

ORIGINAL ARTICLE**Developing a Physical Model of The Cities of Mazandaran Province Using Morphometric Indices of Active Tectonics: A Case Study of Shirgah-Galugah****Hasan Alizadeh** 

Associate Professor, Department
of Geology, Payame Noor
University Tehran, Iran.

***Correspondence**

Hasan Alizadeh
E-mail: h_alizadehs@pnu.ac.ir

Receive Date: 29/Aug/2024

Revise Date: 01/Oct/2025

Accept Date: 17/Oct/2025

How to cite

Alizadeh, H (2026). Developing a Physical Model of The Cities of Mazandaran Province Using Morphometric Indices of Active Tectonics: A Case Study of Shirgah-Galugah. *Urban Ecology Researches*, 17(2), 137-156.

EXTENDED ABSTRACT**Introduction**

Active tectonic hazards pose a significant threat for urban resilience, particularly in seismically active regions such as the Alborz belt in northern Iran. A comprehensive understanding of these hazards is essential for sustainable urban planning, as resilience frameworks rely on the accurate identification of earthquake-vulnerable zones to facilitate proactive risk mitigation. Morphometric indices serve as practical and quantifiable tools for assessing active faulting. Previous investigations in Iran have successfully employed these tools; for instance, Alizadeh and Khalaj (2021) evaluated tectonic activity in Pardis, while other studies have assessed urban resilience in Zanjan and Marzanabad. Despite these contributions, a critical research gap persists in Mazandaran Province. Notably, no specific morphotectonic study has yet targeted the urban corridor between Shirgah and Galugah.

This corridor is situated within a critically active tectonic zone, lying directly along major faults, including the North Alborz and Khatirkuh faults, both of which possess a high potential for generating destructive earthquakes. Consequently, the seismic risk to the local population remains largely unassessed. This study is specifically designed to fill this lacuna by developing a physical model of active tectonics for the Shirgah-Galugah settlements. The central hypothesis posits that morphometric indices will reveal high tectonic activity in the region due to the persistent influence of these regional faults. To test this, the methodological framework employs five standard indices: Hierarchical Anomaly, Bifurcation Ratio, Drainage Density, Form Factor, and Relative Relief. Utilizing ArcGIS and a 30-meter Digital Elevation Model (DEM), these metrics are systematically calculated for 15 distinct sub-basins and integrated into a Relative Active Tectonics Index (I_{rat}). This integrated assessment aims to produce a detailed hazard zoning map, thereby offering a practical framework for urban planners to mitigate seismic risks and enhance public safety within this high-risk tectonic environment.

Methodology

The methodological framework is founded on a combined quantitative and spatial analysis using geographic information systems. A 30-meter resolution DEM served as the primary topographic data source, supplemented by 1:25,000 topographic maps and 1:100,000 geological maps. All spatial data processing, drainage network extraction, and watershed delineation were conducted within the ArcGIS environment. Based on the extracted hydrographic features, the entire study area was systematically divided into fifteen distinct sub-basins, each serving as an independent analytical unit for subsequent evaluations.

To assess relative tectonic activity, five standard morphometric indices were selected based on their well-established effectiveness in active tectonic studies. These include the Hierarchical Anomaly Index (Ha), which quantifies perturbations in stream ordering; the Bifurcation Ratio (R), reflecting structural controls and lithological variations; Drainage Density (Dd), representing total stream length per unit area; the Form Factor (Ff), measuring basin elongation via the formula $Ff = A/L^2$, where A is basin area and L is its length; and Relative Relief (Bh), calculated as the elevation difference between the highest and lowest points in each basin.

Following the calculation of each index, the resulting numerical values were classified into five discrete tectonic activity ranks, ranging from very high to very low. To achieve comprehensive integration, the Relative Active Tectonics Index (Iat) was derived by averaging the assigned ranks of the five indices for each basin. This integrated approach facilitates a holistic assessment of cumulative tectonic deformation. Ultimately, the calculated Iat values formed the basis for generating a detailed spatial zoning map, which illustrates the physical model of active fault hazards and serves as a definitive output for seismic risk evaluation and urban planning.

Findings

The quantitative analysis of the five selected morphometric indices across the fifteen delineated sub-basins reveals distinct spatial patterns of tectonic activity that strongly correlate with the region's major structural faults. Each index was systematically classified into five categories, from very high to very low activity, providing a robust foundation for comparative assessment.

For the Hierarchical Anomaly Index (Ha), sub-basins 2, 3, 4, 8, 9, 10, and 14 exhibited the highest values, indicating significant perturbations in their drainage networks, while sub-basins 5, 10, 14, and 15 recorded the lowest values. Regarding the Bifurcation Ratio (R), the highest values were concentrated in sub-basins 2, 4, 11, and 13, spatially aligned with the North Alborz Fault, demonstrating the structural control of active faulting on stream ordering. Similarly, the highest Drainage Density (Dd) was recorded in sub-basins 11, 13, and 14, closely corresponding with the Dozdban and Marzanabad fault zones, where dense hydrographic networks indicate active surface deformation. The Form Factor (Ff) analysis confirmed the elongation of drainage basins in sub-basins 1, 2, 4, 5, 9, and 10, a morphological characteristic commonly observed in regions undergoing active tectonic uplift. Furthermore, Relative Relief (Bh) was most pronounced in sub-basins 11 and 12, where high elevation differences reflect rugged topography driven by recent vertical crustal movements.

Upon integrating these individual classifications into the composite Iat, the results demonstrate that sub-basins 1, 8, 9, and 14 possess the highest levels of tectonic activity, largely attributed to the persistent influence of

the North Alborz and Khatirkuh (Orim) faults. According to the final zoning model, approximately 33.3% of the total study area falls into the high to very high tectonic activity categories. Notably, in several sub-basins, the presence of secondary faults—formed in response to the primary structural systems—amplified the morphometric values, contributing to elevated tectonic ranks. Collectively, these findings provide a clear, data-driven physical model of active fault hazards across the urban corridor, confirming the region's dynamic tectonic state and the substantial seismic risk to the settlements between Shirgah and Galugah.

Discussion and Conclusion

This research successfully addresses the significant knowledge gap concerning active tectonics in the Shirgah-Galugah urban corridor. The findings align well with previous regional studies, validating the effectiveness of the selected morphometric indices as reliable indicators of tectonic deformation. However, due to the specific geological complexities of the area, some commonly used quantitative indices—such as mountain front sinuosity—proved inapplicable, necessitating a careful methodological adjustment to ensure the integrity of the results.

The integrated Iat reveals that sub-basins 1, 8, 9, and 14 exhibit the highest tectonic activity, a phenomenon directly attributable to the persistent influence of the North Alborz and Khatirkuh faults. Furthermore, the presence of secondary faults, developed in response to these primary structural systems, has significantly amplified morphometric values in adjacent sub-basins, further elevating their tectonic classifications. The final zoning model indicates that approximately 33.3% of the study area is subject to high to very high tectonic activity, a reality that substantially elevates seismic risk for local settlements. The geographic overlap between active faults and densely populated residential zones creates critical vulnerability, as a strong earthquake could result in catastrophic human and economic losses.

In conclusion, the physical model developed in this research effectively highlights active tectonic hazards across the urban corridor, confirming that most settlements are situated directly upon or in close proximity to major active faults. These findings provide a concrete, evidence-based framework bridging geological assessment and practical urban safety planning. To mitigate these substantial risks, it is strongly recommended that urban planners and policymakers prioritize detailed seismotectonic and microzonation studies to accurately determine fault relationships and seismic potential. Moreover, strict enforcement of seismic building codes and systematic retrofitting of critical infrastructure—including bridges, hospitals, and older residential fabrics—must be urgently implemented. Finally, the active fault hazard map generated in this study should be explicitly incorporated into local master plans to prohibit future urban expansion within the highest-risk zones, thereby safeguarding lives and assets within this inherently vulnerable tectonic setting

KEYWORDS

Active Tectonics, Earthquake, Morphometric Indices, Shirgah, Galogah.





«مقاله پژوهشی»

تدوین الگوی کالبدی شهرستان‌های استان مازندران با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی زمین‌ساخت فعال: مطالعه موردی شیرگاه - گلوگاه



حسن علیزاده

دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: حسن علیزاده

رایانامه: h_alizadehs@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵

استناد به این مقاله:

علیزاده، حسن (۱۴۰۵). تدوین الگوی کالبدی شهرستان‌های استان مازندران با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی زمین‌ساخت فعال: مطالعه موردی شیرگاه - گلوگاه. فصلنامه علمی پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، ۱۷(۲)، ۱۵۶-۱۳۷.

چکیده

هدف از این پژوهش تدوین الگوی کالبدی شهرستان‌های استان مازندران با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی زمین‌ساخت فعال است که بر اساس مطالعه موردی سکونتگاه‌های بین شیرگاه تا گلوگاه انجام شده است. در این مطالعه ۵ شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی، انشعابات، شکل حوضه، تراکم زهکشی و برجستگی نسبی در ۱۵ حوضه زهکشی بین این دو شهرستان محاسبه شده است. نتایج حاصل از این پژوهش با تکیه بر شاخص‌های ریخت‌سنجی نشان می‌دهد که اکثر سکونتگاه‌های شهرستان مازندران از جمله مناطق مسکونی از شیرگاه تا گلوگاه منطبق بر گسل‌های شمال البرز، خطیر کوه، دزدبن و مرزن‌آباد، دارای شاخص‌های ریخت‌سنجی بالا و بسیار بالا هستند که به دلیل تأثیر گسل‌های مذکور می‌باشد. حدود ۳۳/۳ درصد از منطقه که تحت سیطره فعالیت این گسل‌ها می‌باشد. علاوه بر گسل‌های اصلی، گسل‌های فرعی دیگری که در اثر حرکات زمین‌ساختی اخیر تشکیل شده‌اند، فعالیت زمین‌ساختی متوسط به بالایی را ارائه می‌دهند. قرارگیری این سکونتگاه‌ها در مجاورت این گسل‌ها سبب شده است که ریسک لرزه‌خیزی منطقه نیز افزایش یابد. به دلیل وجود تاریخچه‌ای مبنی بر وجود زمین‌لرزه در این منطقه و اثبات فعال بودن منطقه از نظر زمین‌ساختی، باید در ساخت زیربنای عمرانی، مقوله مخاطرات حاصل از زمین‌لرزه‌ها مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی

