

(OPEN ACCESS)

Investigation of the Impact of Karkheh Reservoir Dam Construction on River Morphology Using Hydrological Indices, Satellite Imagery

Sahar Bandouri Niknam¹, Mohammad Reza Zayeri^{*2}

1. Ph.D. Student in Rivers and Aquatic Ecosystems, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: sahar.niknam1376@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Engineering and Environmental Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.zayeri@scu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: Construction of large dams alters riverine erosion and sedimentation patterns, exerting substantial impacts on channel geometry and fluvial morphodynamic stability. Meandering rivers are inherently dynamic systems that continuously evolve under the influence of erosion, deposition, and anthropogenic activities. Such processes can lead to meander migration, bank erosion, and an increased risk of flooding. Reservoir dams markedly restrict downstream water discharge and sediment transport, thereby modifying channel width, depth, and cross-sectional form. The Karkheh Basin is one of the most vital and strategic basins in West Asia and plays a key role in Iran's food security. Following the impoundment of the Karkheh Dam in 2001, the mean instantaneous discharge downstream of the reservoir decreased by 78%. Studies indicate that after dam construction, reaches that were previously stable have become morphologically unstable. The river width has decreased from 273 m prior to dam construction to approximately 60 m, and lateral channel migration has been reported at about 34 m per year. The present study investigates the morphological changes of the 212-km Karkheh River from 1985 to 2024 and analyzes the controlling factors based on hydrological indices. Collectively, these objectives contribute to a clearer understanding of the impacts of the Karkheh Dam on river morphological adjustment and discharge variability.
Article history: Received: 09.01.2025 Revised: 11.29.2025 Accepted: 01.03.2026	
Keywords: Base Flow Index, Morphological changes, Satellite images, Sinuosity coefficient, The Karkheh dam	
	Materials and Methods: The core methodology of this research is centered on the temporal and spatial comparison of riverbed morphological changes. In the first stage, the location of the Karkheh River Basin and the study reach were delineated using 1:25,000 digital topographic maps and ArcGIS software. Relevant satellite imagery covering the study area was then collected. For more detailed analysis, the study reach was divided into three longitudinal sections. In the next step, geometric characteristics of meander bends—including bend radius, wavelength, central angle, valley length, and sinuosity—were extracted for each time interval using AutoCAD software. These data were subsequently analyzed using JMP statistical software. In this study, the impacts of the construction and operation of the Karkheh Dam on the hydrological regime and channel

morphology downstream of the dam were assessed through discharge-based hydrological indices and meander geometry indicators. Considering that the Karkheh reservoir dam was constructed and impounded in 2001, monthly discharge data were divided into two phases for hydrological assessment: the pre-dam period (1985 and 1996) and the post-dam period (2014 and 2024). Furthermore, using Landsat and Sentinel satellite imagery, the geometric indices of the Karkheh River were analyzed to evaluate morphological changes over time.

Results: The results indicated that the monthly discharge time series at the Payeh-Pol hydrometric station underwent substantial changes from 1985 to 2024. Prior to dam construction, an increasing trend (+1.06) was observed, whereas after dam completion, a pronounced decreasing trend (−1.65) emerged, reflecting a significant reduction in flow volume. Analysis of the hydrological indices Q95, Q50, and Q5 confirmed considerable declines, particularly in low flows (a 59.7% decrease in Q5), which signifies heightened environmental stress and ecological vulnerability in downstream habitats. Findings also showed that the baseflow index increased by 58.4%, indicating a higher contribution of stable flows to the overall flow regime. Additionally, a 42.9% reduction in the duration of extreme flows, along with a 31.1% increase in the IHA index, revealed an intensification of flow regulation and disruption of the river's natural hydrodynamics. In terms of channel geometry, satellite-image analysis and meander delineation within the GIS environment demonstrated that, following dam construction, the number of meander bends increased by 60%, 33%, and 29% in the upstream, middle, and downstream reaches, respectively. Furthermore, sinuosity and central angle indices across different periods showed a clear increasing trend in meander curvature in the post-dam era. Specifically, the proportion of highly sinuous bends in the upstream reach increased by 55%. Overall, the results suggest that reduced discharge and shear stress downstream of the dam have facilitated the formation of more numerous yet gentler bends. Thus, discharge regulation by the upstream reservoir—while effectively attenuating extreme floods—has shifted the river's morphology toward increased meandering complexity and has altered the system's morphodynamic parameters.

Conclusion: The 39-year monitoring results of the Karkheh River (1985–2024), based on Landsat and Sentinel-2 imagery, show that the construction of the Karkheh Dam in 2001 fundamentally altered the river's hydrological regime and morphological behavior. Hydrological indices indicate that both low and high flows have been severely constrained. Moreover, the 58.4% increase in the Base Flow Index (BFI) reflects a more uniform discharge regime and a reduction in the river's natural flow variability. These hydrological shifts have contributed to reduced shear stress, enhanced sediment deposition, and ultimately, significant morphological transformation downstream of the dam. Geomorphological analyses revealed a 29–60% increase in the number of meander bends across the longitudinal sections of the river after dam construction, suggesting the subdivision of large, pronounced bends into smaller and gentler ones. Although sinuosity experienced a slight decline in all three sections (approximately 5–10%), the number of bends categorized as “highly sinuous” increased by 55% in Section 1 and by approximately 25% in Sections 2 and 3, indicating intensified small-scale meandering and

channel narrowing. In some reaches, channel width decreased by up to 78%, leading to lateral migration rates of about 34 meters per year. In summary, although the Karkheh Dam has reduced flow variability and flood hazards, it has simultaneously intensified lateral instability, increased the number of bends, narrowed the channel, and altered the meander pattern. Therefore, future management should incorporate controlled flood releases, sediment management strategies, annual satellite-based monitoring, and stabilization of vulnerable banks to prevent further instability and protect critical infrastructure.

Cite this article: Bandouri Niknam, Sahar, Zayeri, Mohammad Reza. 2026. Investigation of the Impact of Karkheh Reservoir Dam Construction on River Morphology Using Hydrological Indices, Satellite Imagery. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (2), 61-87.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.24026.3826

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی تأثیر احداث سد مخزنی کرخه بر ریخت‌سنجی رودخانه با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی و تصاویر ماهواره‌ای

سحر باندری نیکنام^۱، محمدرضا زایری^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری رودخانه و اکوسیستم‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: sahar.niknam1376@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: m.zayri@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: احداث سدهای بزرگ باعث تغییر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شده که این امر اثر زیادی بر هندسه و مشکلات ریخت‌شناسی رودخانه بر جای می‌گذارد. رودخانه‌های پیچان سامانه‌های پویایی هستند که به‌طور مداوم تحت تأثیر فرسایش، رسوب‌گذاری و فعالیت‌های انسانی تغییر می‌کنند. این تغییرات می‌تواند منجر به جابه‌جایی پیچان‌ها، فرسایش کناره‌ها و افزایش خطر سیلاب شود. احداث سدهای مخزنی جریان آب و انتقال رسوب به پایین‌دست را به‌شدت محدود می‌کند و تغییراتی در عرض و عمق بستر رودخانه ایجاد می‌نماید. حوضه آبخیز کرخه یکی از حوضه‌های حیاتی و راهبردی در غرب آسیا است که نقشی کلیدی در امنیت غذایی ایران ایفا می‌کند. پس از آبرگیری سد کرخه در سال ۲۰۰۱، میانگین دبی لحظه‌ای در پایین‌دست مخزن ۷۸٪ کاهش یافت. مطالعات نشان می‌دهد که پس از ساخت سد، بخش‌هایی که پیش‌تر پایدار بودند، ناپایدار شده‌اند. عرض رودخانه از ۲۷۳ متر پیش از احداث سد به ۶۰ متر کاهش یافته و جابه‌جایی جانبی بستر حدود ۳۴ متر در سال گزارش شده است. پژوهش حاضر تغییرات مورفولوژیکی رودخانه ۲۱۲ کیلومتری کرخه را از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴ بررسی می‌کند و عوامل مؤثر بر این تغییرات را بر اساس شاخص‌های هیدرولوژیکی تحلیل می‌نماید. این اهداف در مجموع به درک اثرات احداث سد کرخه بر تغییرات مورفولوژیک رودخانه و نوسانات دبی جریان کمک خواهند کرد.
واژه‌های کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات مورفولوژیکی، سد کرخه، شاخص جریان پایه، ضریب سینوسی	
	مواد و روش‌ها: روش اصلی پژوهش بر مقایسه زمانی و مکانی تغییرات بستر رودخانه تمرکز دارد. در مرحله نخست، موقعیت حوضه رودخانه کرخه و بازه مطالعه با استفاده از نقشه‌های رقومی توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و نرم‌افزار ArcGIS تعیین شد. سپس تصاویر ماهواره‌ای

