



Analyzing Morphological Changes in the Sefidrood River Using Satellite Images and GIS (Case Study: Sefidrud River, Gilan)

Maryam Ilanloo^{1✉} 

1. Corresponding Author, Department of Geography, Mahs.C. Islamic Azad University, Mahshahr, Iran.
E-mail: m.ilanloo6101@iau.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 12 June 2025

Revised: 3 October 2025

Accepted: 9 October 2025

Published: 10 May 2026

Keywords:

Sedimentation,
Erosion,
River,
Morphology,
Sefidrud.

ABSTRACT

Objective: The main objective of this study is to analyze the temporal and spatial displacement of a section of the Sefidrud River in Gilan Province, northern Iran. The research aims to understand how geomorphological changes, driven by hydrological conditions and anthropogenic activities, have impacted the river's morphology, resulting in environmental and socio-economic consequences.

Methods: This study employed remote sensing and Geographic Information System (GIS) tools and techniques to monitor and evaluate morphological changes in the Sefidrud River over a 40-year period (1985–2025). Key parameters such as the sinuosity index and river channel width were used to assess channel shifts. Satellite imagery and schematic profile analyses were utilized to map erosion and sedimentation patterns across different decades.

Results: Findings indicate that between 1985 and 2005, the river channel was primarily affected by widespread sedimentation due to increased channel area and reduced flow energy. In contrast, during the 2005–2025 period, this trend reversed, with the active channel experiencing significant narrowing, intensified lateral erosion, and increased morphological dynamism. The total river width decreased drastically from approximately 23,467 meters in 1985 to 4,176 meters in 2025—an overall reduction of about 82%. A consistent decrease in sinuosity across all sections reflected a shift toward a straighter river path. Additionally, lateral channel migration was predominantly westward, with more significant changes observed in the upstream and midstream reaches.

Conclusions: The study reveals a clear temporal shift from sediment-dominated processes in the early decades to erosion-dominated dynamics in recent years. These changes highlight the impact of both natural and human-induced factors on river morphology. The results underscore the importance of continuous monitoring using remote sensing and GIS techniques for sustainable river management and planning.

Cite this article: Ilanloo, M. (2026). Analyzing morphological changes in the Sefidrood River using satellite images and GIS (Case Study: Sefidrud River, Gilan). *Journal of Geography and Planning*, 30(91), 369-388. <http://doi.org/10.22034/gp.2025.67811.3421>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2025.67811.3421>

Publisher: University of Tabriz.

Introduction

The morphological evolution of river systems represents a critical aspect of fluvial geomorphology with considerable environmental, hydrological, and socio-economic implications. Rivers are dynamic systems, continuously reshaping through the interplay of natural processes and anthropogenic influences. Channel migration, bank erosion, sedimentation, and changes in river planform are driven by variations in flow regime, sediment load, catchment characteristics, and increasingly, by intensive human interventions such as dam construction, river training, land use change, and sand-mining activities. These morphodynamic processes determine not only the structure and function of aquatic and riparian habitats but also impact floodplain productivity, infrastructure, and local communities.

Among modern tools available for the quantitative assessment of river channel change, remote sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) have brought a paradigm shift by enabling objective, multi-temporal, and spatially extensive analysis of river systems. The Sefidrud River, located in Gilan province, northern Iran, is of significant economic and ecological importance, providing irrigation, drinking water, and supporting biodiversity. In recent decades, considerable morphological changes have been observed in its upper reaches, particularly upstream of Rudbar, attributable to both natural factors and intensified human activities such as dam operations and catchment development.

This study aims to utilize RS and GIS techniques to investigate the spatiotemporal dynamics and morphological evolution of a defined reach of the Sefidrud River over the period 1985–2025. Specifically, it seeks to quantify and analyze patterns of channel migration, width fluctuation, sinuosity variation, and the processes of erosion and sedimentation, offering insights into driving mechanisms, dominant trends, and their wider implications.

Materials and Methods

Study Area:

The research focuses on a 19-km section of the Sefidrud River, stretching from upstream of Rudbar within Gilan province. The study reach was selected due to its pronounced morphological activity, availability of historical data, and relevance to regional hydrological management.

Data Sources:

Multi-temporal satellite imagery from Landsat (TM, ETM+, OLI) with 30-m spatial resolution were acquired for the target years: 1985, 1995, 2005, 2015, and 2025 (where the 2025 dataset is extrapolated/anticipated based on recent imagery and observed trends). High-resolution Google Earth imagery and historical topographic maps were employed for geo-referencing, cross-validation, and increased spatial accuracy. Ancillary data such as river cross-sectional measurements, field observations, and secondary hydrological statistics were incorporated to support morphometric analysis.

Methodology:

- **Preprocessing:** All satellite images were geometrically corrected, registered to UTM Zone 39N (WGS84), and radiometrically normalized to ensure temporal consistency. Water bodies were extracted using a combination of Normalized Difference Water Index (NDWI) and manual digitization, validated against ground truth points.
- **Channel Centerline and Bankline Extraction:** For each time slice, the main channel's centerline and active banklines were delineated using onscreen digitization and edge-detection approaches in GIS.
- **Morphometric Indices:**
 - **Channel Sinuosity** was calculated as the ratio of the actual river length (along the channel centerline) to the straight-line (valley) length between control points (T1–T19, based on the study segmentation).
 - **River Width:** At each of 19 fixed cross-sections (T1–T19), river width was measured per time slice. Data were structured in a matrix for temporal and spatial comparison.
 - **Erosion and Sedimentation Mapping:** By overlaying successive years' channel polygons, zones of active erosion (bankline retreat) and sedimentation (bar and floodplain accretion) were mapped for each decade.

- **Channel Migration Analysis:** The magnitude and direction of channel shifting were quantified by measuring the centroidal displacement of channel cross-sections and tracking bar apex/channel thalweg movement, noting east-west migration.
- **Statistical Analysis:** Numerical results were summarized using descriptive statistics, longitudinal plots, and change detection matrices. Analytical outputs were further visualized using time-series graphs, bar charts, and thematic erosion/sedimentation maps.

Results

The results reveal clear spatiotemporal patterns in channel form and process, reflecting both natural variability and anthropogenic influences:

1. River Width and Water Surface Area:

The total river width across all cross-sections exhibited a marked and nearly continuous reduction, from approximately 23,467 meters in 1985 to 4,176 meters in 2025—representing an 82% decrease in active channel width. All three main sections (upper, middle, lower) displayed narrowing trends, most pronounced in the upstream reaches. Annual average reduction rates were highest during the first decade and gradually stabilized in later years.

2. Sinuosity:

Channel sinuosity steadily declined in all segments, indicating significant straightening of the river path. Initial years were characterized by higher meandering (sinuosity > 1.2 in some sections), but subsequent decades saw values approaching 1.05–1.10, reflecting loss of natural meander features and reduced lateral migration.

3. Erosion and Sedimentation:

Change detection maps for each decade unveiled an evolving pattern:

- **1985–2005:** Sedimentation (accretion, bar formation) was the dominant process, especially in the middle section. Red zones (indicating deposition) were more extensive, leading to local channel widening and aggradation.
- **2005–2015:** This period marked a transition with more balanced processes—both erosion (bank retreat) and sedimentation were significant, and “no change” areas (yellow) expanded, reflecting spatial stabilization.
- **2015–2025:** Erosional processes became more dominant, particularly in upstream segments. Bankline retreat and width reduction outweighed minor depositional events, resulting in further contraction of the active riverbed and increased flow velocity.

4. Channel Migration:

Across all decades, the channel exhibited a persistent westward shift, especially at midstream sites (T7–T13). The magnitude of migration was greatest in earlier periods, moderating in the most recent decade. Localized eastward shifts were infrequent and spatially constrained.

5. Driving Factors:

The observed channel dynamics are closely linked to (a) reduced water and sediment supply following dam construction and flow regulation, (b) intensive sand-mining and in-channel excavation, (c) engineering interventions for bank stabilization, and (d) regional climatic variability affecting discharge and sediment delivery.

Conclusion

The present study, using spatial analyses and mapping of erosion and sedimentation over four decades (1985–2015), shows that the Sefidrood River in the studied area has undergone significant and variable morphological changes, which is clearly visible based on erosion and sedimentation maps in different decades. The results show that in the first two decades (1985–1995 and 1995–2005), sedimentation was dominant on the riverbed; in such a way that sedimentation covered a major part of the river course and erosion was limited to scattered and smaller sections. This pattern indicated a period of reduced flow energy, increased river sediment load, or reduced flow rate, which led to sediment accumulation and a cross-sectional widening of the bed. It can be assumed that in these periods, the role of dam construction or periodic droughts and extensive exploitation of sand resources

played a major role in the transport and deposition of sediments. In the third decade (2005–2015), however, the pattern of changes has become more balanced and balanced; erosion areas have become more extensive and continuous than in the past, and at the same time, the share of unchanged areas has also increased. This change in behavior indicates that the river has entered a transitional period between the dominant dynamics of sedimentation and the resumption of erosion activities, and indicates that part of the flow energy has been allocated to the recovery and removal of sediments deposited in previous periods. Also, the increase in stable areas indicates the relative stabilization of the bed morphology. In recent decades and the final period (2015–2025), given the continuation of this trend and the overall decrease in bed width in all sections, it can be concluded that the river is on a path of continuous shrinkage and a tendency towards greater morphodynamic equilibrium. This process is accompanied by a decrease in flood storage capacity, an increase in flow velocity, and a decrease in the diversity of bed habitats.

Keywords: Sedimentation, Erosion, River, Morphology, Sefidrud.



تحلیل تغییرات مورفولوژیکی رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و GIS (مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود، گیلان)

مریم ایلانلو^۱

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه جغرافیا، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه: m.ilanloo6101@iau.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰	
کلیدواژه‌ها: رسوبگذاری، فرسایش، رودخانه، مورفولوژی، سفیدرود.	ژئومورفولوژی، شرایط هیدرولوژیکی و فعالیت‌های انسانی موجب تغییر شکل رودخانه و جابجایی مسیر آن می‌شوند که این امر پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی به همراه دارد. هدف از این پژوهش بررسی جابه جایی زمانی و مکانی بخشی از رودخانه سفیدرود در استان گیلان می‌باشد. این پژوهش با بهره‌گیری از ابزارها و تکنیک‌های سنجش از دور و GIS، به بررسی تغییرات مورفولوژیکی، اندازه‌گیری میزان جابجایی فضایی-زمانی، فرسایش و رسوبگذاری بستر رودخانه سفیدرود طی یک دوره‌ی ۴۰ ساله (۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵) می‌پردازد. نتایج نشان مورفولوژیکی بر اساس شاخص درجه پیچشی (sinuosity index)، عرض رودخانه اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج نشان داد که بستر انتخابی مورد مطالعه در دهه‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ عمدتاً تحت تأثیر رسوبگذاری گسترده قرار داشته است، به طوری در گذشته، افزایش مساحت بستر و کاهش انرژی جریان، شرایط مناسب برای رسوبگذاری در بستر رودخانه فراهم کرده بود. با ورود به بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵، این روند معکوس شده و بستر فعال رودخانه با کاهش معنادار عرض و تشدید فرسایش جانبی، پویایی بیشتری از خود نشان داده است. همزمان، پهنای کل رودخانه از حدود ۲۳۴۶۷ متر در سال ۱۹۸۵ به ۴۱۷۶ متر در سال ۲۰۲۵ کاهش یافته است، که نشان‌دهنده کاهش حدود ۸۲ درصدی در طول دوره مطالعه است. کاهش ضریب خمیدگی در تمامی مقاطع نشان‌دهنده‌ی کاهش میزان پیچ‌وخم و گرایش رودخانه به مسیر مستقیم‌تر است. جابه‌جایی عرضی مجرا عمدتاً به سمت غرب صورت گرفته و در نواحی بالادست و میانی شدت بیشتری داشته است. تحلیل پروفیل‌های شماتیک و نقشه‌های فرسایش و رسوبگذاری نیز نشان می‌دهد که در دهه‌های ابتدایی، فرایند رسوبگذاری غالب بوده، اما به مرور زمان روند فرسایش افزایش یافته و در برخی بخش‌ها موجب پایداری نسبی بستر شده است.

