



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۵، سال هشتم، شماره ۳۰

doi 10.22077/jt.2026.11893.1231

مقاله پژوهشی

ارزیابی کنترل گره‌های ساختاری و سنگ‌شناختی بر شبکه شکستگی‌های برگه ۱:۱۰۰,۰۰۰ تهران با تلفیق داده‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی

علی کریم پور^۱، علی فرضی پور صائین^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم زمین، دانشگاه اصفهان، ایران.

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۷

چکیده:

تحلیل ساختاری شبکه شکستگی‌ها، نقشی کلیدی در ارزیابی مخاطرات لرزه‌زمین‌ساختی و مدیریت منابع آب در سازندهای سخت دارد. پژوهش حاضر با هدف بارزسازی و تحلیل زمین‌ساختی شکستگی‌های برگه ۱:۱۰۰,۰۰۰ تهران، به ارزیابی کنترل گره‌های سنگ‌شناختی و ساختاری، بر توزیع و شدت شکستگی‌ها در حاشیه جنوبی البرز مرکزی پرداخته است. بدین منظور، تصاویر ماهواره لندست ۸ پس از پیش‌پردازش و ارتقای تفکیک مکانی به ۱۵ متر، تحت تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در نرم‌افزار (ENVI 5.3) قرار گرفت. استخراج خودکار خطواره‌ها روی مؤلفه نخست (PC1) با ماژول (LINE) در نرم‌افزار (PCI Geomatica 2020) انجام شد و سپس در محیط نرم‌افزار (ArcGIS 10.8.2) و با انطباق با تصاویر (Google Earth Pro)، نویزهای انسان‌ساخت به صورت نیمه‌خودکار حذف گردیدند. تحلیل آماری ۷,۷۳۷ قطعه شکستگی معتبر با مجموع طول ۲,۸۷۴.۷۱ کیلومتر و میانگین طول ۰.۳۷ کیلومتر (۳۷۱.۵۵ متر)، دو روند ساختاری را آشکار ساخت: روند اصلی با امتداد شرق-شمال‌شرق به غرب-جنوب‌غرب (ENE-WSW) همسو با راندهای فعال البرز جنوبی، و روند ثانویه با امتداد غرب-شمال‌غرب به شرق-جنوب‌شرق (WNW-ESE) معرف شکستگی‌های برشی متقاطع در رژیم ترافشاری منطقه است. ارزیابی‌های سنگ-زمین ساختی نشان داد توف‌های شکننده سازند کرج (ائوسن) بالاترین تراکم شکستگی را دارند، در حالی که رسوبات آبرفتی دشت به دلیل رفتار مکانیکی شکل‌پذیر، فاقد تمرکز سطحی شکستگی بوده اما گسل‌های رانده پنهان را در زیر خود پنهان کرده‌اند. مدلسازی زمین‌ساخت بلوکی نیز نشان داد دگرشکلی مورب از طریق فرآیند تفکیک کرنش میان سه بلوک مستقل کرج-پورکان، کن-وردیچ-رندان (با رفتار فراابومی/پاپ‌آپ) و امامزاده داوود-آهار هدایت می‌شود. این نتایج، اطلاعات و ابزاری کاربردی در ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای و یا مدیریت منابع آب کلان شهر تهران را ارائه می‌دهد.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، استخراج خطواره، لندست ۸، البرز مرکزی، منطقه تهران.

* ایمیل: a.farzipour@sci.ui.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۰۲۱۰۸۵۷۱

Research Paper

Evaluating Structural and Lithological Controls on Fracture Networks in the Tehran 1:100,000 Geological Sheet: Integrating Remote Sensing Data and Geographic Information System

Ali Karimpour¹, Ali FarzipourSaein^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

2- Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Abstract

Structural analysis of fracture networks plays a crucial role in assessing seismotectonic hazards and managing water resources in hard rock formations. This study aims to extract and structurally analyze lineaments within the 1:100,000 Tehran quadrangle, evaluating the lithological and structural controls on fracture distribution and intensity along the southern margin of the Central Alborz. To this end, Landsat 8 satellite imagery was pre-processed and pan-sharpened to a 15-meter spatial resolution, followed by Principal Component Analysis (PCA) in ENVI 5.3 software. Automated lineament extraction was conducted on the first principal component (PC1) using the LINE module in PCI Geomatica 2020. Subsequently, anthropogenic noise was semi-automatically filtered in ArcGIS 10.8.2 by cross-referencing with Google Earth Pro imagery. Statistical analysis of 7,736 validated fractures (with a cumulative length of 58.59 km and a mean length of 1.63 km) revealed two dominant structural trends: a primary ENE–WSW trend aligned with active thrust faults of the Southern Alborz, and a secondary WNW–ESE trend representing cross-cutting shear fractures within the regional transpressional regime. Lithotectonic evaluations indicated that the brittle tuffs of the Eocene Karaj Formation exhibit the highest fracture density. Conversely, plain alluvial deposits lack surface fracture concentrations due to their ductile mechanical behavior, yet they conceal blind thrust faults at depth. Furthermore, block-tectonic modeling demonstrated that oblique deformation is accommodated through strain partitioning among three distinct blocks: Karaj–Pourkan, Kan–Vardij–Randan (exhibiting pop-up behavior), and Emamzadeh Davood–Ahar. These findings provide an efficient and practical tool for seismic microzonation and groundwater resource management in the Tehran metropolis.

Keywords: Remote Sensing, Lineament Extraction, Landsat 8, Central Alborz, Tehran Region.

*Email: a.farzipour@sci.ui.ac.ir
Tel: +989102108571

مقدمه

فضایی و ترسیم نمودار گلسرخی جهت‌یافتگی در نرم‌افزار (RockWorks 16) انجام پذیرفت تا مدلی منسجم برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه و مدیریت بهینه آبخوان‌های منطقه ارائه شود.

زمین‌شناسی منطقه

زمین‌شناسی منطقه البرز مرکزی و جنوبی (شکل شماره ۱) بیانگر تاریخچه‌ای طولانی و پیچیده از تعاملات زمین-ساختی است که از پالئوزوئیک تا به امروز ادامه دارد. ساختار این منطقه تحت کنترل همگرایی مورب بین صفحات ایران و اوراسیا و بلوک خزر جنوبی قرار دارد که منجر به ایجاد یک رژیم ترافشاری چپ‌گرد و تفکیک کرنش در امتداد گسل‌های رانده و امتداد لغز شده است. زمین‌ساخت وارونگی نقش کلیدی در شکل‌دهی ساختارهای اصلی ایفا کرده و بسیاری از گسل‌های فشارشی امروزی، حاصل فعال‌سازی مجدد گسل‌های نرمال قدیمی‌تر هستند. توالی ضخیم چینه‌شناسی منطقه، از نهشته‌های پلتفرمی پالئوزوئیک تا مجموعه‌های آتشفشانی-رسوبی سنوزوئیک و آبرفت‌های کواترنری، شاهدی بر تغییرات محیطی و زمین‌ساختی متعدد است. فعالیت نوزمین‌ساختی شدید، لرزه‌خیزی بالا و شواهد مهاجرت جبهه دگرشکلی به سمت دشت تهران، بر پویایی و اهمیت مطالعه مستمر این منطقه تأکید دارد.

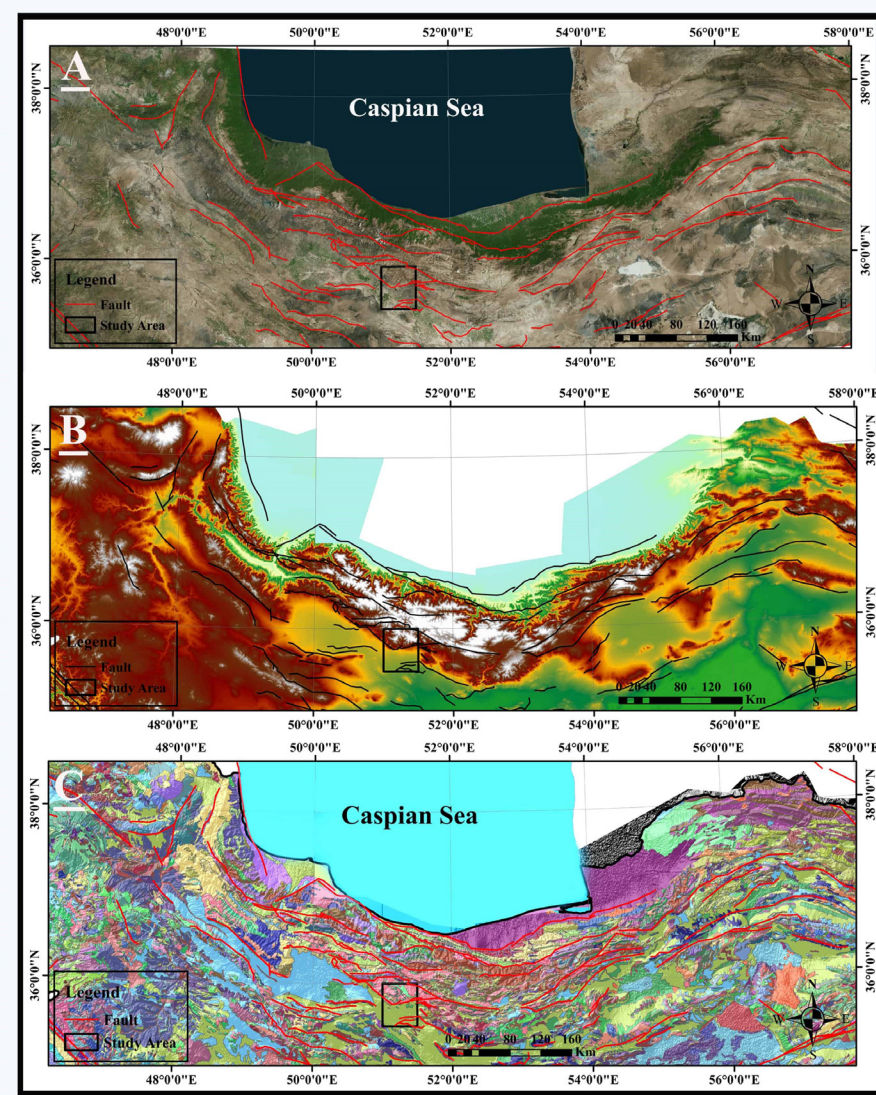
چینه‌شناسی منطقه

البرز مرکزی و جنوبی دارای توالی رسوبی-آذرآواری ضخیمی به ضخامت ۱۱ تا ۱۳ کیلومتر از نئوپروتروزوئیک تا کواترنری است که ثبت‌کننده فازهای متعدد زمین‌ساختی، ریفیتینگ، برخورد قاره‌ای صفحات عربی-اوراسیا و کوهزایی‌های سیمین و آلپی است (Zanchi et al., 2006; Landgraf et al., 2009; Berberian and King, 1981; Sheikholeslami, 2018; Ballato et al., 2011; Rezaei et al., 2024). قدیمی‌ترین واحد پی‌سنگی منطقه، سازند دگرگونی-رسوبی کهر، با سن نئوپروتروزوئیک و شواهد یخبندان ~۵۶۰ میلیون سال پیش است (Allen et al., 2003a; Berberian, 1976).

شناسایی شبکه‌های شکستگی و خطواره‌های ساختاری، نقشی کلیدی در ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای، مطالعات زمین‌ساختی و مدیریت منابع آب در سازندهای سخت ایفا می‌کند. با این حال، دشواری‌های پیمایش زمینی در مناطق صعب‌العبور کوهستانی و بافت‌های متراکم شهری، استفاده از فناوری سنجش از دور را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. از آنجا که روش‌های استخراج خودکار خطواره با خطاهای ناشی از عوارض انسان‌ساخت مواجه هستند و روش‌های دستی نیز ماهیتی ذهنی دارند، اتخاذ یک رویکرد تلفیقی و چندمرحله‌ای برای تلفیق دقت کارشناس با سرعت محاسبات ماشینی، راهکاری کارآمد در نقشه‌برداری نوین ناپیوستگی‌ها به شمار می‌رود.

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ تهران در حاشیه جنوبی البرز مرکزی است که بین مختصات تا طول شرقی و تا عرض شمالی قرار دارد. این پهنه فعال، یک زون گذار ریخت‌شناختی و لیتولوژیکی میان ارتفاعات البرز در شمال و دشت آبرفتی تهران در جنوب ایجاد کرده است. منطقه از نظر زمین‌ساختی تحت تأثیر رژیم ترافشاری (فشارشی-برشی) فعال ناشی از همگرایی صفحات عربی و اوراسیا بوده و میزبان سیستم‌های گسلی لرزه‌زای اصلی نظیر گسل شمال تهران، گسل مشا و راندگی پورکان-وردیچ است.

در این پژوهش، با هدف بارزسازی و استخراج دقیق شبکه شکستگی‌های منطقه، پردازش اولیه تصاویر ماهواره لندست ۸ و اعمال الگوریتم تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در محیط نرم‌افزار (ENVI 5.3) صورت پذیرفت. استخراج خودکار خطواره‌ها با استفاده از ماژول (LINE) در نرم‌افزار (PCI Geomatica) انجام شد. سپس جهت حذف کامل نویزهای انسان‌ساخت و تصحیح نهایی خطواره‌ها، خروجی‌ها در محیط نرم‌افزار (ArcGIS 10.8.2) با استفاده از افزونه تخصصی (ArcBruTile) و انطباق با تصاویر نرم‌افزار (Google Earth Pro 7.3.3) مورد غربالگری و پالایش قرار گرفتند. در نهایت، تحلیل‌های آماری-



شکل ۱. موقعیت ساختاری و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در پهنه البرز؛ (A) پراکندگی گسل‌های فعال بر روی تصویر ماهواره‌ای؛ (B) انطباق گسل‌های فعال بر مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه؛ (C) نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰)

(TReI/TRed) آغاز شد و با وقوع کوهزایی سیمین پیشین، توالی ذغال‌دار گروه شمشک به ضخامت تا ۴۰۰۰ متر نهشته گردید (Berberian and King, 1981; Allen et al., 2003a; Guest et al., 2006a; Ehtesha-mi-Moinabadi, 2017). پیشروی‌های دریایی بعدی منجر به تشکیل سازندهای دلیجای، لار، تیزکوه (Ap-tian) و آهک‌های سنومانین گردید (Zanchi et al., 2006; Seyed-Emami et al., 2020; Naeimi et al., 2022). در سنوزوئیک، پس از دگرشیبی سازند فجن (Ef) و آهک‌های زیارت، توالی عظیم آتشفشانی-آذرآواری سازند کرج به سن ائوسن با ضخامت ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر در یک حوضه کششی پشت‌کمانی شکل

توالی اینفراکامبرین (Ghorbani, 2021; Stern et al., 2021) و پالئوزوئیک با دولومیت‌های سلطانیه (Cs)، تناوب شیلی-دولومیتی باروت (Cl) دارای گدازه‌های بازالتی، شیل‌های زایگون (Cz)، ماسه‌سنگ‌های آرکوزی-کوارتزیتی لالون و کربنات‌های میلا (Cm) ادامه یافته و پس از سازند لشکرک (اردوئین) و وقفه کوهزایی کالدونین (نبود رسوبی دوره سیلورین)، با سازندهای جیروود (D-Cg/D-Ca)، مبارک (C)، دورود (Pd)، روته و سنن (Pn) تا پرمین پسین تکمیل می‌شود (Berberian, 1976; Alavi, 1996; Zanchi et al., 2006; Sheikholesla-mi, 2018; Javadi et al., 2020; Rezaei et al., 2024). دوران مزوزوئیک با کربنات‌های پلتفرمی سازند الیکا

۳) واحد Qf (سازند تهران/واحد C) با سن پلیستوسن پسین، شامل مخروط‌افکنه‌های وسیع متخلخل و آبخوان اصلی دشت تهران.

۴) نهشته‌های هولوسن/واحد D شامل واحد های Q2t (تراس‌های جوان)، Q1 (مخروط‌افکنه‌های جدید)، Qsc (واریزه‌ها/Scree)، Qal (آبرفت بستر فعال رودخانه‌ها) و Qm (رسوبات مارنی) که بر روی سازندهای قدیمی تریا در امتداد مسیل‌ها نهشته شده‌اند (Berberian et al., 1992; Tchalenko et al., 1974; Khaksar and Tavassoli, 2002; Kamranzad et al., 2020; Talebian et al., 2016; Jafari et al., 2004; Saghavaz et al., 2017; Karimi et al., 2019; Ghassemi and Heydari, 2025).

زمین ساخت منطقه

رشته کوه البرز به عنوان یکی از فعال‌ترین کمرندهای کوهزایی قاره‌ای در قالب سیستم کوهزایی آلپ-همالیا شناخته می‌شود که حوضه خزر جنوبی را از فلات ایران مرکزی جدا می‌سازد (Berberian, 1976; De Martini et al., 1998; Ballato et al., 2011; Eshaghpour and Alizadeh Saloomahalleh, 2015; Talebian et al., 2016; Javadi et al., 2020; Shokri et al., 2020; Bina et al., 2020a). این ساختار قوسی شکل با طول ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر و عرض ۶۰ تا ۱۲۰ کیلومتر، بخش عمده‌ای از همگرایی و تقابل میان صفحات عربی-اوراسیا و بلوک صلب خزر جنوبی را جذب می‌کند (Jackson et al., 2002; Allen et al., 2003b; Berberian and Yeats, 2016; Kowsari and Ghassemi, 2021). معماری ساختاری البرز به صورت یک ساختار مرتفع دوطرفه (Double-verg-ing) یا قوسی شکل با مقطع V شکل توضیف شده که از شمال توسط سیستم گسلی رانده خزر و از جنوب به وسیله سامانه‌های گسلی مهمی نظیر مشا، شمال تهران و شمال قزوین محدود می‌گردد (Berberian, 1976; Jackson et al., 2002; Ritz et al., 2006, 2012; Solaymani Azad et al., 2011; Ballato et al., 2015; Ghassemi et al., 2014; Eshaghpour and Alizadeh Saloomahalleh, 2015; Berberian and Yeats, 2016; Naeimi et al., 2022).