مرتبط با محدوده موردنظر گردآوری گردید. برای بررسی دقیق‌تر، بازه مطالعاتی به سه بخش طولی تقسیم شد. در گام بعد، با بهره‌گیری از نرم‌افزار AutoCAD ویژگی‌های هندسی قوس‌ها مانند شعاع قوس، طول موج، زاویه مرکزی، طول دره و ضریب پیمانش برای هر دوره زمانی استخراج گردید. این داده‌ها سپس با استفاده از نرم‌افزار آماری JMP تحلیل شدند. در این پژوهش، تأثیرات ساخت و بهره‌برداری از سد کرخه بر رژیم هیدرولوژیکی و هندسه رودخانه پایین‌دست آن، با استفاده از تحلیل شاخص‌های دبی و شاخص‌های هندسی پیمانش رودی بررسی شده است. باتوجه به احداث و آگیری سد مخزنی کرخه در سال ۱۳۸۰، داده‌های دبی ماهانه برای بررسی شاخص‌های هیدرولوژیکی به دو دوره در سال‌های ۱۳۶۴ و ۱۳۷۵ پیش از احداث سد و سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۴۰۳ پس از آن، تقسیم و بررسی شد. سپس با استفاده از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنتینل، شاخص‌های هندسی رودخانه کرخه نیز بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد روند سری زمانی دبی ماهانه رودخانه در ایستگاه هیدرومتری پایه پل از ۱۳۶۴ تا سال ۱۴۰۳ تغییرات عمده‌ای داشته است به نحوی که پیش از ساخت سد، روند افزایشی (+۱/۰۶) مشاهده می‌شد اما پس از احداث سد، روند کاهشی بارزی (۱/۶۵-) پدید آمد که کاهش چشمگیر حجم جریان را نشان می‌دهد. تحلیل شاخص‌های هیدرولوژیکی Q_{50} ، Q_{95} ، Q_5 کاهش‌های قابل‌توجهی را تأیید کرد، به‌ویژه در جریان‌های کم (کاهش ۵۹/۷٪ شاخص Q_5) که بیانگر افزایش خطر تنش زیست‌محیطی در زیستگاه‌های پایین‌دست است. یافته‌ها نشان داد که شاخص جریان پایه با افزایش ۵۸/۴ درصد، نشانه افزایش سهم جریان‌های پایدار در الگوی جریان است. در کنار آن، کاهش ۴۲/۹ درصد در مدت‌زمان وقوع جریان‌های حدی و افزایش ۳۱/۱ درصد در شاخص IHA، گویای تنظیم مصنوعی جریان‌ها و تغییر در پویایی طبیعی رودخانه است. در بخش هندسی، با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و ترسیم قوس‌های پیمانش رودی در محیط GIS، مشخص شد که پس از ساخت سد، تعداد قوس‌ها در سه بخش رودخانه از بالادست به پایین‌دست به ترتیب ۶۰، ۳۳ و ۲۹ درصد افزایش یافته است. همچنین شاخص ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی در بازه‌های مختلف نشان‌دهنده روند افزایش خمیدگی قوس‌ها در دوره پس از احداث سد است. به طور مشخص، سهم قوس‌های پیمانش رودی شدید در بخش بالادست رودخانه ۵۵ درصد افزایش یافته است. نتایج حاکی از آن است که کاهش دبی و انرژی برشی پس از سد منجر به شکل‌گیری قوس‌های متعدد اما ملایم‌تر شده است. بدین ترتیب کنترل دبی توسط سد بالادست ضمن مهار سیلاب‌های شدید، هندسه رودخانه را به سمت قوس‌های بیش‌تر و ملایم‌تر سوق داده و پارامترهای مورفودینامیکی آن را دستخوش تغییر نموده است.

نتیجه‌گیری: نتایج پایش ۳۹ ساله‌ی رودخانه کرخه (۱۳۶۴ تا ۱۴۰۳) با استفاده از تصاویر لندست و سنتینل-۲ نشان داد که احداث سد کرخه در سال ۱۳۸۰ موجب تغییرات اساسی در رژیم هیدرولوژیک و رفتار مورفولوژیک رودخانه شده است. شاخص‌های هیدرولوژیکی نشان می‌دهند که جریان‌های حداقلی و حداکثری به شدت محدود شده‌اند. همچنین شاخص جریان پایه (BFI) با ۵۸/۴٪ افزایش بیانگر یکنواخت‌تر شدن جریان و کاهش نوسان‌های طبیعی

رودخانه است. این تغییرات زمینه‌ساز کاهش انرژی برشی، افزایش رسوب‌گذاری و در نتیجه، تحول مورفولوژی کرخه در پایین‌دست سد شده‌اند. از نظر تغییرات هندسی، تعداد قوس‌ها پس از احداث سد در بخش‌های طولی رودخانه بین ۲۹ تا ۶۰ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده تقسیم قوس‌های بزرگ به قوس‌های کوچک‌تر و ملایم‌تر است. ضریب خمیدگی نیز پس از سد در هر سه بخش کاهش جزئی داشت (حدود ۵-۱۰٪)، اما تعداد قوس‌های مربوط به طبقه «پیچان‌رودی شدید» در بخش یک ۵۵٪ و در بخش‌های دو و سه حدود ۲۵٪ افزایش یافته است که نشان‌دهنده تشدید پیچ‌وخم در مقیاس خرد و کاهش پهنای کانال است. در برخی بازه‌ها عرض رودخانه تا ۷۸٪ کاهش یافته و این باعث شده جابه‌جایی جانبی سالانه بستر به حدود ۳۴ متر برسد. جمع‌بندی آنکه سد کرخه اگرچه نوسانات جریان و خطر سیلاب را کاهش داده، اما موجب تشدید ناپایداری جانبی، افزایش تعداد قوس‌ها، باریک‌شدن کانال و تغییر الگوی پیچان‌رودی شده است. از این رو مدیریت آینده باید شامل رهاسازی‌های سیلابی کنترل‌شده، مدیریت رسوب، پایش سالانه با تصاویر ماهواره‌ای، و تثبیت سواحل حساس باشد تا از تشدید ناپایداری و تهدید زیرساخت‌ها جلوگیری شود.

استناد: باندری نیکنام، سحر، زایری، محمدرضا (۱۴۰۵). بررسی تأثیر احداث سد مخزنی کرخه بر ریخت‌سنجی رودخانه با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی و تصاویر ماهواره‌ای. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۳ (۲)، ۸۷-۶۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.24026.3826



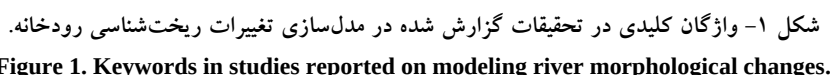
© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

درک تغییرات زمانی در رودخانه‌های پیچان‌رودی برای مدیریت مؤثر رودخانه، کاهش مخاطرات و حفاظت از محیط‌زیست اهمیت بالایی دارد. رودخانه‌های پیچان‌رودی سامانه‌های پویایی هستند که به طور مداوم به دلیل فرسایش، رسوب‌گذاری و دیگر فرایندهای طبیعی و همچنین فعالیت‌های انسانی در حال تغییر و تحول‌اند (۱ و ۲). این تغییرات می‌توانند تأثیرات قابل توجهی در مهاجرت پیچان‌رودها که منجر به فرسایش سواحل، گسترش بستر رودخانه و تغییر مسیر آب شود داشته باشند که منجر به افزایش خطر سیل در مناطق اطراف آن خواهد شد (۳ و ۴)؛ بنابراین تغییرات زیاد در جابجایی پیچان‌رودها می‌تواند برای پل‌ها، جاده‌ها و زیرساخت‌هایی که در نزدیکی آن‌ها ساخته شده‌اند، تهدید واقع شود (۵ و ۶). هم‌چنین دینامیک پیچان‌رودها بر دسترسی و پیوستگی، زیستگاه گونه‌های جانداران حاشیه رودخانه و آبریزهای موجود در بوم‌سازگان آن تأثیرگذار خواهد بود (۷ و ۸). فرسایش و رسوب‌گذاری در مثاندرد رودخانه‌ها فرایندهای پیچیده‌ای هستند که تأثیرات قابل توجهی بر پویایی رودخانه و تغییرات شکل آن دارند. در مناطق پیچان‌رودی، جریان آب با انرژی بالاتر به سمت بخش خارجی خم هدایت می‌شود که منجر به فرسایش سواحل خارجی و تخریب زمین می‌شود. هم‌زمان، در قسمت داخلی خم که انرژی جریان کم‌تر است، رسوبات جمع می‌شوند و منجر به تشکیل نواحی رسوب‌گذار می‌شوند (۹). ناپایداری بستر و سواحل رودخانه و رسوبات حاصل از این فرسایش‌ها، نه تنها باعث تخریب اراضی حاشیه‌ای و سازه‌های مجاور رودخانه می‌شود، بلکه در برخی مواقع بخش قابل توجهی از کل رسوبات را تشکیل می‌دهد که توسط جریان رودخانه حمل می‌گردد (۱۰). مطالعات متعدد ثابت کرده‌اند که ساخت

سدهای مخزنی به طور گسترده‌ای جریان آب و انتقال رسوب را در پایین‌دست محدود می‌کند (۱۱، ۱۲، ۱۳). این پدیده منجر به انباشت رسوبات در پشت سد و فرسایش بستر رودخانه در پایین‌دست می‌شود (۱۴ و ۱۵). تغییرات عرض و عمق کانال، کاهش پیچ‌وخم (سینوسیته) از پیامدهای شایع تنظیم دبی جریان آب و رسوب است (۱۶ و ۱۷). در مدیریت رودخانه‌های با جریان تنظیم‌شده، ضروری است که با رهاسازی کنترل‌شده سیلاب‌ها از سد و اجرای طرح‌های مدیریت رسوب مانند عبور یا رقیق‌سازی رسوبات، تا حد امکان پیوستگی رسوب را بازگردانده و از فرسایش بیش‌ازحد بستر جلوگیری شود (۱۲ و ۱۴). افزون بر این، پایش مستمر با داده‌های با وضوح بالا مانند ماهواره Sentinel-2 و پهپادها، ابزار قدرتمندی برای ارزیابی اثربخشی چنین اقدامات مدیریتی و تدوین راهبردهای بهینه درازمدت فراهم می‌سازد. مطابق شکل ۱، مطالعات متعددی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به بررسی تغییرات رودخانه‌های پیچان‌رودی در مقیاس‌های زمانی مختلف پرداخته‌اند. باتوجه‌به واژگان کلیدی مورد بررسی از پایگاه استنادی اسکاپوس می‌توان اهداف مهم این مطالعات را به سه بخش تقسیم نمود. بخش اول از مطالعات با استفاده از تحلیل زمانی تصاویر ماهواره‌ای، حرکت کانال‌های رودخانه را در طول زمان ردیابی کرده و نواحی فرسایش و رسوب‌گذاری را شناسایی کرده‌اند (۱۸، ۱۹، ۲۰). در بخش دوم مطالعات، تغییرات در پارامترهای پیچان‌رودی مانند سینوسیته، طول‌موج و شعاع انحنا را بررسی کرده تا الگوهای دینامیک حرکتی رودخانه را بهتر درک کنند (۵ و ۲۱). در بخش سوم، پژوهش‌گرانی تأثیرات عوامل طبیعی (مانند سیلاب‌ها و منابع رسوب) و فعالیت‌های انسانی (مانند ساخت سد و تغییر کاربری زمین) را بر پویایی و حرکت پیچان‌رودها مورد بررسی قرار داده‌اند (۲۲ و ۲۳).