استناد: ایلانلو، مریم (۱۴۰۵). تحلیل تغییرات مورفولوژیکی رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و GIS (مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود، گیلان). جغرافیا و

برنامه‌ریزی، ۳۰ (۹۶)، ۳۶۹-۳۸۸.

<http://doi.org/10.22034/gp.2025.67811.3421>



© نویسنده‌گان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

جابجایی کانال رودخانه‌ها از مهم‌ترین فرایندهای طبیعی و پویای سیستم‌های «آبرفتی-رودخانه‌ای»^۱ به شمار می‌رود که تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل همچون فرسایش، رسوب‌گذاری، پیکان‌روی^۲، شاخه‌شاخه شدن^۳ و گسیختگی مسیر^۴ رخ می‌دهد (اسلینگرلند و اسمیت^۵، ۲۰۰۴؛ راخال، آدیکاری و شارما^۶، ۲۰۲۱؛ میتال، سعید و بیگ^۷، ۲۰۲۳). این فرایند در تعامل با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، رژیم هیدرولوژیکی، ساختار رسوبات و نیز مداخلات انسانی همواره در حال تحول است (موسو، کاپولونگو و کالدارا^۸، ۲۰۲۰؛ کامارودین، توریمان و عبد وهاب^۹، ۲۰۲۳).

در دهه‌های اخیر، فعالیت‌های انسانی نظیر احداث سد و پل، توسعه شبکه‌های آبیاری و تغییر کاربری اراضی، رژیم طبیعی رودخانه‌ها را به‌طور چشمگیری دگرگون ساخته‌اند. این مداخلات علاوه بر افزایش ناپایداری و پویایی مسیر رودخانه‌ها، با برهم‌زدن تعادل جریان و رسوب، پیامدهای منفی متعددی بر کارکردهای هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی آنها بر جای گذاشته‌اند (بلانتون و مارکوس^{۱۰}، ۲۰۱۴؛ اورتگا، رازولا و گارزون^{۱۱}، ۲۰۱۴؛ بیسواس و پانی^{۱۲}، ۲۰۲۱). حتی برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اثر این تغییرات انسانی از رخداد‌های طبیعی همچون سیلاب و خشکسالی نیز فراتر می‌رود (علی، اریفین و ادیب^{۱۳}، ۲۰۱۷؛ چورتک، دیدرسکی و یاگودزینسکی^{۱۴}، ۲۰۱۹). به‌دنبال این دگرگونی‌ها، تهدید سکونتگاه‌ها، تخریب زیرساخت‌ها، از بین رفتن اراضی کشاورزی، آسیب به زیست‌بوم‌های آبی و حتی بروز تنش‌های اجتماعی و مرزی از جمله پیامدهای محتمل محسوب می‌شوند (آلکانتارا-آیالا^{۱۵}، ۲۰۲۲).

از این‌رو، پایش دقیق و مستمر تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، ضرورتی اساسی در مدیریت منابع آب و کاهش ریسک‌هایی چون سیلاب و خشکسالی دارد (عالم^{۱۶}، ۲۰۱۸). در این زمینه، فناوری‌های نوین سنجش از دور (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، با فراهم‌سازی امکان تحلیل گسترده، دقیق و زمانمند، جایگزینی مؤثر برای روش‌های سنتی پرهزینه و زمان‌بر به‌شمار می‌روند (وانگ و می^{۱۷}، ۲۰۱۶؛ کانینگهام و لین^{۱۸}، ۲۰۱۶). شاخص‌هایی مانند NDWI و MNDWI توانسته‌اند در استخراج نواحی آبی از تصاویر ماهواره‌ای نقش مؤثری ایفا کنند، هرچند در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم یا نواحی سایه‌دار همچنان چالش‌هایی وجود داشته و نیاز به کالیبراسیون میدانی احساس می‌شود (میتل^{۱۹}، ۲۰۲۳؛ گورنل^{۲۰}، ۲۰۱۶).

1. fluvial
2. meandering
3. braiding
4. avulsion
5. Slingerland & Smith
6. Rakhal, Adhikari & Sharma
7. Mittal, Said & Beg
8. Musso, Capolongo & Caldara
9. Kamarudin, Toriman & Abd Wahab
10. Blanton & Marcus
11. Ortega, Razola & Garzon
12. Biswas & Pani
13. Ali, Ariffin & Adib
14. Czortek, Dyderski & Jagodzinski
15. Alcántara-Ayala
16. Alam
17. Wang & Mei
18. Cunningham & Lyn
19. Mittal
20. Gurnell

تجربه‌های جهانی در کشورهایی چون نپال (رودهای کوشی و کارنالی)، هند (گنگ و یامونا)، بنگلادش (براهماپوترا) و چین (یانگ تسه) نشان داده است که استفاده از RS و GIS در تحلیل تغییرات مکانی - زمانی رودخانه‌ها، درک بهتری از رفتار و پویایی آنها فراهم می‌کند (یانگ، کا و وانگ^۱، ۲۰۱۵).

در ایران نیز رودخانه سفیدرود به عنوان یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های شمال کشور و منبع حیاتی برای استان گیلان، طی سال‌های اخیر تحت تأثیر مداخلات انسانی و تغییرات اقلیمی، دچار جابه‌جایی‌های کانالی و ناپایداری‌های مورفولوژیکی شده است. این ناپایداری‌ها علاوه بر تهدید اراضی کشاورزی و کاهش کیفیت زیست‌محیطی، خطر وقوع سیلاب را تشدید کرده‌اند. با توجه به موقعیت جغرافیایی، تنوع کاربری‌ها و اهمیت زیست‌محیطی و اقتصادی سفیدرود، انجام مطالعات دقیق بر تغییرات ژئومورفولوژیکی و رفتار هیدرولوژیکی آن ضرورتی انکارناپذیر است.

پیشینه پژوهش

۱. مطالعات داخلی

سلطانی گردفرامریزی، عسکری ورزیده و تازه (۱۳۹۷) به بررسی روند تغییرات زوایه مرکزی و شعاع مرکزی در مائندره‌های رودخانه گاماسیاب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداختند. بررسی مقادیر پارامترهای هندسی به دست آمده گویای آن است که با افزایش تعداد مائندر از ۱۵ عدد در سال ۱۹۹۰ به ۴۰ عدد در سال ۲۰۱۳ تغییرات مورفولوژی قابل توجهی در این بازه از مسیر رودخانه دیده شده و طول رودخانه از حدود ۵۱ کیلومتر به حدود ۶۰ کیلومتر افزایش یافته است. ایلا نلو و کرم (۱۳۹۹) به ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه با استفاده از روش MQI (منطقه مورد مطالعه: رودخانه جاجرود) پرداختند. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که تمامی بازه‌های منطقه از لحاظ روش MQI در شرایط ضعیف و خیلی ضعیف قرار گرفته‌اند که این مسائل ناشی از قطع درختان به منظور ایجاد ساخت و سازهای انسانی، برداشت شن و ماسه، ایجاد تفرجگاه‌های متعدد در حواشی رودخانه و تغییر الگوی رودخانه می‌باشد. رجبی، روستایی و برزکار (۱۴۰۰) به بررسی پایداری رودخانه زاب از طریق طبقه بندی مورفولوژیکی آبراهه به روش رزگن پرداختند. نتایج نشان داد که آبراهه مورد مطالعه دارای مقادیر مختلفی از منظر پارامترهای مؤثر در مدل شامل پارامترهای نسبت گودافتادگی بستر، ضریب خمیدگی، نسبت عرض به عمق و اندازه مواد بستر است. به صورتی که مورفولوژی آبراهه در بازه‌های مسیر بالادست دارای الگوی رودخانه از نوع C ، B و F ، الگوی رودخانه‌ای در بازه میانی از نوع A ، B ، C و E در پایین دست الگوی رودخانه از نوع C ، B و D می‌باشد. همچنین بازه‌های ۱۱-۲۴ از لحاظ پایداری در سطح ضعیف و سایر بازه‌ها در سطح متوسط و خوب قرار دارند. خالقی، روستایی، خورشیددوست (۱۴۰۲) به قابلیت اتومای سلولی در شبیه‌سازی میزان تحول و فرسایش در سیستم رودخانه‌ای (مطالعه موردی: حوضه آبریز ليقوان) پرداختند. هدف پژوهش، شبیه‌سازی تحول و فرسایش در سیستم رودخانه‌ای حوضه آبریز ليقوان با استفاده از مدل اتومای سلولی بود. نتایج نشان داد که مدل اتومای سلولی قادر است تغییرات مورفولوژیکی رودخانه را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند و می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. ابراهیمی، ایلا نلو و حمید (۱۴۰۴) به بررسی تغییرات مورفولوژیکی در دشت آبرفتی و جلگه ساحلی (نمونه موردی: رودخانه بهمنشیر) پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که هر دو لندفرم ژئومورفیک دشت آبرفتی و جلگه ساحلی تحت فشار فعالیت‌های انسانی در طول سال‌ها به‌ویژه پس از سال ۲۰۱۲ تغییر یافته‌اند. به طوری که حجم رسوبات آبرفتی از ۹۷/۳ کیلومتر مربع در سال ۱۹۷۳ به ۱۰۸/۸ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۴ رسیده است.

۲. مطالعات خارجی

ژائو و جیانگ (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای جهانی با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-3 و پایگاه داده‌های بین‌المللی، نوسانات سطح آب و تغییرات عرض کانال‌های رودخانه‌ای را در مقیاس جهانی تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از فناوری‌های سنجش از دور می‌تواند در تحلیل پویایی رودخانه‌ها در طول زمان با دقت بالا مؤثر باشد و نقش مهمی در پایش تغییرات هیدرومورفولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی ایفا کند. در مطالعه‌ای که کُداما و همکاران (۲۰۲۳) بر روی رودخانه رد در آمریکا و کانادا انجام دادند، مشخص شد که تنظیمات ایزوستاتیک ناشی از ذوب یخچال‌ها باعث تغییر در شیب رودخانه شده و این عامل، نرخ جابجایی جانبی و مورفولوژی کانال را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار داده است. این پژوهش تأکید دارد که عوامل زمین‌ساختی می‌توانند نقش مهمی در دینامیک رودخانه‌ها ایفا کنند. عالم (۲۰۲۳) در پژوهشی که بر روی رودخانه‌های گنگا در هند و مکونگ در جنوب شرق آسیا انجام دادند، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Landsat از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲، روند تغییرات مکانی مسیر رودخانه‌ها را تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که رودخانه گنگا دستخوش تغییرات چشم‌گیر در پهنه و مسیر خود بوده است، در حالی که رودخانه مکونگ پایداری نسبی بیشتری را نشان داده است. این تفاوت به شرایط اقلیمی و انسانی متفاوت دو حوضه نسبت داده شده است. در هند، سینه‌ها (۲۰۲۳) بر روی رودخانه برهمنی واقع در ایالت اودیشا مطالعه‌ای انجام دادند و با ترکیب داده‌های میدانی و مدل‌سازی عددی، پایداری سواحل و الگوهای جابجایی کانال را تحلیل کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مداخلات انسانی مانند برداشت شن و ساخت سد، در کنار تغییرات اقلیمی، از عوامل اصلی بی‌ثباتی سواحل و تغییر مسیر رودخانه هستند. بیسون و چوی (۲۰۲۴) نیز در مطالعه‌ای بر روی رودخانه سیتائونگ در میانمار نشان دادند که نوسانات اقلیمی، به‌ویژه پدیده ال‌نینو، تأثیر مستقیمی بر نرخ جابجایی کانال رودخانه دارند. آن‌ها استدلال می‌کنند که تغییرات اقلیمی جهانی می‌تواند با تغییر الگوهای بارش و دبی، رفتارهای ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ها را به‌طور محسوسی تغییر دهند.

پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات داخلی و خارجی پیشین، از حیث روش‌شناسی تفاوت‌های قابل توجهی دارد که نوآوری‌ها و نقاط قوت آن را برجسته می‌سازد.

اول اینکه، این مطالعه از رویکردی جامع و چندمرحله‌ای برای کمی‌سازی تغییرات مورفولوژیکی، جابه‌جایی مکانی-زمانی و فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه سفیدرود بهره برده است. برخلاف برخی پژوهشات که تنها به تحلیل مورفولوژیکی ساده یا بررسی داده‌های محدودی در بازه زمانی کوتاه پرداخته‌اند، این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه (از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵) و بهره‌گیری از شاخص‌های دقیق NDWI، شاخص پیچ‌وخم (SI) و اندازه‌گیری دقیق موقعیت کرانه‌ها به صورت ایستگاهی، تغییرات را با دقت بالا و در بازه زمانی بلندمدت تحلیل کرده است.

دوم اینکه، استفاده همزمان و هماهنگ از فناوری‌های سنجش از دور (تصاویر ماهواره‌ای Landsat با رزولوشن‌های متفاوت) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در بستر نرم‌افزارهای QGIS و R به منظور استخراج دقیق شکل هندسی رودخانه، تعیین موقعیت کرانه‌ها، و تحلیل کمی جابجایی و فرسایش-رسوب‌گذاری، رویکردی کاملاً منسجم و سیستماتیک را ارائه می‌دهد که در بسیاری از مطالعات پیشین کمتر مشاهده شده است.

سوم اینکه، تعریف ایستگاه‌های دقیق و ترسیم خطوط مرجع طولی و عرضی در بستر رودخانه، به همراه محاسبه شاخص‌های پیچیدگی هندسی و نرخ جابجایی سالانه در هر ایستگاه، امکان تحلیل دقیق تغییرات مکانی-زمانی رودخانه را در بخش‌های بالا، میانه و پایین‌دست فراهم می‌آورد. این نوع تفکیک و تحلیل مکانی-زمانی به صورت سیستماتیک، در مطالعات مشابه داخلی و خارجی کمتر دیده شده است.

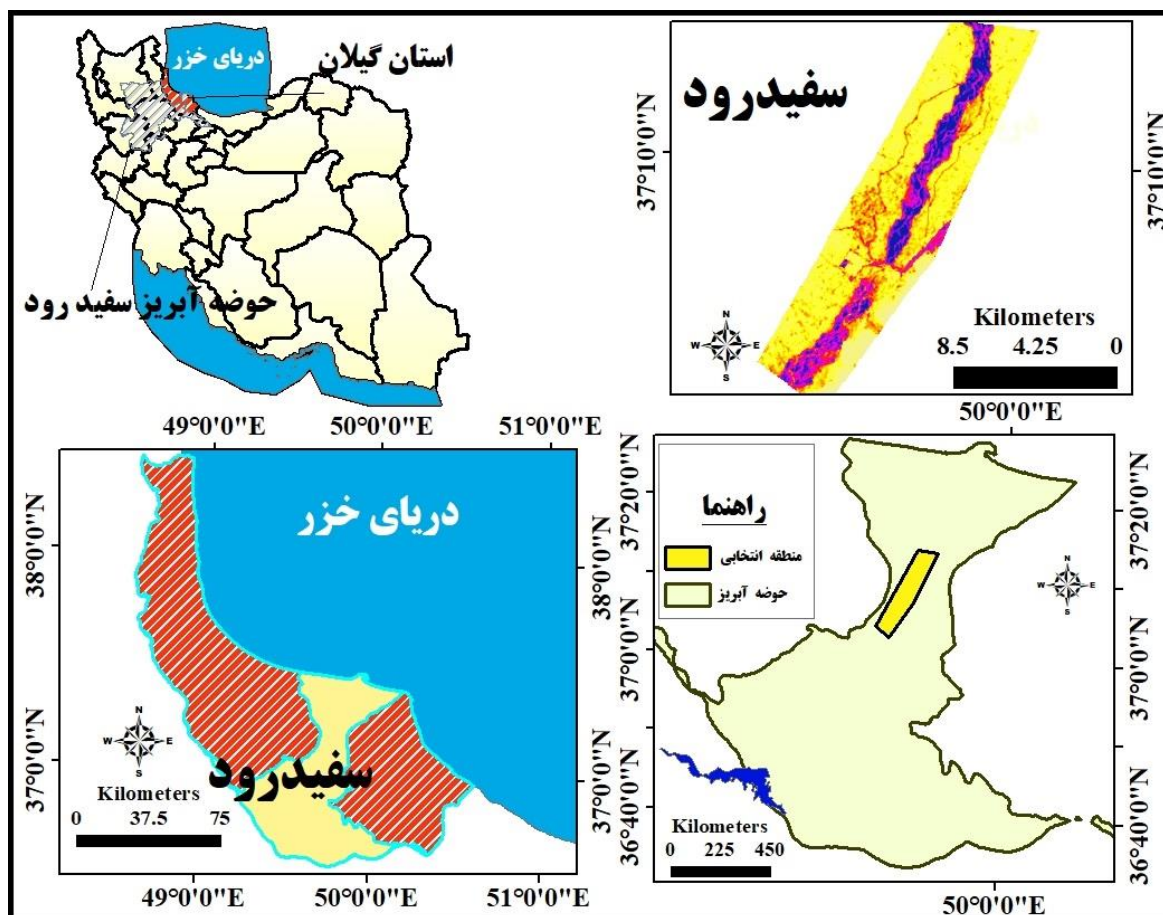
در نهایت، این پژوهش ضمن تمرکز بر سنجش تغییرات مورفولوژیکی رودخانه، با استفاده از داده‌های بلندمدت و رویکرد تلفیقی و تحلیلی، قابلیت ارائه نتایج کاربردی در مدیریت منابع آب و کنترل مخاطرات محیطی را دارد، در حالی که برخی پژوهش‌ها صرفاً به تحلیل‌های توصیفی یا مدل‌سازی محدود شده‌اند.

روش پژوهش

۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

رودخانه سفیدرود یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های شمال ایران به شمار می‌رود که از کوه‌های کردستان سرچشمه می‌گیرد و پس از پیوستن رود قزل‌اوزن و شاهرود، در محدوده‌ی جنوبی شهرستان رودبار در استان گیلان، مسیر خود را به سوی دریای خزر ادامه می‌دهد تشکیل می‌شود. این رود با طولی در حدود ۷۶۵ کیلومتر، پس از گذر از استان‌های زنجان، قزوین و گیلان، سرانجام در نزدیکی بندر کباشهر به دریای خزر می‌ریزد. مختصات جغرافیایی دهانه ورودی سفیدرود به دریای خزر حدوداً برابر با $37^{\circ}25'$ شمالی و $49^{\circ}57'$ شرقی است، در حالی که نقطه تلاقی دو رود اصلی تشکیل‌دهنده آن (قزل‌اوزن و شاهرود) در حدود $36^{\circ}47'$ شمالی و $49^{\circ}25'$ شرقی قرار دارد. سفیدرود علاوه بر اهمیت هیدرولوژیکی، نقش اساسی در تأمین آب کشاورزی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و توسعه سکونتگاه‌های انسانی منطقه دارد.

رودخانه سفیدرود با داشتن یک حوزه آبریز گسترده و پیچیده، نقش حیاتی در تأمین آب کشاورزی منطقه، تغذیه سفره‌های زیرزمینی و حمایت از توسعه سکونتگاه‌ها و فعالیت‌های اقتصادی محلی ایفا می‌کند. متوسط دبی رودخانه در نقاط مختلف حوضه متفاوت است؛ در محل خروج رودخانه از استان زنجان به قزوین، دبی متوسط حدود ۴۵ متر مکعب بر ثانیه گزارش شده و این مقدار در بخش‌های پایینی و نزدیک به دهانه رودخانه، به دلیل جمع‌آوری جریان‌های جانبی و شاخه‌های فرعی، به حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد (سازمان آب منطقه‌ای گیلان، ۱۴۰۰). این جریان آبی قابل توجه موجب شده که سفیدرود به عنوان منبع اصلی آب و انرژی برای مصارف مختلف در شمال ایران شناخته شود (سازمان آب منطقه‌ای گیلان، ۱۴۰۰).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۴)

۲. روش پژوهش

مطالعه حاضر برای کمی‌سازی تغییرات مورفولوژیکی، جابجایی مکانی-زمانی و فرسایش و رسوب‌گذاری در بستر رودخانه در هفت مرحله انجام شده است. در ادامه، مراحل مختلف این پژوهش تشریح می‌شود:

مرحله اول: گردآوری داده‌ها

تصاویر ماهواره‌ای مربوط به پنج سال مختلف شامل ۱۹۹۴، ۱۹۹۵، ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ از پایگاه سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) دریافت شدند. این تصاویر، منطقه مورد مطالعه را به صورت کامل پوشش می‌دادند و نیازی به تلفیق تصاویر نبود. ویژگی‌های تصاویر مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. منابع تهیه داده‌ها

Source	Date	Resolution	Path/Row	Data
EarthExplorer (usgs.gov)	1985	60 m	142/048	Landsat 5
EarthExplorer (usgs.gov)	1995	30 m	142/048	Landsat ETM+
EarthExplorer (usgs.gov)	2005	30 m	142/048	Landsat ETM+
EarthExplorer (usgs.gov)	2015	30 m	142/048	Landsat OLI
EarthExplorer (usgs.gov)	2025	30 m	142/048	Landsat OLI

برای اطمینان از کیفیت تصاویر، تنها تصاویری با پوشش ابری کمتر از ۵٪ از فصل گرم (اکتبر/نوامبر) انتخاب شدند. تنها تصویر سال ۲۰۲۵ برای ماه فوریه انتخاب شد. تصاویر فصل زمستان به دلیل پوشش ابر گسترده و سیلاب‌های موقتی که موجب تغییر موقعیت واقعی بستر رودخانه می‌شوند، استفاده نشدند. تمام تصاویر دارای سیستم مختصات مشترک *UTM WGS84*، منطقه ۳۹ شمالی بودند. تصاویر سطح ۲ مجموعه ۲ لندست به صورت پیش‌پردازش شده بوده و نیازی به پردازش اولیه نداشتند. کاربردهای اصلی این تصاویر عبارتند از:

استخراج پهنه آبی رودخانه در هر دوره زمانی: با استفاده از باندهای طیفی مناسب در هر سری از لندست (باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک)، شاخص‌های *NDWI* و *MNDWI* محاسبه شد تا نواحی پوشیده از آب (پهنه رودخانه) با دقت استخراج شود.

ترسیم مرزهای رودخانه: خروجی شاخص‌های طیفی پس از آستانه‌گذاری، به فرمت برداری (پلی‌گان) تبدیل شد و برای هر سال مرز رودخانه ترسیم گردید. این مرزها پایه‌ای برای سنجش تغییرات عرضی و جانبی رودخانه بودند.

محاسبه تغییرات عرض رودخانه: با ترسیم مقاطع عرضی مشخص در طول رودخانه، تغییرات عرض فعال رودخانه در سال‌های مختلف از روی تصاویر ماهواره‌ای و لایه‌های برداری استخراج شده اندازه‌گیری شد.

محاسبه شاخص پیچان‌روی: مسیر مرکزی رودخانه برای هر بازه زمانی ترسیم و با نسبت طول مسیر رود به طول مستقیم، میزان پیچ‌وخم در هر دوره محاسبه گردید.

تحلیل جابه‌جایی عرضی مجرا: با مقایسه موقعیت مجرای اصلی در تصاویر سال‌های مختلف، میزان و جهت جابه‌جایی جانبی رودخانه (به‌ویژه به سمت غرب) تحلیل شد.

