



Morphometric Asymmetry of the Dena Mountains along the Main Zagros Thrust: The Controlling Role of Subsurface Structures on Surface Topography

Gholam Hassan Jafari ^{1*}

¹ Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Yasouj, Yasouj, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 31 December 2025

Revised: 13 April 2026

Accepted: 15 April 2026

Available Online:

22 April 2026

Keywords:

Dena Mountains

Zagros Fold–Thrust Belt

Morphometric Asymmetry

Subsurface Structural
Control

Surface Topography
Evolution

The Zagros Mountains represent one of the most tectonically active orogenic belts worldwide, exhibiting pronounced morphological asymmetry between their southwestern and northeastern flanks. This study presents a quantitative analysis of topographic relief across both flanks using a high-resolution (12.5 m) digital elevation model (DEM). Over 200 longitudinal profiles and transverse cross-sections were extracted and fitted with linear and polynomial regression models. Key morphometric indices—including effective slope, coefficient of determination (R^2), and curvature trend (convex vs. concave)—were systematically analyzed. Results show the southwestern flank has a steeper effective slope (0.46–0.51), deeply incised concave upper profiles shaped by glacial erosion amplified by structural steepness, and morphological instability in lower segments due to intense fluvial and mass-wasting processes. In contrast, the northeastern flank displays gentler slopes (0.27–0.46), predominantly linear or convex profiles, and greater morphological stability. Although Quaternary glaciation influenced elevations above 3700 m on both flanks, the final morphology of cirques and glacial benches is structurally controlled: gentle convex platforms dominate the structurally concordant northeastern flank, whereas steep, U-shaped valleys characterize the discordant southwestern flank. These findings confirm that subsurface structures—particularly the Main Zagros Thrust and bedrock dip orientation—primarily govern surface topography, with surface processes operating within a tectonically defined framework. This study provides a robust quantitative methodology for analyzing tectonics–erosion interactions in young orogens, transferable to other active mountain belts globally.

* Corresponding author: Gholam Hassan Jafari

E-mail address: jafarihas@znu.ac.ir

How to cite this article: Jafari, G. H. (2026). Morphometric Asymmetry of the Dena Mountains along the Main Zagros Thrust: The Controlling Role of Subsurface Structures on Surface Topography. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoe.2026.97282.1637>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

The Zagros Mountains, formed by the ongoing collision between the Arabian and Eurasian plates, constitute one of the most tectonically active orogenic belts on Earth. A striking morphological asymmetry characterizes this range: the southwestern flank—adjacent to the Main Zagros Thrust—exhibits steep, dynamic topography, whereas the northeastern flank—dipping in harmony with sedimentary strata—displays gentler, more extended slopes. Although numerous studies have addressed the tectonics and geomorphology of the Zagros, a critical research gap persists in the systematic, quantitative analysis of morphometric differences between these two flanks at elevations above 3,000 m, where Quaternary glacial processes and active tectonics interact simultaneously. This study aims to address this gap by testing the hypothesis that the observed topographic asymmetry directly reflects the geometry and activity of subsurface structures.

Material and Methods

The study area is located in the central-southern part of the Zagros heights and spans the provinces of Isfahan, Chaharmahal and Bakhtiari, and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad. This region includes part of the Dena Mountains, one of the most significant and prominent morphological structures in the southern fold belt of the Zagros. The geographical coordinates of the area are precisely: latitude from 30° 40' to 31° 10' north and longitude from 51° 20' to 51° 40' east.

We employed a high-resolution (12.5 m) digital elevation model (DEM), processed in Global Mapper, to extract and analyze topographic profiles across the Dena Mountains in the Central Zagros. Over 200 longitudinal profiles were categorized into three groups: (1) northeastern flank profiles (facing the Iranian Plateau), (2) southwestern flank profiles (adjacent to the Main Zagros Thrust), and (3) valley-aligned profiles on both flanks. Additionally, transverse cross-sections perpendicular to the mountain trend were generated. For each profile, elevation data were exported as numerical series and statistically analyzed in Microsoft Excel. Linear regressions were first fitted to each profile, and the coefficient of determination (R^2) was calculated. Where R^2 fell below 0.95, polynomial models (degrees 2–6) were applied to improve fit quality. Key morphometric parameters—including effective slope, horizontal length, relative relief, and curvature behavior (convex vs. concave)—were systematically compared between flanks.

Results and Discussion

All profiles consistently reveal a pronounced morphological asymmetry: the southwestern flank displays steeper effective slopes (0.46–0.51), while the northeastern flank exhibits gentler gradients (0.27–0.46) and longer horizontal extents. Above 3,700 m, glacial landforms—such as cirques and glacial benches are present on both flanks. However, their final morphology is structurally controlled: on the structurally concordant northeastern flank, cirques manifest as broad, convex platforms; in contrast, the structurally discordant southwestern flank hosts deep, U-shaped valleys with steep, glacially sculpted walls. The coefficient of determination (R^2) is consistently higher on the northeastern flank (0.970–0.998) than on the southwestern flank (0.900–0.990), indicating greater morphological stability and homogeneity. Conversely, the southwestern flank shows greater R^2 dispersion and curvature oscillations, reflecting high geomorphic dynamism and rapid response to tectonic forcing.

These findings align with established structural models of the Zagros. According to the thick-skinned wedge model (Mouthereau et al., 2006) and the blind thrust framework (Berberian, 1995), focused crustal shortening along the Main Zagros Thrust generates steep, unstable topography on the southwestern flank, while the northeastern flank—acting as the upper surface of the tectonic wedge—retains relatively stable, gently sloping forms. Thus, even under similar surface processes (e.g., glacial erosion), structural geometry dictates the expression of topography.

Conclusion

This study provides robust quantitative evidence for deep-seated structural control over surface topography in the Zagros Mountains. The morphometric asymmetry between the two flanks is not merely a surface geomorphological feature but a direct expression of contrasting tectonic settings: the

active collisional front along the southwestern side versus the relatively stable hinterland domain in the northeast. These findings reinforce the theoretical framework of structural control on surface morphology in young orogenic belts and demonstrate that geomorphic analyses cannot fully explain landscape evolution without considering underlying structural geology. Methodologically, the quantitative approach employed in this study—based on fitting mathematical relationships to longitudinal profiles and analyzing morphometric indices such as effective slope, coefficient of determination (R^2), and curvature trends—provides a transferable framework for systematic comparison of tectonically active mountain belts worldwide. In addition, the results have practical implications for geomorphological hazard assessment and environmental planning in the Zagros Mountains, particularly with respect to rockfall susceptibility and slope instability along the steep southwestern slopes. Overall, the contrasting morphometric characteristics of the two flanks illustrate two distinct states of tectonic–surface interaction in a young mountain system, offering insight into the long-term evolution of collisional mountain belts.



ناتقارنی مورفومتری یک کوه‌های دنا در امتداد گسل اصلی زاگرس: نقش کنترل کننده ساختارهای زیرسطحی بر ناهمواری‌های سطحی

غلام حسن جعفری^{۱*}

^۱ گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶	رشته کوه زاگرس به عنوان یکی از پویاترین کمربندهای کوهستانی جهان، ناتقارن مورفولوژیکی آشکاری بین دامنه‌های جنوب غربی و شمال شرقی خود نشان می‌دهد. این پژوهش با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر، تحلیل کمی ناهمواری‌های دو دامنه را انجام داده است. بیش از ۲۰۰ نیمرخ طولی و نیمرخ‌های عرضی عمود بر روند کوهستان ترسیم و با روابط خطی و چندجمله‌ای برازش شدند. شاخص‌های مورفومتری یک شامل شیب مؤثر، ضریب تعیین (R^2) و روند انحنا (کوژ در مقابل کاو) تحلیل شدند. یافته‌ها نشان می‌دهند که دامنه جنوب غربی دارای شیب مؤثر تندتر (۰/۴۶-۰/۵۱)، نیمرخ‌های کاو عمیق در بالادست (ناشی از فرسایش یخچالی تقویت شده توسط شیب ساختاری) و ناپایداری مورفولوژیکی در پایین دست است. در مقابل، دامنه شمال شرقی شیب ملایم‌تر (۰/۲۷-۰/۴۶)، نیمرخ‌های عمدتاً خطی یا کوژ و پایداری بیشتری دارد. هرچند فعالیت‌های یخبندانی کواترنری در ارتفاعات بالاتر از ۳۷۰۰ متر در هر دو دامنه مؤثر بوده‌اند، شکل نهایی سیرک‌ها و لندفرم‌ها تحت کنترل هندسه ساختاری است: لندفرم‌های محدب در دامنه شمال شرقی (هم‌شیب با لایه‌ها) و دره‌های U شکل تند در دامنه جنوب غربی. این نتایج تأیید می‌کنند که ساختارهای زیرسطحی، به‌ویژه گسل اصلی زاگرس و جهت لایه‌ها، نقش اولیه را در شکل دهی به ناهمواری‌های سطحی ایفا می‌کنند و فرآیندهای سطحی در چارچوبی که توسط تکتونیک تعیین شده است، عمل می‌کنند. این مطالعه چارچوبی کمی برای درک تعامل تکتونیک-فرسایش در کوه‌های جوان فراهم می‌آورد و قابلیت تعمیم به سایر کمربندهای فعال جهان را دارد.
کلمات کلیدی: کوه‌های دنا کمربند چین خورده-رانده زاگرس ناتقارنی مورفومتری یک کنترل ساختاری زیرسطحی تکامل ناهمواری‌های سطحی	

مقدمه

رشته‌کوه زاگرس، حاصل برخورد صفحه‌های عربستان و ایران، یکی از مهم‌ترین کمربندهای کوهستانی جنوب غرب آسیا است که از نظر ساختاری و مورفولوژیکی دارای ناتقارن چشمگیری بین دو دامنه‌ی جنوب‌غربی و شمال‌شرقی است (Agard et al., 2011). دامنه‌ی جنوب‌غربی، در مجاورت گسل اصلی زاگرس، شیب تندی دارد و تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی و فرسایش شدید قرار گرفته است، در حالی که دامنه‌ی شمال‌شرقی، با هم‌راستایی نسبی با لایه‌های زمین‌شناسی، شیب ملایم‌تر و امتداد طولانی‌تری از خود نشان می‌دهد (Mouthereau, 2011).