کیس و آندراسی (۲۰۱۵) گزارش کردند که در رودخانه دراوای مجارستان، پس از ساخت سدها، عرض رودخانه تا ۲۸ درصد کاهش یافته و در نتیجه این تغییرات، مناطقی از بستر رودخانه که قبلاً دارای ویژگی‌های سنگریزه‌ای بودند، به دشت‌های جنگلی تبدیل شدند (۲۶). آرنود و همکاران (۲۰۱۵) طول، ارتفاع بستر رودخانه راین و اندازه ذرات رسوبی در پایین‌دست سد انحرافی کِمبز^۱ را طی یک دوره ۸۰ ساله (۱۹۳۲ تا ۲۰۱۱) تحلیل کردند (۲۷). طول این بخش ۵۰ کیلومتر بود. آن‌ها تغییرات عرض کانال، فرسایش بستر، غلظت رسوبات و اندازه ذرات آن را تفکیک کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که ساخت سد باعث کاهش عرض کانال شده است، اما ارتفاع بستر در درازمدت تغییر نکرده است به این معنی که سد می‌تواند رودخانه را در درازمدت پایدار کند.

شد، به طرز قابل توجهی در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ افزایش یافت (۳۳). لئو و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای نشان دادند که از زمان احداث سد سه دره در کشور چین بر روی رودخانه یانگ تسه چین، بخش پایین‌دست رودخانه از نظر مورفولوژی و هیدرودینامیک رودخانه دچار تغییرات طولانی‌مدتی شده است که تأثیر عمیقی بر شرایط محیطی زندگی انسان و اکوسیستم آبی گذاشته است به نحوی که جریان در برخی نواحی کاهش یافته و رسوب‌گذاری در پایین‌دست این سد به شدت افزایش یافت و تغییرات عمده‌ای در شیب و عمق بستر رودخانه به وجود آورده است (۳۴). زاگمستر (۲۰۲۴) در تحقیقاتی که بر روی رودخانه‌های سنگریزه‌ای انجام دادند، دریافتند که پس از احداث سدها، کیفیت آب و تغییرات در زیستگاه‌های رودخانه به شدت تغییر کرده است. در نواحی پایین‌دست سدها، غنای گونه‌های جانوری به شدت کاهش یافته و در برخی از نواحی این کاهش به بیش از ۳۰ درصد رسید (۳۵). وانگ (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای در مورد سدهای متوالی در رودخانه ژینشا (Jinsha)، به میزان ۱۹/۶۲ متر در سال برای سد شیانگجیابا (Xiangjiaba) و ۹/۰۷ متر در سال برای سد سی‌لودو (Xiluodu) در شش ماه اول پس از ساخت، نرخ رسوب‌گذاری بالایی گزارش کرد. این نرخ‌ها پس از احداث سدها کاهش یافت و به ترتیب به ۰/۶۷ متر در سال و ۲/۵۱ متر در سال رسید (۳۶).

باتوجه به اهمیت فوق‌العاده زیستگاه رودخانه کرخه، در مطالعه حاضر تغییرات مکانی و زمانی رودخانه کرخه، قبل و پس از احداث سد کرخه، به‌عنوان بزرگ‌ترین سد خاکی کشور، با استفاده از تصاویر هوایی ماهواره‌ای لندست و سنتینل-۲، مورد پایش قرار گرفت. در مطالعه حاضر روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه کرخه به طول ۲۱۲ کیلومتر در

خم‌های رود، ضریب خمیدگی بالایی (منحنی شدن بیش‌تر) یافته‌اند (۲۹). نتایج مدل‌سازی عددی در مطالعه‌ای نشان می‌دهد که سد مخزنی کرخه نتوانسته جلوی جابه‌جایی محور مرکزی رودخانه را بگیرد به این معنی که پیش‌های طولی رودخانه هم‌چنان ادامه داشته و بستر رودخانه در حال جابه‌جایی است (۳۰). در مطالعه‌ای لیاقت و همکاران (۲۰۱۷) بیان داشتند که در شرایط طبیعی، عرض بستر رودخانه کرخه به طرف پایین‌دست، متناسب با کاهش شیب، افزایش می‌یابد. هم‌چنین در بازه پایین‌دست سد کرخه تا ایستگاه آب‌سنجی پای پل، متوسط عرض رودخانه قبل از احداث سد حدود ۲۷۳ متر بوده که بعد از آن تقریباً به ۶۰ متر رسیده است. در نتیجه باریک شدن کانال (حدود ۷۸ درصد کاهش عرض)، سالانه حدود ۳۴ متر جابه‌جایی جانبی بستر (مهاجرت ساحلی) در این بازه رخ می‌دهد. این ارقام بیانگر ناپایداری قابل توجه و فعالیت مستمر فرایندهای جانبی - طولی در رودخانه کرخه بوده است (۳۱). در مدل‌سازی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌های هیمالیا، سینال (۲۰۱۷) پیش‌بینی کرد که پس از ساخت سدها، تغییرات قابل توجهی در بستر رودخانه رخ می‌دهد. نتایج این مدل عددی Delft3D نشان داد که در یک دوره چهارساله، میزان رسوب در رودخانه‌های پایین‌دست سد به ۲۲ درصد کاهش یافت، در حالی‌که فرسایش بستر در نواحی بالادست نیز کاهش چشمگیری داشت (۳۲). در پروژه مرمت اکوسیستم‌های سیلابی رودخانه‌های ژاپن ناکامورا (۲۰۲۰) نشان دادند که پس از احداث سدها، با استفاده از سیلاب‌های مصنوعی، رشد موفقیت‌آمیز گونه‌های درختی مانند سالیکس^۱ مشاهده شد. این گونه درختی که جزو گونه‌های در معرض خطر بود، در اثر سیلاب‌های مصنوعی که سالانه در دوره تابستان انجام

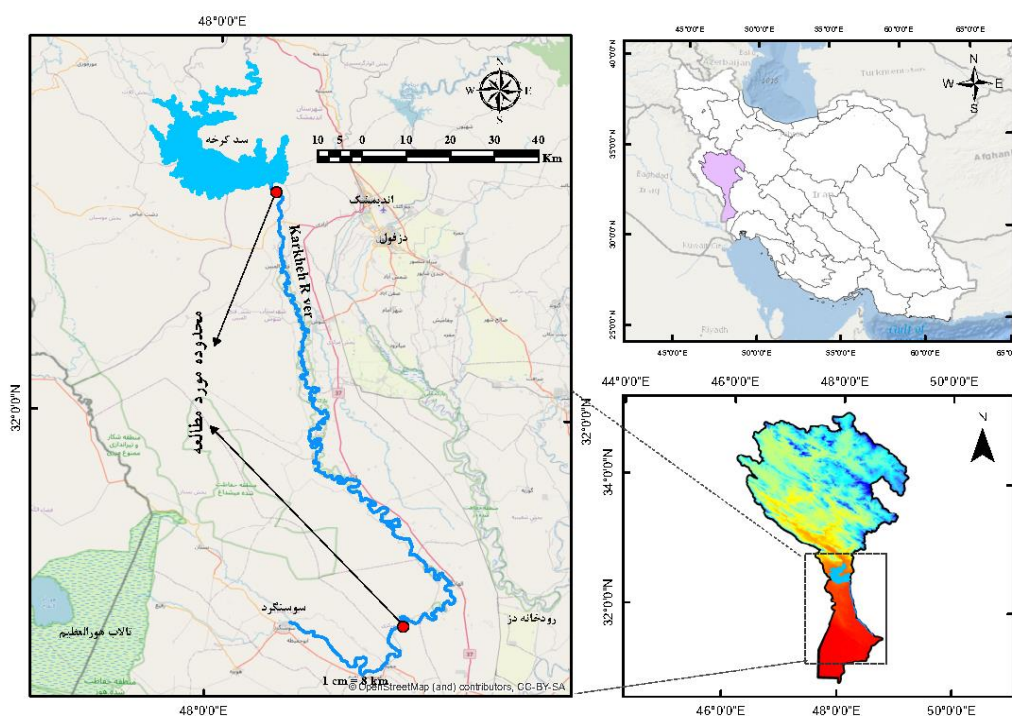
1- *Salix arbutifolia*

۶۶ درجه و دو دقیقه تا ۴۹ درجه و دو دقیقه طول شرقی قرار دارد. این حوضه از شمال به حوزه آبخیز رودخانه‌های سیروان، سفیدرود و قره‌چای، از غرب به حوضه‌های مرزی ایران و عراق و از جنوب به بخشی از مرز غربی کشور محدود می‌شود. در سمت شرق این حوضه، حوضه آبریز رودخانه دز قرار گرفته است. رودخانه کرخه پس از عبور از رشته‌کوه‌های زاگرس وارد خوزستان می‌شود. به دلیل کاهش شیب، مسیر رودخانه به حالت پیچ و خم یا متاندردی تغییر می‌کند و با کاهش سرعت جریان، سطح مقطع و عرض رودخانه افزایش می‌یابد. این رود از غرب شهرهای دزفول، شوش، سوسنگرد و بستان می‌گذرد و در پایین‌دست سد کرخه به سمت جنوب غربی و سپس به سمت غرب جریان پیدا کرده و به تالاب هورالعظیم می‌ریزد (۳۷).