زمین‌ساخت فعال، زمین لرزه، شاخص‌های ریخت‌سنجی، شیرگاه، گلوگاه

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. © ۱۴۰۵ ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

This is an open access article under the CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://grup.journals.pnu.ac.ir>



مقدمه

شاخص‌های ریخت‌سنجی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان ابزاری برای شناسایی و مشخص کردن بخش‌های تغییر شکل‌یافته به‌وسیله گسل‌های فعال^۱ مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Giaconia et al., 2012). هدف ریخت‌سنجی استخراج ویژگی‌های فرمی سطح زمین و عوارض موجود در آن با استفاده از مدل‌های رقومی سطح زمین و نرم‌افزارهای پارامترسازی است (محمدی و جلالی، ۱۳۹۶). به‌عبارتی می‌توان گفت ریخت‌سنجی، علم کمی‌سازی عوارض سطحی زمین، با تمرکز بر استخراج پارامترهای عوارض سطح زمین براساس مدل رقومی ارتفاعی (DEM) می‌باشد. اندازه‌گیری‌های کمی امکان مقایسه عینی زمین‌ریخت‌های^۲ مختلف و محاسبه متغیرهای کم‌تر قابل فهم را فراهم و شناسایی ویژگی‌های خاص شامل سطح فعالیت زمین‌ساختی یک منطقه را امکان‌پذیر می‌سازد، اندازه‌گیری‌های کمی شرایطی را فراهم می‌آورد تا با استفاده از آن‌ها به شناسایی وضعیت مناطق دارای زمین‌ساخت فعال پرداخته شود. استخراج شاخص‌های ریخت‌سنجی با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) در محیط GIS در دهه‌های اخیر، روشی دقیق و مورد اطمینان در تحلیل حوضه زهکشی بوده، به‌طوری‌که از این شاخص‌ها برای ارزیابی سریع فعالیت‌های زمین‌ساختی در یک ناحیه خاص استفاده شده است (Keller & Pinter, 2002). رودخانه‌ها به‌سرعت و به‌طور ثابت به تغییر شکل حاصل از زمین‌ساخت فعال در سطح زمین واکنش نشان می‌دهند (Holbrook & Schumm, 1999; Seeber & Gornitz, 1983). بررسی الگوی رودها، اطلاعات مهمی در مورد گسترش و تکامل ساختاری منطقه فراهم می‌آورد (Keller, et al., 1998; Walker, 2006). تحلیل شبکه‌های زهکشی ابزار قدرتمندی برای شناسایی فعالیت‌های زمین‌ساختی جدید و بالآمدگی‌ها می‌باشد، کانال‌های رودخانه‌ای نسبت به تغییرات در عواملی که شکل و شیب آن‌ها را کنترل می‌کنند، بسیار حساس می‌باشند. تغییرات اقلیم، زمین‌ساخت و سنگ‌شناسی شرایط تعادل رودخانه و در نتیجه ریخت‌شناسی رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Perez Pena, 2009).

مخاطرات ریخت زمین‌ساختی از مخاطرات محیطی می‌باشند که در سراسر جهان باعث اختلال جدی در فعالیت‌های انسانی می‌شوند. در سال‌های اخیر قابلیت زمین‌شناسان و جغرافی‌دانان برای شناخت مناطق مخاطره‌آمیز و دارای پتانسیل خطر افزایش یافته و راهکارهای ریخت زمین‌ساختی برای حل مسائل محیطی توسعه یافته است (Alcántara-Ayala & Goudie, 2005).

مبانی نظری

چارچوب نظری

با تداوم توسعه شهرها، پیش‌بینی‌ها حاکی از وسعت هرچه بیش‌تر مخاطرات لرزه‌ای در مناطق شهری می‌باشد. زیرا با گسترش شهرها و به‌تبع آن افزایش جمعیت، منجر خواهد شد که توسعه شهرسازی بر روی گسل‌ها و مناطق پرخطر لرزه‌ای نیز ساخته شود. به‌دنبال این تحولات و نگرانی‌ها، نظریه توسعه پایدار و الگوی توسعه کالبدی که پیدایش آن به دهه‌های آخر قرن بیستم باز می‌گردد، بیش از پیش قوت گرفت. در این میان با توجه به نقش پررنگ شهرها در پیدایش ناپایداری، نظریه توسعه پایدار شهری از اهمیت فراوانی برخوردار شده و با توجه به اثرات گسترده مسکن بر محیط‌های شهری در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار شهری، بخش مسکن نقش بسیار مهمی را در این میان بر عهده دارد (حکمت‌نیا و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین آن نوع مسکنی که نیازهای زیستی نسل کنونی را بر مبنای امنیت مخاطرات طبیعی برآورده ساخته و در عین حال محلاتی جاذب و یمن را ضمن توجه به مسائل اکولوژیک، فرهنگی و اقتصادی ایجاد کند، مسکن پایدار تلقی می‌شود.

در مطالعات شهری، تاب‌آوری عمدتاً اشاره به ظرفیت بهبود در برابر فجایع طبیعی مانند زلزله، سیل و جنگ دارد. با توجه به تعدد معنای تاب‌آوری در علوم مختلف توسط محققان، نوپا بودن این اصطلاح در امور شهری و همچنین با توجه به این که هر محیطی برای خود دارای ویژگی‌های اجتماعی، اقتصادی، کالبدی و مدیریتی خاص خود است، کاربری این اصطلاح در مکان و زمان مورد مطالعه متفاوت خواهد بود (موسوی و همکاران، ۱۴۰۲). ضرورت بازآفرینی بافت‌های فرسوده مقوله بسیار مهمی برای برنامه‌ریزان شهری به شمار می‌آید که به‌منظور توسعه شهری به مفهوم رشد کمی عناصر کالبدی شهر برای اسکان جمعیت و ارتقای کیفیت زندگی، در قالب طرح‌های توسعه شهری رخ خواهد داد (شاطریان و همکاران، ۱۴۰۲).

در استان مازندران به جز مطالعات محدود لرزه زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی در مقیاس استانی، مطالعه خاصی صورت نگرفته است. در این استان به‌علت نزدیکی شهرهای آن و تراکم جمعیتی در صورت رخداد یک زلزله شدید در قسمتی از آن ناحیه، کل استان را تحت‌الشعاع خود قرار می‌دهد. برای جلوگیری از حوادث مخاطرات لرزه‌ای، باید مناطق پرخطر شناسایی بشوند تا بتوان برنامه‌ریزی برای مدیریت بحران زلزله، بهسازی لرزه‌ای

۱۴۰۰ پرداختند. مطابق این پژوهش شهرستان‌های ساری، بابل، آمل، قائمشهر، تنکابن و چالوس از رتبه‌های بالاتری در ابعاد پایداری برخوردارند. همچنین شهرستان‌های استان مازندران پایداری متفاوتی داشته است و معضل ناپایداری، از نظر اندازه بیش‌تر به شهرهایی با اندازه کوچک و متوسط و از لحاظ شاخص‌ها بیش‌تر به مسائل اقتصادی بازمی‌گردد.

نگاپنا^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، به ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی در منطقه ایدیا اسکا در جنوب غرب کامرون، آفریقای مرکزی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که فعالیت مجدد گسل‌هایی که در این منطقه واقع شده‌اند موجب زلزله می‌شوند و فعالیت آتش‌فشان‌های خطی کامرون موجب شده این منطقه از نظر زمین‌ساختی فعال باشد.

گارسا و والندیا^۲ (۲۰۲۰)، ریخت زمین‌ساخت منطقه در سن لوکاس در کوردیرلای مرکزی با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی مورد بررسی قرار دادند و پیامدهای زمین‌ساخت فعال را به صورت ناحیه‌ای در کوه‌های آند شمالی مشخص کردند. با این پژوهش به این نتیجه دست یافتند که بیش‌ترین فعالیت زمین‌ساختی و بالآمدگی مربوط به دامنه کوه سیمیتی، شمال گسل‌های سیمیتی - سان بلاس، در راستای گسل‌های با روند شمال غرب - جنوب شرق و در شمال حوضه فلسطین است. از پژوهش‌های دیگر صورت گرفته در این زمینه، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مقصودی و همکاران (۱۳۹۶)، با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی به بررسی زمین‌ساخت فعال حوضه آبریز مارون پرداختند و به این نتیجه رسیده‌اند که حوضه رودخانه مارون از نظر نو زمین‌ساختی و بالآمدگی فعال می‌باشد. زیر حوضه‌های بالادست بیش‌تر از زیر حوضه‌های میانی و انتهایی فعال می‌باشند و زمین‌ساخت منطقه تأثیر زیادی بر لندم‌ها و سکونت‌گاه‌ها دارد. مابقی و حسین‌زاده (۱۳۹۶)، با استفاده از شاخص‌های نوزمین‌ساختی به بررسی تجزیه و تحلیل ریخت زمین‌ساخت حوضه رودخانه درونگر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که فعالیت‌های نوزمین‌ساختی در حوضه مورد مطالعه فعال می‌باشد و بر اساس شاخص طبقه‌بندی Iat این حوضه از نظر زمین‌ساختی از مناطق فعال به حساب می‌آید.

محمدی و همکاران (۱۳۹۶)، به ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی در حوضه آبخیز آبشینه همدان با استفاده از شاخص‌های زمین‌ریختی و لرزه‌خیزی منطقه پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که در اغلب شاخص‌ها نشانه‌های فعالیت حوضه آبخیز آبشینه بارز است.

ساختمان‌های ضروری و با اهمیت اقدام کرد. بنابراین مطالعات مختلف برای تعیین وضعیت زمین‌ساخت فعال استان مازندران بسیار ضروری است.

پیشینه پژوهش

علیزاده و خلیج (۱۳۹۹)، با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی به بررسی زمین‌ساخت فعال شهر پردیس پرداختند. مطابق این پژوهش خطر گسیختگی سطحی در شهر پردیس نشان می‌دهد که بستر این شهر میزبان گسل‌های مهمی می‌باشد که در مطالعات اولیه این شهر شرایط زمین‌شناسی و مطالعات ساختمانی مورد توجه قرار نگرفته است. با توجه به نتایج حاصل از بررسی زمین‌ساخت فعال نسبی در منطقه مورد مطالعه، نتیجه گرفته شده است که بیش‌تر مساحت کل منطقه مورد مطالعه در رده فعالیت زمین‌ساختی بالا قرار گرفته است که به دلیل عملکرد گسل‌های واقع در منطقه است.

