



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 36, Issue 4, No.100, 2025, pp. 35- 52

Received: 14/05/2025 Accepted: 17/12/2025

Understanding Tectonic-Erosion Processes of Pediments in the Northern Highlands of Zanjan

Gholam Hassan Jafari  *

Associate professor, Department of Geography, University of Yasouj, Yasouj, Iran
jafarihas@yu.ac.ir

Abstract

Pediments characterized by their low gradient and smooth erosion surfaces are crucial for understanding tectonic and erosion processes. These surfaces typically form as a result of the interplay between erosion and tectonic movements. This study focused on the northern highlands of Zanjan, investigating the tectonic and erosion processes involved in pediment formation with reference to King's model and Shahzidi's proposed model. This region marked by diverse tectonic activity and unique lithological conditions provides an ideal case for examining these phenomena. Employing field analyses, Digital Elevation Models (DEM), and interpretations of Google Earth satellite images, this study identified and investigated pediments. Additionally, field visits to lithological sites and geomorphological analyses were conducted to deepen our understanding of the effects of erosion and tectonics on pediment formation. In the northern areas of Zanjan, long-term erosion has been identified as the primary factor influencing pediment development, particularly in regions with less resistant lithology, such as shale. Slow tectonic activity, especially in the eastern parts of Zanjan, has resulted in the formation of concave pediments with graded slopes. Conversely, in the western regions where tectonic activity is less pronounced, stepped pediments are more prevalent. Active faults in eastern Zanjan have significantly shaped the geology and contributed to pediment formation, creating uneven terrains that have gradually transformed into smooth surfaces under erosive forces. The lithological resistance of andesitic masses amidst less resistant layers has further contributed to slope variations and the development of stepped pediments in the northern highlands of Zanjan.

Keywords: Pediment, Erosion, Tectonics, Shahzidi's Model, King's Model, Zanjan.

Introduction

Pediments are gently sloping, low-relief erosional surfaces that form at the base of mountain fronts often partially covered by alluvial deposits. First described by Lester C. King in 1953, pediments have long been recognized as a characteristic feature of arid and semi-arid landscapes. In these environments, prolonged erosion under tectonically stable conditions results in the retreat of mountain fronts and the development of convex-upward profiles. According to King's classical model, pediments exclusively form in tectonically quiescent settings through lateral planation driven by fluvial processes with minimal contributions from tectonic uplift.

*Corresponding Author

Jafari, G. (2025). Investigating Tectonic-Erosional Processes Controlling the Formation of Pediments in the Northern Highlands of Zanjan. *Geography and Environmental Planning*, 36 (4), 35 - 52 .



2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/gep.2025.145275.1724

Recent experimental and field-based models, however, challenge this perspective. Shahzeidi (2014) proposed an alternative framework based on physical modeling, suggesting that concave pediments with graded slopes can develop under conditions of slow but continuous tectonic uplift combined with long-term erosion. This model posits that even minimal uplift rates (>0.1 mm/yr) can significantly influence landform evolution by maintaining a dynamic equilibrium between rock uplift and erosion, resulting in smooth, concave profiles rather than stepped or convex ones.

The northern highlands of Zanjan situated at the intersection of the Central Iranian Block and the Alborz-Taleh zone, provide a unique natural laboratory for testing these competing geomorphological models. This region exhibits notable spatial variability in tectonic activity, including active fault systems, such as Sultanieh Fault in the south and North Zanjan Fault in the north, alongside areas of relative tectonic stability. Additionally, the presence of resistant Eocene andesitic units (Karj Formation) interbedded with weaker marls and shales creates strong lithological contrasts that significantly influence landscape evolution.

This study aimed to empirically test the predictive capabilities of King's (1953) and Shahzeidi's (2014) models within a real-world tectonically active environment. By analyzing 30 elevation profiles across the northern Zanjan highlands, we evaluated which model more accurately explained the observed morphologies of pediments and investigated the relative roles of tectonics, long-term erosion, and lithological resistance in shaping these landforms.

Materials & Methods

Primary data were collected through a combination of remote sensing analysis and field surveys. A high-resolution Digital Elevation Model (DEM) with a 12.5-m pixel resolution derived from ALOS PALSAR was utilized to extract 30 cross-sectional elevation profiles perpendicular to mountain fronts throughout the study area. These profiles were manually digitized by using GIS software and categorized based on their morphological characteristics: convex, concave, or stepped.

Field observations were conducted along selected profiles to validate geological structures, identify fault traces, and assess lithological variations. Rock samples were collected for petrographic analysis to confirm the composition and resistance of andesitic masses compared to softer sedimentary layers. Morphometric analyses included calculation of slope gradients, measurement of elevation differences between adjacent terraces, assessment of profile curvature, and spatial correlation with mapped fault systems and lithological units. All profiles were classified according to 3 hypotheses derived from Shahzeidi's (2014) experimental model:

- **Hypothesis 1:** Stepped and convex profiles indicate long-term erosion under tectonic stability.
- **Hypothesis 2:** Stepped profiles with moderate slope changes suggest limited tectonic influence alongside predominant erosion.
- **Hypothesis 3:** Concave profiles with gradual slopes reflect long-term erosion under slow tectonic uplift.

Statistical summaries of profile types and their spatial distribution were generated to evaluate regional patterns.

Research Findings

A total of 30 elevation profiles were analyzed across the northern highlands of Zanjan, revealing a distinct spatial pattern in pediment morphology: 46.7% ($n=14$) of the profiles exhibited stepped and convex forms, primarily located in the western and northwestern parts of the region, particularly near the Arman-Khan fault zone, which was characterized by low seismic activity, 40% ($n=12$) displayed concave profiles with graded slopes concentrated in the eastern and southeastern sectors directly aligned with active segments of Sultanieh Fault, 10% ($n=3$) exhibited partially convex stepped features, and 3.3% ($n=1$) showed a partially concave profile, indicating transitional forms.

Vertical offsets between adjacent terraces varied systematically:

- In distal piedmont zones (e.g., downstream of pediment toes), offsets ranged from 30 to 70 m, suggesting advanced stages of erosion.
- In mid-slope transition zones, offsets were measured 100 to 200 m, indicating interaction between tectonic forces and erosion.
- Near mountain crests (e.g., Tarm Heights), offsets ranged from 250 to 400 m, reflecting early-stage development primarily influenced by tectonic uplift.

All stepped profiles, regardless of their convexity or concavity, were spatially associated with the resistant andesitic masses of Karj Formation (Eocene). These units served as remnant surfaces due to their high resistance to erosion, while the softer intervening layers (such as marls and shales) were eroded more rapidly, resulting in staircase-like features.

Spatial overlays with structural maps confirmed that concave profiles were consistently located along active fault traces, while convex profiles were found in areas with minimal faulting and lower levels of crustal deformation.

Discussion of Results & Conclusion

The findings strongly supported Shahzeidi's (2014) model over King's (1953) classical hypothesis. The presence of concave pediments in eastern Zanzan formed under conditions of slow tectonic uplift combined with long-term erosion aligned perfectly with the predictions of the experimental model. This result corroborated global studies indicating that even very low uplift rates (>0.1 mm/yr) can produce concave pediments. For instance, Pelletier (2008) in Arizona and Richardson et al. (2024) in South Africa identified such forms as indicators of sustained, low-amplitude tectonic activity rather than tectonic quiescence.

In contrast, the convex and stepped pediments in western Zanzan conformed to King's model, but only as a specific case within a broader tectonically active context. Their presence reflected periods of relative tectonic stability rather than absolute stillness, underscoring the significance of local structural controls.

Lithological resistance played a crucial role in shaping micro-morphology. The alternation of resistant andesitic layers with weaker interlayers produced stepped features consistent with findings by Eppes and McFadden (2008) in arid basins, where differential erosion has led to the formation of terrace-like remnants. This "relative resistance" effect illustrated how lithology could overshadow uniform tectonic signals, resulting in diverse morphologies even under similar uplift regimes.

Moreover, the asymmetric spatial distribution—46.7% convex in the west versus 40% concave in the east—revealed significant geodynamic heterogeneity across the northern Zanzan highlands. This pattern mirrored observations by Muñoz-Farias et al. (2023) in Atacama Desert, where active tectonic settings have promoted the development of concave pediments, while stable zones have given rise to convex forms.

Crucially, this study demonstrated that erosion remained the dominant process in pediment formation; however, its manifestation was fundamentally influenced by the underlying tectonic and lithological frameworks. The evolution of pediments in this region followed a 3-phase trajectory: tectonic dominance characterized by high relief and large terrace offsets, interaction phase involving moderate uplift coupled with erosion, and erosional dominance marked by low relief, small offsets, and convex forms. Thus, the formation of pediments in northern Zanzan was best explained by a tripartite interaction among long-term erosion (as the primary agent), slow tectonics (which governed overall shape), and lithological heterogeneity (which determined microstructural features).

This research provided the first successful field validation of Shahzeidi's (2014) experimental model in Iran, illustrating that concave pediments could form under conditions of slow tectonic uplift combined with long-term erosion. The widespread occurrence of such forms in eastern Zanzan challenged the classical notion that pediments necessitate tectonic stability, reinforcing the modern understanding that even minimal uplift can significantly shape landscapes over geological timescales. The convex and stepped pediments in the west represented sub-cases of tectonic stability within an overall active regime, aligning with King's model but not discounting the broader role of tectonics.

