that correspond well with mapped faults in the area. The analysis further identifies active structures that are sometimes overlooked by geologists. These structures are likely anti-Riedel faults associated with the MRF. Their proximity to cities such as Kamyaran, Sonqor, Muchesh, and Sattar highlights the need for further investigation of earthquake risk.

Keywords: Fractal analysis of Stream gradient, SL morphometric index, Geographically weighted regression, Morphotectonics, Sahneh fault

*Email: m.nedaei@pnu.ac.ir
Tel: +989153164517



مقدمه

حساسترین شاخص نسبت به بالا آمدگی و تغییرات شیب کانال است و به همین علت برای ارزیابی فعالیت بالقوه زمین‌ساختی، بکار می‌رود. شاخص SL در سال ۱۹۷۳ توسط Hack ابداع شد. مقدار این شاخص به اختلاف مقاومت سنگها و اندازه ذرات بستگی دارد و با قدرت جریان نیز در ارتباط است. قدرت یک جریان نیز با حاصل ضرب دبی (طول جریان) در گرادیان آن متناسب است. در مکان‌های با نرخ بالا آمدگی زیاد، مقادیر شاخص SL نیز زیاد می‌باشد. این شاخص تحت تأثیر ناهمگونی سنگ‌شناسی مانند مقاومت سنگ و توپوگرافی، اندازه ذرات تشکیل دهنده بستر جریان، ناهنجاری‌های محلی و داده‌های پرت هم قرار می‌گیرد که ضریب اطمینان آن را پایین می‌آورد (Keller and Pinter, 1996).

داده کاوی^۴ هسته اصلی فرایند کشف دانش در پایگاه داده است که که الگوهای معتبر، بدیع، مفید و قابل درک از مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده فراهم می‌کند. خوشه‌بندی یکی از روش‌های پرکاربرد در داده کاوی است. روش‌های فرکتالی، روش‌های ساده و پرکاربردی هستند که برای دسته بندی کردن پدیده‌های طبیعی و طبقه بندی جمعیت‌های مختلف بکار می‌رود.

تئوری فرکتال توسط (Mandelbrot 1983) بعنوان ریاضیات غیر خطی معرفی شد و برای پدیده‌هایی بکار گرفته شد که خیلی غیر منظم‌تر از هندسه اقلیدسی بودند. مدل‌ها و روش‌های فرکتالی الگویی را توضیح می‌دهند که بخش‌های آن، هندسه، مقیاس یا اندازه‌ای مشابه با کل را نشان می‌دهند و اصطلاحاً در مقیاس‌ها یا توزیع‌های متفاوت، خود مشابه نامیده می‌شوند (Bolviken et al., 1992; Allegre and Lewin, 1995; Agterberg et al., 1996). مدل فرکتالی در بسیاری از علوم طبیعی نظیر کمیت‌های فیزیکی و شیمیایی مرتبط با هندسه ارائه شده توسط Mandelbrot بکار گرفته شده است. در علوم زمین نیز کاربرد مدل‌های فرکتالی بعنوان یک روش پایه در کمی کردن و توصیف پدیده‌های زمین‌شناسی در ۱۵ تا ۲۰ سال اخیر سرعت گسترش یافته است. در ارتباط با توزیع مکانی

از جمله روش‌های تفسیر ساختارها در علوم زمین استفاده از تحلیل‌های ریخت زمین‌ساختی است که از داده‌های توپوگرافی و اطلاعات دورسنجی و ... صورت می‌پذیرد. زمین ریخت یا ریخت زمین ساخت به معنای دانش مطالعه اشکال و سیمای ایجاد شده در زمین^۱ بر اثر فرآیندهای زمین‌ساختی و یا به معنای کاربرد اصول زمین ریختی در تحلیل مسائل زمین‌ساختی است (Keller and Pinter, 1996). مورفومتری، اندازه گیری کمی شکل مناظر است که امکان مقایسه چشم اندازها را به راحتی فراهم می‌کند و پارامترهایی (شاخصهای ریخت زمین ساختی) را به دست می‌دهد، که برای تعیین خصوصیات یک منطقه به طور مثال سطح فعالیت زمین ساختی مفید هستند. شاخص‌های زمین ریختی می‌توانند برای بررسی تحولات سریع در یک منطقه بزرگ مورد استفاده قرار گیرند و اطلاعات مورد لزوم آنها نیز به راحتی از نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی بدست می‌آید.

استفاده از شاخص‌های ریخت سنجی به عنوان توابعی از فعالیت‌های زمین ساختی، اهمیت آنها را در مطالعات مربوط به برآورد فرآیندهای زمین‌ساختی فعال و اثرات ناشی از آن همچون خطر زمین‌لرزه‌ها مشخص می‌کند. مهمترین ویژگی استفاده از این شاخص‌ها، سادگی نسبی روش محاسبه و همچنین سرعت عمل بالا در بکارگیری آنها است. یکی از کاربردهای اصلی محاسبه‌ی برخی از این شاخص‌ها، علاوه بر تعیین درجه‌ی فعالیت زمین‌ساختی مناطق مختلف، تعیین نرخ لغزش به ویژه نرخ برخاستگی^۲ بر روی گسل‌های منطقه می‌باشد. اگرچه این مطالعات نکات ارزشمندی را ارائه می‌دهند، اما این شاخص‌ها مستعد بروز خطا، سوگیری سنگ‌شناسی و محدودیت‌هایی در تشخیص ناهمسانگردی ساختاری هستند. در میان شاخص‌های سنتی، شاخص گرادیان طولی رودخانه^۳ (SL) یکی از شاخص‌های مهم جهت تفکیک مناطق فعال می‌باشد. در مقایسه با سایر شاخص‌های ریخت شناسی،

