



Morphotectonic Analysis of the Sefidrood Basin, Iran: An Integrated Methodological Framework Based on the Fibonacci Sequence and Gamma Distribution for Identifying Active Structural Patterns

Gholam Hassan Jafari¹

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

ARTICLE INFO

Article History

Received: 16 June 2025

Revised: 23 August 2025

Accepted: 24 August 2025

Available Online: 27 August 2025

Keywords:

Fibonacci Sequence

Neotectonics

Morphotectonics

Gamma Distribution

Dynamic Equilibrium

Sefidrood Basin

ABSTRACT

The Sefidrood Basin in northwestern Iran, located within the tectonically active Alborz–Central Iran transition zone, displays considerable structural complexity. This study employs mathematical and geometric patterns, particularly the Fibonacci sequence and the golden ratio, in combination with advanced statistical approaches such as the gamma distribution, the chi-square test, and Fisher's exact test, to investigate the morphotectonic and neotectonic conditions of the basin and its sub basins. Topographic and structural data were derived from maps and satellite imagery and analyzed using a GIS framework. A quantitative classification system based on Fibonacci ratios was applied to categorize the basin into five classes reflecting varying levels of morphotectonic activity. The results show that 96% of the basin lies within the range of weak to strong morphotectonic activity, whereas 4% is affected by neotectonic processes, primarily concentrated along the Qezelozan–Shahrud valleys, where neotectonic activity is most pronounced. Gamma based analysis confirms dynamic equilibrium with a skewness value of 0.7171 and a kurtosis of 0.782. The chi-square test indicates that the sub-basins behave independently with respect to morphotectonic activity, and Fisher's exact test demonstrates that all sub-basins operate within a shared ergodic structural framework. The findings indicate the presence of a negative cybernetic system with exponential memory that is adjusting the basin toward its base level in the Caspian Sea.

* Corresponding author: Gholam Hassan Jafari

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

How to cite this article: Jafari, G. H. (2025). Morphotectonic Analysis of the Sefidrood Basin, Iran: An Integrated Methodological Framework Based on the Fibonacci Sequence and Gamma Distribution for Identifying Active Structural Patterns. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 21-42. <https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.94085.1584>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Sefidrood Basin, a key sub-basin in northwestern Iran, features complex tectonic processes. Given its geographical and tectonic significance, identifying morphotectonic patterns and assessing its long-term equilibrium state are essential. This study adopts a Fibonacci-based geometric patterns and statistical analyses, including gamma distribution, chi-square tests, and Fisher's exact test, representing Iran's first integrated application of numerical approaches in morphotectonic analyses and distinguishing this work from prior studies.

Fibonacci sequences and the golden ratio ($\phi = 1.618$) have been employed across disciplines, including architecture, geology, biology, and system modeling. In the Sefidrood Basin, these patterns serve as quantitative tools to identify potential zones of tectonic and neotectonic activity, differentiating this work from earlier qualitative assessments.

Material and Methods

A hybrid framework combines mathematical-statistical techniques with geomorphological analyses to evaluate the morphotectonic and neotectonic status of the Sefidrood Basin and its sub-basins. Key stages:

Data Collection: Topographic maps (DEM), field geological data, and 350 geospatial/elevation points were gathered and integrated in ArcGIS Pro to characterize tectonic features.

Fibonacci-based Classification: Morphotectonic data were categorized using Fibonacci ratios (0.236, 0.382, 0.5, 0.618, 0.764) to define five levels of tectonic activity, enhancing spatial pattern recognition.

Statistical Techniques: To address non-normality (right-skewed data), non-normal methods were employed: (1) Gamma distribution analysis for probabilistic modeling of long-term tectonic patterns; (2) Chi-square tests to assess independence between sub-basins and the main basin; (3) Fisher's exact test to compare variability where appropriate.

PDF/CDF Plots: Probability density functions and cumulative distribution functions were generated from the gamma distribution to visualize tectonic activity distributions.

GIS-Based Spatial Analysis: Overlay of fault lines, tectonic indices, Fibonacci patterns, gamma curves, and PDF/CDF maps in ArcGIS Pro provided insights into spatial relationships among tectonic features.

Comparative and Inductive Analyses: Two sub-basins were analyzed in detail (inductive approach), with remaining sub-basins summarized in tables (comparative approach) to identify commonalities and differences.

Moment Analysis and Inference: Statistical moments (mean, variance, skewness, and kurtosis) described the distribution of tectonic activity, enabling a robust characterization of the basin's statistical structure.

Results and Discussion

The Sefidrood Basin shows a highly organized large-scale structure despite tectonic complexity. About 96% of the basin area falls within the weak-to-intense morphotectonic activity range, with 4% neotectonically active, concentrated along the Qezelozan–Shahrud corridor (Manjil Fault). This pattern aligns with regional tectonic models of Arabia–Eurasia convergence, suggesting a phase of relative tectonic quiescence.

Interpretations include a negative-feedback, memory-dependent dynamics driving long-term stability, and a heterogeneous, nonlinear regime with localized deformation. These findings have implications for spatially targeted hazard management.

Gamma-distribution results (skewness 0.7171, kurtosis 0.782; mean 1.45, second moment 0.27, SD 0.519) indicate a stable system with no signs of imminent morphotectonic instability, consistent with non-normal probability approaches highlighted by Khosin & Wang (2022).

Chi-square and Fisher's exact tests show sub-basins are statistically independent from the main basin (chi-square values 6.2–53; all within 99% CI), suggesting a shared underlying tectonic driver within an ergodic framework.

GIS maps identify the highest activity along the Qezelozan–Shahrud corridor and Manjil Gorge; Rudshur lies outside the 95% CI, indicating independence from Zanzanrood.

Validation results show a confidence level of 90.85% with a two-tailed error margin below 8.9%, supporting the reliability of the methods. The study advances Fibonacci-based and gamma-distribution approaches for morphotectonic analysis and offers a framework for sub-basin dynamics within a unified tectonic system, with implications for water resource management, urban planning, and hazard mitigation.

Conclusion

An innovative approach combining Fibonacci patterns and gamma statistics reveals a dynamic equilibrium in the Sefidrood Basin, with only 4% neotectonic activity concentrated along major fault zones. Sub-basins are statistically independent yet integrated within a larger ergodic system, indicating shared long-term tectonic control. Fibonacci ratios and gamma distributions provide effective tools for hazard-zone identification and tectonic modeling, offering a framework for future research in similar basins and suggesting multi-scale, and spatial modeling methods for seismically active regions.





تحلیل مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود، ایران: کاربرد تلفیقی دنباله فیبوناچی و توزیع گاما در شناسایی الگوهای ساختاری فعال

غلام حسن جعفری^{۱*}

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

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲	حوضه سفیدرود در شمال غرب ایران به عنوان یکی از مناطق فعال تکتونیک در زون البرز-ایران مرکزی، دارای پیچیدگی‌های زمین‌ساختی قابل توجهی است. این مطالعه با استفاده از الگوهای ریاضی - هندسی، به ویژه دنباله فیبوناچی و نسبت طلایی، به همراه روش‌های آماری پیشرفته شامل توزیع گاما، آزمون کای دو و تحلیل فیشر، به بررسی وضعیت مورفوتکتونیک و نتوتکتونیک این حوضه و زیرحوضه‌های آن پرداخته است. داده‌های توپوگرافی و ساختاری از نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای استخراج و با استفاده از GIS تحلیل شدند. سپس، بر اساس یک چارچوب کمی مبتنی بر نسبت‌های فیبوناچی، داده‌ها به پنج طبقه از نظر شدت فعالیت مورفوتکتونیک طبقه‌بندی گردیدند. نتایج نشان داد که ۹۶ درصد از سطح حوضه در محدوده مورفوتکتونیک ضعیف تا شدید قرار دارد و تنها چهار درصد از حوضه، تحت فعالیت نتوتکتونیک قرار دارد، که عمدتاً در امتداد دره قزل‌اوزن-شاهرود با فعالیت نتوتکتونیک شدید مشخص می‌شود. تحلیل‌های گاما، تعادل دینامیکی حوضه را با مقادیر چولگی (۰/۷۱۷۱) و کشیدگی (۰/۷۸۲) تأیید کردند. علاوه بر این، تحلیل کای دو نشان داد که زیرحوضه‌ها از نظر فعالیت‌های مورفوتکتونیک مستقل هستند، اما تحلیل فیشر برجسته کرد که تمام زیرحوضه‌ها در یک ساختار ارگودیک مشترک عمل می‌کنند. این یافته‌ها حاکی از وجود یک سیستم سایبرنتیکی منفی دارای حافظه‌نمایی است که حوضه را به سمت سطح اساس (دریای خزر) در حال تنظیم کردن است.
کلمات کلیدی: دنباله فیبوناچی نتوتکتونیک مورفوتکتونیک توزیع گاما تعادل دینامیکی حوضه سفیدرود	

مقدمه

حوضه سفیدرود، به عنوان یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های آبریز ایران، در گذرگاه پیچیده‌ای بین فلات ایران و رشته‌کوه‌های البرز-طالش قرار دارد و از لحاظ ژئودینامیکی تحت تأثیر فرآیندهای فشارشی ناشی از برخورد ورقه عربی و اوراسیا قرار دارد (Radfar, 1995; Berberian, 1995; Chakdel, Nejati, Soleimani & Taati, 2019; Agard, Omrani, Jolivet & Mouthereau, 2005). این برخورد، از کرتاسه پسین تا میوسن، منجر به شکل‌گیری یک سیستم کوهزایی گسترده شامل زاگرس، البرز، طالش و کپه‌داغ شده است (Berberian & King, 1981; Yin, 2010). در این چارچوب، حوضه‌های رسوبی درون‌کوهی مانند حوضه سفیدرود، نه تنها به عنوان حافظه‌های رسوبی از تاریخچه تکاملی فلات ایران عمل می‌کنند (Mohajjel & Fergusson, 2014; Yin & Harrison, 2000)، بلکه به عنوان شاخص‌های حساس از فعالیت‌های مورفوتکتونیک کواترنری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

با این حال، پویایی مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود، به‌ویژه در بخش‌های شمالی و مرکزی آن، با ناهنجاری‌های چشمگیری همراه است. تنگه‌های گلوگاهی مانند منجیل، طارم، هشتجین و ماهنشان که از لحاظ لیتولوژیکی مقاوم هستند؛ ارتباط مستقیم بین دریای خزر و زیرحوضه‌های قزل‌اوزن - شاهرود را مسدود کرده‌اند. این در حالی است که در بسیاری از نقاط، تعادل سطوح ارضی به گونه‌ای نامتعادل شده که با تغییرات اخیر سطح اساس قابل توجیه نیست. این پدیده نشان‌دهنده تغییر حوضه از حالت آندورئیک (بسته) به آگزورئیک (باز) است؛ فرآیندی که احتمالاً تحت تأثیر فعالیت‌های نئوتکتونیک جوان و رشد تاقدیس‌های فشارشی رخ داده است (Guest, Horton, Axen, Hassanzadeh & McIntosh, 2007).

