



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

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 36, Issue 2, No.98, 2025, pp. 141- 168

Received: 25/05/2025 Accepted: 09/08/2025

Spatial-Temporal Analysis of Channel Dynamics and Longitudinal Profile Changes of the Halil-Rud River Using Remote Sensing with Regard to the Interaction of Natural and Anthropogenic Factors (1984–2020)

Mohammad Sharifi Paichoon  *

Associate professor in Geomorphology, Department of Geography, University of Yazd, Yazd, Iran
mscharifi@yahoo.com
msharifi@yazd.ac.ir

A'zam Soleimani Paytagh

M.A. in Geomorphology, Department of Geography, University of Yazd, Yazd, Iran
slymanypaytaqazm@gmail.com

Abstract

This study investigated the longitudinal profile changes of the Halil-Rud riverbed, highlighting the intricate dynamics of river channels influenced by natural processes and human activities. Utilizing Landsat satellite imagery from 1984 to 2020, alongside Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data, we analyzed spatial and temporal changes in the river's morphology across 8 distinct sections. Our findings revealed an overall increase in river length with significant variations attributable to geological, tectonic, and anthropogenic factors. Notably, sections characterized by resistant igneous rocks maintained relative stability, while downstream areas with alluvial sediments exhibited pronounced fluvial dynamics and meandering. The study identified a period of relative stability from 1996 to 2008, which was followed by significant morphological changes linked to intensified human activities, including dam construction and land use alterations. These changes had implications for hydrology, sediment transport, and sustainability of adjacent ecosystems, emphasizing the need for effective water resource management strategies to mitigate the impacts of riverbed instability on local communities and infrastructure.

Keywords: Halil-Rud River, Longitudinal Profile, Satellite Imagery, River Morphology, Anthropogenic Changes, Geological Factors, Fluvial Dynamics, Water Resource Management, Sediment Transport, Ecosystem Sustainability.

Introduction

The dynamics of river channels and their associated fluvial morphological features represent complex, nonlinear systems influenced by a combination of natural processes and human activities, particularly at localized levels.

*Corresponding Author

Sharifi, M. and Solaimani, A. (2025). Spatial-temporal analysis of channel dynamics and longitudinal profile changes of the Halilrud River using remote sensing and the interaction of natural and anthropogenic factors (1984–2020). *Geography and Environmental Planning*, 36 (2), 141 - 168 .



2252-0910 © University of Isfahan

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



10.22108/gep.2025.145420.1726

These systems exhibit significant spatial variability with notable differences observable across diverse geographic regions and among various segments within a single river network. In recent decades, anthropogenic changes have markedly altered channel forms and dimensions. Riverine systems function not only as agents of geomorphological change, but also as critical indicators of broader landscape development. This dual role is evident in observable changes to channel planform, cross-sectional geometry, longitudinal profiles, and network topology. Typically, fluvial systems respond gradually over short temporal scales, ranging from seasons to decades; however, they can also undergo rapid and substantial morphological changes under sustained environmental stress (over centennial timescales) or during extreme hydrological events, such as floods with recurrence intervals exceeding 100 years.

One of the most significant challenges in river systems is the migration of channel beds over time, which can cause substantial damage to infrastructure, human settlements, and agricultural lands. Among these changes, alterations in the longitudinal profiles of rivers—resulting from interactions among river incision, lithology, tectonics, base level fluctuations, and anthropogenic activities—are particularly noteworthy. Studying river longitudinal profiles is crucial for various practical applications, including flood control, reservoir efficiency, and watershed management. This research aimed to investigate the changes in the longitudinal profile of the Halil-Rud riverbed through the processing and analysis of satellite images and data, alongside an examination of the influencing factors. The relevance of this study lay in the significant impact that changes in the river's longitudinal profile could have on the surrounding geographic regions, affecting hydrology, sediment transport, human safety, local economies, and availability of water for agriculture and orchards. In the realm of water resource management, the dynamic behavior of river systems often leads to alterations in flow pathways and water quality, which in turn influence agricultural irrigation, industrial water consumption, and drinking water supplies. Ecologically, the structural stability of riverbeds is vital for the sustainability of adjacent ecosystems, such as wetlands and riparian forests. From a socio-economic perspective, riverbank erosion and associated morphological changes can result in the loss of arable land and other terrestrial resources, directly impacting agricultural productivity and livelihoods of local communities. Furthermore, these changes may jeopardize infrastructure, including bridges, roads, and levees, leading to increased maintenance costs and negative economic consequences for regional development. Given that rivers are inherently dynamic systems with their morphological features evolving over time due to geomorphological, geological, hydrological, and anthropogenic factors, identifying the physical processes and structural conditions that promote riverbed stability is of critical importance. This research highlighted these pressing issues.

Materials & Methods

To conduct this study, Landsat satellite images with a spatial resolution of 30 m were obtained from the United States Geological Survey (USGS), covering the period from 1984 to 2020. Specifically, Landsat 5 (TM) imagery was used for the years 1984 and 1996, Landsat 7 (ETM+) for 2008, and Landsat 8 (OLI) for 2020. Additionally, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data with a 30-meter resolution were employed to generate a Digital Elevation Model (DEM) for slope and topographic analyses of the watershed. Image pre-processing, which included geometric and radiometric corrections, was performed using ENVI 5.3 software. To identify the riverbed and detect changes in the river channel, supervised classification methods were utilized and river boundaries were delineated using spectral indices. The processed images were then mosaicked for integrated analysis. Given its considerable length (over 400 km) and passage through various geomorphological units, the river was divided into 8 sections. For change detection, the satellite images were imported into a GIS environment, where channel changes within each segment were assessed across 4 time periods. Google Earth Pro was also employed for visual change detection and data validation. Furthermore, 1:50,000 topographic maps of different parts of the basin, 1:100,000 geological maps of the study area, and maps detailing soil, vegetation cover, and land use were utilized to reconstruct the basin and evaluate the influence of both natural and anthropogenic factors on changes in the river's longitudinal profile.

Research Findings

Data analysis revealed a general increase in river length across the eight defined sections. Specifically:

- **Increases in Length:** Sections 1, 3, 5, 6, 7, and 8 showed increases of approximately 2, 2, 4, 3, 2, and 3 km, respectively.
- **Minimal Changes:** Sections 2 and 4 exhibited relatively minor longitudinal changes attributed to dynamic equilibrium and tectonic influences.
- **Geological Influences:** The presence of resistant igneous rocks in upstream sections had contributed to their stability, while downstream sections (7 and 8) demonstrated higher fluvial dynamics and extensive meandering.

- **Tectonic Activities:** Significant deviations in the river course had occurred in sections 2, 4, and 5 due to faults and geological uplifts with a notable orientation shift in section 3.
- **Human Interventions:** Dam construction had altered water discharge and sediment deposition, increasing river length and modifying flow patterns in Sections 5 and 6.
- **Land Use Changes:** Agricultural expansion and vegetation removal in Sections 4 to 7 had intensified erosion and morphological transformations.
- **Temporal Patterns:** Between 1996 and 2008, the riverbed had experienced minor changes, indicating stability, while significant morphological changes were observed from 2008 to 2020 due to intensified human activities.

Discussion of Results and Conclusion

The results indicated that each segment of the river had unique characteristics influenced by various factors, including lithology, tectonic activity, topography, soil type, vegetation cover, and water discharge.

- **Interplay of Factors:** Changes in the river length and morphology were governed by a complex interplay of natural factors (geology, tectonics, topography) and human activities (dam construction, land use change).
- **Stability and Dynamics:** Upstream segments with igneous rocks showed relative stability, while downstream alluvial sections exhibited extensive changes due to high dynamics and erosion.
- **Longitudinal Profile Changes:** Significant longitudinal profile changes were more pronounced in low-gradient sections with soft sediments, while steep-gradient segments exhibited less variation.
- **Channel Dynamics:** The river's shift between old and new alluvial beds accounted for high channel migration, with some areas experiencing over 3 kilometers of length increase and extensive meandering.
- **Human Impact:** Dam construction and land use changes had substantially influenced water discharge and sediment dynamics, leading to alterations in river morphology and flow patterns.

These findings underscored the importance of understanding both natural processes and human impacts on river systems to develop effective management strategies for water resources and ecosystem sustainability.

مقاله پژوهشی

تحلیل فضایی- زمانی پویایی بستر و تغییرات نیم‌رخ طولی هلیل‌رود با استفاده سنجش از دور و برهم‌کنش عوامل طبیعی و بشر ساخت (۱۹۸۴-۲۰۲۰ م)

محمد شریفی پیچون* ، دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

msharifi@yazd.ac.ir

اعظم سلیمانی پای‌طاق، کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

slymanypaytaqazm@gmail.com

چکیده

دینامیک و تغییرات بستر رودخانه و مشخصات هندسی آن تابع عوامل طبیعی و انسانی به‌شکل محلی است و نه تنها از منطقه‌ای به منطقه دیگر، که در بخش‌های گوناگون یک رودخانه نیز تفاوت‌های چشمگیری دارد. به‌ویژه در چند دهه گذشته فعالیت‌ها و عملکردهای انسانی اثر چشمگیری بر ویژگی‌های هندسی بستر رودخانه بر جای گذاشته است؛ از این رو، این مطالعه تغییرات نیم‌رخ طولی و مورفولوژی رودخانه هلیل‌رود طی دوره زمانی ۳۵ ساله (۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰ م) و تأثیر عوامل گوناگون بر آن را با استفاده از تحلیل داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای لندست (۵، ۷ و ۸) ارزیابی و تغییرات نیم‌رخ طولی آن را در GIS محاسبه کرده است. به دلیل طولی بودن و عبور از واحدهای ژئومورفولوژیکی گوناگون، رودخانه به ۸ پاره تقسیم شده است. تحلیل داده‌ها از افزایش طول رودخانه در پاره‌های هشت‌گانه حکایت دارد. به‌طور خاص برخی پاره‌ها با افزایش طول بین ۲ تا ۴ کیلومتر روبرو شده‌اند؛ درحالی‌که برخی پاره‌ها (به‌ویژه در بخش‌های میانی) به دلیل تعادل دینامیکی و تأثیرات زمین‌ساختی تغییرات کمتری در نیم‌رخ طولی خود داشته‌اند. مقاومت سنگ‌های آذرین در پاره‌های بالادست سبب پایداری نسبی و رسوبات آبرفتی در پاره‌های پایین‌دست سبب دینامیک بالای رودخانه و تغییرات گسترده در الگوی پیچان‌رودها شده است. فعالیت‌های زمین‌ساختی اغلب در بخش‌های میانی با ایجاد گسل‌ها و بالآمدگی‌های زمین‌شناختی، انحرافات قابل‌توجهی در مسیر رودخانه ایجاد کرده است. فعالیت‌های انسانی همچون ساخت سد، تغییرات چشمگیر در دبی آب و رسوب‌گذاری در پایین‌دست سد (پاره‌های ۵ و ۶) به افزایش طول رودخانه و پیچان‌رودهای آن و همچنین تغییر الگوی جریان منجر شده و تغییر کاربری اراضی به‌شکل تخریب پوشش گیاهی و گسترش کشاورزی در پاره‌های پایانی باعث افزایش فرسایش و تغییرات مورفولوژیکی شده است. از نظر الگوی زمانی نیز بستر رودخانه در بیشتر پاره‌های هشت‌گانه طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۸ تغییرات نسبتاً کمی داشته است؛ اما پس از آن با تشدید فعالیت‌های انسانی همچون ساخت سد این تغییرات افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای، ژئومورفولوژی رودخانه، بستر رودخانه، نیم‌رخ طولی، هلیل‌رود

*نویسنده مسئول

شریفی‌پیچون، محمد و سلیمانی، اعظم. (۱۴۰۴). تحلیل فضایی- زمانی پویایی بستر و تغییرات نیم‌رخ طولی هلیل‌رود با استفاده سنجش از دور و برهم‌کنش عوامل طبیعی و بشر ساخت (۱۹۸۴-۲۰۲۰ م)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۶ (۲)، ۱۶۸-۱۴۱.



مقدمه

رودخانه‌ها شریان‌های حیاتی سرزمین و چرخه آب هستند که نقش اساسی در شکل‌دهی به چشم‌اندازهای طبیعی و تأمین نیازهای انسانی مانند آب و حتی خاک ایفا می‌کنند و به‌عنوان بخشی از زیست‌بوم‌های طبیعی زیستگاه‌های متنوعی برای گونه‌های گیاهی و جانوری به وجود می‌آورند؛ به همین دلیل سیستم‌های رودخانه‌ای به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین عناصر تشکیل‌دهنده سطح زمین از جنبه‌های گوناگون مورد توجه انسان بوده است (یمانی و شرفی، ۱۳۹۱). شبکه‌های رودخانه‌ای نه تنها نیروی محرک مهمی در تغییرات ژئومورفولوژیکی هستند، می‌توانند تأثیر سایر نیروهای محرک در تکامل چشم‌انداز را نیز از طریق تغییرات در الگوی کلی بستر، هندسه، شیب و مکان‌شناسی آشکار کنند (Kirby & Whipple, 2012). رودخانه‌ها و مورفولوژی آنها به‌طور مداوم تحت تأثیر عوامل و متغیرهای مختلف، از نظر ابعاد و نیم‌رخ و الگو تغییر پیدا می‌کنند. این تغییرات نمود و نمادی از تغییرات لندفرم‌ها و چشم‌اندازهای ژئومورفیک است و روند تحولات آنها را آشکار می‌سازد (شریفی‌پیچون و پرنون، ۱۳۹۶ب).