۱ Landforms

۲ uplift

۳ Stream Length Gradient Index

گسل‌هایی که در منطقه حضور دارند می‌توان به گسل اصلی زاگرس (MZRF)^۴ با مولفه معکوس و گسل جوان زاگرس (MRF)^۵ با مولفه امتداد لغز راستبر اشاره کرد (Talebian and Jackson, 2002). MZRF با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق مرز بین پهنه ساختاری زاگرس مرتفع و ساندج سیرجان را تشکیل می‌دهد (Alavi, 1984). MRF به موازات MZRF قرار دارد و شامل سه قطعه شمال غربی، میانی و جنوب شرقی است. گسل مروارید با مکانیسم امتداد لغزی راستبر قطعه شمال غربی از گسل MRF است که بخش کوچکی از آن در منطقه مطالعاتی رخنمون دارد. گسل صحنه، بخش میانی MRF و قسمت وسیعی از منطقه مطالعاتی را شامل می‌شود و علاوه بر مکانیسم امتداد لغزی راستبر، مولفه معکوس نیز دارد (Talebian and Jackson, 2002). گسل میانراهان با مولفه امتدادی راستبر نیز در نقشه مشاهده می‌شود (Mirzaei and Gheitanchi, 2002).

روش کار

فرکتال‌ها و فرکتال‌های چندگانه^۶ مفاهیمی هستند که با هندسه و یا خصوصیات مستقل از مقیاسی که خود تشابهی^۷ یا خود وابستگی^۸ نامیده می‌شوند، سر و کار دارند (Mandelbrot, 1983; Evertsz and Mandelbrot, 1992; Feder, 1988; Schertzer and Lovejoy, 1991; Cheng, 1994). مدل‌های فرکتالی مختلفی برای مطالعه توزیع مکانی عوارض زمین شناسی، تکامل یافته و بکار گرفته شده‌اند. این روش‌ها بر مبنای رابطه بین ویژگی و مکان هندسی مربوطه شکل گرفته‌اند، بعنوان مثال روش عیار^۹ (بزرگی) - تعداد، عیار (بزرگی) - مساحت، عیار (بزرگی) - محیط و عیار (بزرگی) - فاصله. در تمامی این مدل‌های فرکتالی رابطه توانی بین اندازه تجمعی مکان هندسی $M(\ddot{a})$ و ویژگی مورد نظر $\ddot{a}$ بصورت $M(\delta) \propto \delta^{-\alpha}$ وجود دارد. α بعد فرکتالی

پدیده‌های زمین شناسی مرتبط با کانه زایی (Cheng et al., 1994; Carranza, 2008; Deng et al., 2010; Afzal et al., 2011; Zuo, 2011)، کنترل کننده‌های ساختاری (Carranza and Sadeghi, 2010; Zhao et al., 2011) و کنترل کننده‌های زمین شناسی (Ford and Blenkinsop, 2008; Zuo et al., 2009; Wang et al., 2011)، مدل‌های فرکتالی مختلفی گسترش یافته‌اند. گرچه تاکنون از روش فرکتالی برای طبقه بندی جمعیت داده‌های مختلف زمین شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی استفاده شده است اما در این مقاله برای اولین بار خصوصیت فرکتالی گرا دیان رودخانه معرفی و از آن بعنوان شاخصی برای بررسی زمین ساخت فعال و نیز بررسی وضعیت ساختاری بهره جستیم. این تحقیق با هدف معرفی و بررسی عملکرد خاصیت فرکتالی گرا دیان رودخانه در تهیه نقشه‌های نوزمین ساخت و زمین ساخت فعال در منطقه غرب کشور، شمال غرب شهرستان صحنه انجام گردیده است. ابعاد فرکتالی بدست آمده از این پارامتر، نقاط ضعف شاخص SL، از جمله حساسیت به مقاومت سنگها و دانه بندی را نداشته، علاوه بر مشخص کردن گسل‌های رانندگی، گسل‌های امتداد لغز را نیز نمایان می‌سازد که تطبیق خوبی با گسل‌های برداشت شده دارند.

زمین ساخت منطقه

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب شهرستان صحنه واقع گردیده و حدودا در بین مختصات جغرافیایی ۳۴°۲۸' تا ۳۵°۱۵' عرض شمالی و ۴۶°۳۶' تا ۴۷°۵۸' طول شرقی قرار دارد (شکل ۲). همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، منطقه مطالعاتی از دیدگاه ساختاری شامل پهنه زاگرس مرتفع^۱، پهنه زمین درز زاگرس^۲ و پهنه ساندج سیرجان^۳ است. کمپلکس افیولیتی نیز بخش‌هایی از منطقه را شامل می‌شود؛ با این حال بخش جنوبی منطقه یعنی در محل پهنه زاگرس مرتفع، آهک بیستون و رادیولاریت کرمانشاه رخنمون دارند. از مهم ترین

۴ (Main Zagros Reverse Fault (MZRF

۵ (Main Recent Fault (MRF

۶ multifractals

۷ self-similarity

۸ self-affinity

۹ concentration

۱ (High Zagros Belt (HZB

۲ (Zagros Suture Zone (ZSZ

۳ (Sanandaj-Sirjan Zone (SSZ

در روش فرکتالی ارائه شده، گرادیان شیب محلی رودخانه بعنوان ویژگی مورد نظر و طول تجمعی از خط تقسیم آب تا وسط بخشی که شیب محلی آن را اندازه می‌گیریم، بعنوان مکان هندسی این ویژگی در نظر گرفته می‌شود. می‌توان رابطه توانی بین طول (تجمعی) با گرادیان شیب به شکل زیر برقرار کرد:

