



## Research Article

# Geomorphic landscape evolution analysis within the Makran accretionary prism, SE Iran

Reza Mansouri\* 

Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Received: 08 Aug 2025 Accepted: 20 Sep 2025

## Extended Abstract

### Introduction

Earth's surface landforms and geomorphological landscapes are constantly evolving. Geomorphic systems are complex, leading to uncertainties in our understanding of their state. Thus, the ability to measure variables is crucial for geomorphologists. Therefore, the main goal of scientific explanation in the science of geomorphology is the ability to measure the processes and environmental factors that affect the evolution of the Earth's landscapes and landforms. As Mansouri et al. (2023) noted, quantitative methods in geomorphology are important because they offer tools to accurately and efficiently quantify interactions between landforms and related processes, enabling more effective description and interpretation. Tectonic geomorphology studies the interplay between tectonic forces and surface processes that sculpt Earth's landscapes, particularly in active deformation zones. Quantitative topographic analysis is valuable for measuring landforms and geomorphological landscapes because tectonic activity significantly shapes the Earth's topography. In earth sciences, including geomorphology, digital elevation models are commonly used to extract and evaluate topographic swath profiles, providing insights into surface conditions and roughness. Geoscientists commonly employ topographic and drainage network analyses in tectonic geomorphology (Pérez-Peña et al, 2009a; 2009b; 2010; Kirby and Whipple, 2012; Giaconia et al, 2012; Royden and Perron, 2013; Willet et al, 2014; Pérez-Peña et al, 2017). Specifically, topographic swath profiles are used to analyze these patterns, revealing landscape elements and tectonic influences (Molin et al, 2004; 2012; Andreani et al, 2014; Scotti et al, 2014; Azañon et al, 2015). Swath profiles analysis is most widely used in tectonic geomorphology. Numerical evaluation of tectonic uplift or subsidence, detection of fault location, explanation of river capture and antecedent valley formation, as well as testing of geophysical models, are among the most common applications. The present-day great availability of high-resolution Digital Elevation Models has improved tectonic geomorphology analysis in its methodological aspects and geological meaning. Today, it has been proven that swath profile analysis has proved to be useful in the study of large orogens to evaluate the effects of vertical surface movements, as well as in the investigation of fluvially or glacially sculpted topography. One of the main applications of topographic swath profiles is morphological and morphotectonic analysis of various landscapes on the Earth's surface to explore the short and long-term landscape response to tectonic activity and climate changes. Most of the morphometric analyses are conducted in GIS software, which has become a standard tool for analyzing drainage network metrics.

### Materials and Methods

To investigate the long-term evolution of the landscape within the Iranian part of the Makran Accretionary Prism, with a particular focus on the interaction between active tectonic processes and the erosional impact of deep river incision, we employed the SwathProfiler plugin.

**Citation:** Mansouri, R., 2026. Geomorphic landscape evolution analysis within the Makran accretionary prism, SE Iran, *Res. Earth. Sci.* 16(4), (116-147) DOI: 10.48308/esrj.2025.106256

\* Corresponding author E-mail address: [Rezamansouri@gep.usb.ac.ir](mailto:Rezamansouri@gep.usb.ac.ir)



This methodology allowed us to generate topographic swath profiles, providing a detailed representation of the landscape's morphology. A key advantage of this approach, as originally described by Pérez-Peña et al. (2017), lies in its streamlined and automated execution. The entire workflow is designed to be readily implemented using digital elevation models (DEMs) data within the widely used ArcGIS software environment, ensuring efficient data processing and analysis. The ease of use and automation significantly reduce the time and effort required for generating swath profiles, making it a valuable tool for large-scale landscape studies. Furthermore, to complement the topographic analysis, we integrated both topographic and geological datasets. Topographic information was extracted from topographic maps at scales of 1:250,000 and 1:50,000, providing a range of spatial resolutions for detailed and regional analysis. Geological data, crucial for understanding the underlying structural controls on landscape evolution, were derived from geological maps at scales of 1:100,000 and 1:250,000. The integration of these diverse datasets, encompassing topographic and geological information at multiple scales, allowed for a comprehensive assessment of the factors influencing the long-term landscape development of the Makran Accretionary Prism. The combination of the SwathProfiler plugin's efficient processing capabilities with the availability of detailed topographic and geological data enabled a robust and insightful investigation into the complex interplay of tectonic and fluvial processes shaping this dynamic region. The SwathProfiler minimizes the time and the calculation process to extract swath and longitudinal river profiles. They also allow the extraction of key information from profiles that may help in their interpretation and analysis. Swath profiles can be examined statistically to extract maximum, minimum, and mean topographic elevation for each transect. Mean elevation is a good approximation to the general topographic trend of the landscape within the swath profile band, whereas maximum and minimum elevation can inform about landscape variations in the direction perpendicular to the swath profile. Moreover, other parameters as local relief (maximum elevation - minimum elevation) or quartile (Q1 - Q3), can also describe topographic variations along the swath. Generally, stable areas, such as basins or plateaus with low-to-moderate incision, will yield low values of local relief and swath profiles where all lines will merge. Conversely, high local relief and wider variations of swath profiles will be characteristics of mountain ranges or highly dissected landscapes exposed to high incision and/or uplifting (Pérez-Peña et al, 2017).

## Results and Discussion

In general, the longitudinal topographic profiles show remarkable features. Generally, the results indicate substantial variations in both longitudinal and transverse profiles, with a significant degree of oscillation observed in their respective values (maximum elevation (0-2200 m), minimum (0-1500), mean (0-1680), Q1 (0-1610), Q3 (0-1850), local relief (0-1550) and  $THi^*$  (0-0.8)). All longitudinal profiles have recorded a very high percentage of relief, which indicates the presence of a rugged mountainous landscape along the main direction of the Makran belt. Additionally, by carefully examining these profiles, we can observe a type of topographic asymmetry in the path of the profiles, except for the diagram related to the inner Makran, which somehow displays a state of relative topographic symmetry. Overall, a general examination of the longitudinal profiles shows that in the outer and inner Makran subzones the topographic situation is relatively compact; however, in northern and coastal Makran, the level of compression and density of relief is reduced in favor of the expansion of low and low-lying surfaces (corresponding to the unit of wide valleys, plains). However, the northern Makran highlands still have a higher relative density than coastal Makran. On the other hand, the transverse topographic profiles also show very interesting features and differences in the topographic situation of the region. Generally, all profiles perpendicular to Makran are asymmetrical. The main reason for their asymmetry is the effect of the action of the main faults and thrusts in the region (including: Chahkhan, Ghasr-e Ghand, Bashagard, and Bampour thrusts). Therefore, as these profiles show, it is easy to observe the Makran subzones and their boundaries. Overall, the findings show that all longitudinal and transverse profiles recorded high changes in their values. In other words, in most profiles, the local relief curve has high variability and values. Also, the values of the enhanced transverse Hypsometric Integral index ( $THi^*$ ) show high variations. Thus, the highest and lowest  $THi^*$  values were recorded in the North Makran longitudinal profile (affected by the Minab Thrust) and Outer Makran longitudinal profile, respectively, as well as in transverse profiles 1, 2, and 4. In addition, in significant parts of the longitudinal and transverse profiles, it was observed that the profile of the mean elevation moved away from the minimum and, along with the third quartile curve, approached the maximum. Overall, the findings of this study demonstrated that higher values (close to 1) of the  $THi^*$  index, along with the mean elevation curve and the third quartile closing the maximum in many areas, indicate the existence of a young landscape and a transient state of adjustment to higher uplift rates. Overall, the results indicate a strong correlation between the first quartile parameter and both the mean and minimum elevation, with a confidence level of 99%. Pearson's


correlation coefficient ( $r$ ) values for the first quartile were 0.997 with mean elevation and 0.993 with minimum elevation. On the other hand, the results also demonstrate a robust correlation between the mean and minimum height parameters (Table 4). Positive values between these parameters indicate a positive and additive effect between them. Furthermore, strong relationships and correlations are evident between the Q3 and the mean, the Q1 and Q3, the Q3 and the maximum elevation, and the Q3 and the minimum elevation, all at a 95% confidence interval (Table 5).

### **Conclusion**

The topographic analysis conducted in this study, characterized by its rapid execution, has demonstrated the considerable potential for employing topographic swath profiles. This method proves both useful and practical when examining the relief characteristics of mountainous regions, especially when such analyses are performed over a regional extent. The study highlights the value of topographic swath profiles as a powerful tool for understanding and quantifying the complex surface variations inherent in mountainous landscapes. By employing this approach, researchers and practitioners can gain valuable insights into the geomorphological features and processes that shape these areas. Therefore, the application of topographic swath profiles offers a valuable and efficient means of analyzing the relief of mountainous terrains at a regional scale, highlighting its applicability in various geomorphological studies and environmental assessments. The SwathProfiler extension within the ArcGIS software provides a streamlined approach to conducting sophisticated topographic analyses. This tool is designed to facilitate rapid and efficient processing, making it particularly useful for geomorphological and morphotectonic investigations that cover extensive geographic areas. Specifically, its capabilities are optimized for landscape studies conducted at a regional scale, allowing researchers and analysts to easily perform advanced analyses of topographic data. By employing the SwathProfiler extension, ArcGIS users can readily extract valuable insights from topographic information, leading to a more comprehensive understanding of landscape evolution and tectonic processes across broad regions. The creation and subsequent analysis of topographic swath profiles within the Iranian section of the Makran prism proved valuable in discerning and elucidating regional topographic characteristics. This process, utilizing a digital elevation model as its primary data source, facilitated the consideration of both internal tectonic processes and external erosional influences that collectively shape the landscape. By employing topographic swath profiles, we were able to effectively recognize and interpret the dominant topographic patterns present in the region. The extraction of these profiles specifically allowed for a more detailed examination of the interplay between the forces of tectonic uplift and deformation, which originate from within the Earth, and the surficial processes of erosion, driven by external factors such as climate and weathering. This approach offers a comprehensive understanding of the factors responsible for the observed topographic features in this tectonically active area.

**Keywords:** Relief, Makran, Tectonic Geomorphology, Tectonic Uplift Process, Topographic Swath Profiles.

## تحلیل تکامل چشم‌اندازهای ژئومورفیک منشور برافزایشی مکران، جنوب‌خاوری ایران

رضا منصوری\* 

گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

## چکیده گسترده

## مقدمه

لندفرم‌ها و چشم‌اندازهای ژئومورفولوژیکی موجود بر سطح کره زمین، همواره در گذر زمان در حال تغییر، تحول و تکامل هستند (Mansouri and Fotoohi, 2021; Mansouri et al, 2023). سامانه‌های ژئومورفولوژیکی از پیچیدگی‌های ویژه‌ای برخوردارند به‌گونه‌ای که گاهی آگاهی ما از وضعیت آن‌ها چندان دقیق نیست. از این رو، آنچه به‌طور ویژه برای ژئومورفولوژیست‌ها اهمیت دارد، توانایی اندازه‌گیری متغیرها است (Sarvati and Mansouri, 2014). بنابراین، هدف اصلی تبیین علمی در دانش ژئومورفولوژی، توانایی اندازه‌گیری فرآیندها و عوامل محیطی اثرگذار بر تحول چشم‌اندازها و لندفرم‌های زمین است. در این راستا، همان‌طور که منصوری و همکاران (Mansouri et al, 2023) نیز خاطر نشان کرده‌اند، اهمیت استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های اندازه‌گیری کمی در ژئومورفولوژی در این است که می‌تواند ابزارها و شیوه‌هایی را فراهم نماید که با استفاده از آن‌ها بتوان برهم‌کنش‌های بین انواع لندفرم‌ها و فرآیندهای مربوطه را به شیوه‌ای علمی، دقیق و کارآمد، کمی نموده و به تشریح و تفسیر موضوع پرداخت. توپوگرافی کنونی زمین، برآیند برهم‌کنش میان فرآیندهای زمین‌ساختی و سطحی است (Burbank and Anderson, 2012). ژئومورفولوژی زمین‌ساخت، به ارزیابی فرآیندهای پویا و مؤثر در شکل‌دهی زمین و چشم‌اندازهای آن می‌پردازد (Keller and Pinter, 2002). در واقع، ژئومورفولوژی زمین‌ساخت، ارتباط بین نیروهای زمین‌ساخت و فرآیندهای ژئومورفیک مؤثر در تشکیل لندفرم‌ها و چشم‌اندازهای ژئومورفولوژیکی در مناطق دگرشکلی فعال را بررسی می‌کند (Burbank and Anderson, 2012; Decaillau et al, 1998; Molin et al, 2004). به‌طور کلی، تحلیل‌های توپوگرافیکی کمی، به‌عنوان یکی از ابزارهای مفید در اندازه‌گیری انواع لندفرم‌ها و چشم‌اندازهای ژئومورفولوژیکی محسوب می‌شوند؛ زیرا فعالیت‌های زمین‌ساختی به‌طور گسترده بر ویژگی‌های توپوگرافی زمین تاثیرگذار هستند (Mansouri and Fotoohi, 2021). امروزه در علوم زمین و از جمله ژئومورفولوژی، استخراج و ارزیابی نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواً از طریق مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین به‌منظور استخراج اطلاعات مربوط به وضعیت توپوگرافی و ناهمواری‌های کره زمین امری رایج است. اخیراً، دانشمندان علوم زمین از میان رویکردهای گوناگون موجود در دانش ژئومورفولوژی زمین‌ساخت، از تجزیه و تحلیل‌های مربوط به الگوهای توپوگرافیکی و شبکه زهکشی به‌طور گسترده و موفقیت‌آمیزی استفاده کرده‌اند (Pérez-Peña et al, 2009a; 2009b; 2010; Kirby and Whipple, 2012; Willet et al, 2014; Pérez-Peña et al, 2017; Giacomia et al, 2012; Royden and Perron, 2013).

استناد: منصوری، ر.، ۱۴۰۴. تحلیل تکامل چشم‌اندازهای ژئومورفیک منشور برافزایشی مکران، جنوب‌خاوری ایران، پژوهشهای دانش

زمین: ۱۶(۴)، (۱۶-۱۴۷)، DOI: 10.48308/esrj.2025.106256

E-mail: Rezamansouri@gep.usb.ac.ir

\* نویسنده مسئول:



در واقع امروزه، دانشمندان علوم زمین به منظور تجزیه و تحلیل چنین الگوهای، از نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف در زمینه شناسایی عناصر کلی موثر بر چشم‌اندازهای زمین و در ارتباط با جنبش‌های زمین‌ساخت بهره گرفته‌اند (Molin et al, 2004; 2012; Azañon et al, 2015; Scotti et al, 2014; Andreani et al, 2014). از سوی دیگر، امروزه، تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف، کاربردهای بسیار گسترده‌ای در ژئومورفولوژی زمین‌ساخت پیدا کرده‌اند. از جمله رایج‌ترین این کاربردها می‌توان به ارزیابی‌های کمی از میزان بال‌آمدگی زمین‌ساختی یا فرورانش، تشخیص محل غسل‌خوردگی، توضیح درباره چگونگی ایجاد اسارت رود و تشکیل دره‌های پیشین و همچنین آزمایش مدل‌های ژئوفیزیکی، اشاره کرد. دسترسی گسترده امروزی به مدل‌های ارتفاعی رقومی با وضوح بالا، تحلیل‌های ژئومورفولوژی تکتونیکی را از نظر روش‌شناسی و معنای زمین‌شناسی بهبود بخشیده است. امروزه، ثابت شده است تحلیل نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف (Swath) در مطالعه کوه‌زایی‌های بزرگ به منظور ارزیابی تاثیر جنبش‌های عمودی سطح زمین و همچنین در بررسی توپوگرافی ایجاد شده توسط رودها یا یخچال بسیار سودمند و ارزشمند هستند. یکی از کاربردهای اصلی نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف، تجزیه و تحلیل‌های مورفولوژیکی و مورفوتکتونیک از چشم‌اندازهای گوناگون سطح زمین با هدف بررسی پاسخ‌های کوتاه‌مدت و درازمدت چشم‌انداز نسبت به فعالیت‌های زمین‌ساختی و تغییرات اقلیمی است. اکثر این تحلیل‌های مورفومتريک در نرم‌افزار GIS انجام می‌شوند که به ابزارهای استاندارد برای تحلیل معیارهای شبکه زهکشی تبدیل شده‌اند.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور ارزیابی درازمدت تکامل چشم‌انداز بخش ایرانی منشور برافزایشی مکران تحت تاثیر زمین‌ساخت پویا و نقش رودها، از افزونه SwathProfiler در تهیه نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف استفاده شده است. ویژگی برجسته این شیوه که توسط پرزپنا و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017) معرفی شده؛ اجرای آسان و خودکار همه مراحل آن مبتنی بر داده‌های مدل دیجیتالی ارتفاع در محیط نرم‌افزار قدرتمند ArcGIS است. داده‌های توپوگرافیکی و زمین‌شناسی نیز به ترتیب از نقشه‌های توپوگرافی (در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ و ۱:۵۰,۰۰۰) و زمین‌شناسی (در مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ و ۱:۲۵۰,۰۰۰) به دست آمدند. افزونه SwathProfiler، در محیط نرم‌افزار بسیار قدرتمند ArcGIS قابلیت اجرای آسان و سریعی به پژوهشگران می‌دهد. با به کارگیری این افزونه در محیط ArcGIS، می‌توان اطلاعات کلیدی و مهمی را از نیمرخ‌های توپوگرافیکی تولید شده، استخراج نمود؛ به طوری که به روند تجزیه و تحلیل و تفسیر آن‌ها کمک شایانی می‌کند (Pérez-Peña et al, 2017). با تهیه و ساختن نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف، بررسی‌های آماری به منظور استخراج مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین ارتفاع توپوگرافی در هر ترانسکت نیز امکان‌پذیر است. میانگین ارتفاع، برآورد آماری خوبی برای نشان دادن روند کلی توپوگرافی چشم‌انداز هر منطقه در محدوده تعیین شده به عنوان پهنای نیمرخ سوآف است؛ این در حالی است که، مقادیر حداکثر و حداقل ارتفاع تغییرات چشم‌انداز در جهت عمود بر نیمرخ سوآف را نشان می‌دهند. افزون بر آن، پارامترهای دیگری همچون پستی و بلندی یا ناهمواری محلی (حداکثر ارتفاع - حداقل ارتفاع) یا چارک‌ها (چارک نخست - چارک سوم) نیز می‌توانند تغییرات توپوگرافیکی را در راستای نیمرخ سوآف توصیف کنند. عموماً، ویژگی اصلی رشته‌کوه‌ها و مناطق کوهستانی یا سرزمین‌های بسیار بریده و تجزیه‌شده‌ای که در معرض برش عمقی رودها و یا فراخاست زیاد قرار دارند، وجود پستی‌وبلندی‌های محلی فراوان و تغییرات گسترده‌تر در نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف است. برعکس، وجود مقادیر کم برای پستی‌وبلندی‌های محلی و نیمرخ‌های سوآف، گویای مناطق پایدار همچون حوضه‌ها یا فلات‌ها با برش عمقی کم تا متوسط توسط رودها می‌باشد (Pérez-Peña et al, 2017).

