Quantitative Geomorphological Researche

Online ISSN: 2251-9424

Journal Homepage: www.geomorphologyjournal.ir

Morphoclimatic Analysis of Quaternary Climatic Fluctuations Using Polynomial Modeling in the Arpachai Basin, Zanjan

Gholam Hassan jafari [1]

[1]. *(Corresponding Author)Department of Geography, Faculty of literature and Humanist Sciences, University of Yasouj, Yasouj, Iran.*
***Email**:* jafarihas@yu.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Article

Article History:
Received:
25 April 2025
Received in revised form:
2 August 2025
Accepted:
15 September 2025
pp.1-23

Keywords:
Morphoclimatic,
Quaternary,
Natural glacier,
Dimensional hypsometry,
Quantitative geomorphology,
Iran.

A B S T R A C T

Morphoclimatic analyses play a significant role in identifying past climatic changes and their impacts on surface topography. This study aimed to investigate the presence of four paleoclimatic oscillations during the Quaternary period in the Arpaçhay Basin using geometric methods and sixth-degree polynomial modeling. Given its geographical position and average elevation, the basin shows greater morphoclimatic resemblance to periglacial regions of North America than to glacial landscapes of Europe, justifying the use of North American glacial terminology for interpreting its geomorphological evolution. The required data included UTM coordinates, elevation above sea level, and calculated values of $\sqrt{(X^2 + Y^2)}$ to generate dimensional hypsometry across three cross-sections of the basin. Real geomorphic profiles were simulated using a sixth-degree polynomial model. The validity of the upper section model was assessed through correlation coefficient (±0.99), coefficient of determination (97.75%), and effect size (43.4). In the middle section, the final simulation was performed using pixel-coded field image digitization and QGIS software. For the lower section, fifty field survey points and UTM coordinates combined via Pythagorean structure were used. These results indicate a high level of model accuracy in simulating geomorphic profiles across all sections. Findings show that the sixth-degree polynomial model demonstrates high precision in simulating geomorphic edges associated with climatic fluctuations. Four observed edges in the profiles correspond to four evolutionary stages in the basin, each linked to a distinct paleoclimatic event. Moreover, pattern alignment across all sections (upper, middle, and lower) suggests that these fluctuations were simultaneously influenced by both climatic and tectonic factors. These findings not only enrich scientific knowledge but also pave the way for the application of geometric methods in areas with limited accessibility.

Cite this article: jafari,H. (2025). Morphoclimatic Analysis of Quaternary Climatic Fluctuations Using Polynomial Modeling in the Arpachai Basin, Zanjan. *Quantitative Geomorphological Research, 14*(2).125-139.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.529493.1567

Extended Abstract

Introduction

Quaternary climatic fluctuations have played a fundamental role in shaping Earth's surface morphology and influencing the evolution of fluvial systems, especially in mountainous regions. These oscillations, characterized by alternating glacial and interglacial periods, have significantly altered hydrological regimes, erosion-deposition dynamics, and geomorphological development across diverse landscapes. In Iran, particularly in northwestern regions such as the Zanjanrud and Qezelozan basins, Quaternary climatic changes have left distinct geomorphic imprints, including U-shaped valleys, moraine ridges, and multiple terrace levels—features that suggest both glacial and periglacial activity.

This study focuses on detecting and validating four stages of climatic and tectonic transformation in the Arpachai Basin using sixth-degree Pearson polynomial modeling and dimensional hypsometric analysis. Unlike traditional studies that rely on international glacial stage classifications, this research emphasizes morphometric and statistical signatures of past climatic oscillations, based on topographic inflection points preserved in the river longitudinal profile.

Methodology

To achieve the research objectives, a multi-stage methodology was adopted, combining field data acquisition, spatial analysis, and mathematical modeling. Data collection involved:

- Topographic maps (1:25,000 scale), Sentinel-2 satellite imagery, and Google Earth Pro for precise identification of cross-sections.
- Field GPS data (UTM Zone 39N) encompassing longitude (X), latitude (Y), and elevation (H) from three cross-sectional zones: upper, middle, and lower parts of the Arpachai Basin.
- Lithological and geological information derived from 1:100,000-scale geological maps provided by the Geological Survey of Iran.

All collected data were used in dimensional hypsometric analyses. Unlike traditional dimensionless hypsometry, which considers only elevation along the Y-axis, dimensional hypsometry integrates both X and Y coordinates via the Pythagorean formula:

$$D = \sqrt{x^2 + y^2}$$

This value (D) was used as the horizontal axis, while elevation (H) served as the vertical component in dimensional hypsometric diagrams, allowing for a more accurate representation of topographic structures.

Three cross-sections (upper, middle, and lower) were selected based on slope variation, lithological heterogeneity, and the presence of multiple geomorphic terraces. Using the Profile Tool plugin in QGIS, topographic profiles were extracted and analyzed to detect geomorphic inflection points associated with climatic and tectonic changes.

A sixth-degree polynomial model was applied to simulate the actual geomorphic profiles and identify key inflection points:

$$Y = a^6x^6 + a^5x^5 + a^4x^4 + a^3x^3 + a^2x^2 + ax + a_{0^0}$$

Coefficients were optimized using the Least Squares Method, and the resulting models were statistically validated using correlation coefficient *(r)*, coefficient of determination *(R^2)*, and effect size.

Due to limited accessibility in the middle section of the basin, pixel-coded digitization of field images and GIS-based coordinate extraction were employed to reconstruct the topographic profile. In the lower basin, 50 field survey points and UTM coordinates were combined using the Pythagorean structure to extract and analyze the corresponding topographic profile.

Results and discussion

Analysis of the three cross-sectional profiles revealed consistent evidence of four major geomorphic edges throughout the Arpachai Basin. These edges correspond to inflection points in the river longitudinal profile and reflect significant shifts in base-level, river energy regime, and sedimentation patterns

under combined climatic and tectonic influences.

These results demonstrate the robustness of the method in detecting subtle but coherent geomorphic signals across the basin. Minor discrepancies in model performance among sections were attributed to local lithological variations, differential erosion rates, and sediment deposition effects.

In the upper part of the basin, the final polynomial model was derived as:

$$y = (-0.1 * 10^{-12})x^6 + 0.000003x^5 - 34.682x^4 + (2 * 10^8)x^3 - (6 * 10^{14})x^2 + (9 * 10^{20})x - (6 * 10^{26})$$

This model successfully explained over 97% of topographic variability, indicating minimal estimation error and strong explanatory power.

For the middle basin, where direct field access was limited due to steep terrain and narrow width, the following model was obtained:

$$y = -1.6x^6 + 39.2x^5 - 392.8x^4 + 1945.4x^3 - 4581.7x^2 + 5064.4x - 615.92$$

This equation accurately simulated four geomorphic inflection points, interpreted as evolutionary stages linked to paleoclimatic oscillations.

In the lower basin, data from 50 field survey points were used to generate the following polynomial function:

$$y = (2 * 10^{-12})x^6 - (4 * 10^{-5})x^5 + 408.55x^4 - (2 * 10^9)x^3 + (7 * 10^{15})x^2 - (1 * 10^{22})x + (8 * 10^{27})$$

Here, the model achieved the highest performance, with an R^2 value of 98%, confirming the stability and reliability of the polynomial modeling technique.

These results indicate exceptionally high model accuracy, with all sections showing R^2 values above 94%, confirming the presence of four distinct geomorphic stages in the basin's evolution.

The consistency of these geomorphic signatures across all cross-sections demonstrates that the detected climatic fluctuations were recorded synchronously throughout the basin, supporting the hypothesis that the observed changes were not random or isolated, but rather large-scale spatiotemporal adjustments driven by both climatic and tectonic forces.

Minor discrepancies in model performance among sections were attributed to local lithological variations, sediment deposition effects, and differential erosion rates. However, the structural coherence of the inflection points across the basin confirms the morphoclimatic significance of the identified transitions.

The consistency of these geomorphic signatures across all cross-sections indicates that the detected climatic fluctuations were recorded simultaneously throughout the basin. This coherence supports the hypothesis that the observed changes were not random or isolated, but rather reflected large-scale spatiotemporal adjustments driven by both climatic and tectonic forces.

Conclusion

This study provides strong evidence for the presence of four distinct paleoclimatic oscillations during the Quaternary period in the Arpachai Basin. These oscillations were identified through sixth-degree polynomial modeling and dimensional hypsometry, which enabled high-resolution simulation of geomorphic profiles and statistical validation using r, R^2, and Effect Size.

The identified geomorphic edges represent transitions in river energy regime, base-level changes, and sediment transport dynamics, all indicative of climatic forcing. These features were consistently preserved across all three cross-sectional zones, demonstrating the basin-wide impact of Quaternary climatic fluctuations.