$$L_{\varphi}(\geq \varphi) \propto \varphi^{-\beta} \quad (2)$$

L طول تجمعی گرادیان‌های شیب (φ) و β بعد فرکتالی گرادیان‌های شیب است. به دلیل رابطه توانی بین طول (تجمعی) و گرادیان شیب، می‌توان نموداری از $\log L$ در مقابل $\log \varphi$ در هر حوضه ترسیم کرد. از آنجا که اکثر پدیده‌های طبیعی، فرکتال چندگانه و ناهمگن شناخته می‌شوند (Mandelbrot, 1989)، یک بعد فرکتالی واحد نمی‌تواند پیچیدگی هندسی آنها را به طور کامل توصیف کند. در عوض، طیفی از مقادیر β نمایش جامع‌تری را ارائه می‌دهد. در روش‌های کلاسیک محاسبه بعد فرکتالی چندگانه، رگرسیون‌های خطی به صورت دستی و تقریبی بر روی بخش‌های متمایز $\log\text{-}\log$ برازش می‌شوند که هر شیب نشان دهنده یک بعد فرکتالی است. در روش محاسباتی ارائه شده در این تحقیق، برای ثبت ناهنجاری‌های محلی و ساخت یک پروفایل پیوسته از تغییرات بعد فرکتالی، شیب محلی بین نقاط $\log\text{-}\log$ مجاور به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\log L_{\varphi B} - \log L_{\varphi A}}{\log \varphi_B - \log \varphi_A} \quad (1)$$

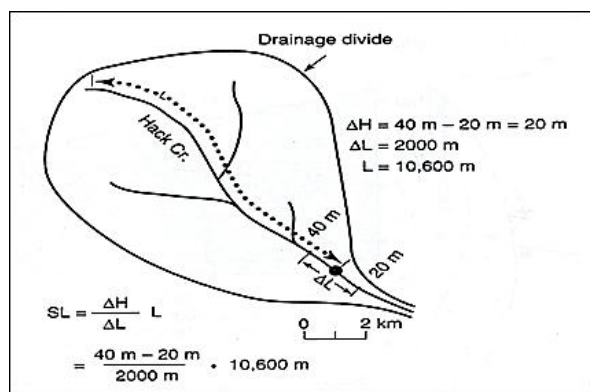
که در آن A و B نقاط میانی بخش‌های متوالی هستند و هر مقدار بعد فرکتالی به ابتدای بخش‌های مربوطه

است که وجود تنها یک مقدار برای آن بیانگر تک فرکتالی بودن آن پدیده، و چند مقدار، نمایانگر فرکتال چندگانه پدیده مورد نظر می‌باشد. تابع توانی $M(\delta)$ مستقل از مقیاس است بدان معنی که در آن تغییر مقیاس اندازه گیری δ ، تغییری در تابع ایجاد نمی‌کند. این ویژگی کاربردی در تمام فرآیندهای فیزیکی که عوارض مشابهی را در مقیاس‌های مختلف ایجاد می‌کنند، وجود دارد (Cheng and Li, 2002). عارضه‌ها بر اساس بعد فرکتالی‌شان قابل تشخیص‌اند. بعد فرکتالی بیشتر از بعد اقلیدسی و پارامتری است که توزیع مکانی یک پدیده فرکتالی، بویژه درجه خوشه بندی آن را معین می‌کند.

جهت بررسی و تحلیل‌های مورفوتکتونیک محدودده مطالعاتی، ابتدا نقشه‌های زمین شناسی و توپوگرافی منطقه مورد بررسی قرار گرفت، سپس با بکارگیری مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر (DEM)، حوضه‌ها و آبراهه‌ها در محیط نرم افزار ArcGIS 10.8 به کمک افزونه Arc Hydro استخراج گردید. اصلاحات لازم و حوضه‌بندی مناسب نسبت به داده استخراجی از نرم افزار ArcGIS 10.8 با استفاده از نرم افزار Google Earth Pro به عمل آمد. شاخص SL از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} L \quad (1)$$

شیب محلی $(\varphi = \frac{\Delta H}{\Delta L})$ رود بین دو منحنی میزان، و L طول (تجمعی) جریان از خط تقسیم آب تا وسط بخشی است که شیب محلی آن را اندازه می‌گیریم (شکل ۱).



شکل ۱. نحوه محاسبه شاخص SL



خود اختصاص داده می‌شود. این تخمین، $n-1$ بعد فرکتالی محلی (که در آن n تعداد نقاط در طول آبراهه است)، را با دقت بالاتری نسبت به روش کلاسیک ایجاد کرده و امکان تشخیص تغییرات کوچک در مقیاس ریز محلی که معمولاً در روش‌های رگرسیون مرسوم از بین می‌روند یا میانگین‌گیری می‌شوند، را فراهم می‌کند. در نهایت ابعاد فرکتالی محلی (FD) برای تحلیل رفتار مقیاس‌های مختلف، خوشه‌بندی می‌شوند. ابعاد فرکتالی با حداقل تغییرات در یک خوشه قرار می‌گیرند، در حالی که تغییرات شدید، نشان دهنده تغییر رفتار گرادیان شیب است.

مدل‌سازی فضایی رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) برای تحلیل رابطه میان متغیرهای مستقل و وابسته با در نظر گرفتن ناهمگنی فضایی به کار می‌رود. در پدیده‌های وابسته به محیط، همچون جغرافیایی، اقلیمی، زمین ریختی و زمین ساختی این روابط غالباً در نقاط مختلف فضا تغییر می‌کنند. روش GWR این ناهمگنی فضایی را شناسایی و مدل‌سازی کرده و برای هر مکان، یک مدل رگرسیون محلی ارائه می‌دهد. GWR یکی از قوی‌ترین روش‌های تحلیل رابطه‌های مکانی در علوم زمین است، زیرا علاوه بر برآورد اثر متغیرها، تغییرات مکانی اثرگذاری آنها را نیز نشان می‌دهد. به همین دلیل، برای بررسی تغییرات محلی داده‌های SL/FD نسبت به فاصله از گسل روش GWR اعمال شد تا تأثیر گسل را آشکار کند.