## نتایج و بحث

نمودارهای مربوط به هر یک از نیمرخ‌های توپوگرافیکی طول و عرضی سوآف تعیین‌شده در زون مکران، در شکل ۷ و شکل ۸ ارائه شده‌اند. با هدف گویا کردن نیمرخ‌ها، فهم بهتر تغییرات و تحلیل دقیق‌تر یافته‌ها، بر روی همه نیمرخ‌های توپوگرافیکی ترسیم شده، تا حد امکان، اطلاعات مربوط به مناظر جغرافیایی - ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی نیز اضافه شده است. خط قرمز در بخش پایینی هر نیمرخ، نشان‌دهنده پستی‌وبلندی‌های محلی است. همان‌طور که در این شکل ۷ به روشنی دیده می‌شود، در همه نیمرخ‌های طولی، نیمرخ مربوط به پستی‌وبلندی‌های محلی از دامنه تغییرپذیری بسیار بالایی برخوردار بوده و مقادیر

نسبتاً بالایی را نیز ثبت کرده‌اند. اما، این مهم، در نیمرخ‌های عمود بر مکران، دامنه تغییرپذیری و مقادیر نسبتاً پایین‌تری را نشان می‌دهند (شکل ۸). به‌طور دقیق‌تر، بالاترین میزان تغییرات و مقادیر در این نیمرخ‌ها، در نیمرخ عرضی شماره یک - که از سه زیرزون مکران شمالی، بیرونی و ساحلی می‌گذرد (شکل ۱ ب و جدول ۱)، به ثبت رسیده است. به‌طور کلی، دامنه تغییرپذیری و مقادیر نسبتاً بالای پستی‌وبلندی‌های محلی در این نمودارها، گویای تأثیر مستقیم و برجسته دینامیک‌های درونی (انواع گسلش و ایجاد تراست‌های مهم و چین‌خوردگی‌ها) و بیرونی (به ویژه قدرت حفر جریان‌های رودخانه‌ای عظیم) است. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند همه نیمرخ‌های طولی و عرضی، تغییرات زیادی داشته و دامنه نوسان بالایی را در مقادیر خود ثبت کرده‌اند (حداکثر ارتفاع (۲۲۰۰-۰ متر)، حداقل (۱۵۰۰-۰)، میانگین (۱۶۸۰-۰)، چارک نخست (۱۶۱۰-۰)، سوم (۱۸۵۰-۰)، ناهمواری محلی (۱۵۵۰-۰) و  $(THi^*(0-0.8))$ . بیشترین و کم‌ترین میزان ارتفاع به ترتیب مربوط به کوه سفید (واقع در نیمرخ طولی مکران شمالی) و خط ساحلی (واقع در همه نیمرخ‌های عرضی و مکران ساحلی) می‌باشد. همه نیمرخ‌های طولی، درصد بسیار بالایی از میزان پستی‌وبلندی را که نشان‌دهنده وجود یک چشم‌انداز خشن کوهستانی در راستای اصلی کمربند مکران است، ثبت نموده‌اند. همچنین، با دقت در این نمودارها، می‌توان گونه‌ای از عدم تقارن توپوگرافیکی را در مسیر نیمرخ‌ها مشاهده کرد؛ به جز نمودار مربوط به مکران داخلی که به‌گونه‌ای حالتی از تقارن نسبی توپوگرافیکی را نمایش می‌دهد. در مجموع، بررسی کلی نمودارهای طولی، نشان می‌دهند که در زیرزون‌های مکران بیرونی و داخلی وضعیت توپوگرافیکی نسبتاً فشرده است؛ اما، در مکران شمالی و ساحلی از میزان فشرده‌گی و تراکم پستی‌وبلندی‌ها به سود گسترش سطوح پست و کم‌ارتفاع (منطبق بر واحد دره‌های گسترده، دشت و جلگه) کاسته می‌شود. با این وجود، همچنان وضعیت پستی‌وبلندی‌های مکران شمالی نسبت به مکران ساحلی، از تراکم نسبی بالاتری برخوردار است. از سوی دیگر، نیمرخ‌های توپوگرافیکی عرضی نیز ویژگی‌ها و تفاوت‌های بسیار جالبی را در وضعیت توپوگرافیکی منطقه نشان می‌دهند. به‌طور کلی، همه نیمرخ‌های عمود بر مکران، به‌طور آشکار نامتقارن هستند. دلیل اصلی نامتقارن بودن آن‌ها، تأثیر عملکرد گسل‌ها و تراست‌های اصلی موجود در منطقه (از جمله: تراست چاه‌خان، قصرقند، بشاگرد و بمپور). بنابراین، همان‌طور که این نیمرخ‌ها نشان می‌دهند، به‌راحتی می‌توان زیرزون‌های مکران و مرزبندی آن‌ها را مشاهده کرد. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند همه نیمرخ‌های طولی و عرضی، تغییرات بالایی را در مقادیر خود ثبت کرده‌اند. به عبارت دیگر، در بیشتر نمودارها، نیمرخ پستی‌وبلندی‌های محلی تغییرپذیری و مقادیر بالایی دارد. همچنین، مقادیر شاخص انتگرال هیپسومترى عرضی بهبودیافته ( $THi^*$ )، تغییرات بالای را نشان می‌دهد. به طوری که، بالاترین و پایین‌ترین مقدار مربوط به  $THi^*$  به ترتیب در نیمرخ طولی مکران شمالی (متأثر از گسل میناب) و در نیمرخ‌های عرضی شماره ۱، ۲ و ۴ و نیز در نیمرخ طولی مکران بیرونی ثبت شده است. علاوه بر آن، در بخش‌های قابل توجهی از نمودارهای طولی و عرضی، به‌طور مشخص مشاهده شد که نیمرخ شاخص میانگین ارتفاع از حداقل آن دور شده و همراه با منحنی چارک سوم به‌سوی حداکثر ارتفاع نزدیک شده است. در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان داد، مقادیر بالاتر (نزدیک به ۱) شاخص  $THi^*$  به همراه نزدیک شدن منحنی میانگین ارتفاع و چارک سوم به حداکثر ارتفاع در بسیاری از مناطق، گویای وجود یک چشم‌انداز جوان و نشانه حالت گذار آن از سازگاری با نرخ‌های بالاتر فراخاست است. به‌طور کلی یافته‌ها نشان دادند، پارامتر چارک نخست به شدت با میانگین و حداقل ارتفاع در فاصله اطمینان ۹۹٪ همبستگی دارد. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ ) برای چارک نخست با میانگین و حداقل ارتفاع به ترتیب ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۳ به دست آمده است. از سوی دیگر، یافته‌ها گویای وجود یک همبستگی بسیار قوی دیگری میان پارامترهای میانگین و حداقل ارتفاع است (جدول ۴). مقادیر مثبت میان این پارامترها، اثر مثبت و افزایشی میان آن‌ها را مشخص می‌کند. علاوه بر آن، میان پارامترهای چارک سوم و میانگین، چارک نخست و سوم، چارک سوم و حداکثر ارتفاع و چارک سوم با حداقل ارتفاع نیز وجود یک رابطه و همبستگی بالا در فاصله اطمینان ۹۵٪، مشاهده می‌شود (جدول ۵).

### نتیجه‌گیری

بررسی نیمرخ نمودارهای موازی و عرضی با زون مکران، نشان دادند در هر جایی که نیمرخ میانگین ارتفاع به حداکثر مقدار آن نزدیک شده (برای مثال، بخش مرکزی مکران داخلی، شمالی، بیرونی (شکل ۷ و شکل ۸))، الگوی کلی چشم‌انداز در سازگاری با نرخ‌های بالاتر فراخاست زمین‌ساختی ناشی از فعالیت گسل‌ها و تراست‌های اصلی و مهم در منطقه دچار جوان‌سازی شده و

چشم‌انداز در حالتی از گذار قرار گرفته است. همچنین، تغییرپذیری فراوان نیمرخ‌های نمودارها و وجود پستی‌وبلندی‌های محلی فراوان (در همه نمودارهای طولی و عرضی)، نشان‌دهنده وجود مناطق کوهستانی با چهره‌ای خشن است که شاخصی از سرزمین‌های بریده‌شده توسط نیروی برش و حفر عمقی رودها در سازگاری با بالآمدگی و جوان‌شدن ناهمواری توسط فعالیت‌های نوزمین‌ساختی است. همچنین، شاخص انتگرال هیپسومتری عرضی بهبودیافته (THi\*) در نمودارهای بررسی شده نشان داد، در مناطقی که میزان ناهمواری‌ها در پی عملکرد موج برش عمقی رودها و فعالیت گسل‌ها، به‌ویژه تراست‌های مهم در منطقه، افزایش چشمگیری پیدا کرده، مقادیر بالایی را نیز ثبت نموده است. در پایان، لازم به گفتن است، تحلیل‌های توپوگرافیکی سریع انجام شده در این مطالعه؛ توانایی، سودمندی و کاربردی بودن نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف را در تجزیه‌وتحلیل ناهمواری‌های مناطق کوهستانی، برجسته کرد. به عبارت دیگر، به کارگیری افزونه SwathProfiler در محیط نرم‌افزار ArcGIS، انجام تجزیه‌وتحلیل‌های پیشرفته توپوگرافیکی در ارتباط با ژئومورفولوژی زمین‌ساخت و مورفوتکتونیک چشم‌اندازها را در یک مقیاس منطقه‌ای، به‌روشی بسیار آسان، سریع و کارآمد، امکان‌پذیر ساخت. از سوی دیگر، تهیه و استخراج نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف در بخش ایرانی منشور برافزایشی مکران، در زمینه شناخت و تفسیر الگوهای توپوگرافیکی منطقه مبتنی بر مدل دیجیتالی ارتفاع و در ارتباط با عوامل کنترل‌گر درونی - زمین‌ساخت و بیرونی - فرسایش، کمک شایانی نمودند.

**واژگان کلیدی:** ژئومورفولوژی زمین‌ساخت، فرایند فراخاست زمین‌ساختی، مکران، ناهمواری زمین، نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف.

#### مقدمه

ژئومورفولوژی زمین‌ساخت، به ارزیابی ارتباط میان نیروهای زمین‌ساخت و فرآیندهای پویا و مؤثر در تشکیل لندفرم‌ها و چشم‌اندازهای ژئومورفیک زمین می‌پردازد (Decailau et al, 1998; Keller and Pinter, 2002; Molin et al, 2012; Burbank and Anderson, 2004). این مناظر نیز، همواره در گذر زمان در حال تغییر، تحول و تکامل هستند (Mansouri and Fotoohi, 2021; Mansouri et al, 2023). بنابراین، توپوگرافی کنونی زمین، برآیند برهم‌کنش میان فرآیندهای زمین‌ساختی و سطحی است (Burbank and Anderson, 2012). در واقع، همانند بسیاری از پدیده‌ها و فرآیندهای طبیعی، فرآیندهای زمین‌ساختی که به عنوانی عامل اصلی ایجاد توپوگرافی و دیگر چشم‌اندازهای طبیعی زمین به شمار می‌آیند، بسیار پیچیده‌اند. با این حال، در کنار پیچیدگی از نظم ویژه‌ای نیز پیروی می‌کنند (Goorabi et al, 2020). برآیند پایانی همراهی این نظم درونی و پیچیدگی ساختارهای زمین‌ساختی، ایجاد الگوها و رفتارهای واکنشی ویژه و مشخصی است که دانشمندان علوم زمین همواره با ایجاد و توسعه روش‌ها و رویکردهای گوناگون در پی شناخت و تحلیل آن‌ها برآمده‌اند. اخیراً، دانشمندان علوم زمین از میان رویکردهای گوناگون موجود در دانش ژئومورفولوژی زمین‌ساخت، از تجزیه‌وتحلیل‌های مربوط به الگوهای توپوگرافیکی و شبکه زهکشی به‌طور

گسترده و موفقیت‌آمیزی استفاده کرده‌اند (Pérez-Peña et al, 2009a; 2009b; 2010; Kirby and Whipple, 2012; Giaconia et al, 2012; Royden and Perron, 2013; Willet et al, 2014; Pérez-Peña et al, 2017). همچنین، پژوهشگران گوناگون به‌منظور تجزیه‌وتحلیل چنین الگوهایی با هدف شناسایی عناصر کلی مؤثر بر چشم‌اندازهای زمین و در ارتباط با جنبش‌های زمین‌ساخت، نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف<sup>۱</sup> را در مطالعات خویش به کار گرفته‌اند (Molin et al, 2004; Grohmann, 2004; 2012; Andreani et al, 2014; Scotti et al, 2014; Azañon et al, 2015; Baoying, 2016; Lv et al, 2020; Pirani et al, 2022). طبق اظهارنظر گراهمن (Grohmann, 2004)، ایده اولیه به کارگیری این روش به دهه ۱۹۲۰ برمی‌گردد (Hergarten et al, 2014). در برخی از این مطالعات عمدتاً نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف را به منظور نمایش توپوگرافی و به‌ویژه تمرکز بر نیمرخ‌های ارتفاعی سطح زمین به کار گرفته‌اند (Rehak et al, 2008; Robl et al, 2008)؛ در حالی که برخی دیگر از این مطالعات، ویژگی‌های ژئومورفیکی بیشتری همچون دامنه‌ها و ناهمواری‌های محلی را تحلیل کرده‌اند (Fielding et al, 1994; Montgomery, 2001; Mitchell and Montgomery, 2006b). در برخی دیگر از این پژوهش‌ها، به کارگیری نیمرخ‌های سوآف بیشتر برای بررسی ارتباط بین توپوگرافی و دیگر داده‌هایی همچون بارش (Fielding

هرچند (Moghadam et al, 2022; Barbero et al, 2023) به‌عنوان یکی از مناطق پویای فرورانش جهان به شمار می‌آید؛ اما، متأسفانه تاکنون از دیدگاه ژئومورفولوژی و به‌ویژه ژئومورفولوژی زمین‌ساخت مطالعات بسیار اندکی در آن انجام شده است. بنابراین، در این مطالعه با اتخاذ یک رویکرد تحلیلی مبتنی بر DEM و به کارگیری شیوه SwathProfiler در تهیه و استخراج نیمرخ‌های توپوگرافیک سواًف در یک مقیاس منطقه‌ای، به ارزیابی و تحلیل تکامل چشم‌اندازهای ژئومورفیک بخش ایرانی منشور برآزایشی مکران پرداخته شده است.

### منطقه‌ی مورد مطالعه

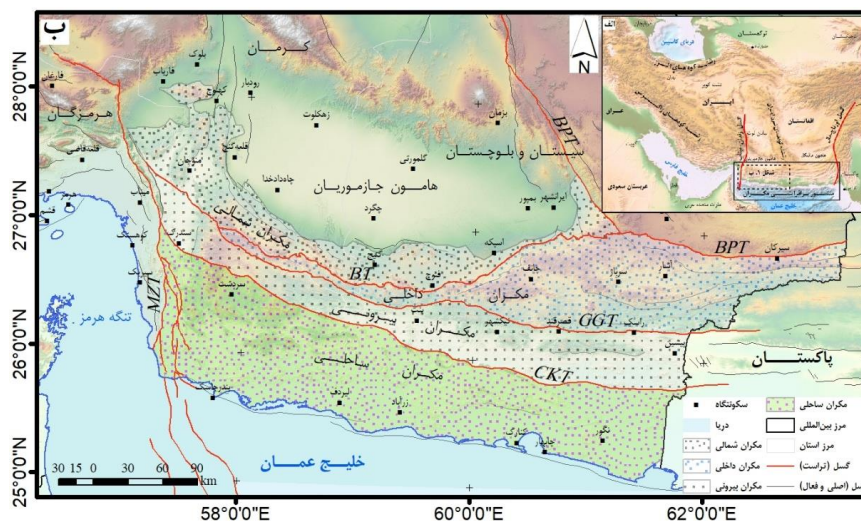
زون فرورانش مکران، با درازای تقریبی ۱۰۰۰ کیلومتر (Kopp et al, 2000; Burg et al, 2013; Burg, 2018)، به‌عنوان بخشی از کمربند کوه‌زایی آلپ - هیمالایا، بر اثر فرورانش پوسته اقیانوسی صفحه عربی به زیر پوسته قاره‌ای صفحه اوراسیا در گوشه جنوب‌خاوری ایران - از تنگه هرمز در باختر و بخش جنوبی پاکستان - تا نزدیکی کراچی در خاور، پدید آمده است. زون مکران، از نظر زمین‌شناسی، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین گُوه‌های برآزایشی سطح کره زمین می‌باشد (Kopp et al, 2000; Burg et al, 2013)؛ به گونه‌ای که، منشور برآزایشی آن، به دلیل دارا بودن بخش گسترده واقع در خشکی - با پهنایی در حدود ۲۰۰ کیلومتر و سبتری زیاد آن، به‌عنوان یک منطقه فرورانش نادر و بی‌همتا در جهان به شمار می‌آید (Byrne et al, 1992; Priestley et al 2022; Irandoust et al, 2022). این منشور، با روند کلی باختری - خاوری در دوسوی مرز ایران و پاکستان، با پهنای متغیر از ۱۵۰ کیلومتر در ایران (McCall and Kidd, 1982; Arian, 2013) تا ۳۵۰ کیلومتر در پاکستان (Burg et al., 2013; Arian, 2013) و در شمال خلیج عمان امتداد یافته است (شکل ۱ الف). به‌طورکلی، مکران در دوسوی باختر و خاور، توسط گسل‌های ترافشارشی با روند کلی شمالی - جنوبی در بر گرفته شده است. مرز باختری با سامانه گسلی امتدادلغز راست‌گرد میناب - سبزواران - نایبند<sup>۳</sup> و مرز خاوری آن با سامانه گسلی امتدادلغز چپ‌گرد چمن - اوناچ - نال<sup>۴</sup> (Stöcklin, 1968; Kopp et al, 2000; Bayer et al, 2006; Dolati and Burg, 2013; Burg et al, 2013; Penney et al, 2015; Burg, 2018; Barbero et al, 2020a; 2020b;

et al, 1994)، سن سنگ‌ها (Reiners et al, 2003)، میزان برونزد (Mitchell and Montgomery, 2006a)، محاسبه نرخ فراخاست در کمربندهای کوهستانی مناطق ساحلی (Gioia et al, 2024)، تغییرپذیری فضایی شبکه زهکشی (Chen et al, 2024) و جابجایی آب‌پخشان (Zhou et al, 2024) که به‌طور بالقوه در ارتباط با توپوگرافی هستند، بوده است. چندین نمونه دیگر از پژوهش‌های مرتبط با به‌کارگیری نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواًف، توسط تل‌بیز (Telbisz et al, 2013) بررسی شده است. برخی از پژوهشگران دیگر نیز روش‌ها و شیوه‌های گوناگون و متفاوت در زمینه تهیه، ترسیم و محاسبات مربوط به نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواًف را عمدتاً در نرم‌افزارهای MATLAB و ArcGIS معرفی و توسعه داده‌اند (Grohmann, 2004; Hergarten et al, 2014; Pérez-Peña et al, 2017; Yousefi-Bavil and Yousefi-Bavil, 2019; Zhu et al, 2021). پرز پنا و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017) با ابداع افزونه‌ای در محیط ArcGIS توانستند روشی نو و راحت‌تر برای محاسبه نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواًف ارائه نمایند. سودمندی این افزونه در این است که با به‌کارگیری آن افزون بر محاسبه و اندازه‌گیری اجزاء معمول این نیمرخ، می‌توان شاخص انتگرال هیپسومتری عرضی را نیز محاسبه کرد. این روش تاکنون در مطالعات گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته‌است (Struth et al, 2019; He et al, 2019; Ascione et al, 2021; Ouayah et al, 2021; Pirani et al, 2022; Roy et al, 2025). با بررسی منابع موجود در این زمینه، مشخص شد مطالعاتی که از این روش استفاده کرده‌اند، عمدتاً در مقیاس محلی و محدود با هدف‌های گوناگون اما در ارتباط با موضوع زمین‌ساخت انجام شده‌اند. تنها دو مورد در مطالعه خود از یک مقیاس منطقه‌ای بهره‌مند شده‌اند. نخست، استراس (Struth et al, 2019) حوضه رودهای Ebro و Duero را مورد مطالعه قرار دادند، اما موضوع اصلی آن‌ها بررسی تکامل و پویایی‌های شبکه زهکشی بوده است. مورد دوم، مطالعه پیرانی و همکاران (Pirani et al, 2022) است که به تحلیل تکامل چشم‌اندازهای زاگرس شمال‌باختری تحت تأثیر زمین‌ساخت و فرسایش پرداخته‌اند. منشور برآزایشی مکران، به‌عنوان برآیند همگرایی میان صفحه عربی و اوراسیا که در پی فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتیس از کرتاسه به‌بعد پدید آمده (Dercourt et al, 1986; Omrani et al, 2017; Barrier et al, 2018; Burg, 2018; Barbero et al, 2020a;



مکران یا جنوب‌خاوری ایران (Alaei-Taleghani, 2007) در نظر گرفته شده است. برپایه این دیدگاه، در راستای شمال به جنوب و در ارتباط با شکل ظاهری ناهمواری، ساختمان زمین‌شناسی و جنس سنگ، می‌توان سه واحد متفاوت از جمله: جبهه داخلی، دیواره میانی و جبهه بیرونی تشخیص داد (Alaei-Taleghani, 2007). اما از لحاظ زمین‌شناسی، زون مکران را می‌توان به زیرزون‌های گوناگون و متفاوتی تقسیم‌بندی کرد. یکی از تقسیم‌بندی‌های اولیه، توسط مک کال و کید (McCall and Kidd, 1982) ارائه شده که در آن مکران - از لبه جنوبی هامون جازموریان تا ساحل، به هشت ایالت زمین‌ساختی متفاوت تعریف و تقسیم‌بندی شده است. تقسیم‌بندی رایج دیگر، تقسیم زون مکران به چهار زیرزون زمین‌ساختی - چینه‌ساختی فرعی متفاوت از جنوب (از خط ساحلی) به سوی شمال و در راستای باختری - خاوری به مکران ساحلی، مکران بیرونی، مکران درونی و مکران شمالی است (شکل ۱ ب).

مشخص می‌شود. اما زون مکران، از سوی شمال به دو فرورفتگی زمین‌ساختی (یعنی، هامون جازموریان در ایران و ماشکل در پاکستان) و زون زمین‌درز سیستان<sup>۵</sup> واقع در مابین این دو فرورفتگی، محدود می‌شود. مرز جنوبی آن نیز توسط پشته میان‌اقیانوسی موری<sup>۶</sup> مشخص شده است. زون مکران، در منابع زمین‌شناسی توسط پژوهشگران گوناگون با عناوین متفاوتی همچون منشور برافزایشی مکران (Arian, 2013; Pirnia et al, 2020; Barbero et al, 2021; Barbero et al, 2023; Dolati, 2025), گوه برافزایشی مکران (Burg et al, 2013; Mohammadi et al, 2016; Burg et al, 2018; Barbero et al, 2020a), کمپلکس برافزایشی مکران (Burg et al, 2013; Barbero et al, 2020a), چین‌خورده - رورانده مکران (Bagheri and Stampfli, 2008; Dolati and Burg, 2013; Back and Morley, 2016), معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته است. اما از دیدگاه مطالعات جغرافیایی و به‌ویژه ژئومورفولوژی، به‌عنوان یک واحد ژئومورفیک - مورفوتکتونیک مستقل و با عنوان واحد



شکل ۱: الف: موقعیت جغرافیایی منشور برافزایشی مکران (نقشه پایه: ETOPO1 برگرفته از <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/>); ب: نقشه ساده شده بخش ایرانی زون مکران به همراه زیرزون‌های زمین‌ساختی - چینه‌ساختی آن، حروف ایتالیک انگلیسی نشان‌دهنده گسل‌های تراستی اصلی هستند که مرز زیربخش‌ها را نیز تشکیل می‌دهند (CKT: تراست چاه‌خان، GGT: تراست قصرقند، BT: تراست بشاگرد، BPT: تراست بمپور، MZT: تراست میناب-زندان) (با تغییراتی Dolati, 2010; Burg et al, 2013; Burg, 2018) و موقعیت گسل‌های اصلی و فعال (Zelenin et al, 2022) (منطقه مورد پژوهش [http://neotec.ginras.ru/index/english/sheets\\_eng.html](http://neotec.ginras.ru/index/english/sheets_eng.html)).

