



Normalized Longitudinal River Profiles Pattern Analysis in Selected Basins of the Makran Accretionary Prism

Reza Mansouri ^{1*}

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 17 July 2025

Revised: 10 October 2025

Accepted: 11 October 2025

Available Online:

11 October 2025

Keywords:

Normalized Longitudinal River Profile

Drainage network analysis

Concavity Index (CT)

Transient landscape

Active Tectonics

Tectonic Geomorphology

ABSTRACT

Longitudinal river profiles are among the most widely used approaches for analyzing short-term landscape responses. Compared to conventional longitudinal profiles, normalized longitudinal profiles provide enhanced interpretability and more effectively highlight slope breaks. This study investigates the geomorphic response patterns of streams within selected basins located in the Makran Accretionary Prism, using DEM derived normalized longitudinal profiles generated by the NProfiler plugin. A total of 37 streams, including five main channels and 32 tributaries, were selected and analyzed. The results indicate that all main channels and most tributaries exhibit concave longitudinal profiles, as reflected by positive concavity parameter (CT) values. The CT values for the main channels range from 29.89% to 52.47%, whereas those for the tributaries vary between 1.38% and 64.39%. Among the main channels, the maximum and minimum CT values correspond to the Kahir and Jagin rivers, respectively, while among the tributaries they are associated with B6 and J1. The most linear and most convex longitudinal profiles in the study area are observed in the J1 (CT = 1.38%) and B7 (CT = -11.36%) channels, respectively. The dominance of concave profiles suggests an erosion-dominated landscape in a state of relative dynamic equilibrium. Only two profiles display negative concavity values, indicating a tendency toward convexity. These convex profiles are primarily associated with small sub-basins, headwater reaches, and intensely faulted zones in the northern Makran highlands within the Bahukalat and Jagin basins, reflecting a transient landscape state likely linked to localized tectonic uplift.

* Corresponding author: Reza Mansouri

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

How to cite this article: Mansouri, R. (2026). Normalized Longitudinal River Profiles Pattern Analysis in Selected Basins of the Makran Accretionary Prism. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(1), 23-46. <https://doi.org/10.22067/geoe.h.2025.94962.1603>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Early morphometric methods from the 1980s (Pérez-Peña et al., 2017) presented computational challenges for large-scale analyses, limiting investigations to localized areas with restricted datasets (e.g., Mackin, 1948; Hack, 1957; Seeber & Gornitz, 1983; Merriots & Vincent, 1989). However, in recent times, there have been significant advances in the scientific discussion over the suitability and meaning of some of these topographic parameters (Keller & Pinter, 2012; Wobus et al., 2006a; Goldrick & Bishop, 2007; Pérez-Peña, Azañón & Azor, 2009a; Kirby & Whipple, 2012; Royden & Taylor Perron, 2013). The advancement of ArcGIS software and the widespread availability of digital elevation models (DEMs) with varying spatial resolutions have significantly transformed and evolved spatial analysis methodologies for geomorphic landscapes. As highlighted by several researchers (Kirby & Whipple, 2001; Grohmann et al., 2007; Zang et al., 2011; Pérez-Peña et al., 2017), the aforementioned factors facilitate the analysis of remote regions exhibiting significant geological and tectonic importance. Consequently, they contribute to a more comprehensive understanding of the dynamic processes operating within these areas.

The drainage pattern of rivers contains unique information about the past and present tectonic regime. The longitudinal profile of a river is sensitive to the ongoing process of uplift and can be used to recognize active structures (Seeber & Gornitz, 1983). The extraction and analysis of longitudinal river profiles from digital elevation models has become a prevalent methodology in contemporary tectonic geomorphology. This approach facilitates the evaluation of drainage network dynamics to a range of environmental controlling factors. In recent years, geoscientists have increasingly employed topographic and drainage network analyses as effective tools within the field of tectonic geomorphology (e.g., Pérez-Peña et al., 2009a; 2009b; 2010; Kirby and Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012; Royden and Taylor Perron, 2013; Willet et al., 2014; Pérez-Peña et al., 2017). Longitudinal profiles are a standard tool used by geoscientists to analyze drainage network patterns. This is predicated on the understanding that, within a stable system, erosion occurs in equilibrium with uplift (Seeber & Gornitz, 1983), and that rivers continuously adjust their longitudinal profiles in response to the climatic, lithological, and tectonic characteristics of their respective regions. Alterations in topographic and drainage network configurations can serve as indicators of shifts in underlying controlling factors (e.g., Seeber & Gornitz, 1983; Rigon et al., 1996; Jackson et al., 1996; Brookfield, 1998; Pérez-Peña et al., 2009a, 2010; Kirby & Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012). In this context, the comparison of normalized longitudinal river profiles can elucidate variations in river gradients, which are typically governed by the aforementioned factors. River gradients, which govern the rate of erosion, are generally adjusted to correlate varying discharge rates with corresponding erosion rates. Consequently, significant slope alterations in river profiles may suggest the presence of active faults intersecting these rivers (Seeber & Gornitz, 1983). Longitudinal river profiles (Pérez-Peña et al., 2017) are now recognized as a highly effective method for analyzing the short-term responses of geomorphic landscapes to recent active geological, lithological, and climate change processes. Therefore, drainage network patterns can be utilized to infer the initial phases of landscape evolution and their corresponding responses.

Material and Methods

This research aims to investigate and assess the geomorphic response patterns of rivers within select basins Bahukalat, Kahir, Sedich, Gabrik and Jagin situated in the Iranian sector of the Makran Accretionary Prism (MAP). The study will analyze these patterns in relation to environmental controlling factors, employing normalized longitudinal river profile extraction (Pérez-Peña et al., 2017) via the NProfiler plugin, which utilizes DEM data. Furthermore, topographic and geological data were sourced from topographic maps (scales of 1:250,000 and 1:50,000) and geological maps (scales of 1:100,000 and 1:250,000), respectively. The NProfiler plugin for ArcGIS offers researchers a streamlined and efficient implementation. This plugin enables the extraction of key information from longitudinal profiles within

the ArcGIS environment, significantly enhancing their subsequent analysis and interpretation (Pérez-Peña et al., 2017). The NProfiler Add-In facilitates the visualization of normalized longitudinal river profiles, along with their associated morphometric indices, including normalized concavity (CT), maximum concavity (Cmax), and length of maximum concavity (Lmax). This extension facilitates spatial analysis of drainage networks within the ArcMap environment.

Results and Discussion

In this study, 37 streams were selected and evaluated, comprising 5 main and 32 secondary streams. The longitudinal profiles exhibit notable characteristics. The data indicate that the main streams, along with many secondary streams, display high CT values. This means that most of the normalized longitudinal profiles have a concave shape. The results of this study underscore the significant influence of multiple active faults exhibiting both normal and reverse mechanisms (including the Chah Khan, Ghasr Ghand, and Bashagard Thrust) on the longitudinal profiles analyzed. As demonstrated by these profiles, the impact of these faults is readily apparent in the development of knickpoints and alterations in the longitudinal gradient of the rivers examined. The CT parameter variation for main streams ranges between 29.89% and 52.47%, while for secondary streams, it ranges from 1.38% to 64.39%. Furthermore, the maximum and minimum CT values observed in the main streams were associated with Kahir and Jagin, respectively. Among the secondary streams, the highest and lowest CT values were found in B6 and J1, respectively. The J1 (CT = 1.38%) and B7 (CT = -11.36%) streams exhibit the most linear and most convex longitudinal profiles within the region, respectively. The prevalence of concave profiles in the examined streams suggests a state of relative dynamic equilibrium in their longitudinal profiles, indicative of an eroded landscape. Moreover, the concavity value only becomes negative in two profiles, indicating a tendency towards convexity in the curve.

Conclusion

Normalized longitudinal river profiles facilitate the comparison of gradient variations across different rivers, potentially influenced by climatic, lithological, or tectonic factors. Normalized profiles offer enhanced interpretability compared to traditional longitudinal profiles, effectively highlighting knickpoints. The normalized longitudinal profiles of the main streams (Figure 8) and the majority of secondary streams profiles (Figure 10) exhibit a pronounced degree of concavity. This characteristic suggests a landscape subject to significant erosion. Specifically, concave normalized longitudinal profiles are indicative of a state of relative equilibrium within the river systems. Furthermore, analysis of the drawn profiles indicated that relatively linear, straight, and even convex profiles are associated with streams situated in the headwater regions of the basins. Although these profiles are found in limited areas in the region, they show the connection and influence of small sub-basins with low area with abundant faults (especially main thrusts) in the region, as well as the lithological diversity of the Makran highlands. This demonstrates that the streams in these areas (the upstream areas of Bahukalat and Jagin) are in a transient state.

تحلیل الگوی نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه در حوضه‌های منتخب منشور برآزایشی مکران

رضا منصوری^{۱*}

^۱ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
نیمرخ‌های طولی رودخانه، یکی از رایج‌ترین شیوه‌های تحلیل و بررسی واکنش‌های کوتاه‌مدت چشم‌انداز می‌باشند. نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده نسبت به نیمرخ‌های طولی سنتی، تفسیر آسان‌تری دارند و شکست شیب را برجسته‌تر می‌کنند. در این پژوهش، به منظور بررسی الگوهای واکنش ژئومورفیک آبراهه‌های منتخب در حوضه‌های باهوکلات، کهیر، سدیچ، گابریک و جگین واقع در منشور برآزایشی مکران، به‌طور ویژه از نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده با به‌کارگیری افزونه NProfiler مبتنی بر DEM استفاده شده‌است. برای این منظور، در مجموع ۳۷ آبراهه (۵ اصلی و ۳۲ فرعی) گزینش و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند همه آبراهه‌های اصلی و بیشتر آبراهه‌های فرعی، با ثبت مقادیر مثبت برای پارامتر تقعر، نیمرخ طولی مقعر دارند. دامنه نوسانی پارامتر C_T برای آبراهه‌های اصلی بین ۲۹/۸۹٪ و ۵۲/۴۷٪ و در آبراهه‌های فرعی از ۱/۳۸٪ تا ۶۴/۳۹٪ متغیر است. همچنین، بیشترین و کم‌ترین میزان C_T در آبراهه‌های اصلی به ترتیب متعلق به کهیر و جگین؛ و در آبراهه‌های فرعی نیز به ترتیب متعلق به B6 و J1 می‌باشند. خطی‌ترین و محدب‌ترین نیمرخ طولی در منطقه نیز، به ترتیب متعلق به آبراهه C_T (J1) 1.38% و C_T (B7) -11.36% می‌باشد. مشاهده نیمرخ‌های مقعر در بسیاری از آبراهه‌های منتخب، نشان‌دهنده وجود حالتی از تعادل نسبی در نیمرخ طولی رودخانه‌ها و چشم‌اندازی فرسایش‌یافته است. علاوه بر آن، تنها در دو نیمرخ مقدار تقعر منفی و منحنی به حالت محدب میل پیدا کرده‌است. نیمرخ‌های محدب، بر حوضه‌های کوچک، بخش سرچشمه و مناطق به شدت گسل‌خورده ارتفاعات شمالی مکران در حوضه‌های باهوکلات و جگین انطباق دارند. این یافته، گویای وجود حالت گذار چشم‌انداز و در ارتباط با فراخاست زمین‌ساختی در مقیاس محلی است.	تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ کلمات کلیدی: نیمرخ طولی نرمال‌شده رودخانه تحلیل شبکه زهکشی شاخص تقعر - تحذب (C_T) چشم‌انداز ژئومورفیک گذرا تکتونیک ژئومورفولوژی جنوبشرق ایران

مقدمه

در گذشته، محاسبه و اندازه‌گیری بسیاری از روش‌های مورفومتریک پیشگام که در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی پیشنهاد شده بودند، به سختی قابل انجام بودند (Pérez-Peña et al., 2017). از این‌رو، تجزیه و تحلیل‌ها به مناطق محلی با مجموعه‌ای از داده‌های کم، محدود می‌شدند (Mackin, 1948; Hack, 1957; Seeber & Gornitz, 1983). با این حال، طی سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در بحث‌های علمی پیرامون مناسب بودن و مفاهیم برخی از این گونه پارامترهای توپوگرافی انجام شده است (Keller & Pinter, 2002; Wobus et al., 2006; Goldrick & Bishop, 2007; Pérez-Peña, Azañón & Azor, 2009a; Kirby & Whipple, 2012; Royden & Taylor Perron, 2013). به عبارت دیگر، امروزه، به دلیل توسعه بسته نرم‌افزار ArcGIS و دسترسی مناسب به مدل‌های دیجیتالی ارتفاع (DEMs) با قدرت تفکیک مکانی متفاوت، روش‌های تحلیل فضایی چشم‌اندازهای ژئومورفیک، تحول و تکامل بسیاری یافته‌اند. بنابراین، همان‌طور که برخی از پژوهشگران (Kirby & Whipple, 2001; Grohmann, Riccomini & Alves, 2007; Zhang et al., 2011; Pérez-Peña et al., 2017) اشاره کرده‌اند، این دو عامل اخیر امکان تجزیه و تحلیل مناطق دورافتاده با اهمیت زمین‌شناسی و زمین‌ساختی بسیار بالا را فراهم کرده و به نوبه خود، درک بهتری از عملکرد فرآیندهای فعال در چنین مناطقی را ارائه می‌دهند.