بحث

در این پژوهش منطقه مطالعاتی به ۲۳ حوضه زهکشی تقسیم شده است. بر روی طویل‌ترین آبراهه در هر حوضه، شاخص ریخت زمین ساختی SL بر اساس روش مندرج در شکل ۱ و همچنین ابعاد فرکتالی بر اساس معادله ۳ محاسبه شدند. برای هر نقطه میانی در گرادیان شیب محلی مشخص شده در شکل ۱، یک مقدار SL و برای هر محل تقاطع آبراهه و خط تراز (بین دو نقطه میانی متوالی) یک بعد فرکتالی تعلق

می‌گیرد. در نهایت با روش درون یابی مناطق دارای مقادیر یکسان پهنه بندی می‌شوند. شکل ۳، نقشه‌های تراز حاصل از SL و FD و تغییرات مکانی این پارامترها را نشان می‌دهند. مناطق قرمز بیانگر SL بالاتر و ابعاد فرکتالی منفی و مناطق سبز بیانگر SL پایین‌تر و ابعاد فرکتالی مثبت است. مناطق با شدت رنگ بیشتر، مقدار بزرگتر از هر دو شاخص را مشخص می‌کنند. قرار گرفتن دو پهنه با رنگهای سبز و قرمز کنار یکدیگر نشان دهنده تغییرات سریع و ناگهانی شاخص‌ها و در نتیجه تغییر جامعه و نحوه توزیع است. در شکل ۳b، نقشه حاصل از ابعاد فرکتالی، مرز بین پهنه‌ها با رنگهای متفاوت خطواره‌هایی را مشخص می‌کند که تطابق خوبی با گسلهای نقشه شده دارند. در حالی که هر دو شاخص با استفاده از تنظیمات همسایگی یکسان درون‌یابی شدند، ترازهای FD تطابق بیشتری با گسل‌ها نشان دادند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر آن به کنترل‌های ساختاری در مقایسه با SL است. در مواردی جابجایی رنگ‌ها حتی حالت برش در گسل‌ها را کاملاً نمایان می‌سازد. در قسمت‌هایی از نقشه FD، روندهای چپگردی مشخص می‌شوند که فقط در مناطق محدودی نقشه شده‌اند. احتمالاً این روندها، گسل‌های آنتی ریدل از گسل MRF باشند. نکته حائز اهمیت نزدیکی این گسلها با شهرهایی چون کامیاران، سنقر، موچش و ستار است که از حیث فعال و جوان بودن در ریسک پرخاطر لرزه‌ای قرار می‌گیرند.

برای ارزیابی تأثیر مقاومت سنگ بر تغییرات مکانی SL و FD، ابتدا واحدهای سنگ‌شناسی مطابق با تقسیم بندی El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸) در پنج کلاس مقاومتی گروه‌بندی شدند. این کلاس‌ها از مقاومت بسیار کم (کلاس ۱: رسوبات کواترنری و مارن) تا مقاومت بسیار بالا (کلاس ۵: آندزیت، دیوریت، گابرو و گرانیت) متغیر هستند و دسته‌های میانی شامل سنگ‌های مارنی-شیلی (کلاس ۲)، سنگ آهک و ماسه‌سنگ (کلاس ۳) و سنگ‌های

۳b) را بررسی کرد. رنگ‌های گرم در این شکل، نشان‌دهنده مناطقی است که غالباً تحت بالآآمدگی و تغییر شکل مرتبط با راندگی هستند، در حالی که رنگ‌های سرد مناطقی را که فرآیندهای امتدادلغز در آنها غالب است، برجسته می‌کند. حوضه دین‌ور به طور مشخص در محدوده رنگ سرد ظاهر می‌شود که با محیط تراکشی آن سازگار است. جابجایی خطوط تراز FD در دو طرف MRF را می‌توان به طور کلی به عنوان معیار تقریبی مؤلفه امتدادلغز گسل در نظر گرفت. دو مورد از آنها که با فلش‌های سیاه در شکل ۵ نشان داده شده‌اند، با مشاهدات گزارش شده توسط علیپور و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد.