بازه زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۴۰۳ بررسی شد و جهت تحلیل دقیق‌تر پاسخ رودخانه کرخه به کنترل جریان از شاخص‌های هیدرولوژیکی استفاده شده است. این اهداف با تمرکز روی افزایش تعداد قوس‌ها و شاخص‌های پیچان‌رودی به درک نحوه تأثیر احداث سد کرخه کمک خواهد کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: رودخانه کرخه که به عنوان منطقه مورد مطالعه پژوهش انتخاب شده است، به حوضه آبریز کرخه تعلق دارد. این حوضه مطابق شکل ۲ در حاشیه غرب و جنوب غربی کشور واقع شده و بخش‌هایی از استان‌های کردستان، کرمانشاه، همدان، ایلام، لرستان، مرکزی و خوزستان را در بر می‌گیرد. موقعیت جغرافیایی این حوضه بین ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۶ دقیقه عرض شمالی و

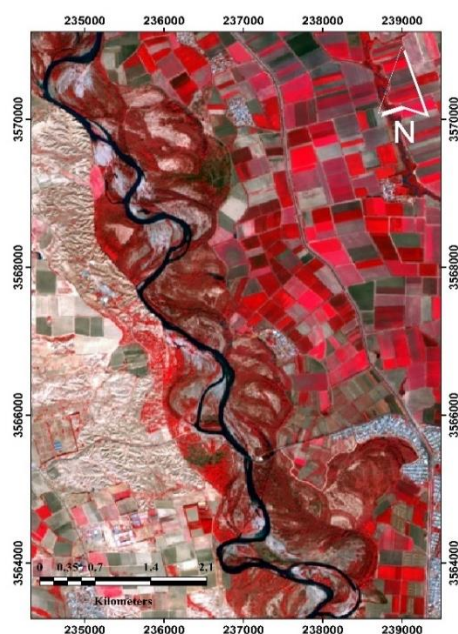


شکل ۲- موقعیت جغرافیایی آبخیز کرخه و محدوده مطالعاتی رودخانه در ایران.

Figure 2. Geographical location of the Karkheh watershed and the river study area in Iran.

رودخانه کرخه، از شاخص $NDWI^2$ به کار گرفته شد و برای تشخیص سطح آب از سایر عوارض استفاده می‌شود، زیرا آب نور سبز را بازتاب می‌کند و مولفه نزدیک به مادون قرمز (NIR) را جذب می‌نماید بنابراین با اختلاف بین بازتاب سبز و NIR و تقسیم آن بر مجموعشان، شاخص $NDWI$ تولید می‌شود که سطح آب رودخانه مقدار مثبت بالا و زمین یا پوشش گیاهی مقدار پایین یا منفی دارند. این ویژگی باعث می‌شود که سطح آب رودخانه همانند شکل ۳ به صورت واضح از سایر عوارض زمین جدا شود.

روش اصلی این پژوهش بر مقایسه زمانی و مکانی تغییرات بستر رودخانه کرخه قبل و بعد از ساخت سد متمرکز است. تصاویر Sentinel-2 (تفکیک مکانی ۱۰ متر) و Landsat-8/9 (تفکیک ۳۰ متر) در چهار بازه زمانی بین ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴ به نحوی انتخاب شدند که در ماه پایانی سال آبی و شامل پوشش ابری کمتر از ۱۰ درصد باشد. این تصاویر با وضوح بالا به صورت فایل‌های زمین مرجع شده^۱ با پسوند GeoTIFF ژئورفرنس شده ذخیره گردید. در مرحله دوم برای شناسایی دقیق سطح پهنه آب در



شکل ۳- نمایش شاخص $NDWI$ رودخانه کرخه.

Figure 3. Display of the $NDWI$ index of the Karkheh River.

برای بررسی دقیق‌تر مطابق شکل ۴، بازه مورد بررسی رودخانه کرخه به سه بخش طولی تقسیم‌بندی گردید. در مرحله بعد، با استفاده از نرم‌افزار اتوکد، مشخصات هندسی قوس‌ها مانند شعاع قوس، طول موج، زاویه مرکزی، طول دره و ضریب خمیدگی برای هر بازه زمانی استخراج گردید. سپس، این داده‌ها

در مرحله سوم، نقشه‌های به دست آمده در نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از طبقه‌بندی نیمه خودکار در تحلیل فایل‌های رستری که در آن مقادیر $NDWI$ بالای ۰/۳ به عنوان آب در نظر گرفته شدند نقشه‌ها به دو کلاس آب و غیرآب تقسیم شدند. سپس با ابزار Raster to Polygon مسیر رودخانه به شکل چندضلعی برداری درآمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار AutoCad می‌توان محور مرکزی رودخانه را استخراج نمود.

1- Georeference

2- Normalized Difference Water Index

با استفاده از نرم‌افزار آماری JMP مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در نهایت، با استفاده از پارامترهای استخراج‌شده، تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه در بازه‌های زمانی مورد نظر تحلیل شد و نتایج نهایی ارائه گردید.

شاخص‌های هیدرولوژیکی رودخانه: برای ارزیابی تأثیر سد مخزنی کرخه بر تغییرات دبی از شاخص‌های هیدرولوژیکی از شاخص‌های که نمایانگر کم آبی و پرابی هستند شامل صدک ۹۵ ام (Q_{95})، میانه (Q_{50}) و صدک پنجم (Q_5) استفاده گردید. تعداد ماه‌ها با دبی کم آبی به تعداد وقایعی که دبی رودخانه کم‌تر از صدک دهم (Q_{10}) باشد و تعداد ماه‌ها با دبی پرابی به تعداد وقایعی که دبی رودخانه بیش‌تر از صدک نودام (Q_{90}) باشد اطلاق می‌گردد. هم‌چنین شاخص‌های جریان پایه BFI و تغییر رژیم جریان IHA مطابق رابطه‌های ۱ و ۲ برای دو دوره پیش و پس از احداث سد محاسبه گردید (۳۸):

$$BFI = \frac{\bar{Q}}{Q_{\max}} \quad (1)$$

$$IHA = \frac{Q_{95}}{Q_5} \quad (2)$$

که در آن، $\bar{Q}$ میانگین دبی جریان و $Q_{\max}$ بیشینه دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه در دوره مورد بررسی است.

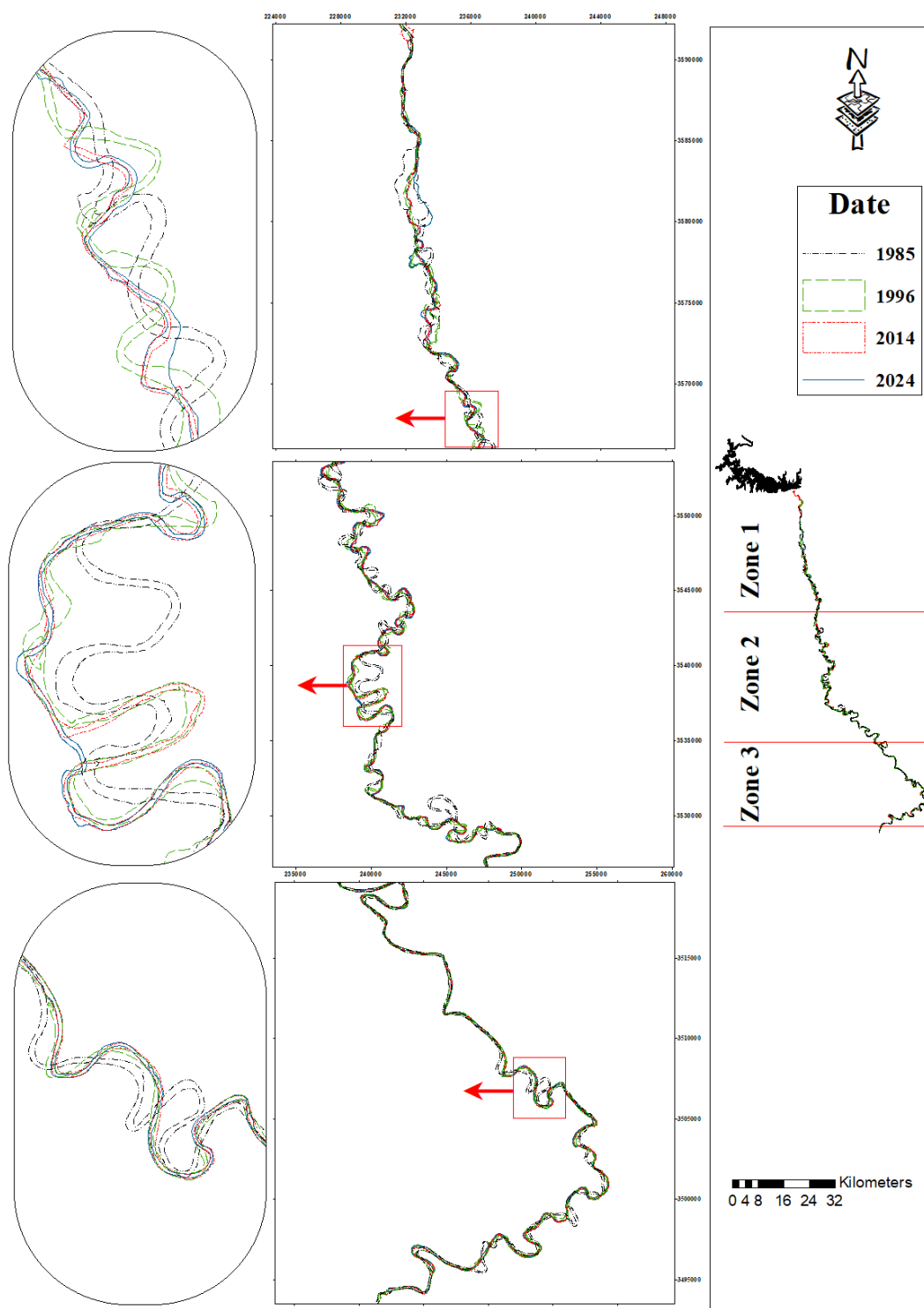
شاخص‌های هندسی تغییرات رودخانه: در مطالعات مربوط به توسعه رودخانه‌های پیچان‌رودی، برای بررسی الگوهای رفتاری و تغییرات زمانی آن‌ها و