عبداله‌زاده ملکی و همکاران (۱۴۰۰)، آستانه تاب‌آوری فضاها و شهری زنجان را در برابر زلزله با رویکرد اجتماعی-بوم‌شناسی بررسی کرده‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که اغلب شاخص‌های مرتبط با برنامه‌ریزی و طراحی مناسب شبکه ارتباطی و هماهنگی آن با بستر بوم‌شناختی دارای بالاترین نیروی محرکه هستند. براساس خروجی مدل نیز شاخص‌های مؤثر بر آستانه تاب‌آوری اجتماعی-بوم‌شناسی فضاها در یک تقسیم‌بندی فراگیرتر به سه سطح شاخص‌های بنیادی، پیوندی و وابسته تقسیم‌بندی شده‌اند.

مصدق‌زاده و همکاران (۱۴۰۱)، مطالعاتی بر روی مخاطرات لرزه‌ای مرزن‌آباد و طالقان انجام داده‌اند. مطابق این پژوهش گسل‌های خزر، شمال البرز، دزدبن و راندگی‌های کندوان و شمال طالقان در گروه‌های بسیار بالا و بالای خطر قرار گرفته‌اند که بیانگر تأثیر این گسل‌ها بر زمین‌ساخت فعال منطقه است و به این نتیجه رسیده‌اند که ایجاد تمهیداتی به منظور کاهش ریسک خطر زمین‌لرزه در این منطقه به خصوص به دلیل شرایط توریستی شهرهای این ناحیه امری ضروری تلقی می‌شود.

موسوی و همکاران (۱۴۰۲)، پژوهشی در مورد تاب‌آوری در حوزه مسکن شهری شهر سقز انجام داده‌اند. مطابق نتایج این مطالعات برخی از مناطق شهر سقز از تاب‌آوری غیر قابل تحمل و نامناسبی برخوردارند و به این نتیجه رسیده‌اند که بهبود فضای و توزیع با نظارت بر ضوابط و مقررات ساخت وسازها، امکان دسترسی این محلات امکان‌پذیر است.

مرصوصی و اسداله تبار (۱۴۰۳)، در پژوهشی به ارزیابی پایداری شهرستان‌های استان مازندران طی سال‌های ۱۳۸۵ و

سلسله مراتبی (Δ_a)، انشعابات (R_b)، شکل حوضه (F_f)، تراکم زهکشی (D_d) و برجستگی نسبی (B_h) تعیین شده است. در انتها نیز الگوی زمین‌ساخت فعال این استان به منظور تعیین فعالیت زمین‌ساخت کل منطقه محاسبه و ارائه شد.

روش انجام پژوهش

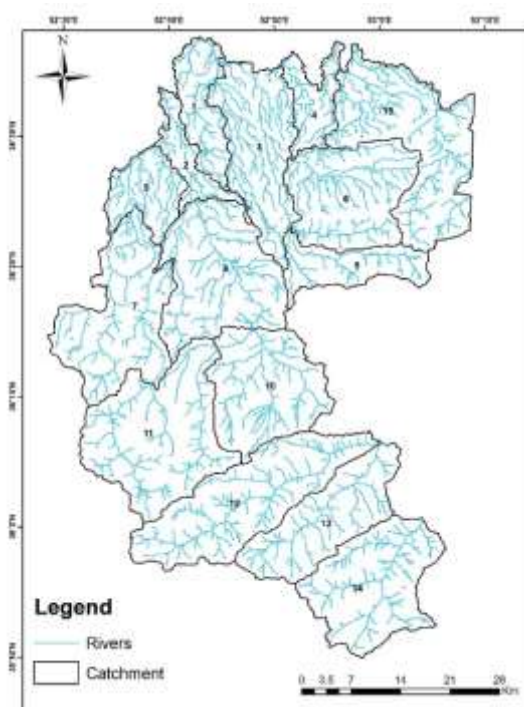
در این مطالعه در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ۳۰ متر، حوضه‌بندی و استخراج آبراهه‌ها انجام شد (شکل ۱). با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ از طریق نرم‌افزار Arc GIS لایه‌های مختلف کاربردی شامل آبراهه، حوضه‌های آبریز، گسل، لیتولوژی و خطوط ارتفاعی، تهیه شد. سپس برای حوضه‌های استخراج شده شاخص‌های ریخت‌سنجی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δ_a)، انشعابات (R)، شکل حوضه (F_f)، تراکم زهکشی (D_d) و برجستگی نسبی (B_h) در ۱۵ حوضه زهکشی محاسبه شده و در نهایت شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (I_{af}) اندازه‌گیری شد. برای هر شاخص نقشه پهنه‌بندی فعالیت زمین‌ساختی در محدوده مورد بررسی تهیه و نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌ها پس از انجام مطالعات صحرایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جدول ۱ شاخص‌های به کار رفته در این تحقیق و نحوه عملکرد آن را نشان می‌دهد.

یمانی و همکاران (۱۳۸۹)، تأثیر زمین‌ساخت فعال بر مخروطه افکنه‌های شمال دامغان را با استفاده از شاخص‌های کمی ریخت‌سنجی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که گسل‌های منطقه در دوره کواترنری فعال بوده‌اند.

تودشکی و آراین (۲۰۱۱)، به تجزیه و تحلیل ریخت زمین‌ساخت در حوضه رودخانه قزل‌اوزن (شمال غرب ایران) با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی پرداختند، نتایج مطالعات بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که میزان فعالیت‌های زمین‌ساختی از غرب به شرق افزایش می‌یابد و مقدار کج‌شدگی زمین‌ساختی ناچیز بوده که در تطابق با روند لرزه‌خیزی منطقه است.

قنوتی (۲۰۱۴)، در پژوهشی با استفاده از داده‌های شیب، خاک، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، انحنای طولی و عرضی جریان، بارش، تراکم زهکشی، فاصله از رود و زمین‌شناسی، سیلاب شهرستان کرج را پهنه‌بندی کرده است.

از آنجا که تاکنون ارتباط بین زمین‌ساخت فعال و ریخت‌سنجی در شهرستان‌های استان مازندران به‌طور دقیق مورد مطالعه قرار نگرفته است، بنابراین بررسی این شاخص‌ها به‌منظور شناسایی تأثیر زمین‌ساخت فعال بر سکونتگاه‌های شهری و تکامل زمین‌ساختی این منطقه ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش فعالیت زمین‌ساختی و مخاطرات لرزه‌ای منطقه شیرگاه تا گلوگاه با استفاده از شاخص‌های کمی ریخت‌سنجی ناهنجاری



شکل ۱. نقشه حوضه‌ها و آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. شاخص‌های مورد سنجش در تحقیق به همراه چگونگی عملکرد هر شاخص در زمین‌ساخت فعال منطقه

عنوان شاخص	نظریه پرداز	عملکرد شاخص
شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی	Horton, 1945	هرچه میزان زمین‌ساخت فعال در یک منطقه بالاتر باشد میزان این شاخص بیشتر است.
شاخص انشعابات	Strahler, 1952	هرچه میزان زمین‌ساخت فعال در یک منطقه بالاتر باشد میزان این شاخص بیشتر است.
شاخص تراکم زهکشی	Horton, 1945	هرچه میزان زمین‌ساخت فعال در یک منطقه بالاتر باشد میزان این شاخص کمتر است.
شاخص ضریب شکل	Horton, 1945	هرچه میزان زمین‌ساخت فعال در یک منطقه بالاتر باشد میزان این شاخص کمتر است.
شاخص برجستگی نسبی	Keller & Pinter, 2002	هرچه میزان زمین‌ساخت فعال در یک منطقه بالاتر باشد میزان این شاخص بیشتر است.

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Hierarchical Anomaly Index) براساس تعداد انشعاباتی که از یک رده به رودخانه رده دو یا چند رده بالاتر از خود می‌ریزد محاسبه می‌شود و بعد از بررسی دو (یا چند) حوضه با توجه به مقادیر به‌دست آمده تفاوت میزان فعالیت زمین‌ساختی بین حوضه‌های مختلف تعیین می‌شود. برهمین اساس در یک حوضه زهکشی کوچک‌ترین انشعاب با رده ۱ مشخص می‌شود. در جایی که دو آبراهه رده ۱ به هم می‌پیوندند، یک آبراهه رده ۲ تشکیل می‌شود و به همین ترتیب این روند تا آخرین رده موجود ادامه می‌یابد. زمانی که یک آبراهه به یک رده بالاتر از خود وارد می‌شود نظم سلسله مراتبی دارد، برای مثال هر آبراهه رده ۱ که به آبراهه رده ۲ وارد شود دارای نظم سلسله مراتبی است (Horton, 1945). این شاخص به صورت ذیل (رابطه ۱) محاسبه می‌شود (Ciccacci et al., 1986):

$$H_A(i > j) = 2^{i-1} - 2^{j-1} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$H_{at} = H_A(i > j) * No.(i > j)$$

در این رابطه H_A ناهنجاری سلسله مراتبی، j رده رودخانه بالاتر و i رده رودخانه پایین‌تر و $No.(i > j)$ تعداد انشعاباتی است که از رده بالا به رده پایین می‌ریزد است. مجموع مقادیر محاسبه شده برای تمامی رده‌ها بر تعداد کل آبراهه‌های رده ۱ تقسیم می‌شود و به‌عنوان شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) هر حوضه تعیین می‌شود.

شاخص انشعابات

شاخص انشعابات (Branching Index) اطلاعات مفیدی را در مورد در مورد نحوه فعالیت فرآیندهای فرسایشی و درجه فعالیت حوضه ارائه می‌دهد، (رابطه ۲) (Guarnieri & Pirrotta, 1986):

(2008). با افزایش درجه تأثیر عوامل زمین‌ساختی در حوضه‌ها مقدار شاخص مذکور افزایش می‌یابد. این شاخص نسبت انشعابات یک رده خاص به تعداد انشعابات یک رده بالاتر است (Horton, 1945; Strahler, 1952):

$$R = R_b - R_{db} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه بالا، R شاخص انشعابات، R_b نسبت انشعابات و R_{db} نسبت مستقیم انشعابات است. نسبت انشعابات برای هر رده یک حوضه به صورت زیر به‌دست می‌آید (رابطه ۳)

$$R_b(u - u + 1) = N_u / N_{u+1} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه بالا، N_u تمام انشعابات یک رده و N_{u+1} تمام انشعابات یک رده بالاتر است. نسبت انشعابات برای هر رده آبراهه محاسبه و در نهایت به‌صورت میانگین برای یک حوضه بیان می‌شود.