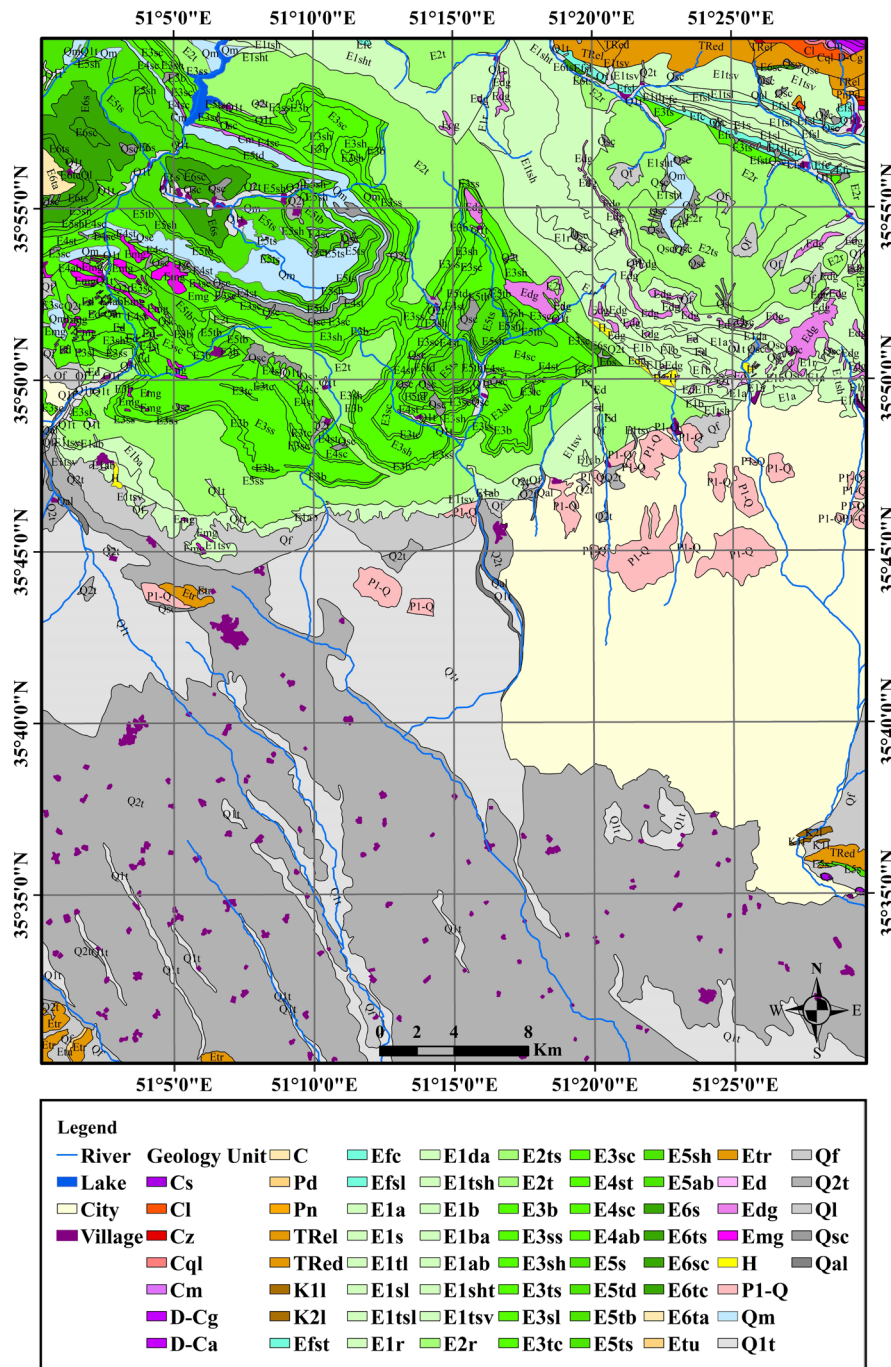
گرفت و متعاقباً توسط نهشته‌های قم، قرمز پائینی و بالایی و رسوبات مولاسی حوضه پیش‌بوم پوشیده شد (Berberian, 1976; Berberian and Tchalenko, 1976; Allen et al., 2003a; Guest et al., 2006a, 2006b; Ballato et al., 2011; Landgraf et al., 2009; Ghassemi and Heydari, 2025).

در منطقه مورد مطالعه، سیستم گسلی راندگی شمال تهران (NTF) مرز قاطعی میان ارتفاعات سخت شمالی و دشت رسوبی جنوبی ایجاد کرده است (Berberian et al., 1992; Tchalenko et al., 1974; Solaymani Azad et al., 2011; Talebian et al., 2016; Ahadnejad et al., 2019; Mohammadi Asl and Abbassi, 2016). پیکره اصلی ارتفاعات شمال تهران از توالی ائوسن سازند کرج تشکیل شده که شامل ۵ عضو و زیرواحدهای مربوطه است: ۱) عضو شیل پایینی (E1) با توف‌ها و روانه‌های داسیتی-بازالتی؛ ۲) عضو توف میانی (E2) با توف‌های کریستالی و لیتیک؛ ۳) عضو شیل آسارا (E3) و ۴) با رخساره‌های توریدایتی و هیالو کلاستیت؛ ۵) عضو توف بالایی (E5) با گدازه‌های پورفیری و توف برشی؛ و ۶) عضو شیل کندوان (E6) با توفیت‌های زرد رنگ. این توالی توسط توده‌های نفوذی ائوسن-الیگوسن شامل دایک‌های داسیتی (Ed)، میکرودیوریت/گرانودیوریت (Edg)، میکروگابرو/مونزونیت (Emg) و زون‌های دگرسانی هیدروترمال (H) تزریق شده است (Berberian et al., 1992; Tchalenko et al., 1974; Guest et al., 2006a, 2006b; Alaei et al., 2023; Ghassemi et al., 2014; Uromeihy and Nassiri, 2006; Berberian and Yeats, 2016; Bina et al., 2020a).

نهشته‌های سنوزوئیک پسین و کواترنری دشت و کوهپایه شهر تهران طبق طبقه‌بندی ریبین (Riebin, 1955) به چهار واحد اصلی تقسیم می‌شوند:

۱) واحد Q1-P (سازند هزاردره/واحد A) با سن پلیو-پلیستوسن پیشین، متشکل از کنگلومرای سخت، سیمان‌شده و چین‌خورده.

۲) واحد Q1t (سازند کهریزک/واحد B) با سن پلیستوسن میانی، شامل کنگلومرای قهوه‌ای با سیمان سست آهکی-گچی.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰

1997; Sheikholeslami, 2018; Seyed-Emami et al., 2020; Hessami, 2021; Naeimi et al., 2022; Rezaei et al., 2024). از اواخر کرتاسه و به ویژه در سنوزوئیک، تحت تأثیر همگرایی صفحات، رژیم زمین‌ساختی منطقه دستخوش تغییر شده و پدیده کلیدی زمین‌ساخت وارونگی (Inversion Tectonics) فعال گردید؛ طی این فرآیند، بسیاری از گسل‌های نرمال موروثی و قدیمی‌تر تحت تنش‌های انقباضی جدید فعال‌سازی مجدد شده و به صورت گسل‌های معکوس، رانده

تاریخچه تکاملی و دگرشکلی البرز مرکزی نشان‌دهنده یک توالی پیچیده و چندمرحله‌ای از فازهای کششی و فشارشی است. در تریاس پسین (فاز سیمین پیشین) و ژوراسیک میانی (فاز سیمین میانی)، همراه با حوضه کششی پشت‌کمانی ائوسن (دوره تشکیل سازند کرج)، فازهای گرابن‌سازی و کشش اولیه در منطقه رخ دادند (Axen et al., 2001; Zanchi et al., 2006; Guest et al., 2007; Landgraf et al., 2009; Davoudzadeh et al.,

حرکت پویای بلوک خزر جنوبی قرار دارد (Berberian, 1976; Ghodrati Amiri et al., 2003; Tavakoli et al., 2009; Ritz et al., 2012; Shirzad and Shomali, 2013; Rousta et al., 2018; Mohammadi Asl and Abbassi, 2019; Kamranzad et al., 2020; Bina et al., 2020b; Musavi et al., 2024; Solaymani Azad et al., 2024; Ghassemi and Heydari, 2025; Uromeihy and Nassiri, 2006). شواهد نوزمین‌ساختی بیانگر مهاجرت جبهه دگرشکلی فعال به سمت جنوب و درون دشت تهران است، به طوری که گسل‌های پنهان، تاقدیس‌های در حال رشد فعال (مانند پردیسان، چیتگر و برج میلاد) و ساختارهای رانده در زیر رسوبات آبرفتی دشت تهران در حال تکوین هستند (Nazari et al., 2011; Ritz et al., 2012; Talebian et al., 2016; Saghavaz et al., 2017; Saberi et al., 2017; Alaei et al., 2023; Ballato et al., 2015; Ghassemi and Heydari, 2025). تنش عهد حاضر در منطقه با بردار تنش فشاری بیشینه (σ_1) در راستای شمالی-جنوبی تا شمال‌شرق - جنوب‌غرب، می‌باشد که راندگی‌های مایل و شکستگی‌های کششی-برشی را در پوسته ایجاد کرده است.

از نظر فیزیوگرافی و ساختاری، منطقه تهران به چهار واحد اصلی طولی از شمال به جنوب تقسیم می‌شود (Tchalenko et al., 1974; Berberian, 1976). «البرز مرتفع» (High Alborz Domain) به عنوان مرز شمالی که از سنگ‌های چین‌خورده و گسل‌خورده پالئوزوئیک، مزوزوئیک و ترشیاری تشکیل شده و از سمت جنوب توسط گسل مشا بر روی چین‌های کناری رانده شده است (Berberian et al., 1992; Tchalenko et al., 1974; Jackson et al., 2002; Berberian and Yeats, 2016). دوم، «چین‌های کناری البرز» (Alborz Border Folds) که دامنه جنوبی را می‌سازند و عمدتاً از واحدهای آتشفشانی-آواری سبز رنگ سازند کرج (ائوسن) ساخته شده‌اند و توسط گسل شمال تهران بر روی گستره کوهپایه‌ای رانده شده‌اند (Tchalenko et al., 1974; Berberian et al., 1992). سوم، «گستره کوهپایه‌ای» (Pediment Zone) که شهر تهران روی آن بنا شده و با نهشته‌های ضخیم آبرفتی پلیوسن تا کواترنر (شامل واحدهای هزاردره، کهریزک،

و امتدادلغز معکوس ظاهر شدند (Axen et al., 2001; Zanchi et al., 2006; Landgraf et al., 2009; Ballato et al., 2011; Talebian et al., 2016; Saghavaz et al., 2017; Ehteshami-Moinabadi 2016, 2017; Torabi et al., 2018; Shokri et al., 2020; Hessami, 2021; Rezaeian et al., 2021).

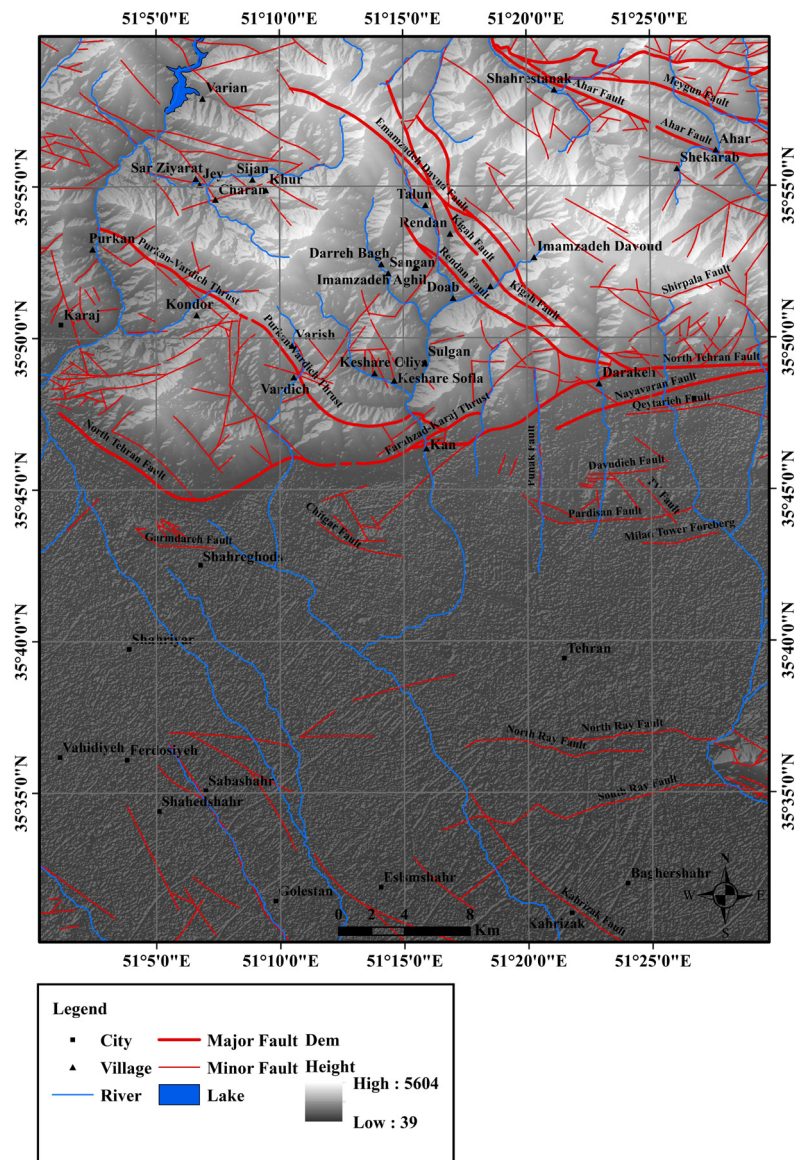
تحولات سینماتیکی دگرشکلی نشان می‌دهد که رژیم ترافشاری راست‌گرد اولیه در میوسن، جای خود را به رژیم ترافشاری/تراکشی چپ‌گرد در پلیوسن تا عهد حاضر داده است که با یک فاز تراکشی جوان‌تر با محور کشش شمال‌غرب-جنوب‌شرق در پلیستوسن میانی همراهی می‌شود (Axen et al., 2001; Zanchi et al., 2006; Guest et al., 2007; Landgraf et al., 2009; Ballato et al., 2011; Talebian et al., 2016; Saghavaz et al., 2017; Jaber et al., 2017; Shokri et al., 2020; Rezaeian et al., 2021). داده‌های ژئودتیک و مدرن (GPS) نیز این چارچوب را تأیید کرده و کوتاه‌شدگی شمالی-جنوبی با نرخ 2 ± 5 میلی‌متر در سال و مؤلفه برش چپ‌گرد با نرخ 2 ± 4 میلی‌متر در سال را در سراسر کمربند نشان می‌دهند (Nazari et al., 2010; Vasheghani Farahani et al., 2014; Saghavaz et al., 2017; Kamranzad et al., 2020; Mahmoudpour et al., 2016; Shojaeian et al., 2021; Babaei et al., 2024). این کوتاه‌شدگی مورب از طریق فرآیند تفکیک کرنش (Strain Partitioning) به مؤلفه‌های امتدادلغز و معکوس روی سیستم‌های گسلی موازی تفکیکی‌گردد (De Martini et al., 1998; Allen et al., 2003a,b; Ritz et al., 2006, 2012; Landgraf et al., 2009; Nazari et al., 2010; Solaymani Azad et al., 2011; Vasheghani Farahani et al., 2014; Ghassemi et al., 2014; Talebian et al., 2016; Berberian and Yeats, 2016; Saghavaz et al., 2017; Shokri et al., 2020; Kowsari and Ghassemi, 2021; Alaei et al., 2023; Mohammadi Nia et al., 2023; Babaei et al., 2024).

در مقیاس محلی، گستره کلان‌شهر تهران در یک زون گذار زمین‌ساختی فعال در دامنه جنوبی البرز مرکزی واقع شده است که تحت رژیم فشارشی-برشی (Transpressional) ناشی از همگرایی صفحات عربی-اوراسیا و

گسل‌ها منطقه

منطقه کلان‌شهر تهران و دامنه جنوبی البرز مرکزی به دلیل موقعیت ژئوتکتونیکی فعال، در محاصره شبکه پیچیده و متراکمی از گسل‌های لرزه‌زا و ساختارهای فعال قرار دارد که شناخت دقیق هندسه و کینماتیک آن‌ها برای ارزیابی خطر لرزه‌ای حیاتی است. توسعه لجام‌گسیخته بافت شهری در دهه‌های اخیر بسیاری از شواهد نوزمین‌ساختی سطح زمین را مدفون ساخته است؛ از این رو، یکی از نوآوری‌های کلیدی این پژوهش، تلفیق نقشه زمین‌شناسی پایه (مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰) سازمان زمین‌شناسی با تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دور (پردازش تصاویر لندست ۸ و

آبرفت تهران و رسوبات عهد حاضر با ضخامت بیش از یک کیلومتر) پوشیده شده است (Rieben, 1955; Berberian and Tchalenko, 1976; Khaksar and Tavassoli, 2002; Jafari et al., 2004; Mahmoudpour et al., 2013; Pirouzi and Eslami, 2017; Talebian et al., 2016; Saghavaz et al., 2017; Kamranzad et al., 2020; Solaymani Azad et al., 2024). چهارم، «آنتی‌البرز» (Anti-Alborz) در جنوب شرقی تهران که با رخنمون گسترده سنگ‌های کرتاسه، به عنوان یک مانع ساختاری در برابر پیشروی گوه البرز به سمت جنوب عمل کرده و باعث فشردگی و چین‌خوردگی شدید رسوبات آبرفتی دشت شده است (Tchalenko et al., 1974; Berberian et al., 1992).