از عمده مسائل مربوط به رودخانه‌ها تغییر بستر آنها در طول زمان است که می‌تواند خسارت‌ها و آسیب‌های زیادی را به تأسیسات، سکونتگاه‌ها و کشتزارها وارد نماید. از نظر علم زمین‌ریخت‌شناسی تغییر در ویژگی‌های هندسی و راستای مسیر به‌شکل طبیعی و تحت تأثیر فرایندهای محیطی و اقلیمی، بخشی از تکامل رودخانه برای دستیابی به تعادل نهایی و شرایط پایدار تلقی می‌شود. از این نظر، ریخت‌شناسی رودخانه تحت تأثیر عوامل و مؤلفه‌های طبیعی پرشماری تغییرات زیادی پیدا کرده است که عبارت‌اند از: حجم رواناب و نوسانات آن در طول سال یا دوره‌های مختلف، رخدادهای ناگهانی و عظیم شامل ابرسیلاب‌ها یا تغییرات تکتونیکی شدید، بارندگی و رژیم آن، سنگ‌شناسی، تغییرات سطح اساس و تغییرات اقلیمی به‌ویژه خشکسالی‌های شدید سال‌های اخیر. همچنین عملکردها و دخالت‌های نابجا و نامناسب انسانی به‌ویژه در نیم‌قرن اخیر مانند ساختن سد، تغییر در مورفولوژی و بستر رود، انتقال بین‌حوضه‌ای آب رودخانه و تغییر کاربری اراضی باعث این تغییرات شده است. از جمله این تغییرات، تغییر در نیم‌رخ‌های طولی رودخانه‌ها و مؤلفه‌های گوناگون آن از قبیل طول، مورفولوژی، شیب و بستر آن است. در بسیاری از موارد رودخانه مسیر خود را تغییر داده، بر تعداد پیچ‌های آن افزوده شده و یا طول و پیچ‌وخم‌های آن کاهش پیدا کرده است. طول رودخانه که بیشتر یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مورفومتریک است، تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد (Schumm, 2005) و تغییرات آن نشان‌دهنده تغییرات در تعادل هیدرولوژیک و ژئومورفیک سیستم رودخانه است. از این رو، بررسی نیم‌رخ طولی رودخانه‌ها در بسیاری از جنبه‌های کاربردی مانند مهار سیل، کیفیت کارایی مخازن سدها، آبخیزداری و... اهمیت دارد (رجبی و انصاری، ۱۴۰۲)؛ مثلاً می‌توان به سیل‌خیزی در بسیاری از حوضه‌های آبی در مناطق مختلف ایران در سال‌های گذشته اشاره کرد که نقش انسان را به‌منزله بهره‌بردار اصلی رودخانه در سیستم آبرفتی رودخانه‌ای برجسته می‌نماید (نوحه‌گر و یمانی، ۱۳۸۴). عملکرد انسان فرایندها و روندهای طبیعی را تغییر داده یا تسریع کرده است و به همین علت دامنه زمانی تغییر بستر رودخانه را کوتاه نموده است (Yang et al., 2024). به‌طور قابل توجهی فعالیت انسان با تخلیه رسوبات به مناطق ساحلی مسیر جریان رودخانه را تغییر می‌دهد و بر سیستم‌های ساحلی و مدیریت حوضه آبی رودخانه‌ها تأثیر می‌گذارد (Frimpoma et al., 2025). دو پدیده

تغییرات آب و هوایی و کاربری زمین بیشترین اثرگذاری را بر رژیم‌های آب در جهان دارند (Chung et al., 2011). تغییرات آب و هوایی مانند افزایش دما و تغییرات بارش و رژیم آن می‌تواند بر فرایند هیدرولوژیکی و بسترهای رودخانه‌ای حوضه‌های آبی اثرگذار باشد (میرزایی و زیبایی، ۱۳۹۹). مهم‌تر از این دو عامل، فعالیت‌های زمین‌ساختی و تأثیرات سنگ‌شناسی است که در تغییرات هندسی بستر رودخانه و نیمرخ طولی آن اثر دارند. تشکیل پادگانه‌های آبرفتی رودخانه‌ای، تغییر نیمرخ طولی و مقاطع عرضی، کاوش و فرسایش بستر، و جابه‌جایی‌های جانبی در مسیر جریان رودخانه‌ها از واکنش‌های رودخانه‌ای به فعالیت‌های زمین‌ساختی است.

شکل‌گیری نیمرخ‌های طولی بستر رودخانه ناشی از تعامل بین فرسایش رودخانه، سنگ‌شناسی، زمین‌ساخت و تغییر سطح اساس است (Snyder et al., 2003; Brocard et al., 2003; Gelabert et al., 2005; Larue, 2008). نیمرخ طولی رودخانه فعالیت‌های زمین‌ساختی را از طریق ریخت‌شناسی کلی و نقاط برخورد، در نقاطی که تغییر در شیب رودخانه سریع است، نشان می‌دهد. این تأثیرات از طریق ایجاد نقاط شکست^۱ ظاهر می‌شود و مشکلاتی را در تشخیص تفاوت بین تغییرات طبیعی و انسانی در چشم‌انداز ایجاد می‌کند (Chen et al., 2024).

مطالعات نشان داده که تغییرات در نیمرخ طولی رودخانه‌ها به‌صورت افزایشی و هم‌کاهشی است؛ برای نمونه طول رودخانه یانگ‌تسه بر اثر احداث سد سه‌دره کاهش ۲۰ درصدی داشته (Yang et al., 2015)، اما رودخانه می‌سی‌سی‌پی بر اثر فعالیت‌های رسوب‌گذاری افزایش طول پیدا کرده است (Nittrouer et al., 2012). از عوامل مؤثر بر افزایش طول رودخانه می‌توان به پیشروی دلتاها بر اثر رسوب‌گذاری (Giosan et al., 2014)، فعالیت‌های زمین‌ساختی و ایجاد فرورفتگی‌های جدید (Burbank & Anderson, 2013)، تغییرات اقلیمی و افزایش بارندگی (Vörösmarty et al., 2010)، احداث بسترهای انحرافی (Syvitski et al., 2014) و تغییر مسیر رودخانه‌ها برای اهداف کشاورزی (Best, 2019) اشاره کرد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کاهش طول رودخانه نیز تصرف رودخانه (Bishop, 2007)، افزایش نرخ فرسایش (Whipple et al., 2013)، خشکسالی‌های درازمدت، احداث سدها، کاهش رسوب (Graf, 2006; Korup et al., 2010)، برداشت بی‌رویه از منابع آب (Gain & Wada, 2014) و تغییر کاربری اراضی حاشیه رودخانه (Hooke, 2006) بوده است.

پژوهشگران پرشماری از شاخص‌های ژئومورفومتریک متنوع در کنار تحلیل نیمرخ طولی و عرضی رودخانه، شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL^۲) و روش‌های استخراج نقاط شکست بهره گرفته‌اند تا تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی قدیمی یا فعال، اثرات بارش، تغییرات سنگ‌شناسی-ساختاری، مقاومت متفاوت سنگ‌ها، بالآمدگی‌های منطقه‌ای و تنش‌های انسانی دوره هولوسن را بر بازآرایی شبکه‌های زهکشی و تکامل نیمرخ رودخانه‌ها بررسی کنند (Jaiswara et al., 2020).

Ambili & Narayana (2014) نیمرخ طولی و الگوی زهکشی رودخانه چالیار^۳ در هند را بررسی و تأثیرات تکتونیک بر شکل‌دهی نیمرخ طولی رودخانه را مطالعه کردند. آنها شاخص‌های تقعر و مورفولوژی را برای نیمرخ

1 knickpoints

2 Stream length (gradient index)

3 Chaliyar River

طولی رودخانه و اثرات تکتونیک با بالا آمدن زمین را بررسی و مشاهده کردند که نیم‌رخ طولی رودخانه در بخش‌های مختلف یکنواخت نیست. مطالعات زیادی هم نشان داده که فعالیت گسل‌ها در دوره جدید سهم قابل‌توجهی در عدم تعادل نیم‌رخ رودخانه‌ها داشته است. این پدیده از طریق تغییر شرایط زمین‌ساختی، بر نرخ‌های فرسایش اثر می‌گذارد و موجب سازمان‌دهی مجدد زهکشی می‌شود (Whipple et al., 2013; Guha & Jain, 2020; Godin et al., 2023). روی و همکاران تأثیرات سنگ‌شناختی و زمین‌ساختی را بر ویژگی ژئومورفیک و پروفیل طولی رودخانه در حوضه رودخانه برهمانی در شرق هند بررسی کردند و بیان داشتند که این رودخانه تحت تأثیر ساختمان زمین، سنگ‌شناسی و زمین‌ساخت تغییرات شدیدی در جهت بستر داشته و ناپوستگی‌های زیادی در طول آن شکل گرفته و برخی بخش‌های آن به شکل بریده‌بریده شده درآمده است (Roy et al., 2025).

مقصودی و همکاران (۱۳۹۴) اثرات سنگ‌شناسی و زمین‌ساخت را بر نیم‌رخ طولی رودخانه اوجان‌چای در شهرستان بستان‌آباد بررسی کردند و بیان داشتند که نیم‌رخ طولی رودخانه‌ها یافته‌های باارزشی را درباره تحول و تغییرات محیط‌های رودخانه‌ای در طول زمان به همراه دارد. **شریفی‌پیشون و پرنون (۱۳۹۶ الف)** تغییرات هندسی نیم‌رخ طولی و عرضی رودخانه قره‌سو را ارزیابی کردند و بیان داشتند که پراسنجه‌های هندسی رودخانه در طول زمان دچار تغییرات زیادی شده است. نیم‌رخ طولی رودخانه‌ها تحت تأثیر سنگ‌شناسی، تجدید فرایندهای فرسایشی ناشی از زمین‌ساخت و پایین رفتن سطح آب تغییر می‌کند (رجبی و انصاری، ۱۴۰۲).

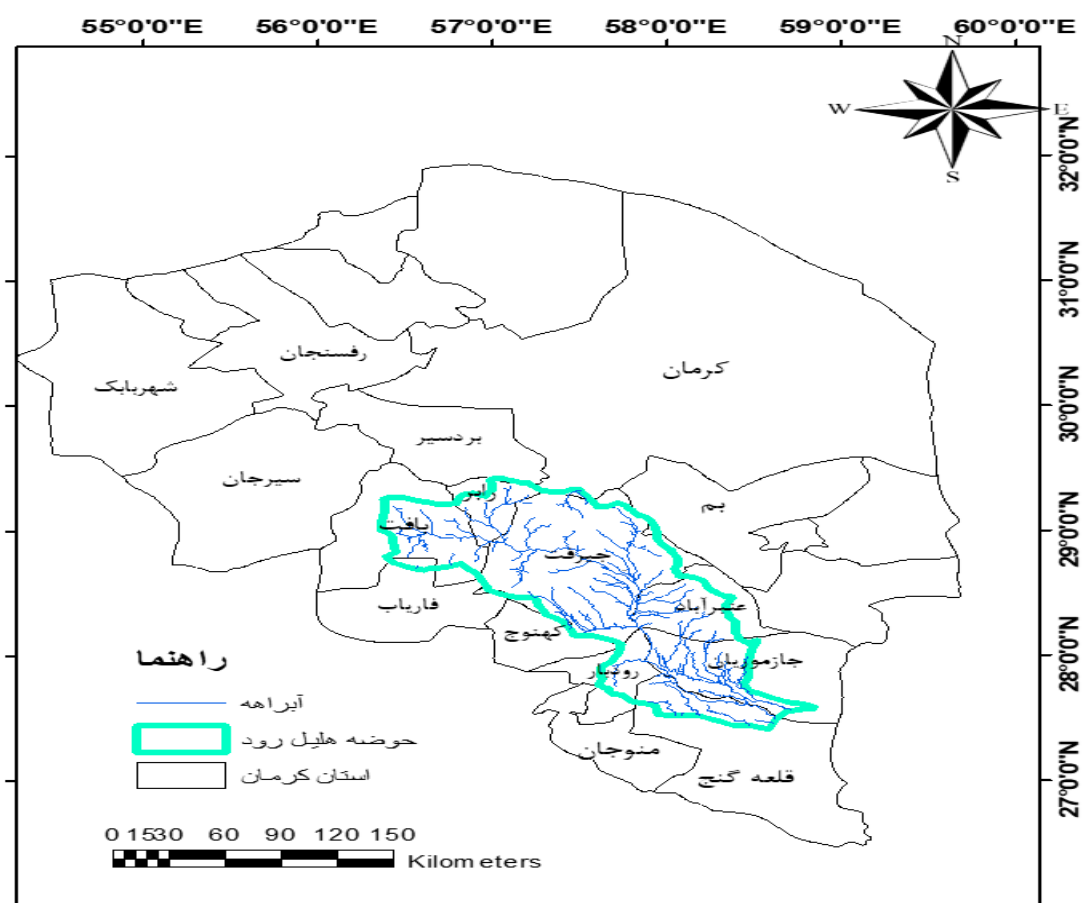
پژوهش پیش رو نیز به دنبال بررسی تغییرات نیم‌رخ طولی بستر رودخانه هلیل‌رود با استفاده از پردازش و تحلیل تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای و بررسی پراسنجه‌ها و عوامل اثرگذار بر روی آن بوده است. بایستگی و شایستگی موضوع در آن است که تغییرات در نیم‌رخ طولی رودخانه هلیل‌رود تأثیرات و پیامدهای زیادی بر مناطق جغرافیایی از جنبه‌های گوناگونی همچون هیدرولوژی حوضه، انتقال رسوب، خطرهای جانی و مالی، اقتصاد محل و تأمین آب موردنیاز مزارع کشاورزی و باغ‌ها دارد. در مدیریت منابع آب تغییرات دینامیکی در رودخانه‌ها اغلب به تغییر در مسیرهای جریان آب و کیفیت آب منجر می‌شود که بر آبیاری کشاورزی، مصرف آب صنعتی و منابع آب آشامیدنی تأثیر می‌گذارد (Woodruff et al., 2013; Li et al., 2024). فرایندهای فرسایش و رسوب، بیشتر آلاینده‌ها را به پایین دست منتقل می‌کند که به تخریب کیفیت آب منجر می‌شود و خطرهایی برای سلامت انسان دارد (Giri, 2021). ازمنظر بوم‌شناختی، پایداری بسترهای رودخانه برای اکوسیستم‌هایی مانند تالاب‌ها و جنگل‌های ساحلی بسیار مهم است. تغییرات خط ساحلی می‌تواند زیستگاه‌های بوم‌شناختی حیاتی را مختل کند؛ به‌طوری‌که این مسئله باعث کاهش مناطق تالاب، تغییر ساختارهای گیاهی و جانوری و از بین رفتن تعادل بوم‌شناختی می‌شود (Luo et al., 2021; Hovsepyan et al., 2019). در سطح اجتماعی-اقتصادی، تغییرات خط ساحلی ناشی از فرسایش سواحل رودخانه اغلب منجر به از دست رفتن کشت‌زارها و سایر منابع سرزمین می‌شود که مستقیماً بر تولید غذا و معیشت کشاورزان تأثیر می‌گذارد (Debnath et al., 2022). تغییرات بستر رودخانه همچنین زیرساخت‌های ساحلی مانند پل‌ها، جاده‌ها و خاکریزها را تهدید می‌کند، هزینه‌های تعمیر را افزایش می‌دهد و بر اقتصاد محلی تأثیر منفی می‌گذارد (Das et al., 2014). پویایی رودخانه‌ها به‌ویژه در رودخانه‌های فرامری حساس است؛ جایی که می‌تواند به اختلافات بین‌المللی