این ناتقارن ریشه در ساختارهای عمیق فعال دارد. بربریان (Berberian, 1995) نشان داد که گسل‌های راندگی کور در عمق، مستقیماً بر ناهمواری سطحی تأثیر می‌گذارند و منجر به بالاآمدگی عمودی تا ۴۰۰۰ متر و تشکیل قله‌های نامتقارن می‌شوند. این گسل‌ها توسط گسل‌های عرضی فعال مانند کازرون و سروستان قطع شده‌اند که بر توزیع فعالیت تکتونیکی تأثیر می‌گذارند. هم‌زمان، تحلیل‌های توپوگرافی و مدل‌سازی نشان داده‌اند که مدل نازک‌پوست نمی‌تواند ناهمواری زاگرس را تبیین کند و دخالت پی‌سنگ (مدل ضخیم‌پوست) از حدود ۱۰ میلیون سال پیش ضروری بوده است (Mouthereau, 2006). Lacombe & Meyer (2006). در سطح محلی، مطالعات ژئومورفولوژیکی کمی با استفاده از DEM و شاخص‌هایی مانند انتگرال هیپسومتریک، سینوسیته پیشانی کوه و ناتقارن حوزه، فعالیت تکتونیکی را در مقیاس‌های محلی تأیید کرده‌اند (Dehbozorgi et al., 2010).

هاتزفیلد و همکاران (Hatzfeld et al., 2010) در مطالعه جامع خود نشان دادند که سیستم گسلی کازرون به‌عنوان یک مرز جنبایی راست‌لغز فعال، زاگرس را به دو بخش با رفتار تکتونیکی متفاوت تقسیم می‌کند: در شمال زاگرس، تغییرشکل عمدتاً در گسل اصلی رخنمونی متمرکز است، در حالی که در مرکز زاگرس، حرکت لغزشی در چندین شاخه موازی از سیستم کازرون پخش شده است. پیراسته و همکاران (Pirasteh et al., 2011) با تحلیل تطبیقی نقشه‌های توپوگرافی چندزمانه (۱۹۵۰-۲۰۰۱) در محیط GIS، نشان دادند که شبکه‌های آبراهه در زاگرس دچار تغییرات معناداری در الگوی جریان، طول رودخانه، گردایان و سلسله‌مراتب آبراهه شده‌اند.

علی همکاران (Ali, Rangzan & Pirasteh, 2013) با استفاده از DEM مبتنی بر تصاویر لندست و تحلیل نیمرخ‌های عرضی، نشان دادند که پروفیل طولی رودخانه دز فاقد تعادل است، که نشان‌دهنده اختلال تکتونیکی اخیر در منطقه است. آن‌ها همچنین نرخ فرسایش خالص را در بخش‌های مختلف زاگرس محاسبه کردند و نشان دادند که این نرخ‌ها به‌طور مستقیم با شدت فعالیت تکتونیکی مرتبط است. در سطح نظری، کتاب مرجع ژئومورفولوژی تکتونیکی^۱ توسط بوربانک و اندرسن (Burbank & Anderson, 2013) چارچوبی جامعی برای درک تعامل بین تکتونیک و فرسایش ارائه می‌دهد. این اثر تأکید می‌کند که در کوه‌های جوان، ساختارهای زیرسطحی، اغلب نقش اولیه را در کنترل الگوهای ناهمواری سطحی ایفا می‌کنند. بهرامی (Bahrami, 2013) در مطالعه‌ای بر قله دنه خشک در کمربند چین‌خورده ساده زاگرس، نشان داد که ویژگی‌های مورفومتریک مخروط‌های آبرفتی، از جمله زاویه جاروب، طول پایه و میزان فرسایش، به‌طور مستقیم با شیب لایه‌های زمین‌شناسی در دو پهلوی تاقدیس مرتبط است. به‌طور خاص، مخروط‌های واقع در دامنه‌هایی با شیب لایه‌های تندتر، دارای فرسایش بیشتر، زاویه جاروب بالاتر و پایه‌های طولانی‌تری هستند که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی شدیدتر در آن قطاع است.

فقیه و همکاران (Faghih, Esmaeilzadeh Soudejani, Nourbakhsh & Rokni, 2015) با استفاده از شش شاخص ژئومورفولوژیکی برای زاگرس مرتفع جنوب غربی ایران محاسبه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که بخش‌های جنوبی منطقه (در امتداد گسل دنا) فعالیت تکتونیکی بالایی دارند که با پیشانی‌های کوهستانی صاف تأیید می‌شود، در حالی که بخش‌های شمالی، متناظر با گسل معکوس اصلی زاگرس، فعالیت کمتری دارند. فقیه و نوبخش (Faghih & Nourbakhsh, 2015) با استفاده از روش «پوشش‌دهنده» بر روی DEM، بعد فرکتال سطحی را برای زاگرس محاسبه کردند و نشان دادند که ناحیه‌های با بعد فرکتال بالا متناظر با رسوبات آبرفتی سست و فعالیت تکتونیکی بالا هستند، در حالی که ناحیه‌های با بعد فرکتال پایین، متناظر با ساختارهای منظم چین‌خورده و فرآیندهای پایدار هستند.

در حوزه آبخیز رودخانه لیسر زاب (در شمال عراق و شمال غرب ایران)، تحلیل پارامترهای مورفومتریک مانند چگالی آبراهه، بافت زهکشی، نسبت انشعاب و ارتفاع نسبی، برای ارزیابی خطر فرسایش و سیلاب‌های سریع‌الجریان استفاده شده است (Al-Saady, Al-Suhail, Al-Tawash & Othman, 2016). در این مطالعه، زیرحوزه‌های بالادست با ارتفاع نسبی بالا، چگالی آبراهه پایین و بافت زهکشی بسیار ریز، به‌عنوان مناطقی با رواناب سطحی بالا و پتانسیل تولید هیدروگراف سیلابی با اوج تیز شناسایی شدند. کلاهی آذر و گلریز (Kolahi-Azar & Golriz, 2018) با استفاده از روش چندفرکتال مبتنی بر ویولت، نشان دادند که ناهمواری سطحی در زاگرس دارای ویژگی‌های آشوب‌گونه و ناهمگون است که مستقیماً با زون‌های ساختاری مرتبط است. یافته‌های آن‌ها حاکی از آن است که بخش‌های میانی کمربند چین‌خورده ساده دارای پیچیدگی تکتونیکی بالاتر و ناهمواری ناهمگن‌تری هستند، در حالی که کمربند راندگی زاگرس بالا از همگنی بیشتری برخوردار است. گوربوز و فرزیپور سائین (Gürbüz & Farzipour Saein, 2019) در مطالعه جامع خود با استفاده از روش‌های هیپسومتریک و تحلیل نیمرخ‌های عرضی، نشان دادند که بخش میانی زاگرس (میان گسل‌های ایزه و سبزپوشان) دارای فعالیت تکتونیکی بالایی است که احتمالاً ناشی از یک زون انتقالی راست‌لغز برای هم‌خوانی کوتاه‌شدگی در بخش‌های شمال غربی و جنوب شرقی است. در مقابل، زون لرستان و جنوب فارس ویژگی‌های سطحی پایدارتر و یکنواخت‌تری از خود نشان می‌دهند. اوبید و آلن (Obaid & Allen, 2019) با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی مانند انتگرال هیپسومتریک (HI^I)، نشان دادند که انتقال از حوزه‌های با HI پایین به بالا معمولاً در ارتفاع $1250 \sim$ متر، متناظر با حد بالای فعالیت گسلش لرزه‌زا، رخ می‌دهد (Obaid, Othman, Salar, 2009; Sissakian & Ali 2024; Pirasteh, Woodbridge & Rizvi, 2009) و نقش فعالیت‌های یخچال کواترنری را تأیید کرده‌اند (Jafari & Hazrati, 2018; Seif, 2015). مقایسه سیستم‌های تصادمی مختلف نشان می‌دهد که میزان نفوذ صفحه فروزانده، نرخ همگرایی و زمان تصادم، نقش تعیین‌کننده‌ای در تکامل مورفولوژیکی و ساختاری کوه‌ها دارند. به‌عنوان مثال، هیمالیا و فلات تبت، با نرخ همگرایی بالا و تصادم قدیمی‌تر، به مرحله‌ای از تکامل رسیده‌اند که در آن، گسل‌های نرمال و کشش افقی در داخل فلات رخ می‌دهد. در مقابل، زاگرس و فلات ایران، با تصادم جدیدتر و نرخ همگرایی کمتر، هنوز در مرحله اولیه‌تری از کوه‌زایی قرار دارند و فعالیت تکتونیکی عمدتاً به حاشیه‌های فلات محدود شده است (Hatzfeld & Molnar, 2010). مطالعات ساختاری نشان داده‌اند که این رشته‌کوه دارای یک عدم‌تقارن بنیادین است که ریشه در هندسه گسل اصلی زاگرس و جهت لایه‌های زمین‌شناسی دارد (Zebari et al., 2020; Alavi 2008; Mohajjel & Fergusson, 2014). این عدم‌تقارن نه تنها در مقیاس‌های زمین‌شناسی، بلکه در الگوهای ناهمواری سطحی نیز به‌وضوح خود را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که دامنه‌های جنوب‌غربی، در مجاورت گسل اصلی، شیب تندتر و فعالیت تکتونیکی بالاتری دارند، در حالی که دامنه‌های شمال‌شرقی، با

شيب ملايم‌تر و هم‌راستايی نسبي با لايه‌های رسوبي، ساختاری پايدارتر از خود نشان داده‌اند (Gürbüz & Farzipour Saein, 2019).

حيدري و همکاران (Heidari, Mazidi & Rousta, 2024) با بررسی بروز ناهنجاری اقليمي در دوره بلندمدت سه ساله پيش از زلزله ۱۳۹۶ از گله کرمانشاه (شاخصی برای زلزله‌های منطقه فعال و پرجمعيت زاگرس)، با روش ساده انحراف از میانگين متحرک، به اين نتيجه رسيدند که در يکی دو هفته پيش از رخداد اين زلزله، هم در پارامترهای هواشناسی دمای هوا، دمای خاک و رطوبت هوا در ايستگاه تازه‌آباد و هم در پارامتر ماهواره‌ای دمای سطح زمين، ناهنجاری روزانه کم‌سابقه یا بی‌سابقه‌ای رخ داده است. بررسی مکانی ناهنجاری در دمای سطح زمين روشن ساخت که در روز زلزله، مرز خشکی دو صفحه عربستان و اوراسيا در غرب ايران، گرم بوده است.