Fig. 1: a: Geographical setting of the Makran accretionary prism (base map from ETOPO1 [http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/image/color\\_etopo1\\_ice\\_full.tif.gz](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/image/color_etopo1_ice_full.tif.gz)); b) Simplified map of the Iranian part of the Makran zone with its tectonic-stratigraphic subzones; English italics indicate the main thrust faults that also form the boundaries of the subdivisions (CKT: Chah Khan Thrust, GGT: Ghasr Gand Thrust, BT: Bashagerd Thrust, BPT: Bampour Thrust, MZT: Minab-Zendan Thrust) (modified from Dolati, 2010; Burg et al, 2013; Burg, 2018) and the location of the main and active faults of the study area (Zelenin et al, 2022). SSZ represents the Sistan Suture Zone.

غالباً در الگوهای ساختاری - لیتولوژیکی آن‌ها نمود یافته، لازم می‌نمود در راستای فهم الگوی‌های واکنش رفتاری چشم‌انداز منطقه مورد مطالعه در ارتباط با نقش تعادلی و تکاملی رودهای مهم با آن‌ها، این تقسیم‌بندی مورد استفاده قرار گیرد. در واقع، هدف اصلی پیروی از این شیوه، علاوه بر مطالعه و بررسی روند کلی نوسان ناهمواری‌ها، درک میزان تغییرات محلی در هر زیرزون تحت تأثیر سامانه‌های گسلی و شبکه زهکشی در این منطقه بوده است. در ادامه ویژگی‌های هر زیرزون به‌طور خلاصه ارائه شده است. مکران شمالی به گسل بشاگرد (بشاگرد) در جنوب و فرورفتگی هامون جازموریان در شمال محدود می‌شود (شکل ۱ ب، شکل ۶ و جدول ۱). لیتولوژی مکران شمالی، عمدتاً شامل سنگ‌های آذرین کرتاسه و رسوب‌های مرتبط و نیز رخنمون‌های پراکنده و جزئی از سنگ‌های پالئوسن و ائوسن می‌باشد. به عبارت دیگر، این بخش از مکران، بیشتر شامل سنگ‌های آتشفشانی و رسوب‌های دریایی عمیق کرتاسه تا حداقل پالئوسن است که بخشی از آن‌ها در آمیزه‌های زمین‌ساختی<sup>۷</sup> جمع شده‌اند (Burg et al, 2013). سنگ‌های تجمع شده توسط فرایندهای زمین‌ساختی در شمال مکران که عمدتاً به سن کرتاسه هستند، در پی اعمال این نیروها، به‌طور ضعیفی چین‌خورده‌اند. سنگ‌های اولترامافیک موجود در مکران شمالی، به یک مجموعه افیولیتی ژوراسیک-پالئوسن نسبت داده شده‌اند (McCall and Kidd, 1982). مکران داخلی، توسط گسل‌های تراستی بشاگرد (بشاگرد) و قصرقند، به ترتیب در شمال و جنوب، در بر گرفته شده و عمدتاً با توالی‌های ماسه‌سنگ-شیل قاره‌ای از نوع فلیش به سن ائوسن بالایی تا میوسن زیرین است که به‌طور هم‌شیب بر روی رسوب‌های دریایی و سنگ‌های آتشفشانی پالئوسن تا ائوسن میانی قرار گرفته‌اند (McCall and Kidd, 1982; Burg et al, 2013). فراخاست مکران داخلی به‌سوی شمال از اواخر پالئوسن تا به امروز ادامه داشته است (شکل ۱ ب، شکل ۶ و جدول ۱). حد شمالی و جنوبی مکران بیرونی، به‌ترتیب توسط گسل‌های تراستی قصرقند و چاه‌خان مشخص شده است. مکران بیرونی عمدتاً رسوب‌های میوسن زیرین تا میانی را که روی رسوب‌های توریدایی و شیل‌های الیگوسن پایانی را می‌پوشانند، در بر می‌گیرد (Dolati and Burg, 2013; Burg et al, 2013).

تاکنون این تقسیم‌بندی، در مطالعات متعددی (Dolati, 2010; Dolati and Burg, 2013; Burg et al, 2013; Mohammadi et al, 2016; Burg, 2018; Barbero et al, 2020a; 2020b; 2021; 2025) به کار برده شده است. در این پژوهش، بخش ایرانی منشور برآزمایشی مکران مورد مطالعه قرار گرفته است. پهنه مورد مطالعه، از نظر موقعیت ریاضی در راستای پهنای جغرافیایی  $25^{\circ} 4'$  تا  $28^{\circ} 6'$  شمالی از خط استوا و در راستای درازای جغرافیایی  $55^{\circ} 56'$  تا  $53^{\circ} 6'$  خاوری از نیمروز گرینویچ واقع شده است (شکل ۱ ب). بخش ایرانی مکران، شامل رشته‌کوه‌هایی با روند باختری - خاوری است که ارتفاع آن غالباً از جنوب به شمال از سطح جلگه ساحلی تا حدود ۱۹۲۹ متر متغیر بوده و تنها در برخی نقاط به بیش از ۲۴۳۸ متر ارتفاع می‌رسد، سپس دوباره در دامنه شمالی کاهش یافته و به هامون جازموریان فرو می‌رود (McCall and Kidd, 1982). به‌طور کلی، رشته‌کوه‌های مکران در ایران حدود ۶۰۰ کیلومتر داراز داشته و از شمال تنگه هرمز از ساحل میناب در باختر تا مرز پاکستان در خاور کشیده شده‌اند.

#### زیرزون‌های زمین‌ساختی - چینه‌شناختی

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، زون مکران با وجود اینکه یک زون مشخص زمین‌شناختی - ژئومورفیک می‌باشد، اما با توجه به ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژیکی، تفاوت‌های مهمی در آن دیده می‌شود. افزون بر آن، این منطقه دارای ساختارهای پیچیده چین‌خورده - رورانده ناشی از فرورانش آن است. در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی میزان تأثیرگذاری و برهم‌کنش میان فرآیندهای فراخاست زمین‌ساختی و برش عمقی رودها در ایجاد تحول و توسعه ناهمواری‌ها در بخش‌های گوناگون چشم‌انداز ژئومورفیک زون مکران، با پیروی از یک تقسیم‌بندی ساختاری - لیتولوژیکی (Dolati, 2010; Burg et al, 2013; Burg, 2018)، منطقه مورد مطالعه به چهار زیرزون فرعی تقسیم شد. مرزها در این تقسیم‌بندی، عمدتاً توسط گسل‌های تراستی اصلی و مهم منطقه، تعیین و تعریف شده‌اند (شکل ۱ ب و جدول ۱). از یک سو، گسل‌های معکوس اصلی به عنوان مرز جداکننده زیرزون‌های مکران در راستای طولی/خاوری - باختری با زون مکران امتداد یافته‌اند و در ایجاد تفاوت‌های مهم ساختاری - مورفولوژیکی منطقه تأثیرگذار بوده‌اند. از سوی دیگر، با توجه به تاریخچه متفاوت تکامل زمین‌شناختی این زیرزون‌ها که

عبارت دیگر، رسوب‌های این بخش، عمدتاً از مارن با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ آهکی، کنگلومرا و ماسه‌سنگ‌های رودخانه‌ای و دیگر رسوب‌های قاره‌ای؛ همچنین، ماسه‌سنگ‌ها و مارن‌های دریایی با ماسه‌سنگ‌های بیوکلاستیک آهکی میان‌لایه‌ای متعلق به میوسن پایانی تا پلیوسن تشکیل شده‌اند (Burg et al, 2013; Burg, 2018). این بخش، به طور ضعیفی تغییرشکل یافته (Burg et al, 2013)، به گونه‌ای که در آن هیچ‌گونه گسل تراستی تشکیل نشده؛ درحالی که، وجود گسل‌های عادی فراوان که بر اثر فرورانش صفحه‌ای ایجاد شده‌اند، ساختار غالب این بخش می‌باشد (Kopp et al, 2000; Burg et al, 2013) (شکل ۱ ب، شکل ۶ و جدول ۱). به‌طورکلی، سن سنگ‌شناسی در بخش ایرانی منشور برافزایشی مکران از شمال به جنوب جوان‌تر می‌شود و سرانجام در بخش ساحلی به رسوب‌های پلیو-کواترنری می‌رسد.

رسوبی غالب در نیمه شمالی و جنوبی مکران بیرونی، به ترتیب، عمدتاً از مارن‌های میوسن زیرین همراه با ماسه‌سنگ و سنگ آهک؛ و از رسوب‌های آب‌های کم‌عمق و توربیدایت‌های میوسن میانی می‌باشد. همچنین، از ویژگی‌های غالب ساختاری این بخش، می‌توان به وجود چین‌خوردگی‌های باز و بزرگ با طول موج بلند همراه با رخنمون ضعیف در صفحه محوری اشاره کرد (Dolati and Burg, 2013; Burg et al, 2013) (شکل ۱ ب، شکل ۶ و جدول ۱). همان‌طور که برگ و همکاران (Burg et al, 2008) اشاره کرده‌اند، یک الیستوستروم گسترده تورونی، سه واحد مورد اشاره در بالا را پوشش می‌دهد که در مکران ساحلی یافت نمی‌شود. مکران ساحلی، به‌عنوان جوان‌ترین بخش (Kopp et al, 2000)، مابین خط ساحلی - در جنوب و گسل تراستی چاه‌خان - در شمال واقع شده و به‌طورکلی، رسوب‌های میوسن بالایی و جوان‌تر را نشان می‌دهد. به

جدول ۱: برخی از مهم‌ترین اطلاعات مربوط به زیرزون‌های مکران (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه (Burg et al, 2013)).

Table 1: Key information on Makran subzones (based on geological maps (Burg et al, 2013)).

Zone	Subzone	Border (Extend)	Lithology	Dominant structural features
	North Makran	From the south of the Jaz Murian Depression and the Bashakerd Thrust	Cretaceous sedimentary and igneous-ultramafics rocks	Imbricated Zone, widespread Tortonian Olistostrome
	Inner Makran	Between the Bashakerd Thrust and Ghasr Ghand Thrust	Eocene to Middle Miocene rocks	Numerous thrust and strike-slip faults, high compression and fracture of sedimentary structures, widespread Tortonian Olistostrome
Makran	Outer Makran	Between the Ghasr Ghand Thrust and Chah Khan Thrust	Upper Oligocene to Middle-Miocene rocks	Open and large folds with a weak axial-plane cleavage, widespread Tortonian Olistostrome, and less shortening than the Inner Makran
	Coastal Makran	Between the Chah Khan Thrust and Coastline	Upper Miocene and Plio-Pleistocene sediments	Very weakly deformed, the absence of any thrust faults, the presence of numerous faults with normal mechanisms, the occurrence of mud-volcano, and the presence of gentle folds

## مواد و روش‌ها

تغییرات اقلیمی ارزشمند هستند. نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواًف و طولی رودخانه دو مورد از پرکاربردترین روش‌های تحلیلی برای بررسی پاسخ‌های درازمدت و کوتاه‌مدت چشم‌انداز به‌شمار می‌آیند. امروزه، بیشتر این‌گونه تحلیل‌های مورفومتریک، در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام می‌شوند که به ابزارهای استاندارد برای انواع تحلیل‌ها

امروزه، دسترسی آسان و گسترده به انواع مدل‌های دیجیتالی ارتفاع (DEMs) با وضوح بالا، تحلیل‌های ژئومورفولوژی زمین‌ساخت را از جنبه‌های روش‌شناختی و مفاهیم زمین‌شناختی بهبود بخشیده‌اند. تحلیل‌های مبتنی بر نیمرخ‌های توپوگرافیکی، برای بررسی پاسخ کوتاه‌مدت و درازمدت چشم‌انداز نسبت به فعالیت‌های زمین‌ساختی و

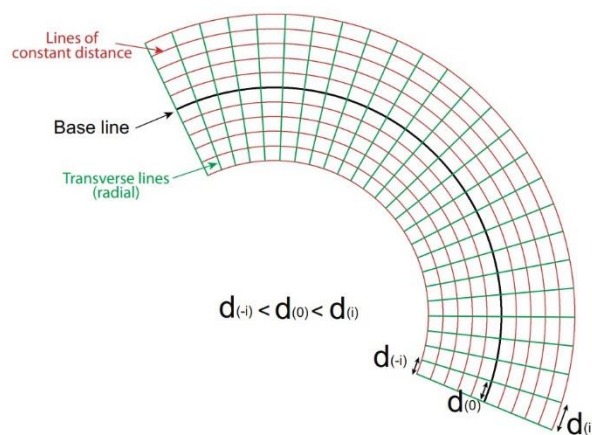
و در قالب یک نوار باریک بوده است. نیمرخ‌های تهیه شده به این سبک، به دلیل فراهم کردن نمایی کلی از الگوی توپوگرافیکی هر منطقه‌ای، توسط پژوهشگران فراوانی (D'Agostino et al, 2001; Riquelme et al, 2003; Grohmann, 2005; Molin et al, 2004; 2012; Scotti et al, 2014; Azañon et al, 2015) با هدف تشریح و توصیف وضعیت توپوگرافی سطح زمین در یک مقیاس منطقه‌ای به‌طور گسترده به کارگرفته شده است. نیمرخ‌های توپوگرافیکی خطی سوآف را می‌توان به راحتی ایجاد کرد. اما همان‌طور که هرگارتن و همکاران (Hergarten et al, 2014)، تلبیز و همکاران (Telbisz et al, 2013) نیز اشاره کرده‌اند، هنگامی که هدف، تهیه نیمرخ‌های توپوگرافیکی غیرخطی در مناطق دارای سینوسیته (برای مثال، جبهه‌های کوهستانی یا دره‌های رودخانه) باشد، نیمرخ‌های تهیه شده تحت تاثیر یک خطای سیستماتیک بالقوه قرار می‌گیرند. تاکنون، در جهت برطرف کردن این مسئله تلاش‌هایی صورت گرفته و روش‌هایی نیز برای حل آن پیشنهاد شده است. برای مثال، تلبیز و همکاران (Telbisz et al, 2013) پیشنهاد کردند که مقادیر ارتفاعی بهتر است در راستای خطوط غیرموازی و عمود بر خط مبناء منحنی، انباشت شوند. اما، همان‌طور که هرگارتن و همکاران (Hergarten et al, 2014) نیز خاطر نشان کردند، این روش پیشنهادی نیز دارای ایرادهایی است که کارایی آن را با مسائلی از جمله نرم کردن خط مبناء برای ناهمواری‌های محلی (در مقیاس کوچک) و نقش آفرینی هر پیکسل در بیش از یک خط عمود بر خط مبناء، روبرو می‌کند. از این رو، نامبردگان روش متفاوت دیگری را برای تهیه نیمرخ‌های توپوگرافیکی غیرخطی سوآف به صورت منحنی، پیشنهاد داده‌اند. در این روش، انباشت ارتفاعات از طریق به کارگیری و درگیر کردن همه پیکسل‌های مدل دیجیتالی ارتفاع (DEM) و محاسبه فواصل علامت‌دار یا جهت‌دار<sup>۳</sup> تا خط مبناء، انجام می‌پذیرد. اما، باز هم این روش بنا به اظهار پرنز و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017) با مسئله اصلی تراکم و فشردگی بالای محاسبات به دلیل تکرارپذیری همه پیکسل‌های مدل دیجیتالی ارتفاع در جهات گوناگون، روبرو است. بنابراین، پرنز و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017) به منظور برطرف کردن مسائل موجود پیرامون تلاش‌های ارزشمند اخیر مورد اشاره در بالا، با ارائه رویکردی کاملاً متفاوت و آسان در محیط نرم‌افزار ArcGIS و بهره‌گیری از

تبدیل شده‌اند. در این پژوهش به منظور بررسی وضعیت ژئومورفولوژی زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل مبتنی بر روش نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف، از افزونه جدید SwathProfiler که در مقاله‌ای توسط پرنز و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017) در مجله Computers and Geosciences ابداع و معرفی شده، استفاده شده است. این افزونه، در محیط نرم‌افزار بسیار قدرتمند ArcGIS قابلیت اجرای آسان و سریعی به پژوهشگران می‌دهد. با به کارگیری این افزونه در محیط ArcGIS، می‌توان اطلاعات کلیدی و مهمی را از نیمرخ‌های توپوگرافیکی تولید شده، استخراج نمود؛ به طوری که به روند تجزیه و تحلیل و تفسیر آن‌ها کمک شایانی می‌کند (Pérez-Peña et al, 2017). در واقع، سودمندی به کارگیری این افزونه در زمینه تجزیه و تحلیل نیمرخ‌های توپوگرافیکی زمین در این است که، هم مدت زمان و هم فرآیند محاسبه استخراج نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف را به‌طور چشمگیری، کاهش می‌دهد. در این راستا، مهم‌ترین داده‌های فیزیکی این پژوهش عبارت‌اند از: مدل دیجیتالی ارتفاع منطقه با دقت مکانی ۱۲/۵ متر، نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ و ۱:۵۰,۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ و ۱:۲۵۰,۰۰۰ به منظور استخراج خطوط گسلی و واحدهای لیتولوژیکی، انواع تصاویر ماهواره‌ای (همچون لندست، سنتینل ۲ و گوئیک‌برد)، Google Earth، باز دیدهای میدانی متعدد و تعیین خطوط مبناء برای ترسیم نیمرخ‌ها. همچنین از ابزار مفهومی SwathProfiler در محیط ArcGIS به منظور تهیه و استخراج خودکار نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف استفاده شده است. در ادامه، به منظور آشنایی بیشتر و فهم بهتر روش ابداعی پرنز و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017)، روش‌شناسی تهیه نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف و شیوه اجرا و پیاده‌سازی آن در محیط ArcMap نرم‌افزار ArcGIS، تشریح شده است.

### روش‌شناسی

به‌طور کلی، روش اصلی تهیه و ایجاد نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف، در بسیاری از پژوهش‌های پیشین (Baulig, 1926; Tricart and Cailleux, 1958;) (d'Agostino et al, 2001; Fielding, 1994)، به صورت ترسیم نیمرخ‌های توپوگرافیکی دارای فواصل نسبتاً یکسان

یکسان نمونه‌برداری می‌شود و معیارهای عرضی نیمرخ به‌عنوان چارک یا میانگین با اندازه نمونه یکسان در سراسر نیمرخ سواف، مورد محاسبه قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، در این روش برای ایجاد یک نیمرخ منحنی، اندازه گام برای تعیین خط مبنا به صورت پیش‌فرض ( $d_0$ ) در نظر گرفته شده و همه خطوط موازی (خطوط قرمز) با لحاظ کردن آن، دوباره محاسبه می‌شوند تا مطمئن شویم که هر خط توسط تعداد نقاط یکسانی نمونه‌برداری می‌شود. البته، توجه به این نکته مهم و ضروری است که خطوط عرضی (خطوط سبز) لزوماً نایبستی بر خط مبنا، عمود باشند.



شکل ۲: طرحی شماتیک از چگونگی ایجاد یک نیمرخ توپوگرافیکی سواف به صورت منحنی (Pérez-Peña et al, 2017).

Fig. 2: Schematic for creating curved topographic swath profiles (Pérez-Peña et al, 2017).

نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواف است. برعکس، وجود مقادیر کم برای پستی‌وبلندی‌های محلی و نیمرخ‌های سواف، گویای مناطق پایدار همچون حوضه‌ها یا فلات‌ها با برش عمقی کم تا متوسط توسط رودها می‌باشد (Pérez-Peña et al, 2017). علاوه‌براین، برای پستی‌وبلندی‌های محلی، روابط بین میانگین ارتفاع نسبت به حداکثر و حداقل آن می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد وضعیت چشم‌انداز آشکار کند (Keller and Pinter, 2002; Wobus et al, 2006). معمولاً، میانگین ارتفاع برای یک نیمرخ سواف معمولی در بسیاری از چشم‌اندازها، به حداقل مقدار آن نزدیک‌تر بوده، اما از مقدار حداکثر فاصله خواهد داشت (Pérez-Peña et al, 2017). چنانچه اگر، میانگین ارتفاع به مقدار حداکثر آن نزدیک شود، این انحراف رو به بالا می‌تواند نشان‌دهنده یک حالت گذار از سازگاری با نرخ‌های بالاتر فراخاست باشد (Keller and Pinter, 2002; Wobus et al, 2006). این‌گونه انحرافات را می‌توان با بررسی انتگرال هیپسومتریک<sup>۱۱</sup>

قابلیت‌های روش‌ها و کلاس‌های ArcObjects موجود در آن؛ ضمن بالابردن بهره‌وری و کارایی این روش، مدت زمان صرف شده برای تهیه و ایجاد نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواف را نیز به حداقل رسانده‌اند. روش کار در این رویکرد بدین صورت است که نخست، خطوط موازی با خط مبنا را محاسبه می‌کند؛ سپس آن‌ها را با اندازه‌های گام متفاوت و بسته به طول‌شان، نمونه‌برداری می‌کند. در این روش، اندازه گام انتخاب شده نسبت به خط مبنا، به‌عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۲ نیز نشان‌داده شده است، از همه خطوط موازی با تعداد نقاط

با تهیه و ساختن نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواف، بررسی‌های آماری به منظور استخراج مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین ارتفاع توپوگرافی در هر ترانسکت نیز امکان‌پذیر است. میانگین ارتفاع، برآورد آماری خوبی برای نشان‌دادن روند کلی توپوگرافی چشم‌انداز هر منطقه در محدوده تعیین‌شده به‌عنوان پهنای نیمرخ سواف است؛ این‌درحالی‌است که، مقادیر حداکثر و حداقل ارتفاع تغییرات چشم‌انداز در جهت عمود بر نیمرخ سواف را نشان می‌دهند. افزون‌برآن، پارامترهای دیگری همچون پستی‌وبلندی یا ناهمواری محلی (حداکثر ارتفاع - حداقل ارتفاع) یا چارک‌ها (چارک نخست - چارک سوم<sup>۱۰</sup>) نیز می‌توانند تغییرات توپوگرافیکی را در راستای نیمرخ سواف توصیف کنند. عموماً، ویژگی اصلی رشته‌کوه‌ها و مناطق کوهستانی یا سرزمین‌های بسیار بریده و تجزیه شده‌ای که در معرض برش عمقی رودها و یا فراخاست زیاد قرار دارند، وجود پستی‌وبلندی‌های محلی فراوان و تغییرات گسترده‌تر در

ناهنجاری‌های هیپسومتریکی، منحنی لگاریتمی پستی‌وبلندی نسبی  $(r/R)^{0.5}$ ، غیرعادی در نظر گرفته می‌شود. بنا به اظهار پرز پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017)، با توجه به اینکه، استفاده از شیوه مرسوم نرمال‌سازی خطی مستقیم، تفاوت‌های بزرگی در ترانسکت‌های سواف با پستی‌وبلندی‌های محلی گوناگون ایجاد می‌کند، در این روش از نرمال‌سازی لگاریتمی استفاده شده است (شکل ۳). در این روش نرمال‌سازی، وزن ترانسکت‌های با پستی‌وبلندی‌های بسیار کم، بیشتر است؛ در حالی که، وزن‌های ترانسکت‌های با پستی و بلندی‌های محلی متوسط تا زیاد، تفاوت‌های کمتری را نشان می‌دهند (به P3 و P4 در شکل ۳ مراجعه شود). به عبارت دیگر، این شیوه نرمال‌سازی اخیر، باعث نزدیک شدن بخش‌هایی از نیمرخ سواف با پستی‌وبلندی بسیار کم، به ۰/۵ می‌شود (نقاط P1 و P2 در شکل ۳)، در حالی که ترانسکت‌هایی با پستی و بلندی نسبی متوسط تا کم، به سختی اصلاح می‌شوند (نقاط P3، P4 و P5 در شکل ۳).

رابطه (۲)

$$THi = (HI - 0.5) w_i + 0.5$$

رابطه (۳)

$$w_i = 0.2 \ln(RLR) + 0.1$$

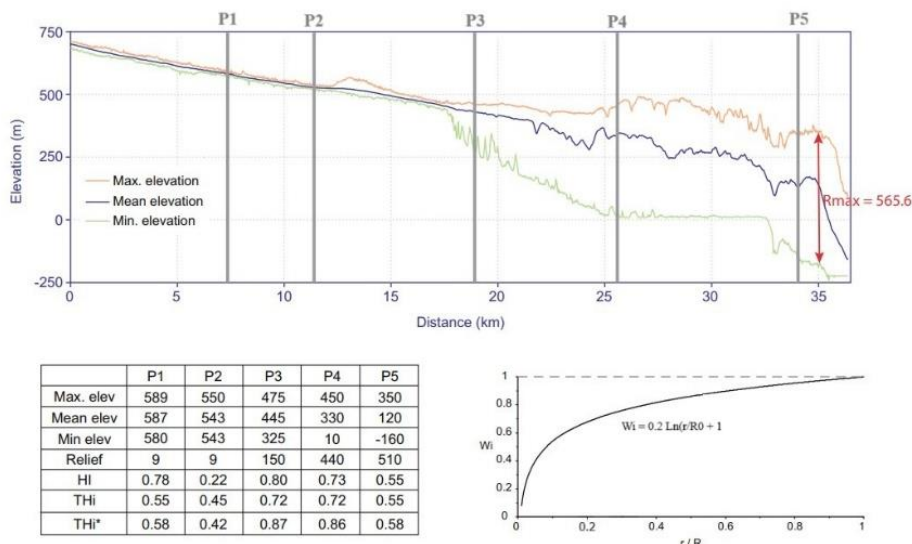
$$\text{Relative local relief (RLR)} = LRi / LRmax$$

(Pike and Wilson, 1971) از طریق معادله رابطه ۱، در طول تمام ترانسکت‌ها مطالعه کرد.

رابطه (۱)

$$HI = H_{mean} - H_{min} / H_{max} - H_{min}$$

مقادیر HI نزدیک به ۱ نشان می‌دهد که میانگین ارتفاعات نزدیک به حداکثر ارتفاعات هستند، بنابراین یک چشم‌انداز گذرای جوان را نشان می‌دهند؛ برعکس، مقادیر HI نزدیک به ۰ نشان‌دهنده یک چشم‌انداز بالغ با میانگین ارتفاعات نزدیک به حداقل است. اما، محاسبه مستقیم HI در ترانسکت‌های سواف، می‌تواند مشکلاتی را ایجاد کند. ترانسکت‌هایی با پستی‌وبلندی‌های کم همچون دشت‌ها، مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین ارتفاع بسیار نزدیک به هم خواهند بود؛ بنابراین، تغییرات کوچک در میانگین ارتفاع، می‌تواند تفاوت‌های زیادی در مقادیر HI ایجاد کند (به P1 و P2 در شکل ۳ مراجعه کنید). برای جلوگیری از این موضوع، پرز پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017) استفاده از انتگرال هیپسومتری عرضی  $(THi)^{12}$  را پیشنهاد کرده (معادله ۲) که در آن مقادیر HI توسط پستی‌وبلندی‌های نسبی محلی  $(RLR)^{12}$  وزن‌دهی می‌شوند (معادله ۳). در این روش پیشنهادی، از یک ضریب وزنی  $(w_i)^{14}$  استفاده می‌شود و در آن، به منظور اصلاح



شکل ۳: روابط بین پستی‌وبلندی (حداکثر - حداقل ارتفاع) و هیپسومتری در نیمرخ‌های سواف. نقاط P1 و P2 به دلیل تغییرات اندک در میانگین ارتفاع در یک ترانسکت با پستی‌وبلندی بسیار کم، مقادیر انتگرال هیپسومتری (HI) بسیار متفاوتی را نشان می‌دهند پرز پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017). برای کسب اطلاعات بیشتر به متن مراجعه شود.

Fig. 3. Relationships between elevation (maximum - minimum elevation) and hypsometry in swath profiles. Points P1 and P2 show very different hypsometry integral (HI) values due to small changes in mean elevation in a transect with very low elevation (Pérez-Peña et al., 2017). See text for more information.

## رابطه ۴)

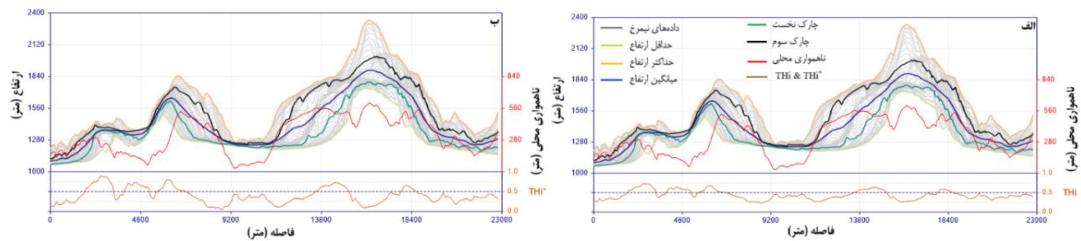
$$HI^* = (HI - 0.2) / 0.8 - 0.2$$

$$THi^* = (HI^* - 0.5) w_i + 0.5$$

در شکل ۴ نمونه‌هایی از نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف همراه با آیتم‌های گوناگون آن در منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده‌است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، تفاوت آشکاری میان منحنی نیمرخ سوآف تهیه شده با به‌کارگیری شاخص انتگرال هیپسومتری عرضی (THi) (شکل ۴ الف) و شاخص انتگرال هیپسومتری عرضی بهبودیافته (THi\*) دیده می‌شود (شکل ۴ ب).

به عبارت دیگر، اعمال THi\* بر روی نمودار، تغییرات منحنی هیپسومتری را به نحو بارزتری به کاربر ارائه می‌دهد.

به گفته پرز پنا و همکاران (Pérez-Peña et al, 2009c)، در بیشتر چشم‌اندازهای طبیعی، مقادیر انتگرال هیپسومتری زیر ۰/۲ یا بالای ۰/۸ پدیده‌ای بسیار نادر است. بنابراین، با تغییر مقیاس مقادیر HI بین ۰/۲ تا ۰/۸، ضمن بهبود توصیف و مقایسه هیپسومتری در راستای یک نیمرخ سوآف، می‌توان تغییرات هیپسومتریکی نیمرخ را نیز برجسته نمود. پرز پنا و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017)، شاخص اخیر را شاخص انتگرال هیپسومتری عرضی بهبودیافته (THi\*) نامیده‌اند و آن را به صورت معادله رابطه ۴ تعریف کرده‌اند. به عبارت دیگر، مزیت نسبی شاخص THi\*، افزایش میزان دقت و کارایی موثرتر آن در استخراج و نمایش بهتر وضعیت هیپسومتری نیمرخ ترسیم شده است. دلیل اصلی این مزیت نیز به اعمال پارامترهای بیشتر نسبت به THi بر می‌گردد.



شکل ۴: نمونه‌هایی از نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف ترسیم‌شده در منطقه با آیتم‌های هفت‌گانه گوناگون آن. الف: با در نظر گرفتن شاخص انتگرال هیپسومتری عرضی (THi). ب: با در نظر گرفتن شاخص انتگرال هیپسومتری عرضی بهبودیافته (THi\*).

Fig. 4: Examples of topographic swath profiles in the study area with its seven different items. A: Considering the transverse hypsometric integral index (THi). B: Considering the enhanced transverse hypsometric integral index (THi\*).

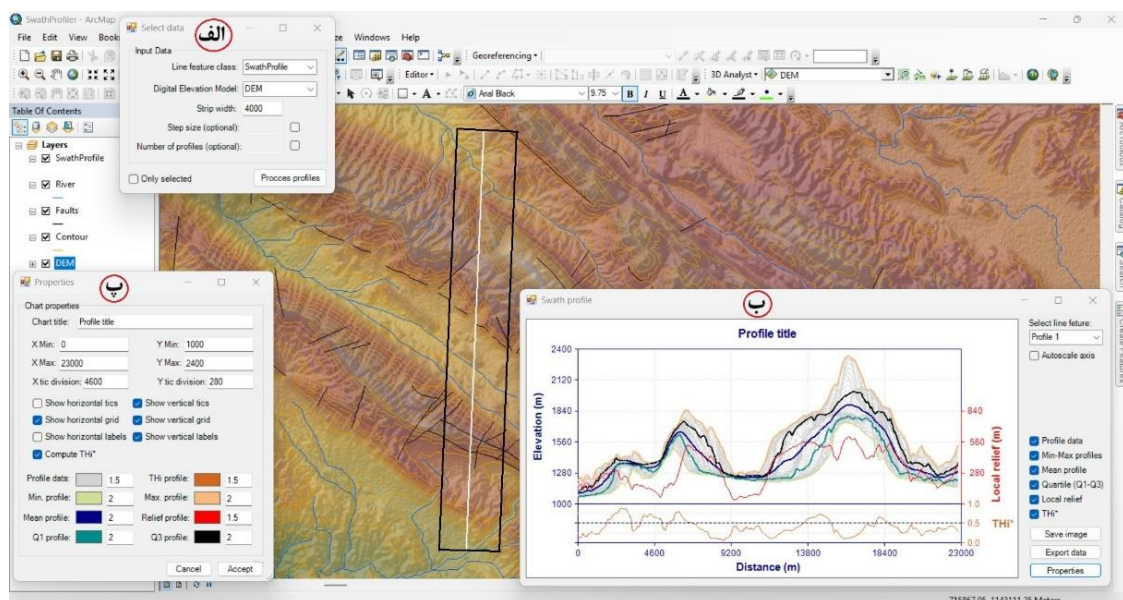
کرد. البته، برخی از پژوهشگران در توسعه روش تهیه و ساختن نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف، دامنه کاربرد آن را به تحلیل چشم‌اندازهای دیگر سیارات خاکی (برای مثال، کوه‌های المپوس مریخ ژو و همکاران (Zhu et al, 2021)، نیز گسترش داده‌اند. مزیت برتر تهیه نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف با ابزار SwathProfiler، ضمن سادگی در به‌کارگیری و کاربرپسند بودن آن، در این است که همه مراحل آن در محیط نرم‌افزار GIS و به‌طور خودکار انجام می‌شود. به طوری که، با استفاده از آن، به راحتی می‌توان نیمرخ‌های توپوگرافیکی متعدد و متفاوت را به همراه شاخص‌های مربوطه تهیه و استخراج کرد. ابعاد و مشخصات هر نیمرخ در این افزونه، به ویژگی‌های تعریف شده برای خطوط مبنایی که پایه اصلی در ترسیم و نمایش نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف هستند، بستگی تام دارد. ما در این پژوهش، افزونه SwathProfiler را در محیط نسخه ۱۰/۸

شیوه اجرا و پیاده‌سازی روش

ابزار جدید SwathProfiler، روشی نوین به‌صورت افزونه‌ای است که توسط پرز پنا و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017) در بستر Visual Basic.NET برنامه‌نویسی شده و به عنوان ابزاری بسیار کاربردی، برای اضافه شدن و ادغام با محیط نسخه ۱۰ نرم‌افزار بسیار قدرتمند شرکت Esri (یعنی، محیط GIS (ArcMap) توسعه و ارائه شده است. نامبردگان، این افزونه را با در نظر گرفتن دو ویژگی بسیار مهم طراحی کرده‌اند، نخست قابلیت «استفاده آسان» و دوم «نمایش مستقیم نتایج در درون نرم‌افزار GIS». همچنین، ورودی اصلی این افزونه، برپایه داده‌های رستری - مدل دیجیتالی ارتفاع (DEM)، بنا نهاده شده است. به‌طور کلی، از نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف - صرف نظر از روش تهیه و ساختن آن، می‌توان برای تحلیل‌های مورفولوژیکی و مورفوتکتونیک چشم‌اندازهای گوناگون سطح زمین استفاده

متغیر را متناسب با اهداف مطالعاتی خود، در پنجره ورودی تغییر دهد (شکل ۵ الف). پرز پنا و همکاران (Pérez-Peña et al, 2017) تاکید می‌کنند که، اندازه گام مشخص شده برای خط مبناء در همه خطوط موازی تعیین شده، دوباره محاسبه می‌شود تا از نمونه‌برداری با تعداد نقاط یکسان در طول تمام نیمرخ‌های سواف، اطمینان حاصل شود (شکل ۲). بنابراین، همان‌طور که در این پنجره مشخص است، کاربر می‌تواند مهم‌ترین پارامترهای موثر در استخراج نیمرخ‌های طولی (برای مثال، پهنای باند تعیین شده برای نیمرخ، اندازه گام نمونه‌برداری و تعداد خطوط ترسیم شده در پیرامون خط مبناء هر نیمرخ، که البته این دو مورد اخیر اختیاری هستند و در صورت عدم انتخاب یا تغییر، مقادیر پیش‌فرض‌ها اعمال می‌شوند) را تعیین و در برخی موارد مقادیر آن‌ها را متناسب با اهداف مطالعاتی خود تغییر دهد.

ArcGIS به کار گرفته‌ایم (شکل ۵). همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده‌است، افزونه SwathProfiler در پنجره ورودی خود با استفاده از یک DEM به عنوان منبع ارتفاع توپوگرافیکی، نیمرخ‌های سواف و معیارهای مرتبط با پدیده‌های برداری آن را، تولید می‌کند. در پنجره ورودی (شکل ۵ الف)، علاوه بر انتخاب داده‌های ورودی، می‌توان پهنای کل نیمرخ سواف را با در نظر گرفتن خطوط مبناء به صورت خطی یا منحنی نیز تعیین کرد. در حالت اولیه، برای هر خط مبناء (چه به صورت خطی یا منحنی)، یک نیمرخ سواف با ۵۰ خط موازی که در هر طرف خط مبنای آن ۲۵ خط ترسیم می‌شود، با برداشتن اندازه گام نمونه‌برداری به میزان ۱/۵ برابر اندازه پیکسل‌های مدل دیجیتالی ارتفاع در خط مبناء محاسبه می‌شود (Pérez-Peña et al, 2017). کاربر به راحتی می‌تواند مقادیر این



شکل ۵: افزونه SwathProfiler در محیط ArcMap. الف: در پنجره ورودی، کاربر می‌تواند کلاس عارضه نیمرخ، منبع ارتفاعی (DEM) اندازه گام نمونه‌برداری، تعداد خطوط برای هر نیمرخ را برای تهیه و ترسیم نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواف انتخاب کند. ب: پنجره خروجی، نیز همه نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواف ترسیم شده را نمایش می‌دهد. همچنین در این بخش، علاوه بر امکان انتخاب و اضافه شدن آیتم‌های گوناگون مربوط به هر شاخص و پارامتر بر روی نیمرخ‌های نمودار، می‌توان داده‌ها را ذخیره و از آن‌ها نیز خروجی گرفت. پ: در پنجره Properties، علاوه بر امکان تغییر رنگ و پهنای خطوط نیمرخ‌ها، می‌توان عنوان، فواصل و دیگر ویژگی‌های محورهای نمودار را نیز تغییر داد. نکته مهم در این پنجره، امکان اعمال و جایگزینی  $THi^*$  با  $THi$  در نوار نمایش پایین نمودار (نیمرخ قهوه‌ای رنگ) می‌باشد.

Fig. 5: SwathProfiler add-in in ArcMap. a: In the input window, the user can select the profile feature class, elevation source (DEM), sampling step size, and number of lines for each profile to prepare and plot the topographic swath profiles. b: The output window also displays all the plotted topographic swath profiles. Also, in this section, in addition to the ability to select and add various items related to each index and parameter on the profile graphs, data can be saved and output from them. c: In the Properties window, in addition to the ability to change the color and width of the profile lines, the title, intervals, and other properties of the graph axes can also be changed. An important point in this window is the ability to apply and replace  $THi^*$  with  $THi$  in the lower display bar of the graph (brown profile).