الگوی زهکشی رودخانه‌ها حاوی اطلاعات منحصر به فردی در مورد رژیم زمین‌ساختی گذشته و حال است. نیمرخ طولی یک رودخانه به فرآیند فراخاست مداوم، حساس است و می‌تواند برای تشخیص ساختارهای پویا مورد استفاده قرار گیرد (Seeber & Gornitz, 1983). امروزه در ژئومورفولوژی زمین‌ساخت، استخراج نیمرخ‌های طولی رودخانه مبتنی بر مدل‌های دیجیتالی ارتفاع به منظور ارزیابی و تحلیل وضعیت شبکه زهکشی تحت تأثیر عوامل کنترل‌گر گوناگون محیطی، امری رایج و پرکاربرد شده است. در این راستا اخیراً، دانشمندان علوم‌زمین از میان روش‌های گوناگون موجود در ارتباط با تکتونیک ژئومورفولوژی، از تجزیه و تحلیل‌های مربوط به الگوهای توپوگرافیکی و شبکه زهکشی به طور گسترده و موفقیت‌آمیزی استفاده کرده‌اند (Pérez-Peña et al., 2009a; Pérez-Peña, Azañón, Azor, Delgado & González-Lodeiro, 2009b; Pérez-Peña, Azor, Azañón & Keller, 2010; Kirby & Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012; Royden & Taylor Perron, 2013; Willett, McCoy, Taylor Perron, 2017; Goren & Chen, 2014; Pérez-Peña et al., 2017). دانشمندان علوم زمین معمولاً برای تجزیه و تحلیل الگوهای شبکه زهکشی، از نیمرخ‌های طولی استفاده می‌کنند؛ زیرا، از یک‌سو، در یک سیستم پایدار، فرسایش همگام با فراخاست پیش می‌رود (Seeber & Gornitz, 1983)؛ و از سوی دیگر، رودها به‌طور پیوسته نیمرخ طولی خود را متناسب با شرایط و وضعیت آب و هوایی، سنگ‌شناختی و زمین‌ساختی هر منطقه سازگار می‌کنند. بنابراین، هرگونه تغییری در الگوهای توپوگرافیکی و الگوهای شبکه زهکشی می‌تواند نشانگر تغییرات رخ داده در هریک از این عوامل کنترل‌گر باشد (Rigon et al., 1996; Jackson, Norris & Youngson, 1996; Brookfield, 1998; Pérez-Peña et al., 2009a, 2010; Kirby & Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012). در این راستا، مقایسه نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه‌ها می‌تواند تفاوت‌های موجود در گرادیان رودخانه که معمولاً تحت تأثیر شرایط سه‌گانه نام برده شده در بالا هستند را برجسته کند. به طور کلی، گرادیان‌های رودخانه، که میزان فرسایش را تعیین می‌کنند، به‌گونه‌ای تنظیم می‌شوند که نرخ‌های متفاوت فراخاست با نرخ‌های متفاوت فرسایش هم‌خوانی داشته باشند. بنابراین، تغییرات ناگهانی شیب در امتداد نیمرخ‌های رودخانه ممکن است نشان‌دهنده اثرات گسل‌های فعالی باشد که از این رودخانه‌ها می‌گذرند (Seeber & Gornitz, 1983).

امروزه، ثابت شده است که نیمرخ‌های طولی (Pérez-Peña et al., 2017)، یکی از بهترین تخمین‌ها برای تجزیه و تحلیل الگوهای رفتاری چشم‌اندازهای ژئومورفیک هستند. از این میان، نیمرخ‌های طولی رودخانه روشی مناسب در ارتباط با بررسی و تحلیل واکنش چشم‌اندازها نسبت به نیروهای محرک درونی و بیرونی هستند. به همین دلیل، تجزیه و تحلیل نیمرخ‌های طولی رودخانه تاکنون به‌طور گسترده‌ای در مطالعات ژئومورفولوژی زمین‌ساخت و با هدف شناسایی تغییرات در عوامل کنترل‌کننده رودخانه، یعنی سنگ‌شناسی، آب و هوا، فراخاست زمین‌ساختی و فرآیندهای دامنه‌ای، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Seeber & Gornitz, 1983).

Gornitz, 1983; Brookfield, 1998; Molin, Pazzaglia & Dramis, 2004; Brookfield, 2008; Pérez-Peña et al., 2009a; Kirby & Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012; Antón, De Vicente, Muñoz-Martín & Stokes, 2014; Troiani, Galve, Piacentini, Della Seta & Guerrero, 2014; Scotti, Molin, Faccenna, Soligo & Casas-Sainz, 2014; Azañón et al., 2015) از یک سو، معمولاً شبکه زهکشی به آسانی توسط جنبش‌های زمین‌ساختی دچار آشفتگی نمی‌شود، زیرا رودخانه‌ها در تنگه‌های ژرف جریان یافته و تمایل دارند مسیرهای اولیه خود را به صورت پیشینه‌رود، در طول تکامل زمین‌ساختی حفظ کنند (Seeber & Gornitz, 1983). از سوی دیگر، نیمرخ‌های طولی رودخانه، واکنش‌های کوتاه‌مدت چشم‌اندازهای ژئومورفیک را نسبت به تغییرات زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی و آب و هوایی نشان می‌دهند. در نتیجه، از الگوی‌های شبکه زهکشی می‌توان برای استنباط مراحل اولیه این تکامل و واکنش‌های مرتبط با آن، بهره برد. همان‌طور که پرز-پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017)، خاطرنشان کرده‌اند، نیمرخ‌های طولی رودخانه، مناسب‌ترین روش برای بررسی و تحلیل واکنش‌های زمان‌های اخیر تا به امروز رودخانه‌ها نسبت به فرآیندهای فعال زمین‌شناسی و نیز تغییرات آب و هوایی هستند.

مطالعات پیشین بر ناپایداری و تغییرات شبکه زهکشی حوضه‌های واقع در کرانه‌های مکران اشاره داشته؛ به‌عنوان مثال، یمانی (Yamani, 1998) در پژوهشی بر دامنه ناپایداری بالاتر در حوضه رود جگین نسبت به دیگر حوضه‌های منطقه اشاره کرده‌است. بنابراین، هدف اصلی در این پژوهش، مطالعه و ارزیابی الگوهای واکنش ژئومورفیک رودها در حوضه‌های منتخب واقع در بخش ایرانی منشور برآزایشی مکران نسبت به عوامل کنترل‌گر محیطی با به‌کارگیری نیمرخ‌های طولی نرمال شده رودخانه می‌باشد.

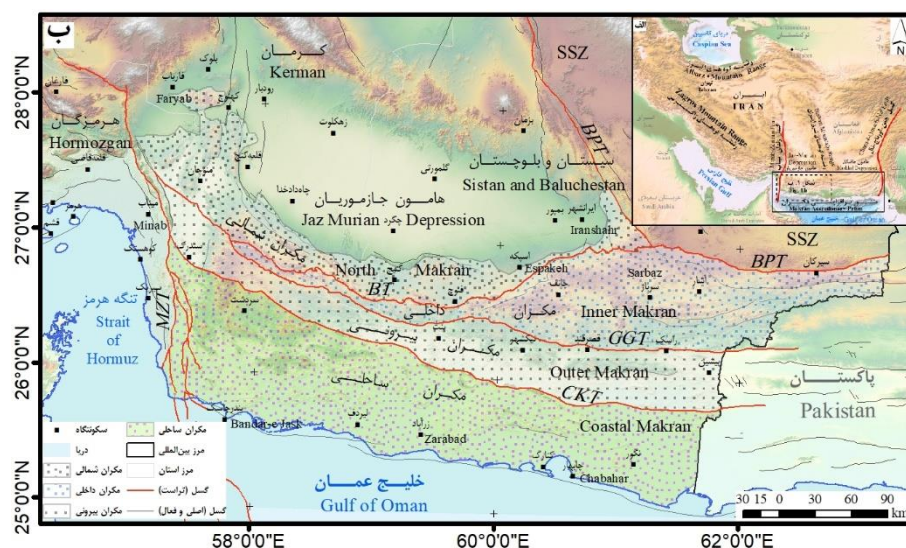
منطقه مورد مطالعه

زون فروانش مکران، با درازای تقریبی ۱۰۰۰ کیلومتر (Kopp et al., 2000; Burg, Dolati, Bernoulli & Smith, 2013)، به عنوان بخشی از کمربند کوه‌زایی آلپ - هیمالایا، بر اثر فروانش پوسته اقیانوسی صفحه عربی به زیر پوسته قاره‌ای صفحه اوراسیا در گوشه جنوب‌خاوری ایران و بخش جنوبی پاکستان پدید آمده است. زون مکران، از نظر زمین‌شناسی، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین گوه‌های برآزایشی سطح کره زمین به‌شمار می‌آید (Kopp et al., 2000; Burg et al., 2013)؛ به‌گونه‌ای که، منشور برآزایشی آن به‌عنوان یک منطقه فروانش نادر و بی‌همتا در جهان به‌شمار می‌آید (Byrne, Sykes & Davis, 1992; Priestley et al., 2022; Irandoust, Priestley & Sobouti, 2022). این منشور، با روند کلی باختری- خاوری در دو سوی مرز ایران و پاکستان و در شمال خلیج عمان امتداد یافته است (شکل ۱ الف). به طور کلی، مکران در دوسوی باختر و خاور، توسط گسل‌های ترافشارشی با روند کلی شمالی- جنوبی دربرگرفته شده‌است. مرز باختری با سامانه گسلی امتدادلغز راست‌گرد زندان- میناب و مرز خاوری آن با سامانه گسلی امتدادلغز چپ‌گرد اوناچ- نال^۱ (Stöcklin, 1968; Kopp et al., 2000; Bayer et al., 2006; Burg et al., 2013; Dolati & Burg, 2013; Penney et al., 2015; Burg, 2018; Barbero et al., 2020a; 2020b; 2021; 2023; 2025) مشخص می‌شود. زون مکران، از سوی شمال به هامون جازموریان در ایران و ماشکل در پاکستان و زون زمین‌دز سیستان واقع در مابین این دو فرورفتگی، محدود می‌شود. مرز جنوبی آن نیز توسط پشته میان‌اقیانوسی موری^۲ مشخص شده است. از لحاظ زمین‌شناسی، زون مکران را می‌توان به زیرزون‌های زمین‌ساختی- چینه‌شناختی گوناگون و متفاوتی همچون مکران شمالی، داخلی، بیرونی و ساحلی تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱ ب). تاکنون این تقسیم‌بندی، در مطالعات پژوهشگرانی همچون دولتی (Dolati, 2010)، دولتی و برگ (Dolati & Burg, 2013)، برگ و همکاران (Burg et al., 2013)، محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2016)، برگ (Burg, 2018)، باربرو و همکاران (Barbero et al., 2020a; 2020b; 2021; 2025) به‌کاربرده شده است.

1- Ornach-Nal sinistral fault system

2- Murray Ridge

اما از دیدگاه ژئومورفولوژی، به عنوان یک واحد ژئومورفیک-مورفوتکتونیک مستقل و با عنوان واحد مکران یا جنوب خاوری ایران در نظر گرفته شده است. بر پایه 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).