نقشه‌سازی نواحی فرسایش و رسوب‌گذاری: از طریق همپوشانی لایه‌های رودخانه در بازه‌های مختلف، نواحی با افزایش یا کاهش مساحت آبی شناسایی شدند که نشانگر فرسایش یا رسوب‌گذاری در بستر رودخانه بوده‌اند. این تحلیل‌ها در بستر نرم‌افزارهای *ENVI*، *ArcGIS Pro*، *QGIS* و *Google Earth Engine* انجام شدند و داده‌های حاصل برای تولید نقشه‌های مقایسه‌ای و تحلیل‌های آماری مورفولوژی رودخانه استفاده گردیدند.

مرحله دوم: استخراج شکل هندسی رودخانه

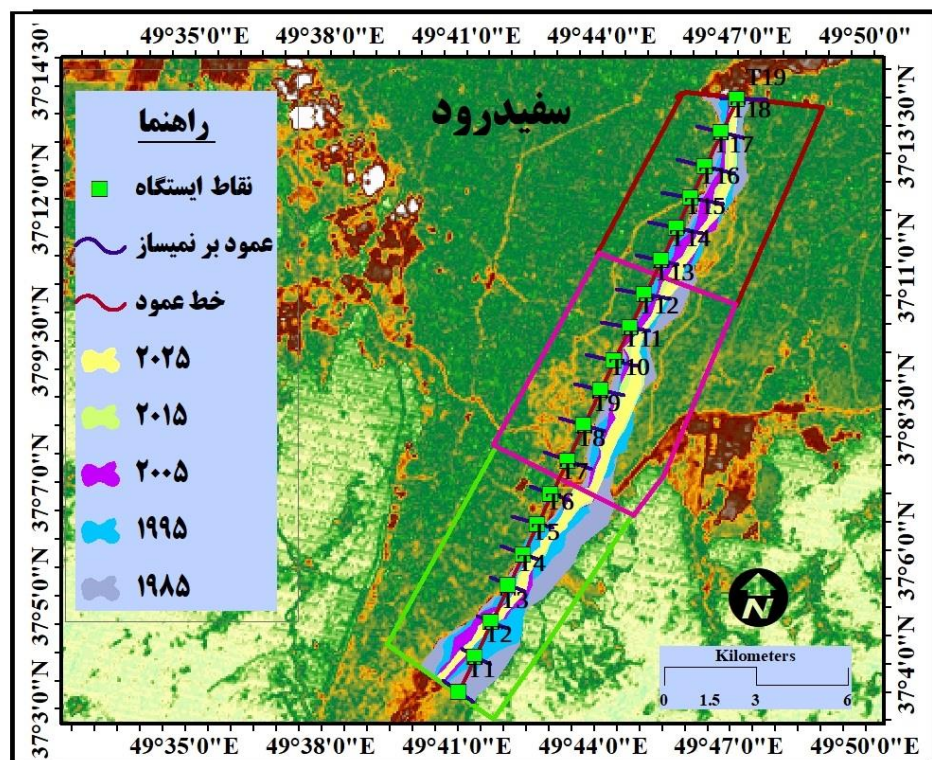
برای هر سال مورد مطالعه، از شاخص استاندارد تفاوت نرمال شده آب (*NDWI*) جهت تفکیک آب از خشکی استفاده شد. پیکسل‌هایی با مقدار *NDWI* بیشتر از صفر به عنوان پیکسل‌های مرطوب (کد ۱) و کمتر یا مساوی صفر به عنوان پیکسل‌های خشک (کد ۰) تعریف شدند. سپس پیکسل‌های مرطوب به فرمت برداری تبدیل و فایل‌های شکل (*shapefile*) رودخانه برای هر سال ایجاد شد. فرمول محاسبه *NDWI* به صورت زیر است:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad \text{رابطه (۱)}$$

برای لندست ۵، باندهای سبز و *NIR* به ترتیب باند ۲ و ۴، و برای لندست ۸، باند ۳ و ۵ بودند.

مرحله سوم: تعیین موقعیت کرانه‌های شرقی و غربی رودخانه

برای تعیین تغییرات مکانی، سال ۱۹۸۵ به عنوان سال پایه در نظر گرفته شد. یک خط مرجع فرضی به طول ۵۷ کیلومتر در امتداد مرکز بستر رودخانه ترسیم شد و ۱۹ ایستگاه با فواصل سه کیلومتر بر روی آن تعریف گردید (شکل ۲).



شکل ۲. تغییرات مکانی-زمانی کانال رودخانه سفیدرود در بازه زمانی ۱۹۸۵-۲۰۲۵ (ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۴)

رودخانه به سه بخش بالا، میانه و پایین دست تقسیم شد. در هر ایستگاه، یک عمود بر خط مرجع ترسیم و با فایل‌های شکل رودخانه تلافی داده شد. محل تقاطع کرانه‌های رود با این عمودها به نقاط تبدیل شده و فاصله آن‌ها از خط مرجع با استفاده از ابزار Distance Matrix اندازه‌گیری شد.

مرحله چهارم: محاسبه شاخص پیچ‌وخم^۱

شاخص SI با تقسیم طول مسیر خمیده رودخانه بر طول مستقیم دره محاسبه شد:

$$SI = (S_L) * (V_L)^{-1} \quad (\text{رابطه ۲})$$

اگر $SI \geq 1.5$ باشد رودخانه پیچان، اگر $SI \leq 1.1$ باشد مستقیم و بین این دو مقدار، سینوسی در نظر گرفته می‌شود. این شاخص برای هر بخش (بالادست، میان دست و پایین دست) و برای کل رودخانه در تمام سال‌های مورد مطالعه محاسبه شد.

مرحله پنجم: محاسبه عرض و سطح آبی رودخانه

عرض رودخانه با محاسبه فاصله بین کرانه‌های شرقی و غربی در هر ایستگاه تعیین و برای هر بخش و کل رودخانه میانگین‌گیری شد. سطح آبی نیز با استفاده از shapefile هر سال اندازه‌گیری و تغییرات آن از طریق تفاضل بین سال پایه و نهایی محاسبه شد. با توجه به قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری تصاویر لندست، محاسبه عرض رودخانه در این مطالعه با در نظر گرفتن محدودیت‌های مکانی این داده‌ها انجام شده است. برای افزایش دقت استخراج مرز رودخانه، از شاخص‌های آبی مانند NDWI و MNDWI همراه با آستانه‌گذاری دقیق استفاده شد. همچنین به منظور کاهش خطا در مرزبندی، عملیات فیلترگذاری،

1. Sinuosity Index

حذف نویز و هموارسازی مرز پهنه آبی صورت گرفت. عرض رودخانه در بازه‌های زمانی مختلف در مقاطع مشخص و عریض‌تر (جایی که پهنای رودخانه بیشتر از ۶۰ متر بود) اندازه‌گیری شده است تا تأثیر محدودیت تفکیک مکانی کاهش یابد. همچنین برای اعتبارسنجی و کنترل نتایج، از تصاویر با تفکیک بالاتر مانند Sentinel-2 (با دقت ۱۰ متر) برای مقاطع سال‌های اخیر استفاده شد و در برخی موارد از داده‌های Google Earth و نقشه‌های توپوگرافی نیز به‌عنوان مرجع بهره گرفته شد.

مرحله ششم: تحلیل جابجایی کانال رودخانه

با تلاقی فایل‌های شکل کرانه‌های رودخانه برای سال‌های متوالی، نواحی فرسایش، رسوب، بدون تغییر و مهاجرت تاریخی تعیین شدند. اگر مرز جدید کرانه شرقی در شرق مرز قدیمی قرار می‌گرفت، به‌عنوان فرسایش و در غرب به‌عنوان رسوب در نظر گرفته می‌شد. برای کرانه غربی، وضعیت برعکس بود. مجموع مساحت نواحی فرسایش و رسوب برای هر بخش و سپس کل رودخانه محاسبه شد. نرخ سالانه با تقسیم مساحت کل بر تعداد سال‌ها به دست آمد.

تمام عملیات تهیه نقشه شامل رقومی‌سازی، هم‌پوشانی و اندازه‌گیری فاصله در نرم‌افزار QGIS انجام شد. داده‌ها در نرم‌افزار Excel گردآوری و در محیط R تحلیل شدند. برای نمایش نتایج از نمودارهای خطی و میله‌ای و همچنین نقشه‌ها برای SI، جابجایی کانال و فرسایش/رسوب‌گذاری در بخش‌های مختلف استفاده شد.

برای هر ایستگاه، فاصله کرانه‌های شرقی و غربی از خط مرجع اندازه‌گیری و تغییرات آن برای هر دهه (۱۹۸۵-۱۹۹۵، ۱۹۹۵-۲۰۰۵، ۲۰۰۵-۲۰۱۵، ۲۰۱۵-۲۰۲۵) محاسبه شد. تغییرات مثبت نشانگر جابجایی به سمت شرق و منفی به سمت غرب بود. سپس میانگین تغییرات هر دهه و تغییر کل ۳۰ سال برای هر ایستگاه و بخش محاسبه شد. نرخ جابجایی سالانه با تقسیم تغییر کل بر تعداد سال‌ها محاسبه گردید.

مرحله هفتم: محاسبه فرسایش و رسوب‌گذاری

نتایج

به‌منظور بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه طی دوره زمانی چهار دهه، مسیر رودخانه در پنج بازه زمانی (۱۹۸۵، ۱۹۹۵، ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵) مورد مطالعه قرار گرفت. مسیر رودخانه به سه بخش مکانی شامل بالادست، میاندست و پایین‌دست تقسیم شد و ضریب سینوسی به‌عنوان شاخصی از میزان انحنا، مسیر، برای هر بخش و هر سال محاسبه گردید. جدول (۲) تغییرات مسیر رودخانه سفیدرود را در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از میانگین عرض رودخانه سفیدرود در سه بازه بالایی (T1-T7)، میانی (T7-T13) و پایینی (T13-T19) طی سال‌های ۱۹۸۵، ۱۹۹۵، ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵، می‌توان روند تغییرات مورفولوژیک این رودخانه را به‌صورت کمی تحلیل کرد. نتایج نشان می‌دهد که در هر سه بازه، روند کلی کاهش عرض رودخانه مشهود است، به‌طوری‌که بیشترین مقدار کاهش میانگین عرض در بازه بالایی، سپس پایینی و در نهایت بازه میانی مشاهده می‌شود. این روند کاهشی با شیب‌های متفاوت و متناسب با شرایط هیدرولوژیک، هندسی و فعالیت‌های انسانی هر بازه قابل تفسیر است. در بازه بالایی رودخانه، متوسط عرض از حدود ۱۶۸۵ متر در سال ۱۹۸۵ به ۲۸۲ متر در سال ۲۰۲۵ کاهش یافته است که معادل کاهش کلی ۱۴۰۳ متر طی ۴۰ سال می‌باشد. این رقم معادل میانگین سالانه کاهش عرض ۳۵٫۷ متر در سال است که نشان‌دهنده شدت فرایندهای تنگ‌شدگی و کانالیزه شدن رودخانه در این بخش می‌باشد. این موضوع می‌تواند تحت تأثیر کاهش دبی سیلابی، اعمال مدیریت مهندسی رودخانه (مانند ایجاد سازه‌های حفاظتی یا دیواره‌سازی)، تغییرات کاربری اراضی حاشیه‌ای و چرخه‌های طبیعی رسوبگذاری و فرسایش رخ داده باشد. در بازه میانی، کاهش کلی میانگین عرض رودخانه به ۶۷۶ متر طی بازه زمانی ۴۰ ساله رسیده است (از ۱۰۵۸ متر به ۳۸۲ متر)، که این رقم برابر با میانگین سالانه کاهش عرض ۲۰٫۳ متر است. با اینکه این بازه نیز روند کاهشی داشته، مقدار آن نسبت به بخش بالایی کمتر

است که دلیل آن می‌تواند مربوط به پیچ‌وخم‌های موضعی، ویژگی‌های ژئومورفولوژیک خاص، یا حتی وجود مصب‌رودهای فرعی و تغییرات موضعی در سرعت و دبی جریان باشد.