با این وجود، تحلیل‌های مورفوتکتونیک سنتی، مبتنی بر شاخص‌های کیفی یا نیمه‌کمی مانند SL, Vf و If، در شناسایی الگوهای منظم و پیش‌بینی رفتار بلندمدت سیستم با محدودیت مواجه هستند. این روش‌ها اغلب نمی‌توانند نظم پنهان در توزیع گسل‌ها، چین‌ها و شبکه زهکشی را آشکار کنند یا تعادل دینامیکی سیستم را به‌درستی ارزیابی نمایند. از این رو، نیاز به روش‌های کمی، سیستماتیک و قابل تعمیم امری ضروری به نظر می‌رسد.

از این رو، نیاز به روش‌هایی کمی و قابل تعمیم که بتوانند الگوهای پنهان در توپوگرافی و شبکه زهکشی را شناسایی کنند، امری ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر، مطالعات نشان داده‌اند که الگوهای ریاضی مانند دنباله فیبوناچی و توزیع‌های آماری مانند گاما، می‌توانند در شناسایی نظم‌های فراگیر در ساختارهای زمین‌ساختی مؤثر باشند (Scholz, Dawers, Yu, Anders & Cowie, 1993). این روش‌ها قادر هستند با تحلیل فراکتالی و آماری داده‌ها، الگوهای تکرارشونده در فاصله گسل‌ها، موقعیت چین‌ها و شکل حوضه‌های زهکشی را آشکار کنند.

در این تحقیق، به منظور رفع محدودیت‌های روش‌های سنتی مورفوتکتونیک، از تلفیق دنباله فیبوناچی و توزیع گاما به عنوان ابزاری کمی و سیستماتیک برای تحلیل حوضه سفیدرود استفاده شده است. هدف، شناسایی الگوهای منظم در توپوگرافی و شبکه زهکشی و ارتباط آن با فعالیت‌های تکتونیک فعال است.

الگوهای ریاضی، به‌ویژه دنباله فیبوناچی و نسبت طلایی ($\approx 1/618$)، از دیرباز به عنوان پدیده‌هایی جهان‌شمول در علوم مختلف، از جمله زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هنر و زیست‌شناسی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Kalman & Mena, 2003; Sharma, 2009). این الگوها با سادگی خود، قادرند ساختارهای بسیار پیچیده را در مقیاس‌های مختلف از کوچکترین ذرات تا کهکشان‌ها توصیف کنند. استفاده از این روابط ریاضی در زمین‌شناسی به ویژه در شناسایی الگوهای منظم در ساختارهای تکتونیک، شبکه‌های گسلی، چین‌خوردگی‌ها و حتی فرآیندهای لرزه‌ای، یک حوزه جذاب و در حال توسعه محسوب می‌شود (Khattab, Radwan, El-Anbaawy, 2021; Mansour & El-Tehiwy, 2023; Tiwari, Goswami & Bhakuni, 2021).

دیدگاه‌های هندسی نسبت به دنباله فیبوناچی از طریق در نظر گرفتن اعداد آن به عنوان بردارهایی در فضای سه‌بعدی، امکان شناسایی الگوهای هندسی در ساختارهای طبیعی را فراهم کرده است (Turner & Shannon, 1998; Turner, 1999). دنباله فیبوناچی

با تعریف ساده خود، جمله بعدی برابر با مجموع دو جمله قبلی (۰، ۱، ۱، ۲، ۳، ۵، ۸، ...)، قابلیت توصیف ساختارهای بسیار پیچیده را دارد و اغلب در تشکیل الگوهای فراکتالی، خودشبیه‌سازی‌ها و ساختارهای طبیعی دیده می‌شود (Marples & Williams, 2022). در سال‌های اخیر، محققانی چون مهرنیا (Mehrnia, 2017) و استفانو و گومانیکو (Stepanov & Gomanyuk, 2023) نشان داده‌اند که الگوهای فیبوناچی می‌توانند در شناسایی روابط میان ساختارهای شکستگی و فعالیت‌های لرزه‌ای مؤثر باشند. در حوزه تکتونیک، نسبت‌های فیبوناچی به عنوان ابزاری برای مدل‌سازی و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌توانند در درک بهتر ساختارهای زمین‌شناسی و تغییرات تکتونیکی مؤثر باشند. دوگلیونی (Doglioni, 1990) نیز نشان داد که اصول هندسی می‌توانند در تحلیل ویژگی‌های تکتونیکی مرتبط باشند، هرچند کاربردهای مشخص در تکتونیک همچنان کم‌شمار هستند.

در دهه‌های اخیر، استفاده از نسبت‌های فیبوناچی در تحلیل‌های زمین‌ساختی به‌ویژه در مناطق فعال تکتونیکی، افزایش یافته است. این رویکرد در مناطقی مانند آندیس، مدیترانه و ژاپن با موفقیت به کار رفته است (Scholz & Aviles, 1986; Scholz et al., 1993). در ایران، الگوهای ریاضی، به‌ویژه دنباله فیبوناچی و نسبت طلایی، در سال‌های اخیر کاربرد فزاینده‌ای در علوم مختلف، از جمله معماری، برنامه‌ریزی شهری، زمین‌شناسی و مدیریت خطرات طبیعی یافته‌اند. در معماری اسلامی-ایرانی نیز استفاده از این تناسبات به صورت گسترده در آثار متعدد تاریخی مشاهده شده است. مثلاً در مطالعه اصول هندسی و تناسبات طلایی موجود در مدرسه شوکتیه، هاشمی زرج‌آباد و همکاران (Hashemi Zarjabad, Ziaieniya & Ghorbani, 2015) نشان دادند که معماران قدیمی ایرانی از دانش عمیقی در زمینه نظام‌های تناسباتی و ترسیمات هندسی برخوردار بوده‌اند و این دانش را در طراحی فضاهای معماری به‌خوبی به کار گرفته‌اند. همچنین ضیایی‌نیا و هاشمی زرج‌آباد (Ziaieniya & Hashemi Zarjabad, 2016) در مطالعه خود به بررسی تناسبات معماری مسجد جامع قائن پرداخت و نشان دادند که سیستم تناسبات ایرانی-اسلامی بر پایه اعداد اصم و مربع مضاعف استوار است و در کنار آن، از نسبت طلایی نیز برای ایجاد تعادل بصری در عناصر مهم معماری (مانند ایوان و ورودی اصلی) استفاده شده است. این موضوع برجسته می‌کند که الگوهای عددی و هندسی در فرهنگ معماری ایرانی به صورت غیرتصادفی وجود دارند و می‌توانند الهام‌بخش روش‌های نوین تحلیلی در سایر حوزه‌های علمی باشند.

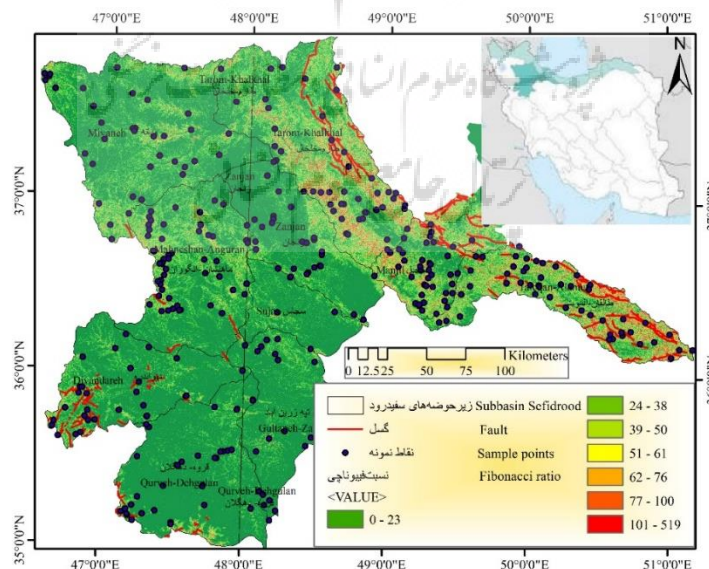
مهرنیا (Mehrnia, 2017) در تحقیقی تحت عنوان «شناسایی الگوی مکانی زلزله‌های غرب ایران به روش فیبوناچی»، این الگوها را در تحلیل مکانی زلزله‌های غرب ایران به کار گرفت. او نشان داد که توزیع پس‌لرزه‌های زلزله ۷/۳ ریشتری ازگله (۲۰۱۷ میلادی) در قالب مثلث طلایی (زاویه رأس ۳۶ درجه)، دایره طلایی (کمان ۱۳۷/۵ درجه) و مارپیچ طلایی قرار گرفته است. این مطالعه، وجود نظم فضایی غیرتصادفی در توزیع زلزله‌ها را تأیید کرد و نشان داد که روش‌های ریاضی می‌توانند در شناسایی نقاط بالقوه خطر زلزله مؤثر باشند. تحلیل‌هایی که در مقاله بازیابی ساختار فضایی و طرح کاشت باغ سالار جنگ شیراز (Asadpour, 2018) انجام شد، نشان داد که ساختارهای فضایی باغ‌های فارسی با الگوهای هندسی و ریاضی اسلامی همخوانی بالایی دارند. این رویکرد هندسی، اصولاً در طراحی فضایی و مرتب‌سازی عناصر طبیعی نیز کاربرد دارد. آن‌ها نشان دادند که هندسه و تناسبات طبیعی در خانه‌های سنتی ایرانی نقش کلیدی در ایجاد فضای داخلی مطلوبی به‌ویژه در مناطق گرم و خشک ایران دارند. بلیان و حسن‌پور لمر (Bililan & Hassanpour Lamr, 2019)، در مطالعه خود به بررسی الگوهای هندسی و تناسبات طلایی در روستای تاریخی ایبانه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مستطیل طلایی، مثلث خیام-پاسکال، مارپیچ طلایی، پنج‌ضلعی طلایی و سلسله اعداد فیبوناچی، نقش کلیدی در طراحی معماری و صنایع دستی این روستا داشته‌اند. این مطالعه مؤید آن است که هنرمندان ایرانی اسلامی از تناسبات طلایی به عنوان زبانی مشترک در تمامی طرح‌های هنری و معماری استفاده کرده‌اند و این موضوع می‌تواند الهام‌بخش استفاده از الگوهای عددی در علوم طبیعی و زمین‌ساختی نیز باشد.

معمارزاده و همکاران (Memarzadeh, Hosseinzadeh Lotfi, Jahanshahlu & Dehqan Toranposhti, 2022) در مطالعه خود با عنوان «رتبه‌بندی ایستگاه‌های آتش‌نشانی با استفاده از تکنیک دنباله فیبوناچی»، این الگوها را در بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های خدماتی در منطقه ده تهران به کار گرفتند. آن‌ها با مقایسه این روش با روش‌های متداول تصمیم‌گیری چندمعیاره، نشان دادند که روش فیبوناچی تطابق بالایی با معیارهای عملکردی و فضایی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کمی در تحلیل‌های فضایی و مکان‌یابی بهینه خدمات شهری استفاده شود.