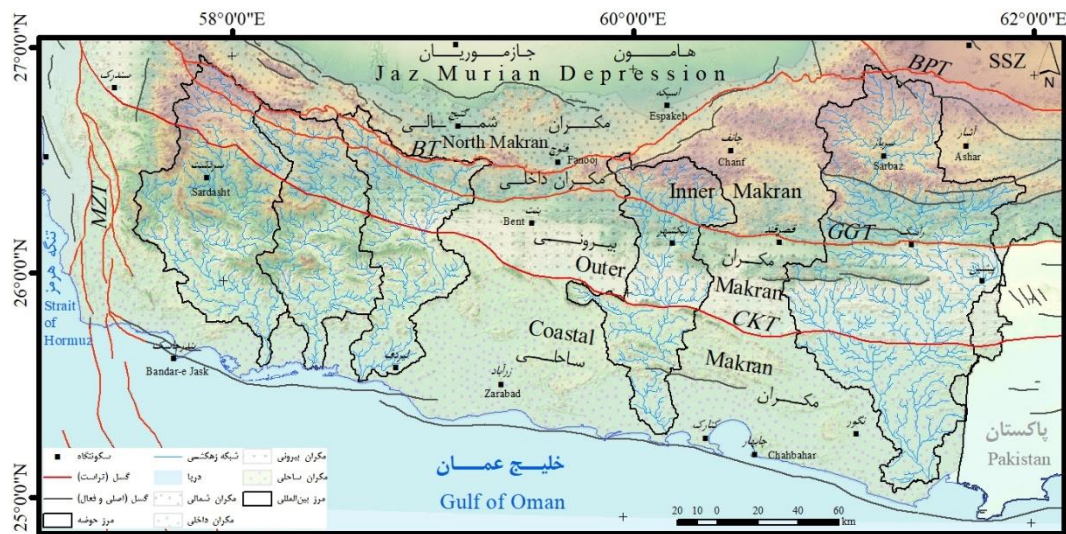
شکل ۱- الف) موقعیت جغرافیایی منشور برآفرایشی مکران (نقشه پایه: ETOPO1 برگرفته از <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/>؛ ب) نقشه ساده شده بخش ایرانی زون مکران به همراه زیرزون‌های زمین‌ساختی-چینه‌شناختی آن؛ حروف ایتالیک انگلیسی نشان‌دهنده گسل‌های تراسی اصلی هستند که مرز زیربخش‌ها را نیز تشکیل می‌دهند (CKT: تراس چاه‌خان، GGT: تراس قصرقند، BT: تراس بشاگرد، BPT: تراس بمپور، MZT: تراس میناب- زندان) (با تغییرات و اصلاحاتی از Dolati, 2010; Burg et al., 2013; Burg, 2018) و موقعیت گسل‌های اصلی و فعال^۱ منطقه مورد پژوهش (Zelenin, Bachmanov, Garipova, Trifonov & Kozhu-rin, 2022). SSZ معرف زمین‌درز سیستان است.

Fig. 1. a) General 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); **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: Bampur 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.

در این مطالعه، پنج حوضه آبریز اصلی واقع در بخش ایرانی منشور برآفرایشی مکران که به ترتیب از خاور به باختر عبارتند از: حوضه آبریز باهوکلالت، کهیر، سدیچ، گابریک و جگین (شکل ۱ ب)، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شبکه زهکشی این حوضه‌ها از ستیغ ارتفاعات شمالی مکران تا کرانه‌های مکران جریان‌یافته‌اند. معیار اصلی در گزینش این حوضه‌ها، علاوه بر زهکشی گسترده‌ای بزرگ در راستای عمود بر زون مکران با پراکندگی فضایی مناسب، در برگرفتن زیرزون‌های گوناگون تعیین‌شده نیز بوده است. همان‌طور که در شکل ۲ نیز به وضوح دیده می‌شود، مرز شمالی همه حوضه‌های مورد مطالعه منطبق بر مرزهای ساختاری زون مکران می‌باشند و غالباً توسط گسل‌های معکوس اصلی (عمدتاً گسل بشاگرد) محدود شده‌اند. همچنین، در این شکل به طور مشخص، امتداد باختری-خاوری تراس‌های اصلی منطقه در حوضه‌های مورد مطالعه، دیده می‌شود؛ به طوری که از طریق آن‌ها می‌توان

۱. داده‌ها برگرفته از موسسه زمین‌شناسی آکادمی علوم روسیه به نشانی: http://neotec.ginras.ru/index/english/sheets_eng.html

حوضه‌ها را به سه بخش مشخص و متمایز شمالی- بالادست، میانی و جنوبی- پایین دست تقسیم کرد. 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 & Kidd, 1982).



شکل ۲- موقعیت حوضه‌های منطقه مورد مطالعه در منشور برآزایشی مکران (به ترتیب از راست به چپ: باهوكلات، كهير، سدیح، گابریک و جگین).

Fig. 2. Location of the basins of the study area in the Makran accretionary prism (right to left: Bahukalat, Kahir, Sedich, Gabrik, and Jagin).

زیرزون‌های زمین‌ساختی - چینه‌شناختی

مکران شمالی به گسل بشاگرد در جنوب و فرورفتگی هامون جازموریان در شمال محدود می‌شود. 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^۱ تجمیع شده‌اند (Burg et al., 2013). سنگ‌های اولترامافیک موجود در مکران شمالی، به یک مجموعه افیولیتی ژوراسیک-پالئوسن نسبت داده شده‌اند (McCall & Kidd, 1982). مکران داخلی، توسط گسل‌های تراسی بشاگرد و قصرقند، به ترتیب در شمال و جنوب، دربر گرفته شده و عمدتاً با توالی‌های ماسه-سنگ-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 (Burg et al., 2013). حد شمالی و جنوبی مکران بیرونی، به ترتیب توسط گسل‌های تراسی قصرقند و چاه‌خان مشخص شده است. جنس سنگ و رسوب‌های این بخش عمدتاً متعلق به الیگوسن بالایی تا میوسن میانی است. در این بخش از مکران، رسوب‌های توریدایتی و شیل‌های الیگوسن پایانی توسط رسوب‌های میوسن پوشانده شده‌اند. 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. این ساختارها، کوتاه‌شدگی کمتری نسبت به مکران داخلی نشان می‌دهند (Dolati & Burg, 2013; Burg et al., 2013).

مکران ساحلی، مابین خط ساحلی- در جنوب و گسل تراستی چاه‌خان- در شمال واقع شده و به طور کلی، رسوب‌های میوسن بالایی و جوان‌تر را نشان می‌دهد. به 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 شده است (Burg et al., 2013; Burg, 2018). مکران ساحلی، به عنوان جوان‌ترین بخش منشور برآزایشی به شمار می‌آید (Kopp et al., 2000). این بخش، به‌طور ضعیفی تغییرشکل‌یافته، به گونه‌ای که در آن هیچ‌گونه گسل تراستی تشکیل نشده؛ در حالی که، وجود گسل‌های نرمال فراوان که بر اثر فرو رانش صفحه‌ای ایجاد شده‌اند، ساختار غالب این بخش می‌باشد (Kopp et al., 2000; Burg et al., 2013).

مواد و روش‌ها

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 طولی رودخانه، برای بررسی واکنش کوتاه‌مدت چشم‌انداز نسبت به فعالیت‌های زمین‌ساختی و تغییرات آب و هوایی ارزشمند هستند. نیمرخ‌های طولی رودخانه یکی از پرکاربردترین روش‌های بررسی و تحلیل واکنش‌های کوتاه‌مدت چشم‌انداز به‌شمار می‌آیند. امروزه، بیشتر این گونه تحلیل‌های مورفومتریک، در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام می‌شوند که به ابزارهای استاندارد برای انواع تحلیل‌ها تبدیل شده‌اند. در این پژوهش، از روش و افزونه جدید *NProfiler* (Pérez-Peña et al., 2017¹) در محیط نسخه ۱۰/۸ نرم‌افزار ArcMap برای تهیه و استخراج نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه^۲ 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 طولی تولیدشده، 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 طولی در این است که، هم مدت زمان و هم فرآیند محاسبه استخراج نیمرخ‌های طولی رودخانه‌ها را به‌طور چشمگیری، کاهش می‌دهد. در این مطالعه، علاوه بر ابزار مفهومی *NProfiler* در محیط ArcMap، از داده‌های فیزیکی دیگری همچون مدل دیجیتالی ارتفاع *Alos Palsar* منطقه با دقت مکانی ۱۲/۵ متر، نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ و ۱:۵۰,۰۰۰ (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح کشور)، نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ و ۱:۲۵۰,۰۰۰ به منظور استخراج گسل‌ها و واحدهای لیتولوژیکی (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)، لایه گسل‌های اصلی و فعال^۳ منطقه، انواع تصاویر ماهواره‌ای (همچون لندست، سنتینل ۲ و کوئیک‌برد)، *Google Earth*، استفاده شده است. علاوه بر آن، داده‌های مربوط به تقسیم‌بندی و مرز حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها و نیز شبکه زهکشی، از سایت *HydroSHEDS*^۴ تهیه شد. سپس، به منظور آماده‌سازی و برطرف کردن هرگونه خطای احتمالی و نیز انجام اصلاحات موردنیاز متناسب با هدف و ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، این داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته و تغییراتی در آن‌ها ایجاد شد. پس از انجام اصلاحات، مرز دقیق حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها تهیه و سپس جریان آبراهه اصلی شناسایی و ترسیم شد.

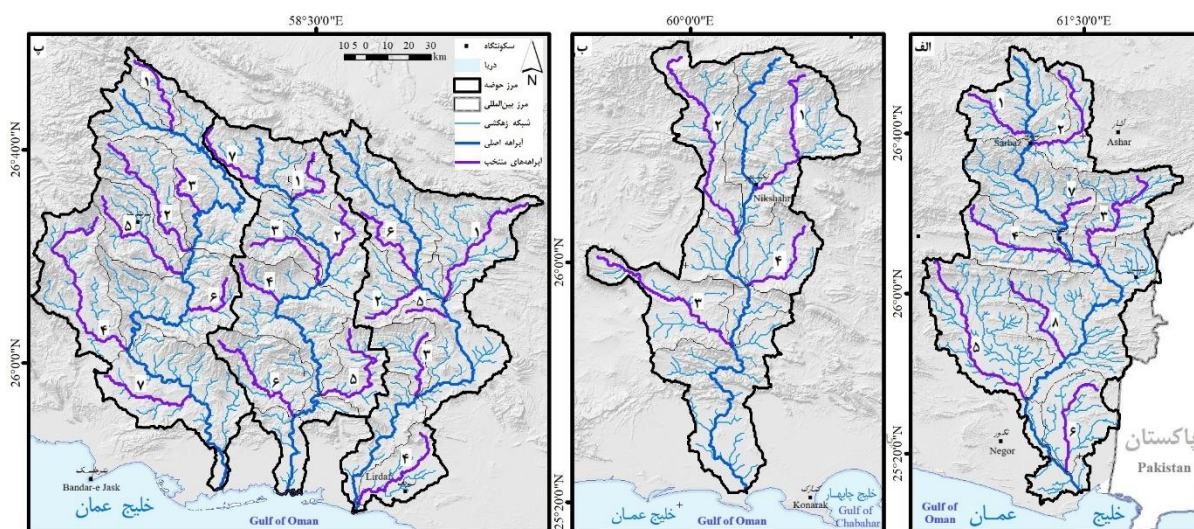
1- برای اطلاعات بیشتر به این منبع مراجعه شود.

2- Normalized longitudinal river profiles

۳- داده‌ها برگرفته از مؤسسه زمین‌شناسی آکادمی علوم روسیه به نشانی: http://neotec.ginras.ru/index/english/sheets_eng.html

4- این داده‌ها در آدرس: <https://www.hydrosheds.org/products/hydrobasins> قابل دسترسی هستند. داده‌های مربوط به رودخانه‌ها شامل یک لایه‌برداری از تمامی جریان‌های آبراهه‌ای در مقیاس جهانی است که حداقل دارای حوضه آبریز در حدود ۱۰ کیلومترمربع یا حداقل یک جریان متوسط در حدود ۰/۱ مترمکعب بر ثانیه و یا هر دو مورد باشد. لایه‌های مربوط به تقسیم‌بندی و مرز حوضه‌ها و نیز شبکه آبراهه، با وضوح ۱۵ ثانیه قوسی و از لایه اصلی شبکه‌بندی‌شده موسوم به *HydroSHEDS* استخراج شده‌اند.