شکل ۳. نقشه ساختاری و تدقیق شده گسل‌های منطقه مورد مطالعه، مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰

و زون گذار: بخش مرکزی منطقه است که بحرانی‌ترین زون دگرشکلی و مرز میان کوهستان سخت و دشت نرم را تشکیل می‌دهد. **راندگی پورکان-وردیچ** با روند (NW-SE) به عنوان یک پیشران بزرگ مقیاس، اعضای قدیمی سازند کرج را بر روی واحدهای جوان‌تر می‌راند. **راندگی فرحزاد-کرج (FKT)** با روند تقریبی شرقی-غربی موازی با گسل شمال تهران بوده و همراه با آن، یک پهنه دگرشکلی فلس‌مانند (Imbricate Zone) و بخشی از سیستم دوبلکس ترافشاری منطقه را شکل می‌دهد (Guest et al., 2006a). در این میان، **گسل شمال تهران (NTF)** به عنوان برجسته‌ترین، اصلی‌ترین و خطرناک‌ترین ساختار زمین‌ساختی در مجاورت پایتخت شناخته می‌شود که طول آن بین ۷۰ تا بیش از ۱۷۵ کیلومتر گزارش شده است (Tchalenko et al., 1974; Berberian and Tchalenko, 1976; Berberian et al., 1992; Jackson et al., 2002; Khaksar and Tavassoli, 2002; Allen et al., 2003a; Zanchi et al., 2006; Zahedi-Khameneh and Zare, 2007; Ritz et al., 2012; Shirzad and Shomali, 2013; Nasrabadi and Abbasi Maedeh, 2013; Ebadati and Hagi, 2014; Shakib et al., 2011; Berberian and Yeats, 2016; Kamranzad et al., 2020; Ghorbani, 2021; Kowsari and Ghasemi, 2021; Solaymani Azad et al., 2024; Ghassemi and Heydari, 2025). این گسل پوسته‌ای با شیب به سمت شمال، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن (سازند کرج) را بر روی نهشته‌های آبرفتی کواترنری دشت رانده و اختلاف ارتفاعی بیش از ۲۰۰۰ متر ایجاد کرده است (Tchalenko et al., 1974; Berberian and Tchalenko, 1976; Berberian et al., 1992; Jackson et al., 2002; Khaksar and Tavassoli, 2002; Allen et al., 2003a; Zanchi et al., 2006; Ritz et al., 2012; Shirzad and Shomali, 2013; Nasrabadi and Abbasi Maedeh, 2013; Ebadati and Hagi, 2014; Uromeihy and Nassiri, 2006; Nazari et al., 2011; Shakib et al., 2011; Arian and Bagha, 2012; Ghorbani, 2021; Solaymani Azad et al., 2024; Berberian and Yeats, 2016). سازوکار حرکتی گسل شمال تهران عمدتاً راندگی با مؤلفه امتدادلغز چپ‌گرد است که در بخش غربی راندگی خالص و در بخش شرقی

مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) و پایش نیمه‌اتوماتیک در محیط نرم افزار (ArcGIS 10.8.2) است که منجر به تهیه نقشه ساختاری و تدقیق‌شده‌ی جدید گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه (شکل شماره ۳) گردیده است. این نقشه تکمیلی، جایگزین نقشه‌های قبلی نبوده بلکه به عنوان یک متمم علمی دقیق عمل کرده و گسل‌های فرعی و شکستگی‌هایی را آشکار ساخته که پیش‌تر در مقیاس‌های منطقه‌ای ناشناخته مانده بودند.

بر اساس ویژگی‌های زمین‌ساختی، لیتولوژیکی و هندسی، سیستم گسلی منطقه مورد مطالعه در سه قلمرو ساختاری مجزا از شمال به جنوب دسته‌بندی و تحلیل می‌شود.

قلمرو نخست شامل گسل‌های البرز مرتفع:

(بخش شمالی منطقه) است که به عنوان زون‌های کوهستانی مرتفع شناخته می‌شوند. در این بخش، گسل‌های رانده و امتدادلغز مایل با روند عموماً شمال‌غرب-جنوب‌شرق و شرقی-غربی حکم‌فرمایی می‌کنند. **گسل میگون** با روند (WNW-ESE) به عنوان یک راندگی فشرده با شیب تند رو به شمال، ورقه‌های پالئوزوئیک را قطع می‌کند، در حالی که **گسل آهار** با روند (NW-SE) به عنوان یک گسل پیشانی در پهنه راندگی شمال‌شرق منطقه عمل نموده و ساختارهای تاقدیسی هسته کوهستان را دگرشکل می‌سازد (Tchalenko et al., 1974). **گسل امامزاده داوود** به عنوان یکی از بزرگ‌ترین گسل‌های بخش کوهستانی با روند (NW-SE) و مؤلفه راست‌گرد، مرز شرقی بلوک فشرده مرکزی را تشکیل داده (در ادامه بحث می‌گردد) و بلوک توچال را بالا رانده است. در امتداد آن، **گسل‌های کیگاه و رندان** به صورت موازی با گسل امامزاده داوود قرار دارند؛ به طوری که گسل رندان مرز غربی فراپوم (Pop-up) تالون-رندان را تشکیل داده و با شیب تند خود اختلاف ارتفاع شدیدی ایجاد می‌کند. همچنین **گسل شیرپلا** با روند تقریبی شرقی-غربی در ارتفاعات شمالی توچال و دره دارآباد-درکه واقع شده و به عنوان یک گسل ناهمخوان (anti-thetic) نرمال-راست‌گرد عمل می‌کند (Solaymani Azad et al., 2024).

قلمرو دوم شامل گسل‌های جبهه کوهستان



مایل لغز می‌باشد (Berberian and Tchalenko, 1976; Allen et al., 2003a; Guest et al., 2006a; Solaymani Azad et al., 2011; Arian and Bagha, 2012; Bagha et al., 2014; Nazari et al., 2011; Berberian and Yeats, 2016; Kamranzad et al., 2020; Kowsari and Ghase-mi, 2021). این گسل توانایی ایجاد زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۷.۲ تا ۷.۴ را دارد (Berberian et al., 1992; Nazari et al., 2011; Ritz et al., 2012; Mohammad-di Asl and Abbassi, 2019; Kowsari and Ghasemi, 2022; Zakian and Asadi Hayeh, 2021). همچنین انشعابات فرعی مهمی مانند **گسل نیاوران** با روند شرق، شمال‌شرق-غرب، جنوب غرب (به عنوان یک گسل امتداد لغز چپ‌گرد با جابجایی تجمعی بیش از ۵۰۰ متر)، **گسل قیظریه** با روند شرق، شمال‌شرق-غرب، جنوب غرب و **گسل شیر پلا** در این زون فعال هستند (Solaymani Azad et al., 2011; Ritz et al., 2012; Mohammad-di Asl and Abbassi, 2019).

روش‌شناسی تحقیق

چارچوب متدولوژیک این پژوهش بر پایه‌یک جریان کاری ترکیبی و چندمرحله‌ای (Hybrid Workflow) جهت بارزسازی، استخراج و پایش ناپیوستگی‌های زمین‌شناختی و شبکه خطواره‌های ساختاری در محدوده بر گره ۱:۱۰۰,۰۰۰ تهران طراحی شده است. مجموعه ابزار نرم‌افزاری مورد استفاده در این متدولوژی شامل: نرم افزار (ENVI 5.3) جهت پیش‌پردازش و اعمال الگوریتم‌های طیفی، نرم افزار (PCI Geomatica 2020) جهت استخراج اتوماتیک خطواره‌ها، نرم افزار (Arc- GIS 10.8.2) به همراه افزونه تخصصی (ArcBruTile) جهت مدیریت داده‌های مکانی، پالایش نیمه‌اتوماتیک و تحلیل‌های فضایی، نرم افزار (RockWorks 16) جهت تحلیل‌های آماری و ترسیم نمودارهای گل‌سرخ و نرم افزار (Google Earth Pro 7.3.3) جهت اعتبارسنجی چشمی و کنترل صحرائی می‌باشد.

داده پایه ماهواره‌ای شامل تصویر ماهواره ای ماهواره لندست ۸ می‌باشد که از پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) دریافت گردید. فرآیند آماده‌سازی و پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای با تصحیح رادیومتری (Radiometric Calibration) در محیط نرم‌افزار (ENVI) آغاز شد تا درجات خاکستری پیکسل‌ها (DN) به مقادیر واقعی تابش رادیومتری تبدیل شوند و قابلیت

مایل لغز می‌باشد (Berberian and Tchalenko, 1976; Allen et al., 2003a; Guest et al., 2006a; Solaymani Azad et al., 2011; Arian and Bagha, 2012; Bagha et al., 2014; Nazari et al., 2011; Berberian and Yeats, 2016; Kamranzad et al., 2020; Kowsari and Ghase-mi, 2021). این گسل توانایی ایجاد زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۷.۲ تا ۷.۴ را دارد (Berberian et al., 1992; Nazari et al., 2011; Ritz et al., 2012; Mohammad-di Asl and Abbassi, 2019; Kowsari and Ghasemi, 2022; Zakian and Asadi Hayeh, 2021). همچنین انشعابات فرعی مهمی مانند **گسل نیاوران** با روند شرق، شمال‌شرق-غرب، جنوب غرب (به عنوان یک گسل امتداد لغز چپ‌گرد با جابجایی تجمعی بیش از ۵۰۰ متر)، **گسل قیظریه** با روند شرق، شمال‌شرق-غرب، جنوب غرب و **گسل شیر پلا** در این زون فعال هستند (Solaymani Azad et al., 2011; Ritz et al., 2012; Mohammad-di Asl and Abbassi, 2019).

قلمرو سوم شامل گسل‌های دشت تهران و منطقه پیشبوم: بخش جنوبی منطقه است که نشان‌دهنده مهاجرت دگرشکلی به سمت درون دشت و زیر رسوبات آبرفتی می‌باشد (Talebian et al., 2016; Saberi et al., 2017; Alaei et al., 2023; Ballato et al., 2015). در این بخش، گسل‌های درون‌شهری و پنهان متعددی شناسایی شده‌اند؛ از جمله **گسل پونک** با سازوکار امتداد لغز مایل و روند شمالی-جنوبی (به عنوان گسل انتقال‌دهنده)، **گسل داوودیه** با سازوکار راندگی پنهان (Blind thrust) و روند شرقی-غربی، **گسل تلویزیون (TV Fault)** یک راندگی پنهان با روند شمال غربی-جنوب شرقی و شیب کم به سمت جنوب باختر و **گسل پردیسان** که با روند شرقی-غربی به عنوان یک راندگی فعال پنهان در زیر پارک پردیسان با نرخ لغزش حداقل ۱ میلی‌متر در سال شناخته می‌شود (Tchalenko et al., 1974; Berberian et al., 1992; Talebian et al., 2016; Kamranzad et al., 2020; Khorrami et al., 2019). ساختارهای دیگری نظیر **تاقدیس‌های در حال رشد برج میلاد**، **گسل چیتگر** و **گسل گرمدره** نیز در این پهنه دشت قرار دارند (Talebian et al., 2016; Sagha-

قطعه خط ($ATHR = 30$) و حداکثر فاصله مجاز برای اتصال بردارها ($DTHR = 20$)؛ خروجی این مرحله به فرمت برداری (Shapefile) ذخیره گردید.

در گام بعد که مرحله پایش و اصلاح نیمه‌اتوماتیک است، فایل برداری استخراج شده به محیط نرم افزار (ArcGIS 10.8.2) منتقل شد. از آنجا که الگوریتم‌های اتوماتیک قادر به تمایز میان عوارض زمین‌شناختی واقعی و خطاهای عوارض ساختگی دست بشر نیستند، با استفاده از افزونه تخصصی (ArcBruTile)، تلفیق با تصاویر با وضوح بالای (Google Earth Pro) و مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، تمام نویزهای غیرزمین‌شناختی نظیر جاده‌ها، اتوبان‌ها، خطوط راه آهن، خطوط انتقال نیرو (دکل‌های برق)، کانال‌های آبیاری، مرز مزارع کشاورزی و شبکه آبراه‌های طبیعی به طور کامل شناسایی و حذف گردیدند. همچنین لایه‌های گسل‌های تدقیق شده و شکستگی‌های رقومی شده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ با لایه خطواره‌های اصلاح شده یکپارچه‌سازی شدند و لایه شکستگی‌های نهایی منطقه تهیه گردید.

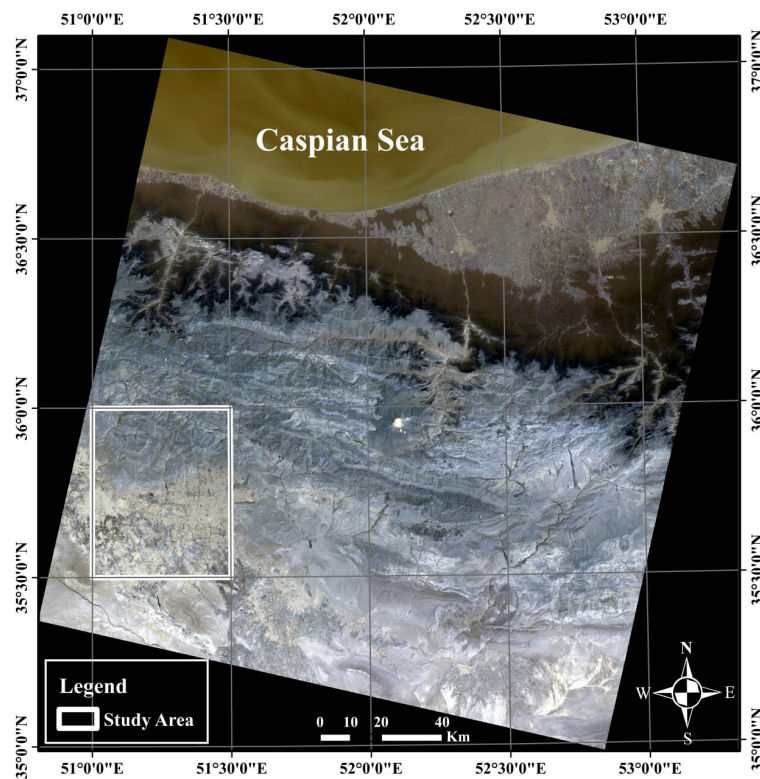
جهت آماده‌سازی هندسی لایه شکستگی‌های نهایی منطقه برای تحلیل‌های آماری و ترسیم نمودارهای گل‌سرخ، در محیط نرم افزار (ArcGIS 10.8.2) خطوط چندنقطه‌ای (Polyline) با استفاده از ابزار Split (Line at Vertices) به قطعات دو نقطه‌ای (تنها دارای نقطه شروع و پایان) تبدیل شدند. سپس در جدول اطلاعات توصیفی لایه، چهار فیلد جدید با فرمت (Double) تعریف شده و با اجرای ابزار (Calculate Geometry)، مختصات دقیق نقاط ابتدا و انتها ($X1, Y1, X2, Y2$) در سیستم مختصات متریک (UTM) محاسبه گردید. در نهایت، فایل توصیفی لایه اصلاح شده با فرمت (DXF) به نرم‌افزار (RockWorks 16) منتقل گردید و با استفاده از ماژول (Linears) و ابزار (Rose Diagram)، تحلیل امتداد غالب، جهت‌یافتگی و پراکندگی آماری خطواره‌های ساختاری منطقه انجام پذیرفت.

مطالعات سنجش از دور

نقشه‌برداری و تحلیل خطواره‌های زمین‌ساختی به عنوان یکی از ابزارهای بنیادین و کلیدی در اکتشافات معدنی،

بارزسازی عوارض خطی افزایش یابد. متعاقباً جهت حذف اثرات جذب و پخش اتمسفری، تصحیح اتمسفری با استفاده از الگوریتم (QUAC) (Quick At-mospheric Correction) بر روی تصاویر اعمال گردید. برای بهبود قدرت تفکیک مکانی باندهای چندطیفی (از ۳۰ متر به ۱۵ متر) و ارتقای توان شناساگری خطواره‌های مورفولوژیک کم‌وسعت، تکنیک ادغام تصاویر (Image Fusion/Pan-sharpening) به روش (Gram-Schmidt) با ترکیب باندهای چندطیفی تصحیح شده و باند پانکروماتیک (باند ۸ با رزولوشن ۱۵ متر) و با الگوریتم باز نمونه برداری (Bilinear) اجرا گردید. به منظور کاهش همبستگی طیفی، حذف اطلاعات اضافی و متمرکز ساختن بیشترین واریانس تصویر در مولفه‌های نخست، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) (Principal Component Analysis) بر روی داده‌ها پیاده‌سازی شد. خروجی این فرآیند نشان داد که مؤلفه اصلی اول ($PC1$) به تنهایی حاوی بیش از ۹۰ درصد از کل اطلاعات و واریانس تصویر بوده و بارزسازی فوق‌العاده‌ای از عوارض توپوگرافی، کنتراست لبه‌ها و روشنایی عوارض خطی ارائه می‌دهد؛ از این رو ($PC1$) به عنوان تصویر ورودی اصلی برای فرآیند استخراج خطواره‌ها انتخاب گردید.

فرآیند استخراج خطواره‌ها بر پایه دو رویکرد **دستی** (تفسیر چشمی و رقومی‌سازی روی صفحه توسط کارشناس) و **اتوماتیک** (استفاده از ماژول (LINE)) در نرم‌افزار (PCI Geomatica 2020) انجام پذیرفت. الگوریتم اتوماتیک (LINE) در سه گام اصلی شامل تشخیص لبه‌ها با الگوریتم (Canny)، آستانه‌گذاری تصویر لبه به تصویر باینری (Thresholding) و استخراج منحنی‌ها و تبدیل پیکسل‌ها به بردار (Curve Ex-traction) عمل می‌کند. جهت دستیابی به بهینه‌ترین شبکه خطواره‌های واقعی و کنترل دقیق هندسه خطوط، پارامترهای شش گانه ماژول (LINE) پس از آزمون‌های متعدد به این شرح تنظیم شدند: شعاع فیلتر هموارسازی لبه ($RADI = 10$)، آستانه گرادین لبه ($GTHR = 50$)، حداقل طول منحنی بر حسب پیکسل ($LTHR = 30$)، حداکثر خطای مجاز در برازش خط ($FTHR = 3$)، حداکثر اختلاف زاویه برای اتصال دو



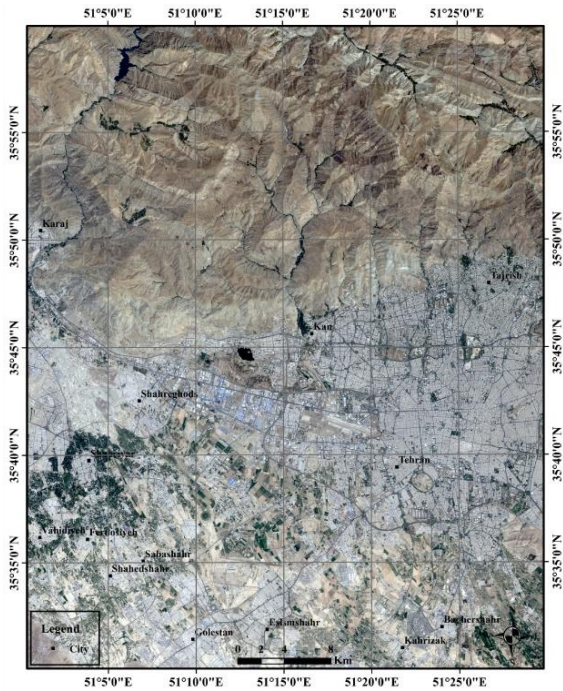
شکل ۴. تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و موقعیت محدوده مورد مطالعه

برای تحلیل‌های زمین‌فضایی و آماری استفاده شده است (Jira et al., 2023; Errami et al., 2023a; Fotze et al., 2019; Es-Sabbar et al., 2020).

