Vol. 15, No. 3, Autumn 2026, p. 48-67 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97282.1637 OPEN ACCESS

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

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

ABSTRACT

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, 15*(3), 48-67. https://doi.org/10.22067/geoeh.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.

جلد ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵ ، ص ۶۷-۴۸ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97282.1637 دسترسی آزاد

ناتقارنی مورفومتریک کوه‌های دنا در امتداد گسل اصلی زاگرس: نقش کنترل‌کننده ساختارهای زیرسطحی بر ناهمواری‌های سطحی

غلام‌حسن جعفری[۱] *

[۱] گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

کلمات کلیدی:

کوه‌های دنا

کمربند چین‌خورده–رانده زاگرس

ناتقارنی مورفومتریک

کنترل ساختاری زیرسطحی

تکامل ناهمواری‌های سطحی

چکیده

رشته‌کوه زاگرس به عنوان یکی از پویاترین کمربندهای کوهستانی جهان، ناتقارن مورفولوژیکی آشکاری بین دامنه‌های جنوب‌غربی و شمال‌شرقی خود نشان می‌دهد. این پژوهش با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر، تحلیل کمّی 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 مورفومتریک شامل شیب مؤثر، ضریب تعیین (R^2) و روند انحنا (کوژ در مقابل کاو) تحلیل شدند. یافته‌ها نشان می‌دهند که دامنهٔ جنوب‌غربی دارای شیب مؤثر تندتر (۰/۴۶–۰/۵۱)، نیمرخ‌های کاو عمیق در بالادست (ناشی از فرسایش یخچالی تقویت‌شده توسط شیب ساختاری) و ناپایداری مورفولوژیکی در پایین‌دست است. در مقابل، دامنهٔ شمال‌شرقی شیب ملایم‌تر (۰/۲۷–۰/۴۶)، نیمرخ‌های عمدتاً خطی یا کوژ و پایداری بیشتری دارد. هر چند 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 شمال‌شرقی (هم‌شیب با لایه‌ها) و دره‌های U شکل تند در دامنه جنوب‌غربی. این نتایج تأیید می‌کنند که ساختارهای زیرسطحی، به ویژه گسل اصلی زاگرس و جهت لایه‌ها، نقش اولیه را در شکل‌دهی به ناهمواری‌های سطحی ایفا می‌کنند و فرآیندهای سطحی در چارچوبی که توسط تکتونیک تعیین شده است، عمل می‌کنند. این مطالعه چارچوبی کمّی برای درک تعامل تکتونیک–فرسایش در کوه‌های جوان فراهم می‌آورد و قابلیت تعمیم به سایر کمربندهای فعال جهان را دارد.

* نویسندهٔ مسئول: غلام‌حسن جعفری

E-mail: jafarihas@znu.ac.ir

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 دامنهٔ جنوب‌غربی و شمال‌شرقی است (Agard et al., 2011) . دامنهٔ جنوب‌غربی، در مجاورت گسل اصلی زاگرس، شیب تندی دارد و تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی و فرسایش شدید قرار گرفته است، در حالی که دامنهٔ 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, Lacombe & Meyer, 2006) . در سطح محلی، مطالعات ژئومورفولوژیکی کمّی 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 مطالعهٔ جامع خود نشان دادند که سیستم گسلی کازرون به عنوان یک مرز جنبایی راست‌لغز فعال، زاگرس را به دو بخش با رفتار تکتونیکی متفاوت تقسیم می‌کند: در شمال زاگرس، تغییر شکل 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، گرادیان و سلسله‌مراتب آبراهه شده‌اند.