سپس، در هر حوضه مهم‌ترین آبراهه‌های فرعی که به جریان اصلی می‌پیوستند، برای تهیه و ساختن نیمرخ‌های طولی نرمال شده مشخص شدند. بدین ترتیب، در مجموع ۳۷ آبراهه (۳۲ آبراهه فرعی و ۵ آبراهه اصلی برای هر حوضه) مشخص شد (شکل ۳) که در بخش یافته‌های پژوهش به تشریح و تحلیل آن‌ها خواهیم پرداخت. در ادامه، با هدف آشنایی بیشتر با شیوه معرفی شده برای تهیه و استخراج نیمرخ‌های طولی نرمال شده رودخانه، روش‌شناسی، و چگونگی پیاده‌سازی آن در محیط ArcMap، به طور مختصر و مفید شرح داده شده است.



شکل ۳- آبراهه‌های اصلی و فرعی مشخص شده برای تهیه نیمرخ‌های طولی نرمال شده در حوضه‌های الف) باهوکلالت، ب) کهر، پ) به ترتیب از راست به چپ: سدیح، گابریک و جگین.

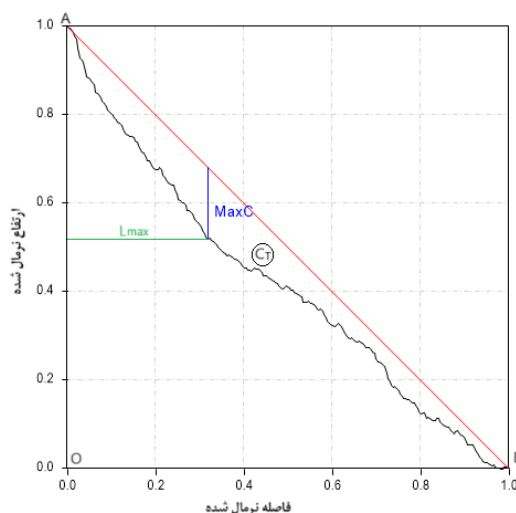
Fig. 3. Main and secondary streams identified for generating normalized longitudinal profiles in the basins of (a) Bahookalat, (b) Kahir, and ©, from right to left: Sadich, Gabrik, and Jegin.

روش‌شناسی

رودخانه‌هایی که در شرایط تعادل و بر روی بسترهایی با سنگ‌شناسی همگن جریان دارند، یک نیمرخ مقعر معمولی ایجاد می‌کنند؛ به طوری که در مناطق سرچشمه (بخش بالادست)، گرادیان‌های بالاتر و در نزدیکی دهانه (بخش پایین‌دست)، گرادیان‌های ملایم‌تری دارند. این نیمرخ مقعر، نتیجه رابطه معکوس بین دبی و شیب است که به ترتیب می‌توان مقادیر آن‌ها را با اندازه‌گیری مساحت بخش بالادست و شیب کانال، تخمین زد. در رودخانه‌های درجه‌بندی شده، شیب به تدریج تنظیم می‌شود تا با توجه به دبی موجود و ویژگی‌های غالب کانال، سرعت مورد نیاز برای انتقال تمام بار رسوبی فراهم شود (Mackin, 1948). انحراف از این تعادل یا نیمرخ درجه‌بندی شده، معمولاً نقاط عطفی را در نیمرخ طولی رود ایجاد می‌کند که به عنوان نقاط شکست شیب شناخته می‌شوند (Whipple & Tucker, 1999; Burbank & Anderson, 2012) و تغییراتی را در میزان تقعر نیمرخ طولی بالادست و پایین‌دست خود ایجاد می‌کنند (Pérez-Peña et al., 2017).

ایده اولیه نمایش نیمرخ‌های طولی رودخانه به صورت نرمال شده، توسط دمولین (Demoulin, 1998) پیشنهاد داده شده است (Pérez-Peña et al., 2017). چنین نیمرخ، به عنوان نیمرخ طولی نرمال شده شناخته می‌شود و با نرمال‌سازی ارتفاعات نسبت به ارتفاع یا دامنه نسبی و فواصل نسبت به طول کل کانال ساخته می‌شود. ارائه و نمایش نیمرخ طولی رودخانه به این شکل، امکان مقایسه رودخانه‌ها با درازا و گرادیان‌های متفاوت را فراهم می‌کند (Demoulin, 1998; Ruszkiczay-Rüdiger, Fodor, Horváth, 2014; Telbisz, 2009; Matoš, Tomljenović & Trenc, 2014). علاوه بر آن، چنین نمایش نرمال‌شده‌ای از نیمرخ، غالباً تغییرات

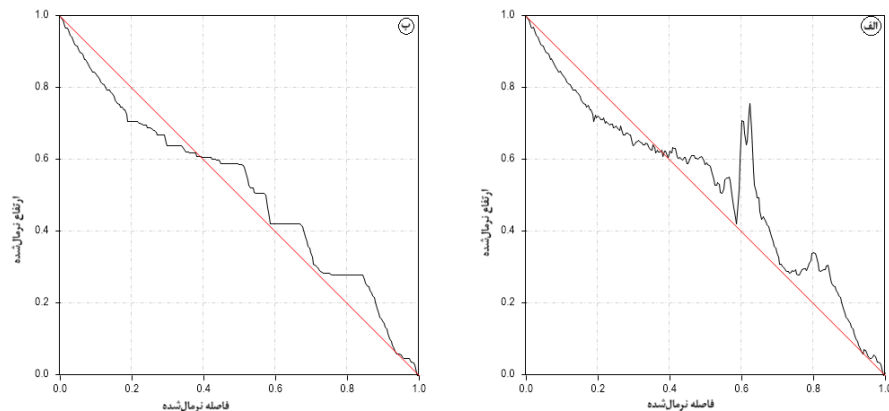
گرایان را به صورت نیمرخ‌های نیمه‌لگاریتمی واضح، برجسته می‌کند (Hack, 1957; Demoulin, 1998). در این گونه از نیمرخ‌ها، شاخص تقعر (C_T) به عنوان درصد مساحت مثلث OAB (شکل ۴) مابین نیمرخ رودخانه و خط مستقیمی که سرچشمه را به دهانه رود متصل می‌کند، تعریف می‌شود. مقادیر منفی C_T نشان دهنده نیمرخ‌های مقعر رو به بالا هستند که در آن نیمرخ رودخانه بالاتر از خط مستقیم AB قرار می‌گیرد؛ درحالی‌که، مقادیر مثبت نشان دهنده محدب بودن نیمرخ رودخانه خواهند بود. نیمرخ رودخانه‌های مستقیم نیز با شاخص تقعر تقریباً صفر ($C_T \sim 0$) مشخص می‌شوند (شکل ۴). از آنجایی که شاخص تقعر رودخانه به صورت یک انتگرال محاسبه می‌شود، در هر نقطه از نیمرخ می‌توانیم یک تقعر محلی (C_i) را به عنوان فاصله از نیمرخ تا خط مستقیم AB تعریف کنیم. با این فرض، می‌توانیم برای هر رودخانه یک نقطه با حداکثر تقعر (C_{max}) تعریف کنیم. این مقدار با شاخص تقعر رودخانه (C_T) تکراری و اضافی خواهد بود، اما موقعیت آن نسبت به سرچشمه رودخانه (L_{max}) می‌تواند اطلاعات بسیار جالبی را اضافه کند (شکل ۴). از نظر تئوری، هرچه L_{max} کمتر باشد، درجه‌بندی نیمرخ بهتر خواهد بود (Demoulin, 1998). کاستیلو و همکاران (Castillo, Bishop & Jansen, 2013) پیشنهاد کردند که این نوع نمایش برای رودخانه‌هایی در حالت گذار با نیمرخ‌های نامنظم، که در آن‌ها روابط سنتی مساحت-شیب معتبر نیستند، مناسب‌تر است. آن‌ها در مطالعه خود نشان دادند که شاخص تقعر (Θ) معیار مفیدی از مورفولوژی بازه‌های گذار ارائه می‌دهد.



شکل ۴- طرحی شماتیک برای نمایش دوبعدی نیمرخ نرمال‌شده و پارامترهای مرتبط با آن. A: بالادست - سرچشمه، B: خروجی یا دهانه، C_T : شاخص تقعر (که به صورت درصد و نسبت به سطح مابین منحنی نیمرخ و خط مستقیمی که سرچشمه و خروجی رودخانه را به هم متصل می‌کند (مثلث OAB) بیان می‌شود)، C_{max} : حداکثر تقعر، L_{max} : موقعیت حداکثر تقعر نسبت به سرچشمه رودخانه. برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود (Demoulin, 1998; Pérez-Peña et al., 2017).

Fig. 4. Sketch illustrating the 2D Normalized profile and associated parameters. A: Headwater, B: mouth, C_T : concavity index (expressed as a percentage respect to the AOB triangle), C_{max} : maximum concavity, L_{max} : position of maximum concavity relative to the source of the river (Demoulin, 1998; Pérez-Peña et al., 2017). See text for further explanation.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، نمونه‌هایی از نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. در این شکل، تفاوت بسیار آشکاری میان منحنی نیمرخ نرمال‌شده در دو حالت پیش‌فرض - بدون حذف قله‌ها یا نقاط اوج در نیمرخ طولی رودخانه (شکل ۵ الف) و با انتخاب کاربر - اعمال گزینه حذف نقاط اوج، دیده می‌شود (شکل ۵ ب). به عبارت دیگر، با دخالت دادن گزینه حذف نقاط اوج بر روی نیمرخ طولی نرمال‌شده رودخانه؛ علاوه بر نرم شدن خط نیمرخ، تغییرات منحنی شیب طولی رودخانه به‌طور بارزتری نشان داده می‌شود.



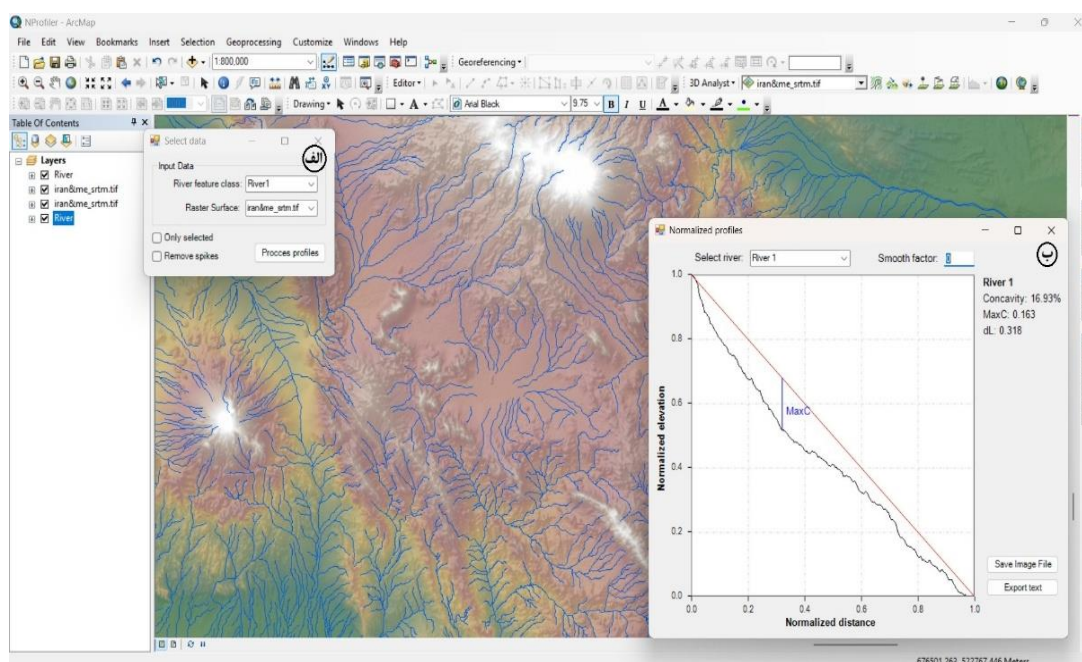
شکل ۵- نمونه‌هایی از ترسیم نیمرخ‌های طولی نرمال شده رودخانه در منطقه مورد مطالعه. الف) بدون در نظر گرفتن حذف قله‌ها یا نقاط اوج (حالت پیش فرض). ب) با اعمال حذف قله‌ها (با انتخاب کاربر).

Fig. 5. Examples of normalized longitudinal river profiles drawn in the study area. A) Without removing peaks (default mode). B) With removing peaks (user-selected).