با توجه به منابع فوق، واضح است که الگوهای فیبوناچی و نسبت طلایی در ایران بیشتر در حوزه‌های هنری و طراحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، استفاده از این الگوها در علوم زمین، ژئومورفولوژی و زمین‌ساخت هنوز در مراحل ابتدایی است و تعداد محدودی از مطالعات به‌صورت توصیفی به آن پرداخته‌اند. این مقاله با تمرکز بر حوضه سفیدرود، یکی از مناطق فعال تکتونیکی ایران، به بررسی وجود الگوهای فیبوناچی در ساختارهای زمین‌ساختی و نقش آنها در تبیین رفتارهای زمین‌ساختی می‌پردازد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سفیدرود یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین حوزه‌های آبریزی در منطقه شمال غرب و غرب ایران است که در استان‌های گیلان، البرز، قزوین، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان، کردستان، بخش‌های کوچکی از آذربایجان غربی، مازندران و همدان گسترده شده است. این حوضه به‌طور تقریبی در عرض جغرافیایی 35° تا 38° شمالی و طول جغرافیایی $46^{\circ}8'$ تا 51° شرقی قرار دارد. این حوزه جغرافیایی شامل مسیر جریان اصلی رودخانه سفیدرود است که از کوه‌های چهل‌چشمه در رشته‌کوه‌های زاگرس در استان کردستان سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسیری طولانی، در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. مساحت کل حوضه بالغ بر ۵۹۰۰۰ کیلومتر مربع است، که شامل حوضه‌های قزل‌اوزن و شاهرود می‌باشد و نقش مهمی در تنظیم آب و اقلیم منطقه دارد. طول مسیر اصلی رودخانه سفیدرود، تقریباً ۶۰۰ کیلومتر، ارتفاع سرچشمه‌ها، بیش از ۳۰۰۰ متر از سطح دریا، ارتفاع دهانه خروجی به دریای خزر، تقریباً ۲۸- متر و میانگین شیب مسیر جریان، حدود ۵ تا ۸ درصد است که نشان‌دهنده شیب ملایم و مسیر طولانی است. این مقاله برای اولین بار چارچوب کمی برای ارتباط نسبت طلایی با پارامترهای تکتونیکی در حوضه سفیدرود را توسعه داده است و یک مدل ترکیبی ریاضی-زمین‌شناسی با قابلیت پیش‌بینی الگوهای ساختاری و گسلش در این حوضه سفیدرود ارائه داده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت حوضه سفیدرود به همراه زیرحوضه‌های آن و نقاط نمونه

Fig. 1. Location of the Sefidrood basin, along with its subbasins and sample points

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، به منظور شناسایی و تحلیل الگوهای فیبوناچی در ساختارهای مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود، یک رویکرد کمی و هندسی-آماري توسعه داده شده است. این روش با تلفیق داده‌های ژئومورفولوژیکی، ساختارهای عددی فیبوناچی و تحلیل‌های آماری پیشرفته، قابلیت شناسایی و طبقه‌بندی سطوح مختلف فعالیت تکتونیک و نئوتکتونیک را در مقیاس حوضه و زیرحوضه‌ها فراهم می‌کند. روش کار شامل چندین مرحله اصلی است:

جمع‌آوری و استخراج داده‌های مکانی و ژئومورفولوژیکی

در مرحله اول، داده‌ها از نقشه‌های توپوگرافی و داده‌های DEM (مدل رقومی زمین) با دقت ۳۰ متر، از حوضه سفیدرود جمع‌آوری شدند. برای ارزیابی وضعیت تکتونیک حوضه سفیدرود و زیرحوضه‌های آن، یک مجموعه داده میدانی شامل ۳۵۰ نقطه نمونه‌برداری ساختاری جمع‌آوری شد. این نقاط، نماینده ساختارهای کلیدی زمین‌ساختی حوضه از جمله گسل‌های فشارشی، چین‌های جوان، خطوط شکستگی، تغییرات شیب توپوگرافی و ناهمگونی‌های زهکشی بوده و از طریق بازدیدهای میدانی سیستماتیک و با استفاده از دستگاه GPS دقت بالا (دقت مکانی ≥ 3 متر) ثبت شدند (شکل ۲). هر نقطه با توجه به معیارهای مشخصی از جمله دسترسی فیزیکی، بیانگر بودن فعالیت تکتونیک و تنوع جغرافیایی در سراسر حوضه انتخاب گردید. در هر نقطه، مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی) و ارتفاع ثبت شد. این داده‌ها در یک ساختار پیوسته آماری (Spatial Database) در محیط GIS یکپارچه شدند و به عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌های مورفوتکتونیک و ریاضی-آماري مورد استفاده قرار گرفتند تا معین گردد: آیا کلیت حوضه در مرحله آرامش تکتونیک قرار دارد یا خیر؟ و آیا بخش‌های از زیرحوضه‌های حوضه سفیدرود، در کلاس نئوتکتونیک در مقایسه با زیرحوضه‌ها قرار دارد؟

گروه‌بندی داده‌ها بر اساس الگوی فیبوناچی

داده‌های تلفیقی حاصل از شاخص‌های شیب و مرکزی، پس از نرمال‌سازی در بازه (۰/۱)، بر اساس یک چارچوب کمی الهام‌گرفته از نسبت‌های فیبوناچی طبقه‌بندی شدند. این نسبت‌ها، از جمله ۰/۲۳۶، ۰/۳۸۲، ۰/۵، ۰/۶۱۸ (نسبت طلایی) و ۰/۷۶۴ و بالاتر، در علوم مختلفی مانند فیزیک، زیست‌شناسی و دینامیک سیستم‌های پیچیده به‌عنوان نقاط آستانه طبیعی در تقسیم‌بندی الگوهای نظم و تحول مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Kalman & Mena, 2003; Sharma, 2009). در این تحقیق، این نسبت‌ها به‌عنوان مرزهای منطقی برای تمایز سطوح فعالیت تکتونیک به کار گرفته شدند؛ مقادیر زیر ۰/۲۳۶ بیانگر فعالیت بسیار ضعیف، ۰/۳۸۲-۰/۲۳۶ نشان‌دهنده سطح نسبتاً متوسط، ۰/۵-۰/۳۸۲ متوسط، ۰/۵-۰/۶۱۸ شدید (نزدیک به آستانه بحرانی)، ۰/۶۱۸-۰/۷۶۴ بیانگر گذار مورفوتکتونیک به تکتونیک فعال (بحرانی)، و مقادیر بالاتر از ۰/۷۶۴ نشان‌دهنده شرایط بسیار بحرانی و غالب بودن فرآیندهای نئوتکتونیک در نظر گرفته شده‌اند. این روش، با بهره‌گیری از الگوهای ریاضی موجود در سیستم‌های پویای طبیعی، چارچوبی سیستماتیک و قابل تکرار برای تفسیر کیفی داده‌های پیچیده مورفوتکتونیک ارائه می‌دهد.



شکل ۲- عکس‌هایی از محل برداشت مختصات قله و کنیک ناهمواری توسط GPS در بازدیدهای میدانی

Fig.2. photographs showing the acquisition of summit and conic-relief GPS coordinates during ground surveys

آزمون تقارن و توزیع داده‌ها

در مرحله بعد، داده‌های گروه‌بندی شده به‌منظور بررسی تقارن و نرمال بودن با استفاده از آزمون‌های آماری مانند کومولوگراف، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در صورت عدم وجود تقارن، داده‌ها با استفاده از تبدیل‌های لگاریتمی و Box-Cox نرمال‌سازی شدند. این مرحله به کاهش خطای منطقی در تحلیل‌های آماری بعدی کمک می‌کند.

مدل‌سازی توزیع گاما

با توجه به اینکه متغیرهای مورفوتکتونیکی (مانند شدت فعالیت گسلی و شیب‌ها) از نوع پیوسته هستند، تابع توزیع گاما به عنوان یک توزیع احتمالی غیرنرمال و مناسب برای داده‌های مثبت و نامتقارن، انتخاب شد. فرمول تابع چگالی احتمال (PDF) توزیع گاما به صورت رابطه (۱) است:

$$f(x) = \frac{\lambda^\beta}{\Gamma(\beta)} (x^{\beta-1} e^{-\lambda x}) \quad (1)$$

λ ضریب مقیاس، β ضریب شکل، $\Gamma(\beta)$ تابع گامای استاندارد است؛ البته β عملگر گاما نیز می‌باشد. برای محاسبه ضرایب λ و β از روابط (۲) و (۳) استفاده شد:

$$\lambda = E(X)/(\mu_2) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{E(X)^2}{\mu_2} \quad (3)$$

$E(X)$ امید ریاضی و μ_2 گشتاور دوم حول میانگین است (Makar & Rubin, 2017).

محاسبه گشتاورهای آماری و شاخص‌های توزیع

در ادامه، گشتاورهای آماری مربوط به توزیع گاما محاسبه شدند (گشتاور دوم حول میانگین (رابطه ۴)، واریانس) جهت محاسبه امیدریاضی گامای حوضه، که در محاسبه انحراف استاندارد گامای حوضه از آن استفاده خواهد شد (رابطه ۵). با توجه به مقدار انحراف استاندارد فیبوناچی مورفوتکتونیک حوضه وضعیت تکتونیکی آن برآورد و بررسی خواهد شد. این نسبت، به این دلیل حائز اهمیت است که یکی از پایه‌های محاسبه ضریب‌های چولگی (رابطه ۶) و کشیدگی (رابطه ۷) شاخص مورفوتکتونیک حوضه می‌باشد. مقدار کلاسیک کشیدگی گامائی در منابع (۶/β) محاسبه شده است (Makar & Rubin, 2017). این شاخص‌ها به تحلیل تعادل دینامیکی ساختارهای مورفوتکتونیک و شناسایی مناطق با خطر نئوتکتونیک کمک کردند.

$$\mu_2 = E(X^2) - [E(X)]^2 \quad (۴)$$

$$\sigma = \sqrt{\mu_2} \quad (۵)$$

$$S = \frac{E[(X - \mu)^3]}{\sigma^3} \quad (۶)$$

$$K = \frac{E[(X - \mu)^4]}{\sigma^4} \quad (۷)$$

تحلیل مقایسه‌ای زیرحوضه‌ها با کل حوضه

بعد از اینکه وضعیت تعادل دینامیکی در توزیع گاما روی مورفوتکتونیک حوضه انجام شد می‌توان از یکی از ساختارهای قابل قبول برای تعیین میزان وابستگی هر یک از زیر حوضه‌ها با کل حوضه استفاده کرد. ساختار قابل قبول برای زیرحوضه‌ها، مقایسه جبر احتمالاتی گشتاور دوم حول میانگین می‌باشد. بدیهی است که گشتاور دوم حول میانگین عملکردی موازی با واریانس نمونه‌ای البته در داده‌های گسسته دارد. از آنجایی که کمیت مورد نظر، شدت فعالیت مورفوتکتونیک تا تکتونیک و نئوتکتونیک داده‌ای پیوسته است لزوماً باید از ساختار محاسبه فوق استفاده نمود. یکی از کاربردهای این تابع احتمال در مبحث استنباط آماری از میزان تعامل عملکردی هر زیر حوضه با حوضه اصلی است. با توجه به اینکه مجموعه برداشت‌های هر کدام از زیرحوضه‌ها یک نمونه تصادفی از برداشت‌های کل حوضه می‌باشند. با توجه به مراحل فوق از کمیت فعالیت مورفوتکتونیک زیرحوضه‌ها جهت استنباط آماری تحلیل کای دو از هر زیرحوضه نسبت به حوضه مادر مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

اعتبارسنجی نتایج با استفاده از CDF و PDF توزیع گاما

در نهایت، نتایج با استفاده از توابع تجمعی احتمال (CDF) و PDF توزیع گاما اعتبارسنجی شدند. این مرحله به ویژه در محدوده حداقل و حداکثر فعالیت مورفوتکتونیک انجام شد. به دلیل نمایشی بودن توزیع گاما، از روش انتگرال گیری جزء به جزء ریمانی استفاده شد.