علی و 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 نشان‌دهندهٔ اختلال تکتونیکی اخیر در منطقه است. آن‌ها همچنین نرخ فرسایش خالص را در بخش‌های مختلف زاگرس محاسبه کردند و نشان دادند که این نرخ‌ها به طور مستقیم با شدت فعالیت تکتونیکی مرتبط است. در سطح نظری، کتاب مرجع ژئومورفولوژی تکتونیکی[1] 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 قلهٔ دنه‌خشک در کمربند چین‌خورده ساده زاگرس، نشان داد که ویژگی‌های مورفومتریک مخروط‌های آبرفتی، از جمله زاویه جاروب، طول پایه و میزان فرسایش، به طور مستقیم با شیب لایه‌های زمین‌شناسی در دو پهلوی تاقدیس مرتبط است. به طور خاص، مخروط‌های واقع در دامنه‌هایی با شیب لایه‌های تندتر، دارای

1- Tectonic Geomorphology

فرسایش بیشتر، زاویه جاروب بالاتر و پایه‌های طولانی‌تری هستند که نشان‌دهندهٔ 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 نوربخش (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 شمال‌غرب 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، به عنوان 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 ایذه و سبزپوشان) دارای فعالیت تکتونیکی بالایی است که احتمالاً ناشی از یک زون انتقالی راست‌لغز برای هم‌خوانی کوتاه‌شدگی در بخش‌های شمال‌غربی و جنوب‌شرقی 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[1])، نشان دادند که انتقال از حوزه‌های با HI پایین به بالا معمولاً در ارتفاع ~ ۱۲۵۰ متر، متناظر با حد بالای فعالیت گسلش لرزه‌زا، رخ می‌دهد (Obaid, Othman, Salar, Sissakian & Ali 2024; Pirasteh, Woodbridge & Rizvi, 2009) و نقش فعالیت‌های یخچال کواترنری را تأیید کرده‌اند (Jafari & Hazrati, 2018; Seif, 2015). مقایسهٔ سیستم‌های تصادمی مختلف نشان می‌دهد که میزان نفوذ صفحه فرورانده، نرخ همگرایی و زمان تصادم، نقش تعیین‌کننده‌ای در تکامل مورفولوژیکی و ساختاری کوه‌ها دارند. به عنوان 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).

1- Hypsometric index

این عدم‌تقارن نه‌تنها در مقیاس‌های زمین‌شناسی، بلکه در الگوهای ناهمواری سطحی نیز به وضوح خود را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که دامنه‌های جنوب‌غربی، در مجاورت گسل اصلی، شیب تندتر و فعالیت تکتونیکی بالاتری دارند، در حالی که دامنه‌های شمال‌شرقی، با شیب ملایم‌تر و هم‌راستایی نسبی با لایه‌های رسوبی، ساختاری پایدارتر از خود نشان داده‌اند (Gürbüz & Farzipour Saein, 2019).

حیدری و همکاران (Heidari, Mazidi & Rousta, 2024) با بررسی بروز ناهنجاری اقلیمی در دورهٔ بلندمدت سه سالهٔ پیش از زلزلهٔ ۱۳۹۶ ازگلهٔ کرمانشاه (شاخصی برای زلزله‌های منطقهٔ فعال و پرجمعیت زاگرس)، با روش ساده انحراف از میانگین متحرک، به این نتیجه رسیدند که در یکی دو هفته پیش از رخداد این زلزله، هم در پارامترهای هواشناسی دمای هوا، دمای خاک و رطوبت هوا در ایستگاه تازه‌آباد و هم در پارامتر ماهواره‌ای دمای سطح زمین، ناهنجاری روزانهٔ کم‌سابقه یا بی‌سابقه‌ای رخ داده است. بررسی مکانی ناهنجاری در دمای سطح زمین روشن ساخت که در روز زلزله، مرز خشکی دو صفحه عربستان و اوراسیا در غرب ایران، گرم بوده است.

جعفری (Jafari, 2025) با استفاده از الگوهای ریاضی - هندسی، به همراه روش‌های آماری پیشرفته شامل توزیع گاما، آزمون کای دو و تحلیل فیشر، به بررسی وضعیت مورفوتکتونیکی و نئوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود و زیرحوضه‌های آن پرداخت. نتایج نشان داده که ۹۶ درصد از سطح حوضه در محدوده مورفوتکتونیک ضعیف تا شدید قرار داشته است. تحلیل‌های گاما، تعادل دینامیکی حوضه را با مقادیر چولگی (۰/۷۱۷۱) و کشیدگی (۰/۷۸۲) تأیید کرده‌اند.