The study highlighted the necessity of integrating tectonic, erosional, and lithological factors in geomorphological analyses. It also emphasized the value of combining remote sensing with fieldwork to validate theoretical models in complex terrains. These findings have practical implications for neotectonic reconstruction, geological hazard assessment in mountainous areas, and sustainable management of water and soil resources in adjacent plains. For future research, it is recommended to incorporate quantitative morphometric indices (e.g., hypsometric integral, stream length-gradient index) to expand this analytical framework into a fully quantitative domain.

مقاله پژوهشی

بررسی فرآیندهای تکتونیکی - فرسایشی مؤثر در شکل‌گیری پدیمت‌های ارتفاعات شمالی زنجان

غلامحسن جعفری* ، دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

jafarihas@yu.ac.ir

چکیده

پدیمت‌ها به‌عنوان سطوح فرسایشی کم‌شیب در پایه رشته‌کوه‌ها، شاخص‌های کلیدی برای درک تعامل بین فرآیندهای تکتونیکی و فرسایشی محسوب می‌شوند؛ با این حال، ماهیت شکل‌گیری آنها در مناطق با شرایط زمین‌ساختی و لیتولوژیکی متنوع همچنان چالش‌برانگیز است. این پژوهش با هدف بررسی نقش فرآیندهای تکتونیکی-فرسایشی در ژنز پدیمت‌های ارتفاعات شمالی استان زنجان طراحی شده است. منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران واقع شده است و به‌دلیل تنوع لیتولوژیکی، فعالیت‌های نئوتکتونیکی متفاوت و حضور گسل‌های فعال، زمینه مناسبی برای تحلیل این تعامل فراهم می‌کند. روش‌شناسی پژوهش ترکیبی از تحلیل‌های میدانی، پردازش مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت بالا، تفسیر تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث و استفاده از مدل‌های نظری کینگ و شاهزیدی است. نیم‌رخ‌های ارتفاعی از ۳۰ موقعیت مختلف ترسیم و براساس شکل هندسی (محدب، مقعر، پلکانی) و رابطه آنها با ساختارهای تکتونیکی و لیتولوژی منطقه تحلیل شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که در مناطق غرب و شمال‌غربی زنجان، فرسایش طولانی‌مدت در شرایط تکتونیکی پایدار منجر به تشکیل پدیمت‌های پلکانی شده است؛ در حالی که در شرق و جنوب شرقی زنجان، فعالیت‌های تکتونیکی آرام همراه با فرسایش، پدیمت‌های مقعر با شیب استدراجی را ایجاد کرده‌اند. همچنین، مقاومت نسبی توده‌های آندزیتی در برابر فرسایش نقش مهمی در ایجاد تغییرات شیب و شکل‌گیری پلکان‌های موضعی ایفا کرده است. این مطالعه با تأکید بر تعامل سه‌گانه فرسایش، تکتونیک و لیتولوژی، نه تنها به‌درک بهتر ژنز پدیمت‌ها در شمال غرب ایران کمک می‌کند، اعتبار مدل شاهزیدی را در مقایسه با مدل کلاسیک کینگ در شرایط واقعی زمین‌شناسی تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پدیمت، فرسایش، مدل کینگ، مدل شاهزیدی، زنجان.

*نویسنده مسئول

جعفری، غلامحسن. (۱۴۰۴). بررسی فرآیندهای تکتونیکی - فرسایشی مؤثر در شکل‌گیری پدیمت‌های ارتفاعات شمالی زنجان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی،

۳۶ (۴)، ۵۲-۳۵.



مقدمه

پدیمت‌ها به عنوان سطوح فرسایشی کم‌شیب در پایه رشته‌کوه‌ها، از عناصر کلیدی ژئومورفولوژی محیط‌های خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند. از دیرباز، تشکیل این سطوح موضوع بحث‌های گسترده‌ای در ژئومورفولوژی بوده است. تغییر شکل زمین نتیجه برخی تغییرات آب‌وهوایی، سطح اساس یا کاربری زمین است (Phillips, 2020, p. 407). ژئومورفولوژی، شناسایی لندفرم‌های موجود در سطح زمین و بررسی آنها در جهت رمزگشایی از وضعیت توپوگرافی گذشته، حال و آینده است (Sanjari et al., 2021, p. 903). ژئومورفولوژیست‌ها برای درک چرایی اشکال زمین، به درک شکل، دینامیک و تاریخ زمین و پیش‌بینی تغییرات از طریق مشاهدات میدانی، آزمایش‌های فیزیکی و مدل‌سازی‌های عددی می‌پردازند (Gregory & Goudie, 2011, p. 3).

در کوهپایه‌های ارتفاعات شمالی زنجان، گسترش گسترده‌ای از سطوح فرسایشی کم‌شیب (دشت‌سرها) مشاهده می‌شود که حضور اینسلب‌های متعدد در امتداد این سطوح، به عنوان شاهدهی کلیدی از فرآیند عقب‌نشینی شیب‌های کوهستانی و تکامل بلندمدت این لندفرم‌ها تلقی می‌شود؛ با این حال، ماهیت ژنز این پدیمت‌ها، آیا نتیجه فرسایش خالص در شرایط تکتونیکی پایدار است یا حاصل تعامل پویای بین فرسایش، تکتونیک آرام و لیتولوژی ناهمگن؟ هنوز به صورت جامع و تجربی بررسی نشده است. این عدم قطعیت، بیان مسئله اصلی این پژوهش را تشکیل می‌دهد. اگرچه مطالعات پدیمت از دیرباز مورد توجه ژئومورفولوژیست‌ها بوده است، در دهه‌های اخیر، تحقیقات مستقیم درباره مکانیسم‌های بنیادین تشکیل پدیمت کاهش یافته است. این کاهش توجه، نه نشان‌دهنده بی‌اهمیتی این موضوع، بلکه بازتاب جابه‌جایی محورهای پژوهشی در ژئومورفولوژی معاصر است. در چنین شرایطی، بازبینی تجربی مدل‌های کلاسیک، مانند مدل کینگ، در محیط‌های زمین‌ساختی فعال مانند ایران مرکزی، نه تنها ضروری، دارای جنبه نوآورانه است. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل ژئومورفولوژیکی الگوهای شکل‌گیری پدیمت‌های ارتفاعات شمالی زنجان با تمرکز بر سه عامل کنترل‌کننده اصلی: فرسایش طولانی‌مدت، فعالیت‌های نئوتکتونیکی آرام و مقاومت لیتولوژیکی ناهمگن است. این پژوهش به دنبال پاسخ به این پرسش کلیدی است: آیا شکل‌گیری دشت‌سرها ارتفاعات شمالی زنجان نتیجه فرسایش خالص در شرایط تکتونیکی پایدار است، یا حاصل تعامل پویای بین فرسایش و تحرکات تکتونیکی آرام در حضور لیتولوژی ناهمگن است.

مطالعات پدیمت به اواخر قرن نوزدهم بازمی‌گردد؛ زمانی که گیلبرت از این اصطلاح برای توصیف ویژگی‌های کوه‌های هنری در یوتا استفاده کرد. او براساس تحقیقات خود درباره لندفرم‌ها و فرآیندهای مرتبط با شکل‌گیری آنها در مناطق مختلف ایالات متحده، مجموعه‌ای از اصول را برای توضیح ویژگی‌های ژئومورفیک فرموله کرد (Corner, 1992, p. 386). پس از او، مک‌گی در مطالعات خود در صحرای سونوران، جنوب غربی آریزونا و شمال مکزیک، از واژه پدیمت برای توصیف سطوح سنگی تشکیل‌شده توسط جریان‌های صفحه‌ای آب استفاده کرد (McGee, 1897). بریان نیز در تحقیقات خود از این اصطلاح بهره برد و به بررسی نقش فرآیندهای فرسایشی در تشکیل پدیمت‌ها پرداخت (Bryan, 1922).

جوهانسون به بررسی نقش فرآیندهای فرسایشی و تکتونیکی در تشکیل پدیمت‌ها پرداخت و نتیجه گرفت که این سطوح تحت تأثیر تعامل پیچیده‌ای بین فرسایش و تکتونیک قرار دارند (Johnson, 1931). در این دوره، دو چارچوب نظری بنیادین شکل گرفت: ۱- ویلیام موریس دیویس (۱۸۵۰-۱۹۳۴)، ژئومورفولوژیست آمریکایی، مفهوم «چرخه جغرافیایی» را ارائه داد که در آن یک خشکی مرتفع در نهایت به دشت همواری با شیب کم (پنه‌پلن) تبدیل می‌شود. ۲- در مقابل، والتر پنک (۱۸۸۸-۱۹۲۳)، ژئومورفولوژیست آلمانی، ویژگی‌های لندفرم‌ها را نه تابع زمان، بلکه مستقیماً با فعالیت زمین‌ساختی منطقه مرتبط می‌دانست (Anderson & Anderson, 2010, p. 15).

کینگ (۱۹۴۹-۱۹۵۳) به عنوان یکی از نظریه‌پردازان برجسته ژئومورفولوژی، پدیمت را عنصر اساسی دامنه‌ها معرفی کرد و معتقد بود که پدیمت‌ها حاصل فرآیندهای فرسایشی طولانی‌مدت در اقلیم‌های دو فصلی هستند. او مجموعه‌ای از مدل‌های چرخه‌ای (مانند چرخه پدی‌پلن) را فرموله و ادعا کرد این مدل‌ها در سراسر جهان تعمیم‌پذیرند (Twidale, 1992, p. 491).