شیوه اجرا و پیاده‌سازی

ابزار جدید *NProfiler*، روشی نوین به صورت 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 ArcGIS (ArcMap) ارائه شده است. بستر برنامه‌نویسی در Visual Basic.NET از چارچوب موجود در Microsoft.NET بهره‌گرفته و نه تنها شامل مجموعه کاملی از کتابخانه‌های قدرتمند است، بلکه یک رابط کاربری گرافیکی غنی مانند پنجره‌ها، جعبه‌های کنترل، منوها، نمودارهای گرافیکی و غیره را نیز شامل می‌شود. پرز-پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017) یادآور می‌شوند که این افزونه با در نظر گرفتن دو ویژگی بسیار مهم، یعنی «استفاده آسان» و قابلیت «نمایش مستقیم نتایج در درون نرم‌افزار GIS»، طراحی شده است. همچنین، ورودی اصلی این افزونه، بر پایه داده‌های رستری-مدل دیجیتالی ارتفاع (DEM)، بنا نهاده شده است. مزیت برتر تهیه نیمرخ‌های طولی نرمال شده با ابزار *NProfiler*، ضمن سادگی در به‌کارگیری و کاربر پسند بودن آن، در این است که همه مراحل آن در محیط نرم‌افزار GIS و به طور خودکار انجام می‌شود. به طوری که، با استفاده از آن، به راحتی می‌توان نیمرخ‌های طولی گوناگون و متفاوت را به همراه شاخص‌های مربوطه برای رودخانه‌ها تهیه و استخراج کرد. در این پژوهش، افزونه *NProfiler* (شکل ۶) که به عنوان یک افزونه مستقل به منظور استخراج نیمرخ‌های نرمال شده و شاخص‌های مرتبط با آن در محیط ArcMap، ایجاد شده است، در محیط ArcGIS نسخه ۱۰/۸ به کار گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۶ الف نشان داده شده است، افزونه *NProfiler* در پنجره ورودی خود با استفاده از لایه خطی آبراهه‌ها و یک DEM به عنوان منبع ارتفاع توپوگرافیکی، نیمرخ‌های طولی نرمال شده رودخانه و معیارهای مرتبط با پدیده‌های برداری آن را، تولید می‌کند. در این روش، استفاده از ArcObjects دسترسی به هندسه‌ها و سطوح رستری را بدون نیاز به تکرار برروی نقاط یا سلول‌ها را تسهیل می‌کند. همچنین، ارتفاع نیمرخ از طریق درون‌یابی دوسویه چهار سلول مجاور هم برروی DEM محاسبه می‌شوند، به طوری که سرانجام باعث نرم‌شدن و هموارسازی خطاهای ارتفاعی در سلول‌های منفرد می‌شود.

پس از استخراج نیمرخ، ارتفاعات و فواصل هر نیمرخ رودخانه برای محاسبه شاخص‌های C_T , C_{max} , L_{max} از ۰ تا ۱ نرمال‌سازی می‌شوند. این ابزار همچنین امکان حذف «قله‌ها» (یعنی نقاط با ارتفاع بالاتر از نقاط بخش سرچشمه یا بالادست رودخانه که معمولاً به دلیل خطاهای DEM ظاهر می‌شوند) و نرم و هموارسازی نیمرخ را فراهم می‌کند (شکل ۵). روش نرم و هموارسازی از یک میانگین متحرک پنجره‌ای استفاده می‌کند که درصد نقاط ورودی نیمرخ را به عنوان یک عامل هموارسازی در نظر می‌گیرد. این هموارسازی به طور ویژه می‌تواند برای داده‌های با وضوح پایین‌تر مفید باشد. سرانجام، پنجره گرافیکی (شکل ۶ ب)، علاوه بر نشان دادن نیمرخ رودخانه انتخاب شده و پارامترهای مورفومتریک مرتبط با آن، امکان ذخیره نیمرخ تهیه شده به صورت تصویر یا برداری فراهم می‌کند. همچنین، در این پنجره امکان نرم‌کردن یا هموارسازی منحنی نیمرخ از طریق عامل هموارکننده^۱، نیز گنجانده شده است؛ به طوری که کاربر می‌تواند به دلخواه و متناسب با نیاز، مقدار آن را - که به طور پیش‌فرض صفر می‌باشد، تعیین کند.



شکل ۶- افزونه NProfiler در محیط ArcMap 10.8. (الف) پنجره ورودی، به کاربر اجازه می‌دهد تا کلاس عارضه رودخانه (به صورت خطی) و منبع ارتفاع (مدل دیجیتالی ارتفاع) را انتخاب کند. (ب) پنجره خروجی، تمام نیمرخ‌های نرمال‌شده و پارامترهای مرتبط (C_T , L_{max} , C_{max}) را ترسیم کرده و امکان ذخیره فایل‌های تصویری را نیز فراهم می‌کند.

Fig. 6. NProfiler plugin in ArcMap 10.8. (a) The input window allows the user to select the river feature class (polyline) and the elevation source (digital elevation model). (b) The output window plots all normalized profiles and associated parameters (C_T , L_{max} , C_{max}) and allows saving image files.

نتایج و بحث

نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده، برای هر یک از آبراهه‌های اصلی و فرعی انتخاب‌شده در حوضه‌های پنج‌گانه مورد مطالعه، تهیه و ترسیم شدند و به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۱۰ ارائه شده‌اند. به طور کلی، نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده، ویژگی‌های بسیار جالبی را نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که بیشتر آن‌ها دارای نیمرخ‌های طولی مقعر واضحی هستند و مقادیر تقعر مثبت و نسبتاً بالایی را نیز نشان می‌دهند. در جدول ۱ برخی از مقادیر مربوط به پارامترهای کمی برای نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده استخراج شده در

آبراهه‌های منتخب در حوضه‌های مورد مطالعه، ارائه شده است. با مشاهده و بررسی نیمرخ‌های طولی نرمال شده استخراج شده، مشخص شد که مهم‌ترین پارامتر به ویژه در نیمرخ‌های طولی خطی و مستقیم (برای مثال، نیمرخ B7, S5 در شکل ۴)، میزان شاخص تقعر (C_T) است، زیرا پارامترهای حداکثر تقعر (C_{max}) و موقعیت حداکثر تقعر نسبت به سرچشمه و بخش بالادست (L_{max}) (برای مثال، نیمرخ B5, S4 در شکل ۴)، تنها در نیمرخ‌های مقعر معنا پیدا می‌کنند (شکل ۸ و شکل ۱۰). این یافته، با نتایج به دست آمده توسط پرز-پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017)، همخوانی دارد. در ادامه، نیمرخ‌های طولی ترسیم شده برای آبراهه‌های اصلی و فرعی منتخب به تفکیک تشریح شده‌اند.

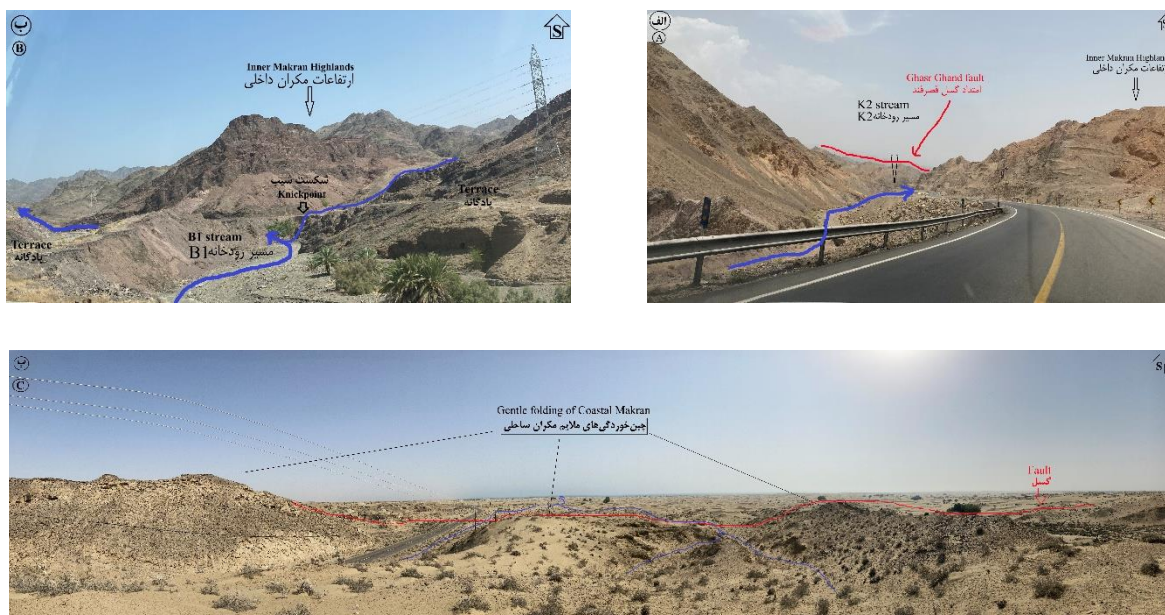
جدول ۱- برخی از مشخصات و اطلاعات کمی برای نیمرخ‌های طولی نرمال شده در آبراهه‌های بررسی شده در منطقه مورد مطالعه

Table 1- Some characteristics and quantitative information for normalized longitudinal profiles in the investigated streams in the study area.

اطلاعات مربوط به پارامترها Parameters information							نام حوضه Basin name
محدب‌ترین نیمرخ The most convex profile	خطی‌ترین نیمرخ The most linear profile	کم‌ترین میزان C_T Lowest C_T value (%)	بیشترین میزان C_T Highest C_T value (%)	مهم‌ترین گسل‌ها Main faults	تعداد آبراهه‌های فرعی Number of secondary streams	درازای آبراهه اصلی Main stream length (km)	
B7 ($C_T = -11.36\%$)	-	B1 ($C_T = 12.21\%$)	B6 ($C_T = 64.39\%$)	بشاگرد، قصرقند، چاه‌خان، پیشامگ، مورتان، پاشنگ،	8	316.62	باهوکلات (Bahukalat)
-	-	K2 ($C_T = 13.91\%$)	K4 ($C_T = 52.57\%$)	پاشگیرم، زبردان، دینارکلک،	4	194.92	کهیر (Kahir)
-	-	S6 ($C_T = 20.12\%$)	S4 ($C_T = 50.01\%$)	کهورکان، گابریک، گاکوش، جگین	6	206.90	سدیچ (Sedich)
-	-	G2 ($C_T = 18.83\%$)	G6 ($C_T = 46.64\%$)	Bashakerd, Ghasr) Ghand, Chah Khan, Pishamag, Murtan, Pashang, Pashgirm, Zirdan, Dinarkalak, Kahurakan, Gabrik, (Gakosh, Jagin	7	203.19	گابریک (Gabrik)
-	J1 ($C_T = 1.38\%$)	J1 ($C_T = 1.38\%$)	J6 ($C_T = 41.01\%$)		7	227.25	جگین (Jagin)
B7 ($C_T = -11.36\%$)	J1 ($C_T = 1.38\%$)	J1 ($C_T = 1.38\%$)	B6 ($C_T = 64.39\%$)	بشاگرد، قصرقند، چاه‌خان Bashakerd, Ghasr) (Ghand, Chah Khan	32	-	در مجموع Overall