جعفری (Jafari, 2025) با استفاده از الگوهای ریاضی - هندسی، به همراه روش‌های آماری پيشرفته شامل توزيع گاما، آزمون کای دو و تحليل فيشر، به بررسی وضعیت مورفوتکتونیکي و نتوتکتونیکي حوضه سفیدرود و زیرحوضه‌های آن پرداخت. نتايج نشان داده که ۹۶ درصد از سطح حوضه در محدوده مورفوتکتونیک ضعيف تا شديد قرار داشته است. تحليل‌های گاما، تعادل دينامیکي حوضه را با مقادير چولگی (۰/۷۱۷۱) و کشیدگی (۰/۷۸۲) تأييد کردند.

اين پژوهش به دنبال آزمون اين فرضيه است که آیا ناتقارن مشاهده شده در دامنه‌های شمال شرقی و جنوب غربی زاگرس، انعکاسی مستقيم از موقعيت ساختاری آن‌ها نسبت به گسل اصلی زاگرس و مرحله تکاملی اوليه اين کوه‌ها در مقايسه با سيستم‌های تصادمی قديمی‌تر (مانند هيماليا) است يا خير.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش مرکزی-جنوبی ارتفاعات زاگرس واقع شده است و در استان‌های اصفهان، چهارمحال بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد قرار دارد. اين منطقه شامل بخشی از کوه‌های دنا، یکی از مهم‌ترین و برجسته‌ترین ساختارهای ريخت‌شناسی در جنوب کمربند چين خورده زاگرس، می‌باشد. مختصات جغرافیایی منطقه به صورت دقيق: عرض جغرافیایی از ۳۰° و ۴۰' تا ۳۱° و ۱۰' شمالی و طول جغرافیایی از ۵۱° و ۲۰' تا ۵۱° و ۴۰' شرقی می باشد. بخش عمده اين منطقه در حوضه آبريز رودخانه کر واقع شده و شامل بخش‌هایی از دشت‌های فلاتی و کوهستانی با توپوگرافی بسيار ناهموار و چين خورده است (شکل ۱).

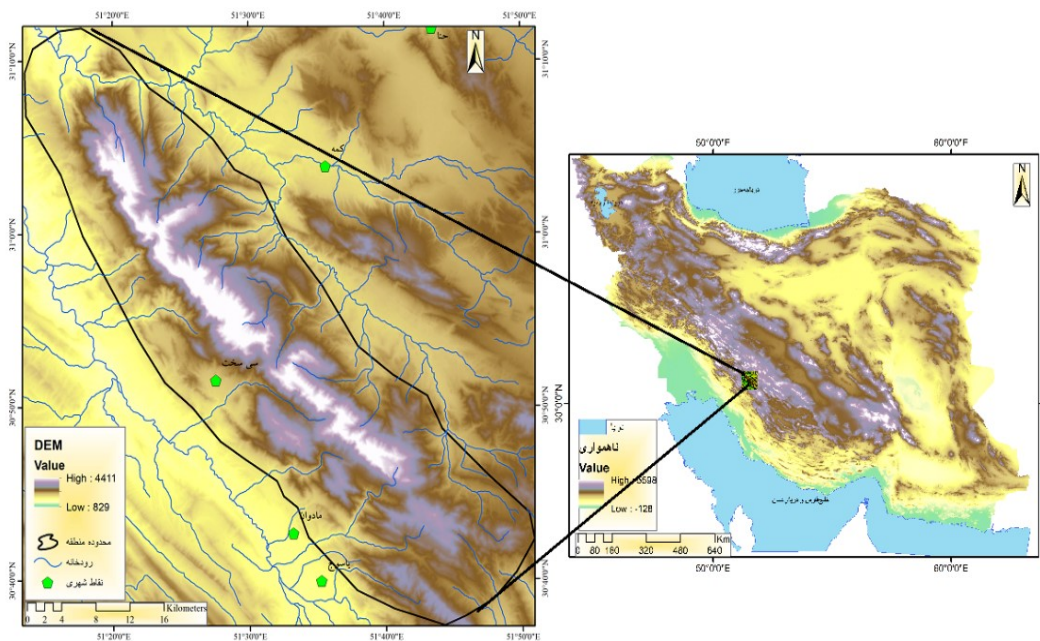
از دیدگاه ساختاری، منطقه مورد مطالعه در جنوب کمربند چين خورده ساده زاگرس قرار گرفته است، جایی که فعالیت‌های تکتونیکي پس از برخورد صفحه‌های عربستان و ايران، منجر به تشكيل چين‌ها و گسل‌های فشرده‌گی‌زا شده است (Mouthereau, 2011; Alavi, 2008). کوه‌های دنا، به عنوان یکی از برجسته‌ترین قله‌های اين بخش، از لحاظ ساختاری به صورت نامتقارن، با دامنه‌ی جنوب غربی تند و دامنه‌ی شمال شرقی ملایم شکل گرفته است. اين ناتقارن مستقیماً با فعالیت گسل‌های راندگی کور در عمق و هم‌راستايی لايه‌های رسوبي در دامنه‌ی شمال شرقی مرتبط است (Berberian, 1995).

از نظر واحدهای سنگ‌چینه‌ای، منطقه عمدتاً شامل سنگ‌های کربناته مزوزوئیک (به‌ویژه آهک‌های کرتاسه و میوسن) است. با اين حال، شواهدی از دخالت پی‌سنگ در بالآمدگی اين بخش وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی ماهيت ضخيم‌پوست تکتونیک زاگرس در اين منطقه است (Mouthereau et al., 2006).

توپوگرافی منطقه بسيار ناهموار و چين خورده است و ارتفاعات آن از کمتر از ۲۰۰۰ متر در دشت‌های فلاتی تا بیش از ۴۴۰۰ متر در قله‌های مرکزی دنا متغير است. اين گرادیان ارتفاعی شديد، در ترکیب با اقليم نیمه‌خشک تا خشک و بارش‌های

فصلی زمستانه، منجر به شکل‌گیری سیستم‌های فرسایشی پویا شده است. در ارتفاعات بالاتر از ۳۷۰۰ متر، شواهدی از فعالیت‌های یخبندانی کواترنری (مانند سیرک‌ها، مورن‌ها و دره‌های U شکل) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی پایین‌آمدن خط برف دائمی در دوره‌های یخبندانی است (Jafari & Hazrati, 2018). در مقابل، در ارتفاعات میانی و پایین، فرآیندهای فرسایشی دامنه‌ای (مانند زمین لغزش و سولی فلوکسیون) و فرسایش رودخانه‌ای، نقش اصلی را در شکل‌دهی به ناهمواری‌ها ایفا می‌کنند.

منطقه از نظر هیدروگرافیکی در حوضه آبریز رودخانه کارون قرار دارد که یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های جنوب غرب ایران است. این رودخانه از شاخه‌های متعددی تشکیل شده که از دامنه‌های جنوبی و شمالی دنا سرچشمه می‌گیرند و به سمت جنوب غربی جریان می‌یابند. شبکه زهکشی منطقه عمدتاً از نوع درختی نامنظم است که نشان‌دهنده‌ی فعالیت تکتونیکی پیوسته و عدم تعادل سیستم‌های رودخانه‌ای است (Faghih et al., 2015).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی کوه‌های دنا در ایران و رشته کوه زاگرس

Fig. 1. Geographical location of the Dena Mountains in Iran and the Zagros Mountain Range

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از داده‌های رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲.۵ متر استفاده شد که از محصول ALOS World 3D (AW3D30) نسخه ۳/۲، استخراج گردید. این محصول یکی از معتبرترین منابع DEM جهانی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر است. تمامی داده‌ها قبل از تحلیل، در محیط Global Mapper v24 تحت فرآیندهای پیش‌پردازش زیر قرار گرفتند: تصحیح خطای سیستماتیک عمودی با استفاده از مدل ژئوئید EGM2008، هم‌ترازسازی با نقاط کنترلی ارتفاعی (GCPs) استخراج‌شده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری ایران، حذف نوفه‌های ارتفاعی (Outliers) با الگوریتم Median Filter.

این مراحل اطمینان از حداقل‌سازی خطاهای سیستماتیک و افزایش دقت نسبی نیمرخ‌ها را فراهم آورد. در مجموع، بیش از ۲۰۰ نیمرخ طولی در سه دسته مجزا ترسیم گردید: ۱- نیمرخ‌های دامنه‌ی شمال‌شرقی (شیب‌های داخلی به سمت فلات ایران)، ۲- نیمرخ‌های دامنه‌ی جنوب‌غربی (شیب‌های خارجی به سمت دشت‌های خوزستان و عراق)، و ۳- نیمرخ‌های رودخانه‌ای در هر دو دامنه که مسیرهای اصلی فرسایش را نشان می‌دهند.

علاوه بر این، نیمرخ‌های عرضی عمود بر روند کلی کوهستان نیز تهیه گردید. برای هر نیمرخ، حداقل ۵۰۰ نقطه ارتفاعی با فاصله‌ی ثابت استخراج شد تا از کافی‌بودن نمونه‌برداری برای تشخیص دقیق انحناهای مورفولوژیکی اطمینان حاصل شود. داده‌های ارتفاعی هر نیمرخ در محیط Excel مورد پردازش آماری قرار گرفت. در مرحله اول، روابط خطی ($y = ax + b$) بین فاصله افقی (x) و ارتفاع (y) با استفاده از روش کمترین مربعات برازش شد. در مواردی که ضریب تعیین (R^2) کمتر از ۰/۹۵ بود، از روابط چندجمله‌ای (درجه ۲ تا ۶) برای بهبود برازش استفاده شد.