وینست و ساده در مطالعه‌ای جامع بر ۳۷ پدیمت در عربستان سعودی، با استفاده از بررسی‌های تئودولیتی و تحلیل انحنای نیمرخ نشان دادند که پدیمت‌های کوتاه‌تر تمایل به تشکیل نیمرخ‌های محدب دارند؛ در حالی که پدیمت‌های بلندتر تمایل به تشکیل نیمرخ‌های مقعر یا خطی دارند. این یافته نشان می‌دهد که فرم نیمرخ تنها بازتابی از فرآیندهای تشکیل دهنده نیست، بلکه تابعی از طول عمر و تحول پدیمت است (Vincent & Sadah, 1996).

بورن و تویدال در مطالعه‌ای در رشته‌کوه فلایندرز استرالیا نشان دادند که رودخانه‌های سرچشمه‌گرفته از سنگ‌های مقاوم (مانند کوارتزیت و آهک) منجر به تشکیل پدیمت می‌شوند؛ در حالی که رودخانه‌های عبوری از سنگ‌های نرم (مانند رس‌ها) حجم بالایی از رسوبات را منتقل و مخروط افکنه ایجاد می‌کنند. این یافته نشان می‌دهد که حضور توده‌های مقاوم (مانند آندزیت در منطقه زنجان) نه تنها در شکل‌گیری پدیمت مؤثر است، با جلوگیری از تجمع رسوبات متراکم، شرایط لازم برای حفظ سطوح فرسایشی را فراهم می‌کند (Bourne & Twidale, 1998). پازاگلیا در مروری جامع، تأکید می‌کند که اگرچه مدل‌های کیفی نقش تاریخی مهمی در توسعه ژئومورفولوژی داشته‌اند، مدل‌های تجربی و عددی در درک دقیق‌تر فرآیندهای بلندمدت مؤثرتر عمل می‌کنند (Pazzaglia, 2003).

در این مطالعه، مدل کینگ به عنوان یک مدل کیفی و شاهزیدی به عنوان یک مدل تجربی-شبیه‌سازی‌شده مقایسه شده‌اند (شاهزیدی، ۱۳۹۳؛ King, 1949). این رویکرد، همسو با چارچوب پیشنهادی پزاگلیا بر ضرورت تلفیق مدل‌های کلاسیک با رویکردهای تجربی و عددی تأکید دارد (Pazzaglia, 2003). استردلی و مورای اولین کسانی بودند که تشکیل پدیمت را به صورت عددی مدل کردند. آنها با استفاده از مدل‌های ریاضی، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر تشکیل و تکامل پدیمت‌ها پرداختند (Strudley & Murray, 2007). آپس و مک‌فادن نیز به بررسی تأثیر هوازدهی سنگ بستر بر تشکیل پدیمت‌ها در محیط‌های خشک پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که هوازدهی سنگ بستر می‌تواند به تشکیل پدیمت‌ها کمک کند (Eppes & McFadden, 2008). در مقابل، هک (۱۹۹۱-۱۹۱۳) خاطر نشان کرد چشم‌اندازهای چندسطحی را نمی‌توان براساس چرخه فرسایش چندگانه دیویس توضیح داد؛ بلکه باید آنها را براساس نظریه تعادل دینامیکی درک کرد (Anzaku & Adamu-Ja, 2023, p. 83). پیلتر با ارائه یک

مدل عددی ترکیبی، نشان داد که فرسایش در رشته‌کوه‌ها می‌تواند از طریق واکنش ایزواستاتیک خمشی، باعث بالآمدگی نسبی پای کوه و ایجاد سطوح فرسایشی هموار شود. این مدل همچنین تأکید می‌کند که برای تشکیل پدیمت، نرخ فرسایش باید دست‌کم برابر نرخ تولید خاک باشد تا سطح سنگ بستر بیرون بیاید (Pelletier, 2008).

دوهرنوند و پارسونز در یکی از جامع‌ترین بررسی‌های تطبیقی، نشان دادند که پدیمت‌ها در طیف گسترده‌ای از شرایط اقلیمی، از مناطق قطبی تا گرمسیری رطوبتی و بر انواع سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی تشکیل می‌شوند (Dohrenwend & Parsons, 2009). دگوریر و همکاران در مطالعه‌ای در اسپانیا نشان دادند که دیپایر نمکی Estella با نرخ بالآمدگی ۰/۰۵-۰/۰۷ میلیمتر در سال، باعث جابه‌جایی عمودی ۴۰ متری پدیمت P5 و تغییر مسیر رودخانه Ega شده است. این یافته نشان می‌دهد که حتی تحرکات بسیار آرام پوسته، اگر به طولانی‌مدت رخ دهند، می‌توانند بر شکل‌گیری و تحول پدیمت تأثیر بگذارند (Guerrero et al., 2023). مونوز-فارسیس و همکاران در صحرای آتاکاما، با استفاده از تاریخ‌گذاری ایزوتوپی، تکامل پدیمت را به‌عنوان فرآیندی طولانی‌مدت (تا ۲/۳ میلیون سال) تأیید کردند (Munoz-Farias et al., 2023). ریچاردسون و همکاران نیز با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، پایداری ژئومورفیک پدیمت‌ها را برای دست‌کم ۱ میلیون سال نشان دادند. همچنین، مطالعات اخیر در مناطق تکتونیکی فعال نشان داده‌اند که عقب‌نشینی شیب جبهه کوه تحت کنترل گسل‌ها، منجر به تشکیل پدیمت و سایر سطوح فرسایشی می‌شود (Richardson et al., 2024). بیسواس و همکاران در حوضه ریفتی بیکانر-ناگور در غرب هند نشان دادند که گسل‌ها و خطواره‌ها نقش کلیدی در کنترل شبکه زهکشی و شکل‌گیری پدیمت‌ها دارند. آنها با استفاده از تحلیل منحنی‌های هیپسومتریک (HC) و شاخص‌های مورفومتریک، نشان دادند که بخش‌هایی از حوضه تحت تأثیر فعالیت تکتونیکی قرار دارند و این فعالیت منجر به تشکیل پدیمت، دشت سیلابی و اینسلب‌گ شده است (Biswas et al., 2024).

مطالعات قدیمی حضور پدیمت‌ها در ایران را تأیید می‌کنند. ویس در یکی از جامع‌ترین مطالعات دوران نئوژن و پلیوسن در ایران، نشان داد که فرآیندهای فرسایشی مشابهی که امروز در مناطق نیمه‌خشک و خشک فعال هستند، در گذشته نیز مؤثر بوده‌اند. او تأکید می‌کند که پدیمت‌های ایران فاقد سطوح پلاناسیون نوع ساوانای آفریقایی (مانند مدل کینگ) هستند و بیشتر از طریق صفحه‌ای‌شدگی داخلی دامنه‌ها و عقب‌نشینی جبهه کوه تشکیل شده‌اند. او چهار مرحله تکاملی برای پدیمت تعریف می‌کند: (۱) مرحله کوه-باهادا، (۲) مرحله پدیمت، (۳) مرحله پدی‌پلن و (۴) مرحله گنبدهای بیابانی (Weise, 1978). این یافته، چارچوب نظری مهمی برای درک تکامل پدیمت‌های زنجان فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که این لندفرم‌ها نه تنها «سطوح انتقال»، سطوحی از تخریب خودخواسته هستند؛ فرآیندی که در منطقه زنجان نیز با مقاومت نسبی آندزیت‌ها و فرسایش لایه‌های نرم مشاهده شد.

المدرسی و همکاران (۱۳۹۰) المدرسی و همکاران به رفتار ارگودیک چشم‌اندازهای ژئومورفیک پرداختند و زمینه نظری برای تحلیل کمی لندفرم‌ها فراهم آوردند. شواهد خاک‌شناختی از قدیمی‌بودن و ثبات نسبی پدیمت‌ها حمایت می‌کند. **ثروتی و همکاران (۱۳۹۲)** در مطالعه‌ای در جنوب اهر نشان دادند که خاک‌های روی پدیمت‌ها دارای درجه تکامل بالاتری نسبت به دشت‌های سیلابی هستند. وجود بلورهای درشت و یوهیدرال گچ، پرشدگی‌های کامل و هوادیدگی گسترده، نشان‌دهنده شرایط طولانی‌مدت و بدون اختلال در این محیط‌هاست. این یافته‌ها مؤید آن است که

پدیمت‌ها محیط‌هایی با ثبات نسبی در برابر فعالیت‌های تکتونیکی و رسوب‌گذاری هستند و بنابراین، فرآیند تشکیل آنها نیز باید در دوره‌های طولانی و تحت تعادل بین فرسایش و بالآمدگی آرام رخ دهد؛ اما شاهزیدی (۱۳۹۳) مهم‌ترین نقد نظریه کینگ در ایران را ارائه داد. او با مدل‌سازی آزمایشگاهی نشان داد که حتی تحرکات تکتونیکی بسیار آرام می‌توانند منجر به تشکیل پدیمت‌های مقعر یا پلکانی شوند؛ در حالی که کینگ چنین نقشی را برای تکتونیک در نظر نگرفته بود. همچنین، مطالعات ژئومورفولوژیکی در ایران نیز از شواهد غیرمستقیم برای ارزیابی ثبات سطوح پدیمتی بهره گرفته‌اند. سرمست و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی جلای بیابان در پدیمت‌های جیرفت، نشان دادند که سطوح پایدار دارای جلایی با ضخامت بیشتر و پرشدگی‌های رسی هستند که نشان‌دهنده مدت‌زمان طولانی‌تر معرض هوازدهی و عدم اختلال تکتونیکی است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که پدیمت‌ها محیط‌هایی با ثبات نسبی هستند و تشکیل آنها نیازمند فرآیندهای فرسایشی طولانی‌مدت در شرایط پایدار است.