This research highlights the robustness of geometric and statistical methods in detecting and interpreting paleoclimatic signals in tectonically active and climatically sensitive regions. The approach used in this study can serve as a model for similar investigations in mountainous and semi-mountainous basins in Iran and other regions with complex morphoclimatic and tectonic histories.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved thecontent of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

مجلـــه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی

شاپا الکترونیکی: ۹۴۲۴-۲۲۵۱

Journal Homepage: www.geomorphologyjournal.ir

تحلیل مورفوکلیماتیک نوسانات اقلیمی کواترنری با استفاده از مدل پلی‌نومیال در حوضه آرپاچای زنجان

غلام حسن جعفری[۱] ✉

۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: jafarihas@yu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۲/۰۵
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۵/۱۱
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۶/۲۴
صص. ۲۳-۱

واژگان کلیدی:
مورفوکلیماتیک،
کواترنری،
یخچال طبیعی،
هیپسومتری بعددار،
ژئومورفولوژی کمی، ایران.

چکیده

تحلیل‌های مورفوکلیماتیک نقش برجسته‌ای در شناسایی تحولات اقلیمی کواترنری و تأثیرات آن بر توپوگرافی سطح زمین دارد. در این پژوهش، با هدف اثبات وجود چهار نوسان پالئوکلیماتیک دوره کواترنری حوضه آرپاچای، از روش‌های ژئومتریک و مدل‌سازی ریاضی پلی‌نومیال درجه ششم استفاده شد. داده‌های مورد نیاز شامل مختصات متریک (طول و عرض)، ارتفاع از سطح دریا و مقادیر جذر مجموع طول و عرض جغرافیایی به توان دو ($\sqrt{(X^2 + Y^2)}$) جهت ایجاد هیپسومتری بعددار از سه مقطع عرضی (علیا، وسطی و سفلی) حوضه جمع‌آوری گردید. نیمرخ‌های توپوگرافیکی واقعی با استفاده از مدل پلی‌نومیال درجه ششم شبیه‌سازی شد و اعتبار مدل نیمرخ در بخش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب همبستگی بالا نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب بین داده‌های میدانی و نتایج مدل‌سازی است. نتایج نشان میدهند که مدل پلی‌نومیال درجه ششم دارای دقت بالایی در شبیه‌سازی تراس‌های ژئومورفولوژیکی مرتبط با نوسانات اقلیمی است. چهار تراس مشاهده شده در نیمرخ‌ها مربوط به چهار مرحله تحولی در حوضه بوده که با چهار رویداد پالئوکلیماتیک همراهی دارد. همچنین، تطبیق الگوها در تمامی بخش‌های حوضه (علیا، وسطی و سفلی) نشان داد که این نوسانات تحت تأثیر همزمان فاکتورهای اقلیمی و تکتونیکی ثبت شده‌اند. این یافته‌ها نه تنها غنای علمی تحقیقات مورفوکلیماتیک را افزایش می‌دهند، بلکه کاربرد روش‌های ژئومتریک را در مناطق با دسترسی محدود ممکن می‌سازند..

استناد: جعفری،حسن . (۱۴۰۴). تحلیل مورفوکلیماتیک نوسانات اقلیمی کواترنری با استفاده از مدل پلی‌نومیال در حوضه آرپاچای زنجان. *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمّی*. ۱۴(۲). ۱۳۹-۱۲۵.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.529493.1567

مقدمه

تحول و تنوع اشکال ژئومورفیک سطح زمین تحت تأثیر فرآیندهای مورفوژنز مختلفی است که در گذر زمان فعال بوده‌اند و چشم‌اندازهای منحصر به فردی را ایجاد کرده‌اند (مددی و همکاران، ۱۴۰۲). این مطالعه، با توجه به تحلیل تغییرات فرم‌های توپوگرافیکی، به ما کمک کرده است تا بتوانیم نوسانات اقلیمی و تکتونیکی را در حوضه آرپاچای ثبت و تفسیر کنیم.

بررسی الگوی رودخانه‌ها نیز برای درک شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات آتی آن‌ها ضروری است (حسین‌زاده و گلستانی، ۱۴۰۲). این مطالعه، واکنش رودخانه‌ها به تغییرات اقلیمی و زمین‌ساختی را مورد توجه قرار داده و ما را در تفسیر تحولات رودخانه آرپاچای یاری کرده است. همچنین، مطالعه حساسیت ژئومورفیک رودخانه، مبنایی برای توسعه یک رویکرد تحلیلی فراهم کرده است (دارابی‌شاهماری و همکاران، ۱۴۰۲). این مفهوم به ما کمک کرده تا چگونگی واکنش رودخانه آرپاچای به نوسانات اقلیمی و تکتونیکی را در سه مقطع عرضی (علیا، وسطی و سفلی) درک کنیم و الگوهای چهار نوسان توپوگرافیکی را به‌خوبی ثبت کنیم.

در طول دوره کواترنری، تحولات اقلیمی پیوسته و نوسانات فراوان دما و بارش، ساختار توپوگرافیک و پویایی سیستم‌های فرسایشی–رسوبی را تحت تأثیر قرار داده‌اند (دیویس و همکاران، ۲۰۰۹[1]؛ گیلبارد و هوقس، ۲۰۲۱[2]). این تحولات، الگوهای مورفوتکتونیکی، رژیم هیدرولوژیکی و نحوه گسترش عوارض ژئومورفولوژیکی را به‌صورت چشمگیری دگرگون کرده‌اند. در این میان، مفهوم مورفوکلیماتیک به عنوان ابزاری تفسیری در ارتباط متقابل بین پالئواقلیم و شکل‌گیری عوارض زمین، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (گودی[3]، ۲۰۰۴). این رویکرد قادر است از طریق تحلیل‌های ژئومتریک و ریاضی، نوسانات اقلیمی کواترنری را در قالب الگوهای هندسی قابل اندازه‌گیری و قابل تعمیم به دیگر حوضه‌ها بازتاب نماید. این رویکرد، ضمن افزایش دقت در تفسیر تحولات سطح زمین، امکان اعتبارسنجی آماری و مقایسه بین حوضه‌ها را فراهم می‌کند (روساکوو و سدوو[4]، ۲۰۱۲؛ فلورینسکی[5]، ۲۰۱۷؛ اسمیت[6] و همکاران، ۲۰۰۳).

در این میان، استفاده از معادلات پلی‌نومیال (چندجمله‌ای) به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در شبیه‌سازی فرم‌های غیرخطی توپوگرافیک، شیب، انحناء و نقاط عطف سطح زمین، نقش برجسته‌ای در مطالعات مورفوکلیماتیکی و تکتونیکی داشته است. این مدل‌ها قادرند الگوهای ژئومورفولوژیک پیچیده را به‌صورت نرم و پیوسته بازتولید کنند. این قابلیت به آن‌ها کمک می‌کند تا نوسانات اقلیمی دوره کواترنری را ثبت و تفسیر کنند (جمز[7]، ۱۹۹۶؛ آلن[8]، ۱۹۷۵). به طور خاص، در مدل‌سازی‌های سطح زمین، پلی‌نومیال‌ها قادر هستند شیب‌ها، انحناها، و دیگر فرم‌های زمین‌شناسی را به صورت نرم‌افزارهای تحلیلی و محاسباتی توصیف کنند که این موضوع در مطالعات زیادی مورد توجه قرار گرفته است (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳، آلن، ۱۹۷۵). به‌ویژه، استفاده از مدل‌های پلی‌نومیال درجه ششم در مطالعات مربوط به مورفولوژی دره‌های یخچالی، دقت بالایی در شبیه‌سازی نیمرخ‌های عرضی و شناسایی تراس‌های توپوگرافیکی مرتبط با نوسانات اقلیمی نشان داده است (جمز، ۱۹۹۶؛ تانگ[9] و همکاران، ۲۰۲۰). مدل‌های پلی‌نومیال زوج درجه ششم به خوبی قادرند نوسانات دیرینه اقلیم را در مقاطع عرضی دره‌ها بازتاب دهند. این مدل‌ها نه تنها قادر به بازتولید نیمرخ‌های واقعی با دقت بالایی هستند، بلکه از طریق

[1] . Davis et al., 2009
[2] . Gibbard & Hughes
[3] . Goudie
[4] . Rusakov, & Sedov
[5] . Florinsky
[6] . Schmidt
[7] . James
[8] . Allen
[9] . Tang

محاسبه ضریب تعیین (R^2)، ضریب همبستگی (r) و اندازه اثر[1]، امکان اعتبارسنجی ژئومتریک این نوسانات را فراهم می‌کنند (بیرکلند[2] و همکاران، ۲۰۰۳). این امر به ویژه در حوضه‌هایی که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های تکتونیکی همزمان قرار دارند، از اهمیت بیشتری برخوردار است (ادوارد و نیکولاس[3]، ۲۰۰۲).

در حوزه ژئوفرم‌ها، استفاده از پلی‌نومیال‌ها در مدل‌سازی اشکال سطحی، از جمله روندهای مرتبط با فرسایش، رسوبات، و شکستگی‌ها، به عنوان رویکردی قابل اعتماد کاربرد دارد. برای نمونه، در مطالعه با عنوان «توابع چندجمله‌ای و توانی برای مورفولوژی مقطع دره یخچالی»، نشان داده شد که معادلات پلی‌نومیال، رابطه قابل قبولی با داده‌های مورفولوژیک در حوزه‌های یخچالی دارند (جمز، ۱۹۹۶). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، استفاده از پلی‌نومیال در محاسبات انحنای مناطق مختلف سطح زمین، اعتمادپذیری بالایی نشان داده است (اسمیت، ۲۰۰۳).