در این پژوهش، R^2 صرفاً به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی کیفیت برازش منحنی به‌کار رفت، نه به‌عنوان شاخصی برای مقایسه آماری میانگین یا تعداد نمونه‌ها. به عبارت دیگر: R^2 نزدیک به ۱/۰ نشان می‌دهد که منحنی برازش‌شده توانسته است الگوی کلی نیمرخ ارتفاعی را با دقت بالا توصیف کند که معمولاً در دامنه‌های پایدار و همگن (مانند دامنه‌ی شمال‌شرقی) رخ می‌دهد. R^2 پایین‌تر (مثلاً < 0.95) نشان‌دهنده‌ی وجود ناهنجاری‌های مورفولوژیکی است که با منحنی ساده قابل توصیف نیست؛ این ناهنجاری‌ها می‌توانند ناشی از ریزش‌های سنگی، فرسایش موضعی، ساختارهای یخبندانی یا فعالیت‌های تکتونیکی پویا باشند که عمدتاً در دامنه‌ی جنوب‌غربی مشاهده می‌شوند. بنابراین، تفسیر R^2 در این پژوهش صرفاً هندسی و کیفی است و مستقل از تعداد نقاط نمونه‌برداری در هر نیمرخ می‌باشد. این رویکرد، روشی استاندارد در تحلیل‌های مورفومتريک کمی است (Burbank & Anderson, 2013).

تنها نیمرخ‌هایی که R^2 آن‌ها از ۰/۹۰ بالاتر بود، در تحلیل‌های نهایی لحاظ شدند. این معیار سخت‌گیرانه، اطمینان از پایداری و قابلیت اعتماد نتایج را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، تمامی نیمرخ‌ها توسط نویسندگان از نظر هماهنگی با تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و Sentinel-2 بازبینی شدند تا از وجود خطاهای ساختاری (مانند جابه‌جایی نیمرخ از مسیر واقعی) اطمینان حاصل شود.

بازبینی تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا

از تصاویر Sentinel-2 MSI (با وضوح ۱۰ متر در باندهای مرئی) و Google Earth Pro (با وضوح بسیار بالا از منطقه مورد مطالعه) برای تأیید موقعیت نیمرخ‌ها و شناسایی ساختارهای مورفولوژیکی استفاده شد. علاوه بر آن، بازدیدهای میدانی در بخش‌های جنوبی و شمالی کوه‌های دنا انجام شد. موقعیت سیرک‌های یخچالی و ساختارهای قله‌ها بررسی گردید. این داده‌ها با یافته‌های کمی (مانند موقعیت کوژی/کاوی در ارتفاعات بالا) مقایسه و تأیید شدند. از مشاهدات میدانی گزارش شده در مطالعات جعفری و حضرتی (Jafari & Hazrati, 2018) برای تأیید وجود فعالیت‌های یخچالی در ارتفاعات بالاتر از ۳۷۰۰ متر استفاده شد.

تحلیل‌های آماری شامل مقایسه‌ی میانگین شیب، طول افقی، ارتفاع نسبی، و پارامترهای هندسی نیمرخ‌ها در دو دامنه بود. همچنین، الگوهای روابط ریاضی حاصل از برازش داده‌ها به‌عنوان شاخصی از پیچیدگی مورفولوژیکی مورد تفسیر قرار گرفت. در نهایت، یافته‌ها در چارچوب مدل‌های تکتونیکی-فرسایشی زاگرس تبیین شدند تا بتوان تفاوت‌های ساختاری و فرآیندی بین دو دامنه را به‌صورت کمی و قابل تعمیم ارائه داد.

نتایج و بحث

مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش بدین شرح است: ۱. ناتقارن مورفولوژیکی عمیق بین دو دامنه زاگرس: دامنه جنوب‌غربی شیب تندتر (۵۱/۴۶-۰/۰)، دامنه شمال‌شرقی شیب ملایم‌تر (۲۷/۴۶-۰/۰). ۲. موقعیت غیرمتقارن قله‌ها: قله اصلی کوه‌ها در یک‌سوم غربی نیمرخ‌ها قرار دارد، نه در مرکز (شکل ۲). ۳. تفاوت الگوهای انحنا: دامنه شمال‌شرقی: غالباً خطی یا کوژ (۷۸٪ موارد)؛ دامنه جنوب‌غربی: غالباً کاو-کوژ-کاو یا کاو شدید. ۴. تأثیر یخبندانی در بالاتر از ۳۷۰۰ متر: شمال‌شرقی: لندفرم‌های محدب، جنوب‌غربی: دره‌های U شکل عمیق و دیواره‌مانند. ۵. پایداری مورفولوژیکی متفاوت: R^2 متوسط شمال‌شرقی: ۰/۹۷۰۰-۰/۹۹۰۰ R^2 متوسط جنوب‌غربی: ۰/۹۹۰۰-۰/۹۹۰۰. ۶. شبکه زهکشی نامتقارن: جنوب‌غربی: الگوی موازی، تراکم بالا، شمال‌شرقی: الگوی درختی، تراکم پایین‌تر. ۷. انتقال مورفولوژیکی در ۳۷۰۰ متر: مرز بالایی اثرگذاری یخبندان‌های کواترنری در زاگرس.



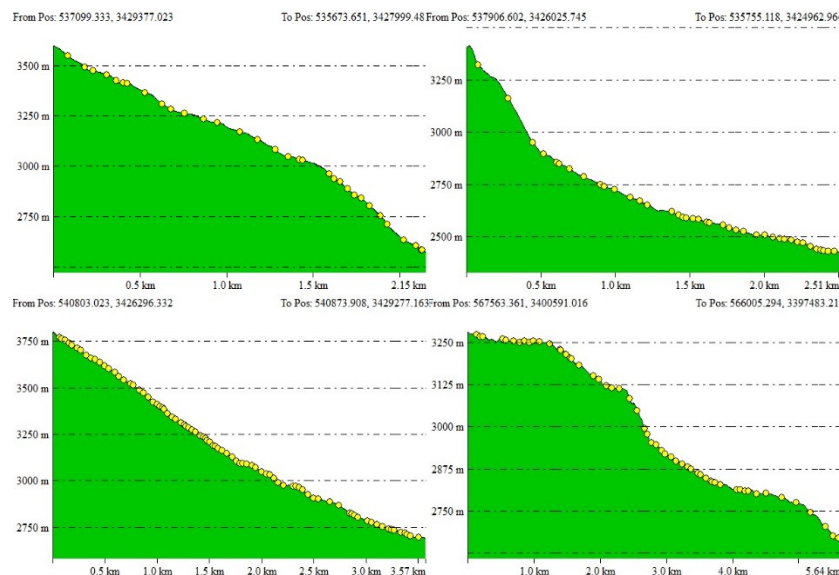
شکل ۲- انعکاس ناتقارنی ارتفاعات دنا تصاویر گوگل ارث

Fig. 2. Reflection of the asymmetry of Dena heights from Google Earth images

الگوهای مورفومتری یک دامنه‌های شمال‌شرقی زاگرس

یافته‌های حاصل از برازش منحنی‌های ریاضی بر نیمرخ‌های طولی دامنه‌های شمال‌شرقی زاگرس در ارتفاعات ۳۰۰۰ تا ۴۲۰۰ متر، الگوهای مورفولوژیکی پیچیده‌ای را آشکار می‌سازد که ترکیبی از تأثیرات تکتونیکی، یخچالی، لیتولوژیکی و فرسایشی است. به‌طور کلی، سه دسته اصلی از رفتارهای مورفولوژیکی در این نیمرخ‌ها قابل تشخیص است: نیمرخ‌های خطی یا شبه‌خطی با شیب یکنواخت، نیمرخ‌های کوژ (Convex) که غالب در ارتفاعات میانی و بالایی دیده می‌شوند، و نیمرخ‌های کاو (Concave) یا ترکیبی از کاو-کوژ که اغلب در ارتباط با فرآیندهای یخچالی یا فرسایش رودخانه‌ای هستند. نیمرخ‌های خطی، نشانگر تعادل تکتونیکی-فرسایشی: نیمرخ‌هایی با ضریب شیب ثابت (حدود ۴۶/۵۱-۰) و R^2 بالای ۰/۹۹، نشان‌دهنده پایداری مورفولوژیکی و تعادل بین بالآمدگی تکتونیکی و فرسایش هستند. این نیمرخ‌ها در بازه‌های ارتفاعی ۳۱۰۰-۴۰۰۰ متر واقع شده‌اند و تنها در ارتفاعات بالاتر از ۳۷۰۰ متر، انحراف‌های جزئی به‌صورت کوژی مشاهده می‌شود. این کوژی‌های محلی را می‌توان به اثر باقیمانده فعالیت‌های یخچالی در آخرین دوره‌های یخچالی نسبت داد، به‌ویژه زمانی که در بالادست این نیمرخ‌ها، ساختارهای سیرک‌مانند شکل گرفته‌اند. وجود چنین الگویی در دامنه‌های شمال‌شرقی

که هم‌شیب با لایه‌های رسوبی هستند، نشان می‌دهد که فرسایش عمودی تحت تأثیر یخچال‌های کوهستانی، ساختارهای موضعی را تغییر داده، اما ساختار کلی دامنه همچنان تحت کنترل تکتونیک باقی مانده است (شکل ۳). این الگو را می‌توان در چارچوب مدل ضخیم‌پوست مائریو و همکاران (Mouthereau et al., 2006) تفسیر کرد، که در آن کوتاه‌شدگی پی‌سنگ عربستان در مجاورت گسل اصلی، منجر به بالآمدگی متمرکز و شیب‌های تند در سمت جنوب‌غرب می‌شود، در حالی که دامنه شمال‌شرقی به‌عنوان سطح بالایی وچ تکتونیک، ساختارهای ملایم‌تری را حفظ کرده است.