مبانی نظری پژوهشی

پدیمت‌ها، سطوح سنگی بستر با شیب ملایم (۰-۱۰ درجه) هستند که با روکش نازکی از رگولیت پوشانده شده‌اند (King, 1953, p. 722; Dohrenwend & Parsons 2009). معمای تشکیل پدیمت را شاید بتوان با در نظر گرفتن اینکه چرا پدیمت‌ها در امتداد بیشتر جبهه‌های کوهستانی تشکیل نمی‌شوند، به بهترین شکل درک کرد. دست‌کم به دو دلیل ممکن است پدیمت‌ها تشکیل نشوند: نخست اینکه بیشتر پدیمت‌ها به‌طور یکنواخت با رسوبات مخروط افکنه پوشیده شده‌اند. در نواحی با برآمدگی سریع اواخر سنوزوییک، نرخ رسوبگذاری در مخروط‌های افکنه اغلب به اندازه کافی زیاد بوده است؛ به‌طوری که مخروط افکنه با جادها به‌طور یکنواخت پدیمت را می‌پوشانند. این واقعیت که مناطقی از حوضه و محدوده که با فعالیت نئوتکتونیکی مشخص می‌شوند، تمایل به پوشش آبرفتی پیوسته دارند، نشان می‌دهد که تشکیل پدیمت یک فرآیند پس از تکتونیکی است. دوم، حتی اگر سنگ بستر از زیر پوشش اولیه آبرفت روی پدیمت خارج شود، خاک یا سنگ روی آن سطح ممکن است به اندازه کافی ضخیم باشد تا از طبقه‌بندی سطح به‌عنوان یک پدیمت جلوگیری کند. به این ترتیب، سطح پدیمت یکی از معیارهای تشخیص پدیمت شناخته می‌شود: یک سطح فرسایشی با شیب ملایم و نسبتاً هموار (Hadley, 1967, p. 86).

برآمدگی ارتفاعات البرز نقش مهمی در تکامل ژئومورفیک مناطق مجاور و محیط‌های رسوبی ایفا کرده است. این مقاله با بررسی شرایط توپوگرافیکی ارتفاعات شمالی زنجان، به تشریح و تبیین وضعیت پدیمت‌های منطقه می‌پردازد. برای تحلیل دقیق‌تر پدیمت‌ها، از مدل‌های پیشنهادی (King, 1953)، المدرسی و همکاران (۱۳۹۰) و شاهزیدی (۱۳۹۳) استفاده شده است. در این مطالعه، بخشی از ارتفاعات شمالی زنجان به‌صورت میدانی از نظر وجود یا عدم وجود لندفرم پدیمت بررسی شد.

کینگ از نظریه پردازان برجسته ژئومورفولوژی، در مطالعات خود که بیشتر روی دشت‌سرهای آفریقا متمرکز بود، بیان می‌کند که دشت‌سرهای حاصل یک دوره فرسایشی طولانی در اقلیم‌های دو فصلی هستند (King, 1949)؛ با این حال، شاهزیدی (۱۳۹۳) با ارائه یک مدل تجربی آزمایشگاهی، نظریه کینگ را نقد کرد و نشان داد که تحرکات تکتونیکی آرام نیز نقش کلیدی در تشکیل دشت‌سرهای ایفا می‌کنند (جدول ۱).

جدول (۱) مقایسه نظرات کینگ و شاهزیدی (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۴ براساس مدل پیشنهادی شاهزیدی)

Table (1) Comparison of King and Shahzaidi's views (Source: Authors, 2025 based on Shahzaidi's proposed model)

موضوع	نظریه کینگ (۱۹۴۹)	نقد شاهزیدی (براساس مدل‌سازی آزمایشگاهی)
شکل دشت‌سرها	دشت‌سرها به شکل محدب هستند.	دشت‌سرها می‌توانند هم محدب و هم مقعر (concave) باشند
نقش فعالیت‌های تکتونیکی	فعالیت‌های تکتونیکی کم یا ناچیز هستند و نقش مهمی در تشکیل دشت‌سرها ندارند.	تحركات تکتونیکی آرام نقش کلیدی در تشکیل دشت‌سرها دارند
فرآیند تشکیل	دشت‌سرها حاصل یک دوره فرسایشی طولانی در اقلیم‌های دو فصلی هستند.	دشت‌سرها حاصل فرسایش طولانی‌مدت همراه با تحركات تکتونیکی آرام هستند.
نیمرخ دشت‌سرها	نیمرخ دشت‌سرها محدب و بدون پلکان است.	نیمرخ دشت‌سرها می‌تواند مقعر با شیب استدراجی یا پلکانی باشد (بسته به وجود یا عدم وجود تحركات تکتونیکی).
تأثیر فرسایش طولانی‌مدت	فرسایش طولانی‌مدت به‌تنهایی باعث تشکیل دشت‌سرها می‌شود.	فرسایش طولانی‌مدت بدون تحركات تکتونیکی باعث تشکیل دشت‌سرها می‌شود.
تأثیر تحركات تکتونیکی	تحركات تکتونیکی تأثیر چندانی ندارند.	تحركات تکتونیکی آرام باعث تشکیل دشت‌سرها می‌شوند.
نتایج مدل‌سازی	نظریه کینگ براساس مشاهدات میدانی و بدون مدل‌سازی آزمایشگاهی ارائه شده است.	شاهزیدی با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی نشان داد که نظریه کینگ با واقعیت مطابقت ندارد.

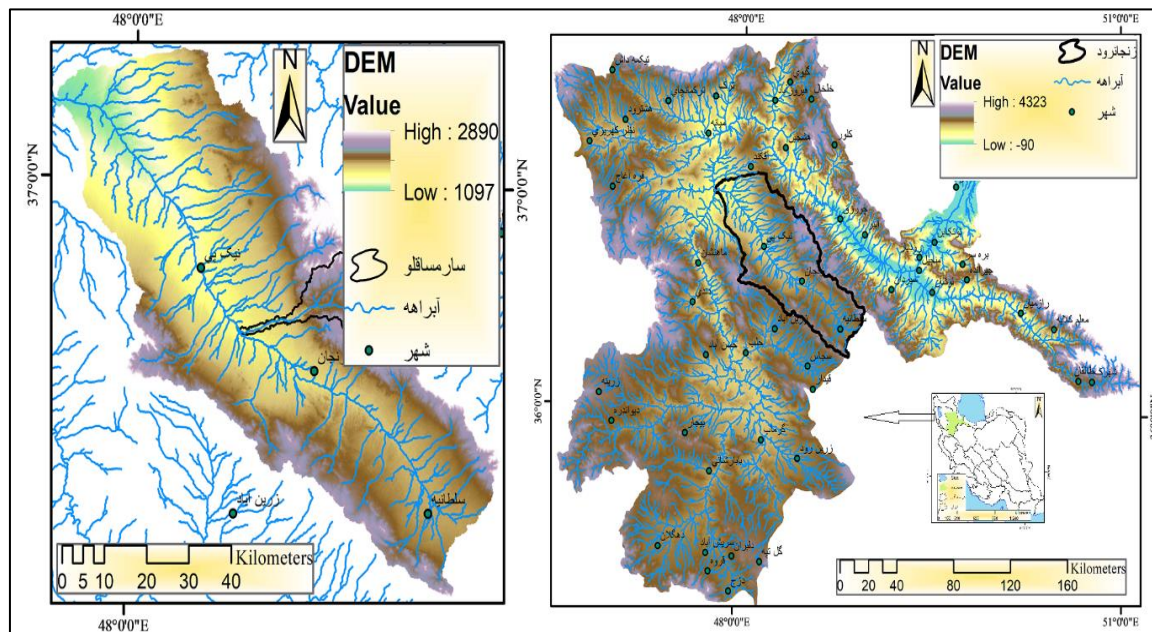
روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه در ارتفاعات شمالی استان زنجان واقع شده است و بخشی از کمربند چین‌خورده و رانده‌شده البرز غربی محسوب می‌شود (جعفری، ۱۳۹۶). این منطقه در مرز فلات ایران مرکزی و رشته‌کوه البرز قرار دارد و تحت تأثیر فعالیت‌های نئوتکتونیکی پیوسته در دوران کواترنری بوده است (Ehteshami-Moinabadi, 2016).