استقلال یا وابستگی زیرحوضه‌ها با تحلیل فیشر

در توزیع فیشر، علاوه بر روابط فوق، برای محاسبه مقدار کلی PDF از رابطه (۸) نیز استفاده شده است.

$$f_F^{(X)} = PDF = \left(\frac{\Gamma\left(\frac{k+l}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right) * \Gamma\left(\frac{l}{2}\right)} \right) * \int_0^\infty \frac{x^{\left(\frac{k}{2}-1\right)}}{\left(1 + \left(\frac{k}{l}\right)x\right)^{\frac{(k+l)}{2}}} \quad (۸)$$

که در آن k و l درجه آزادی زیرحوضه‌های مقایسه‌شده که از تعداد برداشت‌های مورفوتکتونیک هر زیرحوضه فراهم آمده و Γ تابع گاما است. در ساختار فیشر فوق $\left(\frac{\Gamma\left(\frac{k+l}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right) * \Gamma\left(\frac{l}{2}\right)} \right)$ قیمت کولموگروف می‌باشد که سبب چگال شدن PDF می‌گردد. در تحلیل، محاسبه و برآورد تابع PDF فیشر با توجه به ساختار تابع احتمال آن، اگر از محاسبه جزء به جزء ریمانی در ساختار انتگرال معین

استفاده گردد به راحتی هم مقدار چگال کولموگروف تابع PDF و هم ساختار CDF تابع قابل محاسبه می‌باشد (Makar & Rubin, 2017). این رابطه به عنوان اساس تحلیل‌های فیشر در این تحقیق استفاده شد.

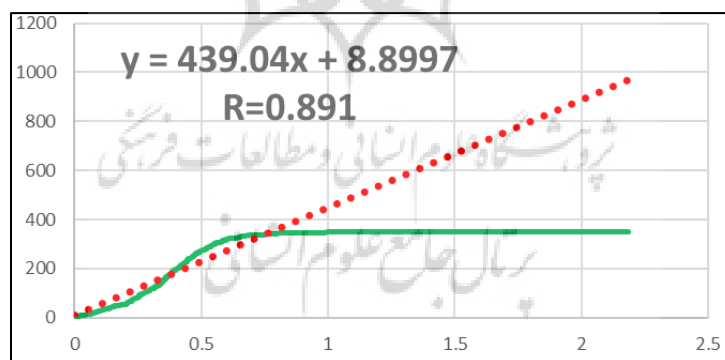
تحلیل گرافیکی و تفسیر فضایی

در پایان، داده‌های مورفوتکتونیک به صورت گرافیکی ترسیم شدند. شدت فعالیت تکتونیک در محور X و درصد گروه‌بندی شده بر اساس نسبت طلایی فیبوناچی در محور Y قرار گرفت. این نمودار به تحلیل فضایی و تعیین نقاط بحرانی در حوضه کمک کرد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، با استفاده از تلفیق الگوهای ریاضی - هندسی (فیبوناچی و نسبت طلایی) و روش‌های آماری پیشرفته (توزیع گاما، آزمون کای دو، تحلیل فیشر)، به بررسی وضعیت مورفوتکتونیک و نتوتکتونیک حوضه سفیدرود پرداخته شد. این رویکرد نوین، علاوه بر ارائه چارچوب نظری برای درک تحولات زمین‌ساختی، ابزارهای تحلیلی نوآورانه‌ای را برای برنامه‌ریزان محیطی و مدیران منطقه‌ای فراهم کرده است. در این بخش، یافته‌های تحقیق با تأکید بر تحلیل‌های ریاضی - آماری و تطبیق با مطالعات قبلی مورد بحث قرار می‌گیرند.

با توجه به گرادیان به‌دست‌آمده از تحلیل فیبوناچی بر روی داده‌های ژئومورفولوژیک حوضه سفیدرود، مشخص شد که داده‌ها در ساختار پیوسته آماری قرار دارند. داده‌های مورفوتکتونیک حوضه، در قالب نسبت‌های فیبوناچی گروه‌بندی و تحت آزمون گوس قرار گرفتند. با توجه به عدم تقارن داده‌ها در سمت راست محور Z، استفاده از توزیع نرمال منجر به خطای منطقی می‌شود. بنابراین، در تحلیل‌های قیاسی و استقرایی این مطالعه از روش‌های گامایی استفاده شد. برای دستیابی به دید جامع‌تر، تنها دو مورد از داده‌ها به صورت کاملاً استقرایی تفسیر شدند. همچنین، ضریب رگرسیون خطی ۰/۸۹ از تحلیل پیرسون بین داده‌های فیبوناچی و مورفوتکتونیک حوضه، محاسبه شد (شکل ۳).



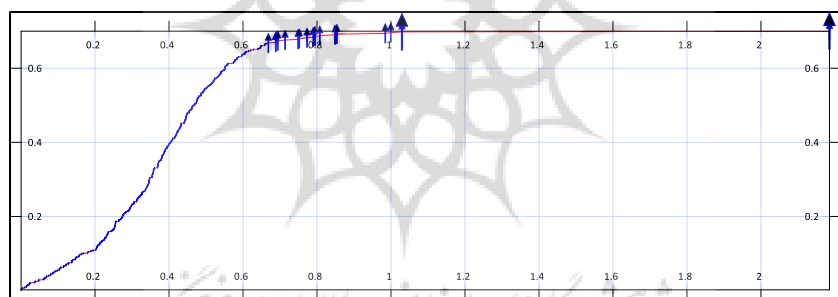
شکل ۳- نتایج تحلیل‌های گامایی و پیرسون خطی کمیت مورفوتکتونیک نسبت به نقاط اندازه‌گیری شده

Fig. 3. Results of gamma and linear Pearson analyses of the morphotectonic index relative to measured points

تحلیل نمودارهای گامایی حوضه، نشان می‌دهد که بیشترین درصد سطح حوضه (۹۶٪) در محدوده مورفوتکتونیک ضعیف تا شدید قرار دارد، در حالی که تنها چهار درصد از حوضه، تحت تأثیر فعالیت‌های نتوتکتونیک است (شکل ۴). عمده این مناطق در امتداد دره قزل اوزن - شاهرود و در اطراف تنگ منجیل قرار دارند که با مسیر گسل‌های منطقه همخوانی دارد. این یافته نشان می‌دهد که فعالیت‌های نتوتکتونیک در حوضه سفیدرود متمرکز به قسمت‌های شمالی آن است. این الگو نشان‌دهنده تعادل نسبی حوضه و عدم وجود ناپایداری‌های گسترده تکتونیک است. این یافته‌ها با نتایج رادفر و همکاران (Radfar et al., 2019) درباره فشار

ناشی از برخورد صفحه عربی با صفحه اوراسیا همخوانی دارد. این موضوع می‌تواند به دو دلیل اصلی تفسیر شود: ۱- حوضه سفیدرود تحت تسلط یک سیستم سایبرنتیکی منفی دارای حافظه نمایی^۱ قرار دارد که به سمت تعادل دینامیکی حرکت می‌کند. ۲- حوضه در مرحله آرامش نسبی قرار دارد و فعالیت‌های تکتونیکی در آن به صورت پراکنده و غیریکنواخت است. این یافته‌ها می‌توانند به برنامه‌ریزان محیطی و مدیران منطقه‌ای کمک کنند تا برنامه‌های مدیریت بحران را به صورت منطقه‌ای و نه سراسری طراحی کنند. استفاده از نسبت‌های فیبوناچی (۰/۲۳۶، ۰/۳۸۲، ۰/۵، ۰/۶۱۸ و ۰/۷۶۴) در این تحقیق، امکان مرکزگیری از فعالیت‌های تکتونیکی و نئوتکتونیکی را فراهم کرد. این مرکزگیری به شناسایی مناطق با فعالیت ضعیف، متوسط، شدید و نئوتکتونیکی کمک کرد. این یافته‌ها با تحقیقات مارپلز و ویلیامز (Marples & Williams, 2022) و فیض‌اله بیگی و همکاران (Feizolahbeigi, Lourenço, Golabchi, Ortega & Rezazadeh, 2021) درباره کاربرد نسبت طلایی در معماری طبیعی و ساختارهای مقاوم در برابر زلزله، تطبیق دارد. با توجه به همگنی مورفوتکتونیکی حوضه، می‌توان فرض کرد که آغاز فعالیت‌های نئوتکتونیکی در آینده، از همان موقعیت‌های کیاسیک رخ خواهد داد. مقایسه هر زیرحوضه با کل حوضه، امکان دستیابی به یک دید مورفولوژیکی دقیق‌تر را فراهم می‌کند که می‌تواند در مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی بحران‌های آتی بسیار مؤثر باشد.

در نمودارهای شکل ۲ و ۳، چولگی به سمت راست ساختار مورفوتکتونیکی به خوبی مشهود است. این ویژگی، ضرورت استفاده از روش‌های غیرنرمال را در تحلیل داده‌ها برجسته می‌کند. لذا، بهترین راهکار برای محاسبه کمیت‌های هندسی و فعالیت مورفوتکتونیکی هر زیرحوضه نسبت به ساختار ارگودیک حوضه، استفاده از روش‌های گامایی است. این امر با نتایج دوگلیونی (Doglioni, 1990) درباره اهمیت استفاده از توابع احتمال غیرنرمال در تحلیل‌های زمین‌ساختی همراهی دارد.



شکل ۴- تجسم عینی میزان فعالیت تکتونیکی حوضه سفیدرود با اغراق در محور X

Fig. 4. Visualization of tectonic activity of the Sefidroud basin with exaggeration on the X axis

ضریب همبستگی تابع رگرسیون خطی پیرسون حوضه ۰/۸۹ است که قابلیت اطمینان بالایی دارد. با استفاده از این رابطه و در بازه حداقل تا حداکثر فعالیت تکتونیکی، تابع پیرسون به روش کولموگروف بر روی حوضه مستولی شد تا از آن به جای میانگین، از امید ریاضی (EX) برای محاسبه کمی تغییرات مورفوتکتونیکی کل حوضه به صورت ژئومتریک استفاده شود.

$$f(X) = (0.00094) * \int_{0.000306}^{19/5155} (X)(439.04X + 8.8997)dx = 1.45$$

$$\mu_2 = (0.00094) * \int_{0.000306}^{19/5155} (X - 1.45)^2 * (439.04X + 8.8997)dx = 0.27$$

۱ - سیستم سایبرنتیکی منفی دارای حافظه نمایی: سیستمی کنترلی که با استفاده از فیدبک منفی، پایداری را حفظ می‌کند و رفتار آن به وضعیت‌های قبلی وابسته است، به گونه‌ای که تأثیر گذشته با یک تابع نمایی ($e^{-\lambda t}$) کاهش می‌یابد.