این پژوهش به دنبال آزمون این فرضیه است که آیا ناتقارن مشاهده شده در دامنه‌های شمال‌شرقی و جنوب‌غربی زاگرس، انعکاسی مستقیم از موقعیت ساختاری آن‌ها نسبت به گسل اصلی زاگرس و مرحله تکاملی اولیه این کوه‌ها در مقایسه با سیستم‌های تصادمی قدیمی‌تر (مانند هیمالیا) است یا خیر.

منطقهٔ مورد مطالعه

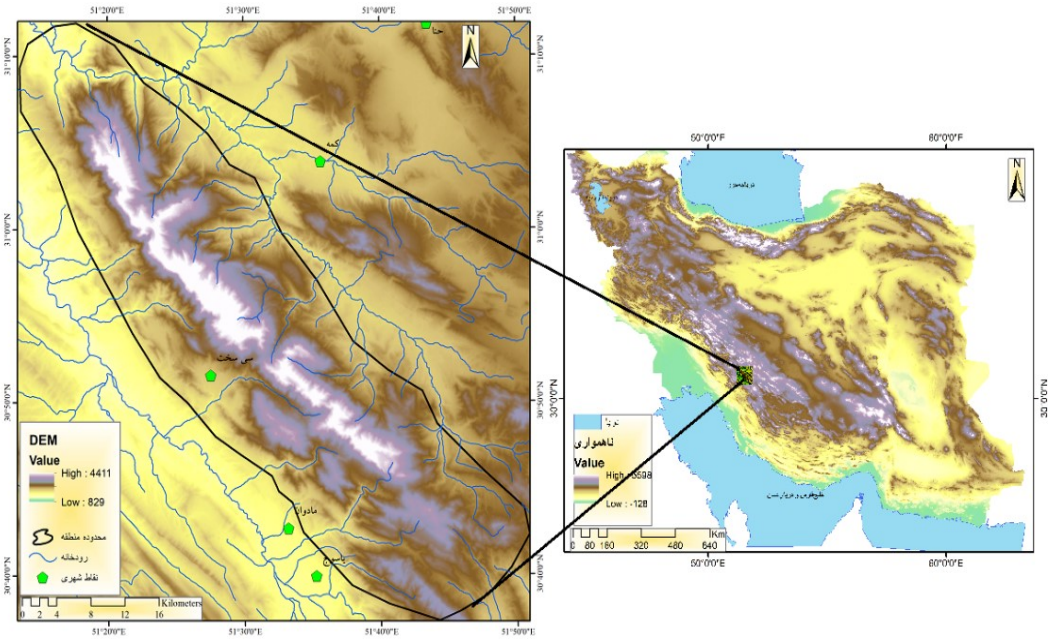
منطقهٔ مورد مطالعه در بخش مرکزی- جنوبی ارتفاعات زاگرس واقع شده است و در استان‌های اصفهان، چهارمحال بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد قرار دارد. این منطقه شامل بخشی از کوه‌های دنا، یکی از مهم‌ترین و برجسته‌ترین ساختارهای ریخت‌شناسی در جنوب کمربند چین‌خورده زاگرس، می‌باشد. مختصات جغرافیایی منطقه به‌صورت دقیق: 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 این منطقه در حوضه آبریز رودخانه کر واقع شده و شامل بخش‌هایی از دشت‌های فلاتی و کوهستانی با توپوگرافی بسیار ناهموار و چین‌خورده است (شکل ۱).