سرزمینی منجر شود. تغییرات در بستر رودخانه‌های مرزی می‌تواند بر تعیین مرز اثر بگذارد و مهاجرت بستر اصلی به اختلافات سرزمینی یا حتی درگیری منجر شود (He, 2021, Salman & Uprety, 2021). تخریب سواحل و تداوم فرسایش کناری توأم با مهاجرت حلقه‌های پیچان رود هر ساله موجب تخریب اراضی کشاورزی، تأسیسات ساحلی، پل‌ها و اماکن عمومی می‌شود. بدین ترتیب، رودخانه به‌منزله سامانه‌ای زنده و پویا مسیر و ویژگی‌های مورفولوژیکی خود را همواره برحسب زمان، عوامل ژئومورفیک، زمین‌شناختی، هیدرولوژیکی و گاه در اثر دخالت بشر تغییر می‌دهد. هرگونه دخل و تصرف در رودخانه‌ها بدون برنامه‌ریزی و شناخت دقیق مورفولوژی رودخانه باعث می‌شود رودخانه تعادلی را که در طی میلیون‌ها سال به آن رسیده است، از دست بدهد و زمینه‌ساز مخاطرات نوین شود؛ بنابراین، شناسایی پدیده‌های ژئومورفیک و زمین‌شناختی که سبب پایداری بستر می‌شوند، امری ضروری است (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۱).

منطقه مطالعه شده

زیرحوضه آبی هلیل رود بخشی از حوضه آبی جازموریان در جنوب شرقی ایران را در بر می‌گیرد که بین طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲ دقیقه شمالی در استان کرمان واقع شده است (شکل ۱). رودخانه هلیل رود پرآب‌ترین رودخانه استان کرمان است که از دامنه‌های جنوبی کوه‌های لاله‌زار و بیدخان سرچشمه می‌گیرد. شاخه آغازین این رودخانه شامل رودخانه‌های سلطانی، بافت، رابر و سیدمرتضی است. منزلگاه پایایی این رودخانه پس از زهکشی فلات مرتفع بافت به سمت جنوب شرق و حوضه جازموریان غربی جریان می‌یابد. مسیر رودخانه در این بخش کاملاً کوهستانی و ناهموار است و در کران‌سوی این بخش، سد مخزنی جیرفت احداث شده است. مسیر رودخانه پس از گذر از دره هلیل و شهر جیرفت وارد دشت رودبار می‌شود و سپس در امتداد مشرق جریان می‌یابد و به هامون جازموریان می‌ریزد. رودخانه هلیل رود از سرچشمه تا هامون جازموریان ۴۴۰ کیلومتر طول دارد و مساحت حوضه آبی آن در حدود ۳۱۴۶۲ کیلومترمربع است (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۶).

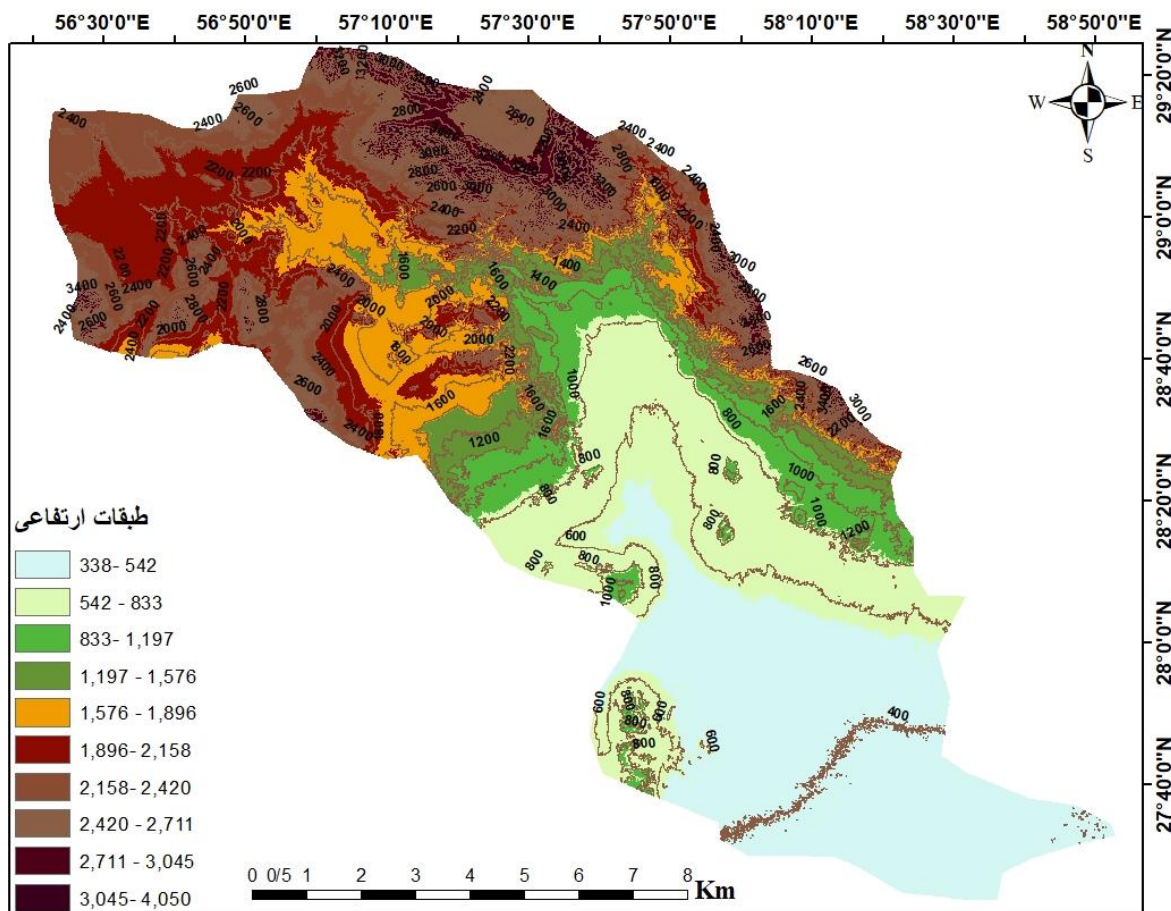
رودخانه هلیل رود از چند شهرستان استان کرمان یعنی بافت، رابر، جیرفت، عنبرآباد، جازموریان و رودبار می‌گذرد؛ اگرچه بخش‌هایی از حوضه آبی هلیل رود قسمت‌های غرب استان سیستان و بلوچستان را نیز در بر می‌گیرد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی زیرحوضه آبی هلیل‌رود در استان کرمان
Fig. 1: Geographical location of the Halilrud River in Kerman province

بخش‌هایی از استان کرمان سرزمینی ناهموار، مرتفع و کوهستانی است که همجوار با کویر لوت و چاله جازموریان با کمتر از ۲۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا است. ارتفاعات هزار، لاله‌زار، جوپار و کوهبنان نیز با ارتفاع بیش از ۴۶۶۵ متر از سطح دریا بیشتر در بخش شمالی گسترده شده است که اختلاف ارتفاعی بیش از ۴۲۰۰ متر را نشان می‌دهد (شکل ۲). تفاوت‌های زیاد ناهمواری باعث تنوع شرایط اقلیمی و گوناگونی بوم‌شناختی بسیاری در استان شده است. گستردگی حوضه آبی و پهناوری (بیش از ۳۰۰۰۰ کیلومترمربع) سبب تنوع در زمین‌شناسی به‌ویژه از نظر سنگ‌شناسی و همچنین ساختار زمین شده است. آب‌وهوای زیرحوضه آبی هلیل‌رود به‌شدت متأثر از ارتفاع و عرض جغرافیایی است. ارتفاع زیرحوضه هلیل‌رود در بخش شمالی که با دیواره کوهستانی جبال بارز تا لاله‌زار محصور شده است، به حدود ۴۴۰۰ متر می‌رسد؛ درحالی‌که ارتفاع حوضه در بخش پایانی و پایانی، یعنی چاله جازموریان، به ۳۵۰ متر می‌رسد. دمای حوضه بر اثر تغییرات عرض جغرافیایی و نیز گرادیان ارتفاع در بخش‌های مختلف تفاوت چشمگیری دارد. توده‌های هوایی که حوضه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، در تابستان‌ها شامل جریان مداری بری از شمال غرب و خراسان، جریان مرطوب اقیانوس هند از جنوب شرق و جریان‌های خشک و گرم از منشأ عربستان است. در زمستان نیز جریان‌های خشک و سرد قطبی از منشأ سیبری و جریان‌های مرطوب غربی، شمال غرب و جنوب غرب منطقه را

تحت تأثیر قرار می‌دهد (بنی‌اسدی، ۱۳۷۸). میزان بارش سالانه این حوضه بین ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر است (Dinpashoh et al., 2004). مقادیر بارش در ارتفاعات بارز و لاله‌زار به حدود ۵۰۰ میلی‌متر در سال می‌رسد؛ اما در بخش‌های پایاب حوضه به کمتر از ۵۰ میلی‌متر می‌رسد. دمای حداکثر حوضه به حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و دمای حداقل (برای مثال در دولت‌آباد اسفندقه) به ۲۵- درجه در فصل زمستان کاهش می‌یابد. میانگین دما نیز از حدود ۲۵ درجه در اطراف چاله جازموریان به کمتر از ۱۰ درجه در ارتفاعات کاهش پیدا می‌کند (بنی‌اسدی، ۱۳۷۸).



شکل ۲: نقشه توپوگرافی زیرحوضه آبی هلیلرود نشان‌دهنده طبقات ارتفاعی

Fig. 2: Topographical map of the Halil Rud sub-basin, clearly showing elevation classes

مواد و روش‌ها

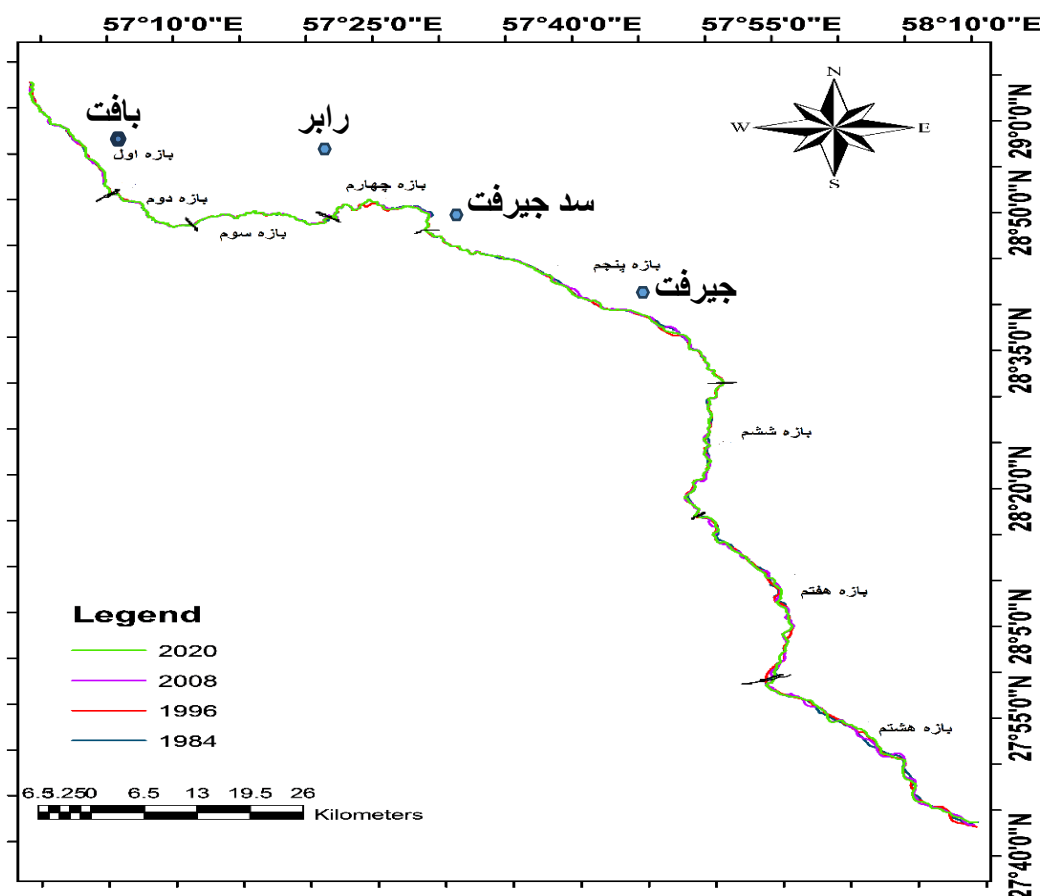
پژوهشگران برای بررسی تغییرات نیمرخ طولی رودخانه‌ها از روش‌های گوناگونی همچون سنجش از دور و (Yang et al., 2011) آنالیز داده‌های ماهواره‌ای چندزمانه (Pekel et al., 2016) و مدل‌سازی عددی (Tucker & Hancock, 2010) استفاده کرده‌اند که البته به استفاده از تحلیل داده‌های ماهواره‌ای در سال‌های اخیر توجه بیشتری شده است. پژوهش حاضر نیز براساس تحلیل داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای انجام گرفته است. در این پژوهش برای