در حوزه مدل‌سازی شکستگی‌ها و پدیده‌های طبیعی، پلی‌نومیال‌ها بر اساس قابلیت تطابق با شکل‌های طبیعی، در تحلیل سطوح ناهموار نظیر لغزش‌های زمین، شکستگی‌های سازند، و ناهمواری‌های سطحی، کاربردهای کارآمدی داشته‌اند (تانگ و همکاران، ۲۰۲۰). به عنوان مثال، مدل‌سازی شکستگی‌ها و سطح شکست در زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی، با بهره‌گیری از روش پلی‌نومیال، امکان بهینه‌سازی در برآورد حجم خسارت، تحلیل پدیده‌های لرزه‌ای، و بررسی روندهای پدیده‌های طبیعی را فراهم کرده است (بوناکداری[4] و همکاران، ۲۰۲۰).

همچنین، تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از پلی‌نومیال‌ها در مدل‌سازی‌های چندبعدی، به دلیل توانایی بیان نرم و پیوسته‌ی شکل‌های زمین، رویکردی عملی و علمی است تا نمونه‌های بسیار پیچیده پدیده‌های ژئومورفولوژیکی را با دقت قابل قبولی تبیین کند(فلورینسکی، ۲۰۱۷). در نتیجه، تأکید بر کاربرد پلی‌نومیال در مدل‌سازی فرم‌ها و مورفولوژی، می‌تواند به بهبود دقت و صحت نتایج مطالعات ژئومورفولوژیکی کمک نماید و به عنوان یک ابزار مفید و کاربردی در تحلیل ساختارهای طبیعی مطرح باشد.

مطالعات حیدرزاده و بالاتو (۲۰۱۷) و بالاتو و همکاران (۲۰۱۶) در زمینه تکتونیک نئوژنی حوضه طارم–شاهرود، به عنوان چارچوبی تکتونیکی–ژئومورفولوژیکی برای تفسیر تراس‌های توپوگرافیکی شناسایی‌شده در حوضه آرپاچای استفاده شدند. این مطالعات نشان داده‌اند که رودخانه قزل‌اوزن پیش از ورود به حوضه خزر، در ارتفاعی بیش از ۲۰۰ متر جریان داشته است. این امر، زمینه را برای واکنش‌های ژئومورفولوژیکی شدیدتر به نوسانات اقلیمی کواترنری فراهم کرده است. بنابراین، تراس‌های توپوگرافیکی شناسایی‌شده در این تحقیق، نه تنها نشان‌دهنده نوسانات اقلیمی، بلکه نمادی از واکنش تاریخی رودخانه به تحولات زمین‌ساختی منطقه نیز هست.

مطالعات صورت گرفته بر روی الگوهای یافت شده در ساختارهای یخچالی، نشان می‌دهند که یخچال‌های فصلی و دائمی، در دوره‌های سرد کواترنری، نقش مهمی در شکل‌گیری و توسعه فضاهای کواترنری ایفا نموده‌اند (شریفی پیچون و همکاران، ۱۳۹۶). حوضه قزل اوزن در شمال‌غرب ایران، به‌ویژه در بخش‌هایی از حوضه زنجان‌رود و آرپاچای، دارای شواهد متعددی از فعالیت‌های یخچالی دوره کواترنری است. وجود مورن‌های سنگی، دره‌های U شکل و رسوبات ناهمگن، نشانه‌هایی از واکنش منطقه به تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های یخچالی در گذشته است (جعفری و حضرتی، ۲۰۲۰، شریفی پیچون و همکاران، ۱۳۹۶؛ جعفری و اصغری سرسکانرود، ۱۳۹۳؛ جعفری و محمدی، ۲۰۱۸).

پادگانه‌های آبرفتی در حوضه زنجان‌رود، به‌عنوان سطوح رسوبی و تپه‌های آبرفتی، در درک فرآیندهای ژئومورفولوژیکی و اقلیمی دوره کواترنری اهمیت ویژه‌ای دارند. نتایج مطالعات رستم‌خانی (۱۳۹۳) در ارتباط با مخروط افکنه‌ها و عباسی

[1] . Effect Size
[2] . Birkeland
[3] . Edward, & Nicholas
[4] . Bonakdari

(۱۳۹۴) در ارتباط با پادگانه های آبرفتی حوضه آبی قزل اوزن نشان داد که تغییرات ارتفاعی سطح اساس در حوضه قزل اوزن تا بیش از ۲۰۰ متر در رسوبات و تراس‌های آبرفتی، ناتعادلی ایجاد کرده است. این تغییرات نشانه‌ای از فرآیندهای چندمرحله‌ای و دوره‌ای در تاریخ زمین‌ساز منطقه هستند که منجر به تخلیه رسوبات و تغییر در توالی رسوب‌گذاری شده‌اند. در همین راستا، نتایج مطالعات اردکان (۱۳۹۵) و زنجانی و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که چهار سطح رسوبی مختلف (*Q1*، *Q2*، *Q3*، *Q4*) در حوضه زنجان‌رود وجود دارد که به چهار دوره رسوبی–اقلیمی مربوط می‌شوند. این سطوح، نشان‌دهنده تغییرات در سطح اساس، واکنش رودخانه به نوسانات دمایی–بارشی و تحولات فرسایشی–رسوبی در طی دوره کواترنری هستند.

بنابراین، هدف اصلی این مطالعه، استفاده از مدل‌سازی پلی‌نومیال درجه ششم پیرسون برای اثبات وجود چهار نوسان پالئوکلیماتیک در حوضه قزل اوزن، به طور اعم و در حوضه آرپاچای، به طور خاص، از طریق تحلیل هیپسومتری بعددار و اعتبارسنجی نتایج با معیارهای آماری است. این مطالعه ضمن افزایش دقت در شناسایی نوسانات اقلیمی قدیمی، می‌تواند الگویی قابل تعمیم برای مطالعات مشابه در حوضه‌های کوهستانی و نیمه‌کوهستانی ایران و دیگر مناطق ارائه دهد (گودی و همکاران، ۲۰۲۲؛ گودی، ۲۰۰۴).

مبانی نظری

مورفوکلیماتیک به عنوان یکی از زیرشاخه‌های کلیدی ژئومورفولوژی، به بررسی تعاملات متقابل بین اقلیم قدیمی و توسعه عوارض سطح زمین می‌پردازد (گودی و همکاران، ۲۰۲۲، گودی، ۲۰۰۴). این رویکرد، به‌ویژه در مطالعات دوره کواترنری، به‌عنوان چارچوبی تفسیری برای شناسایی نوسانات اقلیمی قدیمی و تأثیر آن بر الگوهای فرسایشی–رسوبی مورد استفاده قرار گرفته است (گیبارد و هوقس، ۲۰۲۱؛ دیویس و همکاران، ۲۰۰۹). در طول دوره کواترنری، نوسانات اقلیمی شامل فازهای یخبندانی و بین‌یخبندانی، منجر به تحولات بنیادین در رژیم هیدرولوژیکی، فعالیت‌های فرسایشی و تشکیل عوارض ژئومورفولوژیکی شده‌اند (روساکوو و سدوو، ۲۰۱۲؛ واندربرق[1]، ۲۰۰۳). این نوسانات، به‌ویژه در حوضه‌های کوهستانی، اثرات برجسته‌ای بر توسعه سیستم‌های رودخانه‌ای، تشکیل تراس‌های چندگانه، تغییرات سطح اساس و واکنش‌های زمین‌ریختی داشته‌اند (گیبارد و الیاس[2]، ۲۰۱۴).

نوسانات اقلیمی دوره کواترنری، با تغییرات قابل توجهی در الگوی بارش، دما، فعالیت‌های یخچالی و شدت فرسایش همراه بوده‌اند. در مناطقی مانند حوضه آرپاچای، این نوسانات اقلیمی منجر به تشکیل چندین سطح تراسی شده است که نشانه‌هایی از چندین مرحله تحولی در حوضه کلی‌تر زنجان رود هستند (اردکان، ۱۳۹۵ و زنجانی و همکاران، ۲۰۱۳). تفکیک دقیق این نوسانات از تغییرات تکتونیکی، نیازمند استفاده از روش‌های کمّی و آماری است.