تحلیل کمی این رودخانه‌ها، پارامترهای هندسی مختلفی مورد اندازه‌گیری و بررسی قرار می‌گیرند. از جمله این پارامترها می‌توان به زاویه مرکزی، شعاع پیچان‌رودی، طول‌موج، طول دره و ضریب خمیدگی اشاره کرد. این شاخص‌های هندسی ابزاری کلیدی برای مقایسه مسیر تاریخی رودخانه با وضعیت فعلی آن و ارزیابی تغییرات رخ داده فراهم می‌کنند. در ادامه، مهم‌ترین متغیرهای هندسی مورد استفاده در این پژوهش به طور مختصر تعریف می‌شوند:

زاویه مرکزی و شعاع پیچان‌رودی: یکی از شاخص‌های کلیدی در طبقه‌بندی و ارزیابی میزان توسعه‌یافتگی پیچان‌رودهای رودخانه‌ای، زاویه مرکزی است. پس از ترسیم دایره‌های مماس بر مسیر رودخانه در نرم‌افزار AutoCAD، از مرکز هر دایره، دو شعاع به نقاط عطف (انتهای قوس) و دره رودخانه ترسیم شد که بین این دو شعاع در مرکز دایره تشکیل می‌شود، مطابق رابطه ۳ زاویه مرکزی (A) نامیده می‌شود و فاصله مرکز دایره تا خط محوری رودخانه (شعاع دایره مماس‌شده) به‌عنوان شعاع پیچان‌رودی (R) در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۳).

$$A = \frac{180L}{R\pi} \quad (3)$$

برای بیان کمی توسعه و پیشرفت پیچان‌رودی شدن در رودخانه‌ای آبرفتی و تمایز آن‌ها از یکدیگر، با در نظر گرفتن زاویه مرکزی، تقسیم‌بندی مشخصی مطابق با جدول ۱ پیشنهاد شده است (۳۹).



شکل ۴- تغییرات مسیر و پیشروی پیچانرودی رودخانه کرخه در سه بخش مجزا برای چهار دوره زمانی مورد مطالعه.

Figure 4. Changes in the meandering progress of the Karkheh River in three separate Zones for four studied time periods.

جدول ۱- میزان توسعه‌یافتگی خم رودخانه بر اساس زاویه مرکزی (۳۹).

Table 1. The development extent of river meandering on the central angle (39).

زاویه مرکزی رودخانه Central angle of the river	شکل رودخانه River shape
0	مستقیم Straight
1-41	شبه پیچان‌رودی Slightly Meandering
41-85	پیچان‌رودی توسعه‌نیافته Poorly developed Meander
85-158	پیچان‌رودی توسعه‌یافته Developed Meander
158-296	پیچان‌رودی زیاد توسعه‌یافته Highly developed Meander
>296	U شکل یا نعل‌اسبی Oxbow Meander

می‌کند. این پارامتر نقش اساسی در طبقه‌بندی الگوی رودخانه‌ها ارزیابی میزان بلوغ ژئومورفولوژیکی، مطالعات مدیریت سیلاب و مهندسی رودخانه دارد. این شاخص نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول چم را نشان می‌دهد و بیانگر میزان تکامل چم است. طبق تعریف، ضریب خمیدگی بزرگ‌تر از ۱/۴ تا ۱/۵ نشان‌دهنده پیچشی بودن رودخانه و کم‌تر از این مقدار بیانگر مستقیم بودن آن است. برای محاسبه ضریب خمیدگی هر قوس، از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$S = \frac{2L}{\lambda} \quad (4)$$

که در آن، S ضریب خمیدگی، L طول مسیر و λ طول موج است.

براساس معیار ولفرت (۲۰۰۱) در مورد تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب میزان ضریب خمیدگی، چهار نوع رودخانه شامل مستقیم، سینوسی، پیچان‌رودی و پیچان‌رودی شدید معرفی شده است که این تقسیم‌بندی در جدول ۲ ذکر شده است (۴۰).

طول موج و طول دره: دو متغیر کلیدی در طبقه‌بندی رودخانه و تعیین ضریب خمیدگی آن، طول موج و طول دره است. معمولاً میان این دو پارامتر همبستگی بالایی وجود دارد. برای محاسبه طول موج، ابتدا بر روی نقشه محور مسیر رودخانه استخراج شده در نرم‌افزار Arcgis، نقاط عطف یا نقاط تغییر انحنای محور بادقت در نرم‌افزار AutoCad تعیین شد. سپس هر دو نقطه عطف مربوط به یک قوس به یکدیگر متصل شده و طول پاره‌خط به‌دست‌آمده (وتر مقابل به قوس محور رودخانه) با استفاده از نرم‌افزار اتوکد بادقت بالا اندازه‌گیری شد. این طول معادل نصف طول موج ($\lambda/2$) هر قوس رودخانه است که محاسبات را بر اساس همین پارامتر ادامه می‌دهیم. برای محاسبه طول دره (L) نیز فاصله بین نقطه عطف یک قوس تا نقطه عطف قوس بعدی در امتداد محور رودخانه مشخص شده و با استفاده از نرم‌افزار برای هر قوس اندازه‌گیری می‌شود (۳۹).

ضریب خمیدگی: ضریب خمیدگی (S) میزان انحراف مسیر رودخانه از خط مستقیم را کمی‌سازی

جدول ۲- تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب میزان ضریب خمیدگی معیار ولفرت (۳۹).

Table 2. Classification of rivers according to the curvature coefficient of the Wolfert criterion (39).

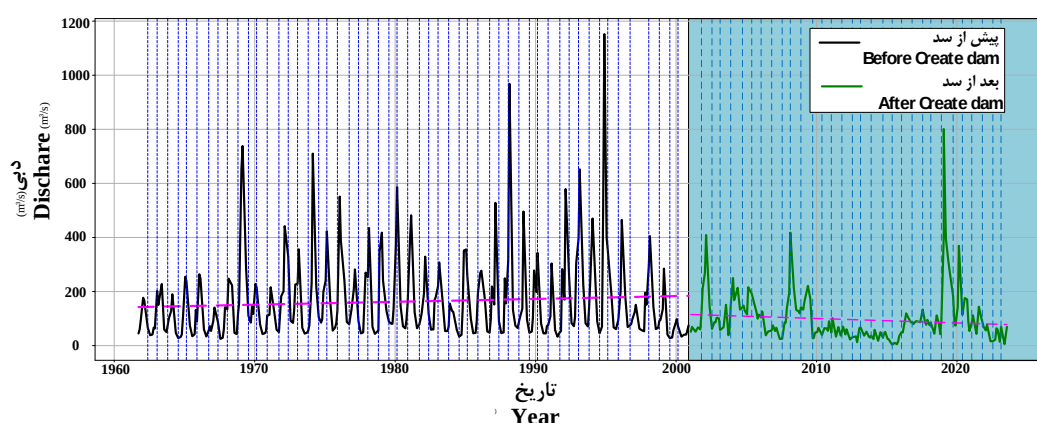
نوع رودخانه River type	ویژگی‌ها Characteristics	محدوده ضریب خمیدگی Range of curvature coefficient
مستقیم Straight	الگوی خطی با حداقل انحنا Nearly straight channel	1 - 1.05
سینوسی Sinuous	انحراف متوسط از مسیر مستقیم Average channel sinuosity	1.06 - 1.25
پیچان‌رودی Meandering	الگوی موجی مشخص Distinct wavy pattern	1.25 - 2
به‌شدت پیچان‌رودی Highly Meandering	پیچ‌وخم‌های توسعه‌یافته Well-developed meanders	>2

نتایج و بحث

ارزیابی شاخص‌های هیدرولوژیکی: به‌منظور بررسی تأثیرات ساخت و بهره‌برداری از سد کرخه در سال ۱۳۸۰، بر دبی رودخانه پایین‌دست آن، تحلیل سری زمانی دبی ماهانه رودخانه در ایستگاه هیدرومتری پایه پل از دهه ۱۳۶۴ تا سال ۱۴۰۳ انجام شد و سری زمانی به دو دوره قبل و بعد از سال ۲۰۰۱ تقسیم شد. نتایج تحلیل روند در این دو دوره، تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهد. در بازه پیش از ساخت سد، روند افزایشی با شیب مثبت ۱/۰۶ مشاهده شد که نشان می‌دهد جریان رودخانه در آن دوره تمایل به افزایش داشته است. در مقابل، پس از سال ۲۰۰۱ روندی نزولی با شیب ۱/۶۵- به ثبت رسید که نشان‌دهنده کاهش چشمگیر دبی در پایین‌دست سد پس از آغاز بهره‌برداری از آن است. این تغییر برای روند، همراه با کاهش کلی جریان، به‌وضوح در نمودار سری زمانی شکل ۵ قابل مشاهده است که در آن، دبی‌های بالا به‌ویژه پس از دهه ۲۰۰۱ به‌طرز محسوسی کاهش یافته‌اند.