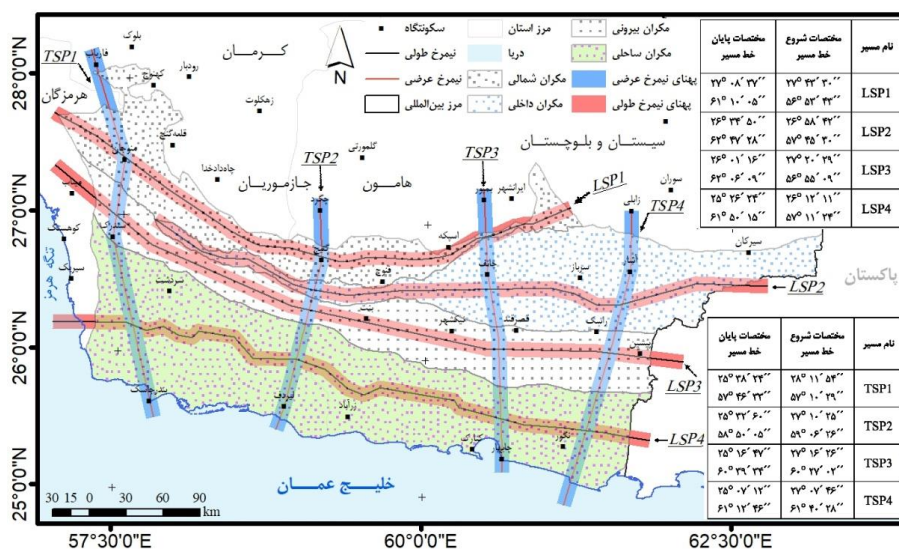


آن‌ها تاثیرگذار است. به‌طوری که مشاهده شد پهنای زیاد و کم به‌ترتیب در محو و اغراق‌آمیزسازی ناهمواری موثر هستند. در مقیاس منطقه‌ای که در این پژوهش کار شد، علیرغم مبانی نظری و هدف تعیین‌شده از سوی ارائه‌دهندگان روش برای کاربرد در مسیرهای خطی و منحنی، نتایج گویای عدم اجرای موفقیت‌آمیز نیمرخ‌ها در مسیرهایی بود که خط تعیین‌شده یا بیش از حد سینوسیته داشت یا به‌طور فاحشی دچار شکست تند و با زاویه زیاد بود. تست مقادیر متفاوت در دیگر موارد در این مقیاس، اختلاف فاحشی را نشان ندادند. در این پژوهش، در مجموع هشت مسیر اصلی برای ترسیم نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف و در دو جهت طولی - موازی و عرضی - عمود بر زون مکران تعیین شده است (شکل ۶ و جدول ۲). نیمرخ‌های طولی و عرضی توپوگرافیکی سوآف به ترتیب با کدیکتا یا علامت اختصاری  $^{16}LSP$  و  $^{17}TSP$  مشخص و از ۱ تا ۴ شماره‌گذاری شده‌اند. در نیمرخ‌های طولی، شماره ۱ تا ۴ به ترتیب از شمال به جنوب زیرزون‌های مکران شمالی، داخلی، بیرونی و ساحلی را شامل می‌شوند؛ اما، در نیمرخ‌های عرضی به‌ترتیب از چپ به راست - از باختر به خاور، شماره ۱ تا ۴ را دربر می‌گیرند (شکل ۶ و جدول ۲). در تهیه و ترسیم نیمرخ‌های توپوگرافیکی آن‌ها، مبنای ارتفاعی کار مدل دیجیتالی ارتفاع SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر بوده؛ همچنین، اندازه گام نمونه‌برداری از DEM و پهنای هر مسیر به ترتیب ۱۲,۰۰۰ متر (۶,۰۰۰ متر از مرکز خط تعیین‌شده به اطراف) و ۴۵ متر (متناسب با اندازه پیکسل DEM) گزینش شد. در گزینش مسیر نیمرخ‌های طولی - که موازی با روند اصلی زون مکران هستند، تلاش شده تا مسیر هر نیمرخ علاوه بر پوشش‌دادن امتداد گسل‌های اصلی، به‌گونه‌ای نیز در بخش مرکزی هر زیرزون امتداد یابند. همچنین، در تعیین مسیر نیمرخ‌های عرضی - که عمود بر زون مکران هستند، افزون بر آنکه مسیر هر نیمرخ از عرض زیرزون‌های مکران، گسل‌ها و تراست‌های مهم منطقه می‌گذرند، تلاش شده تا نقاط مسکونی نیز در طول مسیر قرار گیرند. به‌طورکلی، مسیرهای عرضی به‌گونه‌ای مورد گزینش قرار گرفتند تا بتوان به‌وسیله نیمرخ‌های توپوگرافیکی ترسیم شده در راستای آن‌ها، به‌طور بسیار آشکاری تأثیر فراخاست‌های زمین‌ساختی ناشی از فعالیت گسل‌های معکوس اصلی در ایجاد

شکل ۵ ب، پنجره مربوط به خروجی نیمرخ‌های سوآف برای خطوط ورودی که می‌توانند با استفاده از پنجره ورودی (شکل ۵ الف)، انتخاب شوند را نمایش می‌دهد. در این پنجره، علاوه بر نمایش نیمرخ‌های ترسیم‌شده برای همه خطوط موازی، نیمرخ‌های مربوط به مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین؛ مقادیر چارک نخست و سوم و نیز پستی‌وبلندی محلی (حداکثر ارتفاع - حداقل ارتفاع) محاسبه شده است. علاوه بر آن، انتگرال هیپسومتری عرضی نیز می‌تواند با انتخاب کاربر به بخش پایینی پنجره نمایش و در پایین نیمرخ‌های ترسیم شده، اضافه شود. همچنین، کاربر می‌تواند با مراجعه به بخش Properties، ویژگی‌های دیگر نمودار (ازجمله عنوان نمودار، رنگ‌ها و پهنای خطوط نیمرخ‌ها، تیک‌ها و فواصل میان مقادیر محورهای نمودار و دیگر موارد) را تغییر دهد یا انتگرال هیپسومتری عرضی بهبودیافته ( $THi^*$ ) را برای نمایش به‌جای انتگرال هیپسومتری عرضی ( $THi$ ) انتخاب کند. در پایان، می‌توان از نمودارهای تهیه شده، به‌طور دلخواه خروجی‌های مناسبی را در فرمت‌های گوناگون تهیه کرد. در فرایند انجام پژوهش حاضر، پیش از تهیه و ترسیم نهایی نیمرخ‌های توپوگرافیکی برای هر مسیر، به‌منظور ارزیابی میزان دقت و شناسایی خطاهای احتمالی در این روش، به‌طور آزمایشی و با رویکرد تصادفی در بخش‌های گوناگون منطقه با مدل‌های دیجیتالی ارتفاع در سه مقیاس (۹۰، ۳۰ و ۱۲/۵ متر)، پهنای باند نیمرخ، طول نیمرخ، اندازه گام نمونه‌برداری، تعداد خطوط متفاوت و در مسیرهایی به صورت خطی تا با میزان انحناهای مختلف، اقدام به بررسی‌های اولیه شد. برآیند این کار نشان‌دهنده تفاوت‌های معناداری در اثرگذاری میزان قدرت DEMs، پهنای و میزان انحناهای هر نیمرخ بود. به عنوان مثال، این نتایج نشان داد به هر میزان که قدرت تفکیک مکانی مدل‌های دیجیتالی ارتفاع کاهش یابد (برای مثال، ۹۰ متر) به‌طور مستقیم بر روی نتایج و نمای کلی نیمرخ‌های هر نمودار تاثیرگذار است. این درحالی بود که مدل ارتفاعی ۱۲/۵ متر به‌وضوح در آشکارسازی تغییرات جزئی‌تر بسیار کارآمدتر بود. ذکر این نکته ضروری است، در این مطالعه به‌دلیل عدم دسترسی و نبود پوشش سراسری زون مکران برای این مدل، از DEM-30m SRTM استفاده شده است. همچنین، نتایج نشان داد پهنای تعیین‌شده برای هر نیمرخ بر ویژگی پارامترهای

مرکزی زیرزون‌های مکران شمالی، داخلی، بیرونی و ساحلی را نشان خواهند داد. از میان مسیر نیمرخ‌های عرضی که عمود بر زون مکران - زیرزون‌ها، امتداد یافته‌اند، مسیرهای شماره ۲ و ۳ از میان همه زیرزون‌های مکران می‌گذرند؛ اما، مسیر شماره ۱ از سه زیرزون - مکران شمالی، بیرونی و ساحلی؛ و سرانجام مسیر شماره ۴ از زیرزون‌های مکران داخلی، بیرونی و ساحلی عبور می‌کند (شکل ۶ و جدول ۲).

تفاوت‌های ساختاری - مورفولوژیکی در زیرزون‌ها را شناسایی و تفسیر کرد. از سوی دیگر، مسیرهای طولی نیز به‌گونه‌ای طرح‌ریزی شدند تا از طریق آن‌ها بتوان تفاوت‌های محلی ناهمواری، صرفاً در هر زیرزون که عمدتاً ناشی از تأثیرگذاری سامانه‌های گسلی فرعی و منشعب شده از گسل‌های اصلی می‌باشند را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد (شکل ۲ و شکل ۶). در این راستا، مسیر نیمرخ‌های طولی شماره ۱ تا ۴ به ترتیب وضعیت ناهمواری‌های بخش



شکل ۶: موقعیت و پهناي مسیرهای طولی و عرضی تعیین‌شده برای ترسیم نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواًف در منطقه. حروف انگلیسی ایتالیک دارای زیرخط (LSP: مسیر نیمرخ‌های طولی و TSP: عرضی)، نشان‌دهنده نام مسیر تعیین‌شده برای هر نیمرخ است. برای اطلاعات بیشتر به متن و جدول ۲ مراجعه کنید.

Fig. 6: The location and width of the longitudinal and transverse paths designated for drawing the topographic swath profiles in the study area. Italicized English letters with underlines (LSP: Longitudinal Swath Profile and TSP: Transverse) indicate the name of the path designated for each profile. For more information, see the text and Table 2.

جدول ۲: برخی از مهم‌ترین مشخصات مربوط به مسیرهای تعیین‌شده برای تهیه و ترسیم نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواًف در زون مکران. برای اطلاعات بیشتر علاوه‌بر متن به شکل ۶ مراجعه شود.

Table 2: Some of the most important characteristics related to the routes determined for the preparation and drawing of topographic swath profiles in the Makran zone. For more information, refer to Figure 6, which provides additional details.

Route	Name	Route coordinates		Route Elevation (m)		Route length (km)	Main Faults	Structural zones along the route	Route settlement centers
		Starting point	End point	Starting point	End point				
Longitudinal, parallel to the Makran zone	LSP1	27° 43' 30'' 56° 53' 43''	27° 08' 37'' 61° 10' 05''	902	1144	463.22	Pip, Jiroft, Pashang, Rudan, Zendan-Minab	North Makran	Espakeh, Gotij, Manojan
	LSP2	26° 58' 42'' 57° 45' 30''	26° 34' 50'' 62° 47' 28''	1815	886	520.72	Pishamag, Kajeh, Pip, Bashakerd	Inner Makran	Pishin, Bent
	LSP3	27° 20' 29'' 56° 55' 09''	26° 01' 16'' 62° 06' 09''	28	361	550.17	Ghasr Ghand, Kahurakan, Jagin, Beshno, Sabzevaran, Zendan-Minab	Outer Makran	Mortan, Paroud, Toutan

Transverse, perpendicular to the Makran zone	LSP4	26° 12' 11'' 57° 55' 09''	25° 26' 24'' 61° 50' 15''	0	16	516.51	Muman, Zur, Getiv, Kashi, Sabz, Zendan- Minab	Coastal Makran	Nobandian, Bojeh, Kambo
	TSP1	28° 11' 54'' 57° 10' 29''	25° 38' 24'' 57° 46' 33''	947	0	306.56	Sabzevaran, Rudan, Bashakerd, Chah Khan, Makran	North Makran, Outer Makran, Coastal Makran	Faryab, Manojan, Bandar-e Jask
	TSP2	27° 10' 25'' 59° 06' 26''	25° 32' 60'' 58° 50' 05''	371	0	192.92	Karang, Bashakerd, Ghasr Ghand, Chah Khan, Lirdaf	North Makran, Inner Makran, Outer Makran, Coastal Makran	Chegerd, Gotij, Lirdaf
	TSP3	27° 16' 26'' 60° 27' 02''	25° 16' 47'' 60° 39' 34''	542	0	232.10	Bashakerd, Pip, Kajeh, Ghasr Ghand, Chah Khan, Muman	North Makran, Inner Makran, Outer Makran, Coastal Makran	Bampour, Chanf, Chabahar
	TSP4	27° 07' 46'' 61° 40' 28''	25° 07' 12'' 61° 12' 46''	1272	0	248.10	Chegerd, Zaboli, Bamposht, Padgan, Pishamag, Firuzabad, Ghasr Ghand, Chah Khan	Inner Makran, Outer Makran, Coastal Makran	Zaboli, Ashar, Beris

## بحث و نتایج

نمودارهای مربوط به هر یک از نیمرخ‌های توپوگرافیکی طول و عرضی سواً تعیین شده در زون مکران، در شکل ۷ و شکل ۸ ارائه شده‌اند. با هدف گویا کردن نیمرخ‌ها، فهم بهتر تغییرات و تحلیل دقیق‌تر یافته‌ها، بر روی همه نیمرخ‌های توپوگرافیکی ترسیم شده، تا حد امکان، اطلاعات مربوط به مناظر جغرافیایی - ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی نیز اضافه شده است. خط قرمز در بخش پایینی هر نیمرخ، نشان‌دهنده پستی‌وبلندی‌های محلی است. همان‌طور که در این شکل ۷ به‌روشنی دیده می‌شود، در همه نیمرخ‌های طولی، نیمرخ مربوط به پستی‌وبلندی‌های محلی از دامنه تغییرپذیری بسیار بالایی برخوردار بوده و مقادیر نسبتاً بالایی را نیز ثبت کرده‌اند. اما، این مهم، در نیمرخ‌های عمود بر مکران، دامنه تغییرپذیری و مقادیر نسبتاً پایین‌تری را نشان می‌دهند (شکل ۸). به‌طور دقیق‌تر، بالاترین میزان تغییرات و مقادیر در این نیمرخ‌ها، در نیمرخ عرضی شماره یک - که از سه زیرزون مکران شمالی، بیرونی و ساحلی می‌گذرد (شکل ۱ ب و جدول ۲)، به ثبت رسیده است. به‌طور کلی، دامنه تغییرپذیری و مقادیر نسبتاً بالای پستی‌وبلندی‌های محلی در این نمودارها،

گویای تاثیر مستقیم و برجسته دینامیک‌های درونی (انواع گسلش و ایجاد تراست‌های مهم و چین‌خوردگی‌ها) و بیرونی (به‌ویژه قدرت حفر جریان‌های رودخانه‌ای عظیم) است.

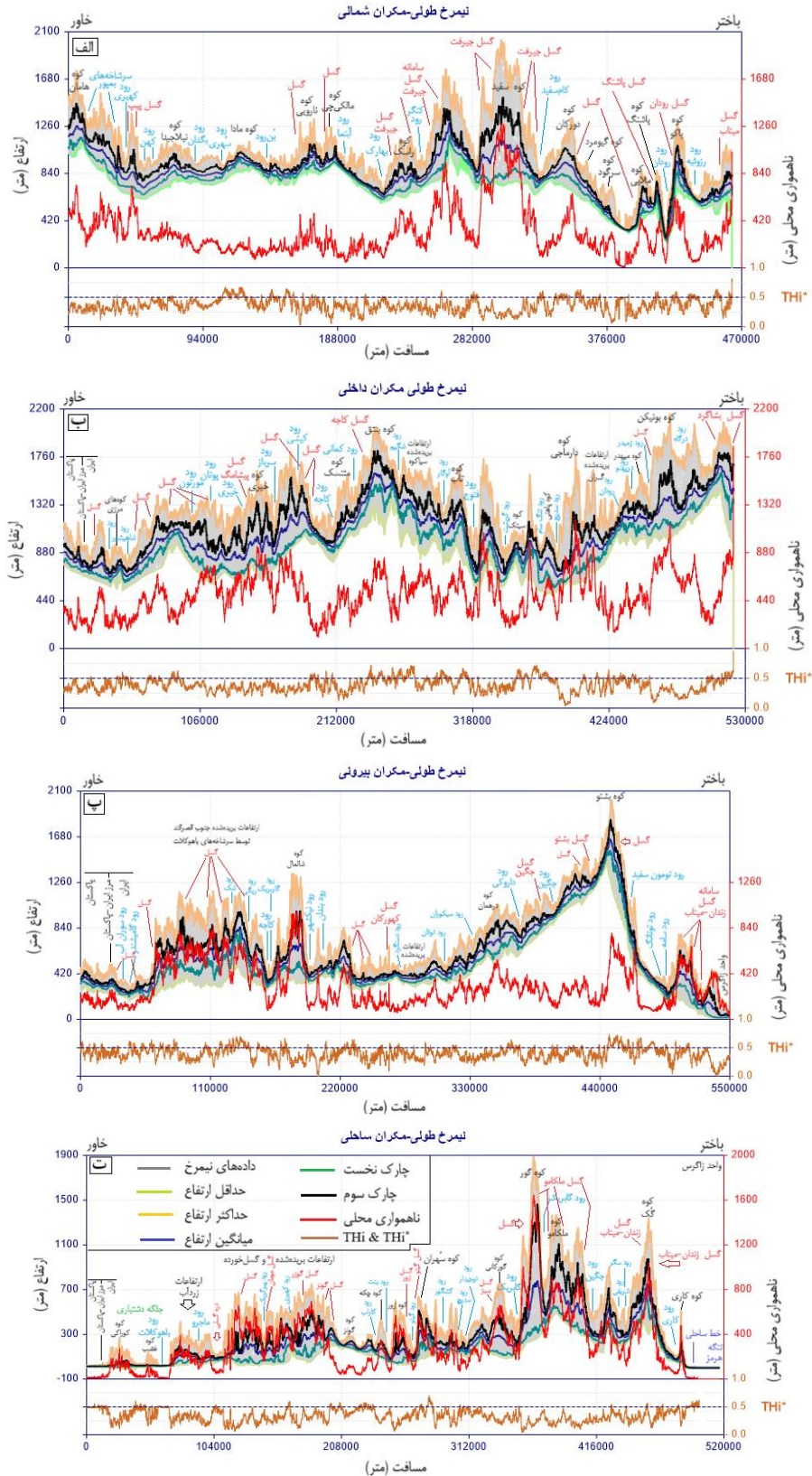
نیمرخ‌های توپوگرافیکی طولی سواً به‌طور کلی، نیمرخ‌های توپوگرافیکی طولی، ویژگی‌های قابل توجهی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، همه نیمرخ‌های طولی، درصد بسیار بالایی از میزان پستی‌وبلندی را که نشان‌دهنده وجود یک چشم‌انداز خشن کوهستانی در راستای اصلی کمربند مکران است، ثبت نموده‌اند. همچنین، با دقت در این نمودارها، می‌توان گونه‌ای از عدم تقارن توپوگرافیکی را در مسیر نیمرخ‌ها مشاهده کرد؛ به جز نمودار مربوط به مکران داخلی که به‌گونه‌ای حالتی از تقارن نسبی توپوگرافیکی را نمایش می‌دهد. در مجموع، بررسی کلی نمودارهای طولی، نشان می‌دهند که در زیرزون‌های مکران بیرونی و داخلی وضعیت توپوگرافیکی نسبتاً فشرده است؛ اما، در مکران شمالی و ساحلی از میزان فشرده‌گی و تراکم پستی‌وبلندی‌ها به سود گسترش سطوح پست و کم‌ارتفاع (منطبق بر واحد دره‌های گسترده، دشت و جلگه) کاسته می‌شود. با این وجود،

همچنین، مقادیر مربوط به شاخص میانگین ارتفاع در انطباق با مقادیر  $THi^*$ ، به مقدار حداقل آن نزدیک است. مطابقت مقادیر این دو شاخص، به روشنی نشانگر وجود یک چشم‌انداز نسبتاً بالغ در منطقه است. در نمودار مکران داخلی (شکل ۷ ب)، که مسیر نیمرخ طولی آن از فرازای ۱۸۱۵ متر در باختر، آغاز و به فرازای ۸۸۶ متر در خاور می‌رسد، حدود ۵۲۰/۷۲ کیلومتر درازا دارد (شکل ۶ و جدول ۲)؛ مقادیر شاخص  $THi^*$  در بیشتر طول مسیر، مابین ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ در نوسان بوده و تنها در چندین نقطه مقادیر بالاتر یا پایین‌تر از این محدوده را ثبت نموده است. بیشترین میزان این شاخص در بخش مرکزی نمودار و منطبق بر کوه بنتق و متاثر از گسل کاجه و نیز در ارتفاعات بریده شده سیاه‌کوه توسط رودها (با مقادیر بیش از ۰/۷) بوده؛ در حالی که، پایین‌ترین مقدار آن در بخش باختری مسیر - سمت راست نمودار، در محل برش عمقی و حفر شدید رود سدیچ به میزان کمتر از ۰/۰۶ ثبت شده است (جدول ۳). به‌طور کلی، مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر شاخص  $THi^*$  نیمرخ میانگین ارتفاع به حداکثر و با کاهش این شاخص، میانگین به حداقل ارتفاع نزدیک شده است. افزایش مقادیر شاخص  $THi^*$  در انطباق با تغییرات بالای نیمرخ پستی‌وبلندی‌های محلی، نقش فراخاست زمین‌ساختی ناشی از عملکرد گسل‌های اصلی و برش عمقی رودها (برای مثال، گسل کاجه و بشاگرد و رودهای سرباز، کاجه، سدیچ و غیره) در جوان‌سازی ناهمواری را برجسته می‌نماید. نیمرخ پستی‌وبلندی‌های محلی تغییرات نوسانی نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد و مقادیر حداقل و حداکثر ثبت شده برای آن به ترتیب ۱۰۰ و ۱۱۹۰ متر است. منحنی چارک نخست از ۵۵۰ تا ۱۶۱۰ متر نوسان نشان می‌دهد. روند کلی این منحنی در بیشتر طول مسیر پایین و نزدیک به حداقل ارتفاع می‌باشد، اما در چندین نقطه نیز متاثر از عملکرد گسل‌های مهم (برای مثال، کوه بنتق - گسل کاجه، کوه بونیکن و گسل بشاگرد) همراه با میانگین و چارک سوم به سوی حداکثر ارتفاع نزدیک شده است. روند کلی تغییرات نیمرخ چارک سوم (با دامنه نوسانی مابین ۶۹۰ تا ۱۸۱۰ متر) و میانگین ارتفاع (با دامنه نوسانی مابین ۶۵۰ تا ۱۶۸۰ متر)، در بیشتر طول مسیر نمودار، به سوی حداکثر ارتفاع (۲۱۵۰ متر منطبق بر کوه بونیکن) متمایل شده (شکل ۷ ب و جدول ۳) که به پیروی از دیگر