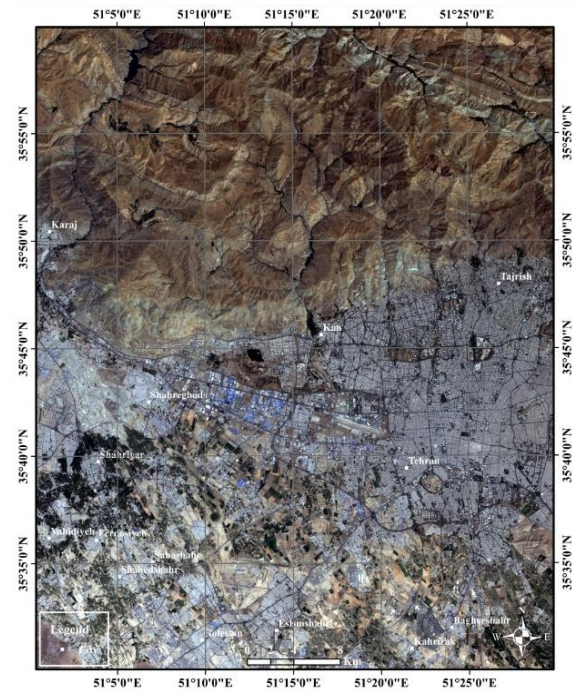
برای استخراج دقیق خطواره‌های منطقه، از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ (Landsat 8 OLI/TIRS) (شکل شماره ۴) استفاده شد که به دلیل قدرت تفکیک رادیومتریکی بالا و قابلیت ارتقای تفکیک مکانی به ۱۵ متر انتخاب گردید. این تصویر ماهواره‌ای مربوط به گذر ۱۶۴ و ردیف ۳۵، تاریخ اخذ تصویر ۱۱ آگوست ۲۰۲۳، سیستم مختصات UTM، زون ۳۹ شمالی، بیضوی مرجع WGS84 است که از پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) دریافت گردید. ماهواره لندست ۸ مجهز به دو سنجنده (OLI) مبتنی بر مشاهدات زمینی و (TIRS) حرارتی است که مجموعاً ۱۱ باند طیفی را پوشش می‌دهند؛ باندهای ۱ تا ۷ و ۹ با تفکیک مکانی ۳۰ متری (باند ۷ با رزولوشن ۶۰ متری)، باند ۸ پانکروماتیک با تفکیک مکانی ۱۵ متری، و باندهای ۱۰ و ۱۱ حرارتی با تفکیک مکانی ۱۰۰ متری طراحی شده‌اند.

پیش از انجام هرگونه تحلیل ساختاری، اعمال

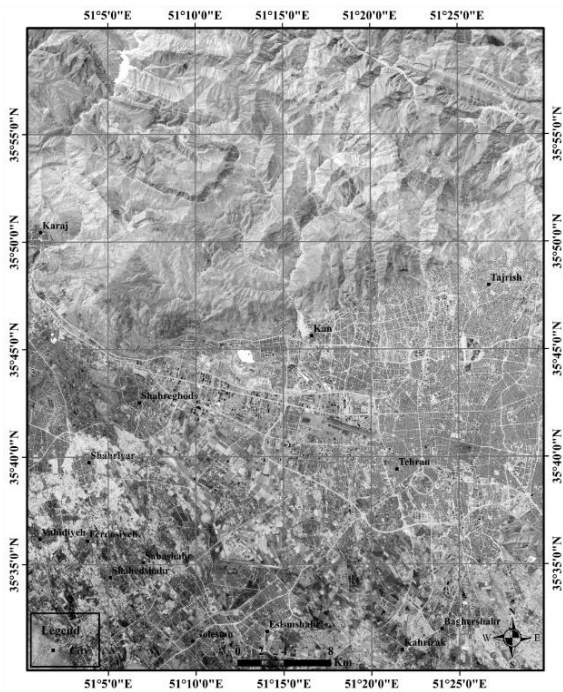
ارزیابی‌های نوزمین‌ساختی، مطالعات ژئومورفولوژی و اکتشاف آب‌های زیرزمینی در سازندهای سخت شناخته می‌شود (Diab et al., 2022; Pires et al., 2021; Mathew and Ariffin, 2018). با پیشرفت فناوری سنجش از دور، تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع، دسترسی رایگان و آرشیو زمانی غنی، به یکی از منابع داده‌ای اصلی در مطالعات زمین‌ساختی تبدیل شده‌اند (Saidi et al., 2020; Andarawus et al., 2023; Jira et al., 2023). روش‌های سنتی استخراج خطواره‌ها که بر پایه تفسیر بصری و دستی استوار بودند، اگرچه به دانش و تجربه کارشناس وابسته‌اند، اما زمان‌بر و تا حدی ذهنی می‌باشند (Han et al., 2018; Hung et al., 2005; Adiri et al., 2017; Rahnama and Gloaguen, 2014). در مقابل، رویکردهای نوین اتوماتیک و نیمه‌اتوماتیک با هدف افزایش سرعت، دقت و تکرارپذیری طراحی شده‌اند (Sedrette and Rebaï, 2016; Thannoun, 2013; Han et al., 2018). در این پژوهش، از یک چارچوب نرم‌افزاری یکپارچه شامل نرم افزار (ENVI 5.3) برای پیش‌پردازش و بهبود تصاویر، نرم افزار (PCI Geomatics 2020) برای استخراج اتوماتیک خطواره‌ها و نرم افزارهای (ArcGIS 10.8.2) به همراه (RockWorks 16)



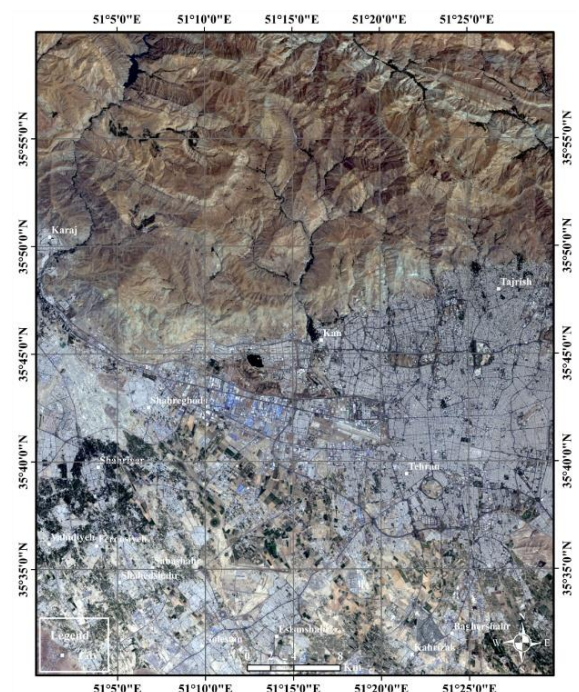
شکل ۷. افزایش قدرت تفکیک مکانی بر روی تصویر ماهواره ای منطقه



شکل ۵. انجام تصحیحات رادیومتریک بر تصویر ماهواره ای منطقه

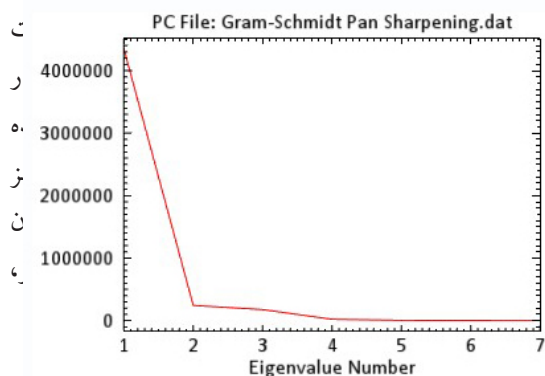


شکل ۸. بارزسازی تصویر با تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی تصویر ماهواره ای منطقه



شکل ۶. انجام تصحیحات اتمسفری بر تصویر ماهواره ای منطقه

گردید (Ahmadi and Pekkan, 2021; Khedr et al., 2016; Takodjou Wambo et al., 2022). استفاده از این مؤلفه که بیشترین اطلاعات را در خود جای داده، به بارزسازی بهتر عوارض خطی، مانند خطواره‌های زمین ساختی کمک شایانی می‌کند. خروجی این فرآیند، یک فایل تصویری چند بانده (شکل شماره ۸) و



شکل ۹. خروجی ابزار (PCA) به صورت نمودار

استخراج خطواره‌ها

استخراج دستی خطواره‌ها

استخراج دستی خطواره‌ها مبتنی بر تفسیر بصری تصاویر بهبود یافته و رقوم سازی روی صفحه توسط اپراتور متخصص برای شناسایی دره‌های خطی، پرتگاه‌ها و جابجایی رودخانه‌ها است (Adiri et al., 2017; Mathew and Ariffin, 2018; Hung et al., 2005; Koçal, 2004; Okeke et al., 2019; Onibudo et al., 2022; Rahnama and Gloaguen, 2014; Riahi et al., 2023; Šilhavý et al., 2016; Whittle et al., 1983). نقشه‌های حاصل از این روش غالباً به عنوان داده مرجع واقعیت زمینی (Ground Truth) برای اعتبارسنجی روش‌های اتوماتیک به کار می‌روند.

استخراج اتوماتیک خطواره‌ها

در این روش با استفاده از فایل (PC1) (که در مرحله قبلی تهیه گردید) و مازول تخصصی (LINE) در نرم افزار (PCI Geomatica 2020) انجام گرفت (شکل شماره ۱۰) که شامل مراحل تشخیص لبه (Canny

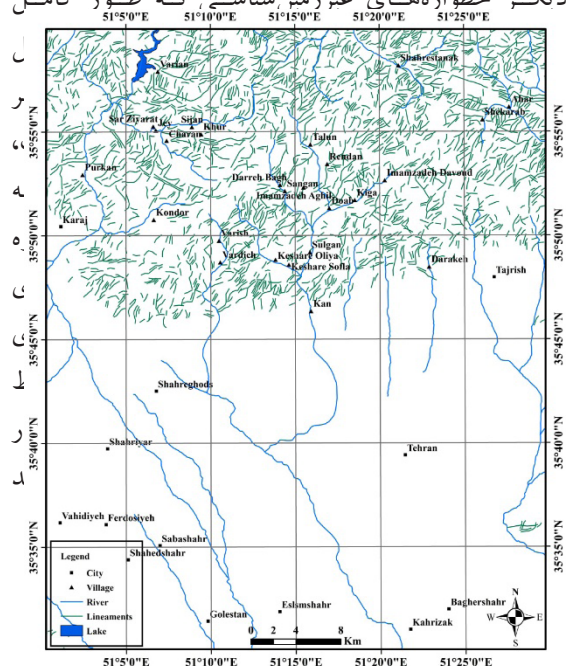
تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری بر روی داده‌های خام لندست ۸ امری ضروری است تا خطاهای ناشی از سنسور و اثرات جوی اصلاح گردند (Farahbakhsh et al., 2022; Benaissi et al., 2020; Saidi et al., 2019; al., 2022). در گام نخست، تصحیحات رادیومتریک با استفاده از ابزار (Radiometric Calibration) در نرم افزار (ENVI) انجام گرفت (شکل شماره ۵) تا مقادیر درجات خاکستری (DN) هر پیکسل اصلاح شده و به مقادیر واقعی نزدیک تر شوند؛ امری که برای شناسایی تغییرات (DN) در خطواره‌های ساختاری حیاتی است (Farahbakhsh et al., 2019; Saidi et al., 2020; Benaissi et al., 2022). سپس تصحیح اتمسفری با استفاده از ابزار (QUAC) (Quick Atmospheric Correction) به منظور کاهش تأثیرات کلی جو بر روی تصویر اعمال گردید (شکل شماره ۶) که با وجود سادگی، نتایج بسیار نزدیک به روش‌های پیچیده تر مانند (FLAASH) ارائه می‌دهد (Errami et al., 2023b; Jira et al., 2023; Al, 2017; Hseinat et al., 2020; Adiri et al., 2017).

برای ارتقای قدرت تفکیک مکانی تصاویر و آشکارسازی بهتر جزئیات ساختاری، از تکنیک تلفیق تصاویر (Image Fusion) و ابزار (Pan-sharpening) مبتنی بر الگوریتم (Gram-Schmidt) استفاده شد (Adiri et al., 2017; Es-Sabbar et al., 2020; Onibudo et al., 2022; Tchato et al., 2021; Zhao et al., 2023). در این فرآیند، باندهای چندطیفی با رزولوشن ۳۰ متر با باند پانکروماتیک (باند ۸) با تفکیک مکانی ۱۵ متر ترکیب شدند (شکل شماره ۷) تا با استفاده از روش نمونه برداری مجدد (Bilinear)، جزئیات خطی و لبه‌های زمین شناختی با وضوح بسیار بالاتری نمایان گردند. جهت کاهش افزونگی داده‌ها بین باندهای مختلف لندست و فشردن سازی اطلاعات، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) (Principal Component Analysis) روی تصویر اعمال شد (Abdelouhed et al., 2021; Ahmadi et al., 2023; Githenya et al., 2019; Riahi et al., 2023; Shandini et al., 2020).

مؤلفه اصلی اول (PC1) که بیش از ۹۰ درصد از واریانس و اطلاعات تصویر (مربوط به توپوگرافی و روشنایی) را در خود جای داده است، به عنوان ورودی بهینه برای بارزسازی عوارض خطی و رقوم سازی دستی انتخاب

استخراج نیمه‌اتوماتیک و تصحیح خطواره‌ها

خطواره‌های استخراج شده به روش اتوماتیک به محیط نرم افزار (ArcGIS 10.8.2) منتقل شدند (Abdelouhed et al., 2021; Thannoun, 2013). چون الگوریتم‌ها قادر به تمایز خطواره‌های ساختاری از عوارض خطی مصنوعی نیستند، با استفاده از افزونه تخصصی (Arc-BruTile)، تصاویر (Google Earth Pro) و نقشه‌های زمین‌شناسی، فرآیند اصلاح و فیلترینگ عوارض انسانی (جاده‌ها، بزرگراه‌ها، خطوط آهن، کانال‌های آبیاری، مرز مزارع کشاورزی و دکل‌های برق) به صورت نیمه اتوماتیک انجام گرفت (Adiri et al., 2017; Abdelouhed et al., 2021; Ahmadi et al., 2023; Diab et al., 2022; Githenya et al., 2019; Redouane et al., 2022; Shandini et al., 2020; Tchato et al., 2021). به عبارت دیگر خطواره‌های غیر زمین‌شناسی به طور کامل



شکل ۱۱. نقشه نهایی و اصلاح شده خطواره‌های منطقه مورد مطالعه

اعتبارسنجی کمی و ارزیابی صحت استخراج خطواره‌ها

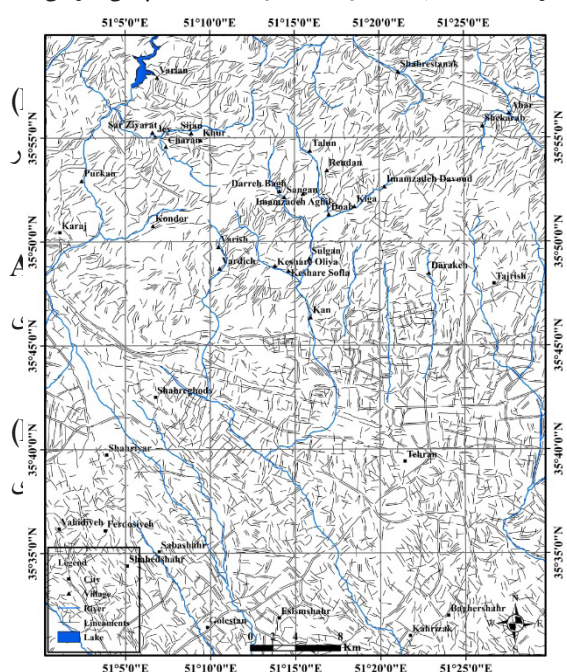
به منظور اعتبارسنجی کمی خطواره‌های استخراج شده به روش خودکار نسبت به داده‌های مرجع (تفسیر

Edge Detection)، آستانه گذاری تصویر شدت لبه به تصویر باینری (Thresholding) و استخراج منحنی‌ها و برداری سازی (Curve Extraction) است (Abdullah et al., 2010, 2013; Adiri et al., 2017; Ahmadi and Pekkan, 2021; Benaissi et al., 2022; Koçal, 2004; Said et al., 2022; Sedrette and Rebaï, 2016; Shandini et al., 2020; Tchato et al., 2021; Thannoun, 2013). تنظیم دقیق پارامترهای شش گانه الگوریتم (LINE) پس از آزمون‌های متعدد به این شرح انجام شد:

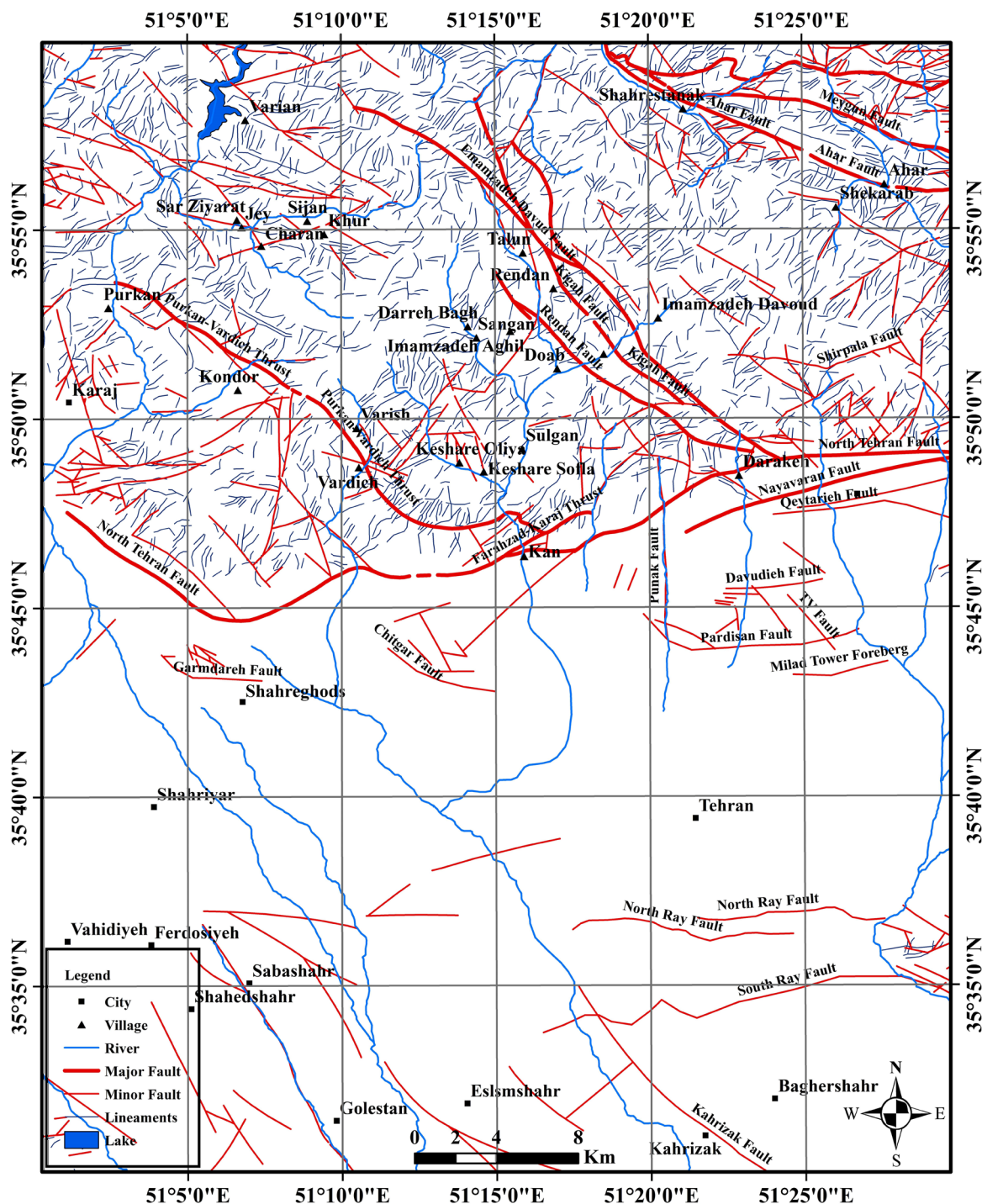
۱- RAD (Filter Radius) شعاع فیلتر برای هموارسازی و تشخیص لبه؛ مقدار پیش فرض ۱۰ حفظ شد.