از دیدگاه ساختاری، منطقهٔ مورد مطالعه در جنوب کمربند چین‌خورده ساده زاگرس قرار گرفته است، جایی که فعالیت‌های تکتونیکی پس از برخورد صفحه‌های عربستان و ایران، منجر به تشکیل چین‌ها و گسل‌های فشردگی‌زا شده است (Mouthereau, 2011; Alavi, 2008). کوه‌های دنا، به عنوان یکی از برجسته‌ترین قله‌های این بخش، از لحاظ ساختاری به صورت نامتقارن، با دامنهٔ جنوب‌غربی تند و دامنهٔ شمال‌شرقی ملایم شکل گرفته است. این ناتقارن مستقیماً با فعالیت گسل‌های راندگی کور در عمق و هم‌راستایی لایه‌های رسوبی در دامنهٔ شمال‌شرقی مرتبط است (Berberian, 1995).

از نظر واحدهای سنگ‌چینه‌ای، منطقه عمدتاً شامل سنگ‌های کربناته مزوزوئیک (به ویژه آهک‌های کرتاسه و میوسن) است. با این حال، شواهدی از دخالت پی‌سنگ در بالاآمدگی این بخش وجود دارد که نشان‌دهندهٔ ماهیت ضخیم پوست تکتونیک زاگرس در این منطقه است (Mouthereau et al., 2006).

توپوگرافی منطقه بسیار ناهموار و چین‌خورده است و ارتفاعات آن از کمتر از ۲۰۰۰ متر در دشت‌های فلاتی تا بیش از ۴۴۰۰ متر در قله‌های مرکزی دنا متغیر است. این گرادیان ارتفاعی شدید، در ترکیب با اقلیم 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 نشان‌دهندهٔ پایین آمدن خط برف دائمی در دوره‌های یخبندانی است (Jafari & Hazrati, 2018)؛ در مقابل، در ارتفاعات میانی و پایین، فرآیندهای فرسایشی دامنه‌ای (مانند زمین لغزش و سولی‌فلوکسیون) 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 نشان‌دهندهٔ 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 دامنهٔ شمال‌شرقی (شیب‌های داخلی به سمت فلات ایران)، ۲- نیمرخ‌های دامنهٔ 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 فاصلهٔ ثابت استخراج شد تا از کافی بودن 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 چند جمله‌ای (درجه ۲ تا ۶) برای بهبود برازش استفاده شد.

در این پژوهش، R^2 صرفاً به عنوان شاخصی برای ارزیابی کیفیت برازش منحنی به‌کار رفت، نه به عنوان شاخصی برای مقایسه آماری میانگین یا تعداد نمونه‌ها. به عبارت دیگر: R^2 نزدیک به ۱/۰ نشان می‌دهد که منحنی برازش شده توانسته است الگوی کلی نیمرخ ارتفاعی را با دقت بالا توصیف کند که معمولاً در دامنه‌های پایدار و همگن (مانند دامنهٔ شمال‌شرقی) رخ می‌دهد. R^2 پایین‌تر (مثلاً $0.95 >$) نشان‌دهندهٔ 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 دامنهٔ 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 مورفومتریک کمّی 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 نویسنده 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 کمّی (مانند موقعیت کوژی/کاوی در ارتفاعات بالا) مقایسه و تأیید شدند. از مشاهدات میدانی گزارش‌شده در مطالعات جعفری و حضرتی (Jafari & Hazrati, 2018) برای تأیید وجود فعالیت‌های یخچالی در ارتفاعات بالاتر از ۳۷۰۰ متر استفاده شد. تحلیل‌های آماری شامل مقایسهٔ میانگین شیب، طول افقی، ارتفاع نسبی، و پارامترهای هندسی نیمرخ‌ها در دو دامنه بود. همچنین، الگوهای روابط ریاضی حاصل از برازش داده‌ها به عنوان 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 به صورت کمّی 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: غالبًا خطی یا کوژ (۷۸٪ موارد)؛ دامنه جنوب‌غربی: غالبًا 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: ۰/۹۷۰۰–۰/۹۹۰. R^2 متوسط جنوب‌غربی: ۰/۹۰۰–۰/۹۹۰. ۶- شبکه زهکشی نامتقارن: جنوب‌غربی: الگوی موازی، تراکم بالا، شمال‌شرقی: الگوی درختی، تراکم پایین‌تر. ۶. انتقال مورفولوژیکی در ۳۷۰۰ متر: مرز بالایی اثرگذاری یخبندان‌های کواترنری در زاگرس.