شکل ۳- نیمرخ‌ها از بالا-راست به چپ-پایین کاو، کوژ، موژدر نواحی مرتفع و کاو در نواحی کم‌ارتفاع، مستقیم

Fig. 3. Profiles from top-right to left-bottom: Concave, Convex, Convex in high areas and Concave in low areas, and straight

نیمرخ‌های کوژ، غالب در ارتفاعات میانی و بالایی: در بسیاری از موارد (معادلات با ضریب x^3 منفی یا x^2 منفی)، منحنی‌ها به‌صورت کاملاً کوژ هستند. برای مثال برخی نیمرخ‌ها در ارتفاعات ۳۱۵۰–۳۹۵۰ متر، تمایل به شکل‌گیری سطوح محدب دارند. این الگو معمولاً در مناطقی دیده می‌شود که فرسایش جانبی یا فرسایش دامنه‌ای غالب است و سیستم رودخانه‌ای هنوز نتوانسته به‌طور کامل تعادل طولی برقرار کند. با این حال، در ارتفاعات بالاتر از ۳۷۰۰ متر، اوج کوژی معمولاً با وجود سیرک‌های یخچالی هم‌خوانی دارد. به‌ویژه در مواردی که خط برازش در بالادست کمی پایین‌تر از منحنی واقعی قرار می‌گیرد، این اختلاف را می‌توان به وجود یک لندفرم یخچالی مسطح در بالای دامنه نسبت داد که در مدل‌های ریاضی خطی یا چندجمله‌ای ساده قابل بازتاب کامل نیست. این تفسیر توسط مدل گسل‌های کور بربریان (Berberian, 1995) نیز تقویت می‌شود؛ طبق این مدل، فعالیت گسل‌های راندگی کور در عمق، مستقیماً بر شیب تند جنوب‌غربی تأثیر گذاشته است.

نکته جالب اینجاست که در برخی نیمرخ‌ها (با $R^2 = 0.962$ در ارتفاع ۲۱۰۰–۲۳۰۰ متر)، کاوی شدید در ارتفاعات پایین، مستقل از فعالیت یخچالی و صرفاً ناشی از فرسایش آب‌های روان است که نشان می‌دهد حتی در دامنه‌های شمال‌شرقی، سیستم‌های رودخانه‌ای در پایین‌دست قادر به ایجاد نیمرخ‌های کلاسیک کاو هستند. این تفاوت‌ها با یافته‌های فقیه و همکاران (Faghih et al., 2015) همخوانی دارد؛ آن‌ها نشان دادند که جنوب زاگرس بالا (در امتداد گسل دنا) فعالیت تکتونیک بالاتری دارد، در حالی که شمال منطقه، نزدیک به گسل معکوس اصلی زاگرس، نسبتاً پایدار است.

تفسیر ترکیبی، نقش یخچال در شکل‌دهی به ناهمواری‌های بالای ۳۷۰۰ متر

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، انتقال مورفولوژیکی در حدود ۳۷۰۰ متر است. در این ارتفاع، بسیاری از نیمرخ‌ها یا اوج کوژی خود را نشان می‌دهند یا به‌طور ناگهانی به حالت کاو تغییر می‌کنند. این ارتفاع را می‌توان به‌عنوان مرز بالایی اثرگذاری یخچال‌های کواترنری در زاگرس در نظر گرفت. شواهد ژئومورفولوژیکی از سایر مطالعات نیز تأیید می‌کنند که خط برف دائمی در آخرین دوره یخچالی در زاگرس مرکزی در حدود ۳۶۰۰-۳۸۰۰ متر بوده است. در مقابل، در ارتفاعات زیر ۳۵۰۰ متر، نیمرخ‌ها عمدتاً خطی یا کوژ هستند که نشان‌دهنده تسلط فرآیندهای دامنه‌ای (مانند لغزش، سولی فولکسیون) بعد از عقب‌نشینی یخچال‌های کواترنری است. هرگاه در این بازه‌ها کاوی مشاهده شود (مانند در ارتفاع ۳۲۰۰-۳۵۰۰ متر)، احتمالاً ناشی از عدم تسلط فعالیت رودخانه‌ای یا محل اتصال شاخه‌های رودخانه‌ای است که باعث تغییر ناگهانی در شیب و شکل نیمرخ می‌شوند.

اهمیت ضرایب ریاضی در تفسیر فرآیندها

ضرایب معادلات چندجمله‌ای، به‌ویژه علامت و بزرگی ضریب x^3 یا x^2 شاخص‌های کمی از جهت‌گیری انحنا هستند: ضریب منفی x^3 یا $x^2 \rightarrow$ کوژی غالب، ضریب مثبت $x^2 \rightarrow$ کاوی غالب. همچنین، مقایسه‌ی شیب‌های خطی (ضریب x در روابط خطی) نشان می‌دهد که دامنه‌های شمال‌شرقی زاگرس در ارتفاعات بالا (۳۶۰۰-۴۰۰۰ متر) شیب‌های خطی بین ۰/۴۶-۰/۵۱ دارند، در حالی که در ارتفاعات پایین‌تر (۲۶۰۰-۳۴۰۰ متر) شیب خطی معادله به ۰/۲۷-۰/۳۷ کاهش می‌یابد. این کاهش شیب به‌سمت پایین‌دست، با مدل‌های کلاسیک تعادل رودخانه‌ای همخوانی دارد، اما عدم وجود کاوی گسترده در بخش‌های میانی، نشان می‌دهد که سیستم‌های رودخانه‌ای در این دامنه‌ها هنوز به تعادل کامل نرسیده‌اند، احتمالاً به‌دلیل مقاومت لیتولوژیکی لایه‌های آهکی و دولومیتی که در زاگرس شمال‌شرقی گسترده هستند.

این تحلیل کمی، نه‌تنها تفاوت‌های مورفولوژیکی دامنه‌های شمال‌شرقی را روشن می‌سازد، بلکه چارچوبی برای مقایسه‌ی دامنه‌های جنوب‌غربی که تحت تأثیر مستقیم گسل اصلی زاگرس و فرسایش شدیدتر قرار دارند، فراهم می‌آورد. این یافته با نتایج کلاهی آذر و گلریز (Kolahi-Azar & Golriz, 2018) همخوانی دارد؛ آن‌ها با استفاده از تحلیل چندفکتال، پیچیدگی بالاتر در کمربند چین‌خورده (دامنه جنوب‌غربی) را نشان دادند، اما روش ما این پیچیدگی را به‌صورت هندسی و قابل تفسیر (کاوی، کوژی، شیب) آشکار می‌سازد.

تحلیل مورفومتریک دامنه‌های جنوب‌غربی زاگرس، تأثیر گسل اصلی و فرسایش شدید در شکل‌گیری ناهمواری‌ها

شواهد نشان می‌دهند که کوتاه‌شدگی و بالآمدگی در زاگرس از حدود ۱۵-۱۲ میلیون سال پیش شتاب گرفته است (Mouthereau, 2011). این فعالیت تکتونیکی متمرکز در مجاورت گسل اصلی زاگرس، منجر به شکل‌گیری دامنه‌های تند و پویا در سمت جنوب‌غرب شده است، در حالی که دامنه شمال‌شرق به‌عنوان بخشی از فلات ایران، تحت تأثیر ضخیم‌شدگی لیتوسفری تدریجی قرار گرفته و ساختارهای پایدارتری را حفظ کرده است. تحلیل ۲۲ نیمرخ طولی در ارتفاعات ۲۱۰۰ تا ۴۲۰۰ متر، سه الگوی کلیدی را آشکار می‌سازد: ۱- شیب‌های تند خطی یا شبه‌خطی با اختلالات موضعی ناشی از فعالیت یخچالی، ۲- نیمرخ‌های کاو شدید در بالادست (بالاتر از ۳۹۰۰ متر) که نشانه‌ی فرسایش یخچالی است، و ۳- ناپایداری‌های مورفولوژیکی در پایین‌دست ناشی از ترکیب فرسایش رودخانه‌ای، ریزش‌های سنگی و واکنش سریع به بالآمدگی تکتونیکی.

نیمرخ‌های خطی با شیب تند، نشانگر بالاآمدگی فعال و فرسایش پاسخگو

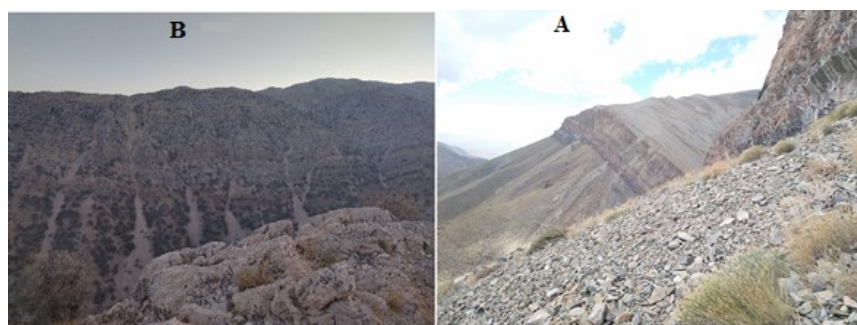
بیشتر نیمرخ‌های جنوب‌غربی دارای شیب‌های خطی تندتر (ضریب x بین ۰/۴۶-۰/۵۱) نسبت به دامنه‌های شمال‌شرقی هستند. این شیب‌های خطی تند، مستقیماً با موقعیت ساختاری این دامنه‌ها در مجاورت گسل اصلی زاگرس مرتبط است؛ جایی که بالاآمدگی تکتونیکی به‌صورت ناگهانی و پیوسته رخ می‌دهد؛ با این حال، حتی در این نیمرخ‌های خطی، انحرافات موضعی در ارتفاعات ۳۵۰۰-۳۷۰۰ متر مشاهده می‌شود. مانند کوژی‌های کوچک یا انحراف منحنی از خط برازش. این پدیده‌ها را نمی‌توان صرفاً به فعالیت یخچالی نسبت داد؛ بلکه واکنش سریع سیستم‌های دامنه‌ای به تغییرات تکتونیکی نیز در ایجاد این ناهمواری‌های موضعی مؤثر است. به‌ویژه در مواردی که خط برازش در بالادست کمی پایین‌تر از منحنی واقعی قرار می‌گیرد، این اختلاف می‌تواند نشانه‌ی وجود لندفرم‌های یخچالی کوچک یا سیرک‌های ناقص باشد که در اثر فرسایش پسین تغییر شکل داده‌اند.