شناسایی و آشکارسازی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه هلیل‌رود با طول تقریبی ۴۰۰ کیلومتر از منابع کتابخانه‌ای، داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای، سیستم اطلاعات جغرافیایی و همچنین مطالعات میدانی استفاده شده است. ابتدا تصاویر ماهواره لندست (با قدرت تفکیک ۳۰ متر) از ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰ شامل لندست ۵ (TM) برای تصاویر سال‌های ۱۹۸۴ و ۱۹۹۶، لندست ۷ (ETM+) برای سال ۲۰۰۸ و لندست ۸ (OLI) برای سال ۲۰۲۰ از سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۱ دریافت شد. افزون‌بر آن، برای تهیه مدل رقومی ارتفاعی از داده‌های SRTM (با قدرت تفکیک ۳۰ متر) برای تحلیل شیب و توپوگرافی حوضه استفاده شد. همچنین از نرم‌افزار Envie 5.3 برای پیش‌پردازش تصاویر شامل تصحیحات هندسی و طیفی استفاده شد. برای تشخیص بستر رودخانه و تغییرات آبراهه‌ها تصاویر به شکل نظارت‌شده طبقه‌بندی شدند و مرز رودخانه با استفاده از شاخص‌های طیفی مشخص شد و تصاویر به هم چسبانده شدند. بدین ترتیب، تصاویر بستر رودخانه به شکل رستری مشخص شد؛ سپس در فضای سامانه اطلاعات جغرافیایی، بستر و نیم‌رخ طولی رودخانه به شکل برداری تبدیل و تهیه شد. در ادامه، در فضای سامانه اطلاعات جغرافیایی رودخانه به ۸ پاره تقسیم شد و تغییرات هر پاره طی چهار دوره زمانی بررسی شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ارزیابی شد. از مهم‌ترین تغییرات بررسی شده، تغییر در طول نیم‌رخ رودخانه و مسیر آن بوده است که در سیستم اطلاعات جغرافیایی طول پاره‌های رودخانه در دوره‌های زمانی مطالعه‌شده محاسبه گردید. از سامانه Google Earth Pro هم برای بررسی تغییرات بصری و اعتبارسنجی داده‌ها بهره گرفته شد. به علاوه از نقشه‌های توپوگرافی ۵۰۰۰۰ مرتبط با بخش‌های مختلف حوضه، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۰ منطقه مطالعه‌شده، نقشه خاک، نقشه پوشش گیاهی و نقشه کاربری اراضی تهیه شده از تصاویر ماهواره لندست ۸ برای بازسازی حوضه و نقش عملکرد عوامل طبیعی و انسانی در تغییرات نیم‌رخ طولی رودخانه استفاده شد.

بحث و نتایج

برای بررسی تغییرات مسیر و طول رودخانه، به دلیل طولانی بودن آن (حدود ۴۰۰ کیلومتر)، رودخانه به ۸ پاره تقسیم و سپس تغییرات هر پاره در طول دوره‌های زمانی مطالعه‌شده ارزیابی شد (شکل ۳). این پاره‌ها براساس پراسنجه‌های ناهمواری، زمین‌شناسی و مهم‌تر از آنها تغییرات و شکست‌های طبیعی در مسیر و مورفولوژی رودخانه انجام گرفت.

^۱ USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>)



شکل ۳: مسیر و بستر رودخانه هلیل‌رود در پاره‌های گوناگون و سال‌های ۱۹۸۴، ۱۹۹۶، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۰

Fig. 3: The course and riverbed of the Halilrud River across different segments in the years 1984, 1996, 2008, & 2020

پاره اول: این پاره در بخش سرآب حوضه در ارتفاعات بافت و رابر و ساردوئیه قرار دارد و حدوداً از پدوم‌آباد در مناطق ناهموار شروع می‌شود و در مختصات بین $28^{\circ} 57' 30''$ تا $29^{\circ} 1' 10''$ عرض جغرافیایی شمالی و $50^{\circ} 50'$ تا $56^{\circ} 54' 40''$ طول جغرافیایی شرقی با جهت کاملاً شمال‌غربی - جنوب‌شرقی قرار گرفته است. این پاره در منطقه کوهستانی، مرتفع و پرشیب است و شکل‌گیری، مورفولوژی و تحول آن تحت‌تأثیر این دو پراسنجه فیزیکی زمین قرار داشته است. بستر رود در بخش‌های پایین‌دست پاره دارای کمینه ارتفاع ۲۶۲۴ متر و بیشینه ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر در بخش‌های سرچشمه رودخانه است. براساس محاسبات انجام‌شده با استفاده از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای لندست، در سال ۱۹۸۴ طول این پاره ۲۷/۰۹ کیلومتر، در سال ۱۹۹۶ طول پاره ۲۷/۹۶ کیلومتر، در سال ۲۰۰۸ طول پاره ۲۸/۳۱ کیلومتر و در سال ۲۰۲۰ طول پاره ۲۹/۱۶ است. براین‌اساس، طول رودخانه در این پاره طی حدود ۳۵ سال دوره مطالعه حدود ۲ کیلومتر افزایش یافته است. این افزایش، بیشتر در پیچان‌رودهای بستر رود و جایی پدید آمده که پهنای رودخانه و تغییرات در دبی رودخانه و نوسان آن در طول دوره مطالعاتی زیاد بوده است (شکل ۴).

پاره دوم: این بخش از رودخانه از کوه قرکتویه در مختصات جغرافیایی بین $28^{\circ} 58' 29''$ تا $29^{\circ} 1' 00''$ عرض جغرافیایی شمالی و $56^{\circ} 51' 00''$ تا $56^{\circ} 55' 00''$ طول جغرافیایی شرقی قرار گرفته است. ارتفاع و شیب بستر رودخانه در ابتدای این پاره افت محسوسی پیدا می‌کند و مهم‌تر از آن، جهت و راستای آن نیز تحت تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساخت تغییر اساسی پیدا کرده است و به سمت شرق تمایل زیادی دارد. در سال ۱۹۸۴ طول این پاره ۱۵/۵۵ کیلومتر، در سال ۱۹۹۶ طول پاره ۱۴/۴۷ کیلومتر، در سال ۲۰۰۸ طول پاره ۱۴/۵۰ کیلومتر و در سال ۲۰۲۰ طول این پاره ۱۵/۲۸ کیلومتر بوده است. این رودخانه طی سال‌های مطالعه‌شده در حالت تعادل دینامیک قرار داشته و متوسط طول آن تغییر زیادی پیدا نکرده است. به نظر می‌رسد مهم‌ترین دلیل، حفر بستر در این محدوده تحت تغییرات شیب ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی (شاید هم انسانی) است.

پاره سوم: این پاره از رودخانه در حد فاصل بین $29^{\circ} 12' 00''$ تا $29^{\circ} 18' 00''$ عرض جغرافیایی شمالی و $57^{\circ} 00' 00''$ تا $57^{\circ} 12' 00''$ طول جغرافیایی شرقی قرار گرفته است. جهت و راستای امتداد رودخانه در این پاره به‌طور کامل تحت تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی اواخر دوران سوم و بالاآمدن رسوبات کنگلومرایی پلیو-پلیستوسن قرار گرفته و انحراف پیدا کرده است. به دلیل امتداد غربی-شرقی رودخانه و دینامیک زیاد آن در طول دوره مطالعه، که اغلب متأثر از فعالیت‌های انسانی بوده است، تغییر مورفولوژی و مسافت قابل‌توجهی پیدا کرده است. بیشتر این تغییرات در پیچان‌رودهای این بخش از رودخانه به وقوع پیوسته است (شکل ۴). براساس ارزیابی و محاسبات نمیرخ طولی رودخانه در پاره زمانی حدوداً ۳۵ ساله، طول رودخانه از حدود ۲۳/۶ به ۲۵/۴ کیلومتر تغییر یافته و افزایش حدود ۲ کیلومتری در نیم‌رخ طولی آن به وجود آمده است. مطالعه تغییرات نیم‌رخ طولی نشان داد که بیشترین تغییر آن نیز در کمتر از ۱۵ سال اخیر رخ داده است (جدول ۱).

پاره چهارم: این بخش از رودخانه در مختصات جغرافیایی بین $29^{\circ} 00' 00''$ تا $29^{\circ} 56' 00''$ عرض جغرافیایی شمالی و $57^{\circ} 46' 00''$ تا $57^{\circ} 54' 00''$ طول جغرافیایی شرقی قرار گرفته است. بالاآمدگی کنگلومرای کرمان در پلیو-پلیستوسن سبب انحراف کامل رودخانه شده است؛ به‌گونه‌ای که در بخشی از آن راستای بستر رودخانه به سمت شمال شرقی تمایل پیدا می‌کند. رودخانه در این مسیر با حفر زیاد و ژرف‌ترکردن بستر توانسته است مسیرش را بر ساختمان زمین تحمیل کند؛ بنابراین، در این قسمت شیب بستر رودخانه نسبتاً زیاد است و به همین دلیل با وجود جابه‌جایی‌های زیاد در مورفولوژی و مسیر به‌ویژه در انتهای محدوده که تحت تأثیر ساختن سد پیچ‌وخم‌های زیادی در بستر رودخانه به وجود آمده است، طول نیم‌رخ رودخانه تفاوت زیادی در طول حدود ۴ دهه زمان دوره مطالعه پیدا نکرده است. بدین ترتیب، میزان تغییرات رودخانه در این پاره طی سال‌های مطالعه در ابتدای پاره ۱۹۸/۱۶ متر به سمت شرق و تقریباً در انتهای پاره ۹۶۵/۸۹ متر به سمت جنوب انحراف پیدا کرده است.

پاره پنجم: پاره پنجم در مختصات جغرافیایی بین $28^{\circ} 40' 00''$ تا $28^{\circ} 55' 00''$ عرض جغرافیایی شمالی و $57^{\circ} 10' 00''$ تا $57^{\circ} 30' 00''$ طول جغرافیایی شرقی قرار گرفته است. این بخش از رودخانه از پایین‌دست سد جیرفت شروع می‌شود و متأثر از این تغییر بزرگ در مسیر رودخانه تغییرات زیادی پیدا کرده است؛ به‌گونه‌ای که نیم‌رخ طولی