شکل ۲- انعکاس ناتقارنی ارتفاعات دنا تصاویر گوگل ارث

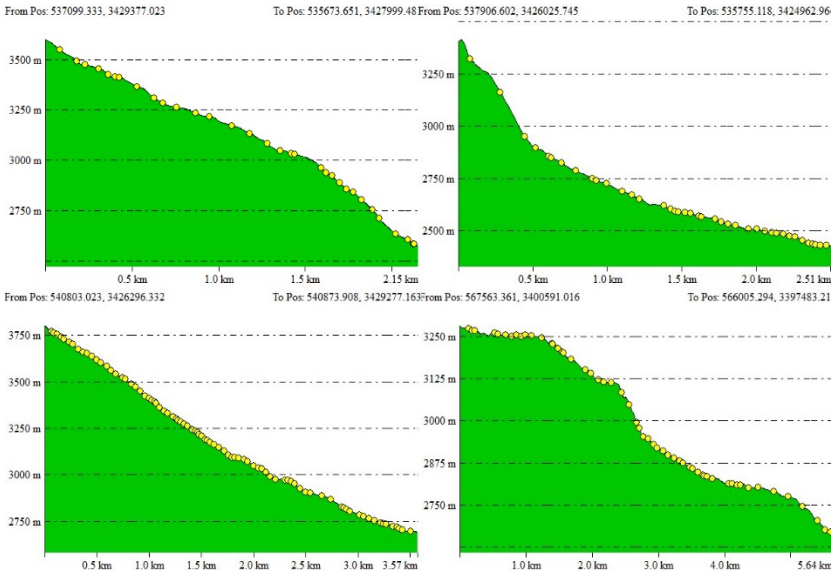
Fig. 2. Reflection of the asymmetry of Dena heights from Google Earth images

الگوهای مورفومتریک 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. به طور 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 ۰/۴۶–۰/۵۱) و R^2 بالای ۰/۹۹، نشان‌دهندهٔ پایداری مورفولوژیکی و تعادل بین بالاآمدگی 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 باقیمانده‌ی فعالیت‌های یخچالی در آخرین دوره‌های یخچالی نسبت داد، به ویژه 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 ماثریو و همکاران (Mouthereau et al., 2006) تفسیر کرد، که در آن کوتاه‌شدگی پی‌سنگ عربستان در مجاورت گسل اصلی، منجر به بالاآمدگی متمرکز و شیب‌های تند در سمت جنوب‌غرب می‌شود، در حالی که دامنه شمال‌شرقی به عنوان سطح بالایی وِج تکتونیکی، 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^3منفی یا x^2منفی)، منحنی‌ها به صورت 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. به ویژه 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 تکتونیکی 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 به طور ناگهانی به حالت کاو تغییر می‌کنند. این ارتفاع را می‌توان به عنوان 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 نشان‌دهندهٔ تسلط فرآیندهای دامنه‌ای (مانند لغزش، سولی‌فولکسیون) 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، به ویژه علامت و بزرگی ضریب x^3 یا x^2، شاخص‌های کمّی از جهت‌گیری انحنا هستند: ضریب منفی x^3 یا $x^2 \rightarrow$ کوژی غالب، ضریب مثبت $\rightarrow x^2$ کاوی غالب.

همچنین، مقایسهٔ 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 به دلیل مقاومت لیتولوژیکی لایه‌های آهکی و دولومیتی که در زاگرس شمال‌شرقی گسترده هستند.

این تحلیل کمّی، نه تنها تفاوت‌های مورفولوژیکی دامنه‌های شمال‌شرقی را روشن می‌سازد، بلکه چارچوبی برای مقایسهٔ 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 چندفرکتال، پیچیدگی بالاتر در کمربند چین‌خورده (دامنه جنوب‌غربی) را نشان دادند، اما روش ما این پیچیدگی را به صورت 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 بالاآمدگی 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 بالاآمدگی تکتونیکی.