نیمرخ‌های طولی نرمال شده در آبراهه‌های اصلی

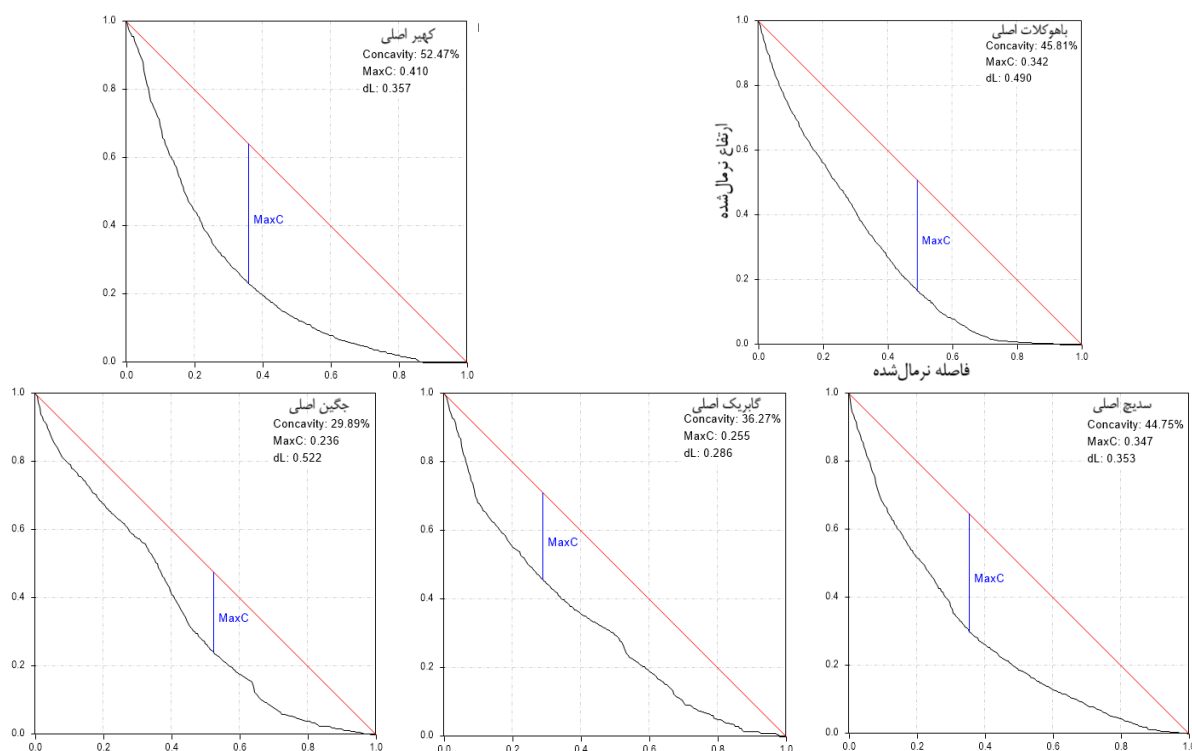
همه نیمرخ‌های طولی نرمال شده در آبراهه‌های اصلی حوضه‌های منتخب، حالت مقعر را نشان می‌دهند (شکل ۷ پ؛ شکل ۸). بیشترین و کم‌ترین میزان شاخص C_T ، به ترتیب مربوط به آبراهه اصلی کهیر ($C_T = 52.47\%$) و جگین ($C_T = 29.89\%$) می‌شوند (جدول ۱). نکته مهم و قابل توجه که در همه آبراهه‌های اصلی حوضه‌های پنج‌گانه به طور مشترک دیده می‌شود، آن است که همگی در بخش سرچشمه و بالادست حوضه‌ها، نیمرخ تقریباً خطی و مستقیمی را نشان می‌دهند. این موضوع می‌تواند به دلیل تأثیرپذیری این بخش از حوضه‌ها از ساختار لیتولوژیکی ارتفاعات مکران (مکران داخلی و بیرونی) و زمین‌ساختی ناشی از عملکرد گسل‌های متعدد نرمال، معکوس و به‌ویژه تراست‌های اصلی و مهم (برای مثال، بشاگرد و قصرقند) باشد (شکل ۷ الف و ب).



شکل ۷- چشم‌انداز هایی از حوضه‌های آبریز مورد مطالعه. الف) آبراهه شماره دو حوضه کهیر، ب) آبراهه شماره یک حوضه باهوکلالت، پ) پایاب حوضه سدیچ (آبراهه شماره چهار).

Fig. 7. Some landscapes of the study basins. A) No.2 Main Stream of Kahir basin, B) No.1 Main stream of Bahukalat basin, C) Downstream of the Sedich basin (No.4 Stream).

به طور کلی، در آبراهه‌های اصلی باهوکلالت، کهیر و سدیچ، گرادیان طولی نیمرخ با حالت تقعر کاملاً مشخصی آغاز شده و از بخش سرچشمه تا دهانه، به طور یکنواخت افزایش نشان می‌دهد؛ تا اینکه تقریباً در میانه مسیر و منحنی نیمرخ، حداکثر میزان تقعر (C_{Max}) رخ داده است (شکل ۸). این در حالی است که، آبراهه اصلی گابریک، ضمن نشان دادن حالتی مشابه اما با درصد نسبتاً پایین‌تری از تقعر ($C_T = 36.27\%$)، به طور مشخص در سه نقطه و متأثر از تراست‌های اصلی منطقه، دچار شکست شیب آشکاری شده‌است. اما، گرادیان طولی نیمرخ آبراهه اصلی جگین به‌طور آشکار با چهار مورد دیگر، متفاوت است. علاوه بر میزان تقعر پایین‌تر ($C_T = 29.89\%$)، منحنی نیمرخ در بخش بالادست با حالت خطی متمایل به مقعر شروع شده و تقریباً در حدود یک سوم طول مسیر خود که بر ارتفاعات مکران داخلی و بیرونی انطباق دارد، تحت تأثیر ساختارهای لیتولوژیکی و زمین‌ساختی (به‌ویژه تراست‌های قصرقند و چاه‌خان)، در حالت تقعر اما با شیب نسبتاً یکنواخت و به خط مستقیم جریان یافته است. سپس، از تراست چاه‌خان به‌سوی پایین‌دست، با شکست شیب ایجاد شده، گرادیان طولی و میزان تقعر آن افزایش چشمگیری نشان می‌دهد. حداکثر میزان تقعر، در این بخش از منحنی و منطبق بر واحد مکران ساحلی به‌ثبت رسیده‌است (شکل ۸).



شکل ۸- نیمرخ‌های طولی نرمال شده برای آبراهه‌های اصلی حوضه‌های پنج‌گانه

Fig. 8. Normalized longitudinal profiles for the main streams in the study basins.

نیمرخ‌های طولی نرمال شده در آبراهه‌های فرعی

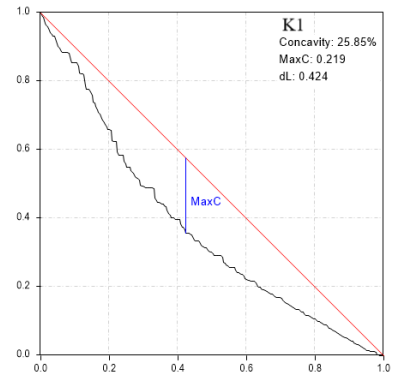
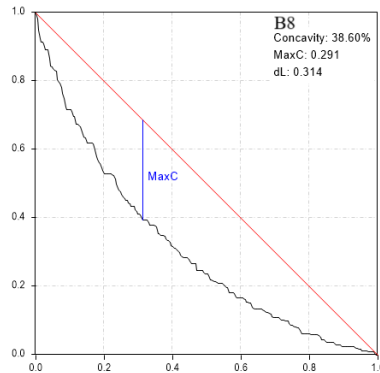
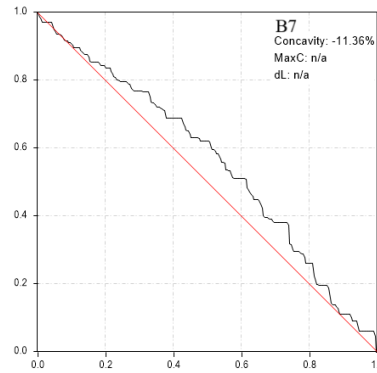
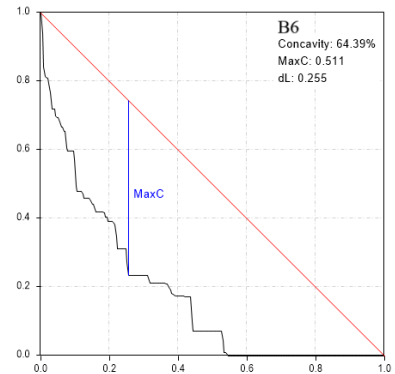
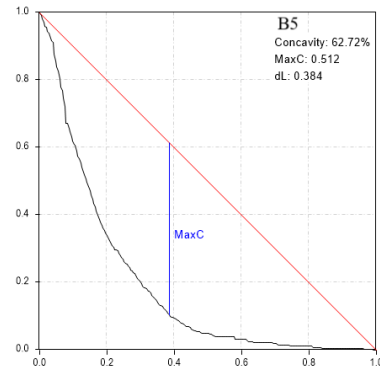
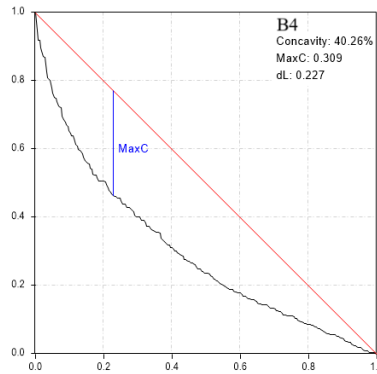
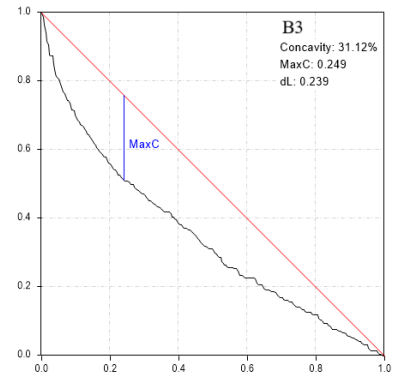
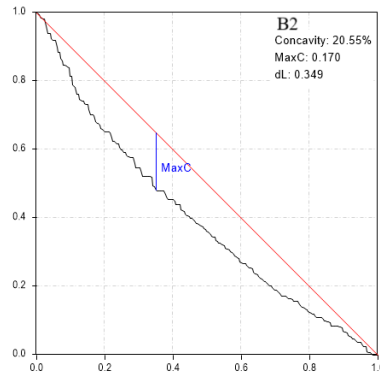
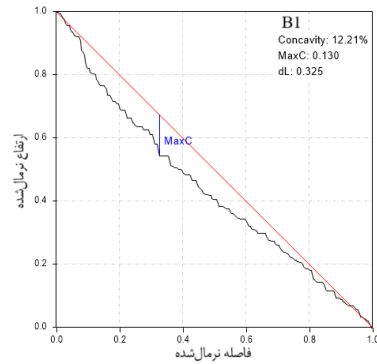
همانند آبراهه‌های اصلی، منحنی بیشتر نیمرخ‌های طولی نرمال شده مستخرج برای آبراهه‌های فرعی نیز، به صورت مقعر با دامنه نوسانی نسبتاً بالا می‌باشند (شکل ۱۰). بالاترین میزان شاخص C_T ، به ترتیب در آبراهه‌های B5 ($C_T = 62.72\%$)، B6 ($C_T = 64.39\%$) و K4 ($C_T = 52.57\%$) مشاهده می‌شود. اما، پایین‌ترین میزان آن، به ترتیب در نیمرخ‌های طولی نرمال شده آبراهه‌های J1 ($C_T = 1.38\%$)، J3 ($C_T = 2.64\%$) و B1 ($C_T = 12.21\%$) ثبت شده‌اند (جدول ۱). در این بین، نیمرخ‌های طولی در آبراهه‌های J1 و B7 ($C_T = -11.36\%$) به ترتیب به عنوان خطی‌ترین و محدب‌ترین نیمرخ، به زیرحوضه‌های کوچک با مساحت کم مربوط می‌شوند، به طوری که عمدتاً در بخش سرچشمه و یا مناطق بالادست حوضه‌های اصلی واقع شده‌اند. این نیمرخ‌ها، غالباً به ارتفاعات بالادست و شمالی‌ترین بخش‌های رشته کوه‌های مکران در حوضه‌های جگین و باهوکلالات و نیز تأثیر فراخاست زمین‌ساختی ناشی از عملکرد گسل‌های تراستی در این مناطق، مربوط می‌شوند. این یافته‌ها با نتایج به دست آمده توسط پرز-پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017) در آبراهه‌های واقع در دامنه‌های رشته کوه‌های سیرا الهامیلا^۱ در اسپانیا، همخوانی کامل و بالایی را نشان می‌دهد. به طور کلی، در بیشتر آبراهه‌های فرعی منتخب بررسی شده، صرف‌نظر از اینکه گرادیان نیمرخ‌های طولی نرمال شده در چه حالتی از تعادل قرار دارند، نقاط شکست شیب در منحنی نیمرخ‌ها (برای مثال، به‌طور ویژه در K3, S1, S3, G2, G5, B6) در ارتباط با نقش و تأثیر عملکرد گسل‌های متعدد، کاملاً آشکار و برجسته شده‌اند (شکل ۹ و شکل ۱۰).