روش‌های ژئومتریک، به‌ویژه استفاده از هیپسومتری بعددار و مدل‌های ریاضی پلی‌نومیال، به‌عنوان ابزارهای قوی برای تحلیل و اعتبارسنجی نوسانات ژئومورفولوژیکی شناخته شده‌اند (استرالر[3]، ۱۹۵۲؛ پیک و ویلسون[4]، ۱۹۷۱). هیپسومتری بعددار با استفاده از مختصات جغرافیایی در سیستم متریک، اطلاعات فضایی را در محاسبات دخالت داده و دقت مدل سازی را افزایش می‌دهد (استرالر، ۱۹۵۲). مدل‌های پلی‌نومیال، به‌ویژه درجه ششم، قادر به شبیه سازی دقیق نقاط عطف ژئومورفولوژیکی در مقاطع عرضی دره‌ها هستند. این مدل‌ها از طریق محاسبه ضریب همبستگی (*r*)، ضریب تعیین (R^2) و اندازه اثر، امکان اعتبارسنجی ژئومتریک این نوسانات را فراهم می‌کنند (بیرکلند و همکاران، ۲۰۰۳).

---

[1] . Vandenberghe
[2] . Elias
[3] . Strahler
[4] . Wilson

روش پژوهش

جمع‌آوری و تهیه داده‌های مکانی و توپوگرافی: در این پژوهش، داده‌های اولیه مورد نیاز از منابع مختلف به دست آمدند: ۱- نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل۲[1] و گوگل ارث‌پرو[2] برای شناسایی موقعیت دقیق مقطع‌های عرضی. ۲- داده‌های GPS میدانی (UTM Zone 39N) شامل طول (X)، عرض (Y) و ارتفاع از سطح دریا (H) از سه مقطع عرضی (علیا، وسطی و سفلی) حوضه آرپاچای. ۳- اطلاعات لیتولوژیکی و زمین‌شناسی منطقه از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور.

در این مطالعه، از روش هیپسومتری بعددار در تحلیل مقاطع عرضی حوضه استفاده شد که در آن از تلفیق مختصات جغرافیایی و ارتفاع جهت ایجاد متغیر فضایی استفاده گردید. برخلاف هیپسومتری بدون بعد که تنها بر اساس ارتفاع محور Y عمل می‌کند، در این مطالعه ابعاد فضایی X و Y باهم تلفیق شده و با استفاده از قضیه فیثاغورث، فاصله افقی هر نقطه از مبدأ به صورت زیر محاسبه گردید(رابطه ۱):

$$D = \sqrt{x^2 + y^2}$$ رابطه ۱)

این مقدار (D) به عنوان محور افقی و H (ارتفاع) به عنوان محور قائم در نمودارهای هیپسومتریک بعددار استفاده شد (استرالر، ۱۹۵۲).

تعریف و استخراج مقاطع عرضی: سه مقطع عرضی در بخش‌های مختلف حوضه (علیا، وسطی و سفلی)، با در نظر گرفتن شیب عمومی حوضه، وضعیت لیتولوژیکی و وجود تراس‌های ژئومورفولوژیکی متعدد، انتخاب گردید. با استفاده از ابزار Profile Tool در QGIS، مقاطع عرضی از خطوط توپوگرافی استخراج گردید. این رویکرد قادر است ساختارهای عمودی و افقی سطح زمین را با دقت بالایی ثبت کند (استرالر، ۱۹۵۲؛ بیرکلند و همکاران، ۲۰۰۳).

مدل‌سازی ریاضی با پلی‌نومیال درجه ششم: به منظور شبیه‌سازی نیمرخ‌های ژئومورفولوژیکی و شناسایی نقاط عطف مرتبط با نوسانات پالئوکلیماتیک، از مدل ریاضی پلی‌نومیال درجه ششم استفاده شد (رابطه ۲):

$$Y = a^6x^6 + a^5x^5 + a^4x^4 + a^3x^3 + a^2x^2 + ax + a_0$$ رابطه ۲)

که در آن ضرایب a^6 تا a_0 با استفاده از روش حداقل مربعات[3] بهینه شدند. مدل به گونه‌ای تنظیم شد که نوسانات ژئومورفولوژیکی مرتبط با چهار دوره کواترنری در مقاطع عرضی بازتاب داده شوند (پیک و ویلسون[4]، ۱۹۷۱).

به دلیل شیب تند، عرض کم و دسترسی محدود به تنگ آرپاچای، گردآوری داده‌های میدانی مستقیم از بخش میانی حوضه با چالش‌هایی همراه بود. بنابراین، از دیجیتایز پیکسل‌کدی تصاویر میدانی جهت استخراج مختصات توپوگرافیک استفاده شد. مختصات دکارتی X و Y این منطقه با بهره‌گیری از تلفیقی از مشاهدات میدانی و تحلیل های QGIS ثبت گردید. با توجه به ساختار توپوگرافیک منطقه، از پلی‌نومیال‌های زوج (دوم، چهارم و ششم) برای تحلیل نقاط عطف ژئومورفیک استفاده شد.

در بخش سفلی حوضه نیز، از ۵۰ نقطه پیمایش میدانی و مختصات UTM طولی و عرضی استفاده شد. این داده‌ها در قالب ساختار فیثاغورثی ترکیب شدند و نیمرخ توپوگرافیک مربوطه استخراج و تحلیل گردید.

---

[1] . Sentinel-2
[2] . Google Earth Pro
[3] . Least Squares Method
[4] . Pike & Wilson

اعتبار سنجی آماری مدل: اعتبار سنجی مدل از طریق سه معیار ضریب همبستگی (r)، ضریب تعیین (R^2) و اندازه اثر اصلی انجام شد (رابطه ۳):

$$\textbf{Effect Size} = \left(\frac{\boldsymbol{R^2}}{(\boldsymbol{1-R^2})}\right)$$

رابطه ۳)

مقدار بالاتر از ۰/۸ اندازه اثر، نشان‌دهنده قابلیت اعتماد بالای مدل است.

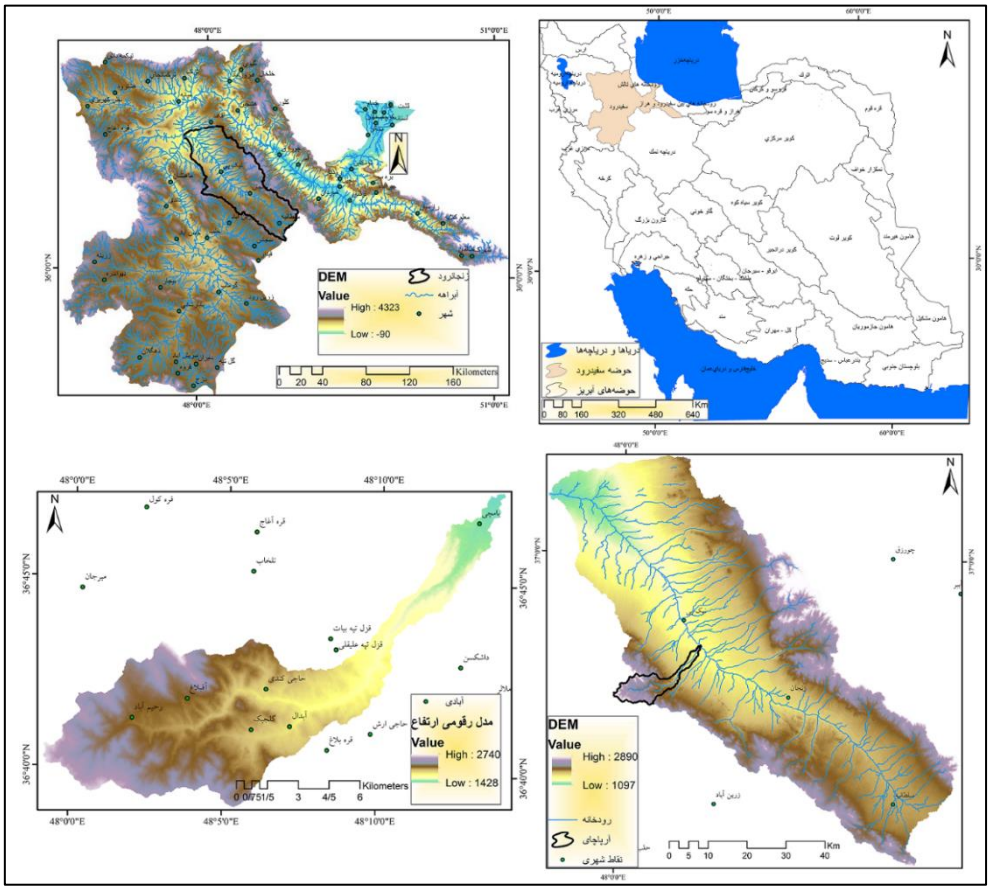
تفسیر هندسی و ژئومورفولوژیکی نیمرخ‌ها: با هم‌پوشانی نیمرخ واقعی و مدل‌سازی شده، چهار تراس مشخص شدند که مرتبط با چهار مرحله تحولی در حو ضه آرپاچای ه ستند. این تراس‌ها مربوط به چهار نو سان پالئوکلیماتیک بوده و تحت تأثیر همزمان فعالیت‌های تکتونیکی قرار داشته‌اند.