نسبت انشعابات در یک حوضه با افزایش رده کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش رده در یک حوضه، تعداد آبراهه‌هایی که با پیوستن به یکدیگر رده بالاتر را ایجاد می‌کنند، افزایش می‌یابد. مقدار میانگین این نسبت برای حوضه‌های سطح ۲ و برای حوضه‌های واقع در مناطق کوهستانی بین ۳ تا ۴ می‌باشد. نسبت انشعابات پایین در حوضه‌هایی که ساختارهای زمین‌شناختی، کم‌تر تغییر کرده‌اند و الگوی زهکشی به حالت طبیعی است وجود دارد (Strahler, 1964). نسبت مستقیم انشعابات برای هر رده به‌صورت زیر (رابطه ۴) محاسبه می‌شود:

$$R_{db} = N_{du} / N_{u+1} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه بالا F_f ضریب شکل، A مساحت حوضه و L^2 مجذور طول حوضه است. طول حوضه از محل خروج آبراهه اصلی تا مرتفع‌ترین نقطه در حوضه محاسبه می‌شود. این شاخص شدت جریان در یک مساحت معین می‌باشد. هر چه مقدار ضریب فرم به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد حوضه مذکور به مربع نزدیک‌تر است و هر چه ضریب فرم کوچک‌تر از یک باشد حوزه کشیده‌تر است. حوضه‌های زهکشی در مناطق فعال از نظر زمین‌ساختی، دارای شکل کشیده‌تر می‌باشند (Bull & Mcfadden, 1977)، حوضه‌هایی با ضریب شکل بزرگ‌تر دارای دبی اوج بالا هستند (Singh et al., 2014).

شاخص برجستگی نسبی

برجستگی حوضه نقش مهمی در توسعه زهکشی، حرکت آب‌های سطحی و زیرزمینی، تراوایی، توسعه اشکال سطحی زمین و ویژگی‌های فرسایشی عوارض زمینی دارد. مقدار بالای شاخص برجستگی نسبی^۳ نشان‌دهنده شدت جریان آب، نفوذ پایین و مقدار بالای رواناب می‌باشد. برجستگی نسبی از اختلاف بین مرتفع‌ترین و پست‌ترین ارتفاعات حوضه به‌دست می‌آید و از رابطه زیر (رابطه ۷) محاسبه می‌شود (Keller & Pinter, 2002):

$$B_h = H_{\max} - H_{\min} \quad \text{رابطه ۷.}$$

در این رابطه $H_{\max}$ مقدار ارتفاع بیشینه و $H_{\min}$ مقدار ارتفاع کمینه حوضه است.

شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی

شاخص‌های ریخت‌سنجی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δ_a)، انشعابات (R_b)، شاخص تراکم زهکشی (D_d)، ضریب شکل (F_f) و برجستگی نسبی (B_h) براساس مقادیری که دارا بودند، به منظور طبقه‌بندی منطقه براساس شاخص زمین‌ساخت نسبی^۴ (I_{at}) هر شاخص به پنج رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی رده‌بندی شدند و در نهایت برای هر حوضه میانگین مقادیر رده شاخص‌های ریخت‌سنجی (S/n) اندازه‌گیری شد (جدول ۱). پس از رده‌بندی گستره مورد مطالعه براساس شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی، نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی (I_{at}) در گستره مورد مطالعه ترسیم شد.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش شرقی البرز مرکزی و در بخشی از استان مازندران با مختصات جغرافیایی ۱۸° ، $۴۸'$ ، $۵۳''$ طول

در رابطه بالا، N_{du} تعداد انشعابات یک رده است که به آبراهه‌های رده بالاتر خود می‌ریزند و $N_u + 1$ تعداد انشعابات رده بالاتر است. این نسبت، ساختمان شبکه آب سطحی را بدون در نظر گرفتن ناهنجاری سلسله مراتبی توصیف می‌کند. شاخص انشعابات و ناهنجاری سلسله مراتبی به یکدیگر وابسته‌اند و اطلاعات مفیدی در مورد درجه تکامل حوضه زهکشی ارائه می‌دهند (Guarnieri & Pirrotta, 2008).

شاخص تراکم زهکشی

تراکم زهکشی^۱ یک شاخص ریخت‌سنجی مهم برای حوضه‌هایی است که آبراهه‌های آن، بازتاب کننده فرآیندهای حاکم بر حفر چشم‌اندازها است (Schumm, 1997). تراکم زهکشی از نسبت مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه به مساحت حوضه محاسبه می‌شود (Horton, 1945) و با توجه به رابطه زیر (رابطه ۵) به‌دست می‌آید:

$$D_d = L_u / A \quad \text{رابطه ۵.}$$

در رابطه بالا L_u مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه و A مساحت حوضه می‌باشد. به طور کلی مقادیر پایین تراکم زهکشی در مناطق بسیار مقاوم و دارای مواد نفوذپذیر زیر خاک، دارای پوشش گیاهی زیاد بوده و در مناطقی که برجستگی کم است دیده می‌شود، اما مقادیر بالای تراکم زهکشی بیان‌گر آن است که منطقه شامل واحدهای سنگی با مقاومت کم یا نفوذناپذیر، با پوشش گیاهی اندک و پستی و بلندی زیاد است.

شاخص ضریب شکل

حوضه‌های آبریز از نظر ظاهری دارای شکل‌های گوناگون می‌باشند. به‌طوری‌که با مساوی بودن سایر شرایط فیزیکی دبی اوج حوضه‌های گرد بیش‌تر از حوضه‌های کشیده خواهد بود. به دلیل این که شکل حوضه تابعی از پستی و بلندی و محیط آن می‌باشد. گوناگونی زیادی در شکل حوضه‌ها دیده می‌شود و مقایسه آن‌ها را با یکدیگر مشکل می‌سازد. برای حل این مشکل از روابطی که در آن‌ها روابط ثابتی از حوضه گنجانده شده است استفاده می‌شود، از جمله این روابط می‌توان به ضریب شکل اشاره کرد. شاخص ضریب شکل^۲ با توجه به رابطه زیر (رابطه ۶) به‌دست می‌آید (Horton, 1945):

$$F_f = A / L^2 \quad \text{رابطه ۶.}$$

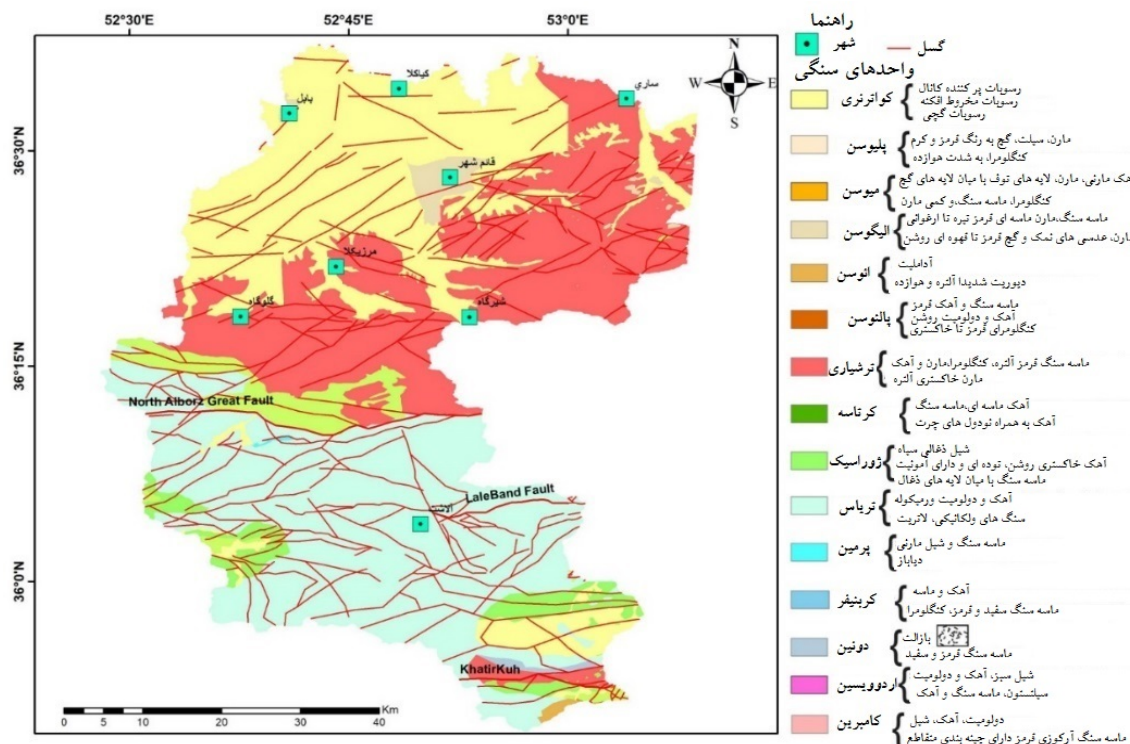
ساختاری ایران، حوضه‌های رسوبی، تشکیل کانسارهای رگه‌ای و مناطق زلزله‌خیز ایران نقش دارند. فعالیت زمین‌ساختی در پهنه البرز، به دلیل حرکت رو به شمال ایران مرکزی به سمت اوراسیا و حرکت به سمت جنوب غرب و غرب حوضه خزر جنوبی در رابطه با چرخش چپ‌گرد اوراسیا در این محدوده است. این دو سازوکار باعث ایجاد رژیم ترافشارش (با روند NNE-SSW) در البرز شده است و اعتقاد بر این است که از حدود 5 ± 2 میلیون سال قبل شروع شده و کل منطقه البرز را تحت تاثیر قرار داده است (Ritz et al., 2006). برداشت‌های GPS میزان کوتاه‌شدگی شمالی-جنوبی البرز مرکزی را 5 ± 2 میلی‌متر در سال و تغییر شکل برشی چپ‌گرد در کل پهنه البرز را 4 ± 2 میلی‌متر در سال نشان می‌دهد (Vernant et al., 2004).