کاوی شدید در بالادست، فرسایش یخچالی در بالاترین ارتفاعات

نیمرخ‌هایی واقع در ارتفاعات بالاتر از ۳۹۰۰ متر، کاوی شدید و حتی دیواره‌های عمودی را نشان می‌دهند. این ساختارها به‌وضوح با فرسایش یخچالی در دوره‌های یخچالی مرتبط هستند. پایداری این ساختارهای کاو در طول هولوسن (حتی در دوره‌های گرم) نشان می‌دهد که مقاومت لیتولوژیکی (به‌ویژه حضور آهک‌های مقاوم) و شیب تند زمین‌شناسی، از بازگشت به شکل تعادلی رودخانه‌ای جلوگیری کرده‌اند.

ناهمواری‌های پیچیده در پایین‌دست، ترکیب فرسایش، ریزش و تکتونیک

در بسیاری از نیمرخ‌ها، الگوی کاو-کاو یا کوژ-کاو-کوژ مشاهده می‌شود. این نوسانات مورفولوژیکی در بازه‌های ارتفاعی ۲۷۰۰-۳۵۰۰ متر، نشانه‌ی عدم تعادل سیستم فرسایشی است. در دامنه‌های جنوب‌غربی، به‌دلیل شیب تند و فعالیت گسلی پیوسته، سیستم‌های رودخانه‌ای نمی‌توانند به راحتی به تعادل طولی دست یابند. در نتیجه، ریزش‌های سنگی، لغزش‌های دامنه‌ای و فرسایش جانبی شدید، ساختارهای ناپایداری را ایجاد می‌کنند که در نیمرخ‌ها به‌صورت نوسانات کوژ-کاو ظاهر می‌شوند (شکل ۴).



شکل ۴- انعکاسی از گسل اصلی زاگرس (A) و تالوس‌های واریزه‌ای ناشی از ریزش (B)

Fig. 4. Reflection of the main Zagros fault (A) and debris talus from the falls (B)

نکته قابل توجه این است که حتی در ارتفاعات پایین (مانند ۲۱۰۰-۲۳۰۰ متر، $y = -0.0623x + 218921$ با $R^2 = 0.962$)، نیمرخ‌ها کاملاً کاو هستند که نشان می‌دهد سیستم‌های رودخانه‌ای در این دامنه‌ها فعالیت بسیار بالایی دارند و قادر به ایجاد نیمرخ‌های کلاسیک کاو هستند. این امر در تضاد کامل با دامنه‌های شمال‌شرقی است، جایی که در ارتفاعات پایین نیمرخ‌ها

عمدتاً خطی یا کوژ باقی می‌مانند این امر ناشی از شیب تند ناهمواری‌های بالادست است که منجر به جریان سریع آب به پایین دست شده و در پایین دست بر اثر بریدگی شیب، سرعت و قدرت آب کم شده و با ایجاد دره‌های وسیع‌تر و برجای گذاری رسوب بیشتر، شرایط کاوی نیمرخ دره‌ها را فراهم می‌ورند.

مقایسه ضرایب ریاضی، شاخص‌های کمی از تفاوت فرآیندها

شیب خطی متوسط در دامنه‌های جنوب‌غربی (۵۱/۳۷-۰/۰) به‌طور سیستماتیک تندتر از دامنه‌های شمال‌شرقی (۲۷/۰-۰/۴۶) است.

- ضریب R^2 در روابط خطی دامنه‌های جنوب‌غربی، علیرغم ناهمواری‌های موضعی، همچنان بالا است (معمولاً >0.97) که نشان‌دهنده همگنی ساختاری کلی این دامنه، حتی در حضور فرسایش شدید است.
- تکرار الگوهای کاو در بالادست (بالتر از ۳۹۰۰ متر) در هر دو دامنه، تأیید می‌کند که فرسایش یخچالی یک فرآیند منطقه‌ای بوده است، اما شکل نهایی آن تحت تأثیر جهت‌گیری ساختاری قرار گرفته است: در دامنه‌های جنوب‌غربی، سیرک‌ها در امتداد شیب تند گسل شکل گرفته‌اند، در حالی که در دامنه‌های شمال‌شرقی، در بالای سطوح هم‌شیب گسترش یافته‌اند (جدول ۱).

جدول ۱- مقایسه کمی و کیفی نیمرخ‌های دامنه‌های شمال‌شرقی و جنوب‌غربی زاگرس

Table 1- Quantitative and qualitative comparison of the profiles of the northeastern and southwestern slopes of the Zagros

ردیف Row	جهت Direction	دامنه ارتفاعی Elevation	نوع نیمرخ Profile type	شیب خط Line slope	ضریب تعیین R coefficient	تحلیل مختصر Brief analysis
1	شمال شرقی NE	3100-3900	خطی (مستقیم) Linear (Direct)	0.45-0.46	>0.995	تعادل تکتونیک-فرسایشی؛ تأثیر محدود یخچال در بالادست Tectonic-erosion balance; Limited impact of the glacial above
	جنوب غربی SW	3100-4050	خطی (مستقیم یا متمایل به کوژ) linear concave (directly or inclined to convex)	0.46-0.51		بالآمدگی فعال در مجاورت گسل اصلی؛ فرسایش مؤثر Active uplift near the Main Fault; Effective erosion
2	شمال شرقی NE	3150-3950	کوژ غالب (چندجمله‌ای درجه 2 یا 3) Dominant convex (second or third-degree polynomial)	کوژ Convex	0.990-0.996	فرسایش دامنه‌ای؛ لندفرم‌های یخچالی در بالادست Slope erosion; Glacial landforms in upstream
	جنوب غربی SW	3300-4000	کوژ موضعی یا ترکیبی (کوژ-کاو-کوژ) Local or combined convex (convex-concave-convex)	ناپایدار Unstable	0.970-0.990	واکنش سریع به تکتونیک؛ ریزش‌های دامنه‌ای Rapid response to tectonics; Slope failures
3	شمال شرقی NE	3600-4150	کاو محدود به بالادست ($>3900m$) Concave limited to upstream ($>3900m$)	کاو در بالا Concave at the top	0.990-0.997	سیرک‌های یخچالی در بالای سطوح هم‌شیب Glacial cirques on level terraces
	جنوب غربی SW		کاو شدید و گسترده در بالادست Severe and extensive concavity in upstream	کاو عمیق Deep concave	0.990-0.995	فرسایش یخچالی در امتداد شیب تند گسل؛ دره‌های U شکل عمیق

ردیف Row	جهت Direction	دامنه ارتفاعی Elevation	نوع نیمرخ Profile type	شیب خط Line slope	ضریب تعیین R coefficient	تحلیل مختصر Brief analysis
4	شمال شرقی NE	2600-3500	خطی یا کوژ؛ کلاوی بسیار محدود Linear or convex; highly limited concave	0.27-0.37	0.970-0.990	Glacial erosion along steep fault scarps; deep U-shaped valleys فرسایش ضعیف رودخانه‌ای؛ تسلط فرآیندهای دامنه‌ای Weak fluvial erosion; dominance of slope processes
	جنوب غربی SW		کاو متوسط تا شدیداً نوسان کاو-کوژ Moderate to severe concavity or concave-convex fluctuation	0.31-0.38	0.960-0.986	فعالیت رودخانه‌ای شدید؛ ریزش و ناپایداری ساختاری Intense fluvial activity; rock falls and structural instability
	شمال شرقی NE		کاو ضعیف (در صورت وجود) Weak concavity (if present)			فرسایش آب‌های روان در پایین‌دست Stream erosion downstream
5	جنوب غربی SW	<2500	کاو واضح و منظم Clear and regular concavity	~0.06	~0.96	سیستم‌های رودخانه‌ای فعال و تعادل‌یافته در پایین‌دست Active, balanced fluvial systems in downstream

بیشتر بودن ضریب تعیین (R^2) در نیمرخ‌های دامنه شمال شرقی از دامنه جنوب غربی نشان‌دهنده پایداری نسبی و همگنی مورفولوژیکی در این دامنه است. در مقابل، پراکندگی بیشتر R^2 و وجود نوسانات انحنای در دامنه جنوب غربی، گواه پویایی بالا و واکنش سریع به تغییرات تکتونیکی و فرسایشی است. این تفاوت‌ها در سطح منطقه‌ای نیز دیده می‌شوند: بر اساس مدل ابید و آلن (Obaid & Allen, 2019)، مناطق مرطوب‌تر (مانند باختری) دارای سیستم‌های رودخانه‌ای فعال‌تری هستند که منجر به نیمرخ‌های ناپایدارتر می‌شوند، در حالی که در مناطق خشک‌تر (مانند فارس)، ناهمواری‌ها بیشتر تحت کنترل ساختار باقی می‌مانند. علاوه بر این، تفاوت‌های بین بخش‌های غربی و شرقی زاگرس را می‌توان در چارچوب هاتزفلد و همکاران (Hatzfeld et al., 2010) تفسیر کرد؛ طبق این مدل، سیستم گسلی کازرون، زاگرس را به دو حوزه با کینماتیک متفاوت تقسیم می‌کند که این امر مستقیماً بر منظم‌بودن یا پیچیدگی نیمرخ‌ها تأثیر گذاشته است.

تحلیل نیمرخ‌های عرضی زاگرس، عدم تقارن ساختاری و مورفولوژیکی در برش‌های عمود بر روند کوهستان

نیمرخ‌های عرضی زاگرس در ارتفاعات ۲۱۰۰ تا ۴۳۰۰ متر، تصویری روشن از عدم تقارن ساختاری عمیق این کوه‌ها ارائه می‌دهند. تمامی نیمرخ‌ها بدون استثنا، شیب تند در دامنه جنوب غربی (سمت گسل اصلی زاگرس) و شیب ملایم‌تر و طولانی‌تر در دامنه شمال شرقی (سمت فلات داخلی ایران) را نشان می‌دهند. این الگوی عدم تقارن که در ادبیات ژئومورفولوژی به‌عنوان «عدم تقارن کوهستانی» شناخته می‌شود، مستقیماً با هندسه گسل اصلی زاگرس و جهت بالآمدگی تکتونیکی مرتبط است. با بررسی دقیق معادلات چندجمله‌ای درجه ۶، می‌توان مکان قله اصلی (که متناظر با نقطه عطف یا ماکزیمم منحنی است) را تقریباً در یک‌سوم یا ربع غربی نیمرخ (یعنی نزدیک به دامنه جنوب غربی) شناسایی کرد. این یافته با مدل‌های ساختاری زاگرس همخوانی دارد که نشان می‌دهند بالآمدگی بیشتر در مجاورت گسل اصلی رخ می‌دهد و در نتیجه، قله‌های اصلی کوه‌ها به سمت جنوب غربی جابه‌جا شده‌اند. در برخی از نیمرخ‌هایی دامنه جنوب غربی، شیب بسیار تندتر است که نشان‌دهنده فعالیت گسلی متمرکز در این سمت است. در مقابل، در برخی از نیمرخ‌ها با وجود همین الگوی کلی، شیب دو

دامنه تقریباً متقارن دارند که می‌تواند نشانه‌ی موقعیت ویژه‌ی ساختاری (مثلاً در مجاورت یک گسل عرضی یا خم ساختاری) یا ناشی از دخالت فرسایش تفریقی باشد که تقارن موضعی ایجاد کرده است.