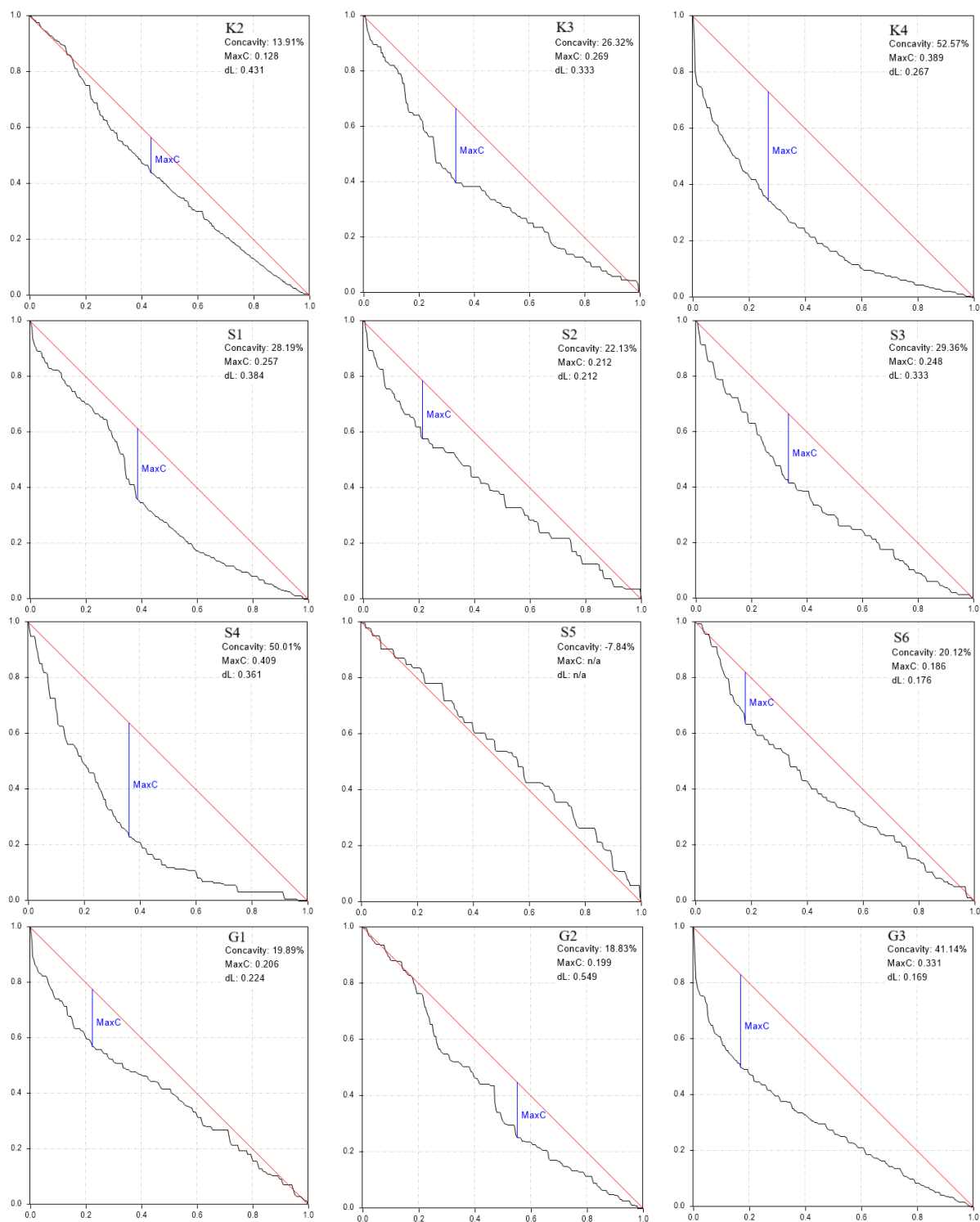


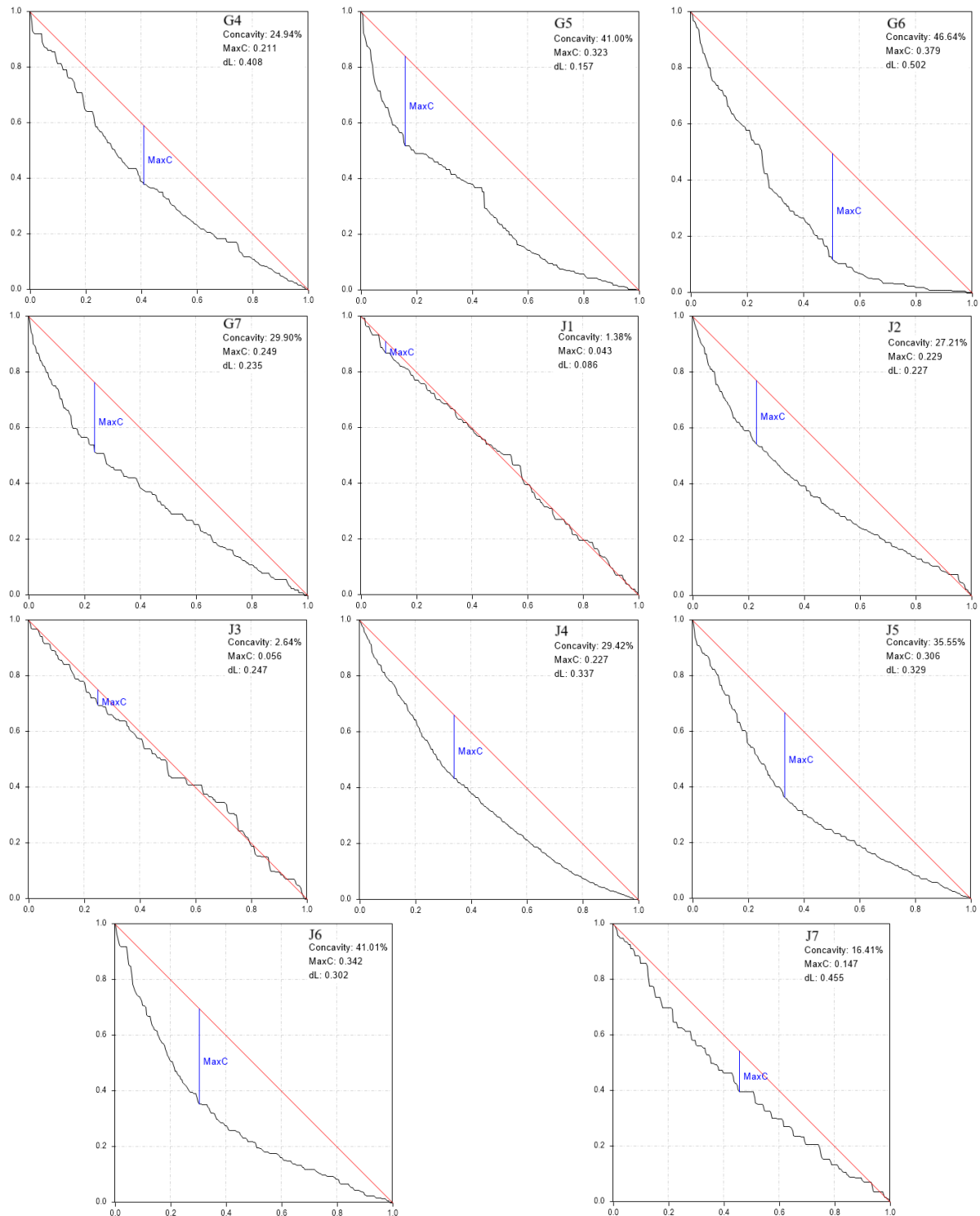
شکل ۹- نمونه‌هایی از نقاط شکست ایجاد شده در مسیر رودهای مورد مطالعه. الف) در حوضه کهیر، ب) در حوضه سدیج.

Fig. 9. Examples of knickpoints formed along the studied streams. A) in the Kahir basin, and B) in the Sedich basin.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، نیمرخ طولی در بیشتر آبراهه‌های فرعی منطقه مورد مطالعه، حالت مقعر دارند؛ اما، در میان آن‌ها تنها آبراهه‌های B7 ($C_T = -11.36\%$) و S5 ($C_T = -7.84\%$) دارای نیمرخ محدب، آبراهه‌های J1 ($C_T = 1.38\%$) و J3 ($C_T = 2.64\%$) به عنوان خطی‌ترین نیمرخ و چهار آبراهه B1, K2, J7, B2 (در شکل ۱۰) نیز به صورت نسبتاً خطی و مستقیم قابل مشاهده هستند. نیمرخ آبراهه J1 که خطی‌ترین نمونه ثبت شده در منطقه مورد مطالعه می‌باشد، در بیشتر طول مسیر کوتاه خود که در واحد مکران داخلی جریان یافته، به شدت تحت تأثیر گسل‌های فراوان نرمال و معکوس قرار گرفته است. این آبراهه در حد فاصل سرچشمه و دهانه (محل اتصال به آبراهه اصلی) از تراس‌های اصلی منطقه به ترتیب بشاگرد و قصرقند (در محل با نام پاشگیرم) متاثر شده؛ به گونه‌ای که، C_{Max} در این نیمرخ در پایین‌دست تراس بشاگرد و منطبق بر واحد لیتولوژیکی Q^{II} رخ داده است. این نیمرخ، به طور آشکار و چشمگیری، تأثیر و اهمیت متغیرهای زمین‌ساختی و لیتولوژیکی را نشان می‌دهد. زیرا، فراز و فرودهای آن در انطباق کامل با خط گسل‌ها، تنوع و تغییر در واحدهای لیتولوژیکی (رسوبی، آذرین، آمیزه‌های رنگین - مجموعه دورکان، واحد گوردک) منطقه می‌باشد. همچنین، نیمرخ آبراهه B7 (منطبق بر آبراهه پیشامگ) به عنوان محدب‌ترین نیمرخ، با جریان یافتن در بخش جنوبی واحد مکران داخلی، علاوه بر واقع شدن با فاصله کم در شمال تراس قصرقند، تحت تأثیر گسل‌های معکوس پیشامگ و مورتان نیز قرار گرفته است. این نیمرخ، به روشنی نشان می‌دهد که این بخش از منطقه (زیرحوضه مربوطه) در واکنش به تداوم فراخاست زمین‌ساختی ناشی از فعالیت تراس قصرقند و دیگر گسل‌های معکوس، در حالت گذار بوده و موج برش و فرسایش آن بر ناهمواری منطقه در جریان است. نیمرخ آبراهه S1 را می‌توان به طور مشخص به دو بخش متفاوت بالا و پایین که به ترتیب در واحد مکران داخلی و بیرونی جریان یافته، تقسیم کرد (شکل ۱۰). همان‌طور که این نیمرخ نشان می‌دهد، بر اثر فعالیت تراس قصرقند (امتداد آن در محل با نام پاشگیرم)، شکست شیب قابل توجهی در منحنی آن رخ داده و با ثبت حداکثر تقعر (C_{Max})، شاخص تقعر آن معنادار شده است.







شکل ۱۰- نیمرخ‌های طولی نرمال شده برای آبراهه‌های فرعی در حوضه‌های پنج‌گانه (B: باهوكلات، K: كهير، S: سدېچ، G: گابريك، J: جگين). برای آگاهی از موقعیت مکانی، به شکل ۳ مراجعه کنید.

Fig. 10. Normalized longitudinal profiles for secondary streams in the five basins studied (B: Bahukalat, K: Kahir, S: Sedich, G: Gabrik, J: Jagin). See fig.3 for location information.

نتیجه‌گیری

نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه، امکان مقایسه تغییرات گرادیان رودخانه‌های گوناگون را فراهم می‌کنند که ممکن است تحت تأثیر فاکتورهای کنترل‌گر آب و هوایی، سنگ‌شناسی و یا زمین‌ساختی باشند. در این مطالعه، با به کارگیری افزونه NProfiler و مبتنی بر داده‌های DEM در محیط ArcGIS 10.8، به بررسی و شناسایی الگوهای واکنش آبراهه‌های منتخب در پنج حوضه آبریز اصلی - باهوکلالت، کهیر، سدیچ، گابریک و جگین، واقع در بخش ایرانی منشور برآفرایشی مکران پرداخته شد.