همچنین، با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه (عرض $^{\circ}$۳۶/۵ شمالی) و ارتفاع متو سط ۲۰۷۷ متر، این مطالعه ن شان داد که تفاوت عرضی با مناطق یخبندانی آمریکای شمالی از نظر ژئومورفولوژی اقلیمی جبران شده است. بنابراین، استفاده از واژه شنا سی یخچالی آمریکای شمالی در این منطقه از نظر مورفوکلیماتیک قابل توجیه ا ست (بوربانک و اندر سون[1]، ۲۰۱۳؛ گودی، ۲۰۰۴).

محدوده مورد مطالعه

حو ضه رودخانه آرپاچای، به عنوان یکی از زیرحو ضه‌های مهم حو ضه آبریز قزل‌اوزن، در شمال‌غرب ایران مرکزی واقع شـده اسـت. این حوضـه در محدوده جغرافیایی $^{\circ}$۴۸ تا $^{\circ}$۴۸ $'$۱۴ شـرقی و $^{\circ}$۳۶ $'$۳۸ تا $^{\circ}$۳۶ $'$۴۷ $''$۳۰ شـمالی قرار دارد و دارای مسـاحتی معادل ۹۴ کیلومترمربع اسـت. این حوضـه در قسـمت جنوبی زیرحوضـه زنجان‌رود، در میان دامنه‌های کوهستانی جنوبی زنجان گسترش یافته و طول محور اصلی تقریبی ۳۱ کیلومتر است (شکل ۱).

[1] Burbank& Anderson



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آرپاچای در حوضه های آبریز ایران، سفیدرود و زنجانرود.

حوضه آرپاچای از لحاظ توپوگرافیکی پرتگاه‌های قابل توجهی دارد. ارتفاع آن از حداقل ۱۴۳۲ متر در ناحیه اتصال به زنجان‌رود تا حداکثر ۲۷۳۶ متر در مناطق سرچشمه‌ای بالادست متغیر است، با ارتفاع متوسط ۲۰۷۷ متر از سطح دریا. این تنوع ارتفاعی، منجر به وجود آمدن شـــیب‌های ژئومورفولوژیکی برجســـته، فعالیت‌های هیدرولوژیکی قوی و الگوهای مختلف خاک‌سازی و پوشش گیاهی شده است.

زمین شناسی حوضه آرپاچای بسیار متنوع است؛ سنگ‌های غالب شامل سنگ آهک، دولومیت، ماسه سنگ، شیل، رسوبات سیلابی قدیمی و توده‌های گرانیتی هستند. برجسته‌ترین ویژگی این حوضه، گسترش زیاد سنگ‌های آهکی و دولومیتی است که به دلیل خاصیت انحلال‌پذیری بالای خود، نقش اساسی در شکل‌گیری عوارض کارستی، تغییرات سطح اساس و تحولات فرسایشی–رسوبی ایفا می‌کنند. این ویژگی‌ها، منطقه را به یکی از مناطق کلیدی برای مطالعات مورفوژنز، ردیابی تحولات دوره کواترنری و بررسی واکنش سیستم‌های رودخانه‌ای به نوسانات اقلیمی و تکتونیکی تبدیل کرده است.

حدود ۱۱ کیلومتر مربع از مساحت کل حوضه، دارای شرایط مناسب برای شناسایی و تفسیر آثار تغییرات سطح اساس اســـت. این مناطق، به دلیل وجود چندین تراس ژئومورفولوژیکی، مخروط‌افکنه‌های قدیمی و ناپایداری‌های فرم‌های زمین‌ریختی، فرصت مناسبی برای مطالعات مورفوکلیماتیک و تاریخچه تحولات زمین‌ساز فراهم کرده‌اند.

همچنین، حوضه آرپاچای در مجاورت ساختارهای تکتونیکی فعال منطقه زنجان قرار دارد و دارای سابقه لرزه‌خیزی مشـــخصـــی اســـت. این ویژگی، اهمیت آن را به عنوان یک منطقه نمونه برای مطالعه تعاملات متقابل بین فرآیندهای

تکتونیکی، اقلیمی و ژئومورفولوژیکی دوچندان می‌کند. با توجه به این وضعیت، آرپاچای می‌تواند به عنوان یک سیستم طبیعی پویا برای درک فرآیندهای تکامل سطح زمین و واکاوی اثرات تغییرات اقلیمی و تکتونیکی در مقیاس‌های زمانی کواترنری عمل کند.

یافته‌ها

اولین استفاده از مدل‌های پلی‌نومیال درجه ششم پیرسون در حوضه‌های ایران برای شناسایی نوسانات پالئوکلیماتیک: این پژوهش به عنوان نخستین مطالعه در ایران، از مدل‌های چندجمله‌ای درجه ششم توزیع پیرسون برای شناسایی و تحلیل نوسانات پالئوکلیماتیک در حوضه‌های آبریز استفاده کرده است. این رویکرد، که پیش‌تر در مطالعات مورفومتریک و پالئوکلیماتولوژی مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان (مانند آریزونا، صحرای آتاکاما و ساهارا) به کار گرفته شده است، قادر است الگوهای غیرخطی و چندحالتی در توزیع ارتفاع و شیب را تشخیص دهد که با روش‌های کلاسیک (مانند هیپسومتری بدون بعد یا رگرسیون خطی) قابل شناسایی نیستند.

استفاده از چندجمله‌ای درجه ششم پیرسون امکان شناسایی چندین نقطه عطف در توزیع فراوانی ارتفاع را فراهم می‌کند که هر کدام می‌توانند نشانه‌ای از تغییرات محیطی گذشته، مانند دوره‌های خشک‌سالی یا بارش‌های شدید یا تغییرات آب و هوایی، باشند. در این مطالعه، این مدل‌ها به طور خاص برای شناسایی لایه‌های سطحی بازمانده از فرسایش دوره کواترنری به کار گرفته شدند و نشان دادند که تغییرات پالئوکلیماتیک به صورت دوره‌ای و با دامنه مشخصی در طول زمان تکرار شده‌اند.

این نوآوری روش‌شناختی، نه تنها دقت شناسایی نوسانات اقلیمی گذشته را افزایش داده، بلکه زمینه را برای استفاده از مدل‌های آماری پیشرفته در مطالعات ژئومورفولوژی ایران فراهم کرده است.

استفاده از هیپسومتری بعددار به جای هیپسومتری بدون بعد، که دقت تحلیل را افزایش می‌دهد: در این پژوهش، برخلاف روش‌های رایج در مطالعات هیپسومتری که از شاخص هیپسومتری بدون بعد استفاده می‌کنند، از روش هیپسومتری بعددار استفاده شده است. این رویکرد، به جای نرمال‌سازی ارتفاع و مساحت، از مقادیر واقعی (متر و کیلومترمربع) استفاده می‌کند و امکان مقایسه مستقیم بین حوضه‌های مختلف را بدون از دست دادن اطلاعات فیزیکی فراهم می‌کند.

مزیت اصلی این روش: حفظ واحد فیزیکی (متر)، که امکان تفسیر مستقیم تغییرات ارتفاعی را میسر می‌سازد، کاهش خطای ناشی از نرمال سازی، به ویژه در حوضه‌های کوچک یا نامتقارن، افزایش حساسیت به تغییرات کوچک در توزیع ارتفاع که می‌توانند نشانه‌ای از تحولات پالئوکلیماتیک باشند،

در این مطالعه، استفاده از هیپسومتری بعددار امکان شناسایی چهار سطح ارتفاعی مجزا با فراوانی بالا در توزیع ارتفاع را فراهم کرد که با روش‌های بدون بعد قابل تشخیص نبودند. این سطوح، با موقعیت تراس‌های قدیمی و لایه‌های رسوبی هم‌راستا بوده و نشان‌دهنده ثبات نسبی در شرایط اقلیمی در دوره‌های گذشته هستند. این تغییر روش، دقت تحلیل را به طور چشمگیری افزایش داده و مدل‌های پالئوکلیماتیک را قابل اعتمادتر کرده است.

اثبات وجود چهار نوسان اقلیمی در حوضه آرپاچای با استفاده از شاخص‌های آماری قوی: تحلیل توزیع ارتفاع در حوضه آرپاچای با استفاده از مدل‌های پلی‌نومیال درجه ششم پیرسون و تحلیل واریانس چندسطحی، وجود چهار نوسان اقلیمی واضح در طول دوره کواترنری را تأیید می‌کند. هر یک از این نوسانات با تغییرات معنادار در: میانگین شیب، دامنه تغییرات ارتفاع، فراوانی تراس‌های فرسایشی و ضخامت لایه‌های رسوبی همراه بوده‌اند که نشان‌دهنده تغییرات از شرایط خشک به مرطوب و بالعکس است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که فرسایش طولانی‌مدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی دوره‌ای، منجر به تشکیل سطوح باقی‌مانده در ارتفاعات مختلف شده است.