گسل شمال البرز با طول ۳۰۰ کیلومتر به صورت گسلی معکوس - رانده با شیبی به سمت جنوب خاور تا جنوب باختر از علی‌آباد گرگان تا نزدیکی تنکابن گسترش داشته که از دو روند ساختاری شمال خاوری - جنوب باختری و شمال باختری - جنوب خاوری تشکیل شده است. روند کلی این گسل به موازات گسل خزر می‌باشد و در ۱۰ تا ۱۲ کیلومتری غرب چالوس به این گسل می‌پیوندد. این گسل در بخشی از طول خود مرز میان سنگ‌های مربوط به پالئوزویک (در جنوب) و کرتاسه (در شمال) را تشکیل می‌دهد. دیواره شمالی البرز به روشنی در روی زمین و نیز بر روی عکس‌های هوایی دیده می‌شود (آقاناتی، ۱۳۸۳).

شرقی، $36^{\circ}45'27''$ عرض شمالی قرار دارد و تحت تاثیر فرآیندهای زمین‌ساختی حاصل از برخورد کمربند چین‌خورده آلپ-هیمالیا قرار دارد (شکل ۲). قرارگیری ایران در کمربند چین‌خورده آلپ-هیمالیا موجب شده است که اکثر نقاط ایران از نظر زمین‌ساختی فعال باشد (Berberian & King, 1981). گستره مورد مطالعه تحت تاثیر فرآیندهای زمین‌ساختی حاصل از این برخورد است. پهنه البرز شامل مجموع صفحه‌های رانده‌ای است که به وسیله تغییر شکل حاصل از نیروی فشارشی در زمان سنوزوئیک پایانی به وجود آمده است و از زمان تریاس تا حال در طول کوه‌زایی سیمیرن و آلپین در حال نمو و گسترش است (نبوی، ۱۹۸۷).

کوه‌های البرز به عنوان یک سد بین حوضه خزر جنوبی با اقلیم مرطوب و ایران مرکزی با اقلیم نیمه‌خشک تا خشک قرار دارد. تغییر شکل در این پهنه، نتیجه یک پیشینه از فعالیت مجدد انبساطی و انقباضی ساختارهای به‌جامانده از پالئوزوئیک پایانی است که شامل باز و بسته شدن حوضه اقیانوس پالئوتتیس و باز شدن حوضه خزر جنوبی است، همسانی البرز با ایران مرکزی در دامنه جنوبی بیش‌تر است، ولی در دامنه شمالی تفاوت‌هایی دارد (Stocklin, 1968).

بسیاری از گسل‌های فعال البرز دارای امتدادی به موازات کمربند البرز و به شکل V هستند (Berberian, 1983). این بخش شامل گسل‌های اصلی و فرعی با روندهای مختلف می‌باشد. تعدادی از گسل‌های اصلی در زمین‌شناسی و منطقه



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

دارای سازوکاری معکوس با مولفه چپ‌بر می‌باشد (نبوی، ۱۳۶۶). این گسل که در گستره سمنان قرار گرفته است بیشینه جابه‌جایی شاقولی نزدیک به ۱۰۰۰ متر دارد. این گسل در بخش خاوری خود مرز میان مارن و سنگ‌ماسه‌های اتوسن و سنگ‌های سازند شمشک را ساخته و در بخش باختری، سنگ‌های پرکامبرین بالایی و پالتوزوئیک را بریده است. گسل اوریم به موازات گسل‌های الله‌آباد و شمال البرز در شمال و گسل فیروزکوه در جنوب قرار دارد. این گسل نسبت به چین‌خوردگی‌های اطراف خود به صورت طولی می‌باشد. در این بخش از البرز مرکزی تا به حال مطالعات بر روی شاخص‌های ریخت‌سنجی صورت نگرفته است یا مطالعات از پیش انجام گرفته تنها منطقه بسیار کوچکی از این بخش را شامل می‌شوند. در این پژوهش که نتیجه مطالعه بر روی آبراهه‌های سطحی منطقه با تکیه بر شاخص‌های ریخت زمین‌ساختی می‌باشد، به بررسی تاثیر گسل‌ها بر روی رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه به منظور ارزیابی فعالیت زمین‌ساخت فعال پرداخته شده است.

با توجه به قرار گرفتن رومرکز مه‌لرزه‌ای چندین زمین‌لرزه تاریخی در سده بیستم بر روی این گسل، می‌توان آن را گسلی جنب‌و‌لرزه‌خیز دانست. به اعتقاد بربریان (۱۹۹۴) زمین‌لرزه ۱۱۲۷ میلادی در گستره فریم - چهاردانگه با بزرگای $M_s = 6.8$ و شدت $VIII = +10$ حاصل فعالیت گسل شمال البرز بوده است. علاوه بر زمین‌لرزه تاریخی ۱۱۲۷ میلادی زمین‌لرزه‌های زیر نیز به این گسل نسبت داده شده است (شاه‌پسندزاده و زارع، ۱۳۷۴) (شکل ۳):

- زمین‌لرزه ۵ مارس ۱۹۳۵ میلادی (۱۵ اسفند ۱۳۱۳ هجری

شمسی) شیرگاه؛

- زمین‌لرزه ۲ ژوئیه ۱۹۵۷ میلادی (۱۱ تیر ۱۳۳۶ هجری

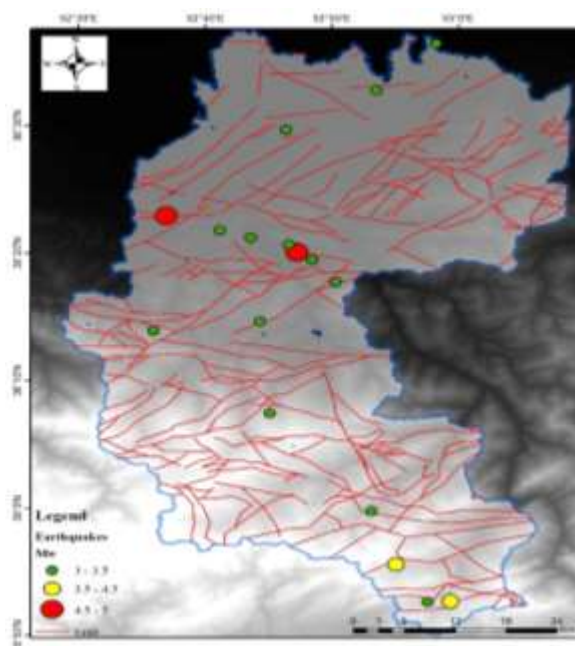
شمسی) بندپی مازندران؛

- زمین‌لرزه ۱۳۰۱ میلادی گلوگاه با بزرگای $M_s = 6.7$ و شدت

$VIII = +10$

گسل اوریم (خطیرکوه) با طول حدود ۶۴ کیلومتر و راستای

شمال خاوری - جنوب باختری و شیب به سوی شمال خاور



شکل ۳. نقشه کانون زمین‌لرزه‌های گستره مورد مطالعه

پایین در هنگام مواجهه با عوامل افزایش دهنده زمین‌ساخت مانند گسل‌های فعال به رودخانه‌هایی با درجاتی حداقل دو برابر بیش‌تر از حد معمول می‌ریزند.

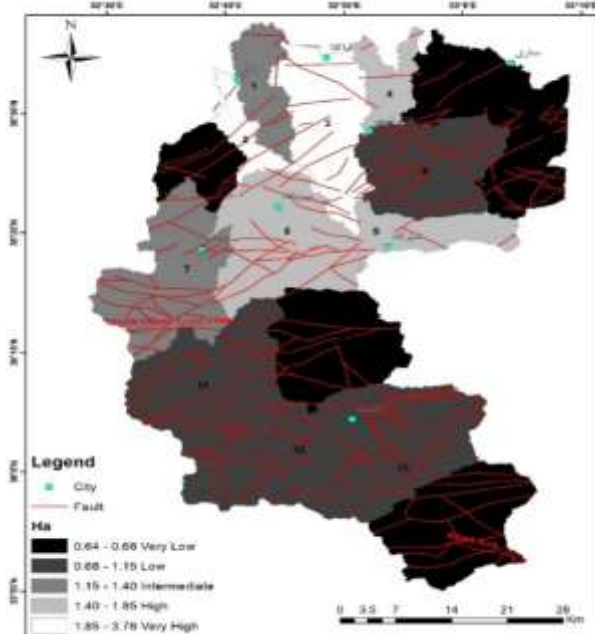
شاخص مذکور به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به پنج رده طبقه‌بندی شده است: رده ۱ مقادیر بین ۳/۷۶ تا ۱/۸۵ ($1/85 < H_A < 3/76$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا، رده ۲ مقادیر بین ۱/۸۵ تا ۱/۴۰ ($1/40 < H_A < 1/85$) دارای فعالیت

یافته‌ها

تحلیل شاخص ناهنجاری سلسه مراتبی

براساس محاسبات صورت گرفته در خصوص شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی زیرحوضه‌های ۲، ۳، ۴، ۸ و ۹ بیش‌ترین میزان این شاخص و زیرحوضه‌های ۵، ۱۰، ۱۴ و ۱۵ کم‌ترین میزان این شاخص را دارا می‌باشند (شکل ۴). به این معنی که هرچه میزان زمین‌ساخت فعال در یک منطقه بالاتر باشد آبراهه‌های درجه

زمین‌ساختی بالا و رده ۳ شامل مقادیر بین $1/40$ تا $1/15$ ($1/15 < H_A < 1/40$) دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۴ شامل مقادیر بین $1/15$ تا $0/68$ ($0/68 < H_A < 1/15$) دارای فعالیت زمین‌ساختی کم و رده ۵ شامل مقادیر بین $0/68$ تا $0/64$ ($0/64 < H_A < 0/68$) می‌باشند.

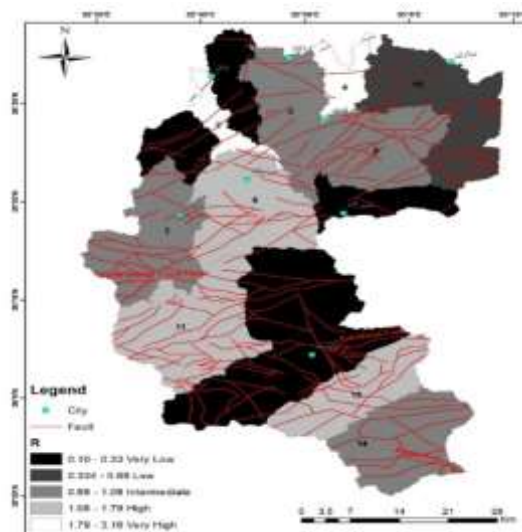


شکل ۴. نقشه شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی در زیرحوضه‌های گستره مورد مطالعه

تحلیل شاخص انشعابات

مقادیر بین $1/79$ تا $1/08$ ($1/08 < R_b < 1/79$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا و رده ۳ شامل مقادیر بین $1/08$ تا $0/69$ ($0/69 < R_b < 1/08$) دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۴ شامل مقادیر بین $0/69$ تا $0/33$ ($0/33 < R_b < 0/69$) دارای فعالیت زمین‌ساختی کم و رده ۵ شامل مقادیر بین $0/33$ تا $0/10$ ($0/10 < R_b < 0/33$) می‌باشند.