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

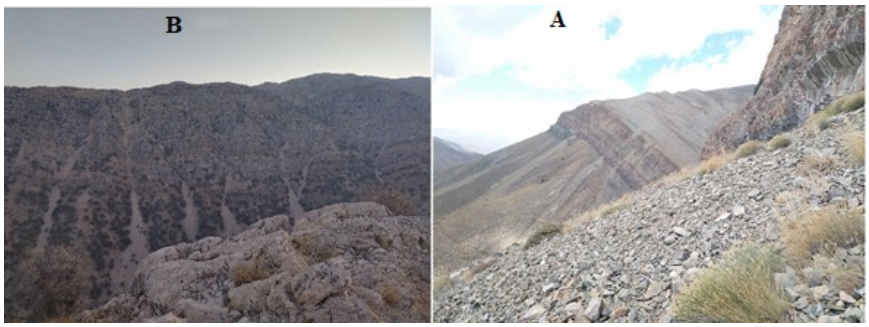
بیشتر نیمرخ‌های جنوب‌غربی دارای شیب‌های خطی تندتر (ضریب x بین ۰/۴۶-۰/۵۱) نسبت به دامنه‌های شمال‌شرقی هستند. این شیب‌های خطی تند، مستقیماً با موقعیت ساختاری این دامنه‌ها در مجاورت گسل اصلی زاگرس مرتبط است؛ جایی که بالاآمدگی تکتونیکی به صورت ناگهانی و پیوسته رخ می‌دهد؛ با این حال، حتی در این نیمرخ‌های 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–کوژ–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، به دلیل 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 به صورت نوسانات کوژ-کاو ظاهر می‌شوند (شکل ۴).



شکل ۴- انعکاسی از گسل اصلی زاگرس (A) و تالوس های واریزه ای ناشی از ریزش(B)

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

نکتهٔ 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 می‌آورند.

مقایسه ضرایب ریاضی، شاخص‌های کمّی از تفاوت فرآیندها

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

- ضریب R^2 در روابط خطی دامنه‌های جنوب‌غربی، علیرغم ناهمواری‌های موضعی، همچنان بالا است (معمولاً 0.97<) که نشان‌دهندهٔ همگنی ساختاری کلی این دامنه، حتی در حضور فرسایش شدید است.
- تکرار الگوهای کاو در بالادست (بالاتر 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 کمّی 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	دامنه‌ارتفاعی Elevation	نوع نیمرخ Profile type	شیب خط Line slope	ضریب تعیین R coefficient	تحلیل مختصر Brief analysis
1	شمال‌شرقی 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
	جنوب‌غربی SW	3100-4050	خطی (مستقیم یا متمایل به کوژ) linear concave (directly or inclined to convex)	0.46-0.51		بالاآمدگی فعال در مجاورت گسل اصلی؛ فرسایش مؤثر Active uplift near the Main Fault; Effective erosion
2	شمال‌شرقی 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
	جنوب‌غربی 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	شمال‌شرقی 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
	جنوب‌غربی 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	دامنه‌ارتفاعی Elevation	نوع نیمرخ Profile type	شیب خط Line slope	ضریب تعیین R coefficient	تحلیل مختصر Brief analysis
4	شمال‌شرقی NE	2600-3500	خطی یا کوژ؛ کاوی بسیار محدود Linear or convex; highly limited concave	0.27-0.37	0.970-0.990	فرسایش ضعیف رودخانه‌ای؛ تسلط فرآیندهای دامنه‌ای Weak fluvial erosion; dominance of slope processes
	جنوب‌غربی SW		کاو متوسط تا شدیدیا 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
5	شمال‌شرقی NE	<2500	کاو ضعیف (در صورت وجود) Weak concavity (if present)	~0.06	~0.96	فرسایش آب‌های روان در پایین‌دست Stream erosion downstream
	جنوب‌غربی SW		کاو واضح و منظم Clear and regular concavity			سیستم‌های رودخانه‌ای فعال و تعادل‌یافته در پایین‌دست Active, balanced fluvial systems in downstream

بیشتر بودن ضریب تعیین (R^2) در نیمرخ‌های دامنه شمال‌شرقی از دامنه جنوب‌غربی نشان‌دهندهٔ پایداری نسبی و همگنی مورفولوژیکی در این دامنه است. در مقابل، پراکندگی بیشتر R^2 و وجود نوسانات انحنا در دامنه جنوب‌غربی، 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 منظم بودن یا پیچیدگی نیمرخ‌ها تأثیر گذاشته است.