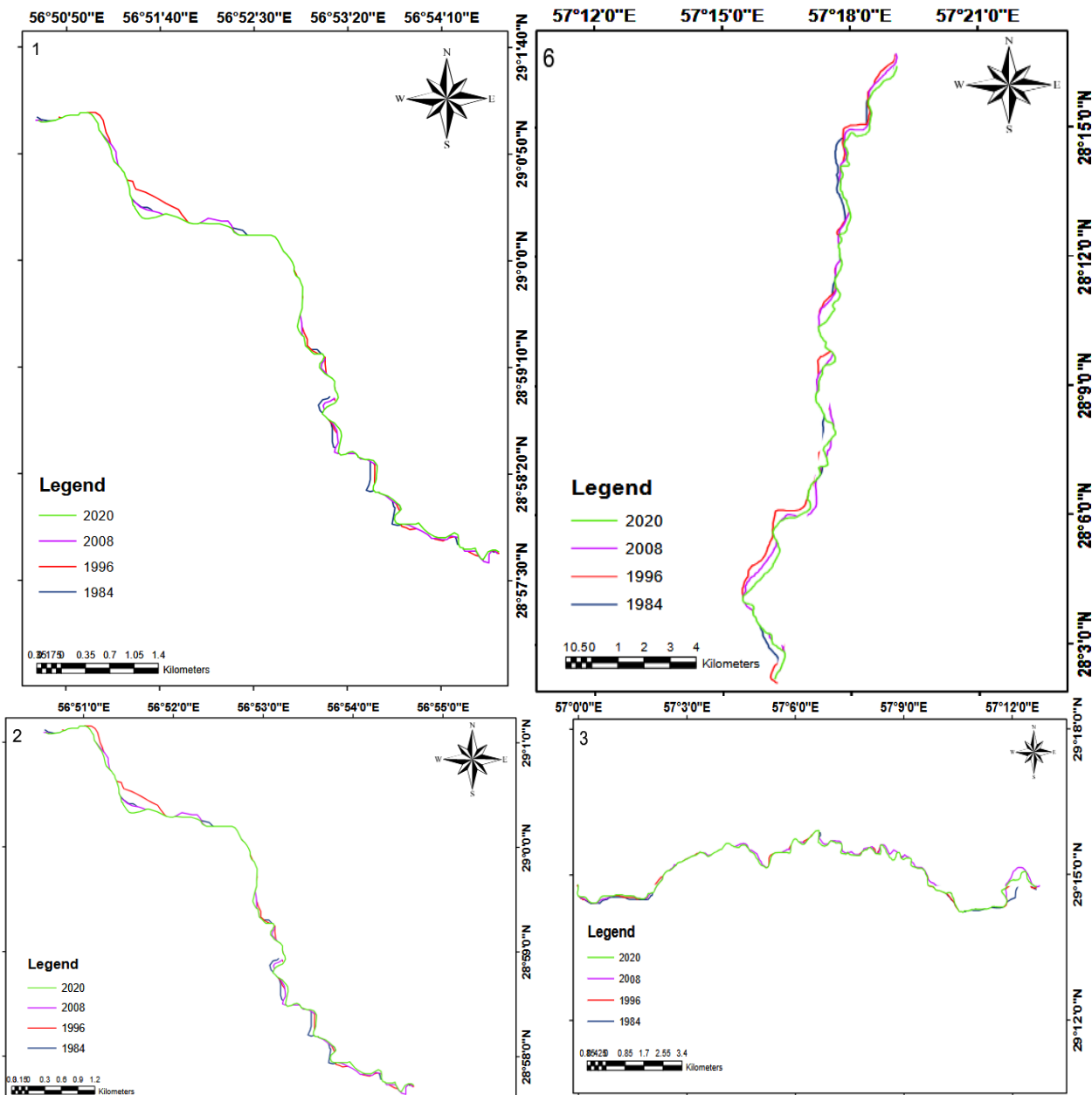
آن با افزایش در طول پیچان‌رودهای آن حدود ۴ کیلومتر در طی سال‌های اخیر افزایش پیدا کرده است. جهت رودخانه نیز به همان جهت و راستای آغازین آن، یعنی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، برگشته است. بخش‌هایی از بستر رودخانه تحت تأثیر فعالیت گسل‌ها عمق نسبتاً زیادی پیدا کرده و به این علت تغییرات زیادی در آن به وجود نیامده است؛ اما در جایی که بستر رودخانه پهنای بیشتری داشته است، به دلیل کاهش و نوسان آب در طول دو دهه بعد از ساخت سد نیم‌رخ طولی آن گسترش داشته است. بیشترین تغییرات هم تقریباً از حدود سال ۲۰۰۵ در طول مسیر رودخانه به وجود آمده است.

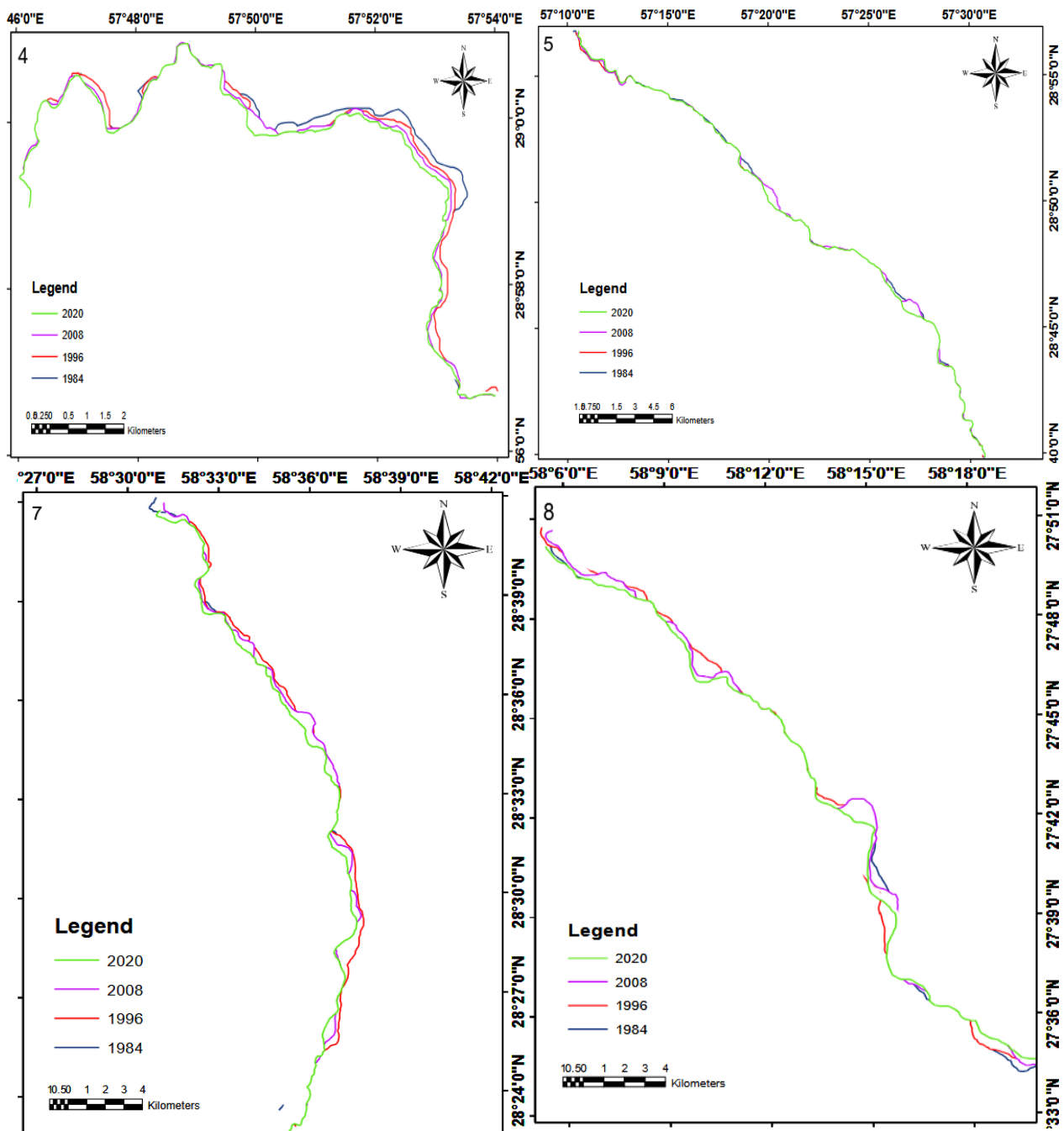
پاره ششم: محدوده‌ای از رودخانه هلیل‌رود که در این مطالعه تحت عنوان پاره ششم بررسی و ارزیابی شده است، در مختصات بین $28^{\circ} 15' 00''$ تا $28^{\circ} 30' 00''$ عرض جغرافیایی شمالی و $57^{\circ} 12' 00''$ تا $57^{\circ} 21' 00''$ طول جغرافیایی شرقی از خزرآباد تا حسین‌آباد قرار دارد. امتداد رودخانه در این بخش تغییر زیادی داشته و جهت شمالی-جنوبی پیدا کرده و حتی در انتهای آن به سمت غرب متمایل شده است. الگوی حاکم بر این پاره شریانی یا بریده‌بریده است و همین امر سبب تغییرات در بستر و مورفولوژی زیاد و به‌طور کلی دینامیک زیاد به‌ویژه در سال‌های اخیر با حجم زیاد فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی شده است. براساس بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، در ابتدای زمان مطالعه در سال ۱۹۸۴ طول این پاره ۳۰/۵۱ کیلومتر، در سال ۱۹۹۶ طول پاره ۳۱/۶۰ کیلومتر، در سال ۲۰۰۸ به حدود ۳۱/۸۹ کیلومتر و در سال ۲۰۲۰ طول آن به ۳۳/۲۲ کیلومتر رسیده است.

پاره هفتم: مختصات پاره هفتم بین $28^{\circ} 24' 00''$ تا $28^{\circ} 39' 00''$ عرض جغرافیایی شمالی و $57^{\circ} 28' 00''$ تا $57^{\circ} 42' 00''$ طول جغرافیایی شرقی از حسین‌آباد تا قدمگاه واقع شده است. امتداد این محدوده از رودخانه در بخش‌های اول تا نیمه‌های آن جهت شمال‌غربی-جنوب‌شرقی داشته است؛ اما از بخش‌های میانی امتداد آن شمالی-جنوبی شده است و حتی در بخش‌های پایانی، بستر رودخانه به سمت غرب متمایل بیشتری پیدا می‌کند. افت زیاد شیب بستر، بستر رسوبی و آبرفتی رودخانه، تغییرات در حجم و مقدار آب و نوسانات زیاد آن در سال‌های اخیر، تغییرات در کاربری اراضی و عملکرد گسل بزرگ و پوشیده-که بستر رودخانه در داخل آن شکل گرفته است- از دلایل اصلی دینامیک زیاد و تغییرات در نیم‌رخ طولی و مورفولوژی بستر رودخانه است. ارزیابی و محاسبه نیم‌رخ طولی بستر رودخانه در پاره هفتم نشان داد که در سال ۱۹۸۴ طول این پاره ۴۲/۲۵ کیلومتر بوده و تا سال ۲۰۰۸ تغییرات زیادی در آن پدید نیامده و فقط حدود ۲۰۰ متر کاهش پیدا کرده است؛ اما از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ طول رودخانه با افزایش حدود ۲ کیلومتر در این پاره، به حدود ۴۴ کیلومتر رسیده است.

پاره هشتم: این پاره از حدود $28^{\circ} 51' 00''$ تا $28^{\circ} 33' 00''$ عرض شمالی در نزدیکی منزلگاه نهایی حوضه و رود یعنی چاله جازموریان و $58^{\circ} 06' 00''$ تا $58^{\circ} 18' 00''$ طول شرقی در بخش پایاب زیرحوضه یا بخش انتهایی رودخانه هلیل‌رود گسترش یافته است. این پاره از رودخانه از نظر زمین‌ریختی در داخل یک پهنه آبرفتی هموار واقع شده و راستای آن متأثر از سطح اساس نهایی، یعنی چاله جازموریان، دگرباره به امتداد اصلی و آغازین خود یعنی شمال غربی-جنوب‌شرقی بازگشته است و به اراضی پست زیرحوضه سرازیر می‌شود؛ افزون‌بر آن، الگوی رودخانه کاملاً تغییر پیدا کرده و به‌شکل پیچان‌رودی درآمده که همواره پیچ‌های آن در حال تغییر بوده است (شکل ۴). طول

این پاره از رودخانه در سال ۱۹۸۴ در حدود ۴۱/۶۷ کیلومتر، در سال ۱۹۹۶ طول پاره به ۴۳/۴۷ کیلومتر، در سال ۲۰۰۸ طول پاره ۴۳/۴۵ کیلومتر و در سال ۲۰۲۰ طول آن به ۴۴/۴۰ کیلومتر رسیده است که افزایش حدود ۳ کیلومتری در نیم‌رخ طولی بستر رودخانه را نشان می‌دهد.





شکل ۴: پاره ۱ تا ۸ طی سال‌های ۱۹۸۴، ۱۹۹۶، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۰

Fig. 4: River segments 1 to 8 in the years 1984, 1996, 2008, & 2020.

جدول ۱: میزان تغییرات طول رودخانه در پاره‌های گوناگون رودخانه هلیل‌رود در دوره زمانی ۱۹۸۴-۲۰۲۰

Table 1: Variations in river length along different segments of the Halil River (1984-2020).

۲۰۲۰	۲۰۰۸	۱۹۹۶	۱۹۸۴	
۲۷۰/۷۲	۲۶۴/۸۱	۲۵۸/۸۵	۲۵۵/۸۶	کل رودخانه
۲۹/۱۶	۲۸/۳۱	۲۷/۹۶	۲۷/۰۹	پاره اول
۱۵/۲۸	۱۴/۵۰	۱۴/۴۷	۱۵/۵۵	پاره دوم
۲۵/۴۱	۲۳/۴۱	۲۳/۲۹	۲۳/۶۰	پاره سوم
۲۵/۳۲	۲۴/۳۴	۲۴/۵۹	۲۵/۱۳	پاره چهارم
۵۳/۹۶	۵۳/۵۹	۵۱/۴۳	۵۰/۰۶	پاره پنجم
۳۳/۲۲	۳۱/۸۹	۳۱/۶۰	۳۰/۵۱	پاره ششم
۴۳/۹۷	۴۲/۰۵	۴۲/۰۵	۴۲/۲۵	پاره هفتم
۴۴/۴۰	۴۳/۴۵	۴۳/۴۷	۴۱/۶۷	پاره هشتم

تأثیر عوامل جغرافیایی بر تغییرات مورفولوژی رودخانه

پویایی، تحول و تغییرات در بخش‌های گوناگون اعم از نمیرخ طولی و عرضی، مورفولوژی و به‌طور کلی مؤلفه‌های هندسی و فیزیکی یک رودخانه از سرآب تا پایاب تحت‌تأثیر پراسنجه‌ها و عوامل گوناگون طبیعی و انسانی (در چند دهه گذشته) قرار دارد. این پارامترها و عوامل نه فقط از منطقه‌ای به منطقه دیگر و از رودخانه‌ای به رودخانه دیگر، که در بخش‌های مختلف یک رودخانه نیز تفاوت‌های اساسی دارند. رودخانه هلیل‌رود یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های ایران در جنوب شرقی کشور است که از منطقه کوهستانی و بسیار مرتفع (بیش از ۴۰۰۰ متر) شروع می‌شود و از طریق دره‌ها و دشت‌ها به چاله ساختمانی جازموریان می‌ریزد. تغییرات مورفولوژیکی و نیم‌رخ طولی این رودخانه که در این پژوهش مطالعه و ارزیابی شده است، متأثر از عوامل گوناگون و پرشماری است که در اینجا به مهم‌ترین آنها اشاره شده است.