زیرحوضه‌های شماره ۱، ۵، ۹، ۱۰ و ۱۲ کم‌ترین و زیرحوضه‌های شماره ۲، ۴، ۸، ۱۱ و ۱۳ که در امتداد گسل شمال البرز هستند نیز بیش‌ترین میزان از این شاخص را دارا می‌باشند. (شکل ۵). شاخص مذکور به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به پنج رده طبقه‌بندی شده است: رده ۱ مقادیر بین $3/16$ تا $1/79$ ($1/79 < R_b < 3/16$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا، رده ۲



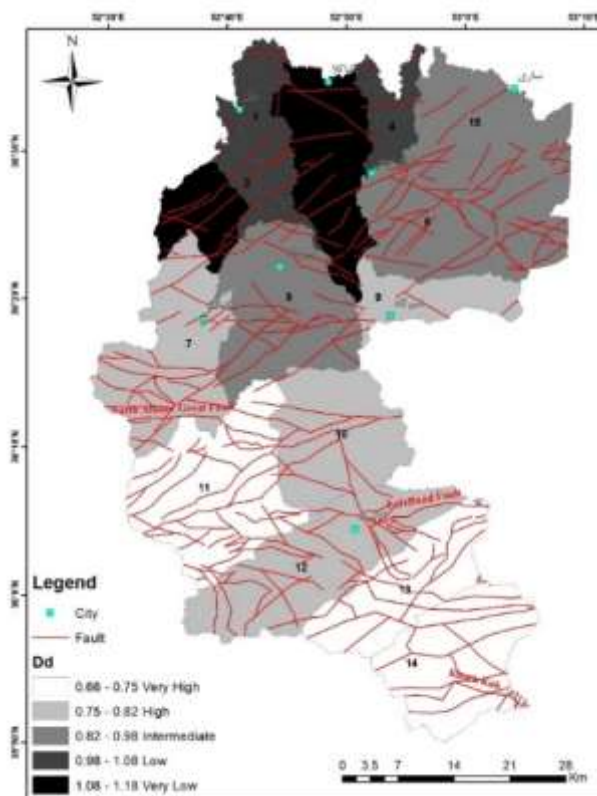
شکل ۵. نقشه شاخص انشعابات در زیرحوضه‌های گستره مورد مطالعه

تحلیل شاخص تراکم زهکشی

براساس اطلاعات به‌دست آمده از این شاخص زیرحوضه‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۴ که در امتداد گسل‌های دزدین و مرزن‌آباد هستند، بیش‌ترین میزان از این شاخص و زیرحوضه‌های ۳ و ۵ کم‌ترین میزان را دارا می‌باشند (شکل ۶). هرچه شاخص تراکم زهکشی در یک زیرحوضه بیش‌تر باشد، رودخانه‌ها متراکم‌تر و تعداد آن‌ها بیش‌تر است که یکی از دلایل آن می‌تواند سطح بالایی از میزان فعالیت‌های زمین‌ساختی باشد.

شاخص مذکور به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به پنج رده طبقه‌بندی شده است: رده ۱ مقادیر بین ۰/۷۵ تا ۰/۶۶.

($0/75 < D_d < 0/66$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا، رده ۲ مقادیر بین ۰/۸۲ تا ۰/۷۵ ($0/82 < D_d < 0/75$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا و رده ۳ شامل مقادیر بین ۰/۹۸ تا ۰/۸۲ ($0/98 < D_d < 0/82$) دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۴ شامل مقادیر بین ۱/۰۸ تا ۰/۹۸ ($1/08 < D_d < 0/98$) دارای فعالیت زمین‌ساختی کم و رده ۵ شامل مقادیر بین ۱/۸ تا ۱/۰۸ ($1/8 < D_d < 1/08$) دارای فعالیت زمین‌ساختی خیلی کم می‌باشند.



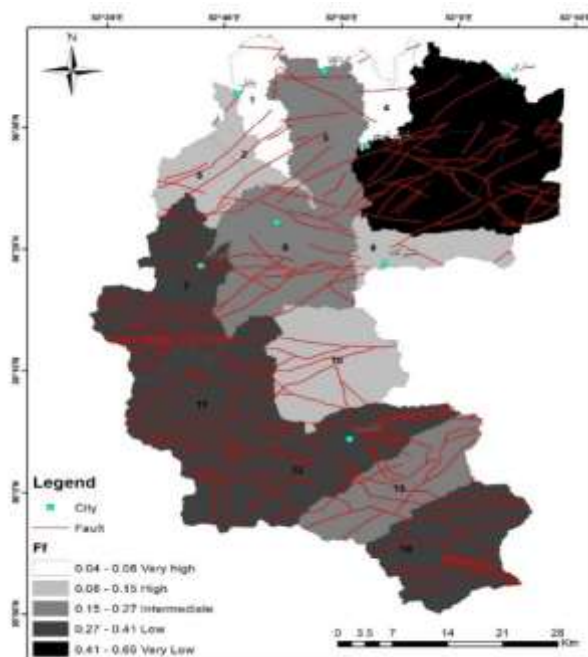
شکل ۶. نقشه شاخص تراکم زهکشی در زیرحوضه‌های گستره مورد مطالعه

تحلیل شاخص ضریب شکل

براساس اطلاعات به‌دست آمده از این شاخص زیرحوضه‌های شماره ۱، ۲، ۴، ۵، ۹ و ۱۰ بیش‌ترین میزان و زیرحوضه ۱۵ کم‌ترین میزان از این شاخص را دارا می‌باشند (شکل ۷). بنابراین شکل زیرحوضه‌هایی همانند ۱ و ۴ کشیده‌تر از زیرحوضه‌های دیگر و نسبت طول به عرض این زیرحوضه‌ها بیش‌تر است که این خود می‌تواند یکی از دلایل فعالیت زمین‌ساختی بالا باشد.

شاخص مذکور به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به پنج رده طبقه‌بندی شده است: رده ۱ مقادیر بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۸.

($0/04 < F_f < 0/08$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا، رده ۲ مقادیر بین ۰/۱۵ تا ۰/۰۸ ($0/15 < F_f < 0/08$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا و رده ۳ شامل مقادیر بین ۰/۲۷ تا ۰/۱۵ ($0/27 < F_f < 0/15$) دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۴ شامل مقادیر بین ۰/۴۱ تا ۰/۲۷ ($0/41 < F_f < 0/27$) دارای فعالیت زمین‌ساختی کم و رده ۵ شامل مقادیر بین ۰/۶۵ تا ۰/۴۱ ($0/65 < F_f < 0/41$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار کم می‌باشند.

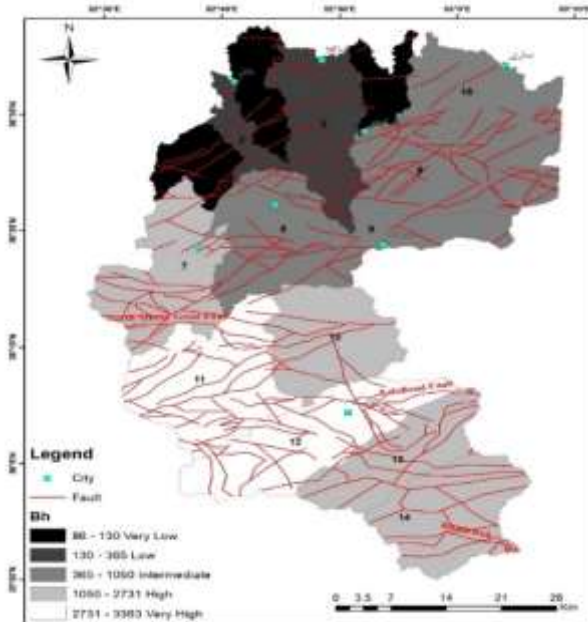


شکل ۷. نقشه شاخص ضریب شکل در زیرحوضه‌های گستره مورد مطالعه

تحلیل شاخص برجستگی نسبی

براساس اطلاعات حاصل از محاسبات این شاخص زیرحوضه‌های شماره ۱، ۴ و ۵ کم‌ترین میزان از شاخص برجستگی نسبی و زیرحوضه‌های ۱۱ و ۱۲ بیش‌ترین میزان از این شاخص را دارا می‌باشند (شکل ۸). یعنی در زیرحوضه‌های شماره ۱۱ و ۱۲ ارتفاعات خشن و بلند در کنار ارتفاعات بسیار کم مانند دره‌های تنگ قرار گرفته است، که این امر خود دلیلی بر اثبات وجود زمین‌ساخت فعال در یک منطقه است.

شاخص مذکور به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به پنج رده طبقه‌بندی شده است: رده ۱ مقادیر بین ۳۳۶۳ تا ۲۷۳۱ ($2731 < B_h < 3363$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا، رده ۲ مقادیر بین ۲۷۳۱ تا ۱۰۵۰ ($1050 < B_h < 2731$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا و رده ۳ شامل مقادیر بین ۱۰۵۰ تا ۳۶۵ ($365 < B_h < 1050$) دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۴ شامل مقادیر بین ۳۶۵ تا ۱۳۰ ($130 < B_h < 365$) دارای فعالیت زمین‌ساختی کم و رده ۵ شامل مقادیر بین ۱۳۰ تا ۸۶ ($86 < B_h < 130$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار کم می‌باشند.