امید ریاضی کمیت فعالیت مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود (۱/۴۵) و گشتاور دوم حول میانگین (۰/۲۷) اساس محاسبه پارامترهای توزیع گاما را تشکیل داد:

$$\beta = \frac{2.1}{0.27} = 7.8 \quad \lambda = \left(\frac{1.45}{0.27} \right) = 5.37$$

بنابراین گامای ارگودیک ژئومورفولوژیکی حوضه برابر ۷/۸ می‌باشد. در محاسبه‌ی Pdf گامای حوضه داریم که:

$$f(X) = (0.00030936) * \int_0^{10} ((476145.84) * (X^{(6.778)}) * (\exp(-5.37 * X))) dx$$

$$E(X) = (0.00030936) * \int_0^{10} (X) * ((476145.84) * (X^{(6.778)}) * (\exp(-5.37 * X))) dx = 1.448$$

مقدار ۱/۴۴۸ دقیقاً با امید ریاضی تابع پیرسون خطی حوضه همخوانی دارد و این هماهنگی، اعتبار بسیار بالای تحلیل‌های گامایی را تأیید می‌کند. همچنین، این همخوانی نشان می‌دهد که استفاده از میانگین ساده گسسته، منجر به نتایج نادرست و غیرقابل اعتمادی در تفسیر ساختارهای تکتونیک خواهد شد.

در مرحله بعد، برای محاسبه انحراف معیار و ارزیابی پراکندگی فعالیت‌های مورفوتکتونیک، از رابطه زیر استفاده شد:

$$SMM = (0.00030936) * \int_0^{10} (X - 1.448)^2 * ((476145.84) * (X^{(6.778)}) * (\exp(-5.37 * X))) dx = 0.2697$$

$$STDEV.P = \sqrt{0.2697} = 0.519$$

انحراف معیار ۰/۵۱۹ نشان‌دهنده توزیع فعالیت‌های تکتونیک در محدوده متوسط تا شدید است. همچنین، این مقدار یکی از پایه‌های اصلی در محاسبه چولگی و کشیدگی ساختارهای مورفوتکتونیک حوضه است (روابط ۶ و ۷).

هرچه چولگی برداشت‌های مورفوتکتونیک حاصل از تحلیل فیوناچی در حوضه سفیدرود به صفر نزدیک‌تر باشد حوضه از نظر تکتونیک در حالت تعادل بیشتری می‌باشد. در تحلیل‌های آماری این تحقیق، مقدار چولگی از طریق گشتاور مرکزی مرتبه سوم محاسبه شد:

$$TMM = (0.00030936) * \int_0^{10} (X - 1.448)^3 * ((476145.84) * (X^{(6.778)}) * (\exp(-5.37 * X))) dx = 0.1004558$$

$$SK = \frac{0.1004558}{0.519^3} = 0.7171$$

این مقدار دقیقاً با مقدار چولگی محاسبه‌شده از رابطه استاندارد گاما ($\frac{2}{\sqrt{7.778}} = 0.7171$) همخوانی دارد، که مؤید دقت بالای محاسبات انجام‌شده است. مقدار چولگی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که توزیع فعالیت‌های مورفوتکتونیک حوضه دارای تمایل خفیف به سمت راست است، اما این عدم تقارن در محدوده قابل قبولی قرار دارد. بنابراین، حوضه سفیدرود از نظر تکتونیک در وضعیت تعادل نسبی قرار دارد و هیچ گرایشی به ناپایداری شدید در آن مشاهده نمی‌شود. این یافته به معنای این است که شاکله مورفیک حوضه به سمت عدم تعادل پیش نمی‌رود بلکه از ساختار نمائی حافظه‌دار $Y = \lambda e^{-\lambda X}$ تبعیت می‌نماید که توضیح آن در این پژوهش نمی‌گنجد. این وضعیت تعادلی در حوضه سفیدرود با نتایج مطالعات قبلی در مناطق مشابه، مانند تحقیقات والدرون و اسنیدر (Waldron & Snyder, 2020) و ناصف (Nassef, 2015) درباره الگوهای هندسی طبیعی سازگار است.

برای تخمین کشیدگی ساختار مورفوتکتونیک حوضه، از گشتاور چهارم حول میانگین استفاده شد:

$$FMM = (0.00030936) * \int_0^{10} (X - 1.448)^4 * ((476145.84) * (X^{(6.778)}) * (\exp(-5.37 * X))) dx = 0.274373$$

در حقیقت مقدار ۰/۲۷۴ گشتاور چهارم حول میانگین می‌باشد و جهت محاسبه کشیدگی حوضه این مقدار باید بر توان چهارم انحراف استاندارد حوضه که در بخش قبلی محاسبه شد تقسیم گردد. در نهایت در برآورد کشیدگی حوضه سفیدرود داریم که:

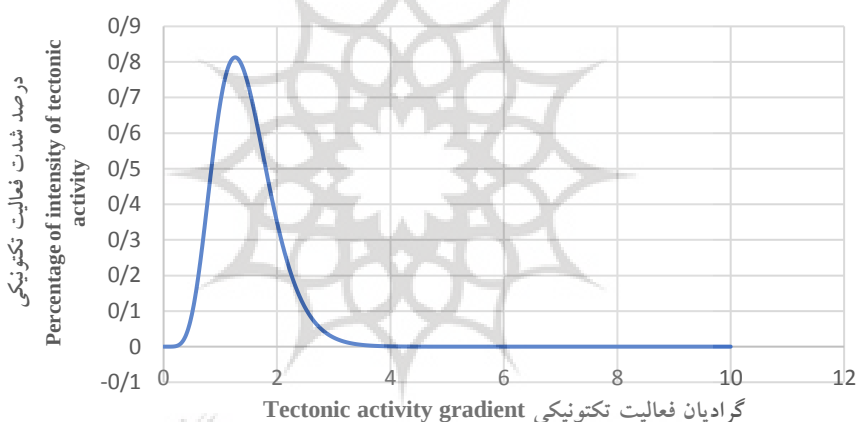
$$Kurtosis = \frac{FMM^4}{\sigma^4} = \frac{0.274373}{0.072555} = (3.782 - 3) = 0.782$$

بنابر کمیت محاسبه شده مذکور کشیدگی حوضه سفیدرود مزوکورتیک (۰/۷۸۲) می باشد یعنی حول کمیت صفر، و این نیز خود بیانگر عدم وجود ناعادلی در شاکله مورفولوژیک حوضه سفیدرود می باشد. مقدار کلاسیک کشیدگی گامائی در منابع (۶/β) محاسبه شده است که به طور اعجاب انگیزی در برآورد این مقدار برای حوضه ی ژئومورفیک سفیدرود داریم که:

$$\text{Kurtosis} = \frac{6}{\beta} = \frac{6}{7.7778} = 0.782$$

این مقدار با مقدار استاندارد گاما برابر است و برجسته می کند که توزیع فعالیت های مورفوتکتونیک دارای کشیدگی مزوکورتیک است. مقدار کشیدگی مزوکورتیک بیانگر تعادل نسبی و عدم وجود نوسانات شدید در ساختار حوضه است. در مقایسه با منحنی نرمال، این مقدار با الگوی کلاسیک تطبیق دارد و نشان دهنده فقدان نقاط بحرانی با فعالیت های غیرعادی است. همچنین، مقدار به دست آمده از چولگی و کشیدگی با همبستگی خطی بالا ($R=0.89$) تأیید می کند که حوضه تحت یک ساختار ارگودیک و سایبرنتیکی بلندمدت قرار دارد و رفتار آن از نوع نمایی حافظه دار ($Y=\lambda e^{-\lambda X}$) است.

در صورتی که شدت های مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود بر اساس داده های ژئومورفولوژیکی روی محور X و درصد گروه بندی شده بر اساس نسبت طلایی فیبوناچی روی محور Y رسم شوند، نمودار گامای حوضه از لحاظ شدت فعالیت های تکتونیک قابل تحلیل خواهد بود. تمام مشخصه های احتمالی تکتونیک حوضه در بخش های قبلی محاسبه شده اند و می توان آن ها را به صورت شهودی در نمودار شکل ۵ مشاهده کرد.

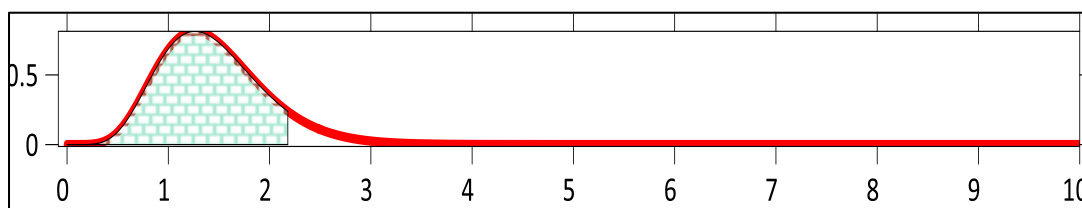


شکل ۵- نمودار گامای حوضه ی ژئومورفیک سفیدرود از لحاظ شدت فعالیت های تکتونیک

Fig. 5. PDF plot of the Sefidrood geomorphic basin gamma in terms of the intensity of tectonic activities

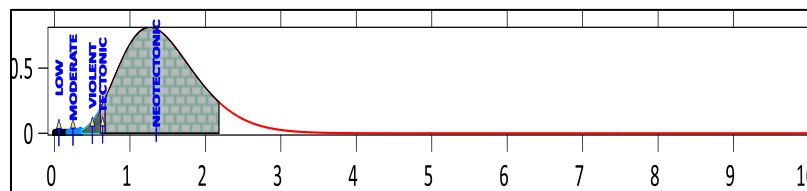
با توجه به تحلیل های انجام شده، دامنه تغییرات شدت فعالیت های مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود - بر اساس ساختار طلایی فیبوناچی - از ۰/۰۰۳ تا ۲/۱۸۵ واحد نسبت طلایی تعیین شد. این بازه در مقایسه با دامنه نظری توزیع گاما (که از صفر تا بی نهایت مثبت قابل تعریف است)، نشان دهنده عدم وجود نوسانات بسیار شدید در ساختار های تکتونیک حوضه است. لذا، می توان فرض کرد که حوضه از دوره تریاس تاکنون تحت فشار تکتونیک نسبتاً پایداری قرار داشته است. برای تجسم بهتر موقعیت ژئومتریک الگوهای فیبوناچی شدت تکتونیک در حوضه سفیدرود، نمودار شکل ۶ با کاهش بزرگنمایی عرضی ترسیم شد. این نمودار محدوده فعالیت های مورفوتکتونیک حوضه را به خوبی مجسم می کند و به عنوان یک ابزار تصویری درک عمیق تر از توزیع فضایی فعالیت های تکتونیک فراهم می کند.