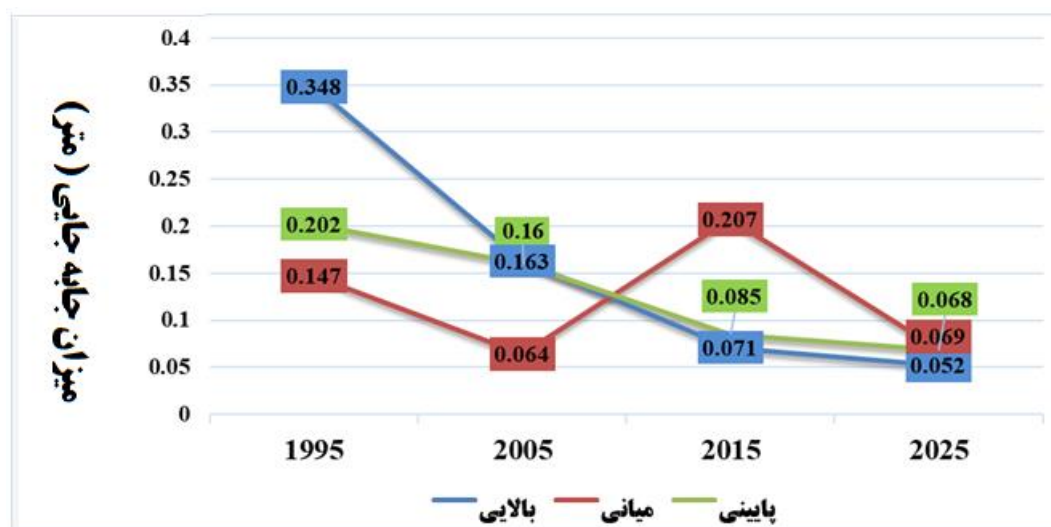
در بازه پایینی نیز کاهش کلی میانگین عرض ۶۲۶ متر (از ۱۰۶۴ به ۴۳۸ متر) برآورد شده که میانگین سالانه کاهش عرض را به ۲۲,۵ متر در سال می‌رساند. این رقم نشان‌دهنده پایداری نسبی بازه پایین‌تر نسبت به بالادست است، اما همچنان کاهش قابل توجهی در عرض، به احتمال زیاد ناشی از افزایش رسوب‌گذاری، افت سطح آب، مدیریت انسانی و کاهش سیلاب‌ها را نشان می‌دهد. در مجموع روند کلی بیانگر آن است که رودخانه سفیدرود طی چهار دهه اخیر نه تنها از نظر میزان پیچ‌وخمی (ضریب سینوسی) بلکه در خصوص پارامتر عرض نیز روند هموارسازی داشته و این موضوع متأثر از تلفیقی از عوامل طبیعی (تغییرات دبی و رژیم هیدرولوژیک، چرخه‌های رسوبگذاری و فرسایش) و دخالت‌های انسانی (ساخت‌وسازها، تغییر کاربری اراضی، سازه‌های مهندسی روی رودخانه و...) بوده است. وقوع چنین تغییراتی علاوه بر تأثیرگذاری مستقیم بر پایداری بستر و سواحل رودخانه، می‌تواند پیامدهایی نظیر کاهش زیستگاه‌های جانوری و گیاهی، افزایش ریسک وقوع سیلاب‌های نابهنگام و برهم‌خوردن توازن اکوسیستم منطقه را به دنبال داشته باشد. بنابراین توجه ویژه به مدیریت پایدار رودخانه و پایش مستمر متغیرهای مورفولوژیک توصیه می‌شود.

جدول ۲. تغییرات میانگین عرض فعال کانال بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵. واحدها بر حسب متر هستند و علامت منفی نشان‌دهنده کاهش عرض است.

بخش	۱۹۹۵	۲۰۰۵	۲۰۱۵	۲۰۲۵	میانگین سالانه تغییر عرض (متر/سال)
بالایی	-۰/۳۴۸	-۰/۱۶۳	-۰/۰۷۱	-۰/۰۵۲	-۳۵/۷۱
میانی	-۰/۱۴۷	-۰/۰۶۴	-۰/۲۰۷	-۰/۰۶۹	-۲۰/۲۹
پایینی	-۰/۲۰۲	-۰/۱۶	-۰/۰۸۵	-۰/۰۶۸	-۲۲/۴۵

(یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

بر اساس داده‌های برداشت‌شده از مقاطع عرضی رودخانه سفیدرود طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵، روند میانگین سالانه تغییر عرض در سه بخش بالایی، میانی و پایینی حوضه مورد بررسی قرار گرفت. محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کاهش میانگین سالانه عرض رودخانه مربوط به بخش بالایی بوده، به‌طوری‌که در این بخش، متوسط کاهش عرض رودخانه برابر با ۳۵,۷ متر در سال ثبت شده است. این مقدار، گویای آن است که در طول چهار دهه اخیر، بستر رودخانه در ناحیه بالادست بیش از سایر بخش‌ها دچار تنگ‌شدگی شده است. در ادامه، بخش پایینی رودخانه با ۲۲,۵ متر کاهش عرض در هر سال در جایگاه دوم قرار می‌گیرد. بخش میانی نیز طی این مدت به طور متوسط هر سال ۲۰/۳ متر کاهش عرض را تجربه کرده است. این اعداد، بیانگر تفاوت محسوس در شدت تغییرات مورفولوژیک بستر بین سه ناحیه اصلی رودخانه می‌باشد. به‌ویژه مقدار بسیار قابل توجه کاهش عرض سالانه در بخش بالایی، می‌تواند نشانه دخالت‌های گسترده انسانی، کاهش آورد رسوبی، کاهش دبی سیلاب‌ها و یا اجرای پروژه‌های مهندسی مانند احداث دیواره‌ها و ساماندهی بستر رودخانه در سال‌های اخیر باشد. البته در همه بخش‌ها گرایش عمومی به کاهش عرض رودخانه طی چهار دهه اخیر ظاهراً غالب بوده است. چنین روندی علاوه بر تأثیرگذاری بر ظرفیت انتقال سیلاب، پایداری اکوسیستم‌های جانبی و زیستگاه‌های رودخانه‌ای را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو، فهم و تحلیل این روندها برای مدیران منابع آب و محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار است و تأکید می‌کند که پایش منظم و مدیریت اکولوژیک رودخانه ضروری است تا از تبدیل این روندهای کاهشی به بحران‌های محیط‌زیستی یا افزایش آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات طبیعی جلوگیری شود.



شکل ۳. تغییرات میانگین عرض فعال کانال بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵ (ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۴)

تحلیل تغییرات زمانی مساحت آب رودخانه سفیدرود (۱۹۸۵-۲۰۲۵)

بررسی داده‌های عرضی مقاطع مختلف رودخانه سفیدرود در سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد (جدول ۳) که مساحت آب رودخانه در این بازه ۴۰ ساله دستخوش تغییرات قابل توجهی شده است. مطابق جدول (۳)، مجموع عرض مقاطع رودخانه سفیدرود طی ۴۰ سال اخیر روند شدیداً کاهشی داشته است. به طوری که این شاخص از حدود ۲۳۴۶۷ متر در سال ۱۹۸۵ به تنها ۴۱۷۶ متر در سال ۲۰۲۵ کاهش یافته است. بیشترین افت طی دو دهه اول رخ داده و پس از آن روند کندتر اما همچنان کاهشی ادامه پیدا کرده است.

این کاهش، معادل از دست رفتن حدود ۸۲ درصد از مساحت مقطع آبی در محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵ است. چنین روندی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مثل کاهش دبی جریان، سدسازی بالادست، تغییرات اقلیمی، برداشت‌های انسانی، دیواره‌چینی و رسوبگذاری فزاینده بستر رودخانه باشد. این تحولات نه تنها بر پویایی‌های مورفولوژیک رودخانه تأثیرگذار است بلکه بر پایداری زیستگاه‌های مرتبط با رودخانه و کیفیت خدمات اکوسیستمی آن نقش حیاتی دارد.

جدول ۳. تغییرات زمانی مساحت آب رودخانه سفیدرود (۱۹۸۵-۲۰۲۵)

۲۰۲۵	۲۰۱۵	۲۰۰۵	۱۹۹۵
-۱۹۲۹۱	-۱۷۷۴۳	-۱۵۹۲۸	-۱۰۲۲۴

(یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

بررسی آماری تغییرات مکانی (جابجایی عرضی^۱) رودخانه سفیدرود در سه بخش بالادست، میانه و پایین‌دست، به مدت چهار دهه (۱۹۸۵ تا ۲۰۲۵)، شاخص مهمی در شناخت رفتار مورفولوژیکی و پویایی این رودخانه به شمار می‌رود. نتایج حاصل از محاسبات مبتنی بر داده‌های عرض مقاطع نمایانگر روند غالب کاهش عرض و جابجایی محسوس کانال رودخانه، عمدتاً به سمت غرب (حداقل غربی)، به ویژه در دهه‌های نخست مطالعه است.

در بخش بالادست، بیشترین میزان جابجایی غرب‌سو مشاهده می‌شود، به طوری که در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۵، میانگین تغییر (به سمت کرانه غربی) به ۸۷۳ متر می‌رسد و این روند در دهه بعد نیز تداوم دارد (میانگین ۶۱۸ متر). مقادیر (میانگین-غرب) تا مرز ۱۶۶۴ متر کاهش قابل توجه عرض، و نشان‌دهنده اثرگذاری ملموس فرسایش کناری یا حوادث سیلابی در این

بازه‌ها است. اگرچه در دهه‌های اخیر از شدت جابجایی کاسته شده و حتی مقادیر مثبت (به سمت کرانه شرقی) نیز ثبت گردیده، اما روند کلی بیانگر پایداری نسبی جدید و میل به تثبیت بستر در نتیجه دخالت‌های انسانی نظیر سازه‌های کنترل سیلاب، احداث سدها و احیاناً تغییرات کاربری است.

در بخش میانه نیز روند غالب، کاهش عرض و جابجایی به سمت غرب بوده است؛ البته دامنه این تغییرات پایین‌تر از بالادست است و میانگین جابه‌جایی در بازه ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۵ حدود ۳۰۲ متر منفی گزارش شده است. در ادامه، فرآیند کاهش شدت یافته و فاصله تغییرات حداقلی و حداکثری کمتر شده است که بیانگر تعدیل پویایی بستر در بخش میانی در سال‌های جدیدتر است. این بخش به دلیل ساختار مورفولوژیکی و سینوسی بالاتر، همیشه حساس‌ترین ناحیه به رخدادهای طبیعی و انسانی محسوب می‌شود.

در بخش پایین‌دست نیز نحوه تغییر مشابه بوده و عمدتاً با جابه‌جایی به سمت غرب و مقدار میانگین به (سمت کرانه غربی) منفی همراه است، اگرچه دامنه و شدت تغییر نسبت به دو بخش دیگر پایین‌تر بوده است. بیشترین میزان منفی در دهه اول (۳۲۴ متر) ثبت شده و در دهه‌های بعد روند کاهشی داشته است. این ناحیه به دلیل ظرفیت جابجایی رسوبات کمتر و عرض پهن‌تر، پایداری نسبی بیشتری را نسبت به بخش‌های بالایی از خود نشان داده است.

در مجموع، مقدار (حداکثر-شرق) در تمامی بخش‌ها نسبت به (حداقل-غرب) کمتر و فاصله بین (حداکثر و حداقل تغییر) در دهه‌های اول مؤید حضور رخدادهای شدیدتر و سپس کاهش تدریجی این نوسانات در دهه‌های اخیر است. این موضوع را می‌توان به تاثیرگذاری اقدامات مدیریتی، کاهش انرژی جریان، و روند تثبیت سواحل نسبت داد.