شکل ۸. نقشه شاخص برجستگی نسبی در زیرحوضه‌های گستره مورد مطالعه

ارائه الگوی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی

با استفاده از نتایج حاصل از محاسبات شاخص‌های ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δ_a)، انشعابات (R)، شکل حوضه (F_f)، تراکم زهکشی (D_d) و برجستگی نسبی (B_h) در ۱۵ حوضه زهکشی

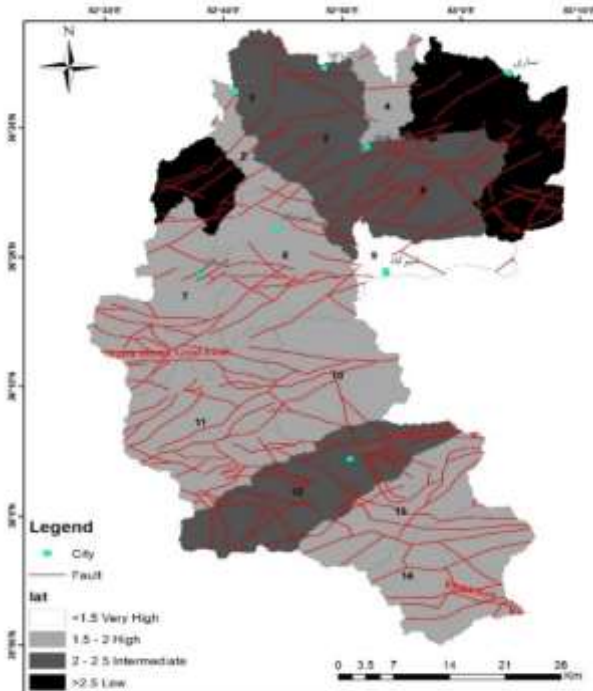
(جدول ۲)، می‌توان الگوی زمین‌ساخت فعال شهرستان‌های استان مازندران را با استفاده از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (I_{at})، با تاکید بر وضعیت مناطق مسکونی شیرگاه تا گلوگاه، را ارایه داد. این الگو نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی اخیر در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۲. محاسبات به‌دست آمده از شاخص‌های هر حوضه و رده‌بندی I_{at}

شماره حوضه	I_{at}	رده‌بندی					شاخص‌ها					زمین‌ساخت فعال نسبی
		B_h	R	D_d	F_f	H_a	B_h	R	D_d	F_f	H_a	
۱	۲/۴	۳	۳	۳	۱	۲	۸۶	-۰/۳۳۳	-۰/۰۰۹	-۰/۳۱۲	۱/۴۰۹	۲
۲	۱/۸	۳	۱	۳	۱	۱	۳۳۱	۲/۳۳۳	۱/۰۸۷	-۰/۳۱۹	۳/۷۶۰	۲
۳	۲/۲	۳	۲	۳	۲	۱	۳۶۵	-۰/۹۱۷	-۰/۰۰۲	-۰/۲۲۶	۳/۵۵۶	۲
۴	۱/۸	۳	۱	۳	۱	۱	۹۱	۳/۱۶۷	۱/۰۶۰	-۰/۳۲۲	۱/۶۸۰	۲
۵	۲/۶	۳	۳	۳	۱	۳	۱۳۰	-۰/۲۹۲	-۰/۰۰۵	-۰/۳۰۸	-۰/۰۰۷	۲
۶	۲/۴	۲	۲	۲	۳	۳	۷۳۲	۱/۰۲۱	-۰/۹۷۱	-۰/۲۵۰	۱/۱۵۲	۲
۷	۱/۸	۱	۲	۱	۳	۲	۲۲۸۱	۱/۰۱۶	-۰/۸۱۷	-۰/۳۱۲	۱/۲۶۰	۲
۸	۱/۶	۲	۱	۲	۲	۱	۱۰۵۰	۱/۷۹۶	۱/۸۸۳	-۰/۲۵۱	۱/۸۵۳	۲
۹	۱/۴	۱	۳	۱	۱	۱	۸۷۷	-۰/۱۰۸	-۰/۰۰۵	-۰/۳۵۸	۱/۵۸۸	۱
۱۰	۱/۸	۱	۳	۱	۱	۳	۲۷۰۰	-۰/۳۰۷	-۰/۰۰۶	-۰/۳۰۸	-۰/۰۰۷	۲
۱۱	۱/۸	۱	۱	۱	۳	۳	۳۳۶۳	۱/۳۷۷	۱/۶۶۶	-۰/۳۱۵	۱/۰۲۱	۲
۱۲	۲/۲	۱	۳	۱	۳	۳	۳۳۴۸	۱/۱۶۲	-۰/۰۰۴	-۰/۴۱۰	-۰/۹۴۷	۲
۱۳	۱/۶	۱	۱	۱	۲	۳	۲۷۳۱	۱/۲۹۶	۱/۷۵۴	-۰/۲۷۶	۱/۰۴۴	۲
۱۴	۲	۱	۲	۱	۳	۳	۲۶۶۳	۱/۰۸۳	-۰/۷۵۴	-۰/۳۲۵	-۰/۰۰۲	۲
۱۵	۲/۶	۲	۳	۲	۳	۳	۹۰۲	-۰/۶۹۴	۱/۹۸۶	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۱	۳

براساس محاسبات حاصل از این شاخص، زیرحوضه‌های شماره ۱، ۸، ۱۴ و ۹ که در امتداد گسل‌های شمال البرز و خطیرکوه هستند بیش‌ترین میزان از شاخص زمین‌ساخت فعال

نسبی را دارا می‌باشند. بنابراین الگوی کلی و نهایی و پهنه‌بندی مخاطرات زمین‌ساخت فعال شهرستان‌های استان مازندران به شکل زیر ارائه می‌شود (شکل ۹):



شکل ۹. الگوی زمین‌ساخت فعال شهرستان‌های استان مازندران با استفاده از شاخص‌های ریخت زمین‌ساختی

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش تدوین الگوی کالبدی شهرستان‌های استان مازندران با تاکید بر شهرستان‌های شیرگاه - گلوگاه با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی زمین‌ساخت فعال است. مخاطرات ریخت زمین‌ساختی از مخاطرات محیطی می‌باشند که در سراسر جهان باعث اختلال جدی در فعالیت‌های انسانی می‌شوند. در سال‌های اخیر شناخت مناطق مخاطره‌آمیز و دارای پتانسیل خطر افزایش یافته و راهکارهای ریخت زمین‌ساختی برای حل مسائل محیطی توسعه یافته است. از آنجا که در مناطق شهری بین شیرگاه - گلوگاه تاکنون مطالعات ریخت‌سنجی انجام نشده است، لذا ارزیابی زمین‌ساخت فعال این مناطق بر اساس بررسی‌های ریخت‌سنجی ضروری به نظر می‌رسد و نتایج این تحقیق می‌تواند برای برنامه‌ریزان شهری در این ناحیه مفید واقع شود.

نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با برخی از شاخص‌های مشابه در تحقیقات سایر پژوهشگران که میزان زمین‌ساخت یک منطقه را براساس شاخص‌های ریخت‌سنجی مورد مطالعه قرار داده‌اند، همسویی دارد. از جمله این پژوهشگران می‌توان به علیزاده و خلج (۱۳۹۹)، مصدق‌زاده و همکاران (۱۴۰۱)، مقصودی و همکاران (۱۳۹۶)، مابقی و حسین‌زاده (۱۳۹۶)، محمدی و همکاران (۱۳۹۶)، تودشکی و آراین (۲۰۱۱)، گارسیا و والندیا (۲۰۲۰) اشاره کرد. البته برخی از شاخص‌های کمی ریخت‌سنجی این پژوهشگران، با شاخص‌های به کار برده شده در این تحقیق تفاوت دارد؛ ضمناً برخی از این پژوهشگران در مطالعات ریخت زمین‌ساختی، علاوه بر شاخص‌های کمی از شاخص‌های کیفی نیز استفاده کرده‌اند، اما در شاخص‌های ریخت‌سنجی مشابه با شاخص‌های این تحقیق، برای نتیجه‌گیری از همان روش تحقیق و همان نتایجی که در این پژوهش به آن‌ها استناد شده است، استفاده کرده‌اند.

شهرستان‌های شیرگاه - گلوگاه با توجه به نتایج حاصل از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی و بر پایه نقشه پهنه‌بندی این شاخص، به دلیل فعالیت بخش‌هایی از گسل شمال البرز، گسل اوریم، گسل الله‌آباد و گسل فیروزکوه، رده فعالیت زمین‌ساختی بالا را دارا هستند. سایر محققانی که شاخص‌های ریخت‌سنجی را در مطالعات زمین‌ساخت فعال به کار برده‌اند، از جمله (Giaconia et al., 2012)، (Latrubesse, 2010)، (Perez Pena, 2009)، (Walker et al., 2006) با به‌دست آوردن مقادیر مشابه در شاخص‌های مشابه با این تحقیق و تحلیل آن در شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی، برای پهنه‌بندی منطقه مورد بررسی خود، به نتیجه‌ای دست یافته‌اند که در این تحقیق برای

فعالیت زمین‌ساخت فعال سکونتگاه‌های بین شیرگاه تا گلوگاه پیشنهاد شده است.

تفاوت در وضعیت زمین‌شناسی هر منطقه نسبت به مناطق دیگر موجب می‌شود که برخی از مناطق برای به کارگیری نوع خاصی از شاخص‌ها مناسب‌تر از شاخص‌های دیگر باشند. وضعیت زمین‌شناسی سکونتگاه‌های بین شیرگاه تا گلوگاه موجب شد برخی از شاخص‌های کمی ریخت‌سنجی مانند شاخص‌های نسبت پیشانی کوهستان در این منطقه به خوبی قابل اندازه‌گیری نباشند، بنابراین از به کارگیری چنین شاخص‌هایی خودداری شد.

با محاسبات صورت گرفته در رابطه با شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی و مقایسه آن با دیگر شاخص‌های محاسبه شده، مشخص شد که زیرحوضه‌های شماره ۱، ۸، ۱۴ و ۹ که تحت تاثیر فعالیت گسل‌های شمال البرز و خطیرکوه می‌باشند، شاخص بالا را نمایش می‌دهند. گسل‌های فرعی دیگری که در اثر بالا بودن فعالیت زمین‌ساختی در منطقه شکل گرفته‌اند، تاثیر به‌سزایی بر افزایش میزان شاخص‌های ریخت زمین‌ساختی گذاشته و سبب شده‌اند که در برخی زیرحوضه‌ها میزان شاخص‌های بالا و یا بسیار بالا پدیدار شود.