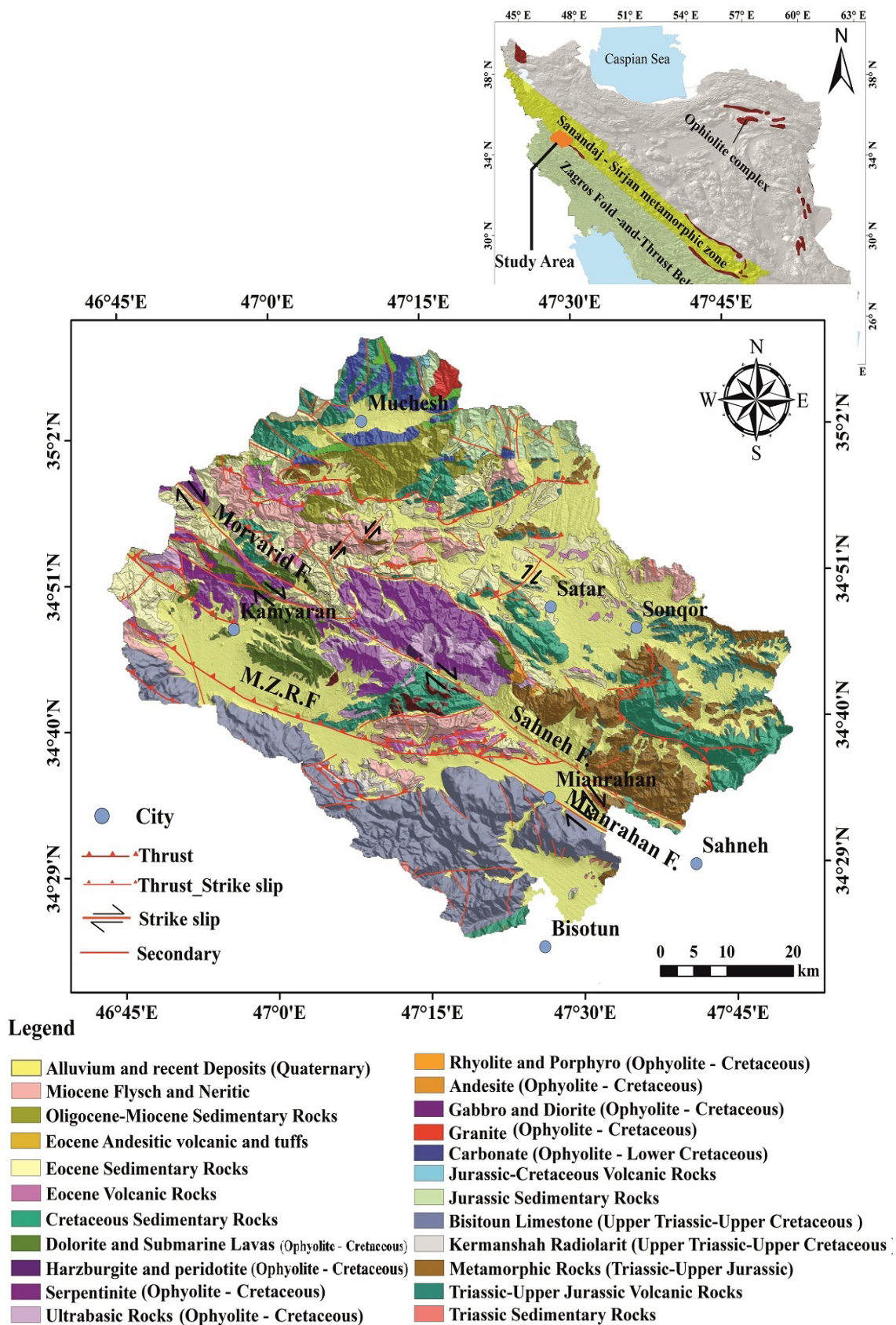
نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای اولین بار ویژگی فرکتالی شیب آبراهه در برآورد زمین‌ساخت فعال مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد فرکتالی بدست آمده، نقاط ضعف شاخص SL متداول، از جمله حساسیت به مقاومت سنگها و دانه‌بندی را ندارد. علاوه بر این، ترازهای FD روندهایی با جهت NNE-SSW را نشان می‌دهند که ممکن است در مطالعات قبلی توجه کمی به آنها شده باشد. در نهایت، FD حساسیت بالایی در تشخیص مورفودینامیک ایجاد شده توسط گسل را نشان می‌دهد و بنابراین می‌تواند به عنوان یک شاخص برای فعالیت‌های زمین‌ساختی بکار رود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نقشه‌برداری FD با حساسیت بالا هر دو مؤلفه تغییر شکل عمودی و جانبی را ثبت می‌کند و دیدگاه‌هایی را در مورد فرآیندهای ریخت زمین‌ساختی ارائه می‌دهد که در تحلیل‌های مرسوم مبتنی بر SL مبهم باقی می‌مانند. با این وجود، عملکرد متمایز FD نسبت به SL، هنوز هم می‌تواند تحت تأثیر تراکم زهکشی و جهت‌گیری شبکه‌های آبراهه نسبت به روند گسل‌های اصلی، به ویژه در زمین‌های با ساختار پیچیده، قرار گیرد.