زمین‌شناسی اعم از ساختمان و سنگ‌شناسی و جنس مواد و فعالیت زمین‌ساختی آن، مورفولوژی، امتداد و جهت کلی رودخانه، نیم‌رخ طولی و عرضی، شیب بستر و بخش بنیادین، پیدایش آغازین و تحولات پسین رودخانه هلیل‌رود را مشخص می‌کند. راستای بستر رودخانه و تغییرات زیاد زوایا و جهت آن و همچنین مقدار پهنا و ژرفای رودخانه، به‌جز در بخش‌های سرآب که متأثر از ارتفاع و شیب است، تحت‌تأثیر عوامل و عناصر زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی در منطقه بوده است. سنگ‌شناسی و جنس مواد بستر رودخانه هلیل‌رود براساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه در ابتدای پاره اول از سنگ‌های آهکی، کنگلومرا، مارن و گچ و در انتهای این پاره از جنس ریوداسیت، آندزیت، آندزیت-بازالت و نهشته‌های آذرآواری است. بررسی و ارزیابی داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که سنگ‌های آذرین در برابر فرسایش آبی مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند. باوجوداینکه سنگ‌های رسوبی بخش‌های نخست پاره اول رودخانه مقاومت کمتری در برابر فرسایش داشته‌اند، به دلیل ارتفاع و شیب زیاد و عمق بستری رود، در مورفولوژی و نیم‌رخ بستر رودخانه تغییرات کمی به وجود آمده است. در این بخش به دلیل تفاوت سنگ‌شناسی شکستگی‌های زیادی در مسیر بستر رود ایجاد شده و نیم‌رخ طولی ناپیوسته و بعضاً

پلکانی را به وجود آورده است. مورفولوژی بستر در پاره اول و دوم بیشتر V شکل با دیواره‌های سنگی بوده و عمق دره‌ها در بیشتر نقاط زیاد است. در بخش‌هایی از پاره‌های دوم و سوم و بخش‌های اول پاره چهارم نیز بستر رودخانه در بستر سنگ‌های آذرین واقع شده است؛ اما در بخش‌های انتهایی پاره چهارم و پاره پنجم سنگ‌های آهکی، مارن و کنگلومراها جنس غالب بستر رودخانه هلیلرود را در بر گرفته‌اند که فرسایش‌پذیری زیاد این سنگ‌ها سبب دینامیک بیشتر بستر رود و جابه‌جایی زیاد آن شده است. جنس رسوبات آبرفتی بستر رودخانه در پاره‌های ۷ و ۸ تأثیر چشمگیری بر دینامیک رودخانه و تغییرات گسترده در نیمرخ طولی، مورفولوژی و الگوی بستر رودخانه داشته است. بخش عمده پاره ۸ در داخل چاله جازموریان با رسوبات رسی و سیلتی-رسی واقع شده است (شکل ۴). این رسوبات در بستر جریان رود با شیب و ارتفاع بسیار کم و نوسان شدید آب در طول فصول سال و سال‌های مختلف سبب دینامیک زیاد بستر رود و جابه‌جایی زیاد در مورفولوژی و پیچان‌رودی شدن آن شده است.

افزون‌بر عامل زمین‌شناسی، خاک و نوع و ویژگی‌های آن نیز بر تغییرات هندسی رودخانه به‌ویژه نیمرخ آن مؤثر است. پاره ۱ تا ۲ را رخنمون سنگی همراه با پوشش خاکی اندک آنتی‌سلزهای سنگریزه‌دار، با نفوذپذیری زیاد در بر گرفته است که همین امر شدت جریان آب، کندوکاو و رفت‌وروب بیشتر بستر و کرانه‌ها را در پی داشته است. در پاره‌های ۴ و ۵ و ابتدای پاره ۶ جنس خاک‌ها از نوع اینسپتی‌سلز^۱ با بافت متوسط تا سنگین است و همین امر در فرسایش زیاد بستر رود و تغییرات در مورفولوژی و نیمرخ طولی و عرضی رودخانه و کاهش پایداری بستر رودخانه اثر زیادی بر جای گذاشته است. انتهای پاره ۶ و پاره ۷ جنس خاک بستر رود ریزدانه و فرسایش‌پذیر است و سبب شده است کناره‌های رودخانه فرسایش بیشتری پیدا کنند و طول رودخانه افزایش یابد. پاره ۸ در داخل پلایا با نوع خاک رسی، رسی نمکی و سیلتی همراه با نهشته‌های بادرفتی است. زمین‌ریخت کفه نمکی بدون پوشش خاکی است. رودخانه در این بخش اغلب رسوب‌گذاری، پیچ‌خوردگی و جابه‌جایی بستر را به شکل زیاد و سالانه تحت‌تأثیر دبی آب و میزان رسوب دارد و جابه‌جایی زیادی در بستر رودخانه به وجود آمده است.

از تأثیرات تکتونیک بر مورفولوژی و نیمرخ طولی رودخانه هلیلرود، اثر بر شیب و ارتفاع و حتی جهت امتداد رودخانه است؛ در پاره اول یک گسل اصلی رودخانه را تحت‌تأثیر قرار داده است، در پاره دوم یک سیستم و پهنه گسلی در امتداد رودخانه وجود دارد (شکل ۵) و در انتهای همین پاره به نظر می‌رسد فعالیت این گسل‌ها بر جهت امتداد رودخانه اثر گذاشته است؛ به‌گونه‌ای که رودخانه در انتهای پاره دوم امتدادی غربی-شرقی پیدا می‌کند. در انتهای پاره سوم نیز احتمالاً به دلیل فعالیت گسل‌های پرشمار عمود بر رودخانه در سال‌های اخیر، جهت بستری رودخانه مقداری به سمت شمال تمایل پیدا کرده و جهت امتداد این پاره به‌طور کامل از شمال غربی-جنوب شرقی-به غربی-شرقی تغییر یافته است. در انتهای پاره چهارم فعالیت گسل‌های دیرینه با بالا آمدن کنگلومرای کرمان در الیگومیوسن-پلیوسن مانعی را در امتداد مسیر رودخانه شکل داده و جهت اصلی امتداد رودخانه را از شمال غربی-جنوب شرقی به سمت غربی-شرقی درآورده (شکل ۵) و با بالا آوردن این گونه سنگ‌ها شیب زیادی را در بستر رودخانه به وجود

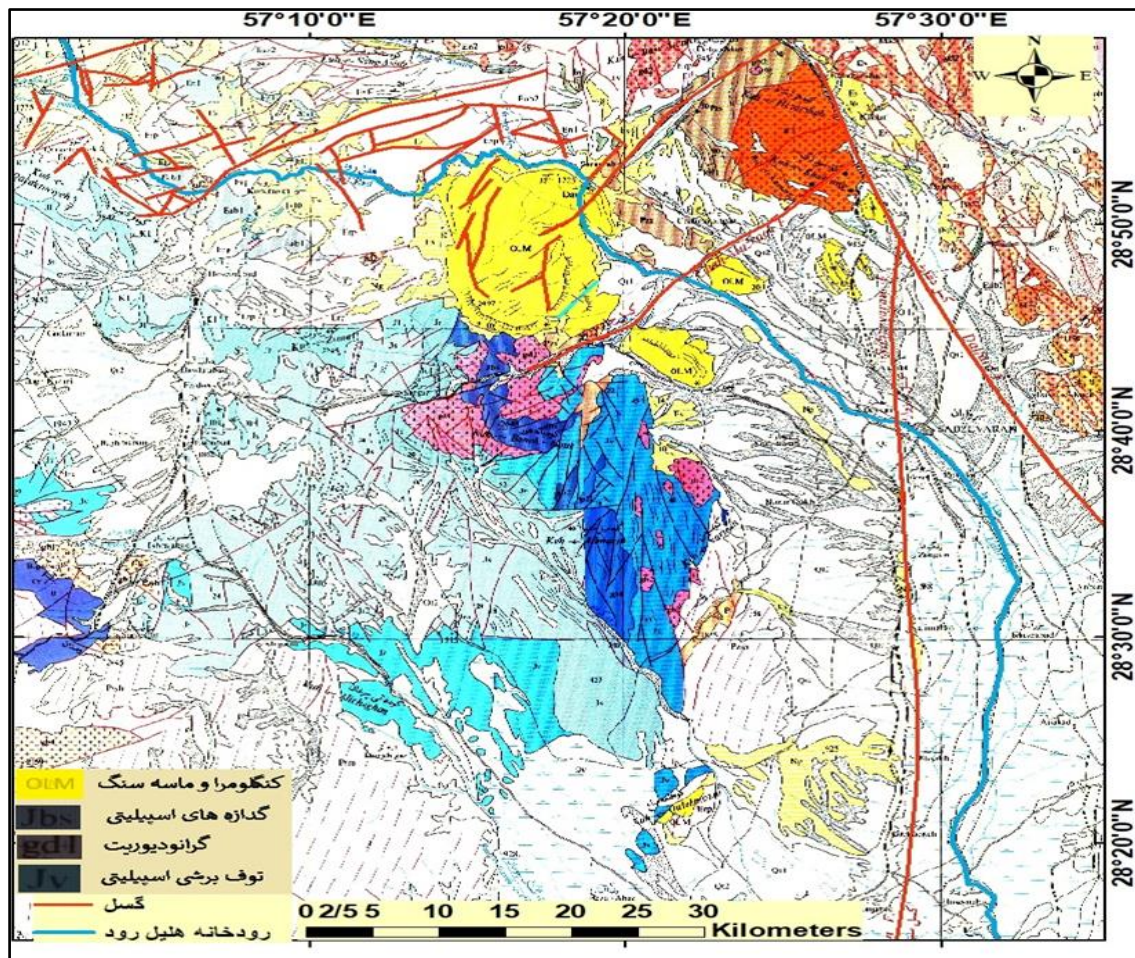
¹ Inceptisols

آورده است. در همین محدوده، فعالیت گسل‌ها در دوره جدید نیز جابه‌جایی‌های زیادی را در مسیر و نیم‌رخ طولی رودخانه به وجود آورده است. در پاره‌های ۵ و ۶ گسل‌های راست‌لغز و عمود بر امتداد رودخانه و احتمالاً فعالیت آنها در چند دهه اخیر، تغییرات زیادی را در مسیر و مورفولوژی رودخانه ایجاد کرده است. ارزیابی نیم‌رخ طولی رودخانه و مطابقت آن با نقشه زمین‌شناسی نشان داد که بخشی از بستر رودخانه در پاره ۵ در امتداد گسل قرار گرفته و تحت تأثیر فعالیت آن، افزایش شیب و عمق پیدا کرده است؛ به همین دلیل تغییرات بسیار کمی در مورفولوژی، الگوی رودخانه و نیم‌رخ طولی آن در این پاره رخ داده است.

ناهمواری و پستی و بلندی یکی از عوامل دیگری است که جریان سطحی و زمان تمرکز را در رودخانه تحت تأثیر قرار می‌دهد. تأثیرات توپوگرافی بر روی تغییر و تبدیل بارندگی به رواناب از راه شیب قابل بررسی است. شیب حوضه بر میزان سرعت جریان آب و میزان فرسایش و قدرت آن مؤثر است و در نهایت، بر پویایی رود و تغییر در ویژگی‌های هندسی آن اثر می‌گذارد. از نظر ارتفاعی، بیشترین میانگین ارتفاعی بستر رودخانه در پاره نخست بیش از ۲۵۰۰ متر و در پاره هشتم و پایاب حوضه در حدود ۳۵۰ متر است. این گرادیان چشمگیر ارتفاعی و پیامد آن شیب زیاد، اثر زیادی بر دینامیک رودخانه و تغییرات مؤلفه‌های هندسی و مورفولوژی هلیل رود گذاشته است. شیب بستر رودخانه مطالعه‌شده در پاره اول و دوم و همچنین سوم و پنجم زیاد است و از دلایل تغییرپذیری کمتر نیم‌رخ طولی و مورفولوژی بستر رودخانه همین پراسنجه است.