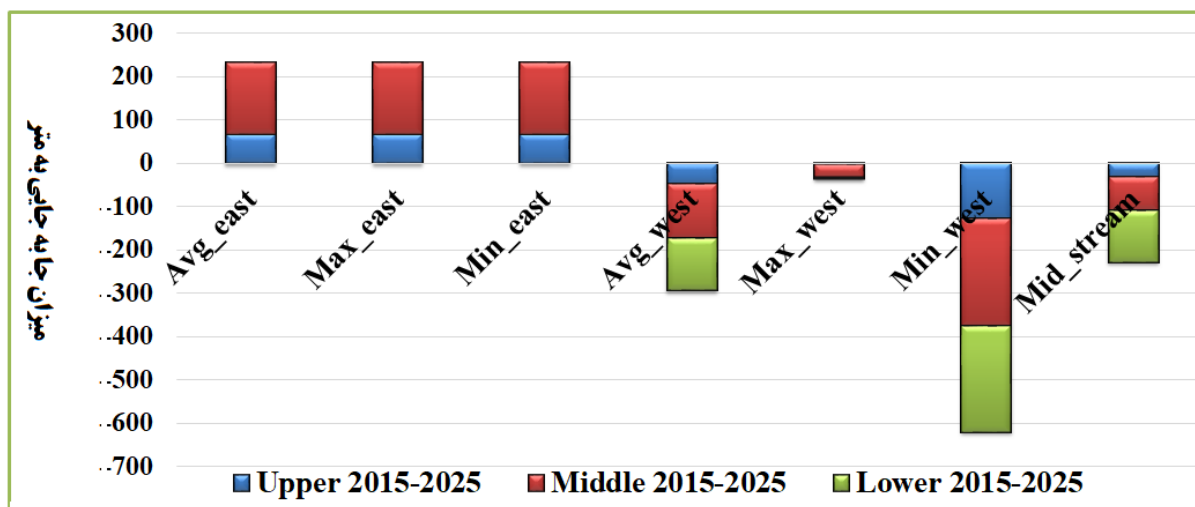
عوامل متعددی در ثبت چنین تغییراتی نقش داشته‌اند: کاهش آورد آب و سیلاب‌های بزرگ ناشی از تغییرات اقلیم، برداشت‌های انسانی (شن و ماسه)، احداث سدها و سازه‌های هیدرولیکی که هم سبب کاهش انرژی فرسایشی و هم محدود شدن آزادی حرکت رود می‌شوند. این مسائل اغلب سبب انحراف و حرکت کانال به سوی پایداری و جمع‌شدن بستر شده است و می‌تواند منجر به کاهش تنوع مورفولوژیک، آسیب به اکوسیستم‌های حاشیه‌ای و افزایش خطرات آینده مانند سیل ناگهانی شود.

در نهایت، تحلیل جابه‌جایی عرضی رودخانه طی چهار دهه اخیر نمایانگر غلبه جابجایی به سمت کرانه غربی و کاهش شدید عرض بستر رودخانه سفیدرود است؛ روندی که با کاهش در دامنه تغییرات طی زمان و نشانه‌هایی از تثبیت تدریجی بستر همراه شده است و نیازمند توجه جدی در مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی سیلاب و حفاظت محیط زیست این حوضه می‌باشد (شکل ۴).

جدول ۴. تغییرات جابجایی عرضی رودخانه سفیدرود (۱۹۸۵-۲۰۲۵)

بخش	دهه	میانه جریان	حداقل غرب	حداکثر غرب	میانگین غرب	حداقل شرق	حداکثر شرق	میانگین شرق
بالایی	۱۹۸۵-۱۹۹۵	-۷۴۱/۸	-۱۶۶۴	-۶۶۲	-۸۷۳/۳	۴۷	۴۷	۴۳
	۱۹۹۵-۲۰۰۵	-۵۲۳	-۱۱۰۰	-۱۴۷	-۶۱۸	۴۹	۴۹	۴۲
	۲۰۰۵-۲۰۱۵	-۱۳۲/۴	-۳۵۷	-۳۷	-۱۹۹/۶	۷	۶۴	۳۵/۵
	۲۰۱۵-۲۰۲۵	-۳۱/۱	-۱۲۹	-۲	-۴۷/۵	۶۷	۶۷	۶۷
میانی	۱۹۸۵-۱۹۹۵	-۳۰۲/۱	-۷۱۰	-۲۸	-۳۰۲/۱	۰	۰	۰
	۱۹۹۵-۲۰۰۵	-۳۵۹	-۶۱۸	-۲۳۵	-۳۵۹	۰	۰	۰
	۲۰۰۵-۲۰۱۵	-۲۱/۶	-۲۱۳	-۷۸	-۱۶۴/۳	۱۵	۲۶۲	۱۲۱
	۲۰۱۵-۲۰۲۵	-۷۸/۱	-۲۴۶	-۳۱	-۱۲۶/۶	۱۶۴	۱۶۴	۱۶۴
پایانی	۱۹۸۵-۱۹۹۵	-۴۰۹/۸	-۱۱۱۵	-۲۸	-۴۰۹/۸	۰	۰	۰
	۱۹۹۵-۲۰۰۵	-۱۴۴/۶	-۳۳۸	-۹۰	-۱۹۱/۲	۸۸	۸۸	۸۸
	۲۰۰۵-۲۰۱۵	-۱۸۱	-۳۰۹	-۶۳	-۱۸۱	۰	۰	۰
	۲۰۱۵-۲۰۲۵	-۱۱۹/۱	-۲۴۵	-۲	-۱۱۹/۱	۰	۰	۰

(یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)



شکل ۴. الگوی جابجایی کانال در امتداد ایستگاه‌های مورد مطالعه در طی بازه زمانی مورد مطالعه. مقدار منفی نشان‌دهنده جابجایی به سمت غرب ساحل است، در حالی که مقدار مثبت نشان‌دهنده جابجایی به سمت شرق است.

نقشه‌های ارائه شده در شکل (۵)، که تغییرات مورفولوژیکی رودخانه را در چهار دوره زمانی (۱۹۸۵-۱۹۹۵، ۱۹۹۵-۲۰۰۵، ۲۰۰۵-۲۰۱۵، و ۲۰۱۵-۲۰۲۵) به تفکیک فرسایش (آبی)، رسوبگذاری (قرمز) و مناطق بدون تغییر (زرد) نشان می‌دهند.

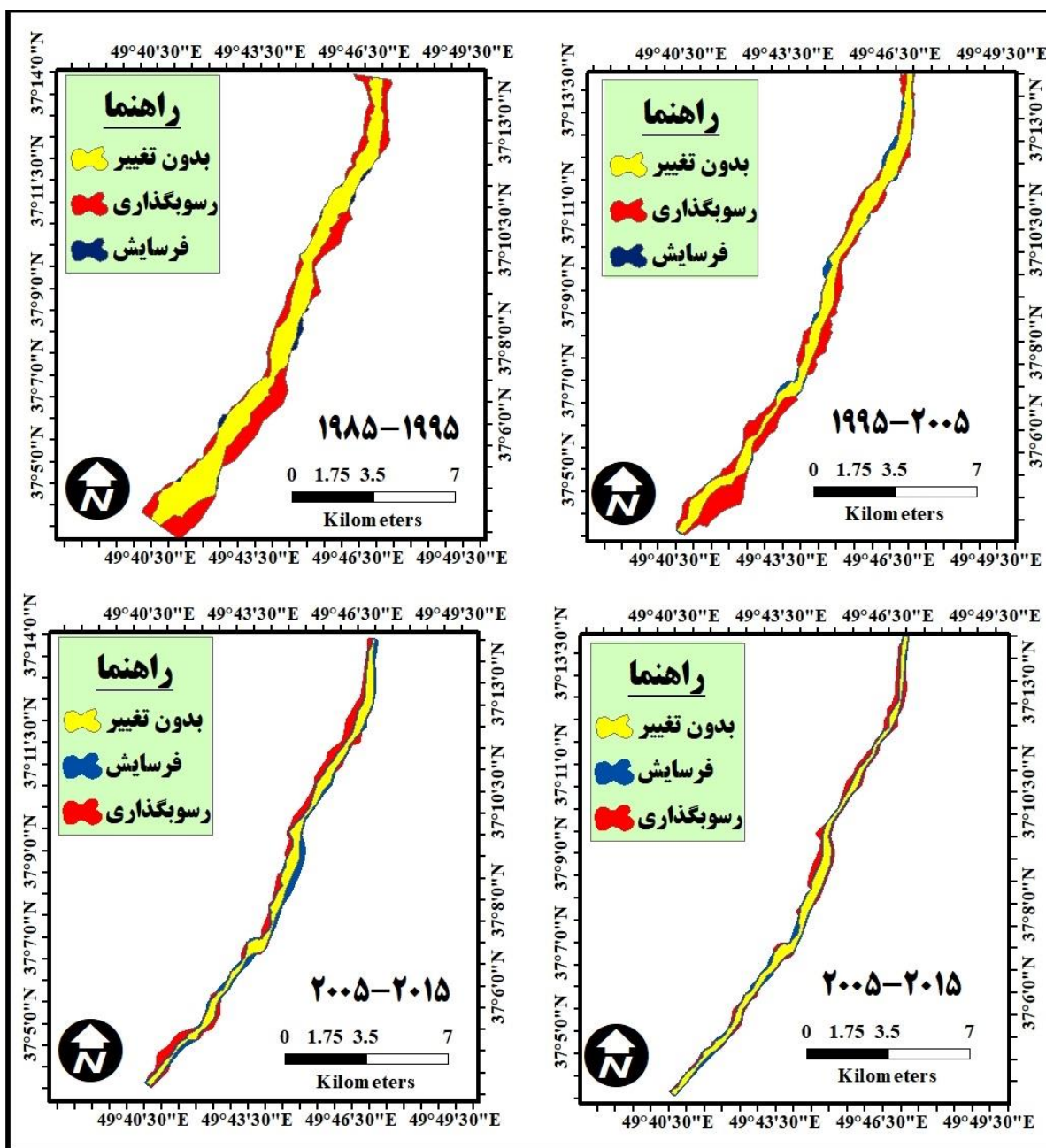
دوره ۱۹۸۵-۱۹۹۵: بررسی نقشه تغییرات مورفولوژیک رودخانه سفیدرود طی بازه‌ی ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۵ نشان‌دهنده‌ی غلبه فرآیند رسوبگذاری بر بستر رودخانه است. چنین شرایطی اغلب زمانی رخ می‌دهد که دبی و انرژی رودخانه کاهش یافته یا ورود رسوب به بستر افزایش یافته باشد. در کنار رسوبگذاری، فرسایش موضعی کناره‌ها به صورت پراکنده و در مقیاس کوچک در نقشه دیده می‌شوند. بخش‌های بدون تغییر سهم بسیار کمتری نسبت به دو فرآیند دیگر داشته‌اند که خود نشانه‌ای از پویایی بالا و نبود ثبات بستر در این بازه زمانی است. به عبارت دیگر، رودخانه در این دهه همواره در حال دگرگونی و جابجایی مقطع عرضی و طولی بوده است. غلبه رسوبگذاری بر فرسایش طی این دوره پیامدهای مهمی به دنبال دارد.

دوره ۱۹۹۵-۲۰۰۵: در این دهه نیز، روند رسوبگذاری همچنان غالب است، اگرچه ممکن است نسبت به دهه قبل، شدت آن در برخی مقاطع کاهش یافته باشد. فرسایش بیشتر در نقاط محدود و ناپیوسته مشاهده می‌شوند. این پراکندگی نشان می‌دهد که در این بازه زمانی، فرسایش کناره‌ها یا نقاط خاصی از بستر رودخانه رخ داده است. حضور باریک‌های زردرنگ در طول محور رودخانه نمایانگر مناطقی است که تقریباً ثبات خود را در این بازه زمانی حفظ کرده‌اند. اما حجم و گستردگی این بخش‌ها نسبت به مناطق قرمز (رسوب‌گذاری) و حتی آبی (فرسایش) کمتر است. این نشان می‌دهد که رودخانه کماکان دارای پویایی بالایی بوده و ثبات کلی کانال در این دهه پایین بوده است.