تحلیل نیمرخ‌های عرضی زاگرس، عدم‌تقارن 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 جنوب‌غربی (سمت گسل اصلی زاگرس) و شیب ملایم‌تر و طولانی‌تر در دامنه شمال‌شرقی (سمت فلات داخلی ایران) را نشان می‌دهند. این الگوی عدم تقارن که در ادبیات ژئومورفولوژی به عنوان «عدم‌تقارن کوهستانی» شناخته می‌شود، مستقیماً با هندسه گسل اصلی زاگرس و جهت بالاآمدگی 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 جنوب‌غربی) شناسایی کرد. این یافته با مدل‌های ساختاری زاگرس همخوانی دارد که نشان می‌دهند بالاآمدگی بیشتر در مجاورت گسل اصلی رخ می‌دهد و در نتیجه، قله‌های اصلی کوه‌ها به‌سمت جنوب‌غربی جابه‌جا شده‌اند. در برخی از نیمرخ‌هایی دامنه جنوب‌غربی، شیب بسیار تندتر است که نشان‌دهندهٔ 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 خَم 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 برازش دقیقی فراهم می‌کند، نشان می‌دهد که سطح زمین در این مقیاس دارای چندین نقطه عطف است: یک شیب تند در جنوب‌غربی (ممکن است دربرگیرنده یک دیواره‌های یخچالی یا ریزشی باشد)، یک قله اصلی، یک شیب ملایم و طولانی در شمال‌شرقی که گاهی شامل لندفرم‌های یخچالی یا سطوح هم‌شیب می‌شود، و در برخی موارد، دره‌های فرعی یا اتصال رودخانه‌ها در پایین‌دست. به‌عنوان مثال، در برخی از نیمرخ‌ها با ضرایب بزرگ برای x^3وx^4 نشان‌دهندهٔ تغییرات شدید انحنا در نزدیکی قله است که می‌تواند با وجود چندین سیرک یخچالی مجاور یا شکست‌های ساختاری مرتبط باشد.