نتایج حاصل از این پژوهش با تکیه بر شاخص‌های ریخت‌سنجی نشان می‌دهد که اکثر شهرستان‌های استان مازندران از جمله مناطق مسکونی از شیرگاه تا گلوگاه منطبق بر گسل‌های شمال البرز، خطیرکوه، دزدبن و مرزن‌آباد، دارای شاخص‌های ریخت‌سنجی بالا و بسیار بالا هستند که به دلیل تاثیر گسل‌های مذکور می‌باشد. حدود ۳۳/۳ درصد از منطقه که تحت سیطره فعالیت این گسل‌ها می‌باشد. علاوه بر گسل‌های اصلی، گسل‌های فرعی دیگری که در اثر حرکات زمین‌ساختی اخیر تشکیل شده‌اند، فعالیت زمین‌ساختی متوسط به بالایی را ارائه می‌دهند. قرارگیری این سکونتگاه‌ها در مجاورت این گسل‌ها سبب شده است که ریسک لرزه‌خیزی منطقه نیز افزایش یابد.

شهرستان‌های بین شیرگاه تا گلوگاه دارای امکانات اقتصادی، اجتماعی، صنعتی و سیاسی است و به لحاظ جمعیت چندین میلیونی، با وجود گسل‌های متعدد فعال در مناطق مختلف خود، جریان حیاتی آسیب‌پذیر، بافت‌های شهری و ساخت و ساز بی‌رویه، به شدت در معرض آسیب‌های جبران‌ناپذیر است. تا زمانی که ساخت و سازها براساس اصول مهندسی نباشد و حریم گسل‌ها رعایت نشود و سازها بر روی مناطق دارای مخاطرات لرزه‌ای بنا شود، باید منتظر وقایع ناگوار در ابعاد وسیع بود. به دلیل وجود تاریخچه‌ای مبنی بر وجود زمین‌لرزه در این منطقه و اثبات فعال بودن منطقه از نظر زمین‌ساختی، باید در ساخت زیربنای عمرانی، مقوله مخاطرات حاصل از زمین‌لرزه‌ها مورد توجه قرار گیرد.

راهکارها

✓ تعیین و ترسیم نقشه میزان شدت یا میرایی امواج لرزه‌ای در سراسر منطقه مورد مطالعه؛

✓ تعیین و رعایت ضرایب مقاومت و پایداری در برابر زلزله در سراسر منطقه مورد مطالعه هنگام ساخت و ساز؛

✓ مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و سازه‌های مهم مانند پل‌ها و بزرگراه‌ها و بازسازی بافت‌های فرسوده براساس داده‌های PGA

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش و به‌دلیل آن که اکثر مناطق مورد بررسی دارای مخاطرات لرزه‌ای است راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

✓ تعیین نحوه ارتباط عمقی کلبه گسل‌های منطقه مورد با مطالعات دقیق ژئوفیزیکی؛

✓ تعیین مخاطرات لرزه‌ای منطقه شیرگاه گلوگاه با سایر شاخص‌های زمین‌ساخت فعال؛

References

- Agha Nabati, A. (2013). *Geology of Iran* (1st ed.). Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. (In Persian). <https://ketab.ir/Book/223AB130-D2C7-41CD-9A06-70F789032A27>
- Alcántara-Ayala, I., & Goudie, A. S. (2010). *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Cambridge University Press. http://www.geomorph.org/wp-content/uploads/2015/06/9780521769259_GeomHazards.pdf
- Alizadeh, H., & Khalaj, M. (2021). Assessment of active tectonic activities in the New Pardis City based on morphotectonic indexes. *Tectonics Quarterly*, 4(16), 1–23. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/jt.2021.3730.1089>
- Berberian, M. (1983). The southern Caspian: A compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(2), 163–183. <https://doi.org/10.1139/e83-015>
- Berberian, M. (1994). *Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran: Historical hazards in Iran prior to 1900* (Vol. 1). International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Bull, W. B., & McFadden, L. D. (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In D. O. Doehring (Ed.), *Geomorphology in arid regions* (pp. 115–138). State University of New York at Binghamton. <https://doi.org/10.4324/9780429299230-5>
- Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., & Pugliese, F. (1986). Indirect evaluation of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters. *International Geomorphology*, 22(3), 233–248. <https://doi.org/10.13140/2.1.3909.1843>
- Ebadolazadeh Maleki, F., Saeedeh Zarabadi, Z. S., Pir, S., & Farzad Behtash, M. (2021). Interpretive structural model of the resilience threshold of urban spaces against earthquakes with a socio-ecological approach (Case study: Zanjan city). *Journal of Urban Ecology Research*, 12(24), 97–116. (In Persian). <https://doi.org/10.30473/grup.2021.8658>
- García, H., Delgado, F., & Velandia, F. (2020). Tectonic geomorphology of the Serranía de San Lucas (Central Cordillera): Regional implications for active tectonics and drainage rearrangement in the Northern Andes. *Geomorphology*, 349, Article 106914. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106914>
- Ghanavati, E. (2012). Flood risk zoning of Karaj using fuzzy logic model. *Geography and Environmental Hazards*, 1(3), 33–49. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.27924>
- Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J. M., Azañón, J. M., Pérez-Peña, J. V., Pérez-Romero, J., & Villegas, I. (2012). Geomorphic evidence of active tectonics in the Sierra Alhamilla (eastern Betics, SE Spain). *Geomorphology*, 145–146, 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.043>
- Guarnieri, P., & Pirrotta, C. (2008). The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95(3–4), 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.013>
- Hekmatnia, H., Pakgohar, A., & Bagheri Kashkouli, A. (2021). Achieving sustainable housing with the approach of analyzing physical, social and economic indicators (Case study: Sirjan city). *Journal of Urban Ecology Research*, 12(3), 1–18. (In Persian). <https://doi.org/10.30473/grup.2021.7852>

- Holbrook, J., & Schumm, S. A. (1999). Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: A brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics*, 305(1–3), 287–306. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00011-6)
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active tectonics: Earthquakes, uplift, and landscape* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Keller, E. A., Zepeda, R. L., Rockwell, T. K., & Dinklage, W. S. (1998). Active tectonics at Wheeler Ridge, southern San Joaquin Valley, California. *Geological Society of America Bulletin*, 110(3), 298–310. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1998\)110<0298:ATAWRS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0298:ATAWRS>2.3.CO;2)
- Latrubesse, E. M. (Ed.). (2010). *Natural hazards and human-exacerbated disasters in Latin America*. Elsevier.
- Mabghi, S. A., & Hosseinzadeh, S. R. (2016). Tectonic-geomorphological analysis of Darokhan River Basin. *Geography and Development*, 14(44), 163–188. (In Persian). https://gdij.usb.ac.ir/article_3458.html
- Maqsoudi, M., Zamanzadeh, S. M., Yamani, M., & Hajizadeh, A. (2017). Active tectonic investigation of Marun catchment basin using geomorphic indicators. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(3), 37–59. (In Persian).
- Marsousi, N., & Asadoullahtabar, N. (2024). Evaluation of the stability of the cities of Mazandaran Province during the years 2006 and 2021. *Journal of Urban Ecology Research*, 15(2), 163–184. (In Persian). <https://doi.org/10.30473/grup.2024.68563.2798>
- Mohammadi, S. D., Jalali, S. H., & Saedi, B. (2017). Evaluation of relative active tectonics in Hamadan watershed using landslide and seismicity indicators. *Quantitative Geomorphological Research*, 5(4), 190–207. (In Persian).
- Mossadeghzadeh, E., Dehboorgi, M., & Hakimi-Asiaber, S. (2020). Tectonic investigation of the geomorphology of East Ramsar, North Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 65–86.
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active tectonics: Earthquakes, uplift, and landscape* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Keller, E. A., Zepeda, R. L., Rockwell, T. K., & Dinklage, W. S. (1998). Active tectonics at Wheeler Ridge, southern San Joaquin Valley, California. *Geological Society of America Bulletin*, 110(3), 298–310. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1998\)110<0298:ATAWRS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0298:ATAWRS>2.3.CO;2)
- Latrubesse, E. M. (Ed.). (2010). *Natural hazards and human-exacerbated disasters in Latin America*. Elsevier.
- Mabghi, S. A., & Hosseinzadeh, S. R. (2016). Tectonic-geomorphological analysis of Darokhan River Basin. *Geography and Development*, 14(44), 163–188. (In Persian). https://gdij.usb.ac.ir/article_3458.html
- Maqsoudi, M., Zamanzadeh, S. M., Yamani, M., & Hajizadeh, A. (2017). Active tectonic investigation of Marun catchment basin using geomorphic indicators. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(3), 37–59. (In Persian).
- Marsousi, N., & Asadoullahtabar, N. (2024). Evaluation of the stability of the cities of Mazandaran Province during the years 2006 and 2021. *Journal of Urban Ecology Research*, 15(2), 163–184. (In Persian). <https://doi.org/10.30473/grup.2024.68563.2798>
- Mohammadi, S. D., Jalali, S. H., & Saedi, B. (2017). Evaluation of relative active tectonics in Hamadan watershed using landslide and seismicity indicators. *Quantitative Geomorphological Research*, 5(4), 190–207. (In Persian).
- Mossadeghzadeh, E., Dehboorgi, M., & Hakimi-Asiaber, S. (2020). Tectonic investigation of the geomorphology of East Ramsar, North Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 65–86.
- Shahpasandzadeh, M., & Zare, M. (1995). *Preliminary study of seismicity and tectonic earthquakes and the risk of earthquakes and faults in Mazandaran province* [Technical Report]. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology. (In Persian)
- Shaterian, M., Gholami, Y., Hosseini, S. A., & Khalaji, N. (2024). Analysis of economic, social and physical factors affecting urban regeneration (Case study: Central texture of Kashan). *Journal of*

- Urban Ecology Research, 14(4), 85–102. (In Persian).
<https://doi.org/10.30473/grup.2023.35858.1995>
- Singh, P., Gupta, A., & Singh, M. (2014). Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 17(2), 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.09.003>
- Stocklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: A review. *AAPG Bulletin*, 52(7), 1229–1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In V. T. Chow (Ed.), *Handbook of applied hydrology* (pp. 4-39–4-76). McGraw-Hill.
- Toudeshki, V. H., & Arian, M. (2011). Morphotectonic analysis in the Ghezel Ozan River Basin, NW Iran. *Journal of Geography and Geology*, 3(1), 258–268. <https://doi.org/10.5539/jgg.v3n1p258>
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., & Chéry, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, 157(1), 381–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>
- Walker, R. T. (2006). A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran. *Journal of Structural Geology*, 28(4), 654–668. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.12.014>
- Yamani, M., Kamrani-Dalir, H., & Bagheri, S. (2009). Morphometry and evaluation of geomorphic indicators to determine the amount of new land construction activity in Abriz Chele basin (Northwestern Zagros). *Quarterly Journal of Geographical Research*, 24(4), 1–26. (In Persian)