شکل ۷ همچنین نمودار گامای کولموگروف شده پیرسون خطی حوضه سفیدرود را نشان می دهد. این نمودار از روی PDF گاما ترسیم شده است. در این بخش، تمرکز بر روی محدوده ضعیف فعالیت مورفوتکتونیک است.



شکل ۶- محدوده فعالیت‌های مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود با اغراق عرضی کمتر از شکل ۵

Fig. 6. The extent of morphotectonic activities of the Sefidroud basin with less lateral exaggeration than Fig. 5



شکل ۷- محدوده ترسیمی فیبوناچی مورفوتکتونیک ضعیف حوضه سفیدرود

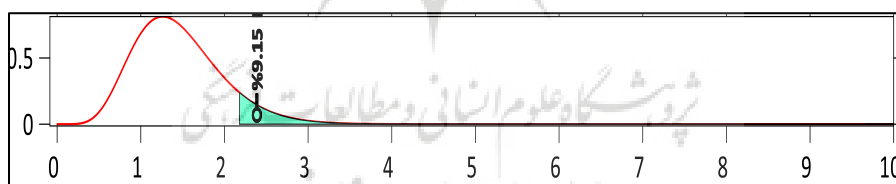
Fig. 7. Weak morphotectonic Fibonacci plot area of the Sefidroud basin

برای ارزیابی دقت و اعتبار نتایج برداشت‌های مورفوتکتونیک، میزان خطا در داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از توابع تجمعی گاما (CDF) محاسبه شد. این خطا از دو جهت (چپ و راست) بررسی شد:

$$p(x < 0.0003) = 0.00030936 \int_0^{0.0003} 4661145.84x^{6.778}e^{-5.37x} dx$$

$$p(x > 0.0003) = 0.00030936 \int_{2.185}^{\infty} 4661145.84x^{6.778}e^{-5.37x} dx$$

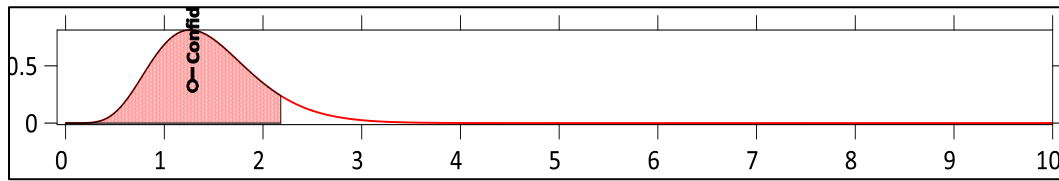
نتایج نشان دادند که مقدار خطای چپ منحنی تنها 3.88×10^{-12} درصد است، که در عمل قابل صرف‌نظر کردن است. این موضوع مؤید آن است که داده‌های مورفوتکتونیک در دنباله چپ منحنی با دقت بسیار بالایی بدون خطا استخراج شده‌اند (شکل ۸).



شکل ۸- نمودار شهودی میزان خطای داده‌های مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود

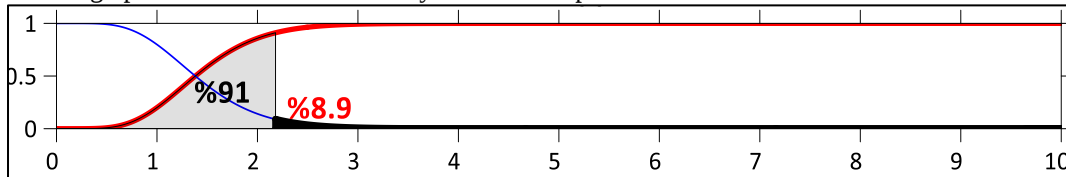
Fig. 8. Intuitive plot of the error rate of morphotectonic data of the Sefidroud basin

تحلیل‌های گامایی نشان دادند که دقت کلی برداشت‌ها حدود ۹۰/۸۵ درصد است. این مقدار از طریق محاسبه CDF و با توجه به محدوده داده‌ها به‌دست آمد. همچنین، در صورت ادامه‌دار بودن نمودار CDF به سمت دنباله راست منحنی (حداقل دقت)، خطای دوطرفه به‌صورت بالقوه بیش از ۸/۹ درصد می‌تواند رخ دهد. این خطا به‌عنوان یک فاصله اطمینان ۹۹ درصد در تحلیل‌های آماری مطرح شد. نتایج اعتبارسنجی، بیانگر دقت بالای روش‌های استفاده شده و قابلیت اعتماد مناسب نتایج است (شکل ۹ و ۱۰). در این تحقیق، تمام تحلیل‌های تجمعی در حیطه توزیع گاما انجام شد. نکته مهم این است که توزیع گاما از نوع توزیع‌های نمایی است و بنابراین، انتگرال‌گیری از آن باید به‌صورت معین و در بازه‌های مشخص انجام شود. همچنین، مشخص شد که CDF مثبت و منفی استخراج شده از روند فعالیت‌های مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود، نسبت به یکدیگر متمم هستند ($P(X < x) + P(X > x) = 1$). این رابطه نشان‌دهنده سازگاری کامل داده‌ها با ساختار آماری گامایی و همچنین عدم وجود انحرافات غیرمنطقی در داده‌ها است.



شکل ۹- کومولوگراف دقت برداشت یا فاصله اطمینان مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود

Fig. 9. Cumulograph of the extraction accuracy with the morphotectonic confidence interval of the Sefidrood basin



شکل ۱۰- کومولوگراف حداقل و حداکثر کمیت فعالیت مورفوتکتونیک حوضه سفیدرود

Fig. 10. Cumulogram of minimum and maximum quantity of morphotectonic activity of the Sefidrood basin

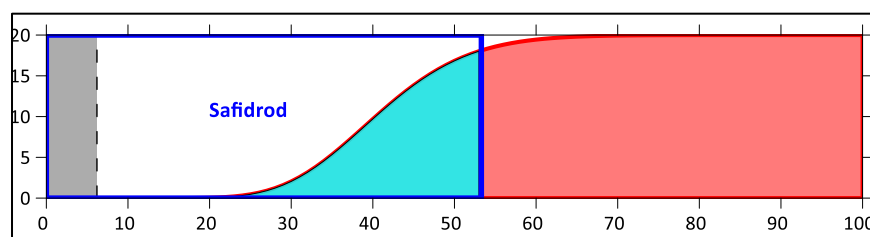
میزان وابستگی زیرحوضه‌ها به حوضه اصلی (تحلیل کای دو)

پس از تأیید تعادل دینامیکی حوضه سفیدرود با استفاده از توزیع گاما، لازم بود رابطه وابستگی هر زیرحوضه به حوضه اصلی از طریق روش‌های آماری استنباطی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور، از آزمون کای دو استفاده شد. در این پژوهش، مقایسه جبر احتمالاتی گشتاور دوم حول میانگین (M_2) بین زیرحوضه‌ها و حوضه اصلی نشان داد که:

$$\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1)$$

S^2 واریانس (گشتاور دوم حول میانگین) زیرحوضه، $\sigma^2=0.27$ گشتاور دوم حول میانگین حوضه اصلی و n تعداد نقاط برداشت شده در هر زیرحوضه است. این آزمون امکان استنتاج آماری درباره وابستگی یا استقلال زیرحوضه‌ها به حوضه اصلی را فراهم کرد. تحلیل کای دو نشان داد که اکثر زیرحوضه‌ها از نظر فعالیت‌های مورفوتکتونیک مستقل از حوضه اصلی هستند. مقادیر محاسبه شده χ^2 برای زیرحوضه‌ها بین $6/2$ تا 53 متغیر بودند، که نشان‌دهنده وجود تفاوت معنادار در نحوه توزیع فعالیت‌های تکتونیک و نفوتکتونیک در مقایسه با حوضه اصلی است. در نمودار شکل ۱۱، توزیع CDF و PDF کای دو به صورت شهودی نمایش داده شده است. محور افقی این نمودار بازه عددی ضریب کای دو (0 تا $6/2$) و محور عمودی تابع چگالی و تجمعی احتمال است. این نمودار برجسته می‌کند که تنها زیرحوضه سفیدرود با مقدار $\chi^2=53$ در سطح معناداری 99% قرار دارد و بنابراین، رابطه سیستمی معناداری با حوضه اصلی دارد. در مقابل، زیرحوضه رودشور در خارج از این ساختار واقع شده و فاقد هرگونه همبستگی آماری یا سیستمی با حوضه مادر است. این موضوع در سمت چپ نمودار با ناحیه خاکستری خط‌چین‌دار مشخص شده است.

این یافته، برجسته می‌کند که آن‌ها تحت تأثیر یک سیستم سایبرنتیکی منسجم و حافظه‌دار منفی قرار دارند که به سمت سطح اساس (دریای خزر) در حال تنظیم است. این ترکیب از استقلال ساختاری و هماهنگی سیستمی یکی از یافته‌های کلیدی این مطالعه است. این پدیده به ما کمک می‌کند تا بفهمیم چگونه یک حوضه با ساختارهای پیچیده تکتونیک می‌تواند هم در سطوح محلی مستقل عمل کند و هم در چارچوب یک سیستم کلان منسجم باشد. در مقابل، تشابه ساختاری و هماهنگی سیستمی بین زیرحوضه‌ها (با نسبت فیشر بین $4/4$ تا $5/5$) نیز برجسته می‌کند که هر زیرحوضه در یک ساختار ارگودیک کلان عمل می‌کند. این پدیده یکی از مواردی است که تاکنون به خوبی در مطالعات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. این یافته می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات بیشتر درباره ارتباط بین سیستم‌های زیرحوضه‌ای و ساختارهای تکتونیک کلان شود.



شکل ۱۱- نمودار CDF کای دو - مقایسه گشتاور دوم حول میانگین تمام زیرحوضه‌ها با حوضه اصلی

Fig. 11. Chi-square CDF plot comparing the second moment around the mean of all subbasins with the main basin

با توجه به یافته‌های فوق، می‌توان گفت: ۱- حوضه سفیدرود در یک ساختار ارگودیک بلندمدت تحت تأثیر یک سیستم سایبرنتیکی واحد قرار دارد. ۲- با این حال، زیرحوضه‌ها به‌طور کلی از نظر فعالیت‌های مورفوتکتونیک مستقل هستند و هر کدام تحت تأثیر عوامل محلی خاص خود عمل می‌کنند. ۳- تنها زیرحوضه سفیدرود با داشتن نسبت گشتاور دوم حول میانگین برابر با ۵۴/۳۶، در محدوده استنباط آماری کای دو قرار داشته و در تعامل سیستمی با حوضه اصلی است. ۴- زیرحوضه رودشور در سمت چپ نمودار و در ناحیه خاکستری خط‌چین‌دار قرار دارد که بیانگر عدم وجود هیچ گونه اشتراک سیستمی با حوضه اصلی است. این استقلال نسبی زیرحوضه‌ها در کنار وجود یک ساختار ارگودیک کلان، نشان‌دهنده دوگانگی مهم در نحوه تحول مورفوتکتونیک حوضه است: ۱- مستقل بودن زیرحوضه‌ها از منظر فعالیت محلی و ۲- وابستگی کلی آن‌ها به یک الگوی سایبرنتیکی مشترک.