همچنان وضعیت پستی‌وبلندی‌های مکران شمالی نسبت به مکران ساحلی، از تراکم نسبی بالاتری برخوردار است (شکل ۷). مسیر نیمرخ طولی در مکران شمالی به‌عنوان کوتاه‌ترین مسیر موازی با زون مکران با درازای ۴۶۳/۲۲ کیلومتر، از فرازای ۹۰۲ متر در باختر، آغاز و با فرازای ۱۱۴۴ متر در خاور پایان می‌پذیرد (شکل ۶ و جدول ۲). نیمرخ پستی‌وبلندی‌های محلی در نمودار مکران شمالی (شکل ۷ الف)، با وجود دامنه نوسانی مابین ۱۳۰۰-۲۵ متر، وضعیت توپوگرافیکی و فراز و فرودهای نسبتاً ملایم و یکنواختی را در منطقه نشان می‌دهد؛ اما، در بخش‌هایی از خاور، مرکز و باختر مسیر به دلیل عملکرد گسل‌ها و برش عمقی رودها و تاثیر آن‌ها بر بلندی‌های پراکنده، مشاهده می‌شود که اوج‌هایی در وضعیت پستی‌وبلندی‌ها و به‌طور دقیق‌تر، شاخص حداکثر ارتفاع در نیمرخ را سبب شده‌اند. به‌طوری‌که حداقل و حداکثر ارتفاع به ترتیب در محل برش عمقی رود رودان و کوه سفید به میزان ۲۱۰ و ۲۲۰۰ متر مشاهده می‌شود (شکل ۷ الف و جدول ۳). همچنین، میانگین ارتفاع، در کم‌ترین مقدار خود کد ارتفاعی ۲۵۰ متر (منطبق بر رود رودان) و در بیشترین مقدار تحت‌تأثیر سامانه گسلی جیرفت، فرازای ۱۳۰۰ متری را ثبت کرده است. نیمرخ چارک‌های نخست و سوم به ترتیب دارای مقادیر حداقل ۲۱۰ و ۲۵۰ متر؛ و حداکثر ۱۱۹۰ و ۱۵۱۰ متر می‌باشند. در بیشتر طول مسیر مشاهده می‌شود که نیمرخ شاخص‌های چارک نخست و میانگین ارتفاع با نزدیک شدن به چارک سوم در مجموع به سوی حداکثر ارتفاع متمایل می‌شوند. در این نمودار، شاخص انتگرال هیپسومتری عرضی بهبودیافته ( $THi^*$ )، به جز در چند نقطه محدود - که عمدتاً بر محل گسل‌ها و برش عمقی رودها (برای مثال، سامانه گسلی جیرفت، میناب و گسل پاشنگ؛ کوه مادا، ملایی) منطبق است و مقادیر بیشتر از ۰/۵ را ثبت کرده، در بیشتر طول مسیر خود مقادیر پایین‌تر از ۰/۵ را نشان می‌دهد و عمدتاً مابین ۰/۲ تا ۰/۵ در نوسان است. بالاترین مقدار ثبت شده در محدوده سامانه گسلی میناب - زندان در حدود ۰/۸ است؛ این درحالی است که، در سه نقطه مشخص که بر ارتفاعات نیز منطبق است، مقدار  $THi^*$  تا حدود ۰/۰۳ (متأثر از عملکرد گسل در دامنه کوه نارویی) کاهش نشان می‌دهد؛ به طوری که، میانگین ارتفاع به حداقل آن نیز نزدیک می‌شود (شکل ۷ الف و جدول ۳).

شاخص‌های تشریح شده، گویای وجود یک چشم‌انداز جوان در حالت گذار است. مسیر نیمرخ طولی در مکران بیرونی، درازترین مسیر نیمرخ موازی با زون مکران با حدود ۵۵۰/۱۷ کیلومتر درازا می‌باشد که در نقطه شروع مسیر در باختر در جلگه ساحلی شمال تنگه هرمز تنها ۲۸ متر و در نقطه پایان در خاور تنها ۳۶۱ متر فرازا دارد (شکل ۶ و جدول ۲). نیمرخ پستی‌وبلندی‌های محلی در نمودار مکران بیرونی (شکل ۷ پ)، نیز میزان بالایی از تغییرات را در محدوده ارتفاعی ۵۰ تا ۱۰۰۰ متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار آشکار است، بیشترین میزان ارتفاعات در دو بخش باختری و خاوری مسیر، متمرکز شده؛ ولی در عین حال، فرازای بخش باختری، بیشتر است؛ به طوری که مقادیر حداکثر مربوط به پارامترهای حداقل، حداکثر و میانگین ارتفاع و چارک‌های نخست و سوم همگی در محدوده کوه و غسل بشنو و نیز دیگر غسل‌های واقع در این بخش از مسیر ثبت شده‌اند (شکل ۷ پ و جدول ۳). تغییرپذیری شاخص  $THi^*$  در طول این مسیر نیز تقریباً، روند مشابهی با مکران داخلی ثبت نموده است؛ با این تفاوت جزئی، که در این جا در سه نقطه بسیار مشخص، منحنی این شاخص به مقدار صفر رسیده است. با این حال، صرف‌نظر از فراز و فرودهای محلی، دامنه نوسانی آن مابین ۰/۲ تا ۰/۶ است. بالاترین میزان ثبت شده برای شاخص  $THi^*$  حدود ۰/۷۵ منطبق بر قله کوه بشنو و تحت‌تأثیر سامانه‌های گسلی بر آن است. اما، مناطقی که این شاخص به پایین‌ترین حد خود (صفر) رسیده، منطبق بر دامنه تاقدیس‌هایی است که غسل‌های مهم و اصلی بر آن عمل کرده است (برای مثال، دامنه خاوری کوه خاکو و غسل زندان - میناب (شکل ۷ پ)). در بیشتر طول مسیر نمودار مکران بیرونی، نیمرخ میانگین ارتفاع از حداقل آن دور شده و همراه با منحنی چارک سوم، به نیمرخ حداکثر ارتفاع نزدیک شده است. در این زیرزون نیز همانند دیگر بخش‌های مکران، انطباق مقادیر شاخص‌ها با هم، گویای وجود چشم‌اندازی جوان است که توسط آبراهه‌های گوناگون و عملکرد غسل‌های اصلی و به‌ویژه تراست‌های مهم، به شدت حفر شده و تحت‌تأثیر فراخاست قرار گرفته است. نکته بسیار مهم و قابل توجه در این نمودار که به طور آشکار مشاهده می‌شود، وجود یک عدم تقارن برجسته در بخش سمت راست نمودار - باختر مسیر، تحت‌تأثیر فعالیت

سامانه گسلی سبزوآران و زندان - میناب است (شکل ۷ پ). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تفاوت بسیار بارزی میان دو دامنه خاوری - باختری ارتفاعات این بخش ایجاد شده است. در دامنه خاوری ضمن عملکرد غسل‌های متعدد تراستی رو به شمال، رودهای مهم و اصلی نیز در حفر و برش عمقی آن اثرگذار بوده‌اند؛ در حالی که، دامنه باختری به شدت تحت‌تأثیر راندگی سامانه غسل‌های نامبرده قرار گرفته و دامنه‌ای پرشیب با اختلاف سطح قابل توجه ایجاد کرده است. درازای مسیر نیمرخ طولی در مکران ساحلی حدود ۵۱۶/۵۱ کیلومتر است و از خط ساحلی (فرازای ۰ متر) خاور تنگه هرمز در باختر به جلگه ساحلی شمال خلیج عمان با فرازای ۱۶ متر در خاور می‌رسد (شکل ۶ و جدول ۲). به‌طور کلی، نیمرخ پستی‌وبلندی‌های محلی در نمودار مکران ساحلی (شکل ۷ ت)، همچون دیگر نمودارهای منطقه مورد مطالعه، دامنه نوسانی نسبتاً بالایی را ثبت کرده (۱۵۰۰-۰ متر) و تفاوت آشکاری نیز میان دو بخش خاوری - باختری در آن دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که روند کلی منحنی پستی‌وبلندی‌های محلی و حداکثر ارتفاع به سوی باختر افزایش بارزی نشان می‌دهد، که تأییدکننده تراکم بیشتر ناهمواری در این بخش است (شکل ۷ ت و جدول ۳). در این نمودار، نیمرخ‌های میانگین ارتفاع و چارک سوم جز در دوسوی مسیر - که بر سطح جلگه‌های ساحلی منطبق است و با منحنی‌های دیگر شاخص‌ها روی هم قرار گرفته‌اند، به نیمرخ حداکثر ارتفاع نزدیک شده‌اند. این درحالی است که، نیمرخ چارک نخست در بیشتر طول مسیر، به حداقل ارتفاع نزدیک است و تنها در دو نقطه (برای مثال، در محل کوه گُک و غسل گیتو)، هم‌سو با نیمرخ میانگین ارتفاع و چارک سوم به سوی حداکثر ارتفاع میل پیدا کرده است. به‌طور کلی در نمودار مکران ساحلی، شاخص  $THi^*$  تغییرپذیری فراوانی صرفاً پایین‌تر از ۰/۵ را ثبت کرده و دامنه نوسانی آن غالباً مابین ۰/۵-۰/۲ بوده است. همچنین، مقادیر این شاخص تنها در چند بخش محدود از ۰/۵ بیشتر شده، به طوری که حداکثر مقدار آن منطبق بر کوه سُهران و تحت‌تأثیر غسل سُهران و گیتو مشاهده می‌شود، درحالی که کم‌ترین مقدار آن تحت‌تأثیر غسل و رود گابریک به مقدار ۰/۰۶ به ثبت رسیده است (شکل ۷ ت و جدول ۳).



شکل ۷: نمودار نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف در راستای مسیرهای طولی تعیین شده در زیرزون‌های مکران. برای آگاهی از موقعیت جغرافیایی هر زیرزون، به شکل ۱ ب؛ و مسیر هر نیمرخ، به شکل ۶ مراجعه کنید. مرزهای بین‌المللی در این نمودارها سندیت ندارد.

Fig. 7: Diagram of the topographic swath profiles along the longitudinal paths determined in the Makran subzones. For information on the geographical location of each subzone, see Figure 1b; and the path of each profile, see Figure 6. International boundaries are not documented in these diagrams.

جدول ۳: مهم‌ترین مقادیر کمی پارامترهای مربوط به نیمرخ‌های توپوگرافیکی طولی و عرضی سوآف در منطقه مورد مطالعه.

Table 3: Key quantitative values for longitudinal and transverse topographic swath profiles in the study area.

Parameter	Value	Longitudinal topographic profiles				Transverse topographic profiles				
		LSP1	LSP2	LSP3	LSP4	TSP1	TSP2	TSP3	TSP4	
THi*	Max.	0.8	0.73	0.75	0.72	0.8	0.7	0.75	0.75	
	Dominant trend	0.2-0.5	0.25-0.5	0.2-0.6	0.2-0.5	0.25-0.5	0.25-0.5	0.25-0.5	0.25-0.6	
	Min.	0.03	0.06	0.0	0.06	0.0	0.0	0.03	0.0	
Elevation (m)	Max.	High	2200	2150	2000	1900	1460	1380	1790	1800
	Low	300	750	70	0	0	0	0	0	
Mean	High	1300	1680	1650	790	1000	1150	1560	1550	
	Low	250	650	30	0	0	0	0	0	
Min.	High	1110	1500	1480	500	700	1010	1350	1490	
	Low	210	500	10	0	0	0	0	0	
Third quartile (m)	Max.	1510	1810	1850	1470	1300	1200	1700	1600	
	Min.	250	690	50	0	0	0	0	0	
First quartile (m)	Max.	1190	1610	1550	650	890	1100	1500	1510	
	Min.	210	550	30	0	0	0	0	0	
Local Relief (m)	Max.	1300	1190	1000	1550	980	480	800	600	
	Min.	25	100	50	0	0	0	0	0	

به مقادیر مثبت و بالای  $t$  و کم‌تر از  $0.05$  برای آیتیم  $Pr > |t|$  میان این پارامترها، اثر مثبت و افزایشی میان آن‌ها نیز مشخص می‌شود؛ به طوری که، علاوه بر وجود یک همبستگی قوی و مثبت میان آن‌ها، رابطه در فاصله اطمینان  $0.99\%$  معنی‌دار می‌باشد (جدول ۵). علاوه بر آن، میان پارامترهای چارک سوم و میانگین ( $r = 0.988$ )، چارک نخست و سوم ( $r = 0.988$ )، چارک سوم و حداکثر ارتفاع ( $r = 0.988$ ) و چارک سوم با حداقل ارتفاع ( $r = 0.988$ ) نیز وجود یک رابطه و همبستگی بالا با معناداری در فاصله اطمینان  $0.95\%$ ، مشاهده می‌شود (جدول ۵).

در جدول ۴ رابطه میان پارامترهای هفت‌گانه مستخرج از نیمرخ‌های طولی و عرضی مورد مطالعه (جدول ۳) ارائه شده است. برپایه یافته‌های پژوهش و همان‌طور که در این جدول نمایان است، مشاهده می‌شود که پارامتر چارک نخست به شدت با میانگین و حداقل ارتفاع همبستگی دارد. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ ) برای چارک نخست با میانگین و حداقل ارتفاع به ترتیب  $0.997$  و  $0.993$  به دست آمده است. از سوی دیگر، یافته‌ها گویای وجود یک همبستگی بسیار قوی دیگری میان پارامترهای میانگین و حداقل ارتفاع ( $r = 0.988$ ) است (جدول ۴). از این رو، با توجه

جدول ۴: ماتریس ضریب همبستگی پیرسون برای پارامترهای مربوط به نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف در مسیرهای مورد مطالعه.

Table 4: Pearson's correlation coefficient matrix for parameters related to the topographic swath profiles in the studied routes.

Parameter	Max. elevation	Min. elevation	Mean elevation	3rd quartile	1st quartile	Local relief	THi*
Max. elevation	1						
Min. elevation	0.401	1					
Mean elevation	0.446	0.988	1				
3rd quartile	0.741	0.727	0.791	1			
1st quartile	0.391	0.993	0.997	0.749	1		
Local relief	0.635	-0.413	-0.330	0.225	-0.395	1	
THi*	0.190	-0.052	0.002	0.003	-0.031	0.222	1

Bolded numbers = significance at 99% confidence level.

Italic numbers = significance at 95% confidence level.

جدول ۵: مقادیر کمی ضرایب مربوط به ضریب همبستگی پیرسون برای پارامترها و متغیرهای مستخرج از نیمرخ‌های مورد مطالعه.

Table 5: Quantitative values of the coefficients related to Pearson's correlation coefficient for the parameters and variables extracted from the studied swath profiles.

Parameter	r	T	Pr >  t	Significance (at confidence level)
1st quartile with Mean elevation	0.997	30.616	< 0.0001	99%
1st quartile with Min. elevation	0.993	20.654	< 0.0001	99%
Mean with Min. elevation	0.988	15.599	< 0.0001	99%
3rd quartile with Mean elevation	0.791	3.162	0.020	95%
1st and 3rd quartile	0.749	2.770	0.032	95%
3rd quartile with Max. elevation	0.741	2.765	0.035	95%
3rd quartile with Min. elevation	0.727	2.590	0.041	95%

نیمرخ‌های توپوگرافیکی عرضی سواًف

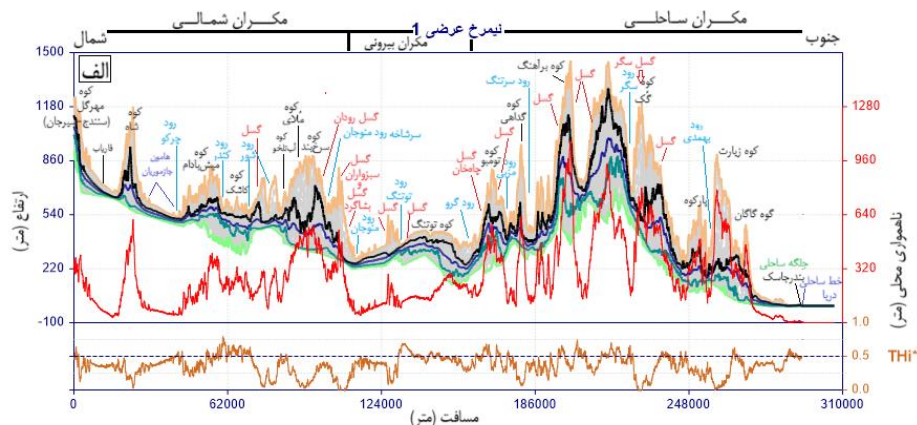
نیمرخ‌های توپوگرافیکی عرضی نیز ویژگی‌ها و تفاوت‌های بسیار جالبی را در وضعیت توپوگرافیکی منطقه نشان می‌دهند (شکل ۸). به طور کلی، همه نیمرخ‌های عمود بر مکران، به طور آشکار نامتقارن هستند. دلیل اصلی نامتقارن بودن آن‌ها، تاثیر عملکرد گسل‌ها و تراست‌های اصلی موجود در منطقه (از جمله: تراست چاه‌خان، قصرقند، بشاگرد و بمپور) است (شکل ۱ ب، شکل ۸). بنابراین، همان‌طور که این نیمرخ‌ها نشان می‌دهند، به راحتی می‌توان زیرزون‌های مکران و مرزبندی آن‌ها را مشاهده کرد. نیمرخ توپوگرافیکی عرضی شماره یک در شکل ۸ الف نشان داده شده است. مسیر این نیمرخ که از حوالی فاریاب با فرازای ۹۴۷ متر آغاز و به خط ساحلی در بندرجاسک (فرازای ۰ متر) می‌رسد، با حدود ۳۰۶/۵۶ کیلومتر درازا به عنوان درازترین مسیر در بین نیمرخ‌های عرضی می‌باشد (شکل ۶ و جدول ۲). مسیر این نمودار، در گوشه باختری منطقه تعیین شده و سه زیرزون اصلی مکران شمالی، بیرونی و ساحلی را پوشش داده است (شکل ۶، جدول ۲). در این نمودار، نیمرخ‌های شاخص پستی‌وبلندی‌های محلی و  $THi^*$  تغییرات بسیار بالایی را نشان می‌دهند؛ به طوری که دامنه نوسان آن‌ها به ترتیب مابین ۰-۹۸۰ متر و ۰-۰/۸، بالاترین مقادیر را در بین چهار نمودار عرضی، به خود اختصاص داده است (جدول ۳). نیمرخ شاخص  $THi^*$  با وجود داشتن فراز و فرودهای فراوان و ثبت دامنه نوسانی مابین صفر تا ۰/۸، عمدتاً در طول مسیر خود پایین‌تر از ۰/۵ در افت‌وخیز بوده و تنها در چند محل، نقاط اوج بالاتر از ۰/۵ را نشان می‌دهد. همه این نقاط اوج، در انطباق با جوان‌سازی ناهمواری متأثر از موج برشی رودها و فعالیت تراست‌های اصلی این بخش از مکران بوده است. برای مثال، بالاترین مقدار ثبت شده برای این شاخص، حدود ۰/۸ و در دامنه جنوب‌خاوری کوه کاشک - جایی که گونه‌ای از انطباق مضاعف در مسیر برش عمودی رود کُندر با محل فعالیت گسل کاشک رخ داده، مشاهده می‌شود (شکل ۸ الف). نیمرخ چارک نخست هرچند در محدوده ۰-۸۹۰ متر در نوسان بوده، اما در حالت کلی به حداقل ارتفاع نزدیک‌تر است. همچنین، این منحنی در بخش‌هایی از نمودار که ناهمواری از فعالیت رودها و گسل‌های اصلی متأثر و بریده شده و شاخص  $THi^*$  نیز مقادیر بالاتر از ۰/۵ را نشان