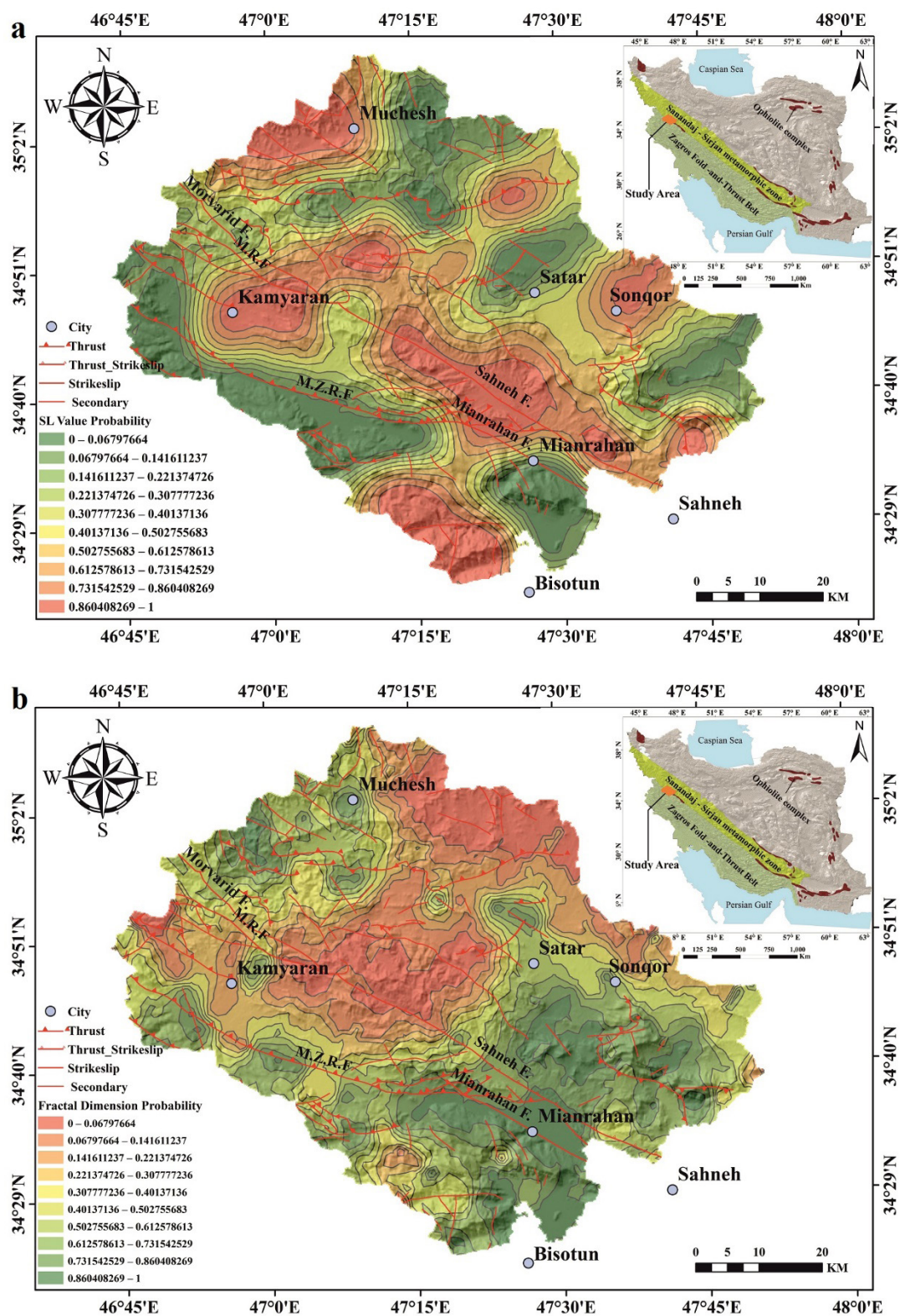
آتشفشانی-دگرگونی (کلاس ۴) می‌باشند. سپس GWR برای بررسی تغییرات محلی داده‌های SL/FD نسبت به فاصله از گسل اعمال شد تا تأثیر گسل را آشکار کند. پهنای باندی شامل ۲۰ همسایه به عنوان بهینه انتخاب شد که بین قدرت توضیح دهنده و پیچیدگی مدل تعادل برقرار کند. نتایج GWR روی نقشه طبقات سنگ‌شناسی نمایش داده شد تا مقایسه بین انواع سنگ‌ها تسهیل شود. رنگ‌های سرد ضرایب منفی GWR را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده مناطقی هستند که مقادیر SL و FD در نزدیکی گسل‌ها افزایش می‌یابند، در حالی که رنگ‌های گرم ضرایب مثبت را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده مناطقی هستند که نزدیکی به گسل‌ها این پارامترها را کاهش می‌دهد (شکل ۴).

به طور کلی، ضرایب منفی GWR (مقادیر بالاتر) برای SL که در نزدیکی گسل‌های راندگی است، عمدتاً با واحدهای سنگ‌شناسی با مقاومت کم تا متوسط مرتبط هستند. در مقابل، ضرایب مثبت GWR هیچ رابطه مشخصی با گسل یا طبقات سنگ‌شناسی خاص در این مقیاس از تحلیل نشان نمی‌دهند (شکل ۴a). این الگوها نشان می‌دهند که شاخص SL در جایی پاسخ می‌دهد که اثرات ترکیبی تضادهای سنگ‌شناسی و فعالیت راندگی، کنترل غالبی را بر گرادیان‌های شیب محلی اعمال می‌کنند.