تشـــخیص چهار نوســـان اقلیمی در تمامی بخش‌های حوضـــه، که نشـــان از ثبات زمانی و مکانی این تحولات دارد: یافته‌های این پژوهش نشـــان می‌دهد که الگوی چهارگانه نوســـان اقلیمی نه تنها در حوضـــه آرپاچای، بلکه در تمامی زیرحوضه‌های اصلی (ارمغانخانه، سهرین، سارمساقلو) نیز مشاهده می‌شود. این هم‌پوشانی فضایی، با تفاوت‌های جزئی در زمان‌بندی و دامنه تغییرات، نشان‌دهنده ثبات زمانی و مکانی نوسانات پالئوکلیماتیک در سطح حوضه زنجانرود است.

این یافته از آن جهت مهم ا ست که ن شان می‌دهد تغییرات اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای رخ داده‌اند، نه محلی، از تأثیر عوامل غیراقلیمی (مانند فعالیت تکتونیکی موضعی) به عنوان علت اصلی این سطوح دفاع می‌کند و فرسایش قهقرایی در پاسخ به تغییرات سطح اساس قزل اوزن، یک پدیده منسجم و سیستماتیک بوده است.

بحث

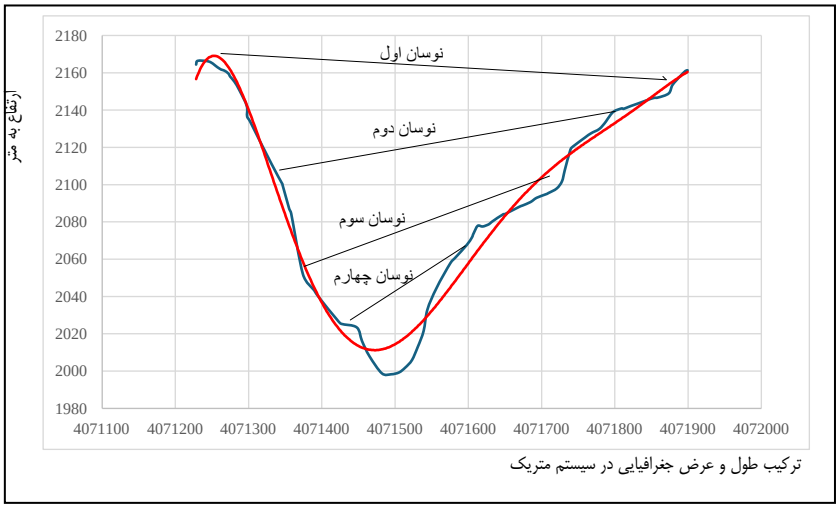
تف سیر تراس‌های ژئومورفولوژیکی و ارتباط آنها با نو سانات کواترنری: در این مطالعه، چهار تراس مشـخص شـده در نیمرخ‌های عرضـــی رودخانه آرپاچای، با توجه به موقعیت مکانی، شـــیب، طول و انحناء هر تراس، به عنوان شـــواهدی از چهار مرحله تحولی در حوضه شناسایی شدند. این تراس‌ها، با توجه به شباهت ساختاری و زمانی با الگوهای شناخته شده از دوره‌های یخبندانی آمریکای شمالی، مرتبط با چهار نوسان پالئوکلیماتیک دوره کواترنری تشخیص داده شدند. هر یک از این تراس‌ها، نشانه‌ای از یک تغییر عمده در وضعیت اقلیمی و هیدرولوژیکی منطقه است؛ تغییراتی که منجر به تغییر در نوع فعالیت‌های فرسایشی و رسوب‌گذاری، و در نهایت شکل‌گیری سطوح ژئومورفولوژیکی چندگانه شده‌اند. این تراس‌ها، از نظر ژئومتریک، نقاط عطفی هستند که نشان‌دهنده تغییر در رژیم انرژی رودخانه، تغییر در شیب سطح اساس و واکنش حوضه به نوسانات اقلیمی هستند.

این یافته‌ها اهمیت ا ستفاده از روش‌های کمّی و آماری را در شنا سایی و اعتبار سنجی تراس‌های ژئومتریک نو سانات پالئواقلیم برجسته کرده است. استفاده از مدل‌های ریاضی–آماری (مانند پلی‌نومیال‌های پیرسون) این امکان را فراهم کرده است که نوسانات اقلیمی را با دقت بالایی ثبت و تفسیر کنیم.

نقش مدل‌های پلی‌نومیال در شنا سایی نو سانات ژئومورفولوژیکی: در بخش علیای حو ضه، بر ا ساس رابطه (۲) مدل نهایی به صورت زیر به دست آمد:

$$y = (-0.1 * 10^{-12})x^6 + 0.000003x^5 - 34.682x^4 + (2 * 10^8)x^3 - (6 * 10^{14})x^2 + (9 * 10^{20})x - (6 * 10^{26})$$

از لحاظ آماری، این مقادیر نشـان‌دهنده آن هسـتند که مدل قادر اسـت بیش از ۹۷ درصـد از تغییرات توپوگرافیک را تبیین کند و خطای تخمین آن بسیار ناچیز است. این موضوع اهمیت استفاده از این نوع مدل‌های ریاضی را در تحلیل‌های ژئومتریک از نظر علمی مستحکم می‌کند (شکل ۲).



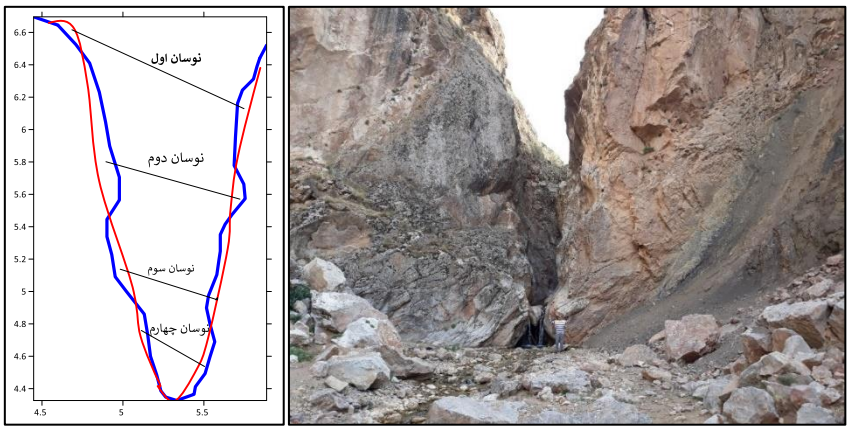
شکل ۲. نیمرخ واقعی (آبی تیره) و هیپسومتریک بعد دار پیرسون پلی‌نومیال درجه ششم (قرمز) از بخش علیای حوضه آرپاچای

در بخش وسطی حوضه، به دلیل شرایط خاص منطقه (پرشیبی، عرض کم و دسترسی محدود)، از دیجیتایز پیکسل‌کدی تصاویر میدانی و QGIS استفاده شد. مختصات X و Y دکارتی این منطقه با استناد به مشاهدات میدانی و تحلیل‌های ژئومتریک ثبت گردید(شکل ۳).

مدل نهایی بر اساس رابطه (۲) به صورت زیر به دست آمد:

$$y = -1.6x^6 + 39.2x^5 - 392.8x^4 + 1945.4x^3 - 4581.7x^2 + 5064.4x - 615.92$$

این معادله قادر است الگوی چهار نقطه عطف ژئومورفولوژیکی موجود در نیمرخ وسطی را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند. این تراس‌ها، با توجه به موقعیت فضایی و توپوگرافیک خود، به‌عنوان شواهدی از چهار مرحله تحولی در حوضه شناسایی شدند که با چهار نوسان پالئوکلیماتیک مرتبط هستند.



شکل ۳. نیمرخ واقعی (آبی) و پیرسون پلی‌نومیال درجه ششم حقیقی(قرمز) به همراه عکس میدانی بخش وسطی حوضه آرپاچای

در بخش سفلی حوضه، از ۵۰ نقطه پیمایش میدانی و مختصات UTM استفاده شد. داده‌ها در قالب ساختار فیثاغورثی ترکیب شدند و نیمرخ توپوگرافیک مربوطه استخراج گردید. مدل نهایی بر اساس رابطه (۲) به صورت زیر محاسبه شد (شکل ۴):

$$y = (2 * 10^{-12})x^6 - (4 * 10^{-5})x^5 + 408.55x^4 - (2 * 10^{9})x^3 + (7 * 10^{15})x^2 - (1 * 10^{22})x + (8 * 10^{27})$$

شکل ۴. نیمرخ واقعی (آبی) و هیپسومتریک بعد دار پیرسون پلی‌نومیال درجه ی ششم (قرمز) بخش سفلای حوضه آرپاچای(واحد محورها همانند شکل ۳)

همخوانی بین مقاطع عر ضی و ثبات زمانی-مکانی نو سانات: مقای سه نتایج سه مقطع عر ضی حو ضه آرپاچای ن شان می‌دهند که ۱-چهار تراس ژئومورفولوژیکی در تمامی مقاطع حفظ شده‌اند ۲- ضرایب آماری (R^2، r و Effect Size) در هر سه مقطع بالا و معنادار هستند. از شاخص اندازه اثر به منظور ارزیابی قدرت تبیین مدل‌های پلی‌نومیال درجه ششم ا ستفاده می شود که ن شان‌دهنده قدرت واقعی اثرگذاری مدل‌ها ا ست. بر ا ساس این معیار، تمامی مقاطع دارای اندازه اثر بسیار بزرگ ($f^2 > 0.35$) دارند. این مقادیر نشان‌دهنده دقت و اعتبار بسیار بالای مدل‌ها در تمامی مقاطع عرضی حو ضه ا ست. کاهش جزئی در اندازه اثر در مقطع و سطی نا شی از تغییرات لیتولوژیکی و اثرات ر سوبی بی شتر ا ست، اما هم‌خوانی بالای تراس‌ها در تمامی مقاطع، ن شان‌دهنده هم سویی کلی نو سانات اقلیمی در سرا سر حو ضه ا ست. و ۳- تفاوت‌های جزئی در دقت مدل بین مقاطع ناشی از تغییرات لیتولوژیکی، فرسایش محلی و اثرات رسوبی است (جدول ۱).