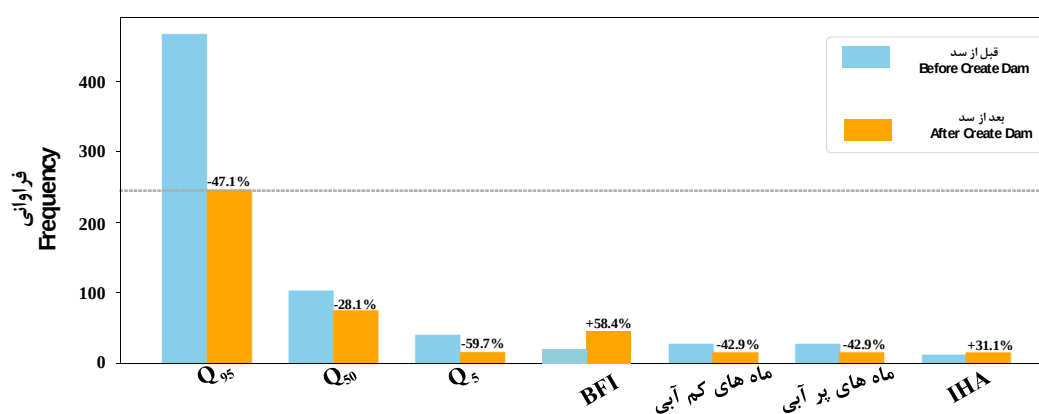
مطابق شکل ۶ تحلیل شاخص‌های هیدرولوژیکی جریان رودخانه پیش و پس از احداث سد کرخه نشان می‌دهد که این سازه تأثیر قابل‌توجهی بر رژیم طبیعی جریان داشته است. مهم‌ترین نشانه این تأثیر،

کاهش چشمگیر در مقادیر دبی‌های شاخص نظیر Q_{95} ، Q_{50} و Q_5 است. کاهش ۴۷/۱ درصدی در Q_{95} بیانگر افت شدید در جریان‌های پُرآب و کاهش وقوع رخداد‌های سیلابی است. هم‌چنین افت ۲۸/۱ درصدی در Q_{50} نشان‌دهنده کاهش میانگین کلی جریان رودخانه بوده، در حالی که کاهش ۵۹/۷ درصدی در Q_5 حاکی از کاهش شدید جریان‌های حداقلی است که می‌تواند مستقیماً اکوسیستم‌های پایین‌دست را با تهدید کم‌آبی مواجه سازد. نتایج مطالعه آذرننگ ۲۰۱۷ نیز نشان داد سد کرخه موجب کاهش ۴۴ درصدی دبی متوسط سالانه رودخانه در ایستگاه هیدرومتری پایه‌پل شده است (۴۱). از سوی دیگر، مقدار شاخص جریان پایه (BFI) پس از احداث سد به‌طور محسوسی افزایش‌یافته است. این افزایش که حدود ۵۸/۴ درصد برآورد شده، بیانگر آن است که نسبت جریان‌های پایدار و منظم (معمولاً ناشی از تخلیه تنظیم‌شده سد یا آب‌های زیرزمینی) به جریان کل افزایش‌یافته است. چنین تغییری در بسیاری از موارد به عنوان نشانه‌ای از یکنواخت‌تر شدن جریان‌ها تعبیر می‌شود که می‌تواند از شدت نوسانات طبیعی بکاهد، اما در عین‌حال، به دلیل حذف تنوع طبیعی جریان، بر چرخه‌های اکولوژیکی تأثیرگذار خواهد بود.



شکل ۵- هیدروگراف دبی ماهانه ایستگاه پایه پل در دوره زمانی مورد بررسی.

Figure 5. Discharge hydrograph of the paieh pol Station during the studied time period.



شکل ۶- فراوانی مقادیر شاخص‌های هیدرولوژیکی پیش و پس از احداث سد مخزنی کرخه.

Figure 6. Frequency of hydrological index values before and after the construction of Karkheh reservoir dam.

فاصله بین مقادیر حداقلی و حداکثری جریان بیش‌تر شده و در نتیجه الگوی طبیعی و متنوع جریان‌ها دچار تغییر بنیادین شده است.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که احداث سد کرخه منجر به افت قابل‌ملاحظه در دبی‌های مختلف، تنظیم و یکنواختی بیش‌تر در جریان، کاهش نوسانات زمانی جریان و تغییر رژیم طبیعی رودخانه شده است. اگرچه این تغییرات می‌توانند به کنترل سیلاب و مدیریت منابع آب کمک کنند، اما هم‌زمان خطراتی برای تعادل اکولوژیکی و پایداری مجرای طبیعی رودخانه پایین‌دست به همراه دارند.

هم‌چنین بررسی دوره‌های زمانی وقوع جریان‌های کم‌آبی و پر آبی نشان می‌دهد که مدت این دوره‌ها پس از احداث سد به میزان ۴۲/۹ درصد کاهش یافته‌اند. این کاهش گویای آن است که سد توانسته است جریان‌ها را از نظر زمانی، نیز به‌گونه‌ای تنظیم کند که از نوسانات شدید جلوگیری شود، اگرچه این مسئله با کاهش پویایی طبیعی رودخانه همراه بوده است. شاخص تغییر رژیم (IHA) که نسبت جریان‌های با دبی زیاد نسبت به دبی پایین را می‌سنجد، پس از احداث سد حدود ۳۱/۱ درصد افزایش یافته است. این افزایش نشان‌دهنده آن است که

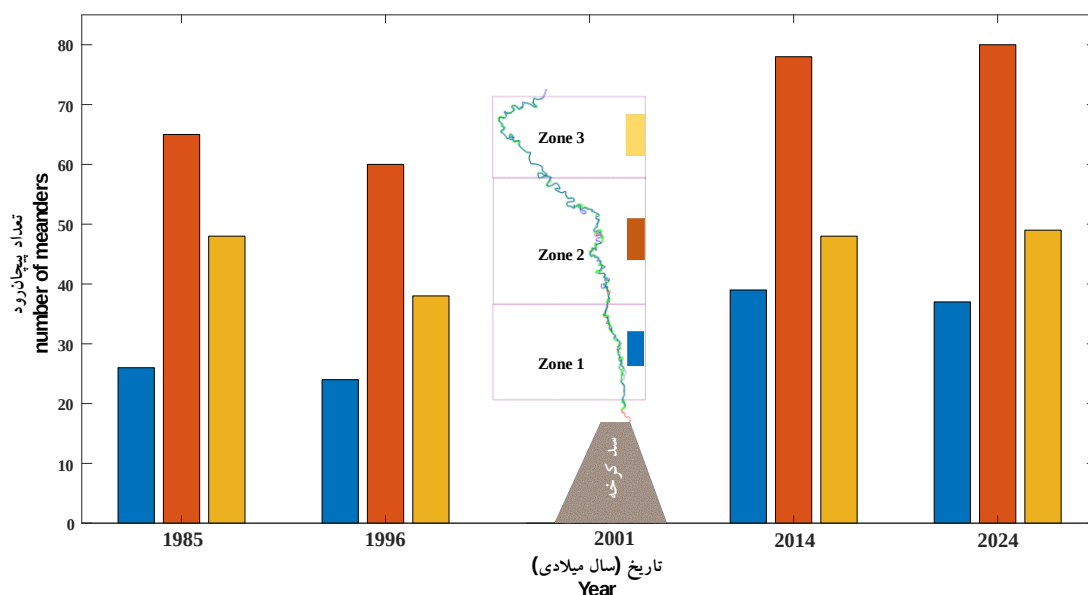
ارزیابی تعداد پیچان‌رودها: در شکل ۷ فراوانی تعداد پیچان‌رودهای کرخه در بازه مورد مطالعه (۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴) در سه بخش ذکر شده، نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در بازه پیش از ساخت سد (سال‌های ۱۹۸۵ و ۱۹۹۶)، تعداد پیچان‌رودها در هر سه بخش یا ثابت مانده یا اندکی کاهش یافته بود؛ به‌گونه‌ای که در بخش یک از حدود ۲۶ قوس در ۱۹۸۵ به ۲۴ قوس در ۱۹۹۶ رسید، در بخش دو از ۶۵ به ۶۰ و در بخش سه از ۴۸ به ۳۸ قوس کاهش مشاهده شد.

این روند با نمودار دبی منطبق است که پیش از سال ۲۰۰۱ میلادی دبی‌های بالای ۳۰۰-۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه را نشان می‌داد و انرژی برشی بالا قوس‌های پهن و درهم‌تنیده‌تری را پدید می‌آورد. پس از احداث سد در سال ۲۰۰۱ میلادی، با کاهش چشمگیر متوسط دبی به زیر ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه (و فقط پیک‌های محدود در مواقع سیلابی)، انرژی برشی جریان کاهش یافت و فرصت رسوب‌گذاری فراهم شد؛ نتیجه‌ی این پدیده در افزایش محسوس تعداد قوس‌ها یافت شد. به گونه‌ای که در بخش یک تعداد قوس‌ها در ۲۰۱۴ به ۳۹ و در ۲۰۲۴ به ۳۷ قوس (افزایش ۶۰٪ نسبت به دوره پیش از سد)، در بخش دو به ۷۸ و ۸۰ قوس (افزایش ۳۳٪) و در بخش سه به ۴۸ و ۴۹ قوس (افزایش ۲۹٪) رسید. این افزایش پس از احداث سد، نشان‌دهنده پویایی بستر و تقسیم هر قوس بزرگ به چند قوس ریزتر با انحناهای ملایم‌تر است. در مطالعه ادیب (۲۰۱۶) نیز بیان داشته شد که پس از احداث سد، تعداد پیچان‌رودها در بخش‌های پایین‌دست سد کاهش یافته است. به‌طور خاص، در سال ۲۰۰۲، ۲۶ قوس در بخش اول رودخانه ثبت شده بود که این عدد در سال ۲۰۱۴ به ۲۲ قوس کاهش یافت که حاکی از کاهش ۱۵٪ در تعداد پیچان‌رودها است (۳۷).