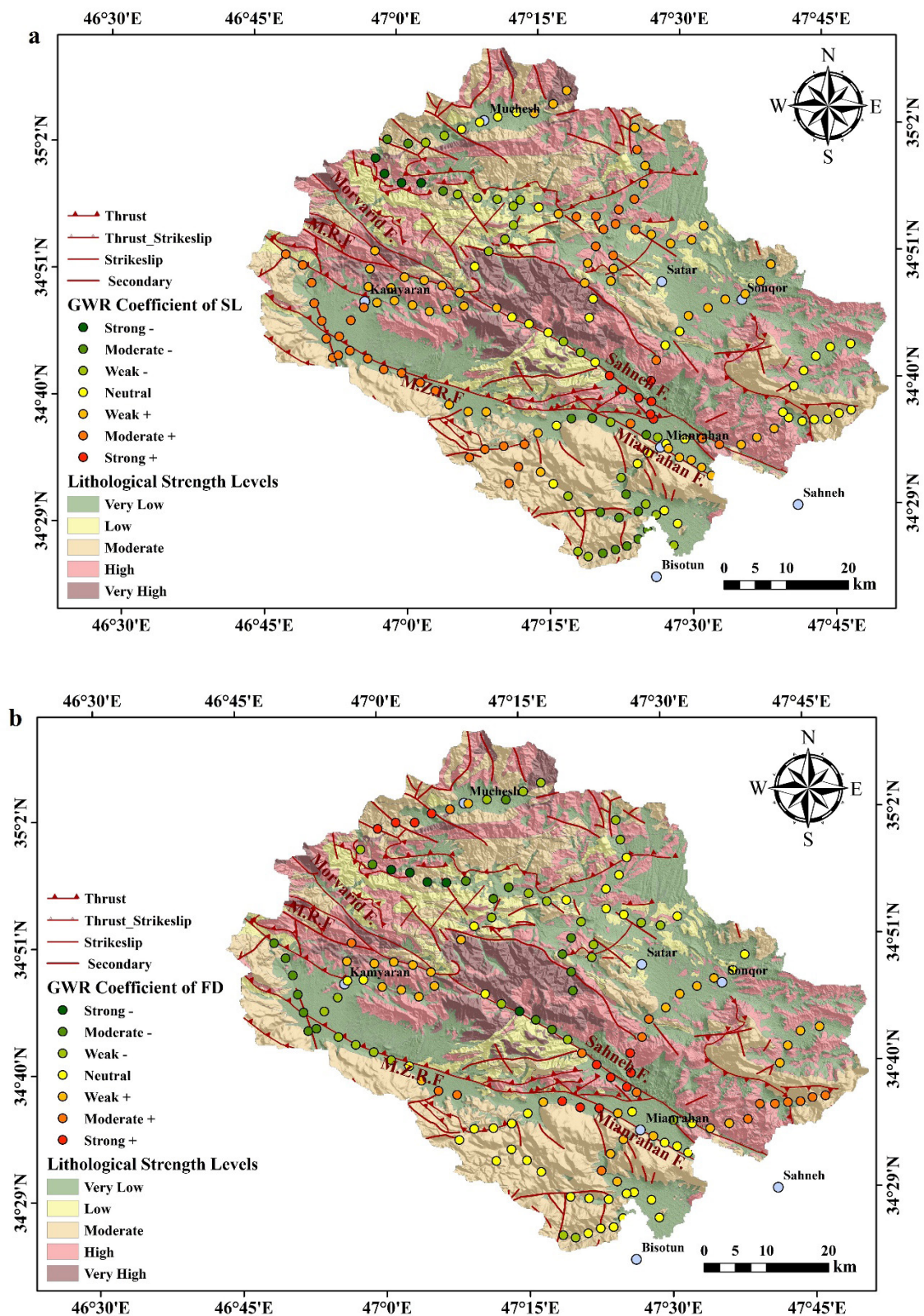
اما توزیع فضایی ضرایب GWR برای FD، بیشتر به جنبش گسل مربوط است تا سنگ‌شناسی. شکل ۴b نشان می‌دهد که مقادیر منفی مربوط به ساختارهای راندگی و مقادیر مثبت مربوط به رژیم‌های امتدادلغز هستند. چنین الگویی در توزیع فضایی ضرایب SL مشهود نیست. بنابراین GWR مشخص می‌کند آنالیز فرکتالی گرادیان شیب، یک روش حساس و کمی برای تشخیص سبک زمین‌ساختی و ارزیابی اثر زمین‌ریختی گسل‌های فعال است. اکنون می‌توان بار دیگر با نگاه عمیق‌تری نقشه پراکندگی FD (شکل



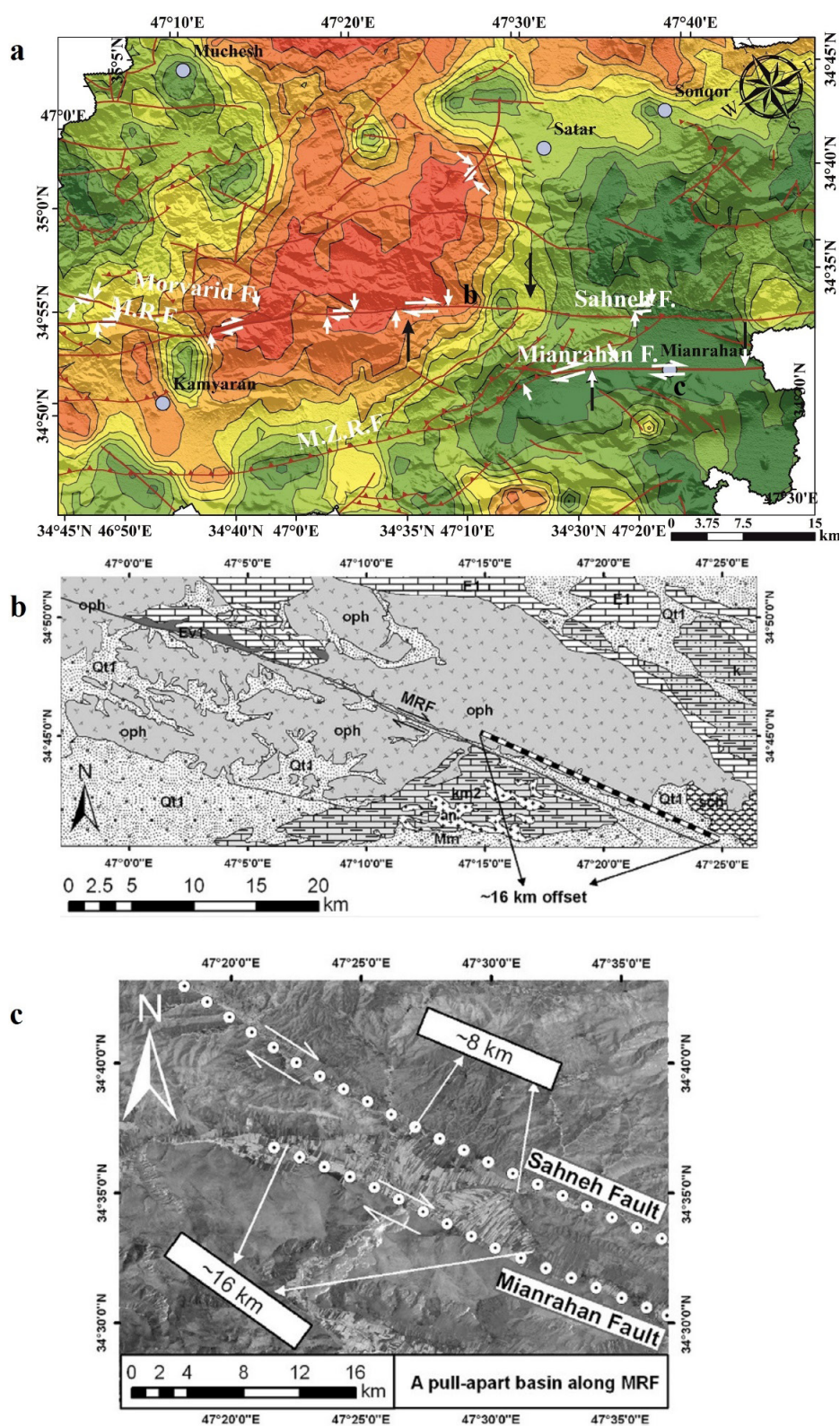
شکل ۲. موقعیت و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ کرمانشاه و سنندج)