از دلایل اصلی تغییرات گسترده در شکل و ریخت‌زایی بستر رود و نیم‌رخ طولی آن تغییرات گسترده در کاربری‌های زمین در چند دهه گذشته است. تخریب مراتع و پوشش جنگلی (کم‌تراکم)، استفاده بیش از حد از زمین برای کشت و زرع، ساخت و ساز، و احداث و ایجاد زیرساخت‌ها از عوامل اصلی ایجاد این تغییرات بوده است. بررسی‌ها نشان داد که در پاره ۱ تا ۴ کاربری زمین در گذشته مرتعی و جنگل تنک و پراکنده بوده است که عمده آنها در حال حاضر تخریب، نابود و یا کاهش بسیار یافته است. در انتهای پاره چهارم سد جیرفت ساخته شده است که تأثیر آن بر تغییرات هندسی رودخانه در بالادست و پایین‌دست سد با اثرگذاری بر روی جریان آب، دبی آب، واپایش و کاهش طغیان رود، تغییر در رسوب‌گذاری، تغییر در تراز آب زیرزمینی و نفوذپذیری خاک در دو دهه گذشته بسیار مشهود است؛ به گونه‌ای که تحلیل نقشه‌ها و مشاهده تغییرات نیم‌رخ طولی رودخانه نشان داد که بیشترین تغییرات در دو دهه گذشته و پس از ساختن سد رخ داده است. بستر پاره پنجم، که بی‌درنگ بعد از سد آغاز می‌شود، از سال ۱۹۹۰، گودی بیشتر و طول و فراوانی پیچان‌رودهای آن افزایش چشمگیری پیدا کرده است. تأثیر سد بر روی پاره‌های پنجم و ششم بیشتر بوده است و تغییرات و جابه‌جایی بستر و تغییر مورفولوژی بستر در سراسر این دو پاره دیده می‌شود (شکل ۴) و هر یک با افزایش طول حدود ۳ کیلومتر در دوره زمانی مطالعه‌شده روبه‌رو شده‌اند؛ هرچند تأثیر و مقادیر تغییر در پاره ششم به دلیل تأثیر عوامل دیگری همچون لیتولوژی مقداری بیشتر بوده است. در انتهای پاره چهارم و درست در بالادست سد مقادیر جابه‌جایی بستر با کاهش شیب و افزایش رسوب‌گذاری بیشتر شده است؛ هرچند طول رودخانه تغییرات چندانی پیدا نکرده است. پس از ساخت سد تغییر کاربری زیادی در پایین‌دست آن صورت گرفته است و به کارگیری بیشتر زمین‌ها برای کشت و زرع و ایجاد باغ‌ها اثر زیادی بر تغییر بستر و

مورفولوژی بستر رودخانه گذاشته است. در ابتدای پاره ۵ و ۶ باغ‌ها و کشتزارها و در انتهای این بخش اراضی بایر گسترش بیشتری یافته است. در پاره ۷ نیز اراضی زراعی و باغ‌ها بیشتر شده است و در پاره ۸ زمین‌ریخت‌رس‌دار همراه با پوشش گیاهی پراکنده و در انتهای آن کفه‌های نمکی و بدون پوشش گیاهی زمینه تغییرات زیادی را در هندسه رودخانه به وجود آورده است.



شکل ۵: نقشه زمین‌شناسی پهنه بررسی شده نشان‌دهنده تأثیرات سنگ‌شناسی، جنس مواد و فرایندهای زمین‌ساخت بر شکل و ریخت بستر رود و نیم‌رخ طولی هلیل‌رود (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی سبزواران ۲۵۰۰۰۰)

Fig. 5: Geological map of the study area, showing the effects of lithology and tectonic activities on the river's morphology and longitudinal profile (Adapted from the geological map of Sabzevaran with a scale of 250,000).

نتیجه‌گیری

پویایی رود و تغییرات بستر اعم از نیم‌رخ طولی، نیم‌رخ عرضی، مورفولوژی و جابه‌جایی بستر و پدیداری چم‌وخم‌های نو یا تغییرات در پیچان‌رودهای گذشته مسئله‌ای پیچیده و تابع عوامل زیادی اعم از طبیعی یا انسانی به‌شکل محلی است و ممکن است نه تنها از زیرحوضه‌ای به زیرحوضه دیگر و رودخانه‌ای به رودخانه‌ی دیگر، در

بخش‌های گوناگون یک رودخانه نیز تفاوت‌های چشمگیری داشته باشد؛ به‌ویژه آنکه در چند دهه گذشته فعالیت‌ها و عملکردهای انسانی تأثیرات چشمگیری بر مؤلفه‌های هندسی بستر رودخانه بر جای گذاشته است. ازاین‌رو، بررسی این تغییرات و مشخص کردن نقش عوامل مختلف نه‌تنها برای هر رودخانه در هر جایی بایسته است، برای بخش‌های گوناگون یک رودخانه نیز حائز اهمیت است. در بررسی تغییرات نیم‌رخ طولی و مورفولوژی رودخانه هلیل‌رود، به دلیل طول زیاد و عبور از واحدهای ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی متفاوت، رودخانه از سرچشمه تا پایاب به ۸ پاره یا فضای زمین‌ریختی-آب‌شناختی (فضای مورفوژنیک-هیدروژنیک) براساس ویژگی‌های توپوگرافی، شکست‌های هندسی در مسیر رود و جهت و امتداد رودخانه تقسیم‌بندی شد. بررسی‌ها نشان داد که هر یک از بخش‌های رودخانه و فضاهای یادشده از نظر سنگ‌شناسی، زمین‌ساخت، ناهمواری، خاک، پوشش گیاهی و میزان آبدهی مشخصات منحصربه‌فردی دارد. همین مسئله در دینامیک و تغییرات هندسی بستر رود و مورفولوژی آن اثر زیادی داشته و مقادیر این تغییرات در هر یک از این فضاها متفاوت است. تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های میدانی در پاره‌های هشت‌گانه رودخانه طی دوره زمانی ۳۵ ساله (۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰) از افزایش طول کلی رودخانه در بیشتر پاره‌ها و تعادل و ثبات نسبی در برخی دیگر حکایت دارد. به‌طور ویژه پاره‌های اول، سوم، پنجم، ششم، هفتم و هشتم با افزایش طول به ترتیب حدود ۲، ۲، ۳، ۲ و ۳ کیلومتر روبرو شده‌اند؛ درحالی‌که پاره‌های دوم و چهارم به دلیل تعادل دینامیکی و تأثیرات زمین‌ساختی و پستی‌وبلندی تغییرات کمتری در نیم‌رخ طولی خود نشان داده‌اند. یافته‌ها نشان داد که تغییرات در طول و مورفولوژی رودخانه تحت‌تأثیر و برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل طبیعی (زمین‌شناسی، تکتونیک و توپوگرافی) و درهم‌تنیدگی فعالیت‌های انسانی (ساخت سد و تغییر کاربری اراضی) قرار داشته است.

براساس نتایج حاصل از این پژوهش عوامل زمین‌شناسی به‌ویژه سنگ‌شناسی و فعالیت‌های زمین‌ساختی نقش کلیدی در تعیین جهت، شیب و مورفولوژی بستر رودخانه ایفا کرده‌اند. پژوهشگران دیگری نیز مانند **مقصودی و همکاران (۱۳۹۴)**، **Burbank & Anderson (2013)**، **Roy et al. (2025)** در مطالعات خود تأثیرات زمین‌ساخت و سنگ‌شناسی بر تحول نیم‌رخ طولی رودخانه‌ها را بررسی کردند و نقش این دو عامل را مهم ارزیابی نمودند. مقاومت سنگ‌های آذرین در پاره‌های بالادست رودخانه پایداری نسبی را در بیشتر نیم‌رخ طولی آن به وجود آورده است؛ درحالی‌که رسوبات آبرفتی و خاک‌های فرسایش‌پذیر در پاره‌های پایین‌دست (پاره‌های ۷ و ۸)، دینامیک بالای رودخانه و تغییرات گسترده در الگوی پیچان‌رودها را تسهیل کرده است. فعالیت‌های زمین‌ساختی به‌ویژه در پاره‌های ۲ و ۴ و ۵ با ایجاد گسل‌ها و بالآمدگی‌های زمین‌شناختی، انحرافات چشمگیری در مسیر رودخانه ایجاد کرده است. در پاره سوم جهت رودخانه از شمال غرب-جنوب شرق به سمت غربی-شرقی تغییر مسیر پیدا کرده است. این تغییر به دلیل نقش عامل ناهمواری و ساختمان زمین است. در این بخش، رودخانه در طول زمان وضعیت تعادل (تعادل دینامیک) داشته و به دلیل تغییر در شیب و ارتفاع از یک سو و تغییر در سرعت آب این شرایط پایدار بوده است و کمترین تغییر در آن مشاهده می‌شود؛ هرچند در بخش انتهایی این پاره تغییر شیب محسوسی اتفاق افتاده و مقدار قابل‌توجهی بر تغییر در بستر رودخانه انجامیده است. در پاره چهارم اگرچه تغییرات پی‌درپی در بستر و نیم‌رخ ایجاد شده است، رود در همان بستر در حالت تعادل دینامیکی قرار داشته و در نیم‌رخ طولی آن تغییرات قابل‌توجهی به وجود نیامده است.

در پاره‌های ۷ و ۸ نیز با کاهش شیب، افزایش پهنای بستر و الگوی پیچان‌رودی حاکم بر آن، تغییرات زیادی در بستر و مورفولوژی رودخانه به وجود آمده است. به نظر می‌رسد رودخانه در بسترهای قدیم و جدید (در پهنای بزرگ بستر اتفاقی رودخانه) در رفت‌وآمد بوده و به همین دلیل میزان تغییرات و جابه‌جایی مسیر زیاد بوده است. نقش لیتولوژی و رسوبات آبرفتی بستر رود و نوسانات شدید جریان آب طی فصول و سال‌های مختلف از دلایل دیگر این تغییرات بوده است. از این رو، بیشترین تغییرات نیم‌رخ طولی، الگوی رودخانه و مورفولوژی آن در این بخش با افزایش بیش از ۳ کیلومتر طول آن رخ داده است. این تغییرات همراه با ایجاد پیچان‌رودهای جدید و توسعه قدیمی‌ها بوده است. فعالیت‌های انسانی همچون ساخت سد و تغییرات چشمگیر در دبی آب و رسوب‌گذاری در پایین‌دست سد (پاره‌های ۵ و ۶) به افزایش طول رودخانه و پیچان‌رودهای آن و همچنین تغییر الگوی جریان منجر شده است. همچنین تغییر کاربری اراضی به شکل تخریب پوشش گیاهی و گسترش کشاورزی در پاره‌های ۴ تا ۷ باعث افزایش فرسایش و تغییرات مورفولوژیکی شده است.

در نهایت، دستاوردهای نهایی نشان داد که رودخانه هلیل‌رود یک سیستم پویا و در حال تغییر و تحول است که مدیریت بهینه آن به رویکردی یکپارچه و دانش‌بنیان با در نظر گرفتن تعامل عوامل طبیعی و انسانی نیازمند است. افزایش کلی طول رودخانه در تمام پاره‌ها (به‌ویژه در پاره‌های ۱، ۳، ۵، ۶، و ۸) با بیشترین تغییرات در پاره‌های پایانی (حدود ۳ کیلومتر افزایش در پاره‌های ۶ و ۸) رخ داده است. تغییرات نیم‌رخ طولی همچنین در پاره‌های با شیب کم (پاره‌های ۷ و ۸) و رسوبات نرم (رسی و سیلتی) بیشتر بوده است؛ در حالی که در پاره‌های ناهموار با شیب تند (پاره‌های ۱ و ۲) تغییرات کمتری مشاهده شد. از نظر الگوی زمانی نیز بستر رودخانه در بیشتر پاره‌های هشت‌گانه طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۸ تغییرات نسبتاً کمی را به خود دیده و رودخانه طی این پاره زمانی در حالت نسبتاً پایداری قرار داشته است؛ اما از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ همزمان با تشدید فعالیت‌های انسانی و تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از ساخت سد تغییرات در نیم‌رخ طولی و مورفولوژی رودخانه در سراسر بخش‌های مطالعه شده گسترده بوده است. تأثیر ساخت سد (Sykvitski et al., 2014; Korup et al., 2010; Yang et al., 2024) و تغییر کاربری اراضی (Hook, 2006) بر تغییرات بستر رودخانه‌ها را در سال‌های اخیر بسیار زیاد ارزیابی کرده‌اند که با نتایج حاصل از این پژوهش هم‌خوانی دارد.

یافته‌های بررسی حاضر بر اهمیت مدیریت دانش‌بنیان و یکپارچه منابع آب و کاربری اراضی در حوضه‌های رودخانه‌ای، پایش و واپایش مستمر تغییرات ژئومورفولوژیکی و اجرای راهکارهایی چون تثبیت کناره‌های رود، احیای پوشش گیاهی و کنترل فعالیت‌های انسانی در حریم رودخانه تأکید دارد و می‌تواند به‌منزله مبنایی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار رودخانه در برابر تغییرات محیطی و انسانی استفاده شود. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده بر مدل‌سازی دقیق‌تر تأثیرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر دینامیک رودخانه متمرکز شوند تا بتوان راهکارهای مؤثرتری برای کاهش تأثیرات منفی این تغییرات ارائه داد. پیامد نهایی دینامیک زیاد رودخانه مخاطرات آن برای جوامع انسانی از نظر سیل‌خیزی، تخریب و پسرفت اراضی زراعی و باغ‌ها و همچنین ویرانی و فرسودگی تأسیسات و زیرساخت‌های انسانی است؛ امری که چه بسا با بارگذاری‌های ناموده و تغییرات اقلیمی سال‌های اخیر فزونی یابد یا تشدید گردد.