۲- GTHR (Edge Gradient Threshold) آستانه گرادیان لبه برای ایجاد تصویر باینری (بین ۰ تا ۲۵۵)؛ برای نمایش بهتر از مقدار ۱۰۰ به ۵۰ کاهش داده شد.

۳- LT (Curve Length Threshold) حداقل طول منحنی (بر حسب پیکسل) برای در نظر گرفته شدن به عنوان خطواره؛ مقدار پیش فرض ۳۰



شکل ۱۰. نقشه خطواره‌های استخراج شده به روش خودکار



شکل ۱۲. نقشه ساختاری گسل‌های تدقیق شده و شبکه شکستگی‌های نهایی در منطقه مورد مطالعه

دور ساختاری نظیر (Koçal, 2004; Hung et al., 2005) اشاره شده است، نرخ انطباق ۴۰ تا ۶۰ درصدی برای استخراج خودکار در پهنه‌های کوهستانی و ناهموار، معرف دقت و قابلیت اتکای بالای الگوریتم در شناسایی روندهای زمین ساختی واقعی است. از سوی دیگر، بخش باقیمانده شکستگی‌ها که در داده‌های مبنای وجود نداشتند، ناشی از خطا یا نویز نبوده (زیرا نویزهای

دستی و گسل‌های اثبات شده زمین‌شناسی)، یک ارزیابی مکانی بر مبنای حریم مجاورت (Buffer) ۱۰۰ متری پیرامون داده‌های مرجع صورت پذیرفت (منطبق بر متدولوژی (Koçal, 2004). نتایج نشان داد که ۳,۸۴۹ سگمنت (یا شکستگی) از مجموع ۷,۷۳۷ سگمنت (معادل ۴۹,۷۵٪) انطباق مکانی کاملی با ساختارهای مرجع دارند. همان‌گونه که در مطالعات سنجش از

(۳۷۱.۵۵ متر) در محدوده برگه ۱:۱۰۰,۰۰۰ تهران، حاکمیت ساختاری دو روند اصلی و فرعی متقاطع را نشان می‌دهد (شکل شماره ۱۳). حداقل و حداکثر طول قطعات به ترتیب ۰.۰۰۱ و ۲.۹۳ کیلومتر است. روند غالب دارای راستای شرق-شمال شرق به غرب-جنوب غرب (ENE-WSW) و میانگین برداری ۶۱.۳ درجه (با راستای متقابل ۲۴۱.۳۳ درجه) است که بیشترین فراوانی تعدادی و بیشترین طول تجمعی را به خود اختصاص داده است. مقدار شاخص طول بردار میانگین (R-mag) معادل ۰.۲۱ با بازه اطمینان ۴.۲ درجه (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) محاسبه گردید. اگرچه مقدار عددی $R=0.21$ به دلیل ماهیت دوامدی (Bimodal) توزیع داده‌ها (حضور هم‌زمان دو سیستم ساختاری) از نظر آماری در طیف متوسط قرار دارد، اما اجرای **آزمون یکنواختی ریلی (Rayleigh Test)** با آماره $Z \approx 341.2$ و سطح معنی‌داری $p < 0.0001$ ، فرض تصادفی بودن توزیع امتدادها را با قطعیت کامل رد کرده و مؤید تمرکز ساختاری کاملاً معنی‌دار و غیرتصادفی خطواره‌ها حول روندهای ساختاری منطقه است.

تحلیل تأثیر لیتولوژی بر تراکم شکستگی‌ها

بر این اساس، و ارزیابی میزان فراوانی شکستگی‌های استخراج شده در واحد‌های مختلف زمین‌شناسی منطقه، واحدهای زمین‌شناسی منطقه از نظر درجه خردشدگی و تراکم شکستگی‌ها به هفت رده اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

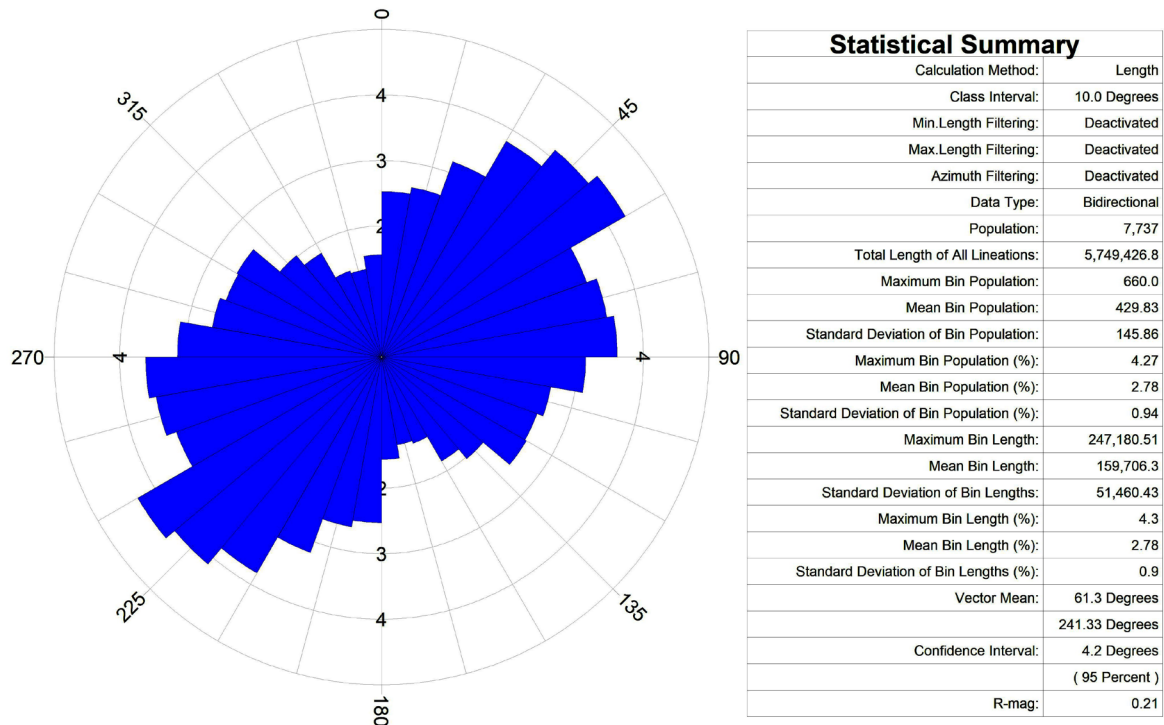
رده ۱: توالی‌های آتشفشانی - رسوبی سازند کرج، واحدهای انوسن شامل (E1a, E1b, E1sl, E1sh, E1sht, E1tsv, E2r, E2ts, E2t, E3b, E3ss, E3sh, E3ts, E3sl, E3tc, E4sc, E4st, E5s, E5td, E5tb, E5ts, E5sh, E6s, E6ts, E6sc, E6tc) این توالی‌ها که عمدتاً شامل توف‌های سبز لایه‌بندی‌شده، توف‌های ماسه‌سنگی، شیل‌های توفی و گدازه‌های بازالتی-آندزیتی هستند، بیشترین میزان تراکم شکستگی‌ها را در کل منطقه نشان می‌دهند. صلیبیت بسیار بالا، چسبندگی قوی دانه‌ها

انسان‌ساخت پیش‌تر در مرحله پالایش بصری به‌طور کامل حذف شدند)، بلکه نمایانگر شکستگی‌های فرعی، درزه‌های متراکم مویین در توف‌های شکننده سازند کرج و زون‌های آسیب‌دیده اطراف راندگی‌ها هستند که به دلیل محدودیت‌های چشمی در نقشه‌برداری‌های پیشین ثبت نشده بودند و استخراج رقومی حاضر موفق به بارزسازی آن‌ها گردیده است. در نهایت با ابزارهای توپولوژی نظیر (Split Line at Vertices) و (Calculate Geometry)، مختصات شروع و پایان شکستگی‌های استخراج‌شده ($X1, Y1, X2, Y2$) محاسبه گردید تا آماده تحلیل‌های آماری در محیط نرم افزار (RockWorks 16) شوند. پردازش، مدل‌سازی فضایی و تحلیل ساختاری شبکه شکستگی‌های نهایی منطقه مورد مطالعه، پس از مرحله اصلاح و حذف کامل نویزهای غیرزمین‌ساختی انسانی و هیدروگرافی، در محیط نرم‌افزارهای (ArcGIS 10.8.2)، (RockWorks 16) و (PCI Geomatica 2020) مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. به منظور اصلاح هندسی شکستگی‌های استخراج‌شده خودکار و نیمه‌خودکار و امکان محاسبه دقیق پارامترهای آماری و هندسی، ابتدا عوارض خطی چندنقطه‌ای با بکارگیری ابزار (Split Line at Vertices) به قطعات دو نقطه‌ای مجزا (دارای مختصات مبدأ و مقصد مشخص $X1, Y1, X2, Y2$) تبدیل شدند و سپس پارامترهای هندسی طول و راستا با استفاده از دستور (Calculate Geometry) استخراج و در جدول اطلاعات توصیفی ثبت گردیدند. این پایگاه داده متنی و برداری، مبنای اصلی تحلیل‌های کینماتیکی، ترسیم نمودارهای گل‌سرخ و پهنه‌بندی‌های آماری - فضایی قرار گرفت تا رژیم تنش حاکم بر زون گذار البرز جنوبی - دشت تهران بازسازی شود.

نتایج

تحلیل آماری شکستگی‌ها

تحلیل آماری و کینماتیکی جامعه آماری مشتمل بر ۷,۷۳۷ سگمنت شکستگی معتبر (قطعات خطی دو نقطه‌ای حاصل از ابزار Split Line at Vertices) با مجموع طول ۲,۸۷۴.۷۱ کیلومتر و میانگین طول ۰.۳۷ کیلومتر



شکل ۱۲. نقشه ساختاری گسل‌های تدقیق‌شده و شبکه شکستگی‌های نهایی در منطقه مورد مطالعه

کرده‌اند.

رده ۳: سنگ‌های آذرین درونی ائوسن شامل واحد‌های (Ed, Edg) توده‌های نفوذی گرانیتی و دیوریتی ائوسن که در بخش‌های محدودی از ارتفاعات البرز تزریق شده‌اند، به دلیل بافت تمام‌بلورین و یکنواخت خود، مقاومت ژئومکانیکی فوق‌العاده بالایی دارند. این توده‌ها اگرچه تحت تنش‌های ساختاری دچار شبکه‌های درزه‌ای منظم (مقاطع) شده‌اند و تراکم خطواره‌ای بالایی را نشان می‌دهند، اما به دلیل وسعت جغرافیایی محدودتر نسبت به سازند کرج، در رتبه سوم تراکم قرار می‌گیرند.

رده ۴: رسوبات و سنگ‌های رسوبی تخریبی و کربنات‌های قدیمی شامل واحد‌های (D-Ca, Cg) کنگلومراها، ماسه‌سنگ‌ها و کربنات‌های اواخر پالئوزوئیک (سازند جیروود) به دلیل داشتن سیمان سخت و لایه‌بندی ضخیم، مقاومت متوسط تا بالایی در برابر شکستگی دارند. تراکم خطواره‌ها در این واحدها متوسط ارزیابی می‌شود که عمدتاً شامل شکستگی‌های کششی بزرگ مقیاس ناشی از چین‌خوردگی‌های منطقه است.

و ماهیت کاملاً ترد توف‌ها در کنار قرارگیری این واحدها در زون پیرانرژی ته‌نشینی البرز جنوبی و در مجاورت گسل‌های راندگی بزرگی چون گسل شمال تهران و راندگی پورکان-وردیچ، سبب شده است که این واحدها مستعدترین سنگ‌ها برای پذیرش شکستگی‌های کششی و برشی فرعی باشند. حتی بخش‌های شیلی سازند کرج (مانند E1sh و E3sh) به دلیل محتوای سیلیسی بالا، رفتار نسبتاً شکننده‌ای از خود نشان داده‌اند.

رده ۲: کربنات‌های تریاس و کرتاسه شامل واحد‌های (TRel, TRed, K1l, K2l) سنگ‌آهک‌های اریتولین‌دار کرتاسه و دولومیت‌های سازند الیکا (تریاس) که در بخش‌های شمالی و مرتفع منطقه برون‌زد دارند، در رتبه دوم از نظر تراکم شکستگی‌ها قرار می‌گیرند. این سنگ‌های کربناته به دلیل تبلور مجدد و صلیبیت ساختاری بالا، در برابر استرس‌های زمین‌ساختی به شدت مستعد درزه‌داری (Jointing) و گسلش ریز هستند. شکستگی‌های فرعی در این واحدها به دلیل انحلال کربنات‌ها تحت تأثیر آب‌های فرورو، گاه تعریض شده و شبکه‌های فرعی خطواره‌ای بارزی را در تصاویر ماهواره‌ای ایجاد

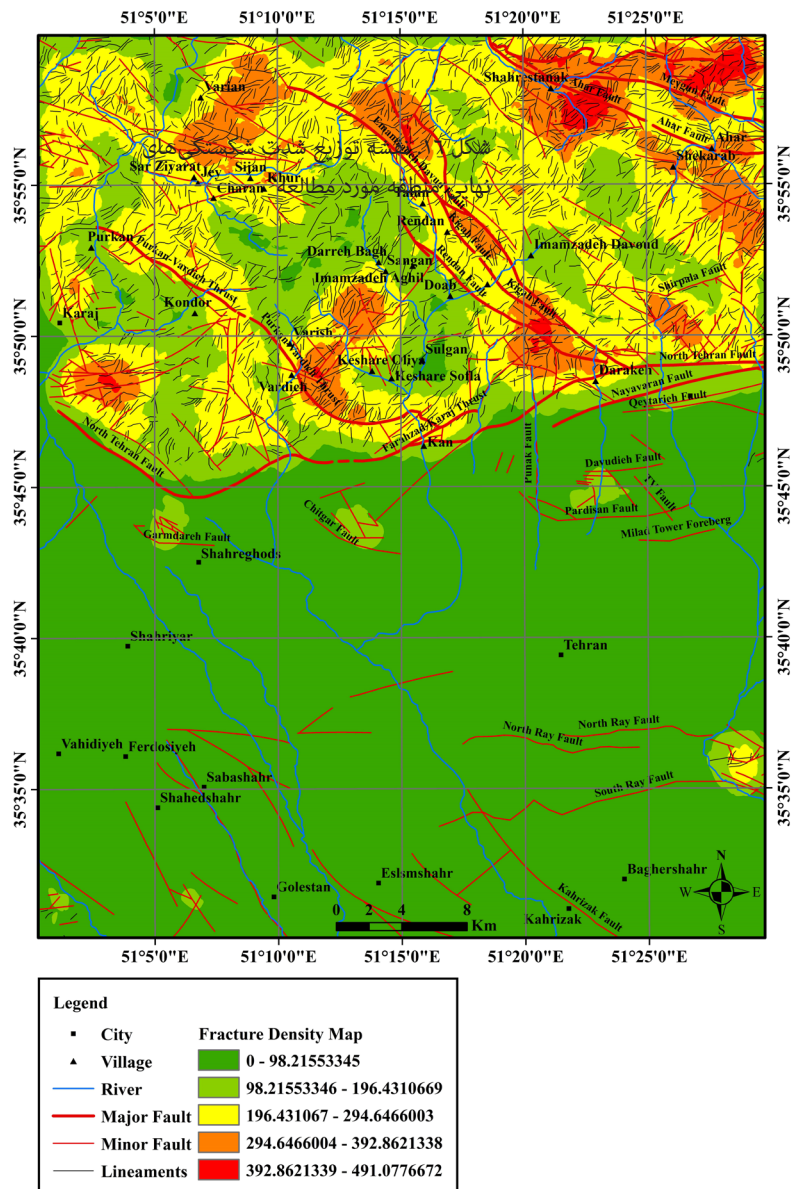
شکل ۱۴. نقشه توزیع شبکه شکستگی های نهایی بر روی واحد های زمین شناسی منطقه

که جریان‌های رودخانه‌ای جوان را تحت تأثیر قرار داده است.