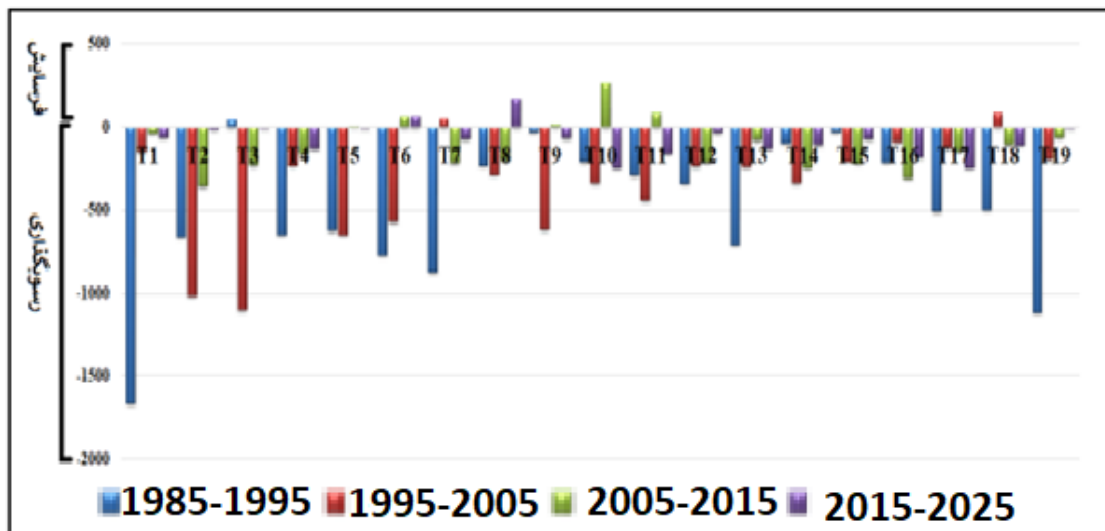
نقشه تغییرات مورفولوژیک سفیدرود طی بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ نشان‌دهنده توزان نسبی بین فرآیند رسوبگذاری (قرمز) و فرسایش (آبی) در مقایسه با دو دهه‌ی پیشین است. اگرچه همچنان نواحی قرمز رنگ رسوبگذاری در طول بستر دیده می‌شوند، اما حوزه‌های فرسایش (آبی) نیز به شکل پیوسته‌تر و گسترده‌تر نسبت به گذشته ظاهر شده‌اند؛ به‌ویژه در بخش‌های میانی و بالادست رودخانه. مناطق زرد (بدون تغییر) نیز نسبت به دهه‌های قبل اندکی افزایش یافته است که بیانگر تثبیت نسبی برخی بخش‌هاست. این الگو نشان می‌دهد که در این دهه، دینامیک رودخانه به سمت تعادل بیشتری بین انباشت و برداشت حرکت کرده و از برتری کامل رسوبگذاری فاصله گرفته است؛ به عبارت دیگر، رودخانه وارد مرحله‌ای با پویایی متعادل‌تر و رقابت نزدیک‌تر دو فرآیند فرسایش و رسوبگذاری شده است. این وضعیت می‌تواند ناشی از تغییرات هیدرولوژیکی، مدیریتی یا کاهش وقایع شدید طی این دوره باشد.

طی بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۵ مشاهده می‌شود که میزان مناطق بدون تغییر نسبت به دوره‌های قبل اندکی افزایش یافته و بخش‌های بیشتری از رودخانه تثبیت شده‌اند. در مقایسه با دهه‌های ۱۹۹۵-۱۹۸۵ و ۲۰۰۵-۱۹۹۵ که بیشتر بستر رودخانه تحت تأثیر فرایند رسوبگذاری بود و مناطق دچار فرسایش کمتر و پراکنده‌تر حضور داشتند، در این دهه توزیع رسوبگذاری و فرسایش نسبتاً متوازن‌تر است و مناطق فرسایشی پیوسته‌تر و بیشتر شده است. این موضوع بیانگر گذار از یک دوره‌ی غالب رسوبگذاری به سمت تعادل بیشتر بین فرسایش و رسوبگذاری است. با این حال، بخش قابل توجهی از رودخانه هنوز تحت تأثیر رسوبگذاری قرار داشته، ولی از شدت و وسعت آن نسبت به دوره‌های قبل کاسته شده است. این ترکیب، می‌تواند نشانه‌ای از کاهش دینامیک شدید و پیدایش پایداری نسبی بیشتر در بازه‌ی زمانی اخیر باشد و شاید منعکس‌کننده مدیریت بهتر یا تغییرات هیدرولوژیک باشد. در مجموع، این بازه نسبت به دو دهه‌ی قبلی پویایی متوازن‌تر و ثبات بیشتری در بستر رودخانه نشان می‌دهد.

بررسی تغییرات عرض رودخانه سفیدرود در مقاطع مختلف طی چهار دهه گذشته براساس پروفایل‌های طولی ترسیم‌شده نشان می‌دهد (شکل ۶) که این رودخانه عمدتاً با روند رسوبگذاری چشمگیر مواجه بوده است. در این نمودار میله‌ای، تغییرات فرسایش و رسوبگذاری عرضی در مقاطع مختلف مسیر رودخانه سفیدرود طی چهار بازه زمانی (۱۹۸۵-۱۹۹۵، ۱۹۹۵-۲۰۰۵، ۲۰۰۵-۲۰۱۵ و ۲۰۱۵-۲۰۲۵) به تفکیک نقاط T1 تا T19 نمایش داده شده است. رنگ‌های مختلف میله‌ها (آبی برای ۱۹۸۵-۱۹۹۵، قرمز برای ۱۹۹۵-۲۰۰۵، سبز برای ۲۰۰۵-۲۰۱۵ و بنفش برای ۲۰۱۵-۲۰۲۵) بیانگر تغییرات طی هر دوره زمانی هستند. مقدارهای منفی (پایین‌تر از محور افقی) نمایانگر فرسایش و مقادیر مثبت نشان‌دهنده رسوبگذاری در آن مقطع و دوره زمانی می‌باشند. براساس این شکل، بیشترین شدت فرسایش در دو بازه دهه اول (۱۹۸۵-۱۹۹۵) و دهه دوم (۱۹۹۵-۲۰۰۵) در اغلب مقاطع، به‌ویژه نقاط ابتدایی مانند T1 تا T8 آشکار است که با میله‌های بلند منفی آبی و قرمز نشان داده شده‌اند. این موضوع بیانگر آن است که در دو دهه نخست مطالعه، غالب فرآیند غالب در این بخش‌ها فرسایش شدید و عقب‌نشینی قابل توجه بستر فعال بوده است. اما در بازه‌های زمانی بعدی (۲۰۱۵-۲۰۰۵ و ۲۰۲۵-۲۰۱۵) که با رنگ‌های سبز و بنفش نمایش یافته‌اند، اغلب مقاطع یا تغییر چندانی را تجربه نکرده‌اند و یا مقدار رسوبگذاری محدودی نسبت به گذشته داشته‌اند، به‌ویژه در برخی نقاط (مانند T10، T11 و T13) که روند مثبت دارند و نشانه‌ای از تشکیل بار جدید یا پایداری نسبی محیط محسوب می‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که در پایان دوره (۲۰۱۵-۲۰۲۵) شدت تغییرات چه از نظر فرسایش و چه از نظر رسوبگذاری کاهش یافته است و مقادیر نزدیک به صفر شده‌اند که این امر نشانه‌ای از تثبیت نسبی بستر رودخانه در این بازه زمانی است. بنابراین، جمع‌بندی این نمودار نشان می‌دهد که رودخانه سفیدرود در ابتدای این دوره مطالعاتی، عمدتاً تحت تأثیر فرسایش شدید قرار داشته اما به مرور روند فرآیندها متعادل‌تر شده و رفتار رودخانه به سمت پایداری بیشتری پیش رفته است. این پویایی فضایی-زمانی می‌تواند نتیجه کاهش دبی و بار رسوبی، اعمال مدیریت‌های انسانی و دخالت‌های عمرانی در منطقه باشد.



شکل ۵. تغییرات فرسایش و رسوبگذاری سفیدرود (۱۹۸۵-۲۰۲۵)



شکل ۶. نمودار تغییرات فرسایش و رسوبگذاری سفیدرود (۱۹۸۵-۲۰۲۵) در ایستگاه‌های منتخب

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با استفاده از تحلیل‌های مکانی و ترسیم نقشه‌های فرسایش و رسوبگذاری طی چهار دهه (۱۹۸۵-۲۰۱۵) نشان می‌دهد رودخانه سفیدرود در محدوده مورد بررسی، دستخوش تغییرات مورفولوژیکی چشمگیر و متغیری شده است که این روند بر اساس نقشه‌های فرسایش و رسوبگذاری در دهه‌های مختلف به‌وضوح قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که در دو دهه نخست (۱۹۸۵-۱۹۹۵ و ۱۹۹۵-۲۰۰۵)، رسوبگذاری بر بستر رودخانه غالب بوده است؛ به گونه‌ای که رسوبگذاری بخش عمده‌ای از مسیر رود را در بر می‌گرفتند و فرسایش محدود به بخش‌هایی پراکنده و کوچک‌تر بود. این الگو بیانگر دوره‌ای از کاهش انرژی جریان، افزایش بار رسوبی رودخانه و یا کاهش دبی عبوری بود که منجر به تجمع رسوبات و عریض‌تر شدن مقطعی بستر می‌شد. می‌توان حدس زد که در این بازه‌ها، نقش سدسازی‌ها یا خشکسالی‌های مقطعی و بهره‌برداری گسترده از منابع شن و ماسه، سهم عمده‌ای در انتقال و رسوبگذاری رسوبات داشتند. در دهه سوم (۲۰۰۵-۲۰۱۵)، اما الگوی تغییرات متعادل‌تر و متوازن‌تر گردیده است؛ نواحی فرسایشی نسبت به گذشته فراگیرتر و پیوسته‌تر شده‌اند و همزمان، سهم مناطق بدون تغییر نیز افزایش یافته است. این تغییر رفتار بیانگر ورود رودخانه به دوره‌ای گذار بین دینامیک غالب رسوبگذاری و آغاز مجدد فعالیت‌های فرسایشی است و نشان می‌دهد که بخشی از انرژی جریان به بازپس‌گیری و برداشت رسوبات رسوب‌گذاری شده دوره‌های قبل اختصاص یافته است. همچنین افزایش مناطق پایدار نشان‌دهنده تثبیت نسبی مورفولوژی بستر می‌باشد. در دهه‌های اخیر و دوره پایانی (۲۰۱۵-۲۰۲۵)، با توجه به تداوم این روند و کاهش کلی عرض بستر در تمام مقاطع، می‌توان نتیجه گرفت که رودخانه در مسیر کوچک شدن پیوسته و میل به تعادل مورفودینامیکی بیشتر قرار گرفته است. این فرایند با کاهش ظرفیت ذخیره سیلاب، افزایش سرعت جریان و کاهش تنوع زیستگاه‌های بستر همراه است.