از نظر لیتولوژی، منطقه شامل توده‌های آندزیتی و آذرآواری ائوسن (سازند کرج)، همراه با لایه‌های رسوبی نرم متعلق به دوران‌های میوسن تا کواترنر (مارن، شیل و ماسه‌سنگ) است (نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰،۰۰۰، ورقه زنجان). در دوره میوسن، منطقه در اوج توپوگرافی قرار داشته و سازند قم در آن تشکیل نشده است. در پلیوسن و کواترنر نیز، فرسایش و رسوب‌گذاری گسترده منجر به تشکیل دشت‌ها و تراس‌های آبرفتی شده است.

از دیدگاه ساختاری، منطقه تحت تأثیر گسل‌های فعال شمال‌غربی-جنوب‌شرقی قرار دارد که بسیاری از آنها در دوران کواترنری فعال بوده‌اند (Ehteshami-Moinabadi, 2016). گسل طارم در شمال و گسل سلطانیه در جنوب، به‌عنوان دو ساختار کنترل‌کننده اصلی، باعث بالآمدگی ارتفاعات طارم و فرونشست دشت زنجان-بهر شده‌اند.

اقلیم منطقه از نوع نیمه‌خشک سرد با میانگین بارش سالانه ۳۰۰-۴۰۰ میلی‌متر است (Nouri et al., 2024). در چنین شرایطی، فرسایش صفحه‌ای و سیلابی به‌عنوان عامل اصلی فرسایش سطحی عمل می‌کند و در تشکیل پدیمنت‌ها نقش تعیین‌کننده دارد. گسترش گسترده پدیمنت‌ها در کوهپایه‌های شمالی زنجان، همراه با حضور متعدد اینسلب‌گ‌ها، شواهدی بر فرآیند عقب‌نشینی شیب‌های کوهستانی و تکامل بلندمدت این لندفرم‌هاست. مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بین ۳۶°۱۰ تا ۳۷°۱۱ عرض شمالی و ۴۷°۵۰ تا ۴۸°۵۸ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه زنجانرود در ایران و حوضه سفیدرود (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۴)

Figure 1: Geographical location of the Zanjanrud basin in Iran and the Sefidrud basin (Source: Authors, 2025)

این پژوهش از نوع توصیفی تحلیلی با رویکرد میدانی-کیفی است و هدف آن آزمون تطبیقی دو چارچوب نظری، مدل کلاسیک کینگ و مدل آزمایشگاهی شاهزیدی در شرایط زمین‌ساختی-لیتولوژیکی ارتفاعات شمالی زنجان است (شاهزیدی، ۱۳۹۳؛ King, 1949). روش‌شناسی پژوهش در پنج مرحله انجام شده است:

مرحله ۱: جمع‌آوری داده‌های مکانی شامل ۱- داده‌های ارتفاعی از نوع DEM با دقت مکانی ۱۲/۵ متر از پایگاه SRTM تهیه شد. این داده‌ها از طریق پلتفرم USGS Earth Explorer دانلود شد. ۲- داده‌های DEM در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 مورد پیش‌پردازش (حذف نوفه‌های ارتفاعی، پر کردن سلول‌های خالی با روش کریجینگ) قرار گرفتند. ۳- از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث پرو برای شناسایی اولیه پدیمت‌ها و عوارض ژئومورفولوژیکی استفاده شد.

مرحله ۲: بازدیدهای میدانی و نمونه‌برداری: ۱- در طی سه مرحله بازدید میدانی، ۳۰ نقطه کلیدی در امتداد کوهپایه‌های شمالی زنجان با استفاده از دستگاه GPS دستی با دقت ± 3 متر ثبت شدند. ۲- در هر نقطه، لیتولوژی، نوع سطح (سنگ بستر یا آبرفت)، و شواهد فرسایشی (مانند حضور اینسلب‌رگ‌ها) ثبت شد.

مرحله ۳: استخراج و تحلیل نیمرخ‌های ارتفاعی: ۱- با استفاده از نرم‌افزار گلوبال مپر ۲۴، از هر یک از ۳۰ موقعیت میدانی، یک نیمرخ ارتفاعی عمود بر جبهه کوهستان با طول متوسط ۵ کیلومتر استخراج شد. ۲- برای طبقه‌بندی کیفی نیمرخ‌ها، روش تحلیل هندسی بصری به کار گرفته شد: الف) یک خط مستقیم بین دو نقطه انتهایی نیمرخ (پایه کوه و انتهای پدیمت) ترسیم شد. ب) اگر تمامی نقاط نیمرخ در بالای این خط قرار می‌گرفتند، نیمرخ محذب در نظر گرفته شد. ج) اگر تمامی نقاط در پایین خط قرار می‌گرفتند، نیمرخ مقعر تشخیص داده شد. د) در

صورت وجود تغییرات پلکانی مکرر در امتداد نیمرخ، نیمرخ پلکانی طبقه‌بندی شد. (د) این روش براساس معیارهای کلاسیک توصیف شکل پدیمت در مطالعات کینگ و تویدال استوار است (King, 1949; Twidale, 1992).

مرحله ۴: پیاده‌سازی مدل‌های نظری: ۱- در مدل کینگ، فرض شد که در شرایط تکتونیکی پایدار، نیمرخ‌های محدب یا پلکانی بدون تقعر تشکیل می‌شوند. ۲- در مدل شاهزیدی، فرض شد که در شرایط تکتونیک آرام (بالاآمدگی کم)، نیمرخ‌های مقعر با شیب استدراجی یا پلکانی با تقعر جزئی رخ می‌دهند. ۳- هر نیمرخ با توجه به این دو چارچوب، به یکی از چهار گروه (محدب، مقعر، پلکانی محدب، پلکانی مقعر) اختصاص یافت.

مرحله ۵: اعتبارسنجی و تحلیل فضایی: ۱- نتایج طبقه‌بندی با مشاهدات میدانی مستقل در ۱۰ نقطه غیرنمونه‌ای بازبینی شد. ۲- نیمرخ‌ها در محیط GIS با نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰،۰۰۰ (ورقه زنجان، سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۹۹) و نقشه گسل‌های فعال هم‌پوشانی شد تا رابطه بین ساختارهای تکتونیکی و شکل پدیمت تحلیل شود.

نتایج و بحث

۱. **تطبیق یافته‌ها با چارچوب‌های نظری، تأیید مدل شاهزیدی در محیط واقعی:** یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدل آزمایشگاهی شاهزیدی (۱۳۹۳) در تبیین شکل‌گیری پدیمت‌های ارتفاعات شمالی زنجان برتری درخور توجهی نسبت به مدل کلاسیک کینگ دارد. در شرق و جنوب‌شرقی زنجان، جایی که گسل‌های فعال (مانند گسل‌های شرق سلطانیه) باعث بالاآمدگی آرام پوسته شده‌اند، پدیمت‌های مقعر با شیب استدراجی رخ داده‌اند؛ الگویی که دقیقاً در مدل شاهزیدی پیش‌بینی شده است. این نتیجه مستقیماً مدل کینگ را به‌چالش می‌کشد؛ زیرا وی فرض می‌کرد پدیمت‌ها تنها در شرایط تکتونیکی پایدار و با نیمرخ محدب تشکیل می‌شوند.

در مقابل، نمودارهایی با فرم پلکانی و فاقد نیمرخ مقعر که در ارتفاعات مختلف و با دوره‌های نسبتاً ثابتی ظاهر شده‌اند، به‌وضوح با پیش‌فرض اول مطابقت دارند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده دوره‌های فرسایشی طولانی‌مدتی است که بدون تغییرات عمده در میزان بالاآمدگی چکاد رخ داده است. بالاآمدگی آرام و تدریجی چکاد باعث ایجاد پلکان‌ها شده است؛ اما نیمرخ مقعری در این مناطق شکل نگرفته است.

همچنین، در مواردی که تعداد پلکان‌های قابل مشاهده بیشتر بوده و فاصله و وسعت پلکان‌ها افزایش یافته است، نشان‌دهنده یک دوره فرسایش طولانی‌تر و پیچیده‌تر است. این ویژگی به‌طور کامل با پیش‌فرض دوم مطابقت دارد که به تأثیر مدت زمان فرسایش بر افزایش تعداد و وسعت پلکان‌ها اشاره می‌کند.