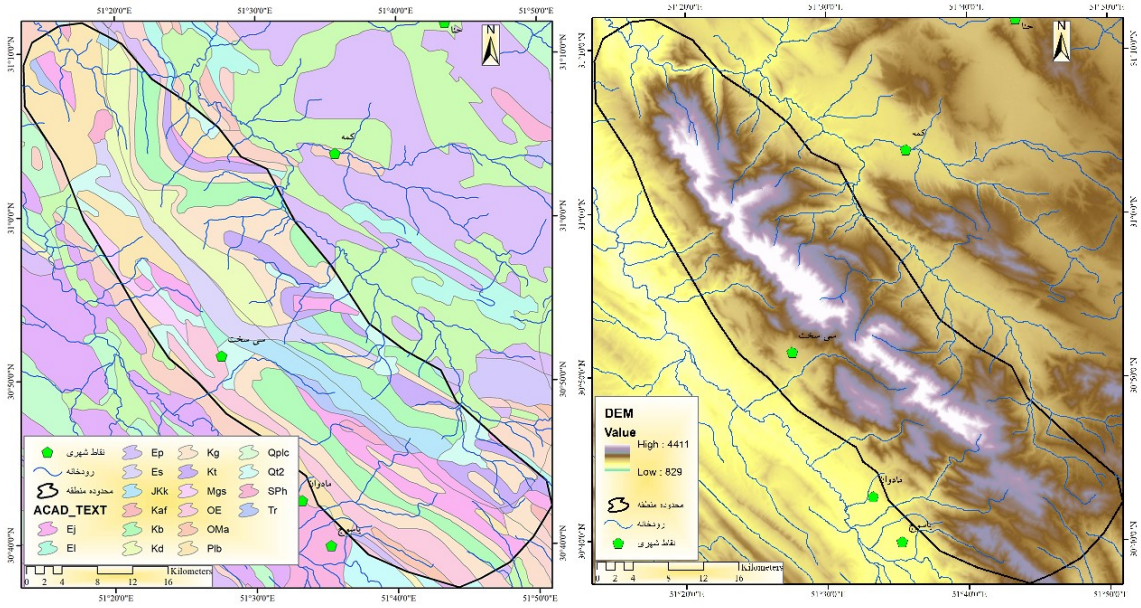
نیمرخ‌هایی با R^2 پایین‌تر (مانند ۰/۹۰۷۸ یا ۰/۹۲۳۳) نشان‌دهندهٔ ناهمواری‌های پیچیده‌تر هستند که ممکن است ناشی از حضور گسل‌های فرعی، تغییر لیتولوژی (انتقال از آهک به مارن)، یا فعالیت‌های یخچالی ناهمگون باشد. در مقابل، نیمرخ‌هایی با R^2 بالاتر از ۰/۹۸ (مانند ۰/۹۸۸۱) نشان‌دهندهٔ ساختارهای مورفولوژیکی منظم‌تر 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 سلطه سازندهای نسبتاً همگن ولی فرسایش‌پذیر (مانند سازند ساچون با تناوب مارن، ژیپس 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 نئوتکتونیکی 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 اجازهٔ توسعه الگوی درختی متأثر از ناهمسانی لیتولوژیکی را داده است. تمرکز سازندهای نسبتاً یکنواخت و فرسایش‌پذیر مانند ساچون در دامنهٔ 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 دامنهٔ 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 زمین شناسی 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.

تطبیق 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 بالاآمدگی عمدتاً در مجاورت آن رخ می‌دهد. در نتیجه، دامنه جنوب‌غربی تحت تأثیر تغییر شکل شدید و فرسایش سریع قرار می‌گیرد، در حالی که دامنه شمال‌شرقی به عنوان دامنه پشتی، ساختارهای قدیمی‌تر و پایدارتری را حفظ کرده است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با تحلیل کمّی بیش از ۲۰۰ نیمرخ طولی و عرضی در دامنه‌های شمال‌شرقی و جنوب‌غربی رشته‌کوه زاگرس، شواهد محکمی از ناتقارن ساختاری-مورفولوژیکی عمیق این کوه‌ها ارائه می‌دهد. الگوهای ناتقارن مورفومتریک شناسایی‌شده در این پژوهش، تنها یک پدیده سطحی نیست، بلکه انعکاسی از تاریخچه تکتونیکی ۲۲ میلیون ساله تصادم عربستان–اوراسیا و به‌ویژه شتاب‌گرفتن 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، نه‌تنها تحت تأثیر فرآیندهای سطحی مانند فرسایش

یخچالی و رودخانه‌ای قرار دارند، بلکه به طور بنیادین توسط هندسه و فعالیت ساختارهای زیرسطحی، به‌ویژه گسل اصلی زاگرس و جهت لایه‌های زمین‌شناسی، کنترل می‌شوند.

دامنهٔ 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، دامنهٔ شمال شرقی که با لایه‌های زمین‌شناسی هم‌شیب است، دارای ساختاری پایدارتر، شیب ملایم‌تر و نیمرخ‌های عمدتاً خطی یا کوژ است که نشان‌دهندهٔ تعادل نسبی بین بالاآمدگی 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 شمال‌شرقی به صورت سطوح محدب ملایم و در دامنهٔ 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 کمّی 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 جنوب‌غربی) 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 (جنوب‌غرب)، و دیگری در پهنه پشتی نسبتاً پایدار (شمال‌شرق). 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 Danehkhoshk 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

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/geoeh.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/geoeh.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