تحلیل مکانی شکستگی‌ها

تحلیل‌های فضایی صورت گرفته با ابزار تراکم خطی (Line Density) از افزونه (Spatial Analyst) در نرم‌افزار (ArcGIS 10.8.2) انجام پذیرفت. جهت تهیه نقشه تراکم شکستگی (Fracture Density Map) با واحد (تعداد شکستگی در کیلومتر مربع) و نقشه شدت شکستگی (Fracture Intensity Map) با واحد مجموع طول در واحد سطح (km^2/km یا km^{-1})، شبکه رستری با اندازه سلول (Cell Size) ۱۵ متر (منطبق بر قدرت تفکیک مکانی تصویر ماهواره‌ای) و شعاع جستجوی

رده ۷: مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات آبرفتی جوان کواترنری شامل واحد‌های ($Q1t$) رسوبات آبرفتی دشت تهران، شهریار، اسلام‌شهر و باقرشهر کمترین میزان تراکم شکستگی‌ها و خطواره‌ها را نشان می‌دهند. این آبرفت‌های غیرمنسجم کواترنری به دلیل ماهیت سست و رفتار مکانیکی نرم و شکل‌پذیر، توانایی حفظ شکستگی‌های ریز ساختاری را در سطح ندارند. تراکم خطواره‌ها در این بخش نزدیک به صفر است و تنها گسل‌های کلان و پویای منطقه (مانند گسل کهریزک یا گسل‌های ری شمال و جنوب) قادر به بریدن این واحدها و ایجاد گسله‌های سطحی بوده‌اند



شکل ۱۵. نقشه توزیع تراکم شکستگی‌های نهایی منطقه مورد مطالعه



دارد؛ به‌طوری‌که مقادیر اوج شدت (بازه ۰.۰۰۳۵ تا ۰.۰۰۴۴)، معادل ۳.۵ تا ۴.۴ کیلومتر طول خطواره در هر کیلومترمربع) در ارتفاعات شمال تهران و حریم مستقیم گسل‌های اصلی شمال تهران، امامزاده داوود، کیگانه و رندان متمرکز شده است. این تقاطع و هم‌پوشانی کامل میان تراکم/شدت بالا و حریم گسل‌های اصلی، اثبات می‌کند که گسل‌های کلان منطقه به‌عنوان تنه اصلی الگوی درختی عمل کرده و گسل‌های فرعی و درزه‌ها به‌صورت شاخ‌وبرگ‌های برشی متراکم در امتداد آن‌ها توسعه یافته‌اند.

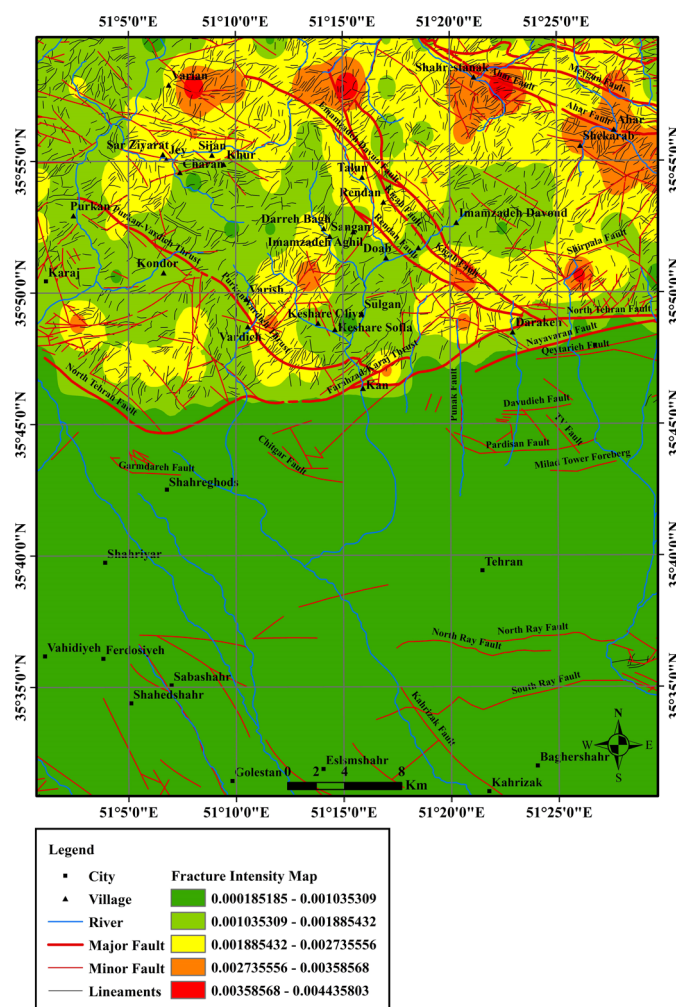
زمین‌ساخت بلوکی و تفکیک واحدهای ساختمانی

بلوک ساختمانی کرج-پورکان (بلوک غربی): این بلوک در غربی‌ترین بخش پهنه کوهستانی منطقه قرار دارد و مرز شمالی آن با راندگی مایل پورکان-وردیچ و مرز

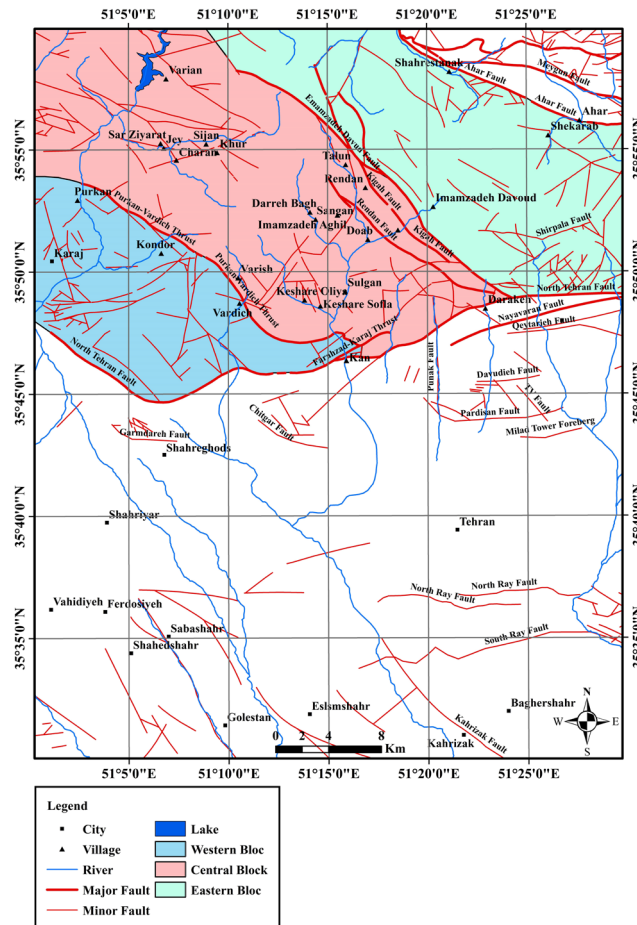
(Search Radius) ۱۰۰۰ متر تنظیم گردید. خروجی این مدل‌ها، الگوی توزیع ناهمگن و تمرکز گسلی شدیدی را در پهنه مورد مطالعه آشکار می‌سازد.

نقشه تراکم شکستگی (شکل شماره ۱۵) نشان می‌دهد که بالاترین میزان چگالی و تمرکز خطواره‌ها (بازه رنگی قرمز و نارنجی با مقادیر اوج تراکم ۳۹۲ تا ۴۹۱ شکستگی در هر کیلومترمربع) دقیقاً منطبق بر نوار کوهستانی شمال تهران و زون گسلی البرز جنوبی است، درحالی‌که دشت تهران به دلیل پوشش ضخیم آبرفتی، تراکم سطحی پایینی (بازه سبز رنگ ۰ تا ۹۸ شکستگی در کیلومترمربع) را نمایش می‌دهد.

نقشه شدت شکستگی که معرف درجه خردشدگی توده سنگ (Rock Mass Fragmentation) و مجموع طول شکستگی‌ها در واحد سطح است (شکل شماره ۱۶)، تطابق فضایی خیره‌کننده‌ای با نقشه تراکم



شکل ۱۶. نقشه توزیع شدت شکستگی‌های نهایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۷. مدل زمین‌ساخت بلوکی و تفکیک منطقه به بلوک‌های مجزا

ناپوستگی‌ها و ارتفاع توپوگرافی برجسته این بلوک است.

بلوک ساختاری امامزاده داوود-آهار (بلوک شرقی): در بخش شرقی پهنه کوهستانی، این بلوک توسط گسل رانده امامزاده داوود در غرب و گسل‌های آهار و میگون در شرق و شمال‌شرق مرزبندی می‌شود (شکل شماره ۱۷). مشخصه بارز این بلوک، برون‌زد گوه مانند هسته‌های قدیمی پی‌سنگ پالئوزوئیک-مزوزوئیک در مجاورت توف‌های ائوسن است که نشان‌دهنده گسلش درگیر در پی‌سنگ (Basement-involved faulting) و تمرکز شدید استرس در زون‌های برشی راست گرد است.

بحث

تحلیل سینماتیکی شکستگی‌ها و تفکیک کرنش

بررسی روندهای ساختاری به‌دست آمده نشان می‌دهد

جنوبی آن با بخش غربی گسل شمال تهران تعریف می‌شود. (شکل شماره ۱۷) این بلوک عمدتاً از تناوب‌های ضخیم توف‌های سبز شکننده-شکل‌پذیر سازند کرج تشکیل شده و تحت تأثیر فشارش منطقه‌ای، چین‌خوردگی‌های نامتقارن و گسل‌های مایل لغز در درون لایه‌ها کوتاه شدگی افقی را مستهلک می‌سازند.

بلوک ساختاری کن-وردیچ-رندان (بلوک میانی) این بلوک پیچیده‌ترین زون زمین‌ساختی منطقه را داراست و مرزهای آن توسط سیستم بادبزی راندگی (Imbricate Thrust Fan) شامل گسل‌های کیگانه، رندان، و فرحزاد-کرج محاط شده است (شکل شماره ۱۷). این بلوک به دلیل نرخ بالای برخاست زمین‌ساختی و فشردگی میان گسل‌های مایل با شیب‌های مخالف، به‌صورت یک فرابوم زمین‌ساختی یا ساختار پاپ‌آپ (Pop-up Structure/Positive Flow-er Structure) عمل کرده و به سمت بالا فرار کرده است. این سازوکار پاپ‌آپی، توجیه‌کننده تمرکز فوق‌العاده شدید خردشدگی توده سنگ، تراکم بالای

(Wide Damage Zones) مملو از درزه‌های مویین ایجاد کرده است (Yassaghi and Naeimi, 2011).

رفتار لیتومکانیکی واحدها و مخاطرات زمین‌ساختی

در امتداد همین رفتار مکانیکی، سخت و ترد بودن واحدهای آتشفشانی-آذرآواری سازند کرج باعث شده است که انرژی زمین‌ساختی حاصل از همگرایی و راندگی البرز به‌جای تغییر شکل نرم، به‌صورت خردشدگی شدید، ایجاد درزه‌های متقاطع و گسلش ثانویه تخلیه شود که این امر پتانسیل ناپایداری دامنه، زمین‌لغزش و ریزش سنگ را در جاده‌ها و سازه‌های کوهستانی شمال تهران به شدت افزایش می‌دهد. در مقابل، رسوبات آبرفتی دشت (نظیر واحد Qal) به دلیل ویژگی‌های خاک نرم و خاصیت خودترمیم‌کنندگی، تراکم و شدت ظاهری بسیار پایینی را نشان می‌دهند؛ با این حال، بروز گسیختگی‌های موضعی و تمرکز خطواره‌ها در بخش‌هایی از دشت جنوبی، نشان‌دهنده فعالیت گسل‌های پنهان زیرسطحی (Blind Faults) و تاقدیس‌های رشدی در زیر رسوبات جوان است که مخاطرات لرزه‌ای متمایزی را برای کلان‌شهر تهران دیکته می‌کند.

زمین‌ساخت بلوکی و الگوی ژئودینامیکی

تحلیل سینماتیکی دگرشکلی در شمال محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که تحت رژیم همگرایی مورب (Oblique Convergence) صفحات عربی و اوراسیا، دگرشکلی پوسته در دامنه جنوبی البرز به‌صورت یکنواخت توزیع نشده است. اگرچه مطالعات پیشین مانند (Ritz et al., 2006; Landgraf et al., 2009; Solaymani Azad et al., 2011) پدیده تفکیک کرنش را در مقیاس منطقه‌ای میان سامانه‌های گسلی اصلی (گسل مشا و شمال تهران) به اثبات رسانده‌اند، اما نحوه سازگاری دگرشکلی داخلی در فرادیواره (Hanging wall) گسل شمال تهران تا پیش از این با جزئیات هندسی تدقیق نشده بود. یافته‌های حاصل از تحلیل فضایی شبکه شکستگی‌ها و تلفیق داده‌های سنجش از دور در پژوهش حاضر، امکان تدقیق و ارائه یک مدل

که هندسه غالب شبکه شکستگی‌های منطقه، با ساختارهای زمین‌ساختی کلان و فعال البرز جنوبی نظیر گسل شمال تهران، راندگی‌های فرحزاد-کرج و پورکان-وردیچ همبستگی فضایی و هندسی کاملی دارد و نشان‌دهنده شکل‌گیری این شبکه تحت تأثیر مؤلفه فشاری بیشینه ($\Sigma 1$) با راستای شمالی-جنوبی تا شمال-شمال‌شرقی در رژیم ترافشاری فعال منطقه است (Berberian, 1976; Allen et al., 2003a; Zanchi et al., 2006; Solaymani Azad et al., 2011; Berberian and Yeats, 2016; Kowsari and Ghasemi, 2021). در مقابل، روند ثانویه با راستای غرب-شمال‌غرب به شرق-جنوب‌شرق (WNW-ESE)، بازتاب‌دهنده عملکرد شکستگی‌های برشی متقاطع (Conjugate Shear Fractures) و زون‌های امتدادلغز فرعی است که نقش تعدیل‌کننده کوتاه‌شدگی جانبی پوسته و تفکیک کرنش را ایفا می‌کنند (Ritz et al., 2006; Landgraf et al., 2009; Talebian et al., 2016; Saghavaz et al., 2017).

کنترل چینه نگاری مکانیکی و انکسار شکستگی‌ها

ارزیابی ویژگی‌های چینه نگاری مکانیکی (Mechanical Competence) و تفاوت صلیبت سنگ‌ها (Contrast) اثبات می‌کند که پراکندگی، تراکم و شدت شکستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه تحت کنترل شدید لیتولوژی و هندسه لایه‌بندی قرار دارد. درتوالی‌های آتشفشانی-رسوبی سازند کرج، پدیده انکسار شکستگی (Fracture Refraction) درمرز لایه‌های سخت توفی و شیل‌های نرم‌تر به‌وفور رخ داده است؛ به‌طوری‌که درزه‌ها هنگام عبور از لایه‌های توف صلب زاویه تند داشته اما در ورود به شیل‌های ترد به صورت لغزش امتداد لایه (Bedding-Plane Slip) مستهلک می‌شوند. وجود گسل-های فعال کلان و افزایش فشار سیال منفذی بر اساس معیار شکست موهر-کولمب، منجر به کاهش تنش مؤثر و بروز شکست هیدرولیکی در دیواره گسل‌ها شده و زون‌های آسیب‌دیده عریض



زمین‌ساخت بلوکی سه گانه را در پهنه ارتفاعات شمالی سازند کرج فراهم ساخته است (شکل شماره ۱۷) که شامل سه بلوک با رفتار لیتومکانیکی متمایز می‌باشد.

از دیدگاه ژئودینامیکی، محرک اصلی ایجاد این زمین‌ساخت بلوکی، فشار مداوم ناشی از همگرایی شمال‌سوی صفحه عربستان به سمت اوراسیا است. در پاسخ به این فشارش مورب، پوسته البرز جنوبی مؤلفه فشارشی (کوتاه‌شدگی عمود بر کمربند) را عمدتاً در جبهه راندگی اصلی (گسل شمال تهران و فرحزاد) جذب کرده و مؤلفه امتدادلغز راست‌گرد را به گسل‌های طولی درون کوهستان (امامزاده داوود، کیگاه، رندان و آهار) منتقل می‌سازد. گسل‌های فرعی و مقاطع درون هر بلوک نیز نقش آزادسازی تنش‌های محلی و پیوند میان ساختارهای اصلی (Linkage Faults) را بر عهده دارند. در نهایت، این سیستم بلوکی کوهستانی در مرز جنوبی خود بر روی بلوک فروافتاده دشت تهران-کرج رانده شده و انتشار جبهه دگرشکلی به سمت دشت، سیستم گسل‌های پنهان و تاقدیس‌های رشدی فعال شهری را پدید آورده است.

نتیجه‌گیری

۱ - تحلیل آماری جهت‌یافتگی جامعه آماری نهایی مشتمل بر ۷,۷۳۷ سگمنت شکستگی معتبر با مجموع طول ۲,۸۷۴.۷۱ کیلومتر نشان می‌دهد که روند غالب شکستگی‌های منطقه شامل یک روند اصلی با راستای شرق-شمال‌شرق به غرب-جنوب‌غرب (ENE-WSW) و میانگین ۶۱.۳ درجه (با راستای متقابل ۲۴۱.۳۳ درجه) است که تحت تأثیر رژیم انقباضی ناشی از همگرایی صفحات عربی و اوراسیا شکل گرفته است. و یک روند ثانویه با راستای غرب-شمال‌غرب به شرق-جنوب‌شرق (WNW-ESE)، نشان‌دهنده گسل‌های برشی متقاطع و زون‌های راستالغز فرعی است که نقش تعدیل‌کننده تغییر شکل‌های جانبی و تفکیک کرنش را در حاشیه البرز ایفا می‌کنند. که انطباق مستقیمی با الگوهای تنش منطقه‌ای مطرح‌شده در مطالعات گذشته دارد.

۲ - توزیع، تراکم و شدت شکستگی‌ها در محدوده

مورد مطالعه تحت کنترل لیتولوژی و چینه‌نگاری مکانیکی واحدها قرار دارد. سنگ‌های آذرآواری و توف‌های ائوسن سازند کرج به دلیل رفتار شکننده (Brittle)، بالاترین تراکم شکستگی‌ها را دارند. در مقابل، رسوبات ناپیوسته نئوژن و کواترنر دشت تهران به دلیل رفتار شکل‌پذیر (Ductile) و خاصیت خودترمیمی، کمترین تراکم خطواره‌های سطحی را نشان می‌دهند، اگرچه گسل‌های پنهان عمیق پی‌سنگ را در زیر خود مخفی کرده‌اند. رتبه‌بندی واحدهای زمین‌شناسی از نظر میزان تراکم و شدت شکستگی‌ها از بیشترین به کمترین در ۷ رده به شرح زیر است:

رده ۱: توالی‌های آتشفشانی-رسوبی سازند کرج شامل واحدهای ائوسن (E1, E2, E3, E4, E5, E6).

رده ۲: کرنات‌های تریاس و کرتاسه شامل واحدهای (TRel, TRed)، (K11) و (K21)

رده ۳: سنگ‌های آذرین درونی ائوسن شامل واحد های (Ed, Edg).

رده ۴: رسوبات و سنگ‌های رسوبی تخریبی و کرنات‌های قدیمی شامل واحد های (D-Cg, D-Ca).