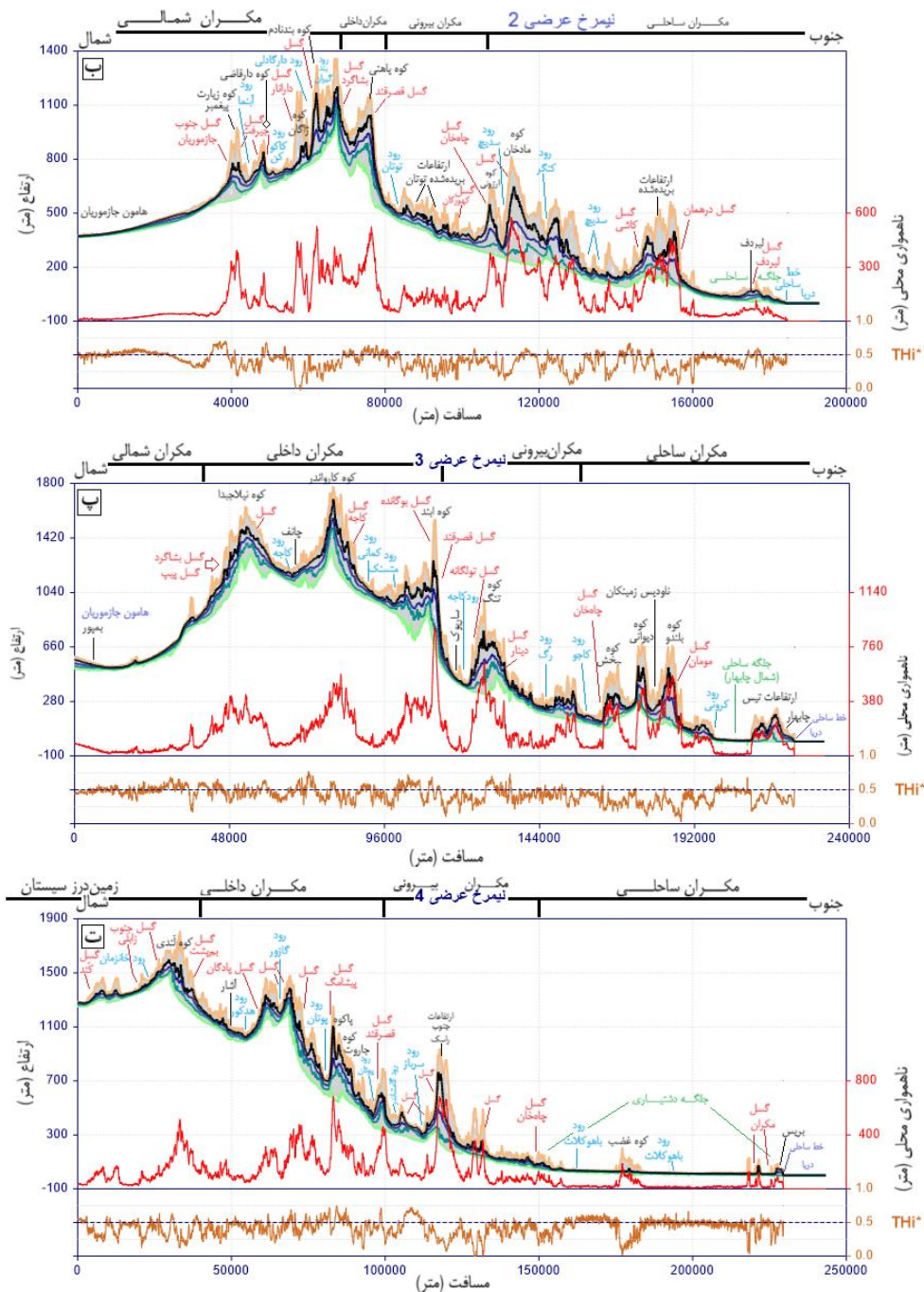
می‌دهد، به همراه منحنی شاخص‌های چارک سوم (۱۳۰۰ متر) و میانگین ارتفاع (۱۰۰۰ متر)، به نیمرخ حداکثر (۱۴۶۰ متر) نزدیک شده است (جدول ۳). نقطه اوج این همراهی، در کوه برآهنگ، در انطباق مسیر رود و گسل سگر و همچنین در مسیر رود کاشک در دامنه جنوبی کوه میش‌بادام، دیده می‌شود (شکل ۸ الف). از سوی دیگر، حداکثر فرازای ناهمواری محلی (۹۸۰ متر) نیز در این محل ثبت شده است. نکته چشمگیر دیگر در این نمودار، نزدیک شدن همه نیمرخ‌ها در دو ناحیه از مسیر است که بر سطح هموار بخش باختری هامون جازموریان و جلگه ساحلی در محدوده جاسک، منطبق می‌باشد. مسیر نیمرخ عرضی شماره دو که از چگرد با فرازای ۳۷۱ متر تا خط ساحلی در محدوده لیردف کشیده شده و از میان همه زیرزون‌های مکران می‌گذرد، به‌عنوان کوتاه‌ترین مسیر تنها در حدود ۱۹۲/۹۲ کیلومتر درازا دارد (شکل ۶ و جدول ۲). نمودار نیمرخ عرضی این مسیر در شکل ۸ ب ارائه شده است. نیمرخ پستی‌وبلندی‌های محلی این نمودار هرچند تغییرات نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد، اما در مقایسه با دیگر نیمرخ‌های عرضی، از دامنه نوسان و مقادیر پایین‌تری برخوردار است (۰-۴۸۰ متر) (شکل ۸ ب و جدول ۳). این نمودار، به روشنی تفاوت عمده ساختاری و مورفولوژیکی چشم‌انداز مکران را در راستای شمال - جنوب، برجسته می‌کند. به‌طور کلی، این نمودار را می‌توان برپایه روند و الگوی نیمرخ‌ها، به سه بخش متفاوت تقسیم کرد. تقریباً در یک‌سوم طول مسیر نمودار، منحنی تمام شاخص‌ها همچون نمودار عرضی شماره یک، در مناطق پست و هموار در دوسوی مسیر - نمودار، بر روی هم قرار گرفته‌اند؛ به طوری که هم‌گویای مناطق پست و کم‌ارتفاع (دشت و جلگه ساحلی) و هم نشان‌دهند تأثیر گسل‌های تراستی (برای مثال، قصرقند) است. اما، در یک‌سوم دیگر مسیر که عمدتاً بر مرز زیرزون‌ها منطبق است، منحنی نیمرخ‌ها هرچند به هم بسیار نزدیک شده‌اند؛ ولی در مجموع، از حداقل ارتفاع دور شده و به حداکثر آن نزدیک گشته‌اند. در یک‌سوم دیگر نمودار نیز، میانگین ارتفاع با نزدیک شدن به چارک سوم، به سوی حداکثر ارتفاع متمایل شده‌اند. مقادیر شاخص  $THi^*$  نیز در مجموع، مابین صفر تا ۰/۷ نوسان نشان می‌دهد، اما غالباً نوسان این نیمرخ، در مقادیر پایین‌تر از ۰/۵ ثبت شده‌اند. بالاترین و پایین‌ترین مقدار این شاخص



عرضی شماره دو داشته است. شکل ۸ ت، نمودار عرضی شماره چهار را که از زیرزون‌های مکران داخلی، بیرونی و ساحلی می‌گذرد، نشان داده است. این نمودار از جنوب واحد زمین‌درز سیستان و با درازایی در حدود ۲۴۸/۱۰ کیلومتر، از حوالی زابلی با فرازای ۱۲۷۲ متر شروع و تا خط ساحلی در ناحیه بریس امتداد یافته است (شکل ۶ و جدول ۲). نیمرخ شاخص  $THi^*$ ، در زیرزون‌های مکران داخلی و بیرونی نسبت به مکران ساحلی، تغییرپذیری بیشتر با دامنه نوسانی بالاتری را ثبت کرده است. در این دو بخش از مکران، عمده نوسان نیمرخ  $THi^*$  پایین‌تر از ۰/۵ ولی با دامنه‌ای متغیر از صفر تا ۰/۷۵ همراه بوده است؛ اما، در جلگه ساحلی، غالباً در نزدیکی ۰/۵ در نوسان بوده است (شکل ۸ ت). الگوی رفتاری نیمرخ‌های حداقل، حداکثر و میانگین ارتفاع به همراه چارک‌های نخست و سوم، در این نمودار نیز همچون نمودارهای عرضی شماره دو و سه بوده است. در اینجا نیز، منحنی میانگین ارتفاع همراه با چارک سوم در هر جایی که ناهمواری توسط رودها و گسل‌ها تحت‌تأثیر قرار گرفته‌اند، به سوی حداکثر ارتفاع منحرف شده‌اند. مقادیر حداکثر برای شاخص‌های حداقل ارتفاع (۱۴۹۰ متر)، میانگین (۱۵۵۰ متر) و حداکثر (۱۸۰۰ متر)، چارک نخست (۱۵۱۰ متر) و سوم (۱۶۰۰ متر) منطبق بر کوه لندی می‌باشند (شکل ۸ ت). نکته چشمگیر و بسیار مهم در این نمودار، الگوی رفتاری نیمرخ‌ها در بخش سمت راست نمودار (بخش جنوبی مسیر) با میزان پستی‌وبلندی بسیار ناچیز منطبق با جلگه ساحلی در منطقه دشتیاری است. این یافته، همانند الگوی رفتاری نیمرخ‌های شکل ۱۲ (و به‌ویژه نمودار P03) مقاله پرز پنا و همکاران (Pérez- Peña et al, 2017) است.

به ترتیب تحت‌تأثیر فعالیت سامانه گسل جنوب جازموریان در دامنه شمالی کوه زیارت پیغمبر و در محل کوه ژاگان در محدوده مکران شمالی رخ داده‌اند (شکل ۸ ب و جدول ۳). در شکل ۸ پ نمودار عرضی شماره سه نشان داده شده است. مسیر این نمودار با داشتن حدود ۲۳۲/۱۰ کیلومتر درازا، از میان چهار زیرزون اصلی مکران می‌گذرد و فاصله میان شهرهای بمپور تا چابهار را پوشش می‌دهد. فرازای آغاز مسیر آن از ۵۴۲ متر در شمال به خط ساحلی در محدوده چابهار ختم می‌شود (شکل ۶ و جدول ۲). نیمرخ‌های این نمودار به گونه‌ای الگویی و تبیین، عدم تقارن و تفاوت‌های توپوگرافیکی و ارتفاعی منشور برافزایشی مکران را در بخش مرکزی ایرانی آن، نشان می‌دهد (شکل ۸ پ). به عبارت دیگر، در نیمه سمت چپ این نمودار، تفاوت بارز ارتفاع و حجم توده کوهستانی مکران به‌طرز چشمگیری نمایان شده است. منحنی شاخص‌های پستی‌وبلندی‌های محلی و  $THi^*$  در این نمودار تغییرپذیری بالایی را ثبت کرده‌اند. به‌طور کلی، مقادیر  $THi^*$  عمدتاً حول خط ۰/۵ (و به‌ویژه پایین‌تر از آن) در نوسان بوده و دامنه‌ای از ۰/۰۳ تا ۰/۷۵ را نشان می‌دهد. در این نمودار تحت‌تأثیر سامانه‌های گسلی و در محل کوه‌ها و ارتفاعات منطقه منحنی چارک نخست و میانگین ارتفاع به همراه چارک سوم به‌طور بارزی به سوی حداکثر ارتفاع نزدیک شده‌اند. اوج این همراهی در محل کوه کارواندر رخ داده است، جایی که همه مقادیر حداکثر ثبت شده برای پارامترهای حداقل ارتفاع (۱۳۵۰ متر)، حداکثر (۱۷۹۰ متر) و میانگین (۱۵۶۰ متر)، چارک نخست (۱۵۰۰ متر) و سوم (۱۷۰۰ متر) در آن مشاهده می‌شود (شکل ۸ پ و جدول ۳). در مجموع، ویژگی‌های این نمودار برپایه روند و الگوی نیمرخ‌های دیگر شاخص‌های آن، رفتاری مشابه نمودار





شکل ۸: نمودارهای مربوط به نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف در راستای مسیرهای عرضی تعیین شده و عمود بر زون مکران. برای آگاهی از مسیر هر نیمرخ، به شکل ۶ مراجعه کنید.

Fig. 8: Diagrams of the topographic swath profiles along the designated transverse paths and perpendicular to the Makran zone. For information on the path of each profile, see Figure 6.

محیط ArcMap بسته نرم‌افزاری ArcGIS 10.8 استفاده شد. برای این منظور، در مجموع در دو راستای طولی و عرضی در زون مکران، هشت مسیر برای تهیه و ترسیم نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف، تعیین و تعریف شد. چهار مسیر موازی، در راستای بخش میانی هر زیرزون امتداد

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور بررسی وضعیت کلی ژئومورفولوژی زمین‌ساخت و تجزیه و تحلیل الگوهای توپوگرافیکی میان مدت تا درازمدت بخش ایرانی منشور برآزایشی مکران، به‌طور ویژه از افزونه SwathProfiler

یافته و چهار مسیر عمودی نیز عرض زیرزون‌های مکران را پوشش داده‌اند. سپس، با تهیه و ترسیم نیمرخ‌های توپوگرافیکی سوآف برای هر مسیر، مقادیر مربوط به شاخص‌های هفت‌گانه (برای اطلاعات بیشتر به بخش روش‌شناسی و شکل ۴ مراجعه شود) بررسی و تشریح شدند. به‌طورکلی، یافته‌های این مطالعه، تاثیر بالای فرایندهای درونی - زمین‌ساخت و بیرونی - فرسایش را در تحول و تکامل توپوگرافیکی ناهمواری‌های منشور برافزایشی مکران، برجسته کرد. به عبارت دیگر، بررسی روند تغییرات پارامترهای مربوط به منحنی نیمرخ‌های مورد مطالعه (برای مثال، وجود همبستگی قوی و شدید میان مقادیر پارامترهای مربوط به چارک نخست و سوم با پارامترهای مربوط به حداکثر، حداقل و میانگین ارتفاع در فاصله اطمینان بالای ۹۵٪ (شکل ۷، شکل ۸، جدول ۴ و جدول ۵))، به روشنی نقش فرایندهای درونی زمین در قالب فعالیت‌های زمین‌ساختی به صورت تداوم چین‌خوردگی و فراخاست فعال ناشی از فشردگی و کوتاه‌شدگی زون مکران را نشان دادند. از سوی دیگر، بررسی داده‌ها و مقادیر کمی مربوط به پارامترهای مستخرج از منحنی نیمرخ‌های توپوگرافیکی موازی و عمود با زون مکران، نشان از نوعی هم‌گرایی یا همبستگی میان مقادیر بالا و نزدیک به ۱ در شاخص  $THi^*$  با میانگین ارتفاع و چارک سوم دارند؛ به طوری که، در بیشتر مناطق مرتفع (کوه‌ها و تاقدیس‌های) کنترل‌شده توسط گسل‌ها به‌ویژه تراس‌ها یا متأثر از موج برش عمقی رودها، منحنی آن‌ها به‌سوی حداکثر ارتفاع متمایل شده است (برای مثال، کوه مادا، دورکان و ملایی در مکران شمالی، کوه تاب و بنتق (متأثر از گسل کاجه) در مکران داخلی، کوه بشنو و شالمال در مکران بیرونی و کوه سهران (متأثر از گسل سهران و گیتو) در مکران ساحلی (شکل ۷ و جدول ۳)؛ کوه‌های میش‌بادام، کاشک، برآهنگ و زیارت در مسیر عرضی ۱، زیارت پیغمبر و دارقازی در مسیر عرضی ۲، کارواندر و تنگ در مسیر عرضی ۳ و پاکوه و جاروت در مسیر عرضی ۴ (شکل ۸ و جدول ۳)). درواقع، وجود این همبستگی و هم‌گرایی گویای تحول ناهمواری‌ها بر اثر تداوم فعالیت نیروهای زمین‌ساختی به ویژه فراخاست، نقش دینامیک‌های بیرونی به صورت برش عمقی رودها به‌ویژه طی دوره‌های مرطوب کواترنری که در قالب جریان‌های

رودخانه‌ای عظیم در ایجاد و توسعه پستی‌وبلندی‌های محلی تا به امروز در جریان بوده و نیز وجود یک مجموعه ناهمواری نسبتاً جوان در کل پهنه مورد مطالعه است. به طوری که، الگوی کلی توپوگرافیکی آن در جهت سازگاری با نرخ‌های بالاتر فراخاست زمین‌ساختی ناشی از فعالیت گسل‌ها و تراس‌های اصلی و مهم در منطقه هنوز به تعادل پایدار خود نرسیده، بلکه دچار جوان‌سازی شده و چشم‌انداز در حالتی از گذار قرار دارد. از سوی دیگر، وجود پستی‌وبلندی‌های محلی و تغییرپذیری بالا در نیمرخ‌های همه نمودارهای طولی و عرضی، به‌عنوان یک شاخص مناسب برای نمایش سرزمین‌های بریده شده و جوان‌شدن ناهمواری در یک کمربند کوهستانی فعال به‌شمار می‌آید. این یافته‌ها با نتایج حقی پور (Haghipour et al, 2012) مبنی بر وجود چین‌خوردگی فعال در مکران از حداقل ۱۳۰ هزار سال پیش تاکنون و اثبات اینکه تغییر شکل و فراخاست زمین‌ساختی چشم‌اندازهای منطقه طی کواترنری تاکنون صرفاً محدود به گوه ساحلی و فراساحلی مکران نیست، هم‌خوانی بالایی را نشان می‌دهد. نامبرندگان همچنین خاطر نشان می‌کنند که چین‌خوردگی و نرخ کوتاه‌شدگی مرتبط با آن به‌طور کاملاً همگن در پهنه گسترده‌ای از منطقه مکران توزیع شده‌اند که نشان‌دهنده توسعه ساختاری نسبتاً پیوسته و واکنش گوه تغییرشکل دهنده است. مطالعات پیشین گویای تداوم فعالیت‌های زمین‌ساختی در زون مکران در پی هم‌گرایی میان صفحه عربی و اوراسیا هستند. پژوهشگران بر پایه داده‌های ژئودتیک نرخ هم‌گرایی آن را در راستای شمال به جنوب در خلیج عمان، حدوداً ۲۶ میلی‌متر در سال (Masson et al, 2005) و در حد فاصل چابهار و بزمان تقریباً  $0.1 \pm 8$  میلی‌متر در سال اندازه‌گیری کرده‌اند (Vernant et al, 2005; Masson et al, 2004). همچنین، پیچ و همکاران (Page et al, 1979)، ویتا فینزی (Vita-Finzi, 1975)، فرس (Frs, 1975) با مطالعه بر روی تراس‌های دریایی مرتفع در راستای سواحل مکران (برای مثال، تراس‌های جنوب کنارک با فرازای ۲۴۶ متر بالاتر از تراز دریا)، بر فرایند فراخاست آن‌ها در کواترنری تأکید نموده‌اند. برخی از این مطالعات (برای مثال، Page et al, 1999; Reyss et al, 1979) نرخ فراخاست در این منطقه را در حدود ۰/۲ میلی‌متر در سال تخمین زده‌اند. بنابراین،

یافته‌های پژوهش حاضر مبنی بر تداوم فراخاست زمین‌ساختی و تأثیر مستقیم آن بر تحول توپوگرافیکی ناهمواری‌ها و وجود یک چشم‌انداز جوان و در حالت گذار در مکران، با چنین مطالعاتی مطابقت بالایی نشان می‌دهد. از سوی دیگر، چنانچه معیار ارزیابی فعالیت نسبی زمین‌ساخت بر میزان فراوانی زمین‌لرزه‌ها و پراکنش کانون‌های سطحی آن‌ها نهاده شود، بخش ایرانی منشور برآزایشی مکران منطقه‌ای پویا به شمار می‌آید. این موضوع به روشنی در یافته‌های مربوط به نیمرخ‌های توپوگرافیکی تشریح شده در بخش پیشین و الگوهای کلی چشم‌انداز در مسیر آن‌ها مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است. این یافته‌ها با نتایج مطالعه گورابی و امامی (Goorabi and Emami, 2017) که با بررسی داده‌های زمین‌لرزه‌های پایین‌تر از ۵ ریشتر طی بازه ۲۰۱۶-۱۹۰۰ میلادی در زون مکران، به این نتیجه رسیدند که بیشتر کانون‌های سطحی این زمین‌لرزه‌ها در باختر منطقه و شمال‌باختری حوضه جگین واقع شده، اما زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالاتر عموماً در خاور منطقه و در حوضه باهوکلالت مشاهده می‌شوند، هم‌خوانی دارد. بنابراین، با استناد به یافته‌های پژوهش حاضر و دیگر مطالعات پیشین مورد اشاره، مشخص می‌شود که بخش ایرانی منشور برآزایشی مکران از لحاظ فعالیت‌های زمین‌ساختی همچنان پویا بوده و دارای جنبش‌های متعدد نوزمین‌ساختی است. با این حال، اشاره به این نکته نیز ضروری است که در مجموع بخش خاوری منشور برآزایشی مکران (در پاکستان) نسبت به بخش باختری آن (در ایران) از پویایی بالاتر و جنبش‌های نوزمین‌ساختی بیشتری برخوردار است. به گونه‌ای که گزارش‌های پیشین حاکی از وجود لرزه‌خیزی کم‌تر مکران باختری نسبت به مکران خاوری است (Byrne et al, 1992). همچنین، برپایه مطالعات انجام شده پیشین (Penney et

al, 2017) مشخص شده است که در نیمه خاوری مکران، زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالاتر و ژرفای متوسط بیشتری ثبت شده‌اند. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی و در یک مقیاس منطقه‌ای، هم در بخش ایرانی منشور برآزایشی مکران و هم در کل پهنه آن، میزان پویایی و فعالیت‌های نوزمین‌ساختی از باختر به خاور - از تنگه هرمز به سوی کراچی، افزایش نشان می‌دهد. در پایان، لازم به گفتن است، تحلیل‌های توپوگرافیکی سریع انجام شده در این مطالعه؛ اهمیت و سودمندی نیمرخ‌های توپوگرافیکی سواف را در تجزیه و تحلیل ناهمواری‌های مناطق کوهستانی در یک مقیاس منطقه‌ای، برجسته کرد. از سوی دیگر، تهیه و استخراج این نیمرخ‌ها، بینش مناسبی در زمینه شناخت، تفسیر و تحلیل الگوهای توپوگرافیکی در بخش ایرانی منشور برآزایشی مکران در ارتباط با عوامل کنترل‌گر درونی - زمین‌ساخت و بیرونی - فرسایش، ارائه داد. از این‌رو، با توجه به تجربه به دست آمده در این مطالعه، پیشنهاد می‌شود در مطالعات دیگر - خواه در این منطقه، خواه در دیگر مناطق ایران زمین، برای بررسی دقیق‌تر نتایج و تحلیل‌های مقایسه‌ای با یافته‌های این پژوهش - که در مقیاس منطقه انجام شده است، مقیاس کاری در محدوده‌های کوچک‌تر - محلی یا حوضه‌ای تمرکز یابند. همچنین، با در پیش گرفتن چنین رویکردی می‌توان در گزینش پهنای نیمرخ‌های توپوگرافیکی و دیگر پارامترهای منحنی‌های نیمرخ‌ها متفاوت عمل کرده و مبنایی برای تحلیل‌های تطبیقی و مقایسه‌ای فراهم شود.

### سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

### پانویس

- 1-Quartile (Q1 - Q3)
- 2-Topographic Swath Profile
- 3-Minab-Sabzevaran-Nayband
- 4-Chaman-Ornach-Nal
- 5-Sistan Suture Zone (SSZ)
- 6-Murray Ridge
- 7-Tectonic Mélanges
- 8-Tortonian Olistostrome
- 9-Signed or oriented distances

- 10-Quartile (Q1 - Q3)
- 11-Hypsometric Integral (HI)
- 12-Transverse Hypsometric Integral (THi)
- 13-Relative Local Relief (RRL)
- 14-Weight Factor (wi)
- 15-Relative Relief (r/R)
- 16-Longitudinal Swath Profile (LSP)
- 17-Transverse Swath Profile (SPT)

## References

- Alaei-Taleghani, M., 2007. Geomorphology of Iran. Ghoomes Publishing, Tehran (In Persian).
- Andreani, L., Stanek, K.P., Gloaguen, R., Krentz, O. and Domínguez-González, L., 2014. DEM-based analysis of interactions between tectonics and landscapes in the Ore Mountains and Eger Rift (East Germany and NW Czech Republic). *Remote Sensing*, v. 6(9), p. 7971-8001.
- Arian, M., 2013. Physiographic-tectonic zoning of Iran's sedimentary basins. *Open Journal of Geology*, v. 3(3), p. 169-177.
- Ascione, A., Aucelli, P.P., Cinque, A., Di Paola, G., Mattei, G., Ruello, M. and Valente, E., 2021. Geomorphology of Naples and the Campi Flegrei: Human and natural landscapes in a restless land. *Journal of Maps*, v. 17(4), p. 18-28.
- Azañón, J.M., Galve, J.P., Pérez-Peña, J.V., Giaconia, F., Carvajal, R., Booth-Rea, G. and Roldán, F.J., 2015. Relief and drainage evolution during the exhumation of the Sierra Nevada (SE Spain): Is denudation keeping pace with uplift? *Tectonophysics*, v. 663, p. 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.015>
- Back, S. and Morley, C.K., 2016. Growth faults above shale–Seismic-scale outcrop analogues from the Makran foreland, SW Pakistan. *Marine and Petroleum Geology*, v. 70, p. 144-162.
- Bagheri, S. and Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: new geological data, relationships and tectonic implications. *Tectonophysics*, v. 451(1-4), p. 123-155.
- Baoying, Y., 2016. The Geomorphologic and geological characteristics of China Qinling Mountain based on DEM. *Earth Sciences*, v. 5(6), p. 104-110.
- Barbero, E., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Marroni, M., Catanzariti, R. and Pandolfi, L., 2020a. The Ganj Complex reinterpreted as a Late Cretaceous volcanic arc: Implications for the geodynamic evolution of the North Makran domain (southeast Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 195, 104306.
- Barbero, E., Delavari, M., Dolati, A., Vahedi, L., Langone, A., Marroni, M. and Saccani, E., 2020b. Early Cretaceous Plume–Ridge Interaction Recorded in the Band-e-Zeyarat Ophiolite (North Makran, Iran): new constraints from petrological, mineral chemistry, and geochronological data. *Minerals*, v. 10(12), 1100.
- Barbero, E., Di Rosa, M., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Zaccarini, F. and Marroni, M., 2023. Deformation history and processes during accretion of seamounts in subduction zones: the example of the Durkan Complex (Makran, SE Iran). *Geoscience Frontiers*, v. 14(2), 101522.
- Barbero, E., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Catanzariti, R. and Marroni, M., 2021. The western Durkan Complex (Makran Accretionary Prism, SE Iran): A Late Cretaceous tectonically disrupted seamounts chain and its role in controlling deformation style. *Geoscience Frontiers*, v. 12(3), 101106-1.
- Barbero, E., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Di Rosa, M. and Marroni, M., 2025. A review of Mesozoic geodynamic evolution of the North Makran (SE Iran): A tale of a Neo-Tethyan ocean vanished due to two coexisting subduction zones. *Gondwana Research*, v. 141, p. 74-101.
- Barrier, E., Vrielynck, B., Brouillet, J.F. and Brunet, M.F., 2018. Paleotectonic reconstruction of the Central Tethyan Realm. *Tectonono-sedimentary-palinspastic maps from Late Permian to Pliocene*.
- Baulig, H., 1926. Sur une méthode d'analyse altimétrique appliquée à la Bretagne, B. Assoc. Geogr. Fr, v. 10, p. 7-9.
- Bayer, R., Chery, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson, F. and Bellier, O., 2006. Active deformation in Zagros—Makran transition zone inferred from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, v. 165(1), p. 373-381.
- Burbank, D.W. and Anderson, R.S., 2012. *Tectonic geomorphology* (2nd ed.), Chichester: Wiley-Blackwell.
- Burg, J.P., 2018. Geology of the onshore Makran accretionary wedge: Synthesis and tectonic interpretation. *Earth-Science Reviews*, v. 185, p. 1210-1231. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.011>
- Burg, J.P., Bernoulli, D., Smit, J., Dolati, A. and Bahroudi, A., 2008. A giant catastrophic mud-and-debris flow in the Miocene Makran. *Terra Nova*, v. 20(3), p. 188-193.
- Burg, J.P., Dolati, A., Bernoulli, D. and Smith, J., 2013. Structural style of the Makran tertiary accretionary complex in SE Iran. In *Lithosphere Dynamics and Sedimentary Basins: The Arabian Plate and Analogues*, Frontiers in Earth Sciences, Al Hosani, K., Roure, F., Ellison, R., Lokier, S., (Eds), Springer: Heidelberg, Germany, p. 239-259.
- Byrne, D.E., Sykes, L.R. and Davis, D.M., 1992. Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 97(B1), p. 449-478.
- Chen, S., Chevalier, M.L. and Li, H., 2024. Tectonic and climatic controls on topographic spatial variability across the Pamir Plateau and implications for drainage evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 276, 106333. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2024.106333>
- D'Agostino, N., Jackson, J.A., Dramis, F. and Funicello, R., 2001. Interactions between

- mantle upwelling, drainage evolution and active normal faulting: an example from the central Apennines (Italy). *Geophysical Journal International*, v. 147(2), p. 475-497.
- Delcaillau, B., Deffontaines, B., Floissac, L., Angelier, J., Deraumont, J., Souquet, P. and Lee, J.F., 1998. Morphotectonic evidence from lateral propagation of an active frontal fold; Pakuashan anticline, foothills of Taiwan. *Geomorphology*, v. 24(4), p. 263-290.
- Dercourt, J.E.A., Zonenshain, L.P., Ricou, L.E., Kazmin, V.G., Le Pichon, X., Knipper, A.L. and Biju-Duval, B., 1986. Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. *Tectonophysics*, v. 123(1-4), p. 241-315.
- Dolati, A., 2010. Stratigraphy, structure geology and low-temperature thermochronology across the Makran accretionary wedge in Iran. PhD. thesis, ETH Zurich.
- Dolati, A. and Burg, J.P., 2013. Preliminary fault analysis and paleostress evolution in the Makran Fold-and-Thrust Belt in Iran. In *Lithosphere dynamics and sedimentary basins: The Arabian Plate and analogues*, p. 261-277. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fielding, E., Isacks, B., Barazangi, M. and Duncan, C., 1994. How flat is Tibet?. *Geology*, v. 22(2), p. 163-167.
- Forte, A.M. and Whipple, K.X., 2019. Short communication: The Topographic Analysis Kit (TAK) for TopoToolbox. *Earth Surface Dynamics*, v. 7(87-95). <https://doi.org/10.5194/esurf-7-87-2019>.
- Frs, N.L.F., 1975. From Musandam to the Iranian Makran. *Geographical Journal*, v. 141, p. 55-58.
- Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J.M., Azañón, J.M., Pérez-Peña, J.V., Pérez-Romero, J. and Villegas, I., 2012. Geomorphic evidence of active tectonics in the Sierra Alhamilla (eastern Betics, SE Spain). *Geomorphology*, v. 145, p. 90-106.
- Gioia, D., Corrado, G., Amodio, A.M. and Schiattarella, M., 2024. Uplift rate calculation based on the comparison between marine terrace data and river profile analysis: A morphotectonic insight from the Ionian coastal belt of Basilicata, Italy. *Geomorphology*, v. 447, 109030. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109030>
- Goorabi, A. and Emami, K., 2017. Neotectonics influences on morphological variations of Makran costal basins, SE Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, v. 6(1), p. 74-89 (In Persian).
- Goorabi, A., Zamanzadeh, S.M., Yamani, M. and Pirani, P., 2020. Evaluation and comparison of fractal and fuzzy quantitative methods efficiency in analysis of northwest Zagros tectonic situation. *Spatial Planning and Geomatics*, v. 24(4), p. 29-67 (In Persian).
- Grohmann, C.H., 2004. Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R. *Computers & Geosciences*, v. 30(9-10), p. 1055-1067.
- Grohmann, C.H., 2005. Trend-surface analysis of morphometric parameters: a case study in southeastern Brazil. *Computers & geosciences*, v. 31(8), p. 1007-1014.
- Haghipour, N., Burg, J.P., Kober, F., Zeilinger, G., Ivy-Ochs, S., Kubik, P.W. and Faridi, M., 2012. Rate of crustal shortening and non-Coulomb behaviour of an active accretionary wedge: The folded fluvial terraces in Makran (SE, Iran). *Earth and Planetary Science Letters*, v. 355, p. 187-198.
- He, C., Rao, G., Yang, R., Hu, J., Yao, Q. and Yang, C.J., 2019. Divide migration in response to asymmetric uplift: Insights from the Wula Shan horst, North China. *Geomorphology*, v. 339, p. 44-57.
- Hergarten, S., Robl, J. and Stüwe, K., 2014. Extracting topographic swath profiles across curved geomorphic features. *Earth Surface Dynamics*, v. 2(1), p. 97-104. <https://doi.org/10.5194/esurf-2-97-2014>
- Irاندoust, M.A., Priestley, K. and Sobouti, F., 2022. High-resolution lithospheric structure of the Zagros collision zone and Iranian Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 127(11), e2022JB025009.
- Keller, E.A. and Pinter, N., 2002. *Active Tectonics Earthquake, Uplift, and Landscape* (2<sup>nd</sup> Ed.). Prentice Hall Publisher. New, Jersey.
- Kirby, E. and Whipple, K.X., 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of structural geology*, v. 44, p. 54-75.
- Kopp, C., Fruehn, J., Flueh, E.R., Reichert, C., Kukowski, N., Bialas, J. and Klaeschen, D., 2000. Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data. *Tectonophysics*, v. 329(1-4), p. 171-191.
- Lv, L., Wang, L., Li, C., Li, H., Wang, X. and Wang, S., 2020. Formation mechanism for upland low-relief surface landscapes in the Three Gorges region, China. *Remote Sensing*, v. 12(3899). <https://doi.org/10.3390/rs12233899>
- Mansouri, R. and Fotoohi, S., 2021. The Relative Evaluation of Active Neotectonic Activities in the Kateh Pifak Anticline; Eyvan-e Qarb, Ilam. *Geography and Environmental Studies*, v. 10(39), p. 55-72. 20.1001.1.20087845.1400.10.39.4.0 (In Persian).
- Mansouri, R., Fotoohi, S. and Sarbazi, Z., 2023. Application of Geomorphic Indices in Evaluating Active Neotectonic Activities in Bayeh Anticline; Eyven-e Qarb, Ilam. *Ilam Culture*, v. 23(76-77), p. 39-61.

- 10.22034/FARHANG.2023.169583 (In Persian).
- Masson, F., Chéry, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F. and Ghafory-Ashtiani, M., 2005. Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data. *Geophysical Journal International*, v. 160(1), p. 217-226.
- McCall, G.J.H. and Kidd, R.G.W., 1982. The Makran, Southeastern Iran: the anatomy of a convergent plate margin active from Cretaceous to Present. Geological Society, London, Special Publications, v. 10(1), p. 387-397.
- Mitchell, S.G. and Montgomery, D.R., 2006a. Influence of a glacial buzzsaw on the height and morphology of the Cascade Range in central Washington State, USA. *Quaternary Research*, v. 65(1), p. 96-107.
- Mitchell, S.G. and Montgomery, D.R., 2006b. Polygenetic topography of the Cascade Range, Washington state, USA. *American journal of science*, v. 306(9), p. 736-768.
- Moghadam, H.S., Arai, S., Griffin, W.L., Khedr, M.Z., Saccani, E., Henry, H. and Ghorbani, G., 2022. Geochemical variability among stratiform chromitites and ultramafic rocks from Western Makran, South Iran. *Lithos*, v. 412, 106591.
- Mohammadi, A., Burg, J.P., Winkler, W., Ruh, J. and von Quadt, A., 2016. Detrital zircon and provenance analysis of Late Cretaceous–Miocene onshore Iranian Makran strata: Implications for the tectonic setting. *Bulletin*, v. 128(9-10), p. 1481-1499.
- Molin, P., Fubelli, G., Nocentini, M., Sperini, S., Ignat, P., Grecu, F. and Dramis, F., 2012. Interaction of mantle dynamics, crustal tectonics, and surface processes in the topography of the Romanian Carpathians: A geomorphological approach. *Global and planetary change*, v. 90, p. 58-72.
- Molin, P., Pazzaglia, F.J. and Dramis, F., 2004. Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, Sila massif, Calabria, southern Italy. *American journal of science*, v. 304(7), p. 559-589.
- Montgomery, D.R., 2001. Slope distributions, threshold hillslopes, and steady-state topography. *American Journal of science*, v. 301(4-5), p. 432-454.
- Omrani, H., Moazzen, M., Oberhänsli, R. and Moslempour, M.E., 2017. Iranshahr blueschist: subduction of the inner Makran oceanic crust. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 35(4), p. 373-392.
- Ouayah, M., Namous, M., Ourribane, M., Elaloui, A., Krimissa, S., Eloudi, H. and Ziadi, K., 2021. Assessment of relative tectonic activity using morphotectonic analysis in the Central High Atlas, Demnate Region, Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 14(9), 813 p.
- Page, W.D., Alt, J.N., Cluff, L.S. and Plafker, G., 1979. Evidence for the recurrence of large-magnitude earthquakes along the Makran coast of Iran and Pakistan. *Tectonophysics*, v. 52(1-4), 533-547.
- Penney, C., Copley, A. and Oveisi, B., 2015. Subduction tractions and vertical axis rotations in the Zagros–Makran transition zone, SE Iran: The 2013 May 11 M w 6.1 Minab earthquake. *Geophysical Journal International*, v. 202(2), p. 1122-1136.
- Penney, C., Tavakoli, F., Saadat, A., Nankali, H.R., Sedighi, M., Khorrami, F. and Priestley, K., 2017. Megathrust and accretionary wedge properties and behaviour in the Makran subduction zone. *Geophysical Journal International*, v. 209(3), p. 1800-1830.
- Pérez-Peña, J.V., Al-Awabdeh, M., Azañón, J.M., Galve, J.P., Booth-Rea, G. and Notti, D., 2017. SwathProfiler and NProfiler: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. *Computers & Geosciences*, v. 104, p. 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.008>
- Pérez-Peña, J.V., Azañón, J.M. and Azor, A., 2009a. CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences*, v. 35(6), p. 1214-1223.
- Pérez-Peña, J.V., Azañón, J.M., Azor, A., Delgado, J. and González-Lodeiro, F., 2009b. Spatial analysis of stream power using GIS: SLk anomaly maps. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 34(1), p. 16-25.
- Pérez-Peña, J.V., Azañón, J.M., Booth-Rea, G., Azor, A. and Delgado, J., 2009c. Differentiating geology and tectonics using a spatial autocorrelation technique for the hypsometric integral. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 114 (2), p. 22-41.
- Pérez-Peña, J.V., Azor, A., Azañón, J.M. and Keller, E.A., 2010. Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*, v. 119(1-2), p. 74-87.
- Pike, R.J. and Wilson, S.E., 1971. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, v. 82(4), p. 1079-1084.
- Pirani, P., Goorabi, A., Zamanzadeh, S.M. and Yamani, M., 2022. Analysis of the Effect of Tectonics and Erosion on the Evolution of Northwestern Zagros Landscapes Using Topographic Swath Profiles. *Environmental Erosion Research Journal*, v. 12(4), p. 79-100 (In Persian).
- Pirnia, T., Saccani, E., Torabi, G., Chiari, M., Goričan, Š. and Barbero, E., 2020. Cretaceous tectonic evolution of the Neo-Tethys in Central

- Iran: Evidence from petrology and age of the Nain-Ashin ophiolitic basalts. *Geoscience Frontiers*, v. 11(1), p. 57-81.
- Priestley, K., Sobouti, F., Mokhtarzadeh, R.A., Irandoust, M., Ghods, R., Motaghi, K. and Ho, T., 2022. New constraints for the on-shore Makran subduction zone crustal structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 127(1), e2021JB022942.
- Rehak, K., Strecker, M.R. and Echtler, H.P., 2008. Morphotectonic segmentation of an active forearc, v. 37–41 S, Chile. *Geomorphology*, v. 94(1-2), p. 98-116.
- Reiners, P.W., Ehlers, T.A., Mitchell, S.G. and Montgomery, D.R., 2003. Coupled spatial variations in precipitation and long-term erosion rates across the Washington Cascades. *Nature*, v. 426(6967), p. 645-647.
- Reyss, J.L., Pirazzoli, P.A., Haghpor, A., Hatte, C. and Fontugne, M., 1999. Quaternary marine terraces and tectonic uplift rates on the south coast of Iran. In: Stewart, I.S., Vita-Finzi, C. (Eds.), *Coastal Tectonics*, Geological Society, London, Special Publications, v. 146(1), p. 225-237.
- Riquelme, R., Martinod, J., Hérail, G., Darrozes, J. and Charrier, R., 2003. A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics*, v. 361(3-4), p. 255-275.
- Robl, J., Hergarten, S. and Stüwe, K., 2008. Morphological analysis of the drainage system in the Eastern Alps. *Tectonophysics*, v. 460(1-4), p. 263-277.
- Roy, A., Patel, P.P. and Sen, A., 2025. Unravelling litho-structural and tectonic influences on geomorphic and river longitudinal profile character in the Brahmani River Basin of eastern India. *Geomorphology*, v. 471, 109574.
- Royden, L. and Taylor Perron, J., 2013. Solutions of the stream power equation and application to the evolution of river longitudinal profiles. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 118(2), p. 497-518.
- Scotti, V.N., Molin, P., Faccenna, C., Soligo, M. and Casas-Sainz, A., 2014. The influence of surface and tectonic processes on landscape evolution of the Iberian Chain (Spain): Quantitative geomorphological analysis and geochronology. *Geomorphology*, v. 206, p. 37-57.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG bulletin*, v. 52(7), p. 1229-1258.
- Struth, L., Garcia-Castellanos, D., Viaplana-Muzas, M. and Vergés, J., 2019. Drainage network dynamics and knickpoint evolution in the Ebro and Duero basins: From endorheism to exorheism. *Geomorphology*, v. 327, p. 554-571.
- Telbisz, T., Kovács, G., Székely, B. and Szabó, J., 2013. Topographic swath profile analysis: A generalization and sensitivity evaluation of a digital terrain analysis tool. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 57(4), p. 485-513. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0110>
- Tricart, J. and Cailleux, A., 1958. *Cours de Geomorphologie I: Geomorphologie Structurale*. C.D.U., Paris.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F. and Chéry, J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, v. 157(1), p. 381-398.
- Vita-Finzi, C., 1975. Quaternary deposits in the Iranian Makran. *Geographical Journal*, v. 141, p. 415-420.
- Willett, S.D., McCoy, S.W., Perron, J.T., Goren, L. and Chen, C.Y., 2014. Dynamic reorganization of river basins. *Science*, v. 343(6175), 1248765.
- Wobus, C.W., Whipple, K.X. and Hodges, K.V., 2006. Neotectonics of the central Nepalese Himalaya: Constraints from geomorphology, detrital  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology, and thermal modeling. *Tectonics*, v. 25(4), p. 1-18.
- Yousefi-Bavil, A. and Yousefi-Bavil, K., 2019. SCPAT: a MATLAB-based toolbox for analysing swath characteristic profiles. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 12. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4437-6>
- Zelenin, E., Bachmanov, D., Garipova, S., Trifonov, V. and Kozhu-rin, A., 2022. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): The Ontology and Design behind the Continental-Scale Dataset. *Earth System Science Data*, v. 14(10), p. 4489-4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>
- Zhou, C., Tan, X., Liu, Y. and Shi, F., 2024. Quantifying the migration rate of drainage divides from high-resolution topographic data. *Earth Surface Dynamics*, v. 12, p. 433-448. <https://doi.org/10.5194/esurf-12-433-2024>
- Zhu, Y., Dortch, J.M., Massey, M.A., Haneberg, W.C. and Curl, D., 2021. An intelligent swath tool to characterize complex topographic features: Theory and application in the Teton Range, Licking River, and Olympus Mons. *Geomorphology*, v. 387, 107778. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107778>