جدول ۱. مقایسه عملکرد مدل در سه مقطع عرضی حوضه آرپاچای

مقطع	ضریب همبستگی(r)	R^2 (%)	Effect Size	اعتبار مدل
علیا	۰/۹۹±	۹۷/۷۵	۴۳/۴	بسیار بالا
وسطی	۰/۹۷±	۹۴/۱	۱۵/۹۵	بسیار بالا
سفلی	۰/۹۹±	۹۸	۴۹	بسیار بالا

این هم‌خوانی نشان می‌دهد که نوسانات اقلیمی کواترنری در تمامی بخش‌های حوضه، به صورت هماهنگ و منسجم، ثبت شده‌اند. این موضوع اهمیت استفاده از مدل‌های غیرخطی چندمتغیره در تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی را برجسته کرده و نشان می‌دهد که این نوسانات تحت تأثیر همزمان عوامل اقلیمی و تکتونیکی منطقه قرار داشته‌اند.

در مطالعات داخلی، بیشتر تأکید بر مشاهدات میدانی و توصیف کیفی عوارض بوده است (رستم‌خانی، ۱۳۹۳؛ عباسی، ۱۳۹۴؛ اردکان، ۱۳۹۵؛ زنجانی و همکاران، ۲۰۱۳). در مقابل، در مطالعات بین‌المللی (استرالر، ۱۹۵۲؛ بیرکلند و همکاران، ۲۰۰۳)، استفاده از روش‌های کمّی، آماری و ژئومتریک رایج‌تر است.

یکی از چالش‌های اصـــلی در مطالعات ژئومورفولوژی مربوط به دوره کواترنری، اثبات وجود نوســـانات اقلیمی بدون وابستگی کامل به مشاهدات میدانی است. در این پژوهش، با استفاده از روش‌های ژئومتریک و آماری، اثبات ژئومتریک وجود چهار نوسان پالئوکلیماتیک در حوضه آرپاچای انجام شد. این اثبات سه مرحله دارد: ۱- شناسایی چهار نقطه عطف در مقاطع عرضی ۲- اعتبارسنجی آماری این تراس‌ها با استفاده از ضریب همبستگی، R^2 و اندازه اثر و ۳- مقایسه این تراس‌ها با الگوهای اســتاندارد مورفوکلیماتیکی مرتبط با نوســانات یخچالی. این امر، باعث افزایش قابلیت تعمیم نتایج و افزایش اعتبار علمی تحقیق شده است.

بنابراین، چهار تراس شناسایی شده در نیمرخ‌های عرضی حوضه، نشانه‌هایی از چهار دوره نوسانی هستند که تحت تأثیر همزمان فعالیت‌های اقلیمی و تکتونیکی قرار داشته‌اند. این تراس‌ها نشان‌دهنده تغییرات در سطح اساس، واکنش رودخانه به نوسانات دمایی-بارشی و تغییرات در رژیم فرسایشی-رسوبی منطقه هستند.

محدودیت‌هایی که این پژوهش با آن‌ها روبه‌رو بود عبارتند از: ۱- عدم دسترسی به داده‌های ایزوتوپی یا دیگر شواهد مســتند از دوره کواترنری. ۲- عدم اســتفاده از روش‌های مکمل مانند تبدیل فوریه یا مدل‌ســازی زمانی از نوســانات. ۳- انجام تحلیل تنها در یک حوضه و عدم مقایسه با حوضه‌های دیگر که لازم است در پژوهش‌های بعدی مد نظر قرار گیرد. بر همین اساس برای ادامه این مطالعه و گسترش نتایج به سایر حوضه‌ها، پیشنهاد می‌گردد: ۱- از تبدیل فوریه برای تعیین طول دوره‌های زمانی نوسانات استفاده شود. ۲- نتایج با داده‌های ایزوتوپی اکسیژن در مناطق کارستی مقایسه گردد. این داده‌ها می‌توانند اعتبار زمانی لازم برای هر یک از چهار نوسان شناسایی شده را فراهم کنند و این امکان را فراهم کنند که نوســانات ژئومورفولوژیکی نه تنها از نظر مکانی، بلکه از نظر زمانی نیز تأیید شــوند. این رویکرد، می‌تواند گامی اســاســی در جهت تعریف یک چارچوب مورفوکلیماتیک منطقه‌ای برای ایران باشــد. ۳- روش‌های مشــابه در حوضه‌های دیگر زنجان‌رود و قزل‌اوزن اعمال گردد. ۴- از داده‌های مدل‌های دینامیکی اقلیمی برای شبیه سازی شرایط پالئواقلیم استفاده شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از روش‌های ژئومتریک و آماری پیشرفته، وجود چهار نوسان پالئوکلیماتیک دوره کواترنری در حوضــه رودخانه آرپاچای به‌خوبی اثبات گردید. این تحلیل‌ها بر اســاس مدل‌ســازی پلی‌نومیال درجه شــشــم پیرســون و هیپسومتری بعددار انجام شدند و از طریق ضریب همبستگی (r)، ضریب تعیین (R^2) و اندازه اثر (Effect Size) مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. تحلیل‌های انجام‌شده در سه مقطع عرضی (علیا، وسطی و سفلی) نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل‌ها در شبیه‌سازی ساختارهای ژئومورفولوژیکی مرتبط با نوسانات اقلیمی هستند. در بخش سفلی، عملکرد مدل حتی بهبود یافت و R^2 =۹۸٪ به دســت آمد، که نشــان‌دهنده ثبات و قدرت روش‌های ژئومتریک در این نوع مطالعات اســت. همچنین، وجود چهار تراس ژئومورفولوژیکی مشابه در تمامی مقاطع عرضی حوضه، نشان‌دهنده هماهنگی ساختاری و ژئومتریک نوســانات اقلیمی در ســراســر حوضــه اســت. این تراس‌ها با توجه به موقعیت مکانی، شــیب و انحناء، به عنوان شواهدی از چهار مرحله تحولی در حوضه آرپاچای شناسایی شدند که با چهار نوسان پالئوکلیماتیک همراهی دارند. این هم‌خوانی نتایج در تمامی مقاطع، نشان‌دهنده ثبات زمانی و مکانی نوسانات اقلیمی در حوضه است. این موضوع اهمیت اســتفاده از روش‌های غیرخطی چندمتغیره در تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی را برجســته می‌کند، بویژه در مناطقی با پیچیدگی‌های زمین‌ساختی و اقلیمی. علاوه بر آن، تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که نوسانات اقلیمی دوره کواترنری در حوضه آرپاچای نه تنها به صورت جداگانه در هر بخش، بلکه در قالب یک الگوی یکپارچه و منسجم ثبت شده‌اند. این الگو، تحت تأثیر همزمان عوامل اقلیمی و تکتونیکی شــکل گرفته اســت. همچنین، این مطالعه با اســتناد به تحقیقات حیدرزاده و بالاتو (۲۰۱۷) و بالاتو و همکاران (۲۰۱۶) که تشــکیل دره طارم-شــاهرود را در دو مرحله نئوژنی برجســته

کرده‌اند، نشان داده است که حوضه قزل‌اوزن در اثر اعمال نیروهای کششی و تشکیل دره تکتونیکی طارم- شاهرود به حوضه خزر متصل شده است، اما رودخانه در ارتفاعی بیش از ۲۰۰ متر بالاتر از سطح کنونی جریان داشته و تحولات اقلیمی کواترنری در کاهش سطح اساس آن و ایجاد ناتعادلی های سطوح ارضی در حوضه قزل اوزن نقش اساسی داشته اند. این تغییرات ارتفاعی، همزمان با نوسانات اقلیمی کواترنری در دوره‌های یخبندانی (گلیشیال) و بین‌یخبندانی (کاتاگلیشیال) و نوسانات شدید رسوبی و روانابی ، منجر به کاهش تدریجی سطح اساس رودخانه و تطبیق توپوگرافی با شرایط کنونی شده است. این تحولات، در قالب چهار نوسان مورفوتکتونیکی-کلیماتیکی در نیمرخ عرضی دره آرپاچای ثبت شده‌اند. این مطالعه با استفاده از مدل‌های ژئومتریک و آماری قوی، گامی نوآورانه در جهت استانداردسازی روش‌های ژئومتریک در ایران محسوب می‌شود. این مدل‌ها قادرند نوسانات اقلیمی قدیمی را در قالب الگوهای ژئومتریکی قابل اندازه‌گیری و قابل تعمیم ثبت کنند. این موضوع، همچنین نشان می‌دهد که این نوسانات تحت تأثیر همزمان عوامل اقلیمی و تکتونیکی منطقه قرار داشته‌اند. این یافته‌ها ضمن افزایش غنای علمی مقالات، زمینه ساز استفاده از روش‌های ژئومتریک در مناطق دسترسی محدود شده و ادامه مطالعات در زمینه تعیین دوره‌های زمانی، محاسبه حجم سیلاب‌ها و پیش‌بینی تحولات زمین‌ساز در حوضه‌های مشابه را فراهم می نماید. این مطالعه نشان داد که روش‌های ریاضی-آماری می‌توانند در مناطقی با پیچیدگی‌های زمین ساختی و اقلیمی، ابزارهای بسیار موثری در تفسیر نوسانات ژئومورفولوژیکی باشند.