شکل ۳. (a) نقشه پراکندگی شاخص SL. (b) نقشه پراکندگی FD که همبستگی مکانی آن را با گسل‌ها نشان می‌دهد. بیشتر گسل‌ها با ترازهای فرکتالی همسو هستند



شکل ۴. ضرایب GWR برای (a) شاخص SL و (b) نسبت به فاصله از گسل. رنگ‌های سرد ضرایب منفی و رنگ‌های گرم ضرایب مثبت را نشان می‌دهند. نتایج برای مقایسه با لیتولوژی روی نقشه طبقات سنگ‌شناسی نمایش داده شده‌اند.



شکل ۵. (a) نقشه ترازهای FD. جابجایی خطوط تراز در دو سمت MRF با فلش سفید نشان داده شده است. (b) و (c) جابجایی‌های راستگرد در امتداد MRF گزارش شده توسط علیپور و همکاران (۲۰۱۲)، که مطابق با نقشه اصلی نام‌گذاری شده‌اند.



مراجع

- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *J Geochem Explor* 51,109–130.
- Cheng, Q. and Li, Q., 2002. A fractal concentration–area method for assigning a color palette for image representation. *Computers & geosciences*, 28(4), 567-575.
- Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Wang, Y., Gong, Q., Liu, H., 2010. Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China. *J Geochem Explor*, 105, 95–105.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., & Keller, E. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173.
- Evertsz, C.J.G., Mandelbrot, B.B., 1992. Multifractal measures. In: Peitgen, H-O., Jurgens, H., Saupe, D. (Eds.), *Chaos and Fractals*. Springer, Berlin, New York, 922–953.
- Feder, J., 1988. *Fractals*. Plenum Press, New York, 283 pp.
- Ford, A. and Blenkinsop, T.G., 2008. Combining fractal analysis of mineral deposit clustering with weights of evidence to evaluate patterns of mineralization, application to copper deposits of the Mount Isa Inlier, NW Queensland, Australia. *Ore Geology Reviews*, 33(3-4), 435-450.
- Hack, J.T., 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the US Geological Survey*, 1(4), 421-429.
- Keller, E.A. and Pinter, N., 1996. Active tectonics
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *J Geochem Explor*, 108, 220–232.
- Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A., Good, D., 1996. Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba. *Comput Geosci*, 22(5), 497–507.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic Belt of Iran. *New Data and Interpretations. Tectonophysics*, 211-238.
- Alipoor, R., Zaré, M., & Ghassemi, M. R. (2012). Inception of activity and slip rate on the Main Recent Fault of Zagros Mountains, Iran. *Geomorphology*, 175, 86-97.
- Allegre, C.J. and Lewin, E., 1995. Scaling laws and geochemical distributions. *Earth and Planetary Science Letters*, 132(1-4): 1-13.
- Bolviken, B., Stokke, P.R., Feder, J., Jossang, T., 1992. The fractal nature of geochemical landscapes. *J Geochem Explor*, 43, 91–109.
- Carranza, E.J.M., 2008. *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS*. Elsevier
- Carranza, E.J.M. and Sadeghi, M., 2010. Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden). *Ore Geology Reviews*, 38 (3), 219-241.
- Cheng, Q., 1994. Multifractal modeling and spatial analysis with GIS, gold potential estimation in the Mitchell-Sulphurets area, Northwestern British Columbia. Ph.D. Dissertation, University of Ottawa, Ottawa, 268 p.

associated with Cu and Pb–Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum–area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China). *J Geochem Explor*, 111, 13–22.

(Earthquake, uplift and landscape). Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 338p.

Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature* (updated and augmented edition). W.H. Freeman and Company, New York, 468 p.

Mandelbrot, B.B., 1989. [*Fractals in the natural sciences*](#). Princeton University press, New Jersey, 208 p.

Mirzaei, N. and Gheitanchi, M. R., 2002. Seismotectonics of Sahneh fault, middle segment of main recent fault, Zagros mountains, western Iran. *J. Earth Space Phys*, 28, 1- 8.

Schertzer, D., Lovejoy, S. (Eds.), 1991. *Nonlinear Variability in Geophysics*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Netherlands, 318 pp.

Taleblian, M. and Jackson, J., 2002. Offset on the main recent fault of NW Iran and implications on the late Cenozoic tectonics of the Arabia– Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International*, 150, 422-439.

Wang, Q.F., Deng, J., Liu, H., Wang, Y., Sun, X., Wan, L., 2011. Fractal models for estimating local reserves with different mineralization qualities and spatial variations. *J Geochem Explor*, 108, 196–208.

Zhao, J., Chen, S., Zuo, R. and Carranza, E.J.M., 2011. Mapping complexity of spatial distribution of faults using fractal and multifractal models, vectoring towards exploration targets. *Computers & Geosciences*, 37(12), 1958-1966.

Zuo, R., Cheng, Q., Xia, Q., 2009. Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration. *J Geochem Explor*, 102, 37–43.

Zuo, R., 2011. Identifying geochemical anomalies