ارزیابی ضریب خمیدگی: مطابق شکل ۸ ضریب خمیدگی (نسبت طول مسیر خمیده به طول مستقیم قوس) رودخانه در سه بخش اصلی و در چهار دوره زمانی ۱۹۸۵، ۱۹۹۶، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ محاسبه شد تا تأثیر کاهش دبی پس از احداث سد در سال ۲۰۰۱ میلادی بر هندسه قوس‌ها مشخص گردد. در بخش یک میانگین ضریب خمیدگی در سال ۱۹۸۵ حدود ۲/۱۵ با انحراف معیار ۰/۲ بود که در ۱۹۹۶ به ۲/۲۵ و انحراف معیار ۰/۲۵ افزایش یافت و نشان‌دهنده تندتر شدن قوس‌ها پیش از احداث سد است؛ پس از کنترل جریان، در سال ۲۰۱۴ ضریب خمیدگی به ۲/۲۰ و انحراف معیار ۰/۳ کاهش پیدا کرد و در سال ۲۰۲۴ با همان میانگین ۲/۲۰ اما انحراف معیار ۰/۲۲ همگن‌تر باقی ماند. در بخش دوم، میانه رودخانه، ضریب خمیدگی از میانگین ۲/۳۰ در ۱۹۸۵ و انحراف معیار ۰/۲۵ به ۲/۳۵ در ۱۹۹۶ و انحراف معیار ۰/۳۵ افزایش یافت، اما پس از احداث سد در سال ۲۰۱۴ به ۲/۲۷ و انحراف معیار ۰/۲۸ و در سال ۲۰۲۴ به ۲/۲۵ و انحراف معیار ۰/۳۰ رسید. در پایین‌دست رودخانه یعنی بخش سه، نیز میانگین از ۲/۲۵ در سال ۱۹۸۵ و انحراف معیار ۰/۲۸ به ۲/۳۰ در سال ۱۹۹۶ و انحراف معیار ۰/۳۵ افزایش یافت، اما پس از احداث سد، مشاهده می‌گردد در سال ۲۰۱۴ به ۲/۲۲ و انحراف معیار ۰/۳۰ و همچنین در سال ۲۰۲۴ به مقدار ۲/۲۱ و انحراف معیار ۰/۳۵ افت کرد؛ این کاهش هرچند اندک اما مستمر، همراه با کاهش انحراف معیار در بخش‌های یک و دو، نشان می‌دهد که تنظیم دبی رودخانه انرژی برشی را کاهش داده و قوس‌ها را ملایم‌تر و یکنواخت‌تر کرده است، هرچند در بخش سه برخی از داده‌های پرت با ضریب خمیدگی بالاتر (تا ۴) هم‌چنان به عواملی نظیر رسوب‌گذاری و شیب بستر می‌تواند مرتبط باشد. نتایج مطالعه‌ای که توسط لیاقت (۲۰۱۷) نیز در مورد سد کرخه انجام دادند

ضریب خمیدگی رودخانه با کاهش ۱۳٪ مواجه بوده است (۴۲).

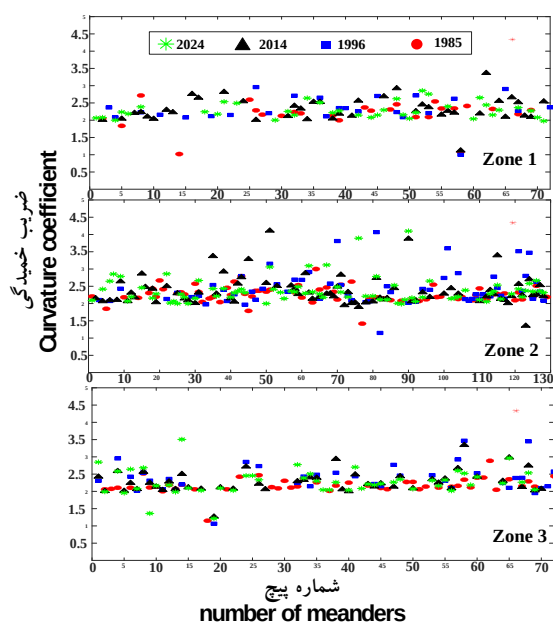
بیان گردید ضریب خمیدگی پس از احداث سد کرخه در برخی از قوس‌های رودخانه کاهش یافته است. به‌طور مثال، در سال ۲۰۰۲، نسبت به سال ۲۰۱۴،



شکل ۷- فراوانی تعداد پیچان‌رودهای کرخه در بازه زمانی مورد مطالعه (۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴) در سه بخش مورد بررسی.
Figure 7. Frequency of Karkheh meanders in the study period time (1985 to 2024) in the three studied Zones.

ضریب خمیدگی با «پیچان‌رودی شدید» مواجه گردید. می‌توان بیان داشت پس از کاهش میانگین دبی ماهانه پس از سال ۲۰۰۱، مشاهده می‌شود تداوم افزایش بخش پیچان‌رودی شدید رودخانه حاکی از «تشدید» پیچش رودخانه کرخه پس از احداث سد است. کاهش دبی و تغییر رژیم رسوب باعث باریک‌تر شدن بستر و کاهش انرژی کناری ساحلی شده، در نتیجه افزایش تعداد یا طول خم‌ها ادامه داشته است.

براساس طبقه‌بندی جدول ۲ فراوانی قوس‌های رودخانه کرخه در سه بخش طولی و در چهار دوره زمانی پیش از سد (۱۹۸۵ و ۱۹۹۶) و پس از سد (۲۰۱۴ و ۲۰۲۴) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۹ در بخش یک که بلافاصله در پایین‌دست سد قرار دارد، از میانگین ۲۴ قوس در طبقه‌بندی «پیچان‌رودی شدید» به مقدار میانگین ۳۷ قوس در این طبقه، معادل ۵۵ درصد افزایش یافت. این روند در بخش دوم (میان‌رود) و بخش سوم (پایین‌دست رودخانه) با افزایش ۲۵ درصدی در طبقه‌بندی

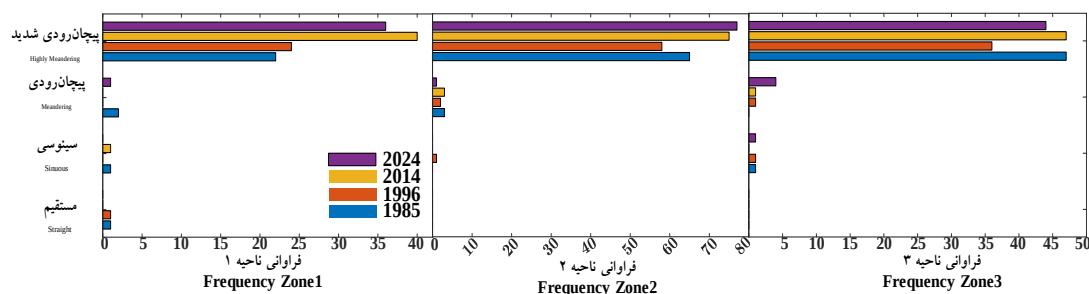


شکل ۸- تغییرات ضریب خمیدگی پیچانرود در سه بخش رودخانه و چهار مقطع زمانی.

Figure 8. Changes in the curvature coefficient of the river meander in three river sections and four time periods.

دامنه و تمرکز بیش‌تر مقادیر در زیر ۴۰ درجه است که می‌تواند نشانه‌ای از تثبیت ساختار رودخانه و کاهش پیچیدگی قوس‌ها در این بخش باشد. در بخش دوم و میانی رودخانه، بیش‌ترین نوسان و تحول زاویه‌ای را نشان می‌دهد؛ مطالعه‌ای که توسط هائو (۲۰۲۴) انجام شد، نیز تأثیرات ساخت سدها بر زاویه مرکزی قوس‌های رودخانه‌ها بررسی نمودند و نشان دادند میانگین زاویه مرکزی قوس‌ها قبل از ساخت سد ۱۲۰ درجه بود، در حالی که پس از احداث سد این میانگین به ۱۳۵ درجه افزایش یافت که حاکی از افزایش ۱۲/۵٪ در زاویه مرکزی قوس‌ها است (۴۳).

ارزیابی زاویه مرکزی: در تحلیل زاویه مرکزی قوس‌های رودخانه در سه بخش مورد مطالعه، مشاهده می‌شود که هر بخش روندی متمایز را دنبال می‌کند. مطابق شکل ۱۰ در بخش اول و ابتدای رودخانه، دامنه‌ی زاویه‌ها در سال ۱۹۸۵ از حدود ۳۵ تا ۲۳۰ درجه گسترده است و میانگین زاویه‌ها در حوالی ۸۰ تا ۱۲۰ درجه قرار دارد. سال ۱۹۹۶ با پراکندگی نسبتاً مشابه اما تمایل به مقادیر بالاتر (حداکثر حدود ۱۷۰ درجه) همراه بوده و در سال ۲۰۱۴ مقادیر به طور متوسط ۱۵-۱۰ درجه نسبت به دوره قبل، افزایش یافته است. نکته جالب توجه در سال ۲۰۲۴ کاهش چشمگیر



شکل ۹- طبقه‌بندی رودخانه بر مبنای شاخص ضریب خمیدگی در سه بخش رودخانه و چهار دوره زمانی.

Figure 9. River classification based on the curvature coefficient index in three river Zones and four time periods.

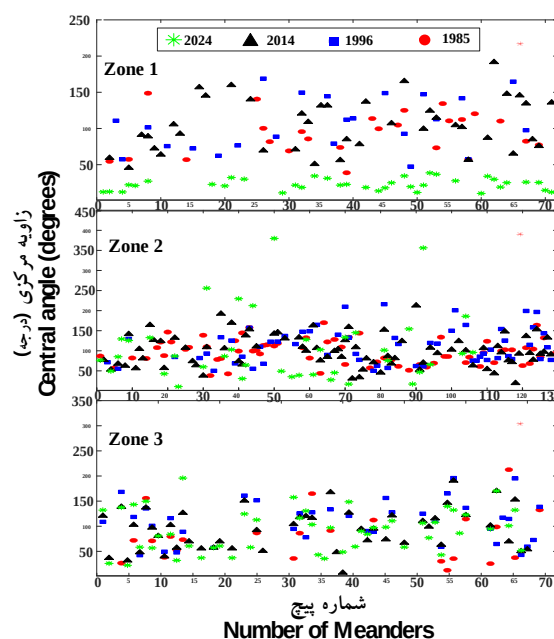
کاهش انرژی جریان هم‌زمان است و حاکی از تثبیت قوس‌ها پس از تنظیم مصنوعی دبی رودخانه است. در این مطالعه شش دسته مورفولوژیکی قوس‌های رودخانه بر مبنای زاویه مرکزی مطابق جدول ۱ در سه بخش بالادست (بخش ۱)، میان‌رود (بخش ۲) و پایین‌دست (بخش ۳) و در چهار دوره پیش از سد (۱۹۸۵ و ۱۹۹۶) و پس از سد (۲۰۱۴ و ۲۰۲۴) شمارش و مقایسه شدند تا تأثیر کاهش دبی پس از احداث سد در سال ۲۰۰۱ میلادی بر مورفولوژی قوس‌ها آشکار گردد.