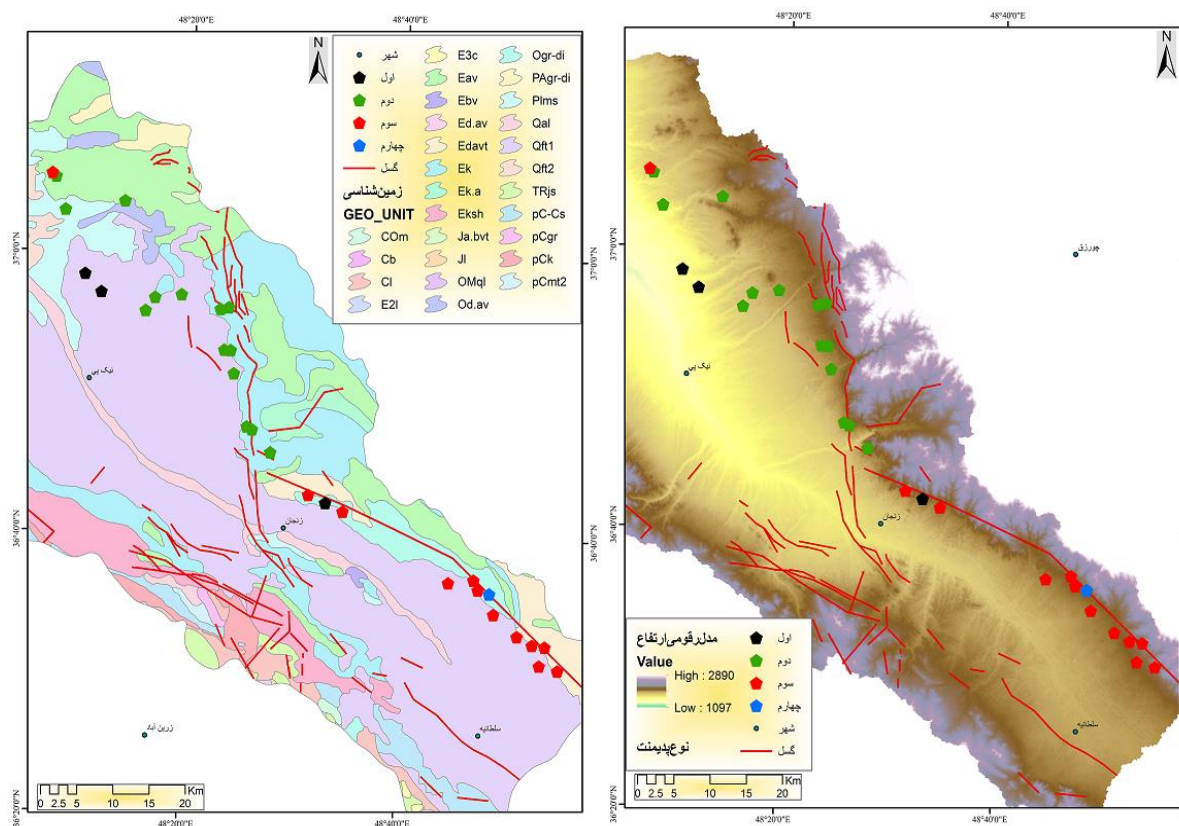
از سوی دیگر، در نمودارهایی که دارای شیب تدریجی و نیمرخ مقعری هستند، پلکان‌های محدودی دیده می‌شود؛ اما شیب کلی نرم‌تر و هموارتر است. این نیمرخ‌ها نشان‌دهنده یک دوره فرسایش طولانی‌مدت همراه با بالاآمدگی آرام چکاد است که باعث ایجاد شیب تدریجی و مقعری می‌شود. این ویژگی‌ها به‌طور کامل با پیش‌فرض سوم مطابقت دارد که به نیمرخ مقعر دشت‌سرها اشاره می‌کند. در این حالت، نیمرخ‌های مقعری با شیب یکنواخت و نرم‌تر و عدم وجود پلکان‌های مشخص، به‌وضوح نشان‌دهنده یک دوره فرسایش طولانی همراه با بالاآمدگی آرام چکاد است.

در نهایت، اگر تعداد پلکان‌های قابل مشاهده بسیار زیاد باشد و شیب کلی نسبتاً یکنواخت باشد، با پلکان‌هایی که در فاصله‌های متفاوتی گسترش یافته‌اند، نشان‌دهنده یک دوره فرسایش بسیار طولانی است که طی آن وسعت پهنه

پلکان‌ها نیز به مرور زمان افزایش یافته است. اینگونه نمودارها به‌طور کامل با پیش‌فرض دوم منطبق هستند که در آن مدت زمان فرسایش مستقیماً بر تعداد و وسعت پلکان‌ها تأثیر دارد.

بنابراین، این مطالعه اولین آزمون تجربی موفق مدل شاهزیدی در یک محیط زمین‌ساختی واقعی در ایران محسوب می‌شود و نشان می‌دهد که نظریه‌های ژئومورفولوژیک باید در شرایط تکتونیک فعال (نه فقط پایدار) ارزیابی شوند.

۲. تفسیر فضایی نیمرخ‌ها: نقش گسل‌ها و لیتولوژی در کنترل مورفولوژی: هم‌پوشانی نیمرخ‌های ترسیم‌شده در شکل (۲) با نقشه زمین‌شناسی و موقعیت گسل‌ها، رابطه علی بین ساختارهای تکتونیکی و شکل پدیمت را آشکار می‌سازد:



شکل ۲. موقعیت مکانی پروفیل‌های ارتفاعی در لایه رقومی ارتفاع و در لایه زمین‌شناسی حوضه زنجنرود (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۴)

Figure 2. Location of elevation profiles in the digital elevation layer and in the geological layer of the Zanjnroud Basin (Source: Authors, 2025)

- بیشتر نیمرخ‌های شرق و جنوب‌شرقی زنجان، مستقیماً روی گسل‌های فعال قرار دارند و همگی مقعر هستند. این هم‌موقعیت فضایی نشان می‌دهد که فعالیت گسل‌ها، حتی اگر آرام باشد، با ایجاد اختلاف ارتفاع موضعی، شرایط لازم برای تشکیل نیمرخ‌های مقعر را فراهم کرده است.
- درمقابل، غالب نیمرخ‌های غرب و شمال‌غربی زنجان، در محدوده گسل‌های کم‌فعال ارمغانخانه قرار دارند و پلکانی محدب هستند؛ الگویی که با شرایط تکتونیکی نسبتاً پایدار سازگار است (شکل ۳).

علاوه بر تکتونیک، لیتولوژی نقش کلیدی در شکل‌گیری ریزساختارهای پدیمت داشته است. تمامی نیمرخ‌های پلکانی (چه محدب و چه مقعر) با توده‌های آندزیتی (سازند کرج، ائوسن) هم‌راستا هستند. این توده‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر فرسایش، به عنوان سطوح باقی مانده عمل کرده‌اند؛ در حالی که لایه‌های میانی (مارن، شیل) به سرعت فرسایش یافته‌اند.

۳. توزیع فضایی و تفسیر ژئودینامیکی: جدول (۲) نشان می‌دهد که ۶۷/۴۶٪ نیمرخ‌ها محدب و ۴۰٪ مقعر هستند. این توزیع نامتقارن نشان‌دهنده ناهمگنی ژئودینامیکی در ارتفاعات شمالی زنجان است:

- غلبه نیمرخ‌های محدب در غرب و شمال‌غربی نشان می‌دهد که این منطقه در دوران کواترنری تحت تأثیر حداقل فعالیت تکتونیک قرار داشته است؛ شرایطی که با مدل کینگ سازگار است، اما تنها به عنوان یک زیرمجموعه از واقعیت.
- وجود قابل توجه نیمرخ‌های مقعر در شرق و جنوب‌شرقی زنجان تأکیدی بر این است که تکتونیک آرام در این منطقه همچنان فعال بوده و بر مورفولوژی پدیمت تأثیرگذار است.

جدول ۲. تحلیل نیمرخ‌ها با توجه به پیش‌فرض‌ها (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۴)

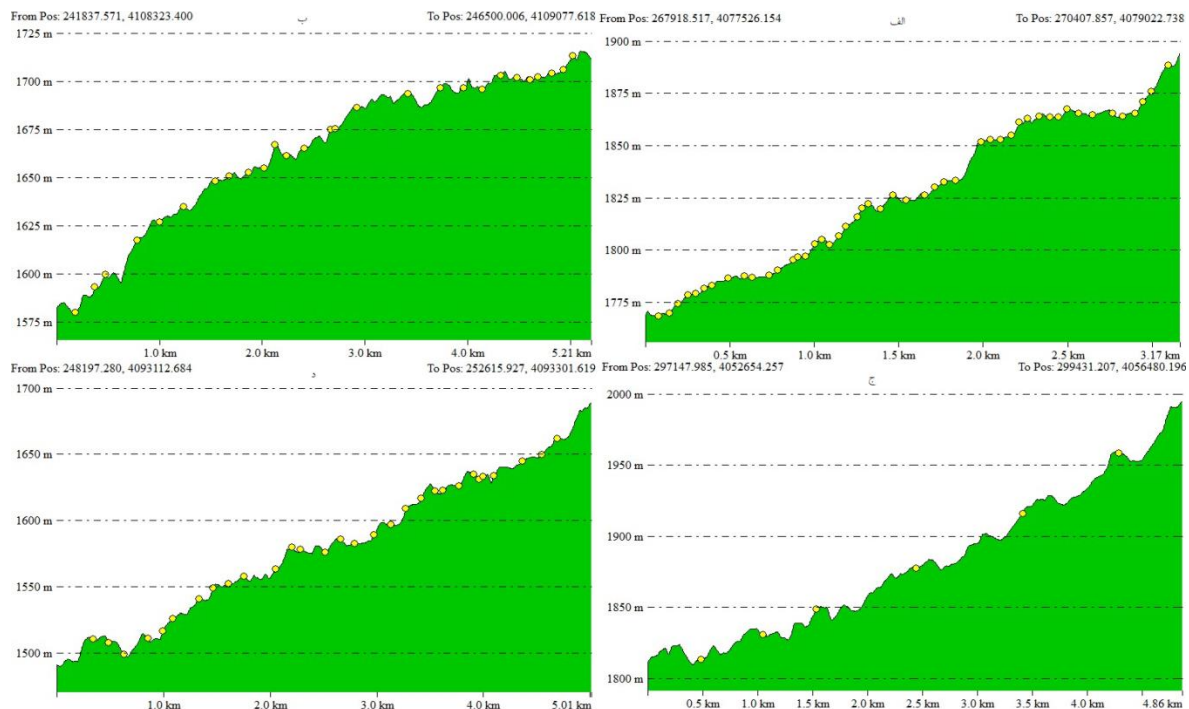
Table 2. Analysis of profiles according to assumptions (Source: Authors, 2025)