مقایسه با مطالعات مشابه (مانند رودخانه باگماتی و کوشی در نپال یا رودخانه زرد و برهماپوترا) نشان می‌دهد که مطالعات جهانی بر روی رودخانه‌های تحت تأثیر سدسازی و تغییر کاربری حوضه، اغلب نشان‌دهنده روند غالب باریک‌شدن، کاهش پهنای فعال رود و کاهش پویایی جانبی است (بارال، باسنت و داهل، ۲۰۲۲؛ وانگ، لی، هی، ۲۰۱۷). مانند نتیجه مشاهدات در سفیدرود، بسیاری از این سیستم‌ها ابتدا به دلیل کاهش دبی و بار رسوبی، مرحله‌ای از رسوبگذاری را طی می‌کنند و سپس، با پایداری بیشتر جهت جریان و تقویت انرژی موضعی، فرایندهای فرسایشی افزایش می‌یابد تا کانال به تعادل جدید برسد که این نتایج با نتایج پژوهش سلیمانی و ایلانلو (۱۴۰۴) مطابقت دارد. همچنین در برخی مطالعات (بارال، باسنت و داهل، ۲۰۲۲)، حتی زمانی که

میانگین سالانه رسوبگذاری چهار برابر فرسایش بوده، همچنان روند کلی کوچک شدن بستر و کاهش مساحت فعال رودخانه ثبت شده است - یافته‌ای که با مشاهدات حاضر مطابقت دارد. وجه تمایز سفیدرود در مقایسه با برخی سیستم‌های مطالعه شده در منابع خارجی، شدت و وسعت کم نواحی بدون تغییر (زرد) در نقشه‌هاست. این ویژگی بیانگر پویایی بالا و استمرار تحول بستر است و می‌تواند نتیجه تعامل پیچیده عوامل طبیعی (نوسانات اقلیمی، تغییرات بارش و دبی، مکانیزم‌های انتقال و رسوب) با عوامل انسانی (سدسازی، برداشت رسوب، تغییرات کاربری اراضی و تثبیت سواحل) باشد.

در جمع‌بندی، مطالعه حاضر با بهره‌گیری از سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) توانسته است تغییرات مورفولوژیکی رودخانه سفیدرود را به صورت مکانی و زمانی در چهار دهه اخیر به دقت تحلیل و ترسیم کند. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک‌های تحلیل مکانی امکان شناسایی دقیق نواحی فرسایش و رسوبگذاری را فراهم ساخته است که این امر بدون چنین فناوری‌هایی بسیار دشوار و زمان‌بر بود. به کمک ابزارهای سنجش از دور، تغییرات گسترده و پویای بستر رودخانه که ناشی از عوامل طبیعی و انسانی است، به صورت مستمر و با دقت بالا ثبت شده و روندهای کلی تحولات مورفودینامیکی قابل ردیابی گردیده‌اند. علاوه بر این، GIS به عنوان پلتفرمی قوی برای مدیریت، تحلیل و ترسیم نقشه‌های فرسایش و رسوبگذاری، امکان هم‌پوشانی داده‌های مکانی مرتبط با فعالیت‌های سدسازی، برداشت مواد رسوبی و تغییرات کاربری اراضی را فراهم ساخته است، که این هم‌گرایی اطلاعاتی به درک بهتر عوامل مؤثر در تغییرات مورفولوژیک کمک شایانی کرده است. این کاربردهای سنجش از دور و GIS ضمن تسهیل پایش و ارزیابی مداوم، بستر ساز مدیریت هوشمندانه بستر رودخانه و طراحی راهبردهای پایدار جهت حفظ تعادل هیدرومورفودینامیک و حفاظت اکولوژیک زیست‌بوم رودخانه‌ای می‌باشند. از این طریق، مطالعه نمونه سفیدرود نشان‌دهنده نقش حیاتی فناوری‌های نوین فضایی در پژوهش‌های زیست‌محیطی و مدیریت منابع طبیعی است و تأکید می‌کند که ترکیب سنجش از دور و GIS می‌تواند به عنوان ابزارهای کلیدی در نظارت بلندمدت و برنامه‌ریزی دقیق برای حفاظت و بهره‌برداری بهینه از رودخانه‌ها و اکوسیستم‌های وابسته به آن‌ها به کار گرفته شوند.

منابع

- ابراهیمی، لیلا؛ ایلانلو، مریم و حمید، زینب (۱۴۰۴). بررسی تغییرات مورفولوژیکی در دشت آبرفتی و جلگه ساحلی (مطالعه موردی: رودخانه بهمنشیر). *مجله ژئومورفولوژی کمی*.
- ایلانلو، مریم و کرم، امیر (۱۳۹۹). ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با استفاده از روش MQI. *مجله تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۶(۲)، ۲۹۶-۳۰۸.
- خالقی، سمیه؛ روستایی، شهرام و خورشیددوست، محمدعلی (۱۴۰۲). ارزیابی قابلیت اتومای سلولی در شبیه‌سازی میزان تحول و فرسایش در سیستم رودخانه‌ای (مطالعه موردی: حوضه آبریز لیقوان). *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۵۵(۴)، ۱۰۱-۸۷.
- رجبی، معصومه، روستایی، شهرام، برزکار، محسن (۱۴۰۰). بررسی پایداری رودخانه زاب از طریق طبقه بندی مورفولوژیکی آبراهه به روش رزگن. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵(۷۵)، ۱۴۱-۱۵۵. Doi: 10.22034/gp.2021.10858
- سلطانی گردفرا مرزی، سمیه؛ عسگری ورزیده، سمیه و تازه، مهدی (۱۳۹۷). بررسی روند تغییرات زوایه مرکزی و شعاع مرکزی در مئاندرهای رودخانه گاماسیاب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۲(۶۳)، ۲۲۵-۲۴۰.
- سلیمانی، بهناز و ایلانلو، مریم (۱۳۹۷). پهنه‌بندی تغییرات زمانی و مکانی بستر رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار Arc/Map: نمونه موردی: رودخانه بهمنشیر. *مجله هیدروژئومورفولوژی*، ۱۲(۴۳)، ۸۱-۱۰۳.

Reference

- Ali, A. N. A., Ariffin, J., Adib, M., Razi, M., & Jazuri, A. (2017). Environmental degradation: A review on the potential impact of river morphology. *MATEC Web of Conferences*, 103, 04001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710304001>
- Ali, M., Zaman, A. K. M. M., Islam, M. R., Hridoy, S. K., & Akhtar, M. P. (2017). Socio-economic impacts of river bank erosion: a case study on coastal island of Bangladesh. *The Journal of NOAMI*, 34(2), 73-84. DOI: 10.1051/matecconf/201710304001
- Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00067-4)
- Baral, B. D., Basnet, A., & Dahal, S. (2022). Morphological changes, channel shifting, erosion and deposition analysis of the Bagmati River, Nepal (1988-2018) using GIS and remote sensing. *Environmental Challenges*, 17, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.101009>
- Batalla, R. J., & Vericat, D. (2011). Recent advances in the use of remote sensing and GIS in river management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(2), 151-158. DOI:10.1002/esp.2043. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.003
- Blanton, S., & Marcus, W. A. (2014). Anthropogenic impacts on river channel morphology: A review. *Geomorphology*, 216, 47-62.
- Cunningham, A., & Lyn, D. (2016). Integrating remote sensing and GIS for river morphology analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1056-1071. DOI:10.1080/19475705.-2015.1121144
- Czortek, P., Dyderski, M. K., & Jagodzinski, A. M. (2019). River regulation drives shifts in urban riparian vegetation over three decades. *Urban Forestry & Urban Greening*, 47, 126524. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126524>
- Debnath, S., et al. (2017). Spatio-temporal analysis of river channel migration using remote sensing and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9), 432. DOI:10.1007/s10661-017-6133-7.
- Dewan, A. M., et al. (2016). River dynamics and sedimentation processes: Implications for flood hazard mitigation. *Journal of Hydrology*, 534, 155-167. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.01.006
- Dhari, R., et al. (2015). Monitoring channel shifting of Yamuna River using remote sensing and GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 74-87. <https://doi.org/10.1080/19475683.2021.1871950>. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-713-2014>. <https://doi.org/10.1002/esp.4378>
- Entwistle, N. S., et al. (2018). Remote sensing techniques for river channel monitoring: Current status and future prospects. *Earth-Science Reviews*, 182, 144-162. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.-1943-5584.0001090](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.-1943-5584.0001090)
- Gurnell, A. M. (2016). Predicting river channel migration: Advances and challenges. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 664-680. DOI:10.1080/19475705.2015.1121144
- Gupta, S., et al. (2023). Impact of large-scale hydropower and irrigation infrastructure on river dynamics. *Journal of Hydrology*, 615, 128345. <https://doi.org/10.1080/02723646.2022.2090656>.
- Harris, N. (2023). The spatial, material and temporal dimensions of planning regulations: A legal geography perspective. *Planning Theory & Practice*, 24(1), 80-96. <https://doi.org/10.1080/-14649357.2022.2154824>.
- Kamarudin, M. K. A., et al. (2023). Hydrological and climate impacts on river characteristics of Pahang River basin, Malaysia. *Heliyon*, 9, e21573. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21573>

- Mittal, R., Said, S., & Beg, M. (2023). Assessment of changes in planform morphology of the upper Yamuna River segment, India, using remote sensing and GIS. *Physical Geography*, 44(4), 446–477. <https://doi.org/10.1080/02723646.2022.2090656>
- Musso, N. M. D., Capolongo, D., Caldara, M., Surian, N., & Pennetta, L. (2020). Channel changes and controlling factors over the past 150 years in the Basento River (Southern Italy). *Water*, 12(1), 307. <https://doi.org/10.3390/w12010307>
- Naim, M., & Hredoy, S. E. (2021). Channel migration analysis of Padma and Brahmaputra Rivers using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 581. <https://doi.org/10.3390/w12010307>. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100169>.
- Neupane, D., et al. (2019). River channel migration and flood risk management in Nepal. *Natural Hazards*, 95, 539–557. <https://doi.org/10.3390/f14010100>.
- Ortega, J. A., Razola, L., & Garzon, G. (2014). Recent human impacts and change in dynamics and morphology of ephemeral rivers. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(3), 713–730. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-713-2014>.
- Rajabi, M., Roustaei, Sh., & Barzegar, M. (2021). Investigation of Zab River stability through Rosgen morphological classification of channels. *Geography and Planning*, 25(75), 141–155. <https://doi.org/10.22034/gp.2021.10858>. [In Persian]
- Rakhal, B., Adhikari, T. R., Sharma, S., & Ghimire, G. R. (2021). Assessment of channel shifting of Karnali Megafan in Nepal using remote sensing and GIS. *Annals of GIS*, 27(2), 177–188. <https://doi.org/10.1080/19475683.2021.1871950>
- Sarkar, D., et al. (2012). Role of river channel migration studies in flood hazard mitigation. *Natural Hazards*, 60(3), 809–828. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107659>.
- Singh, A., et al. (2022). Advances in remote sensing and GIS for river morphology. *Geocarto International*, 37(5), 1234–1250. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.01.010>.
- Slingerland, R., & Smith, N. D. (2004). River avulsion and channel migration dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 257–285. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.-2021.107659>.
- Thakur, V. C., et al. (2012). Socioeconomic consequences of river channel migration. *Journal of Environmental Planning and Management*, 55(10), 1353–1372.
- Vercruyssen, K., & Grabowski, R. C. (2021). Anthropogenic versus natural drivers of river channel changes. *Water Resources Research*, 57(6), e2020WR028606. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.-2023.e21573>.
- Wang, L., & Mei, C. (2016). GIS applications in river morphology monitoring. *Hydrological Processes*, 30(18), 3281–3293. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.42008>.
- Wang, Z., Li, Z., & He, Y. (2017). Channel adjustment, bank erosion, and sediment budget of the lower Yellow River from 1986 to 2014. *Geomorphology*, 304, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.014>
- Wang, S., & Xu, W. (2018). Remote sensing-based river channel analysis techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 635. <https://doi.org/10.1080/01431160110040323>,
- Wulder, M. A., et al. (2012). Benefits and challenges of remote sensing for river studies. *Progress in Physical Geography*, 36(4), 512–532. <https://doi.org/10.1038/322254a0>.

- Yang, C., et al. (2015). Remotely sensed trajectory analysis of channel migration in Lower Jingjiang Reach during the period of 1983–2013. *Remote Sensing*, 7, 16241–16256. <https://doi.org/10.3390/rs71215828>
- Zuo, Q., et al. (2020). Human activities accelerating geomorphic changes in rivers. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4745-2018>.