تفسیر ضرایب چندجمله‌ای درجه ۶، پیچیدگی مورفولوژیکی

استفاده از چندجمله‌ای درجه ۶، هرچند از نظر ریاضی برآزش دقیقی فراهم می‌کند، نشان می‌دهد که سطح زمین در این مقیاس دارای چندین نقطه عطف است: یک شیب تند در جنوب غربی (ممکن است دربرگیرنده یک دیواره‌های یخچالی یا ریزشی باشد)، یک قله اصلی، یک شیب ملایم و طولانی در شمال شرقی که گاهی شامل لندفرم‌های یخچالی یا سطوح هم‌شیب می‌شود، و در برخی موارد، دره‌های فرعی یا اتصال رودخانه‌ها در پایین‌دست. به عنوان مثال، در برخی از نیمرخ‌ها با ضرایب بزرگ برای x^3 و x^4 نشان‌دهنده‌ی تغییرات شدید انحنا در نزدیکی قله است که می‌تواند با وجود چندین سیرک یخچالی مجاور یا شکست‌های ساختاری مرتبط باشد.

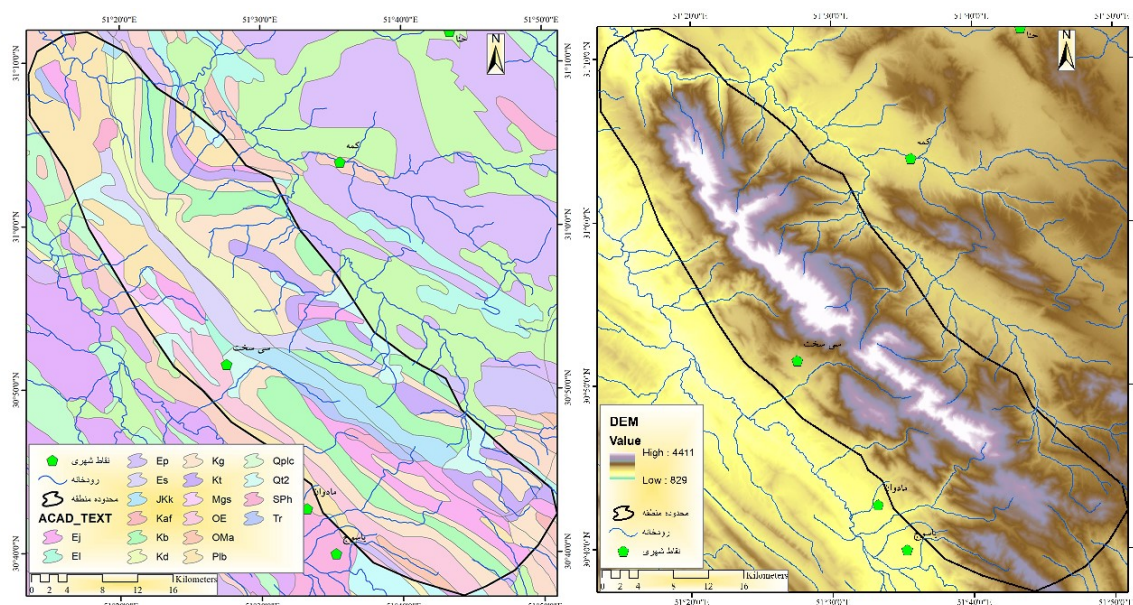
نیمرخ‌هایی با R^2 پایین‌تر (مانند ۰/۹۰۷۸ یا ۰/۹۲۳۳) نشان‌دهنده‌ی ناهمواری‌های پیچیده‌تر هستند که ممکن است ناشی از حضور گسل‌های فرعی، تغییر لیتولوژی (انتقال از آهک به مارن)، یا فعالیت‌های یخچالی ناهمگون باشد. در مقابل، نیمرخ‌هایی با R^2 بالاتر از ۰/۹۸ (مانند ۰/۹۸۸۱) نشان‌دهنده‌ی ساختارهای مورفولوژیکی منظم‌تر هستند که احتمالاً در بخش‌های پیوسته‌تر ساختاری قرار دارند.

با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی و شبکه زهکشی منطقه، می‌توان عدم تقارن چشمگیر بین دامنه‌های شمال شرقی و جنوب غربی را ناشی از تعامل سه عامل کلیدی دانست: ساختار زمین‌شناسی، تغییرات شیب، و ناهمگونی لیتولوژیکی. در دامنه جنوب غربی، شیب تند و سطوح سازندهای نسبتاً همگن ولی فرسایش‌پذیر (مانند سازند ساچون با تناوب مارن، ژپس و آهک) همراه با کنترل ساختاری قوی راستای زاگرس، منجر به شکل‌گیری الگوی زهکشی موازی و نیمرخ‌های کاو شده است. این الگو نشان‌دهنده فرسایش خطی و متمرکز در امتداد درزه‌ها یا لایه‌های ضعیف‌تر است. شروع آبراهه‌ها بعد از کوهپایه دال بر تسلط لیتولوژی مقاوم گسیخته شده مقاوم آهک و شیل در گروه بنگستان است.

در مقابل، دامنه شمال شرقی با شیب ملایم‌تر و لیتولوژی متنوع‌تر (شامل تناوب آهک و شیل گروه بنگستان در ارتفاعات، سازندهای نرم گورپی در سطوح میانی ارتفاع و رسوبات آبرفتی جوان در کوهپایه‌ها)، بستر مناسبی برای توسعه الگوی زهکشی درختی و پیچیده فراهم آورده است. این تنوع سنگی باعث تفاوت در مقاومت فرسایشی و در نتیجه ایجاد شبکه‌ای پراکنده با انشعابات فراوان شده است. حضور باریکه‌های محدود سازند ساچون در این دامنه، نشان‌دهنده نقش گسل‌های مماسی در توزیع واحدهای سنگی باشد (شکل ۵). از نظر تکتونیکی، این شرایط لیتولوژیکی و آبراهه‌ای، نشان‌دهنده کج‌شدگی ناحیه‌ای یا فعالیت نفوختکتونیکی نامتوازن در دو طرف یک محور ساختاری است. شیب تندتر و الگوی زهکشی موازی دامنه جنوب غربی، نشان‌دهنده جانب فعال‌تر و قرارگیری در بخش فرارو گسل اصلی زاگرس با نرخ فعالیت بالاتر است. این یافته‌ها با مطالعات مشابه در کمربند چین‌خورده-گسلی زاگرس همخوانی دارد که در آن الگوی زهکشی اغلب تحت تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی و تغییرات لیتولوژی قرار می‌گیرد.

راستای عمومی موازی آبراهه‌ها در دامنه جنوب غربی، نشان‌دهنده کنترل قوی ساختار زمین‌شناسی (گسل‌ها) و شیب تند بر شبکه زهکشی است. در مقابل، شیب ملایم‌تر دامنه شمال شرقی اجازه توسعه الگوی درختی متأثر از ناهمسانی لیتولوژیکی را داده است. تمرکز سازندهای نسبتاً یکنواخت و فرسایش‌پذیر مانند ساچون در دامنه جنوب غربی، به ایجاد الگوی موازی و خطی کمک کرده است. در حالی که تناوب لایه‌های با مقاومت متفاوت (مانند آهک و شیل در گروه بنگستان) و حضور سازندهای نرم (گورپی) در دامنه شمال شرقی، زمینه را برای توسعه الگوی زهکشی درختی و پیچیده‌تر فراهم آورده

است. تکتونیک و تکامل چشم‌انداز: این عدم تقارن می‌تواند نشان‌دهنده کج‌شدگی تکتونیکی یا نرخ متفاوت فراز در دو طرف یک محور ساختاری باشد. احتمالاً دامنه جنوب غربی با شیب تندتر، فعال‌تر بوده یا تحت تأثیر فرایندهای فرسایشی متفاوتی قرار گرفته است.



شکل ۵- لایه زمین‌شناسی به همراه لایه مدل رقومی ارتفاع و شبکه آبراهه‌های ارتفاعات دنا

Fig. 5. Geological layer, the digital elevation model layer, and waterway network of the Dena Highlands.

تطبيق با مدل‌های تکتونیکی زاگرس

این عدم تقارن مورفولوژیکی، شیب تند در سمت گسل اصلی و شیب ملایم در سمت فلات، مستقیماً با مدل «رشد کوهستان از یک سمت» در زاگرس همخوانی دارد. در این مدل، گسل اصلی زاگرس به‌عنوان مرز فعال تکتونیکی عمل کرده و بالآمدگی عمدتاً در مجاورت آن رخ می‌دهد. در نتیجه، دامنه جنوب غربی تحت تأثیر تغییر شکل شدید و فرسایش سریع قرار می‌گیرد، در حالی که دامنه شمال شرقی به‌عنوان دامنه پستی، ساختارهای قدیمی‌تر و پایداری را حفظ کرده است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با تحلیل کمی بیش از ۲۰۰ نیم‌رخ طولی و عرضی در دامنه‌های شمال شرقی و جنوب غربی رشته‌کوه زاگرس، شواهد محکمی از ناتقارن ساختاری-مورفولوژیکی عمیق این کوه‌ها ارائه می‌دهد. الگوهای ناتقارن مورفومتريک شناسایی شده در این پژوهش، تنها یک پدیده سطحی نیست، بلکه انعکاسی از تاریخچه تکتونیکی ۲۲ میلیون ساله تصادم عربستان-اوراسیا و به‌ویژه شتاب گرفتن کوتاه‌شدگی پس از ۱۲/۴ میلیون سال پیش است. این رویدادهای ساختاری، چارچوبی ایجاد کرده‌اند که در آن، ناهمواری‌های سطحی تحت کنترل مستقیم هندسه و فعالیت گسل اصلی زاگرس و گسل‌های کور زیرسطحی قرار گرفته‌اند. یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که الگوهای ناهمواری سطحی، نه تنها تحت تأثیر فرآیندهای سطحی مانند فرسایش یخچالی و رودخانه‌ای قرار دارند، بلکه به‌طور بنیادین توسط هندسه و فعالیت ساختارهای زیرسطحی، به‌ویژه گسل اصلی زاگرس و جهت لایه‌های زمین‌شناسی، کنترل می‌شوند.