به طور کلی، نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده نسبت به نیمرخ‌های طولی سنتی، تفسیر آسان‌تری دارند و نقاط شکست شیب در طول نیمرخ رودخانه‌ها را به‌نحو بارزتری، برجسته‌تر می‌کنند. در این مطالعه، همه نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده برای آبراهه‌های اصلی (شکل ۸) و بیشتر نیمرخ‌های نرمال‌شده در آبراهه‌های فرعی (شکل ۱۰)، درصد نسبتاً بالایی از میزان تقعر را که نشان‌دهنده وجود چشم‌اندازی فرسوده و فرسایش یافته است، را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده با حالت مقعر نشان‌دهنده وجود یک حالت نسبی از تعادل در نیمرخ رودخانه‌ها هستند؛ زیرا پس از فراخاست زمین‌ساختی ارتفاعات مکران، در ارتباط با عناصر آب و هوایی و نیز لیتولوژی حساس به فرسایش - که به طور ویژه بر واحد مکران ساحلی نیز منطبق است، با غلبه موج برش عمقی و فرسایش شبکه زهکشی، نیمرخ‌های طولی به سطحی از پایداری و آرامش نسبی رسیده‌اند. همچنین، بررسی نیمرخ‌های ترسیم شده نشان داد، نیمرخ‌های نسبتاً خطی و مستقیم و حتی محدب، مربوط به آبراهه‌های واقع در بخش سرچشمه حوضه‌ها می‌باشند. این گونه نیمرخ‌ها هر چند به طور محدود در منطقه یافت می‌شوند، اما ارتباط و تأثیرپذیری زیرحوضه‌های کوچک با مساحت پایین از گسل‌های فراوان (به‌ویژه تراس‌های اصلی) منطقه و نیز تنوع لیتولوژیکی ارتفاعات مکران، را نشان می‌دهند. بنابراین، به‌روشنی نشان می‌دهند که آبراهه‌ها در این مناطق (مناطق بالادست حوضه‌های باهوکلالت و جگین)، در حالت گذار هستند. در پایان شایان گفتن است، به‌کارگیری افزونه NProfiler در محیط نرم‌افزار ArcGIS، علاوه بر اینکه تحلیل و تفسیر نیمرخ‌های طولی رودخانه مبتنی بر مدل‌های دیجیتالی ارتفاع را به‌روشی ساده، سریع و کارآمد فراهم نمودند؛ در زمینه شناخت و تفسیر الگوهای واکنش رودخانه‌ها نسبت به عوامل کنترل‌کننده درونی - زمین‌ساخت و بیرونی - سنگ‌شناسی، تغییرات آب و هوایی و فرسایش ناشی از آن‌ها، کمک شایانی نمودند. بنابراین، تحلیل‌های سریع انجام‌شده در این مطالعه، توانایی، سودمندی و کاربردی بودن نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه را به طور ویژه، برجسته کرد.

سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانیم از سه داور گرامی که با نظرات و پیشنهادات ارزشمند خویش باعث بهبود کیفیت و افزایش غنای متن شدند، سپاسگزاری نمائیم.

References

- Alaei-Taleghani, M. (2007). *Geomorphology of Iran*. Tehran: Ghoomes Publishing. [In Persian]
- Antón, L., De Vicente, G., Muñoz-Martín, A., & Stokes, M. (2014). Using river long profiles and geomorphic indices to evaluate the geomorphological signature of continental scale drainage capture, Duero basin (NW Iberia). *Geomorphology*, 206, 250-261. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.028>
- Azañón, J. M., Galve, J. P., Pérez-Peña, J. V., Giaconia, F., Carvajal, R., Booth-Rea, G., ... & Roldán, F. J. (2015). Relief and drainage evolution during the exhumation of the Sierra Nevada (SE Spain): Is denudation keeping pace with uplift? *Tectonophysics*, 663, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.015>
- Barbero, E., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Marroni, M., Catanzariti, R., & 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*, 195, 104306. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104306>

- Barbero, E., Delavari, M., Dolati, A., Vahedi, L., Langone, A., Marroni, M., ... & 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*, 10(12), 1100. <https://doi.org/10.3390/min10121100>
- Barbero, E., Di Rosa, M., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Zaccarini, F., ... & 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*, 14(2), 101522. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101522>
- Barbero, E., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Catanzariti, R., ... & 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*, 12(3), 101106-1. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.12.001>
- Barbero, E., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Di Rosa, M., & 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*, 141, 74–101. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2025.01.016>
- Bayer, R., Chery, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson, F., ... & Bellier, O. (2006). Active deformation in Zagros—Makran transition zone inferred from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 165(1), 373-381. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02879.x>
- Brookfield, M. E. (1998). The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards. *Geomorphology*, 22(3-4), 285-312. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00082-2)
- Brookfield, M. E. (2008). Evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India–Asia collision: Rivers draining north from the Pamir syntaxis. *Geomorphology*, 100(3-4), 296-311. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.003>
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2012). *Tectonic geomorphology* (2nd ed.). Chichester: Wiley-Blackwell. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781444345063>
- Burg, J. P. (2018). Geology of the onshore Makran accretionary wedge: Synthesis and tectonic interpretation. *Earth-Science Reviews*, 185, 1210–1231. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.011>
- Burg, J. P., Dolati, A., Bernoulli, D., & 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, pp. 239–259. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30609-9_12
- Byrne, D. E., Sykes, L. R., & 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*, 97(B1), 449-478. <https://doi.org/10.1029/91JB02165>
- Castillo, M., Bishop, P., & Jansen, J. D. (2013). Knickpoint retreat and transient bedrock channel morphology triggered by base-level fall in small bedrock river catchments: The case of the Isle of Jura, Scotland. *Geomorphology*, 180, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.023>
- Demoulin, A. (1998). Testing the tectonic significance of some parameters of longitudinal river profiles: the case of the Ardenne (Belgium, NW Europe). *Geomorphology*, 24(2-3), 189-208. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00016-6)
- Dolati, A. (2010). *Stratigraphy, structure, geology, and low-temperature thermochronology across the Makran accretionary wedge in Iran*. (Ph.D. Thesis), ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006226348>
- Dolati, A., & 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* (pp. 261-277). Berlin: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30609-9_13
- Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J. M., Azañón, J. M., Pérez-Peña, J. V., Pérez-Romero, J., & Villegas, I. (2012). Geomorphic evidence of active tectonics in the Sierra Alhamilla (eastern Betics, SE Spain). *Geomorphology*, 145, 90-106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.043>

- Goldrick, G., & Bishop, P. (2007). Regional analysis of bedrock stream long profiles: evaluation of Hack's SL form, and formulation and assessment of an alternative (the DS form). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5), 649-671. <https://doi.org/10.1002/esp.1413>
- Grohmann, C. H., Riccomini, C., & Alves, F. M. (2007). SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. *Computers & Geosciences*, 33(1), 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.002>
- Hack, J. T. (1957). *Studies of longitudinal profiles in Virginia and Maryland* (Vol. 294). Washington DC: US Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp294B>
- Irandoost, M. A., Priestley, K., & Sobouti, F. (2022). High-resolution lithospheric structure of the Zagros collision zone and Iranian Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(11), e2022JB025009. <https://doi.org/10.1029/2022JB025009>
- Jackson, J., Norris, R., & Youngson, J. (1996). The structural evolution of active fault and fold systems in central Otago, New Zealand: evidence revealed by drainage patterns. *Journal of Structural Geology*, 18(2-3), 217-234. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(96\)80046-0](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)80046-0)
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics Earthquake, Uplift, and Landscape* (2nd Ed.). New Jersey: Prentice Hall Publisher.
- Kirby, E., & Whipple, K. (2001). Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology*, 29(5), 415-418. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029%3C0415:QDRURV%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029%3C0415:QDRURV%3E2.0.CO;2)
- Kirby, E., & Whipple, K. X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44, 54-75. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009>
- Kopp, C., Fruehn, J., Flueh, E. R., Reichert, C., Kukowski, N., Bialas, J., & Klaeschen, D. (2000). Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data. *Tectonophysics*, 329(1-4), 171-191. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00195-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00195-5)
- Mackin, J. H. (1948). Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin*, 59(5), 463-512. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1948\)59\[463:COTGRJ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1948)59[463:COTGRJ]2.0.CO;2)
- Matoš, B., Tomljenović, B., & Trenc, N. (2014). Identification of tectonically active areas using DEM: a quantitative morphometric analysis of Mt. Medvednica, NW Croatia. *Geological Quarterly*, 58(1), 51-70. <https://doi.org/10.7306/gq.1130>
- McCall, G. J. H., & 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*, 10(1), 387-397. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1982.010.01.26>
- Mohammadi, A., Burg, J. P., Winkler, W., Ruh, J., & Von Quadt, A. (2016). Detrital zircon and provenance analysis of Late Cretaceous–Miocene onshore Iranian Makran strata: Implications for the tectonic setting. *Bulletin*, 128(9-10), 1481-1499. <https://doi.org/10.1130/B31361.1>
- Molin, P., Pazzaglia, F. J., & Dramis, F. (2004). Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, Sila massif, Calabria, southern Italy. *American Journal of Science*, 304(7), 559-589. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.7.559>
- Penney, C., Copley, A., & 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*, 202(2), 1122-1136. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv202>
- Pérez-Peña, J. V., Al-Awabdeh, M., Azañón, J. M., Galve, J. P., Booth-Rea, G., & Notti, D. (2017). SwathProfiler and NProfiler: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. *Computers & Geosciences*, 104, 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.008>
- Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M., & 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*, 35(6), 1214-1223. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.06.006>

- Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M., Azor, A., Delgado, J., & González-Lodeiro, F. (2009b). Spatial analysis of stream power using GIS: SLk anomaly maps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(1), 16-25. <https://doi.org/10.1002/esp.1684>
- Pérez-Peña, J. V., Azor, A., Azañón, J. M., & Keller, E. A. (2010). Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*, 119(1-2), 74-87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.020>
- Priestley, K., Sobouti, F., Mokhtarzadeh, R. A., Irandoust, M., Ghods, R., Motaghi, K., & Ho, T. (2022). New constraints for the on-shore Makran subduction zone crustal structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(1), e2021JB022942. <https://doi.org/10.1029/2021JB022942>
- Rigon, R., Rodriguez-Iturbe, I., Maritan, A., Giacometti, A., Tarboton, D. G., & Rinaldo, A. (1996). On Hack's law. *Water Resources Research*, 32(11), 3367-3374. <https://doi.org/10.1029/96WR02397>
- Royden, L., & 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*, 118(2), 497-518. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20031>
- Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Fodor, L., Horváth, E., & Telbisz, T. (2009). Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: A DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary. *Geomorphology*, 104(3-4), 203-217. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.014>
- Scotti, V. N., Molin, P., Faccenna, C., Soligo, M., & 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*, 206, 37-57. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.017>
- Seeber, L., & Gornitz, V. (1983). River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, 92(4), 335-367. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90201-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90201-9)
- Stöcklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, 52(7), 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Troiani, F., Galve, J. P., Piacentini, D., Della Seta, M., & Guerrero, J. (2014). Spatial analysis of stream length-gradient (SL) index for detecting hillslope processes: a case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, 214, 183-197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.004>
- Whipple, K. X., & Tucker, G. E. (1999). Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B8), 17661-17674. <https://doi.org/10.1029/1999JB900120>
- Willett, S. D., McCoy, S. W., Taylor Perron, J., Goren, L., & Chen, C. Y. (2014). Dynamic reorganization of river basins. *Science*, 343(6175), 1248765. <https://doi.org/10.1126/science.1248765>
- Wobus, C., Whipple, K. X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, K., ... & Sheehan, D. (2006). Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. In: *Tectonics, Climate and Landscape Evolution*. Willett, S.D., Hovius, N., Brandon, M.T., Fisher, D.M. (Eds.), Geology Society of America Special Papers, 55-74. [https://doi.org/10.1130/2006.2398\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(04))
- Yamani, M. (1998). The Comparison of Change Direction of River on Deltas of East Makran Coastal Plain Surface. *Geographical Researches*, 35, 34-56. [In Persian] https://journals.ut.ac.ir/article_17220_34.html
- Zelenin, E., Bachmanov, D., Garipova, S., Trifonov, V., & Kozhu-rin, A. (2022). The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): The Ontology and Design behind the Continental-Scale Dataset. *Earth System Science Data*, 14(10), 4489-4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>
- Zhang, H. P., Zhang, P. Z., Kirby, E., Yin, J. H., Liu, C. R., & Yu, G. H. (2011). Along-strike topographic variation of the Longmen Shan and its significance for landscape evolution along the eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4), 855-864. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.05.015>