رده ۵: نهشته‌های نیمه متراکم پلیو-کواترنری شامل واحدهای (P1-Q سازند هزاردره)

رده ۶: واحدهای دگرگونی و کرنات‌های دگرگون‌شده فرعی شامل واحد های (Cs, Cl, Cz, Cm, Cql).

رده ۷: مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات آبرفتی جوان کواترنری شامل واحد های (Q1t, Q2t, Qf, Ql, Qsc)، (Qal, Qm, H).

۳ - با تکیه بر یافته‌های لیتوزمین‌ساختی حاصل از نتیجه‌گیری شماره ۲، رتبه‌بندی سازندهای زمین‌شناسی منطقه از نظر میزان تراکم شکستگی‌ها از بیشترین به کمترین به صورت زیر است:

- سازند کرج

- سازند الیکا، سازند تیزکوه و سنگ‌آهک‌های کرتاسه

- توده‌های نفوذی آذرین ائوسن

- سازند جیرود

- سازند هزاردره

لیتومکانیکی مجزا تفکیک و تدقیق نمود:

بلوک غربی (کرج-پورکان): کوتاه‌شدگی افقی را از طریق چین‌خوردگی‌های نامتقارن و گسلش مایل لغز درون‌لایه‌ای مستهلک می‌کند.

بلوک میانی (کن-وردیچ-رندان): به عنوان پیچیده‌ترین بلوک، تحت فشار جانبی شدید به صورت یک ساختار پاپ‌آپ (فراپوم) عمل کرده و ارتفاع بالای توپوگرافی و خردشدگی شدید آن را توجیه می‌کند.

بلوک شرقی (امامزاده داوود-آهار): با بالاآمدگی پی‌سنگ قدیمی در مجاورت توف‌های کرج، بازتاب‌دهنده فعالیت گسل‌های پی‌سنگی و تمرکز تنش در زون‌های برشی است.

۷- پژوهش حاضر موفق گردید تا از طریق تلفیق گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در نقشه‌های کلاسیک (مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰) با یافته‌های نوین زمین‌ساختی منطقه و پیاده‌سازی متدولوژی پیشرفته پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، شکستگی‌های زمین‌ساختی جدیدی را شناسایی نماید. اعمال فرآیندهای فیلترینگ چندمرحله‌ای برای جداسازی و حذف عوارض انسان‌ساخت، به تولید شبکه متراکم و تدقیق‌شده‌ای از شکستگی‌های نهایی منطقه منجر شد (شکل شماره ۱۲) که تصویر ساختاری منسجمی را از پهنه دگرشکلی‌شکننده فعال به نمایش می‌گذارد.

نقشه ساختاری تدقیق‌شده حاصل، جایگزینی برای نقشه‌های زمین‌شناسی گذشته نبوده، بلکه متمم بسیار ارزشمندی برای ارتقای آن‌ها به شمار می‌رود. ارزش علمی اصلی این نقشه در بازسازی بی‌شمار شکستگی‌های فرعی، درزه‌ها و میکروساختارهایی نهفته است که پیش از این پنهان یا ناشناخته مانده بودند و اکنون هندسه دقیق زون‌های آسیب‌دیده گسلی اطراف راندگی‌های بزرگی چون گسل شمال تهران، گسل امامزاده داوود و راندگی پورکان-وردیچ را با وضوح بالا مشخص می‌سازند.

- سازندهای پی‌سنگ کامبرین (شامل سازندهای سلطانیه، باروت، زایگون و میلا)

- سازندهای آبرفتی جوان (شامل سازند کهریزک، تراس‌های کواترنری و رسوبات آبرفتی دشت تهران)

۴- یافته‌های هیدروژئولوژیکی و ساختاری این پژوهش اثبات می‌نماید که واحدهای آذرآواری سازند کرج (به‌ویژه توف‌های لایه‌بندی شده اعضای E3 و E4 در ارتفاعات شمالی)، مجرای عبور و تغذیه هیدرولیکی آبخوان شکافدار (Hard Rock Aquifer) و منبع اصلی تغذیه سفره‌های زیرزمینی دشت تهران به شمار می‌روند. این نقش هیدروژئولوژیکی فعال، مستقیماً تابع یک ارتباط سیستماتیک میان سن، لیتولوژی و ویژگی‌های ژئومکانیکی واحدها است.

۵- این پژوهش با اثبات مهاجرت جبهه دگرشکلی از ارتفاعات البرز به سمت پیش‌بوم دشت تهران، نشان داد که این حوضه رسوبی به پهنه‌ای لرزه‌خیز تبدیل شده است. این بارگذاری تنش خود را به شکل تکوین گسل‌های رانده پنهان در پی‌سنگ (مانند گسل پردیسان با نرخ لغزش حداقل ۱ میلی‌متر در سال) و تشکیل تاقدیس‌های فعالی چون برج میلاد و تپه‌های گیشا نشان داده است. تراکم پایین شکستگی‌های سطحی در دشت، سیگنالی فریبده است که ناشی از قابلیت خودترمیمی رسوبات ضخیم کواترنری در پوشش گسیختگی‌هاست. این دگرشکلی پنهان در زیر بافت شهری، دشت تهران را به حساس‌ترین زون لرزه‌خیزی تبدیل کرده که نیازمند مدیریت بحران و حریم‌گذاری سخت‌گیرانه گسل‌های پنهان است.

۶- تدقیق مدل زمین‌ساخت بلوکی در فرادیواره البرز جنوبی و تفکیک آن به سه بلوک ساختاری مجزا (شکل ۱۷): در حالی که پژوهش‌های پیشین نظیر (Ritz et al., 2006; Landgraf et al., 2009; Solaymani Azad et al., 2011) تفکیک کرنش را در مقیاس کلان ساختاری میان گسل‌های اصلی البرز بررسی کرده بودند، این پژوهش بر پایه تحلیل تراکم شکستگی‌ها و پیوند گسلی، رفتار دگرشکلی درون‌پوسته‌ای را در مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ به سه بلوک ساختاری با ویژگی‌های

- tional, 38(1), 2231400. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2231400>
- Al Hseinat, M., Al-Rawabdeh, A., Al-Zidaneen, M., Ghanem, H., Al-Taj, M., Diabat, A., Jarrar, G., and Atallah, M. (2020). New Insights for Understanding the Structural Deformation Style of the Strike-Slip Regime along the Wadi Shueib and Amman-Hallabat Structures in Jordan Based on Remote Sensing Data Analysis. *Geosciences*, 10(7), 253. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070253>
- Alaei, M., Nadimi, A., Safaei, H., and Dehbozorgi, M. (2023). Evaluating the influence of recent tectonic activity on the river evolution using the identification of knickpoints in the south of Central Alborz Belt. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 32(4), 632-651. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1865>
- Alavi, M. (1996). Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. *Journal of Geodynamics*, 21(1), 1-33. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7)
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., and Qorashi, M. (2003a). Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25(5), 659-672. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00064-0)
- Allen, M. B., Vincent, S. J., Alsop, G. I., Ismail-zadeh, A., and Flecker, R. (2003b). Late Cenozoic deformation in the South Caspian region: effects of a rigid basement block within a collision zone. *Tectonophysics*, 366(3-4), 223-239. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00098-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00098-2)
- Andarawus, Y., Likkason, O. K., Sadiq, M. A., Sani, A., Aliyu, M. K., and Anzaku, I. Y. (2023). Lineaments Characterization and their Tectonic Significance in Mineralization using Landsat TM Data and Field Studies along Mambilla Plateau, Northeast, Nigeria. *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences (DUJOPAS)*, 9(4a), 12-29. <https://doi.org/10.4314/dujopas.v9i4a.2>
- Arian, M., and Bagha, N. (2012). Active Tectonics of Tehran Area, Iran. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(4), 3805-3819.
- Axen, G. J., Lam, P. S., Grove, M., Stockli, D. F., and Hassanzadeh, J. (2001). Exhumation of the west-central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics. *Geology*, 29(6), 559-562. [https://doi.org/10.1130/0100-0759\(2001\)29%3C559:EXHAOF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0100-0759(2001)29%3C559:EXHAOF%3E2.0.CO;2)
- امینی، ب. و امامی، م. ح.، ۱۳۷۲. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ تهران. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- Abdullah, A., Akhir, J. M., and Abdullah, I. (2010). Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(J).
- Abdullah, A., Nassr, S., and Ghaleeb, A. (2013). Landsat ETM-7 for Lineament Mapping using Automatic Extraction Technique in the SW part of Taiz area, Yemen. *Global Journal of Human Social Science: Geography, Geo-Sciences, Environmental and Disaster Management*, 13(3).
- Abdelouhed, F., Ahmed, A., Abdellah, A., Mohammed, I., and Zouhair, O. (2021). Extraction and analysis of geological lineaments by combining ASTER-GDEM and Landsat 8 image data in the central high atlas of Morocco. *Natural Hazards*, 110, 1937-1953. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05122-9>
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M., and Bachaoui, E. M. (2017). Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite Remote Sensing data in Automatic Lineaments Extraction: a case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Advances in Space Research*, 60(11), 2355-2367. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.006>
- Ahadnejad, V., Hirt, A. M., and Alizadeh, H. (2016). Geological constraints on sustainable urban growth and management of the metropolis of Tehran, Iran. In Wessel, G. R., and Greenberg, J. K. (Eds.), *Geoscience for the Public Good and Global Development: Toward a Sustainable Future* (Vol. 520, pp. 273-286). Geological Society of America Special Papers. [https://doi.org/10.1130/2016.2520\(24\)](https://doi.org/10.1130/2016.2520(24))
- Ahmadi, H., and Pekkan, E. (2021). Fault-Based Geological Lineaments Extraction Using Remote Sensing and GIS—A Review. *Geosciences*, 11(5), 183. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050183>
- Ahmadi, H., Pekkan, E., and Seyitoğlu, G. (2023). Automatic lineaments detection using radar and optical data with an emphasis on geologic and tectonic implications: a case study of Kabul Block, eastern Afghanistan. *Geocarto International*

- Canadian Journal of Earth Sciences, 18(2), 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Berberian, M., and Tchalenko, J. S. (1976). Bibliography With Abstracts on the Seismicity and Tectonics of Iran. Geological Survey of Iran, 39, 429-516.
- Berberian, M., and Yeats, R. S. (2016). Tehran: An earthquake time bomb. In Tectonic Evolution, Collision, and Seismicity of Southwest Asia: In Honor of Manuel Berberian's Forty-Five Years of Research Contributions (Vol. 525, pp. 87–170). GSA Special Paper. [https://doi.org/10.1130/2016.2525\(04\)](https://doi.org/10.1130/2016.2525(04))
- Bina, M., Arian, M. A., Pourkermani, M., and Bazoobandi, M. H. (2020a). Geochemistry and petrogenesis of sills in Lavasanat region, Tehran, Iran. Geosaberes, 11, 480-492. <https://doi.org/10.26895/geosaberes.v11i0.1049>
- Bina, M., Arian, M. A., Pourkermani, M., Bazoobandi, M. H., and Yazdi, A. (2020b). Study of the petrography and tectonic settings of sills in Lavasanat district, Tehran (north of Iran). Nexo Revista Científica, 33(02), 286-296. <https://doi.org/10.5377/nexo.v33i02.10768>
- Davoudzadeh, M., Lammerer, B., and Weber-Diefenbach, K. (1997). Paleogeography, Stratigraphy, and Tectonics of the Tertiary of Iran. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen, 205(1), 33-67. <https://doi.org/10.1127/njgpa/205/1997/33>
- De Martini, P. M., Hessami, K., Pantošti, D., D'Addezio, G., Alinaghi, H., and Ghafory-Ashtiani, M. (1998). A geologic contribution to the evaluation of the seismic potential of the Kahrizak fault (Tehran, Iran). Tectonophysics, 287(1-4), 187–199. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)80068-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)80068-1)
- Diab, H., Gabr, S. S., Abdel Fattah, T. A., Youssef, M. A. S., and Khalil, K. I. (2022). Delineation of the subsurface boundary between the Central and Southern Eastern Desert, Egypt. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 25(3), 903-918. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.09.004>
- Ebadati, N., and Hagi, A. E. (2014). Role of Sedimentary Changes and Groundwater Level in Liquefaction of the South of Tehran. Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 4(3), 39-48.
- Babae, S., Khalili, M. A., Chirico, R., Sorrentino, A., and Di Martire, D. (2024). Spatiotemporal characterization of the subsidence and change detection in Tehran plain (Iran) using InSAR observations and Landsat 8 satellite imagery. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 36, 101290. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101290>
- Bagha, N., Arian, M., Ghorashi, M., Pourkermani, M., El Hamdouni, R., and Solgi, A. (2014). Evaluation of relative tectonic activity in the Tehran basin, central Alborz, northern Iran. Geomorphology, 213, 66-87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.12.041>
- Ballato, P., Landgraf, A., Schildgen, T. F., Stockli, D. F., Fox, M., Ghassemi, M. R., Kirby, E., and Strecker, M. R. (2015). The growth of a mountain belt forced by base-level fall: Tectonics and surface processes during the evolution of the Alborz Mountains, N Iran. Earth and Planetary Science Letters, 425, 204-218. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.051>
- Ballato, P., Uba, C. E., Landgraf, A., Strecker, M. R., Sudo, M., Stockli, D. F., Friedrich, A., and Tabatabaei, S. H. (2011). Arabia-Eurasia continental collision: Insights from late Tertiary foreland-basin evolution in the Alborz Mountains, northern Iran. Geological Society of America Bulletin, 123(1-2), 106–131. <https://doi.org/10.1130/B30091.1>
- Benaissi, L., Tarek, A., Tobi, A., Ibouh, H., Zaid, K., Elamari, K., and Hibti, M. (2022). Geological mapping and mining prospecting in the Aouli inlier (Eastern Meseta, Morocco) based on remote sensing and geographic information systems (GIS). China Geology, 5, 614-629. <https://doi.org/10.31035/cg2022035>
- Berberian, M. (1976). An explanatory note on the first seismotectonic map of Iran; a seismo-tectonic review of the country. Geological Survey of Iran, 39, 7-141.
- Berberian, M., Ghorashi, M., Arzhang-Ravesh, B., and Mohajer-Ashjai, A. (1992). Deep Neotectonic, Seismotectonic, and Earthquake-Faulting Hazard Investigation in the Tehran Region and its Vicinity (Report No. 56). (2nd ed.). Tehran: Geological Survey of Iran.
- Berberian, M., and King, G. C. P. (1981). Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran.

- J. P., and Fru, M. I. N. (2019). Mapping Hydrothermal Alteration Targets from Landsat 8 OLI/TIRS and Magnetic Data Using Digital Image Processing Techniques in Garoua, North Cameroon. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 7(1), 28-41. <https://doi.org/10.12691/jgg-7-1-4>
- Ghassemi, M. R., and Heydari, M. (2025). Active Piedmont Zone Deformation, a manifestation of activity on the 'Master Ray Fault'; insight into the seismic hazard analysis of the Tehran metropolitan area. *EGUsphere*, Preprint. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-500>
- Ghassemi, M. R., Fattahi, M., Landgraf, A., Ahmadi, M., Ballato, P., and Tabatabaei, S. H. (2014). Kinematic links between the Eastern Mosha Fault and the North Tehran Fault, Alborz range, northern Iran. *Tectonophysics*, 622, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.03.007>
- Ghodrati Amiri, G., Motamed, R., and Rabet Es-Haghi, H. (2003). Seismic Hazard Assessment of Metropolitan Tehran, Iran. *Journal of Earthquake Engineering*, 7(3), 347-372. <https://doi.org/10.1080/13632460309350453>
- Ghorbani, M. (2021). *The Geology of Iran: Tectonic, Magmatism and Metamorphism*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71109-2>
- Githenya, L. K., Kariuki, P. C., and Waswa, A. K. (2019). Application of Remote Sensing in Mapping Hydrothermal Alteration Zones and Geological Structures as Areas of Economic Mineralization in Mwitika-Makongo Area, SE Kenya. *Journal of Environment and Earth Science*, 9(11), 16-27.
- Guest, B., Axen, G. J., Lam, P. S., and Hassanzadeh, J. (2006a). Late Cenozoic shortening in the west-central Alborz Mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation. *Geosphere*, 2(1), 35-52. <https://doi.org/10.1130/GES00019.1>
- Guest, B., Horton, B. K., Axen, G. J., Hassanzadeh, J., and McIntosh, W. C. (2007). Middle to late Cenozoic basin evolution in the western Alborz Mountains: Implications for the onset of collisional deformation in northern Iran. *Tectonics*, 26(6), TC6011. <https://doi.org/10.1029/2006TC002091>
- Guest, B., Stockli, D. F., Grove, M., Axen, G. J., Lam, P. S., and Hassanzadeh, J. (2006b). Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran: Implications for the spatial and temporal distribution of deformation in north-
- Ehteshami-Moinabadi, M. (2016). Possible Basement Transverse Faults in the Western Alborz, Northern Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 27(4), 329-342. <https://doi.org/10.22059/jsciences.2016.59339>
- Ehteshami-Moinabadi, M. (2017). Post-Triassic normal faulting and extensional structures in Central Alborz, Northern Iran. *Geopersia*, 7(1), 85-102. <https://doi.org/10.22059/geope.2017.223544.648286>
- Eldosouky, A. M., Abd El-Wahed, M. A., Saada, S. A., and Attia, M. (2025). New insights into structural and tectonic evolution of Safaga-Semna shear belt, Eastern Desert, Egypt: advanced integration of aeromagnetic, remote sensing and field studies. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(31). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00946-2>
- Errami, M., Algouti, A., Algouti, A., and Abdelouhed, F. (2023a). Mapping and analysis of structural lineaments using SRTM radar data and Landsat-8 OLI image: an example from the Telouet-Tighza area, Marrakech High Atlas, Morocco. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 60(11), 1339-1355. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1153424/v1>
- Errami, M., Algouti, A., Algouti, A., Farah, A., and Agli, S. (2023b). Utilization of ASTER data in lithological and lineament mapping of the southern flank of the Central High Atlas in Morocco. *Geologos*, 29(1), 1-20. <https://doi.org/10.14746/logos.2023.29.1.01>
- Es-Sabbar, B., Essalhi, M., Essalhi, A., and Si Mhamdi, H. (2020). Lithological and Structural Lineament Mapping from Landsat 8 OLI Images in Ras Kammouna Arid Area (Eastern Anti-Atlas, Morocco). *Economic and Environmental Geology*, 53(4), 425-440. <https://doi.org/10.9719/EEG.2020.53.4.425>
- Eshaghpour, M., and Alizadeh Saloomahalleh, H. (2015). Relationship Between Thermal Springs of Western Alborz Mountains and Regional Tectonics. In *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia.
- Farahbakhsh, E., Chandra, R., Olierook, H. K. H., Scalzo, R., Clark, C., Reddy, S. M., and Müller, R. D. (2019). Computer vision-based framework for extracting geological lineaments from optical remote sensing data. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.02320>
- Fotze, Q. M. A., Lordon, A. E. D., Penaye, J., Sep,