دامنه جنوب غربی که در مجاورت گسل اصلی زاگرس قرار دارد، دارای شیب تندتر، فعالیت تکتونیکی متمرکز و سیستم‌های فرسایشی پویاتری است. این ویژگی‌ها منجر به شکل‌گیری نیمرخ‌های کاو شدید در بالادست (ناشی از فرسایش یخچالی تقویت‌شده توسط شیب ساختاری) و ناپایداری‌های مورفولوژیکی در پایین‌دست (ناشی از ریزش‌ها و فرسایش جانبی) شده است. در مقابل، دامنه شمال شرقی که با لایه‌های زمین‌شناسی هم‌شیب است، دارای ساختاری پایدارتر، شیب ملایم‌تر و نیمرخ‌های عمدتاً خطی یا کوژ است که نشان‌دهنده تعادل نسبی بین بالآمدگی تکتونیکی و فرسایش دامنه‌ای است. حتی در ارتفاعات بالاتر از ۳۷۰۰ متر که فعالیت یخچالی در هر دو دامنه تأثیرگذار بوده، شکل نهایی سیرک‌ها و لندفرم‌ها تحت تأثیر جهت‌گیری ساختاری قرار گرفته است: در دامنه شمال شرقی به صورت سطوح محدب ملایم و در دامنه جنوب غربی به صورت دره‌های U شکل عمیق و تند.

این تفاوت‌های بنیادین، تأیید می‌کنند که در کوه‌های جوان تکتونیکی مانند زاگرس، ساختارهای زیرسطحی نقش اولیه را در شکل‌دهی به ناهمواری‌های سطحی ایفا می‌کنند و فرآیندهای سطحی، هر چند قدرتمند، در چارچوبی که توسط تکتونیک تعیین شده عمل می‌کنند. این یافته، چارچوب نظری «کنترل ساختاری بر مورفولوژی سطحی» را در مقیاس کوهستانی تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که مطالعات ژئومورفولوژیکی بدون در نظر گرفتن زمین‌شناسی ساختاری، نمی‌توانند تصویری کامل از تکامل ناهمواری‌ها ارائه دهند.

از دیدگاه کاربردی، این پژوهش با ارائه یک روش کمی مبتنی بر برازش روابط ریاضی به نیمرخ‌های طولی و تحلیل شاخص‌های مورفومتریک (شیب مؤثر، R^2 و روند انحنا)، چارچوبی قابل تعمیم برای مقایسه سیستماتیک کوه‌های فعال تکتونیکی در سراسر جهان فراهم می‌آورد. همچنین، یافته‌های این مطالعه می‌تواند در ارزیابی خطرات ژئومورفولوژیکی (مانند ریزش‌های سنگی در دامنه‌های تند جنوب غربی) و برنامه‌ریزی‌های محیطی در مناطق کوهستانی زاگرس مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند که تفاوت میان دو دامنه زاگرس، تنها یک پدیده ژئومورفولوژیکی نیست، بلکه انعکاسی از دو حالت متفاوت از تعامل تکتونیک و سطح زمین است: یکی در لبه فعال برخورد (جنوب غرب)، و دیگری در پهنه پشتی نسبتاً پایدار (شمال شرق). این دو حالت، در کنار هم، تصویری جامع از چگونگی ساخته شدن یک کوهستان جوان را در طول زمان زمین‌شناسی ارائه می‌دهند.

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., ... & Wortel, R. (2011). Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 148(5-6), 692-725. <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Alavi, M. (2008). Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science*, 307(9), 1064-1095. <https://doi.org/10.2475/01.2008.05>
- Ali, S. A., Rangzan, K., & Pirasteh, S. (2013). Remote sensing and GIS study of tectonics and net erosion rates in the Zagros Structural Belt, Southwestern Iran. *Geocarto International*, 40(4), 258-267. <https://doi.org/10.2747/0749-3878.40.4.258>
- Al-Saady, Y. I., Al-Suhail, Q. A., Al-Tawash, B. S., & Othman, A. A. (2016). Drainage network extraction and morphometric analysis using remote sensing and GIS mapping techniques (Lesser Zab River Basin, Iraq and Iran). *Environmental Earth Sciences*, 75(18), 1243. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6038-y>

- Bahrami, S. (2013). Tectonic controls on the morphometry of alluvial fans around Danekkhoshk anticline, Zagros, Iran. *Geomorphology*, 184, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.012>
- Berberian, M. (1995). Master “blind” thrust faults hidden under the Zagros folds: Active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241(1–4), 193–224. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00185-C](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C)
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2013). *Tectonic Geomorphology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.19.2.198>
- Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, M., Matkan, A. A., Motamedi, H., & Hosseiniasl, A. (2010). Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran. *Geomorphology*, 121(3–4), 329–341. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.002>
- Faghih, A., & Nourbakhsh, A. (2015). Appraisal of relative tectonic activity along the Kazerun Fault Zone, Zagros Mountains, Iran: insight from spatial analysis of geomorphic indices. *Geological Journal*, 50(6), 783–798. <https://doi.org/10.1002/gj.2597>
- Faghih, A., Esmaeilzadeh Soudejani, A., Nourbakhsh, A., & Rokni, S. (2015). Tectonic geomorphology of High Zagros Ranges, SW Iran: An initiative towards seismic hazard assessment. *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3007–3017. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4298-5>
- Gürbüz, A., & Farzipour Saein, A. (2019). Tectonic geomorphology of the Zagros Orogen. In *Geological, Geomorphological, and Hydrological Studies in the Zagros Belt* (pp. 187–213). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815048-1.00008-1>
- Hatzfeld, D., & Molnar, P. (2010). Comparisons of the kinematics and deep structures of the Zagros and Himalaya and of the Iranian and Tibetan plateaus and geodynamic implications. *Reviews of Geophysics*, 48(2), 1–48. <https://doi.org/10.1029/2009RG000304>
- Hatzfeld, D., Authemayou, C., Van der Beek, P., Bellier, O., Lavé, J., Oveisi, B., ... & Yamini-Fard, F. (2010). The kinematics of the Zagros Mountains (Iran). In *Tectonic and stratigraphic evolution of Zagros and Makran during the Mesozoic–Cenozoic* (pp. 193–209). Geological Society, London, Special Publications. <https://doi.org/10.1144/SP330.3>
- Heidari, M., Mazidi, A., & Rousta, I. (2024). Investigation of the Thermal Anomaly Precursor in the 2017 Azgeleh Earthquake in Kermanshah, Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 92–114. <https://doi.org/10.22067/geoe.2023.83439.1397>
- Jafari, G. H. (2025). Morphotectonic Analysis of the Sefidrood Basin, Iran: An Integrated Methodological Framework Based on the Fibonacci sequence and Gamma Distribution for Identifying Active Structural Patterns. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 21–42. <https://doi.org/10.22067/geoe.2025.94085.1584>
- Jafari, G., & Hazrati, N. (2018). Reconstruction of Quaternary ELA of the Zagros geomorphic unit of Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 8(3), 33–49. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223197.1397.8.3.3.9>
- Kolahi-Azar, A. P., & Golriz, S. (2018). Multifractal topography: A tool to measure tectonic complexity in the Zagros Mountain Range. *Mathematical Geosciences*, 50(4), 431–445. <https://doi.org/10.1007/s11004-017-9727-0>

- Mohajjel, M., & Fergusson, C. L. (2014). Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3), 263-287. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- Mouthereau, F. (2011). Timing of uplift in the Zagros belt/Iranian plateau and accommodation of late Cenozoic Arabia–Eurasia convergence. *Geological Magazine*, 148(5-6), 726-738. <https://doi.org/10.1017/S0016756811000306>
- Mouthereau, F., Lacombe, O., & Meyer, B. (2006). The Zagros folded belt (Fars, Iran): Constraints from topography and critical wedge modelling. *Geophysical Journal International*, 165(1), 336–356. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02855.x>
- Obaid, A. K., & Allen, M. B. (2019). Landscape expressions of tectonics in the Zagros fold-and-thrust belt. *Tectonophysics*, 765, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.05.024>
- Obaid, A. K., Othman, A. A., Salar, S. G., Sissakian, V. K., & Ali, S. S. (2024). Tectonic and Erosion in the Zagros Fold-and-Thrust Belt (ZFTB). In *Natural Resources Deterioration in MENA Region: Land Degradation, Soil Erosion, and Desertification* 55-71. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-58315-5_4
- Pirasteh, S., Pradhan, B., & Rizvi, S. M. (2011). Tectonic process analysis in Zagros Mountain with the aid of drainage networks and topography maps dated 1950–2001 in GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(2), 171–180. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0081-3>
- Pirasteh, S., Woodbridge, K., & Rizvi, S. M. A. (2009). Geo-information technology (GiT) and tectonic signatures: the River Karun & Dez, Zagros Orogen in south-west Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), 389-403. <https://doi.org/10.1080/01431160802345693>
- Seif, A. (2015). Equilibrium-line altitudes of Late Quaternary glaciers in the Oshtorankuh Mountain, Iran. *Quaternary International*, 374, 126-143. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.02.063>
- Zebari, M., Balling, P., Grützner, C., Navabpour, P., Witte, J., & Ustaszewski, K. (2020). Structural style of the NW Zagros Mountains and the role of basement thrusting for its Mountain Front Flexure, Kurdistan Region of Iraq. *Journal of Structural Geology*, 141, 104206. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104206>