منابع

اردکان، معصومه (۱۳۹۵). *بررسی نقش جنبش‌های سنوزوئیک (الیگوسن-کوانرنری) در شکل‌گیری دره طارم*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه زمین‌شناسی تکتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان.

جعفری، غلام حسن، اصغری سراسکانرود، صیاد (۱۳۹۷). بررسی آثار یخچالی کواترنری زنجان رود. *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمّی*، ۳ (۲)، ۱۶-۳۰.

جعفری، غلام حسن، حضرتی، نسرین (۱۳۹۸). مرز سیستم شکل زای یخچال کواترنری در حوضه‌های آبریز شمال غرب ایران. *هیدروژئومورفولوژی*، ۶ (۱۸)، ۷۹-۹۶.

حسین زاده، محمد مهدی، گلستانی، علی (۱۴۰۲). بررسی تغییرات الگوی شریانی رودخانه جاجرود بر اساس شاخص های شریانی بریس، ریچاردز و واربوردن (حدفاصل سد لتیان تا سد ماملو). *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمّی*، ۱۲ (۱)، ۱۳۲-۱۵۱.

دارابی شاهماری، سحر، قنواتی، عزت اله. احمدآبادی، علی، افتخاری، مروت (۱۴۰۲). بررسی حساسیت ژئومورفیک رودخانه طالقان با تاکید بر نقش پوشش گیاهان حاشیه‌ای، *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمّی*، ۱۲ (۱)، ۲۰۵-۲۲۳.

رستم‌خانی، اصغر، (۱۳۹۲). *پایش ساختار زمین اقلیمی مخروط‌های آبرفتی رودخانه قزل‌اوزن*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان.

شریفی پیچون، محمد، طاهری نژاد، کاظم، زارع، فاطمه (۱۳۹۶). شواهد ژئومورفولوژی آثار یخچالی در عصر پلئیستوسن(نمونه موردی: حوضه دشت ابراهیم آباد-یزد). *دو فصلنامه کواترنری ایران*، ۳ (۱)، ۱۵-۲۸.

عباسی، مهدی، (۱۳۹۴). *پایش ژئومورفولوژیکی پادگانه‌های آبرفتی رودخانه‌های ایران مطالعه موردی: رودخانه قزل‌اوزن*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان.

مددی، عقیل، سیدجباری دوشانلو، سلمناز، اصغری سراسکانرود، صیاد (۱۴۰۲). بازسازی برف‌مرز آخرین دوره یخچالی کواترنر بر اساس شواهد ژئومورفولوژیکی و اقلیمی (مطالعه موردی: دامنه‌های شمالی سبلان). *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمّی*، ۱۱ (۴)، ۵۳-۳۹.

Abbasi, M. (2015). *Geomorphic monitoring of alluvial terraces in Iranian rivers: Case study of Qezelozan River* [Master's thesis]. Department of Geography, Faculty of Letters and

Human Sciences, University of Zanjan. p. 141. [In Persian].

Allen, J. R. (1975). Polynomial regression analysis of beach profiles. The Professional Geographer, 27(2), 189-193.

Ardakan, M. (2016). *Investigating the role of Cenozoic (Oligocene–Quaternary) tectonic movements in the formation of Tarom Valley.* Zanjan Graduate University of Basic Sciences. [In Persian].

Ballato, P., Cifelli, F., Heidarzadeh, G., Ghassemi, M. R., Wickert, A. D., Hassanzadeh, J., ... & Strecker, M. R. (2017). Tectono-sedimentary evolution of the northern Iranian Plateau: Insights from middle–late Miocene foreland-basin deposits. Basin Research, 29(4), 417-446.

Birkeland, P. W., Shroba, R. R., Burns, S. F., Price, A. B., & Tonkin, P. J. (2003). Integrating soils and geomorphology in mountains—an example from the Front Range of Colorado. Geomorphology, 55(1-4), 329-344 .

Bonakdari, H., Gholami, A., Sattar, A. M., & Gharabaghi, B. (2020). Development of robust evolutionary polynomial regression network in the estimation of stable alluvial channel dimensions. Geomorphology, 358, 107052.

Burbank, D. W., & Anderson, R. S. 2013. Tectonic geomorphology. John Wiley & Sons

Darabi Shahmari, S., ghanavati, E., Ahmadabadi, A. and eftekhari, M. (2023). Investigating the Geomorphic Sensitivity of Taleghan River Emphasizing Riparian Vegetation. *Quantitative Geomorphological Research*, 12(1), 205-223. [In Persian].

Davis, P. T., Menounos, B., & Osborn, G. (2009). Holocene and latest Pleistocene alpine glacier fluctuations: a global perspective. Quaternary Science Reviews, 28(21-22), 2021-2033 .

Edward, K. A., & Nicholas, P. (2002). Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape.

Florinsky, I. V. (2017). An illustrated introduction to general geomorphometry. Progress in Physical Geography, 41(4), 441-468.

Gibbard, P. L., & Elias, S. A. (2014). The Encyclopedia of Quaternary Science. (Second Edition), 277–289.

Gibbard, P. L., & Hughes, P. D. (2021). Terrestrial stratigraphical division in the Quaternary and its correlation. Journal of the Geological Society, 178(2), jgs2020-134.

Goudie, A. (Ed.). 2004. Encyclopedia of geomorphology (Vol. 2). Psychology Press.

Goudie, A. S., Burt, T. P., & Viles, H. A. (2022). The global transformation of geomorphology.

Hoseinzadeh, M. and Golestani, A. (2023). Investigating changes in the braided pattern of the Jajroud River based on Brice, Richards and Warburton braiding indices (between Latian Dam and Mamlo Dam). *Quantitative Geomorphological Research, 12*(1), 132-151. [In Persian].

Jafari, Gh. H., & Asghari Saraskanroud, S. (2018). Investigation of Quaternary glacial traces of Zanjanroud. Quantitative Geomorphological Research, 3(2), 16–30. [In Persian].

Jafari, Gh. H., & Hazrati, N. (2019). The boundary of the Quaternary glacial morphogenesis system in the river basins of northwestern Iran. Hydrogeomorphology, 6(18), 79–96. [In Persian].

Jafari, Gh. H., & Hazrati, N. (2020). Late Quaternary glacier equilibrium line altitudes (ELA) in the mountains of Iran. Arabian Journal of Geosciences, 13, 1-14.

Jafari, Gh. H., & Mohammadi, H. (2018). Reconstruction of the quaternary glacial lakes of Iran (Qala'ehchai Basin of Zanjan Province). Applied Ecology & Environmental Research, 16(5), 5869-5891.

James, L. A. (1996). Polynomial and power functions for glacial valley cross-section morphology. Earth Surface Processes and Landforms, 21(5), 413-426.

Madadi, A., Seyydjabbari, S. and asghari, S. (2023). Renovation of the snowfalls of the last

Quaternary glacier based on geomorphologic and climatic evidence (Case Study: Northern slopes of Sabalan). *Quantitative Geomorphological Research*, *11*(4), 39-53. [In Persian].

Pike, R. J., & Wilson, S. E. (1971). Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. Geological Society of America Bulletin, 82(4), 1079-1084.

Rostamkhani, A. (2014). *Monitoring the climatic-geomorphic structure of alluvial fans in Qezelozan River Basin* [Master's thesis]. Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan. [In Persian].

Rusakov, A., & Sedov, S. (2012). Late Quaternary pedogenesis in periglacial zone of northeastern Europe near ice margins since MIS 3: Timing, processes, and linkages to landscape evolution. Quaternary International, 265, 126-14.

Sharifi pichoon, M., Taheri nejad, K. and Zare, F. (2017). Geomorphological Evidences of glacier landforms of Pleistocene period (Case study: Dashte Ebrahimabad basin-Yazd). *Quaternary Journal of Iran*, *3*(1), 15-28. [In Persian].

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of America bulletin*, 63(11), 1117-1142.