در شکل ۱۱، تمام زیرحوضه‌های حوضه سفیدرود در محور طولی (X) و با توجه به مقدار χ^2 به‌صورت گرافیکی قابل مقایسه هستند. این مقایسه نشان می‌دهد: ۱- اگر نسبت گشتاور دوم حول میانگین زیرحوضه‌ها تا مقدار ۵۵ روی محور X قرار می‌گرفت، وضعیت مورفوتکتونیک آن‌ها با حوضه اصلی کاملاً مشابه می‌شد. ۲- اما با توجه به موقعیت واقعی آن‌ها، هر زیرحوضه دارای الگوی فعالیت تکتونیک منحصر به فردی است.

این یافته‌ها اهمیت رویکرد منطقه‌محور در مدیریت خطرات طبیعی و برنامه‌ریزی شهری و زیرساختی را برجسته می‌کنند، زیرا هر زیرحوضه ممکن است نیازمند رویکردی متفاوت در مطالعات بعدی باشد.

استقلال یا وابستگی زیرحوضه‌ها با تحلیل فیشر

در این قسمت، به منظور بررسی رابطه آماری بین زیرحوضه مورفوتکتونیک زنجانرود و دیگر زیرحوضه‌های حوضه ژئومورفولوژیکی سفیدرود، از روش تحلیل توزیع فیشر استفاده شده است. این روش کاربرد گسترده‌ای در مقایسه واریانس‌های دو جامعه دارد و در این پژوهش، به عنوان شاخصی برای استقلال یا وابستگی ساختارهای مورفوتکتونیک میان زیرحوضه زنجانرود و سایر زیرحوضه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به اینکه کمیت‌های مورفوتکتونیک استخراج‌شده از ساختار نسبت طلایی فیبوناچی دارای ماهیت پیوسته هستند، استفاده از روش‌های گامایی و فیشر ضروری است. در مقابل، در صورت گسسته بودن داده‌ها، می‌توان از روش‌های متداول‌تری مانند واریانس نمونه‌ای استفاده کرد.

داده‌های مورد نیاز شامل مختصات UTM، ارتفاعات و شاخص‌های مورفوتکتونیک (TEC) استخراج‌شده از ساختار فیبوناچی است. این داده‌ها در مرحله بعدی تحت تحلیل‌های آماری و با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و محاسبه گشتاورهای حول میانگین قرار گرفتند.

محاسبه تابع CDF پیرسون خطی برای زیرحوضه زنجانرود

در این مرحله، با استفاده از داده‌های شاخص مورفوتکتونیک زیرحوضه زنجانرود، تابع CDF پیرسون خطی محاسبه شد. این رابطه، به صورت زیر است:

$$B = ((34 * 232) - (595^2)) / ((34 * 4.027) - (10.1391^2)) = 54.36$$

$$a = (((595) - (54.36 * 10.13)) / 34) = 1.287$$

بنابراین، معادله خط رگرسیون به صورت $Y = 54.36X + 1.288$ خواهد بود؛ که در آن Y معادل PDF و در نهایت CDF و X متغیر شاخص مورفوتکتونیک زیرحوضه زنجانرود است. این رابطه نشان‌دهنده همبستگی بالای خطی (۰/۹۵۲) بین داده‌های مورفوتکتونیک زیرحوضه زنجانرود است که اعتبار ساختار آماری را تأیید می‌کند.

ارگودیک‌سازی PDF و محاسبه امید ریاضی

پس از محاسبه تابع رگرسیون خطی، اقدام به چگال‌سازی و انتگرال‌گیری از تابع فوق شد.

$$f(X) = \int_{0.147}^{0.808} (54.36X + 1.288) dx = 18.748$$

در ادامه، PDF به صورت زیر نرمال‌سازی شد:

$$fX(x) = PDF = \left(\frac{1}{18.748} \right) * \int_{0.147}^{0.808} (54.36X + 1.288) dx = 1$$

و امید ریاضی ($E(X)$) برای زیرحوضه زنجانرود به صورت زیر محاسبه شد:

$$E(X) = \int_{0.147}^{0.808} (x) * (2.9X + 0.0687) dx = 0.532$$

این مقدار برابر با گشتاور اول زیرحوضه زنجانرود است. با توجه به پیوسته بودن داده‌ها، این مقدار در مقایسه با روش‌های گسسته (مانند میانگین)، دقت بالاتری دارد.

محاسبه گشتاور دوم حول میانگین و انحراف استاندارد

در این بخش، گشتاور دوم حول میانگین زیرحوضه زنجانرود به صورت زیر محاسبه شد:

$$E(X^2) = \int_{0.147}^{0.808} (x - 0.532)^2 * (2.9X + 0.0687) dx = 0.0379$$

این مقدار هم ارز واریانس در یک توزیع گسسته است. بنابراین، انحراف معیار نیز به صورت زیر محاسبه گردید:

$$STDEV.P = \sqrt{0.0379} = 0.194$$

این مقادیر، به عنوان ورودی‌های اصلی در تحلیل فیشر مورد استفاده قرار گرفتند.

تحلیل فیشر و مقایسه زیرحوضه‌ها

در این مرحله، برای مقایسه زیرحوضه زنجانرود با دیگر زیرحوضه‌های حوضه سفیدرود، از توزیع فیشر استفاده شد. این توزیع بر اساس نسبت واریانس‌های دو جامعه ($F = \frac{\sigma^2}{S^2}$) محاسبه می‌شود.

که در آن $\sigma^2 = 0.397$ گشتاور دوم حول میانگین زیرحوضه زنجانرود و S^2 گشتاور دوم حول میانگین هر زیرحوضه است. این تحلیل به ما کمک می‌کند تا بفهمیم: ۱- آیا دو زیرحوضه تحت یک ساختار سیستمی واحد عمل می‌کنند؟ ۲- آیا تفاوت‌های موجود در سطح معنایی قابل قبول هستند؟

آزمون فرض آماری با استفاده از توزیع F

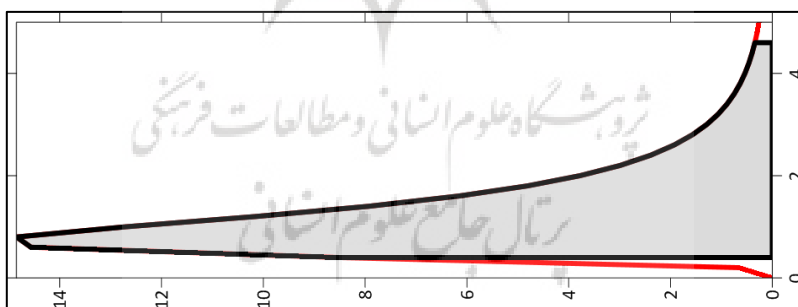
دو فرض آماری $H_0: \sigma^2 = F$ و $H_1: \sigma^2 \neq F$ در این تحقیق مطرح شد. در صورتی که نسبت فیشر محاسبه شده در فاصله اطمینان ۹۵ درصد قرار گیرد، فرض H_0 مورد قبول واقع می شود و این برجسته می گردد که دو زیرحوضه تحت یک ساختار ساینرنتیکی مشترک عمل می کنند. در غیر این صورت، فرض H_1 مورد تأیید قرار می گیرد و نشان دهنده استقلال ساختاری دو زیرحوضه است. تحلیل فیشر بر روی زوج های زیرحوضه زنجانرود و دیگر زیرحوضه ها (مانند رودشور و حلب) انجام شد. در این راستا، جدول ۱ شامل نسبت های فیشر، گشتاورها، درصد توزیع PDF و CDF تهیه شد.

جدول ۱- نتایج تحلیل فیشر بین زیرحوضه زنجانرود و سایر زیرحوضه ها

Table 1- Results of Fisher analysis between Zanjanroud subbasin and other subbasins

وضعیت آماری Statistical situation	%CDF	درجه آزادی (Df) Degree of freedom	نسبت فیشر (F) Fisher ratio	گشتاور دوم حول میانگین The second moment around the mean	زیرحوضه Sub basin
حوضه مادر Main basin	—	34	—	0.0397	زنجانرود Zanjanroud
وابسته Dependent	99.1	6	4.4	0.0086	حلب Halab
وابسته Dependent	98.7	10	4.1	0.0091	دیواندره Divandareh
مستقل Independent	91.3	12	6.2	0.0062	رودشور Rode-shor

در شکل ۱۲، نمودار توزیع فیشر با درجه آزادی $k=6$ برای زیرحوضه حلب و $l=34$ برای زیرحوضه زنجانرود نمایش داده شد. در این نمودار محور افقی (۰-۴) نسبت گشتاور دوم حول میانگین (F) و محور عمودی (۰-۱۴) درصد تجمعی CDF و PDF است (چرخش نمودار). نتایج نشان دادند که نسبت فیشر محاسبه شده برای زیرحوضه های زنجانرود و حلب برابر با ۴/۴ است. این مقدار در سطح اطمینان ۹۹ درصد قرار داشته و نشان دهنده وابستگی سیستمی بین این دو زیرحوضه است.



شکل ۱۲- نمودار توزیع فیشر برای زیرحوضه حلب و زیرحوضه زنجانرود

Fig. 12. Fisher distribution plot for Halab subbasin and Zanjanrud subbasin

در توزیع فیشر، مقدار کلی PDF به صورت زیر محاسبه شد:

$$fX(x) = PDF = \left(\frac{1}{18.748} \right) * \int_{0.147}^{0.808} (54.36X + 1.288) dx = 1$$

که در آن k و l درجه آزادی زیرحوضه های مقایسه شده، برای نمونه برای زنجانرود و حلب به ترتیب ۶ و ۳۴ برآورد گردید و Γ تابع گاما است. نتایج نشان دادند که ۱- تمام زیرحوضه ها در فاصله اطمینان ۹۹ درصد قرار دارند. ۲- این موضوع بیانگر تشابه ساختاری و تعامل سیستمی بین زیرحوضه زنجانرود و دیگر زیرحوضه ها است.