نوع نیمرخ	نوع پدیمت	تعداد	درصد	توضیحات
پلکانی تا حدودی محدب	۱	۳	۱۰	تطابق جزئی با پیش‌فرض اول. ترکیب فرسایش و بالا آمدن چکاد
پلکانی محدب	۲	۱۴	۶۷/۴۶	تطابق با پیش‌فرض اول و دوم. نشان‌دهنده فرسایش بدون تحرک چکاد
پلکانی مقعر	۳	۱۲	۴۰	انطباق با پیش‌فرض سوم (شیب تدریجی و مقعر). نشان‌دهنده فرسایش طولانی با چکاد در حال بالا آمدن
پلکانی تا حدودی مقعر	۴	۱	۳/۳۳	تطابق جزئی با پیش‌فرض سوم. تا حدودی فرسایش طولانی با چکاد در حال بالا آمدن

نتایج این تحلیل‌ها به طور کلی نشان می‌دهد که فرسایش به عنوان فرآیند غالب در شکل‌گیری نیمرخ‌های ارتفاعی منطقه مورد مطالعه نقش اساسی داشته است؛ با این حال، در برخی مناطق، تأثیرات محدود تکتونیک نیز در کنار فرسایش مشاهده می‌شود.

۴. تحلیل اختلاف ارتفاع تراس‌ها، شاخصی از تکامل ژئومورفیک: تحلیل اختلاف ارتفاع بین تراس‌های مجاور، شاخصی کیفی از مراحل تکامل ژئومورفیک منطقه است:

- اختلاف ارتفاع ۳۰-۷۰ متر: نشان‌دهنده مراحل نهایی تکامل است که در آن فرسایش به عنوان عامل غالب عمل کرده و سطوح هموارتری را ایجاد کرده است (برای مثال، در نیمرخ‌های پایین‌دست دشت سرها).
- اختلاف ارتفاع ۱۰۰-۲۰۰ متر: نشان‌دهنده تعامل همزمان تکتونیک و فرسایش است (برای مثال، در نیمرخ‌های گذار از کوهستان به دشت) (شکل ۳).
- اختلاف ارتفاع ۲۵۰-۴۰۰ متر: نشان‌دهنده مراحل ابتدایی تکامل است که در آن تکتونیک غالب است و فرسایش هنوز نتوانسته تغییرات چشمگیری ایجاد کند (برای مثال، در نیمرخ‌های نزدیک به قله‌های ارتفاعات طارم).



شکل ۳. نمونه‌ای از نیمرخ‌های ارتفاعی ترسیم‌شده در ارتفاعات شمالی زنجان: (الف) پلکانی تا حدودی محدب، (ب) پلکانی محدب، (ج) پلکانی مقعر، (د) پلکانی تا حدودی مقعر

Figure 3. Example of elevation profiles drawn in the northern heights of Zanjan: (a) partially convex staircase, (b) convex staircase, (c) concave staircase, (d) partially concave staircase

این یافته که پدیمت‌های مقعر نشانه‌ای از بالآآمدگی آرام و بلندمدت تکتونیکی هستند، نه عدم فعالیت تکتونیکی، با شواهد متعددی از محیط‌های خشک و نیمه‌خشک جهان هم‌خوانی دارد. پیلتر در آریزونا نشان داد که حتی نرخ‌های بسیار پایین بالآآمدگی (بیش از ۰/۱ میلی‌متر در سال) می‌توانند منجر به تشکیل پدیمت‌های مقعر شوند، به شرطی که فرسایش طولانی‌مدت همراه باشد (Pelletier, 2008). به همین ترتیب، ریچاردسون و همکاران در آفریقای جنوبی تأکید کردند که نیمرخ‌های مقعر پدیمت، شاخصی از تکتونیک آرام بلندمدت هستند، نه ثبات کامل پوسته. این هم‌خوانی، مدل شاهرزیدی را از یک آزمایشگاهی محلی به یک چارچوب تحلیلی قابل تعمیم تبدیل می‌کند (Richardson et al., 2024). همچنین، نقش لیتولوژی در شکل‌گیری ریزساختارهای پدیمت، دقیقاً با یافته‌های آپس و همکاران در محیط‌های خشک هم‌راستا است: توده‌های مقاوم (مانند آندزیت) به عنوان سطوح باقی‌مانده، عمل و پلکان‌های مداومی ایجاد می‌کنند؛ در حالی که لایه‌های نرم (مارن، شیل) به سرعت فرسایش می‌یابند (Eppes & McFadden, 2008). این الگوی «مقاومت نسبی» نشان می‌دهد که لیتولوژی می‌تواند حتی در شرایط تکتونیکی مشابه، مورفولوژی پدیمت را متفاوت کند. توزیع فضایی نامتقارن پدیمت‌ها (مقعر در شرق، محدب در غرب) نیز با مطالعات مونوز-فارسیس و همکاران در صحرای آتاکاما هم‌راستا است که نشان دادند در مناطق با تکتونیک فعال، تمایل به تشکیل نیمرخ‌های مقعر وجود دارد؛ در حالی که در مناطق پایدار، نیمرخ‌های محدب غالب هستند (Munoz-Farias et al., 2023). این شباهت‌های زمین‌شناختی، اهمیت تحلیل ترکیبی تکتونیک، فرسایش و لیتولوژی را در مطالعات ژئومورفولوژیک تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که مدل‌های کلاسیک مانند کینگ تنها در زیرمجموعه‌ای از شرایط اجراشدنی هستند.

این تحلیل نشان می‌دهد که با گذشت زمان، تأثیر تکتونیک کاهش یافته و فرسایش به عامل غالب تبدیل شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که شکل‌گیری پدیمت‌های ارتفاعات شمالی زنجان نتیجه تعامل سه‌جانبه بین: فرسایش طولانی‌مدت (عامل غالب)، تکتونیک آرام (عامل کنترل‌کننده کلی شکل نیمرخ) و لیتولوژی ناهمگن (عامل کنترل‌کننده ریزساختار پلکانی) است. این یافته‌ها اعتبار مدل شاهزیدی را در شرایط واقعی زمین‌شناسی ایران تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که مدل کینگ تنها در زیرمجموعه‌ای از شرایط (مناطق با تکتونیک بسیار پایدار) اجراشدنی است. همچنین، این پژوهش بر اهمیت تحلیل ترکیبی تکتونیک، فرسایش و لیتولوژی در مطالعات ژئومورفولوژیک تأکید می‌کند، رویکردی که می‌تواند به درک بهتر تکامل چشم‌اندازهای طبیعی در کمربندهای کوهستانی فعال کمک کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف آزمون دو چارچوب نظری رقیب در تشکیل پدیمت، مدل کلاسیک کینگ و مدل نوین شاهزیدی، در ارتفاعات شمالی زنجان انجام شد. تحلیل ۳۰ نیمرخ ارتفاعی نشان داد که پدیمت‌های مقعر با شیب استدراجی در شرق و جنوب‌شرق منطقه، نتیجه تعامل بین فرسایش طولانی‌مدت و بالآمدگی آرام تکتونیکی هستند و نه محصول فرسایش خالص در شرایط پایدار. این یافته، فرض اصلی مدل کینگ مبنی بر بی‌تأثیری تکتونیک در شکل‌گیری پدیمت را به چالش می‌کشد. درمقابل، پدیمت‌های پلکانی محدب در غرب و شمال‌غربی زنجان با مدل کینگ سازگارند، اما تنها به عنوان یک حالت خاص در مناطقی با فعالیت تکتونیکی کم و نسبتاً پایدار. توزیع فضایی نامتقارن پدیمت‌ها (۶۷٪ محدب در غرب و شمال‌غربی در مقابل ۴۰٪ مقعر در شرق و جنوب‌شرق) نشان‌دهنده ناهمگنی ژئودینامیکی منطقه است و بر اهمیت تحلیل محلی در مطالعات ژئومورفولوژیک تأکید می‌کند. مقاومت لیتولوژیکی توده‌های آندزیتی (سازند کرج، ائوسن) نیز نقش کلیدی در شکل‌گیری ریزساختارهای پلکانی داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در شرایط تکتونیکی مشابه، لیتولوژی می‌تواند مورفولوژی پدیمت را متفاوت کند. از دیدگاه روش‌شناختی، این مطالعه نخستین آزمون میدانی موفق مدل شاهزیدی در ایران محسوب می‌شود و نشان می‌دهد که نظریه‌های ژئومورفولوژیک باید در محیط‌های تکتونیکی فعال، نه فقط پایدار، ارزیابی شوند. هدف اصلی تحقیق، آزمون مدل‌های کینگ و شاهزیدی و شناسایی عوامل کنترل‌کننده شکل‌گیری پدیمت، به‌طور کامل محقق شد. یافته‌های این پژوهش نه تنها درک ما از تکامل ژئومورفیک ایران را ارتقا می‌دهد، کاربردهای عملی در بازسازی تاریخچه نئوتکتونیکی منطقه، ارزیابی خطرات زمین‌شناسی و مدیریت منابع آب و خاک در دشت‌های مجاور دارد. برای مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود از شاخص‌های کمی مورفومتریک استفاده شود تا این چارچوب تحلیلی به‌صورت کمی گسترش یابد.