- Jira, F., Aouragh, M. H., Lakhouili, A., Belasri, A., and Jelbi, M. (2023). Mapping and analysis of structural lineaments using Landsat 8-OLI images and multivariate statistical methods in Tarfaya coastal basin, Southwest Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01853-9>
- Kamranzad, F., Memarian, H., and Zare, M. (2020). Earthquake Risk Assessment for Tehran, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 430. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070430>
- Karimi, L., Motagh, M., and Entezam, I. (2019). Modeling groundwater level fluctuations in Tehran aquifer: Results from a 3D unconfined aquifer model. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 439-449. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.003>
- Khaksar, K., and Tavassoli, A. (2002). Geological characteristics of Tehran aquifer. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.
- Khedr, M. Z., Abo Khashaba, S. M., El-Shibiny, N. H., El-Arafy, R. A., Takazawa, E., Azer, M. K., and Palin, R. M. (2022). Remote sensing techniques and geochemical constraints on the formation of the Wadi El-Hima mineralized granites, Egypt: new insights into the genesis and accumulation of garnets. *International Journal of Earth Sciences*, 111(8), 2409-2443. <https://doi.org/10.1007/s00531-022-02237-7>
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., ... and Alijanzade, M. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophysical Journal International*, 217(2), 832-843. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz045>
- Koçal, A. (2004). A Methodology for Detection and Evaluation of Lineaments from Satellite Imagery. Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Department of Mining Engineering.
- Kowsari, M., and Ghasemi, S. (2021). A backbone probabilistic seismic hazard analysis for the North Tehran Fault scenario. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 144, 106672. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106672>
- Landgraf, A., Ballato, P., Strecker, M. R., Friedrich, A., Tabatabaei, S. H., and Shahpasandzadeh, M. (2009). Fault-kinematic and geomorphic observations along the North Tehran Thrust and Moern Iran. *GSA Bulletin*, 118(11-12), 1507-1521. <https://doi.org/10.1130/B25819.1>
- Han, L., Liu, Z., Zhao, Z., and Ning, Y. (2018). Analysis and application of lineaments extraction using GF-1 satellite images in loess covered. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3, 467-473. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-467-2018>
- Hassan, M. A., and Adhab, S. S. (2014). Lineament automatic extraction analysis for Galal Badra river basin using Landsat 8 satellite image. *Iraqi Journal of Physics*, 12(25), 44-55.
- Hessami, K. (2021). Polyphase Inversion Tectonics in Western Alborz Mountains, Northern Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 15(1), 79-88. <https://doi.org/10.30499/ijg.2020.248614.1291>
- Hung, L. Q., Batelaan, O., and De Smedt, F. (2005). Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. In M. Ehlers and U. Michel (Eds.), *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology V* (Vol. 5983, p. 59830T). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.627699>
- Jaberi, M., R-Ghassemi, M., Shayan, S., Yamani, M., and Zamanzadeh, S. M. (2017). Interaction between active tectonics, erosion and diapirism, a case study from Hable-Rud in Southern Central Alborz (Northern Iran). *Geomorphology*, 285, 233-247. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.031>
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., and Berberian, M. (2002). Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International*, 148(1), 214-245. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01588.x>
- Jafari, M. K., Kamalian, M., Razmkhah, A., and Sohrabi, A. (2004). North of Tehran site effect microzonation. Paper No. 3423, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- Javadi, H. R., Kouhpeyma, M., Gholami Zadeh, P., Naeimi, A., Sheikholeslami, M. R., and Ghassemi, M. R. (2020). Deploying depositional and stratigraphic evidence in kinematic investigations along multi-role faults: The case study from the eastern Mosha Fault, central Alborz Range, northern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 187, 104086. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104086>

- Groundwater quality assessment in southern parts of Tehran plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 69(8), 2697-2706. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2610-x>
- Nazari, H., Ritz, J.-F., Salamati, R., Shahidi, A., Habibi, H., Ghorashi, M. and Karimi Bavandpur, A. (2010), Distinguishing between fault scarps and shorelines: the question of the nature of the Kahrizak, North Rey and South Rey features in the Tehran plain (Iran). *Terra Nova*, 22: 1-12. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2010.00938.x>
- Nazari, H., Ritz, J.-F., Ghassemi, A., Bahar-Firouzi, K., Salamati, R., Shafei, A., and Fonoudi, M. (2011). Paleoearthquakes Determination of Magnitude~6.5 on the North Tehran Fault, Iran. *JSEE (Journal of Seismology and Earthquake Engineering)*, 13(1), 17-24. https://www.jsee.ir/article_240615.html
- Okeke, C. J., Ukaegbu, V. U., and Egesi, N. (2019). Remote sensing signature of geological structures inferred on landsat imagery of Afikpo area Southeastern Nigeria. *Journal of Geology and Mining Research*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.5897/JGMR2018.0305>
- Onibudo, O. O., Laryea, A. E. N., Abiodun, K. S., Olabamidele, O., Ajayi, S. A., Babatunde, A. S., and Loveridge, A. D. S. (2022). Lineaments mapping and digital analysis using remote sensing and geographic information system (GIS) in Erusu-Akoko area of Akoko North-West, Southwest Nigeria. *North American Academic Research*, 5(7), 88-100. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6970677>
- Pires, C. A., Athayde, G. B., de Souza Filho, O. A., and Offerdinger, U. (2021). Litho-structural conditioning in the exploration of fractured aquifers: a case study in the Crystalline Basement Aquifer System of Brazil. *Hydrogeology Journal*, 29, 1279-1296. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02312-4>
- Pirouzi, A., and Eslami, A. (2017). Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0069-4>
- Rahnama, M., and Gloaguen, R. (2014). TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction. *Remote Sensing*, 6(7), 5938-5958. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0069-4>
- sha Fasham Fault, Alborz mountains Iran: implications for fault-system evolution and interaction in a changing tectonic regime. *Geophysical Journal International*, 177(2), 676-690. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04089.x>
- Mahmoudpour, M., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M. R., and Ghassemi, M. R. (2013). Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran. *JGeope*, 3(2), 49-62. <https://doi.org/10.22059/jgeope.2013.36014>
- Mahmoudpour, M., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M. R., and Ghassemi, M. R. (2016). Numerical simulation and prediction of regional land subsidence Caused by Groundwater Exploitation in the Southwest Plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology*, 201, 6-28. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.004>
- Mathew, T. G., and Ariffin, K. S. (2018). Remote Sensing Technique for Lineament Extraction in Association with Mineralization Pattern in Central Belt Peninsular Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1082, 012092. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1082/1/012092>
- Mohammadi Asl, Z. and Abbassi, M.R. (2019) Evaluate Tectonic Activity of Tehran City (Iran) Based on Geomorphic Indices, Field Investigation and Remote Sensing Study. *Open Journal of Earthquake Research*, 8, 19-36. <https://doi.org/10.4236/ojer.2019.81002>
- Mohammadi Nia, A., Rashidi, A., Khatib, M. M., Mousavi, S. M., Nemati, M., Shafiebafti, S., and Derakhshani, R. (2023). Seismic Risk in Alborz: Insights from Geological Moment Rate Estimation and Fault Activity Analysis. *Applied Sciences*, 13(10), 6236. <https://doi.org/10.3390/app13106236>
- Musavi, O., Oloomi, E., Firuzi, E., and Amini Hosseini, K. (2024). Estimating Building Debris Volume in the Case of the Rupture of North Tehran Fault in Tehran, Iran. *Conference Paper. 9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*.
- Naeimi, A., Alavi, S. A., and Madanipour, S. (2022). Structural analysis and the late Cenozoic tectonic evolution of the SE Alborz Mountains in northern Iran: insights into the Arabia-Eurasia collision. *Geopersia*, 12(2), 241-264. <https://doi.org/10.22059/GEOPE.2022.339263.648649>
- Nasrabadi, T., and Abbasi Maedeh, P. (2013).

- 2018). Sustainability, 10(12), 4433. <https://doi.org/10.3390/su10124433>
- Saberi, E., Yassaghi, A., and Djamour, Y. (2017). Application of geodetic leveling data on recent fault activity in Central Alborz, Iran. *Geophysical Journal International*, 211(2), 751-765. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx311>
- Saghavaz, O. A., Ghorashi, M., and Pourkermani, M. (2017). The Role of Faults on Tehran Alluvial and Its Impact on Resistance of Alluvial. *Open Journal of Geology*, 7, 1128-1139. <https://doi.org/10.4236/ojg.2017.78075>
- Said, M., Algouti, A., Algouti, A., and Farah, A. (2022). Mapping lineaments using Landsat 8 OLI and SRTM in the Boumalne-Imiter regions of the southern Central High Atlas. Morocco. *Estudios Geológicos*, 76(2), e133. <https://doi.org/10.3989/egol.43887.587>
- Saidi, O., Si Mhamdi, H., Essalhi, A., and Tournemite, A. (2020). Fracture network mapping using Landsat-8 OLI images of the mining zone of Jbel Tijekht in Moroccan Eastern Anti-Atlas. *Estudios Geológicos*, 76(2), e133. <https://doi.org/10.3989/egol.43887.587>
- Sedrette, S., and Rebaï, N. (2016). Automatic extraction of lineaments from Landsat Etm+ images and their structural interpretation: Case Study in Nefza region (North West of Tunisia). *Journal of Research in Environmental and Earth Sciences*, 4, 139-145.
- Seyed-Emami, K., Wilmsen, M., and Fürsich, F. T. (2020). A summary of the Jurassic System in North and East-Central Iran. *Zitteliana*, 94, 99-156. <https://doi.org/10.5282/ubm/epub.75981>
- Shakib, H., Dardaei Joghann, S., and Pirizadeh, M. (2011). "Proposed Seismic Risk Reduction Program for the Megacity of Tehran, Iran." *Natural Hazards Review*, 12(3), 140-145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000042)
- Shandini, Y., Mouzong, M. P., Onguene, R., Tome-di, M. E., Etame, J., and Essimbi, B. Z. (2020). Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in South Cameroon Area using Remote Sensing Techniques and GIS. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 43(4), 319-329. https://doi.org/10.11137/2020_4_319_329
- Sheikholeslami, M. R. (2018). Tectonosedimentary evolution of the basins in Central Alborz, Iran. *GEOSCIENCES*, 27(106), 29-38. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.58353>
- [org/10.3390/rs6075938](https://doi.org/10.3390/rs6075938)
- Redouane, M., Si Mhamdi, H., Haissen, F., Raji, M., and Sadki, O. (2022). Lineaments Extraction and Analysis Using Landsat 8 (OLI/TIRS) in the Northeast of Morocco. *Open Journal of Geology*, 12, 333-357. <https://doi.org/10.4236/ojg.2022.125018>
- Rezaeian, M., Kuijper, C.B., van der Boon, A., Pastor-Gálan, D., Cotton, L.J., Langereis, C.G., and Krijgsman, W. (2021). Post-Eocene coupled oroclines in the Talesh (NW Iran): paleomagnetic constraints. *Tectonophysics*, 809, 228859. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228459>
- Rezaei, L., Timmerman, M. J., Altenberger, U., Moazzen, M., Wilke, F. D. H., Günter, C., Sudo, M., and Sláma, J. (2024). Ediacaran to Jurassic geodynamic evolution of the Alborz Mountains, north Iran: geochronological data from the Gasht Metamorphic Complex. *Swiss Journal of Geosciences*, 117(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s00015-024-00465-4>
- Riahi, S., Bahroudi, A., Abedi, M., and Aslani, S. (2023). A comparative analysis of multi-index overlay and fuzzy ordered weighted averaging methods for porphyry Cu prospectivity mapping using remote sensing data: the case study of Chahargonbad area, SE of Iran. *Geocarto International*, 38(1), 2159068. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2159068>
- Rieben, H. (1955). The Geology of the Teheran Plain. *American Journal of Science*, 253(11), 617-639. <https://doi.org/10.2475/ajs.253.11.617>
- Ritz, J.-F., Nazari, H., Balescu, S., Lamothe, M., Salamati, R., Ghassemi, A., Shafei, A., Ghorashi, M., and Saidi, A. (2012). Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran). *J. Geophys. Res.*, 117, B06305. <https://doi.org/10.1029/2012JB009147>
- Ritz, J.-F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., and Vernant, P. (2006). Active transension inside central Alborz: A new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics. *Geology*, 34(6), 477-480. <https://doi.org/10.1130/G22319.1>
- Rousta, I., Sarif, M. O., Gupta, R. D., Olafsson, H., Ranagalage, M., Murayama, Y., Zhang, H., and Mushore, T. D. (2018). Spatiotemporal Analysis of Land Use/Land Cover and Its Effects on Surface Urban Heat Island Using Landsat Data: A Case Study of Metropolitan City Tehran (1988–

- Walker, R.T. (2016). Active faulting within a megacity: the geometry and slip rate of the Pardisan thrust in central Tehran, Iran. *Geophysical Journal International*, 207(3), 1688-1699. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw347>
- Tavakoli, F., Nankali, H.R., Soltanpour, A., Sedighi, M., Khormi, F., and Arabi, S. (2009). Application of Geodetic Tools for Crustal Deformation Monitoring in Iran. Paper presented at the Eighteenth United Nations Regional Cartographic Conference for Asia and the Pacific, Bangkok, 26-29 October 2009. E/CONF.100/CRP.13.
- Tchalenko, J. S., Berberian, M., Iranmanesh, H., Bailly, M., and Arsovsky, M. (1974). Tectonic framework of the Tehran region. In *Geological Survey of Iran Report* (No. 29, pp. 7-46).
- Tchato, S. C., Fossi, D. H., Kamto, P. G., Deassou, S. E., Lemotio, W., and Bidichael, W. W. E. (2021). Comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) satellite Remote Sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Nkolezom, southern part of Cameroon. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 10(4), 24-31.
- Thannoun, R. G. (2013). Automatic extraction of lineaments from satellite imagery using Landsat Etn+ data and its application to Jabal Sinjar area, NW Iraq. *International Journal of Computer Applications*, 79(6), 1-8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20851.99363>
- Torabi, M., Saady, M. S., Fattahi, M., and Ghassemi, M. R. (2018). Landslides as paleoseismic indicators along the North Tehran Fault (North of Iran). *Proceedings of the 18th Iranian Geophysical Conference*, 249-252.
- Uromeihy, A., and Nassiri, S. (2006). Effect of landslides on the development of the districts of north Tehran City. *Conference Paper*.
- Vasheghani Farahani, J., Zaré, M., and Cichowicz, A. (2014). Microseismicity of the Tehran region based on the data recorded in a local monitoring network: 2004-2010. *Episodes*, 37(3), 206-217. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2014/v37i3/006>
- Whittle, R. A., Gutmaniss, J. C., and Shilston, D. T. (1983). Using satellite imagery to detect faults. *Ground Engineering*, 26-28.
- Yassaghi, A., & Naeimi, M. (2011). Structural analysis of the Gachsar sub-zone in central Alborz range; constrain for inversion tectonics followed
- Shirzad, T., and Shomali, Z. H. (2013). Shallow crustal structures of the Tehran basin in Iran resolved by ambient noise tomography. *Geophysical Journal International*, 196(2), 928-941. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt449>
- Shojaeian, A., Farahani, S., Behnam, B., and Mashayekhi, M. R. (2021). Seismic Resilience Assessment of Tehran's Southern Water Transmission Pipeline Using GIS-based Analyses. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 6(2), 93-106. <https://doi.org/10.52547/nmce.6.2.93>
- Shokri, P., Dehbozorgi, M., and Hakimi Asiabar, S. (2020). Recent tectonic activity in Central Alborz Mountain, Iran: morphometric analysis and knickpoint identification. *Journal of Mountain Science*, 17(12), 2993-3027. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5945-2>
- Šilhavý, J., Minár, J., Mentlík, P., and Sládek, J. (2016). A new artefacts resistant method for automatic lineament extraction using Multi-Hillshade Hierarchic Clustering (MHHC). *Computers and Geosciences*, 92, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.03.015>
- Solaymani Azad, S., Entezam Soltani, I., Tabassi, H., and Bolourchi, M. J. (2024). Earthquake-induced paleo-landsliding in the Tehran Region and its role in assessing the seismic hazard, Iran. *Earthquake*, 2(1), 1881. <https://doi.org/10.59429/ear.v2i1.1881>
- Solaymani Azad, S., Ritz, J. F., and Abbassi, M. R. (2011). Left-lateral active deformation along the Mosha-North Tehran fault system (Iran): Morphotectonics and paleoseismological investigations. *Tectonophysics*, 497(1-4), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.013>
- Stern, R. J., Shafaii Moghadam, H., Pirouz, M., and Mooney, W. (2021). The Geodynamic Evolution of Iran. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, 9-36. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-052109>
- Takodjou Wambo, J. D., Ganno, S., Afahnwie, N. A., Nomo, N. E., Mvondo, O. J., and Nzenti, J. P. (2016). Use of Landsat 7 ETM+ Data for the Geological Structure Interpretation: Case Study of the Ngoura-Colomines Area, Eastern Cameroon. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 4(3), 61-72. <https://doi.org/10.12691/jgg-4-3-3>
- Talebian, M., Copley, A.C., Fattahi, M., Ghorashi, M., Jackson, J.A., Nazari, H., Sloan, R.A., and



by the range transverse faulting. *International Journal of Earth Sciences*, 100(6), 1237–1249. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0537-y>

Zahedi-Khameneh, A., and Zare, M. (2007). Implication of the Empirical Greens Functions for the Simulation of Strong Ground Motions for North Tehran Fault.

Zakian, P., and Asadi Hayeh, H. (2022). Finite element simulation for elastic dislocation of the North-Tehran fault: The effects of geologic layering and slip distribution for the segment located in Karaj. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11709-022-0802-8>

Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M. R., and Sabouri, J. (2006). Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology*, 28(11), 2023-2037. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.06.020>

¹

Zhao, Z., Chen, J., Cheng, B., Liu, Y., Qiao, K., Cui, X., Yin, Y., and Li, C. (2023). Spatial Analysis of Structure and Metal Mineralization Based on Fractal Theory and Fry Analysis: A Case Study in Nenjiang-Heihe Metallogenic Belt. *Minerals*, 13(3), 313. <https://doi.org/10.3390/min13030313>