این موضوع نشان می‌دهد که زیرحوضه زنجانرود و حلب تحت تأثیر یک ساختار سایبرنتیکی واحد قرار دارند و الگوی تکتونیکی آن‌ها مشابه است. در مقابل، زیرحوضه رودشور در ناحیه خاکستری خطچین‌دار و در سمت چپ نمودار واقع شد و فاقد هرگونه همبستگی سیستمی با زیرحوضه زنجانرود بود.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از تحلیل‌های گامایی، روش‌های فیبوناچی و آمارهای پیشرفته‌ی ساختاری، به بررسی وضعیت مورفوتکتونیکی و نئوتکتونیکی حوضه سفیدرود در شمال‌غرب ایران پرداخت. نتایج این پژوهش، علاوه بر تأیید تعادل دینامیکی عمومی حوضه، امکان شناسایی الگوهای منظم و قابل پیش‌بینی در فعالیت‌های زمین‌ساختی و هندسه طبیعی را فراهم کرد. این رویکرد جامع، اولین بار در این حوضه و با استفاده از تلفیق الگوهای ریاضی - آماری با داده‌های ژئومورفولوژیکی انجام شده است. تحلیل‌های گاما، چولگی و کشیدگی داده‌ها نشان دادند که حوضه سفیدرود در حالت تعادل دینامیکی قرار دارد. این نتایج نشان می‌دهد که توزیع فعالیت‌های مورفوتکتونیکی در حوضه بدون نوسانات شدید و ناپایداری‌های ساختاری است. بنابراین، حوضه در معرض تحولات سریع و خطرناک تکتونیکی نیست و بیشتر منطقه تحت فشارهای بلندمدت و متوازن قرار دارد. تحلیل کای دو نشان داد که زیرحوضه‌های حوضه سفیدرود از نظر فعالیت‌های مورفوتکتونیکی مستقل هستند. مقادیر χ^2 برای زیرحوضه‌ها بین ۶/۲ تا ۵۳ متغیر بودند، که برجسته می‌کند هر زیرحوضه تحت تأثیر عوامل محلی خاص خود قرار دارد و نمی‌توان الگوی واحدی را برای تمامی آن‌ها در نظر گرفت. نکته کلیدی این نتیجه، شناسایی ترکیب منحصربه‌فردی از استقلال ساختاری و هماهنگی سیستمی در زیرحوضه‌هاست. آزمون‌های آماری کای دو و فیشر نشان دادند که اگرچه زیرحوضه‌ها از نظر فعالیت مورفوتکتونیکی مستقل عمل می‌کنند، اما تمام آن‌ها در فاصله اطمینان ۹۹٪ قرار دارند و تحت تأثیر یک ساختار ارگودیک کلان و سایبرنتیکی مشترک هستند. این پدیده که در مطالعات پیشین به‌ندرت مورد توجه قرار گرفته نشان می‌دهد که حوضه‌های درون‌کوهی می‌توانند همزمان هم محلی و هم منسجم باشند، یک مفهوم که با نظریه‌های ترنر (Turner, 1999) درباره هندسه فضایی دنباله فیبوناچی هم‌خوانی دارد. نتایج اعتبارسنجی با فاصله اطمینان ۹۰/۸۵٪ و خطای دوطرفه کمتر از ۸/۹٪، دقت بالا و قابلیت اعتماد مناسب روش‌های به‌کاررفته را تأیید می‌کند. این مطالعه نه تنها از کاربرد نوین الگوهای فیبوناچی و توزیع گاما در تحلیل مورفوتکتونیکی دستاورد، بلکه چارچوبی کمی و قابل تعمیم برای درک پویایی حوضه‌های درون‌کوهی در مناطق فعال تکتونیکی ارائه می‌دهد. یکی از مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق، محدودیت فعالیت‌های نئوتکتونیکی در حوضه سفیدرود است. فقط ۴ درصد از حوضه، در محدوده نئوتکتونیک قرار دارد. این محدودیت فعالیت‌های نئوتکتونیکی به ما کمک می‌کند تا مناطق بالقوه خطرناک را شناسایی کنیم و برنامه‌ریزی‌های عمرانی و محیطی را به‌صورت منطقه‌محور و غیرسراسری انجام دهیم. تحلیل‌های آماری و هندسی نشان دادند که حوضه سفیدرود تحت تسلط یک سیستم ارگودیک و سایبرنتیکی قرار دارد. این ساختار ارگودیک بیانگر تعادل بلندمدت و پایداری ساختاری است که در آن فعالیت‌های تکتونیکی به‌طور خودبه‌خودی به سمت یک وضعیت تعادلی حرکت می‌کنند. این سیستم به عنوان یک ساز و کار خودتنظیم‌کننده عمل می‌کند که می‌تواند درک عمیق‌تری از نحوه تحول ساختارهای زمین‌ساختی فراهم کند. این یافته نشان می‌دهد که حوضه سفیدرود، علی‌رغم پیچیدگی‌های زمین‌ساختی، در مجموعه‌ای از قوانین هندسی و آماری عمیق قرار دارد که می‌تواند در مدل‌سازی ساختاری و پیش‌بینی خطرات بلندمدت کاربرد داشته باشد.

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., & Mouthereau, F. (2005). Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3), 401–419. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4>
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., & Ashi, M. (2003). Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25(5), 659–672. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00064-0)
- Asadpour, A. (2018). Recovering the spatial structure and planting plan of Sa'ad al-Jang garden in Shiraz based on Trens Odanell's memories [Spatial analysis of historical gardens]. *Journal of Warm and Arid Architecture*, 7, 23–42. [In Persian] <https://doi.org/10.29252/ahdc.2018.1421>
- Berberian, M. (1983). The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(2), 163–183. <https://doi.org/10.1139/e83-015>
- Berberian, M. (1995). Master “blind” thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241(3-4), 193–224. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00185-C](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C)
- Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a Paleogeography and Tectonic Evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Bililan, L., & Hassanpour Lamr, S. (2019). Geometric patterns and golden proportions: A common language of architecture and art in the historical village of Abyaneh. *Journal of Warm and Arid Architecture*, 9, 45–68. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453711.1398.7.9.3.2>
- Doglioni, C. (1990). The global tectonic pattern. *Journal of Geodynamics*, 12(1), 21–38. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(90\)90022-M](https://doi.org/10.1016/0264-3707(90)90022-M)
- Feizolahbeigi, A., Lourenço, P. B., Golabchi, M., Ortega, J., & Rezazadeh, M. (2021). Discussion of the role of geometry, proportion and construction techniques in the seismic behavior of 16th to 18th century bulbous discontinuous double shell domes in central Iran. *Journal of Building Engineering*, 33, 101575. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101575>
- Guest, B., Horton, B. K., Axen, G. J., Hassanzadeh, J., & McIntosh, W. C. (2007). Middle to late Cenozoic basin evolution in the western Alborz Mountains: Implications for the onset of collisional deformation in northern Iran. *Tectonics*, 26(6). <https://doi.org/10.1029/2006TC002091>
- Hashemi Zarjabad, H., Ziaieniya, M. H., & Ghorbani, H. R. (2015). Revisiting the Analysis of Geometrical Principles and Golden Proportions in Shokatieh School. *Iranian Journal of Archaeological Studies*, 5(9), 207–222. [In Persian] https://journals.basu.ac.ir/article_1296.html
- Kalman, D., & Mena, R. (2003). The Fibonacci numbers—exposed. *Mathematics Magazine*, 76(3), 167–181. <https://doi.org/10.1080/0025570X.2003.11953176>
- Khattab, M. A., Radwan, A. E., El-Anbaawy, M. I., Mansour, M. H., & El-Tehiwy, A. A. (2023). Three-dimensional structural modelling of structurally complex hydrocarbon reservoir in October Oil Field, Gulf of Suez, Egypt. *Geological Journal*, 58(11), 4146–4164. <https://doi.org/10.1002/gj.4748>
- Makar, K., & Rubin, A. (2017). Learning about statistical inference. *International Handbook of Research in Statistics Education*, 261–294. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66195-7_8
- Marples, C. R., & Williams, P. M. (2022). The golden ratio in nature: A tour across length scales. *Symmetry*, 14(10), 2059. <https://doi.org/10.3390/sym14102059>
- Mehrnia, S. R. (2017). Identifying Spatial Patterns of Earthquakes in Western Iran Using the Fibonacci Method. *Environmental Risk Management Journal*, 4(3), 215–229. [In Persian] https://journals.ut.ac.ir/article_64799.html

- Memarzadeh, R., Hosseinzadeh Lotfi, F., Jahanshahlu, L., & Dehqan Toranposhti, A. (2022). Ranking Fire Stations Using Fibonacci sequence Technique: Case Study—District 10, Tehran. *Operations Research in Engineering Applications (Applied Mathematics)*, 19(72), 99-122. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.52547/jamlu.19.1.99>
- Mohajjel, M., & Fergusson, C. L. (2014). Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3), 263-287. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- Nassef, A. S. E. (2015). Fibonacci sequence and golden ratio in new formula of predicting cracks propagation in reinforced concrete tie. *International Journal of Damage Mechanics*, 24(8), 1214-1226. <https://doi.org/10.1002/suco.201300077>
- Radfar, A., Chakdel, A. R., Nejati, A., Soleimani, M., & Taati, F. (2019). New insights into the structure of the South Caspian Basin from seismic reflection data, Gorgan Plain, Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 108, 379-402. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1659-x>
- Salehipoor Milani, A., Yamani, M., Moghimi, E., Lak, R., Jafarbigloo, M., & Mohamadi, A. (2018). Effect of The Urmia Lake level fluctuations Based on lake terraces sediments characteristics. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(1), 1-20. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1396.6.1.1.8>
- Scholz, C. H., & Aviles, C. A. (1986). The fractal geometry of faults and faulting. *Earthquake Source Mechanics*, 37, 147-155. <https://doi.org/10.1029/GM037p0147>
- Scholz, C. H., Dawers, N. H., Yu, J. Z., Anders, M. H., & Cowie, P. A. (1993). Fault growth and fault scaling laws: Preliminary results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B12), 21951-21961. <https://doi.org/10.1029/93JB01008>
- Sharma, V. (2009). Deterministic chaos and fractal complexity in the dynamics of cardiovascular behavior: perspectives on a new frontier. *The Open Cardiovascular Medicine Journal*, 3, 110. <https://doi.org/10.2174/1874192400903010110>
- Stepanov, P. Y., & Gomanyuk, J. A. (2023). Mathematical modeling of seismic wave kinematics in complex media. *Moscow University Geology Bulletin*, 78(1), 167-179. <https://doi.org/10.3103/S0145875223010179>
- Tiwari, J., Goswami, P. K., & Bhakuni, S. S. (2021). Pattern of active crustal deformation in a part of a lesser Himalayan Tectonic Window, Himachal Pradesh, India. *Quaternary International*, 592, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.043>
- Turner, J. C. (1999). On Vector Sequence Recurrence Equations in Fibonacci Vector Geometry. In *Applications of Fibonacci Numbers: Volume 8* (pp. 353-368). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4271-7_32
- Turner, J. C., & Shannon, A. G. (1998). Introduction to a Fibonacci geometry. In *Applications of Fibonacci Numbers: Volume 7* (pp. 435-448). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5020-0_48
- Waldron, J., & Snyder, M. (2020). Geological Structures: A practical introduction. <https://doi.org/10.7939/r3-x15j-kd13>
- Yin, A. (2010). Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488(1-4), 293-325. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.002>
- Yin, A., & Harrison, T. M. (2000). Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1), 211-280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Ziaieniya, M. H., & Hashemi Zarjabad, H. (2016). The Golden Proportion and System of Islamic– Iranian proportions in Qaen Mosque. *Journal of Maremat & Memari-e Iran*, 6(11), 89-100. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453850.1395.6.11.7.0>