منابع

ثروتی، مسلم، جعفرزاده، علی‌اصغر، حیدری، احمد و شهبازی، فرزین (۱۳۹۲). تکامل و نموده‌های خاکساختی گچی در خاکهای پدیمت و دشت سیلابی در جنوب منطقه اهر. *دانش آب و خاک*، ۲۳ (۲)، ۵۹-۷۰.

https://journals.tabrizu.ac.ir/article_106_38.html

- جعفری، غلامحسن (۱۳۹۶). بررسی نقش گسل‌ها در مورفولوژی دشت‌های شمالی زنجان رود. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲۱(۱)، ۳۵-۴۸. <https://doi.org/10.22108/gep.2017.97799.0>
- سرمدست، معصومه، فرپور، محمدهادی، و اسفندیارپور بروجنی، عیسی (۱۳۹۴). مقایسه برخی خصوصیات جلای بیابان در سطوح پایدار، ناپایدار و نسبتاً پایدار پدیمت پوشیده در منطقه جیرفت. *علوم آب و خاک*، ۱۹(۷۳)، ۹۹-۱۱۲. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.73.99>
- شاهزیدی، سمیه سادات (۱۳۹۳). نقد نظریه کینگ و چالش‌های تجربی آن (نقدی درحوزه دانش ژئومورفولوژی). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۵(۱)، ۶۵-۷۸. https://gep.ui.ac.ir/article_18648.html
- المدرسی، سیدعلی، تورن، کالین، گرجی، لایلا، و ایزدی، زهرا (۱۳۹۰). رفتار ارگودیک چشم اندازه‌های ژئومورفیک. *فضای جغرافیایی*، ۱۱(۳۴)، ۲۳۲-۲۵۸. <https://www.sid.ir/paper/91680/fa>

References

- Almodarresi, S. A., Ramesht, M. H., Toren, K., Gorji, L., & Izadi, Z. (2011). Ergodic Behavior of Geomorphic Landforms. *Geographic Space*, 11(34), 232-258. <https://www.sid.ir/paper/91680/fa> [In Pershin]
- Anderson, R. S., & Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology: the mechanics and chemistry of landscapes*. Cambridge University Press.
- Anzaku, I. M., & Adamu-Ja, B. S. I. (2023). The relevance of theories of landform evolution in contemporary geographical studies. *Tropical Journal of Geography & Environmental Management (TJGEM)*, 1(4), 83. <https://B2n.ir/kg3518>
- Biswas, M., Raha, A., Mukherjee, S., & Kotak, V. S. (2024). Geomorphic imprints of active tectonics of the Bikaner-Nagaur petroliferous rift basin and its surroundings (western Rajasthan, India). *Journal of the Geological Society of India*, 100(3), 377-390. <https://doi.org/10.17491/jgsi/2024/173844>
- Bourne, J. A., & Twidale, C. R. (1998). Pediments and alluvial fans: genesis and relationships in the western piedmont of the Flinders Ranges, South Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 45(1), 123-135. <http://dx.doi.org/10.1080/08120099808728373>
- Bryan, K. (1922). Erosion and sedimentation in the Papago Country, Arizona. *United States Geological Survey Bulletin*, 730, 38-48. <https://pubs.usgs.gov/bul/0730b/report.pdf>
- Corner, G. D. (1992). Geomorphology: A Systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms. By AL Bloom, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991, 532 pp. *Quaternary Research*, 38(3), 386-387. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(92\)90047-M](https://doi.org/10.1016/0033-5894(92)90047-M)
- Dohrenwend, J. C., & Parsons, A. J. (2009). Pediments in arid environments. In *Geomorphology of desert environments* (pp. 377-411). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9_13
- Ehteshami-Moinabadi, M. (2016). Possible basement transverse faults in the western Alborz, northern Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 27(4), 329-342. <https://sid.ir/paper/718168/en>
- Eppes, M.C., & McFadden, L.D. (2008). The influence of bedrock weathering on pediment formation in arid environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(6), 905-922. <https://doi.org/10.1002/esp.1587>
- Gregory, K. J., & Goudie, A. (2011). Introduction to the discipline of geomorphology. *The SAGE Handbook of Geomorphology*. SAGE.
- Guerrero, J., Bartolomé, M., & Gökkaya, E. (2023). The Quaternary activity of the Estella diapir from the uplift record of fluvial terraces, pediments and cave sediments in the Western Pyrenees, Spain. *Catena*, 233, 107531. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107531>
- Hadley, R. F. (1967). Pediments and pediment-forming processes. *Journal of Geological Education*, 15(2), 83-89. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.5408/0022-1368-XV.2.83>

- Jafari, Gh. H. (2017). Investigating the Role of Faults in the Morphology of the Northern Plains of Zanjanrood. *Geography and Environmental Planning*, 28(1), 35-48. <https://doi.org/10.22108/gep.2017.97799.0> [In Pershin]
- Johnson, D. (1931). Planes of lateral corrasion. *Science*, 73(1885), 174-177. <https://www.jstor.org/stable/1656124>
- King, L. (1949). The pediment landform: some current problems. *Geological Magazine*, 86(4), 245-250. <https://doi.org/10.1017/S0016756800074665>
- King, L. C. (1953). Canons of landscape evolution. *Geological Society of America Bulletin*, 64(7), 721-752. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1953\)64%5b721:COLE%5d2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1953)64%5b721:COLE%5d2.0.CO;2)
- McGee, W. J. (1896). Sheetflood erosion. *Bulletin of the Geological Society of America*, 8(1), 87-112. <http://dx.doi.org/10.1130/GSAB-8-87>
- Munoz-Farias, S., Ritter, B., Dunai, T. J., Morales-Leal, J., Campos, E., Spikings, R., & Riquelme, R. (2023). Geomorphological significance of the Atacama Pediplain as a marker for the climatic and tectonic evolution of the Andean forearc, between 26° to 28° S. *Geomorphology*, 420, 108504. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108504>
- Nouri, L., Mahtabi, G., Hosseini, S. H., & Prasad, C. V. S. R. (2024). Hydrological responses to future climate change in semi-arid region of Iran (Golabar and Taham Basins, Zanjan Province). *Results in Engineering*, 21, 101871. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101871>
- Pazzaglia, F. J. (2003). Landscape evolution models. *Developments in Quaternary Sciences*, 1, 247-274. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(03\)01012-1](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(03)01012-1)
- Pelletier, J. D. (2008). *Quantitative modeling of earth surface processes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511813849>
- Phillips, C. B., Masteller, C. C., Slater, L. J., Dunne, K. B., Francalanci, S., Lanzoni, S., ... & Jerolmack, D. J. (2022). Threshold constraints on the size, shape and stability of alluvial rivers. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(6), 406-419. <https://doi.org/10.4211/hs.fa5503b04af343ffbf33d5a15cb2579>
- Richardson, J. C., Vanacker, V., Hodgson, D. M., Christl, M., & Lang, A. (2024). Constraining the timing and processes of pediment formation and dissection: implications for long-term evolution in the Western Cape, South Africa. *EGU sphere*, 2024, 1-42. <https://doi.org/10.5194/esurf-13-315-2025>
- Sanjari, S., Farpoor, M. H., & Mahmoodabadi, M. (2021). Magnetic susceptibility of soils as affected by lithology, geomorphology and climate in Jazmoorian Watershed, central Iran. *Geosciences Journal*, 25(6), 903-913. <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0007-5>
- Sarmast, M., Farpoor, M. H., & Esfandiarpour Boroujeni, I. (2015). Comparison of Some Desert Varnish Characteristics on Stable, Unstable and Moderately Stable Surfaces of Mantled Pediment in Giroft Area. *Journal of Water and Soil Science*, 19(73), 99-112. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.73.99> [In Pershin]
- Shahzeidi, S. S. (2014). Kingâs theory and its empirical challenges. *Geography and Environmental Planning*, 25(1), 65-78. https://gep.ui.ac.ir/article_18648.html [In Persian]
- Strudley, M. W., & Murray, A. B. (2007). Sensitivity analysis of pediment development through numerical simulation and selected geospatial query. *Geomorphology*, 88(3-4), 329-351. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.008>
- Thervati, M., Jafarzadeh, A. A., Heidari, A. and Shahbazi, F. (2013). Evolution of Gypsum and its Pedofeatures in Soils on Pediment and Flood-Plain, South of Ahar Region, East Azerbaijan, Iran. *Water and Soil Science*, 23(2), 59-70. https://journals.tabrizu.ac.ir/article_106_38.html [In Pershin]
- Twidale, C. R. (1992). King of the plains: Lester King's contributions to geomorphology. *Geomorphology*, 5(6), 491-509. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(92\)90021-F](https://doi.org/10.1016/0169-555X(92)90021-F)
- Vincent, P., & Sadah, A. (1996). The profile form of rock-cut pediments in western Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments*, 32(2), 121-139. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0012>
- Weise, O. R. (1978). Morph dynamics and morphogenesis of pediments in the deserts of Iran. *Geographical Journal*, 450-462. <https://doi.org/10.2307/634821>