منابع

- بنی‌اسدی، علیرضا (۱۳۷۸). بررسی عوامل و عناصر آب‌وهوایی مؤثر بر سیلاب‌های منطقه‌ای حوضه آبریز هلیل‌رود [پایان‌نامه کارشناسی ارشد منتشرنشده]. دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- رجبی، معصومه، و انصاری، مریم (۱۴۰۲). تحلیل کمی تأثیر تکتونیک و لیتولوژی بر نیمرخ طولی رودخانه قلعه‌چای. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۶ (۱)، ۴۷۲-۴۵۳. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.380955.1793>
- رضایی‌مقدم، محمدحسین، ثروتی، محمدرضا، و اصغری سراسکانرود، صیاد (۱۳۹۱). بررسی تغییرات شکل هندسی رودخانه قزل‌اوزن با تأکید بر عوامل ژئومورفیک و زمین‌شناسی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۳ (۲)، ۱-۱۴. https://gep.ui.ac.ir/article_18541.html
- شریفی‌پیچون، و پرنون، فاطمه (۱۳۹۶ الف). ارزیابی و تحلیل تغییرات هندسی نیمرخ طولی و عرضی رودخانه قره‌سو طی سال‌های ۱۳۳۴-۱۳۹۳. *جغرافیا و توسعه*، ۱۵ (۴۶)، ۴۳-۶۰. https://gdij.usb.ac.ir/article_3030.html
- شریفی‌پیچون، محمد، و پرنون، فاطمه (۱۳۹۶ ب). مورفومتری و بررسی تغییرات مؤلفه‌های هندسی رودخانه قره‌سو طی دوره ۶۰ ساله با تأکید بر پایداری رودخانه. *هیدروژئومورفولوژی*، ۴ (۱۳)، ۴۳-۶۲. https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_7122.html
- مقصودی، مهران، نویدفر، اصغر، قنبری، محمد، و رضایی، علی (۱۳۹۴). تحلیل کمی تأثیر لیتولوژی و تکتونیک بر نیمرخ طولی رودخانه: مطالعه موردی رودخانه اوجان‌چای. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۴ (۱)، ۱۰۴-۱۱۷. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_77984.html
- مهندسین مشاور یکم (۱۳۸۶). *مطالعات زیست‌محیطی حوزه جازموریان غربی، مطالعات هیدرولوژی*.
- میرزایی، عباس، و زیبایی، منصور (۱۳۹۹). بررسی استراتژی‌های تطبیقی برای مدیریت منابع آب کشاورزی تحت تغییر اقلیم در حوضه آبریز رودخانه هلیل‌رود. *اقتصاد و توسعه کشاورزی*، ۴ (۴)، ۳۹۷-۴۱۹. <https://doi.org/10.22067/jead.2021.17801.0>
- نوحه‌گر، احمد، و یمانی، مجتبی (۱۳۸۴). بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان‌رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب (پایین‌دست میناب). *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳۷ (۲)، ۶۵-۸۵. https://journals.ut.ac.ir/article_10046.html
- یمانی، مجتبی، و شرفی، سیامک (۱۳۹۱). ژئومورفولوژی و عوامل مؤثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۳ (۱)، ۳۲-۱۵. https://gep.ui.ac.ir/article_18528.html

References

- Ambili, V., & Narayana, A. C. (2014). Tectonic effects on the longitudinal profiles of the Chaliyar river and its tributaries, southwest India. *Geomorphology*, 217, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.013>
- Bani-Asadi, A. (1999). *Investigation of climatic factors and elements affecting regional floods in the Halilrud river basin* [Unpublished Master's thesis]. Shahid Beheshti University. [In Persian]
- Best, J. (2019). Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, 12(1), 7-21. <https://www.nature.com/articles/s41561-018-0262-x>
- Bishop, P. (2007). Long-term landscape evolution: Linking tectonics and surface processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(3), 329-365. <https://doi.org/10.1002/esp.1493>

- Brocard, G. Y., Van Der Beek, P. A., Bourlès, D. L., Siame, L. L., & Mugnier, J. L. (2003). Long-term fluvial incision rates and postglacial river relaxation time in the French western Alps from ^{10}Be dating of alluvial terraces with assessment of inheritance, soil development and wind ablation effects. *Earth and Planetary Science Letters*, 209(1-2), 197-214.
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00031-1)
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2013). *Tectonic Geomorphology*. Oxford.
- Chen, H. E., Chiu, Y. Y., Cheng, C. Y., & Chen, S. C. (2024). Knickpoints and fixpoints: The evolution of fluvial morphology under the combined effect of fault uplift and dam obstruction on a Soft Bedrock River. *Earth Surface Dynamics*, 12(6), 1329-1346.
<https://doi.org/10.5194/esurf-12-1329-2024>
- Chung, E. S., Park, k., & Lee, K. S. (2011). The relative impacts of climate change and urbanization on the hydrological response of a Korean urban watershed. *Hydrological Process*, 25(4), 544-560.
<https://doi.org/10.1002/hyp.7781>
- Consulting Engineers of Avval. (2007). *Environmental Studies of Western Jazmurian Basin: Hydrological Studies*. [In Persian]
- Das, T. K., Haldar, S. K., Gupta, I. D., & Sen, S. (2014). River bank erosion induced human displacement and its consequences. *Living Reviews in Landscape Research*, 8(3), 1-35.
<http://dx.doi.org/10.12942/lrlr-2014-3>
- Debnath, J., Meraj, G., Das Pan, N., Chand, K., Debbarma, S., Sahariah, D., Gualtieri, C., Kanga, S., Singh, S., Farooq, M., Sahu, N., Kumar, P. (2022). Integrated remote sensing and field-based approach to assess the temporal evolution and future projection of meanders: A case study on river Manu in north-eastern India. *Plos One*, 17(7), 0271190.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271190>
- Dinpashoh, Y., Fakheri-Fard, A., Moghaddam, M., Jahanbakhsh, S., & Mirnia, M. (2004). Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods. *Journal of Hydrology*, 297(1-4), 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.04.009>
- Frimpoomaa, J., Mensah, P. K., Antwi-Agyakwa, K. T., & Angnuureng, B. D. (2025). Sediment particle sizes and river discharge implications on shoreline change along Anlo Beach, Ghana. *Regional Studies in Marine Science*, 83, 104095. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104095>
- Gain, A. K., & Wada, Y. (2014). Assessment of future water scarcity at different spatial and temporal scales of the Brahmaputra River basin. *Water Resources Management*, 28, 999-1012.
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0530-5>
- Gelabert, B., Fornós, J. J., Pardo, J. E., Rosselló, V. M., & Segura, F. (2005). Structurally controlled drainage basin development in the south of Menorca (Western Mediterranean, Spain). *Geomorphology*, 65(1-2), 139-155. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.005>
- Giosan, L., Syvitski, J., Constantinescu, S., & Day, J. (2014). Climate change: Protect the world's deltas. *Nature*, 516, 31-33. <https://doi.org/10.1038/516031a>
- Giri, S. (2021). Water quality prospective in Twenty First Century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: A review. *Environmental Pollutio*, 271, 116332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332>
- Godin, L., Crilly, B., Schoenbohm, L. M., & Wolpert, J. (2023). Recent basement fault reactivation and fluvial drainage modification in an intraplate setting, eastern Bundelkhand Craton, Madhya Pradesh, India. *Geomorphology*, 436, 108871. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108781>
- Graf, W. L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79(3-4), 336-360. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.022>
- Guha, S., & Jain, V. (2020). Role of inherent geological and climatic characteristics on landscape variability in the tectonically passive western Ghat, India. *Geomorphology*, 350, 106840.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106840>
- He, Y. (2021). Current and future transboundary water cooperation over the YarlungZangbo/Brahmaputra river basin: From an interdisciplinary perspective. *Water Policy*, 23(5), 1107-1128. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.008>

- Hooke, J. (2006). Hydromorphological adjustment in meandering river systems and the role of flood events. *IAHS Publication*, 306, 127. <https://iahs.info/uploads/dms/13542.20-127-135-10-306-Hooke.pdf>
- Hovsepyan, A., Tepanosyan, G., Muradyan, V., Asmaryan, S., Medvedev, A., & Koshkarev, A. (2019). Lake sevan shoreline change assessment using multi-temporal Landsat images. *Geography, Environment, Sustainability*, 12(4), 212-229. <http://dx.doi.org/10.24057/2071-9388-2019-46>
- Jaiswara, N. K., Kotluri, S. K., Pandey, P., & Pandey, A. K. (2020). MATLAB functions for extracting hypsometry, stream-length gradient index, steepness index, chi gradient of channel and swath profiles from digital elevation model (DEM) and other spatial data for landscape characterisation. *Applied Computing and Geosciences*, 7, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100033>
- 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>
- Korup, O., Densmore, A. L., & Schlunegger, F. (2010). The role of landslides in mountain range evolution. *Geomorphology*, 120(1-2), 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.017>
- Larue, J. P. (2008). Effects of tectonics and lithology on long profiles of 16 rivers of the southern Central Massif border between the Aude and the Orb (France). *Geomorphology*, 93(3-4), 343-367. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.03.003>
- Li, L., Knapp, J. L., Lintern, A., Ng, G. H. C., Perdrial, J., Sullivan, P. L., & Zhi, W. (2024). River water quality shaped by land-river connectivity in a changing climate. *Nature Climate Change*, 14(3), 225-237. <https://www.nature.com/articles/s41558-023-01923-x>
- Luo, L., Zhao, W., Wang, L., Ogashawara, I., Yang, Q., Zhou, H., Yang, R., Duan, Q., Zhou, C., & Zhuang, Y. (2021). Are the shoreline and eutrophication of desert lakes related to desert development? *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(43). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08806-0>
- Maghsoudi, M., Navidfard, A., Ghanbari, M., & Rezaei, A. (2015). Quantitative analysis of lithology and tectonics impacts on river longitudinal profile: Case study of Ojanchay river. *Quantitative Geomorphological Research*, 4(1), 104-117. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_77984.html [In Persian]
- Mirzaei, A., & Zibaei, M. (2021). Investigating adaptive strategies for agricultural water resource management under climate change in the Halilrud river basin. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 34(4), 397-419. <https://doi.org/10.22067/jead.2021.17801.0> [In Persian]
- Nittrouer, J. A., Shaw, J., Lamb, M. P., & Mohrig, D. (2012). Spatial and temporal trends for water-flow velocity and bed-material sediment transport in the lower Mississippi river. *GSA Bulletin*, 124(3-4), 400-414. <https://doi.org/10.1130/B30497.1>
- Nohegar, A., & Yamani, M. (2003). Geomorphological study of meanders and their role in bed and bank erosion of the Minab river (downstream of Minab). *Geographical Research*, 37(2), 65-85. https://journals.ut.ac.ir/article_10046.html?lang=en [In Persian]
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418-422. <https://www.nature.com/articles/nature20584>
- Rajabi, M., & Ansari, M. (2023). Quantitative analysis of tectonic and lithology effects on longitudinal profile of Ghale-Chay river. *Geography and Human Relationship*, 6(1), 453-475. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.380955.1793> [In Persian]
- Rezaei-Moghaddam, M. H., Sarvati, M. R., & Asghari-Sareskanrood, S. (2012). Investigation of geometric alterations of Gezel Ozan river considering geomorphologic and geologic parameters. *Geography and Environmental Planning*, 23(2), 1-14. https://gep.ui.ac.ir/article_18541.html?lang=en [In Persian]
- Roy, A., Patel, P. P., & 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*, 471, 109574. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109574>

- Salman, S. M. A., & Upreti, K. (2021). *Conflict and Cooperation on South Asia's International Rivers: A Legal Perspective* (Vol. 8). BRILL.
- Schumm, S. A. (2005). *River Variability and Complexity*. Cambridge University Press.
- Sharifi-Paichoon, M., & Parnoon, F. (2017). The study and analysis of geometrical variations of longitudinal and cross profiles of Qaresou rRiver during 1954-2014. *Geography and Development*, 15(46), 43-60. https://gdij.usb.ac.ir/article_3030.html?lang=en [In Persian]
- Sharifi-Paichoon, M., & Parnoon, F. (2018). Morphometry and studying of the changes of geometrical parameters in the Qaresou river between 1959-2014. *Hydrogeomorphology*, 4(13), 43-62. https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_7122.html?lang=en [In Persian]
- Snyder, N. P., Whipple, K. X., Tucker, G. E., & Merritts, D. J. (2003). Channel response to tectonic forcing: Field analysis of stream morphology and hydrology in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geomorphology*, 53(1-2), 97-127. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00349-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00349-5)
- Syvitski, J. P., Cohen, S., Kettner, A. J., & Brakenridge, G. R. (2014). How important and different are tropical rivers? An overview. *Geomorphology*, 227, 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.029>
- Tucker, G. E., & Hancock, G. R. (2010). Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(1), 28-50. <https://doi.org/10.1002/esp.1952>
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555-561. <https://www.nature.com/articles/nature09440>
- Woodruff, J. D., Irish, J. L., & Camargo, S. J. (2013). Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*, 504, 44-52. <https://www.nature.com/articles/nature12855>
- Whipple, K. X., DiBiase, R. A., & Crosby, B. T. (2013). Bedrock rivers. In J. Shroder, & E. Wohl (Eds.), *Treatise on Geomorphology* (pp. 550-573; vol. 9). Academic Press. https://sseh.uchicago.edu/doc/Whipple_et_al_2013.pdf
- Yamani, M., & Sharafi, S. (2012). Geomorphology and factors affecting lateral erosion of the Herroud river in Lorestan province. *Journal of Geography and Environmental Planning*, 23(1), 15-32. https://gep.ui.ac.ir/article_18528.html [In Persian]
- Yang, S. L., Milliman, J. D., Li, P., & Xu, K. (2011). 50,000 Dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Global and Planetary Change*, 75(1-2), 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.09.006>
- Yang, S. L., Xu, K. H., Milliman, J. D., Yang, H. F., & Wu, C. S. (2015). Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes. *Scientific Reports*, 5, 12581. <https://www.nature.com/articles/srep12581>
- Yang, Y., Zheng, J., Zhang, M., Wang, J., & Chai, Y. (2024). Impacts of human activities on the riverbed morphological in the tidal reaches of the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 630, 130735. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130735>