مطابق شکل ۱۱، در بخش یک پیش از احداث سد تقریباً همه قوس‌ها یا در دسته پیچان‌رودی توسعه‌نیافته (۱۰ قوس از ۲۶ در ۱۹۸۵، ۸ از ۲۴ در ۱۹۹۶؛ حدود ۳۵-۴۰ درصد) یا در دسته پیچان‌رودی توسعه‌نیافته (۱۴ قوس از ۲۶، ۵۴ درصد در ۱۹۸۵ و ۱۴ از ۲۴، ۵۸ درصد در ۱۹۹۶) قرار داشتند و تنها ۸ درصد قوس بسیار توسعه‌یافته وجود داشت. این توزیع با نمودار هیدروگراف دبی منطبق است که پیش از ساخت سد جریان‌های دبی سلابی را نشان می‌دهد و انرژی بالا آن، قوس‌های پهن و تند را موجب شده است. اما در ۲۰۱۴ پس از احداث سد، پیچان‌رودی توسعه‌نیافته و توسعه‌یافته هنوز غالب‌اند (۱۲ و ۲۵ قوس؛ معادل ۳۳ و ۶۸ درصد از کل ۳۷ قوس مورد بررسی) و تعداد قوس‌های بسیار توسعه‌یافته اندکی به سه (۸ درصد) افزایش یافته بود، اما در ۲۰۲۴ یک جهش ناگهانی رخ داد و تمامی ۳۷ قوس زیرمجموعه شبه‌پیچان‌رودی گردیدند، به گونه‌ای که هیچ قوسی در دسته‌های توسعه‌نیافته، توسعه‌یافته یا بسیار توسعه‌یافته قرار نداشت.

در سال ۱۹۸۵ و ۱۹۹۶ دامنه‌ای بین ۳۰ تا ۱۵۰ درجه نسبتاً یکنواخت‌تر است، اما سال ۲۰۱۴ نمونه‌هایی تا حدود ۲۱۵ درجه و سال ۲۰۲۴ اوج‌های بسیار بالا (تا ۳۸۰-۴۰۰ درجه) را ثبت کرده است؛ بنابراین، بخش میانی رودخانه نسبت به دیگر بخش‌ها بیش‌ترین تنوع زاویه را داراست. در بخش سوم و انتهای رودخانه، نیز سال ۱۹۸۵ دامنه‌ای حدود ۲۰ تا ۲۱۵ درجه را نشان می‌دهد، سال ۱۹۹۶ و ۲۰۱۴ با دامنه‌های ۳۰-۱۹۵ و ۱۰-۳۲۰ درجه به چشم می‌خورد. اما در سال ۲۰۲۴، همانند بخش یک، پراکندگی اندکی کاهش یافته و زاویه‌ها بیش‌تر در بازه ۲۰-۱۹۵ درجه متمرکز شده‌اند.

مقایسه کلی سال‌ها نشان می‌دهد که سال ۲۰۱۴ در هر سه بخش میانگین زاویه‌ها را بالاتر از دو دوره ابتدایی (۱۹۸۵ و ۱۹۹۶) ثبت کرده است؛ روندی که می‌تواند ناشی از افزایش پیچیدگی مورفولوژیک رودخانه باشد. از سوی دیگر، سال ۲۰۲۴ خصوصاً در بخش‌های یک و سه با کاهش میانگین زاویه و محدود شدن دامنه‌ها همراه بوده است.

در بررسی تجمعی چهار دوره نمونه‌برداری (۱۹۸۵ و ۱۹۹۶ پیش از احداث سد و ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ پس از آن)، مشاهده می‌شود که پیش از احداث سد بخش‌های مورد مطالعه روندی افزایشی در میانگین زاویه مرکزی قوس‌ها داشتند که نشان از پویایی بیش‌تر جریان و توان برشی بالاتر برای شکل‌دهی قوس‌های تند داشت. اما پس از کاهش دبی ناشی از سد بالادست، در بازه‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ کاهش قابل‌توجهی در میانگین زاویه‌ها رخ داده است. این افت تدریجی زاویه‌ها با کاهش عرض رودخانه و



شکل ۱۰- تغییرات مقدار زاویه مرکزی پیچانرود کرخه در سه بازه رودخانه و چهار مقطع زمانی.

Figure 10. Changes in the central meander angle of the Karkheh River in three river intervals and four time periods.

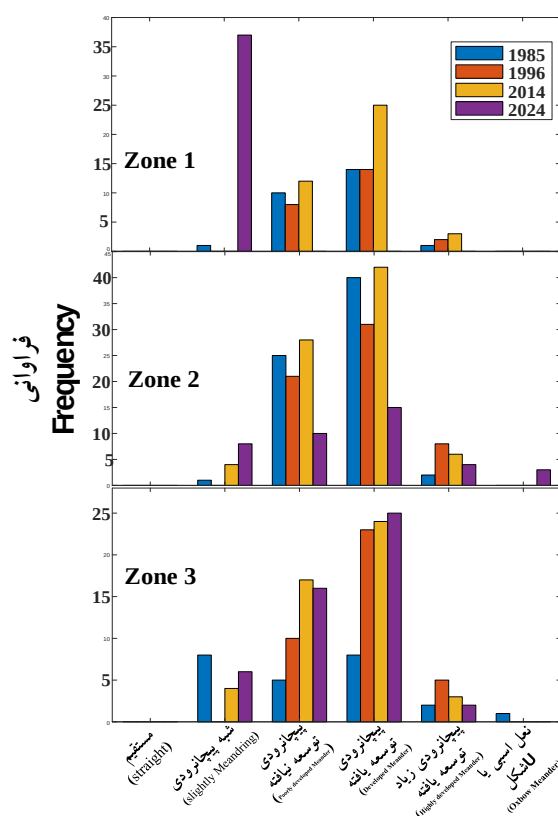
۴۳ در ۱۹۹۶؛ ۵۳ درصد) و پیچانرودی توسعه‌نیافته و شبه‌پیچانرودی به ترتیب حدود ۲۲-۳۵ درصد از کل قوس‌ها را تشکیل می‌دادند. پس از سد در ۲۰۱۴ نسبت پیچانرودی توسعه‌یافته به ۲۴ قوس (۴۶ درصد) و توسعه‌نیافته به ۱۸ قوس (۳۵ درصد) افزایش یافت، اما در ۲۰۲۴ این نسبت به ۲۵ و ۱۶ قوس (۵۲ درصد و ۳۳ درصد) باقی ماند؛ هم‌زمان سهم شبه‌پیچانرودی تنها ۶ قوس (۱۳ درصد) و سهم قوس‌های بسیار توسعه‌یافته و U شکل به حداقل کاهش یافت. این الگوی پایدارتر شدن قوس‌ها در پایین‌دست را می‌توان ناشی از انباشت مداوم رسوب دانست که علی‌رغم کاهش کلی دبی، قوس‌های توسعه‌یافته را حفظ کرده است. در مجموع، ساخت سد بالادست در سال ۲۰۰۱ میلادی با محدود کردن دبی ورودی به رودخانه، انرژی فرسایشی رودخانه را کاهش داد و موجب تبدیل قوس‌های تند و پیچیده به اشکال ملایم‌تر و کوتاه‌تر (شبه‌پیچانرودی) شد؛ این اثر در بالادست (بخش ۱) آشکارترین و در پایین‌دست

این جابه‌جایی کامل به سمت اشکال ملایم‌تر منعکس‌کننده کاهش شدید دبی و تثبیت بستر است. در قسمت میانی رودخانه یعنی بخش دوم که پیش از سد ترکیبی از پیچانرودی توسعه‌نیافته (حدود ۳۸ درصد؛ ۲۵ قوس در ۱۹۸۵ و ۲۱ در ۱۹۹۶) و توسعه‌یافته (۶۲ درصد؛ ۴۰ و ۳۱ قوس) داشت، پس از سد در ۲۰۱۴ مجدداً همین الگو را حفظ کرد (۲۸ و ۴۲ قوس؛ ۴۰ و ۶۰ درصد) ولی در ۲۰۲۴ با کاهش نسبت قوس‌های توسعه‌یافته به ۱۵ قوس (۳۷ درصد) و کاهش قوس‌های توسعه‌نیافته به ۱۰ قوس (۲۶ درصد)، افزایش چشمگیر قوس‌های شبه‌پیچانرودی به ۸ قوس (۱۹ درصد) و ظهور سه قوس U شکل (۷ درصد) همراه شد. این تغییرات ناشی از افت قدرت فرسایش جانبی و افزایش رسوب‌گذاری طولی است که کارکرد سد در میانه مسیر را نشان می‌دهد. در بخش سه نیز پیچانرودی توسعه‌یافته پیش از سد سهم قابل‌توجهی داشت (۸ قوس از ۲۳ در ۱۹۸۵؛ ۳۵ درصد و ۲۳ قوس از

است (بخش اول: از حدود ۴/۲ به ۶/۳؛ بخش دوم: از ۵/۴ به ۸/۵؛ بخش سوم: از ۳/۸ به ۵/۹)، به گونه‌ای که بخش دو همواره بزرگ‌ترین و بخش سه کوچک‌ترین مقادیر R/W را نشان داده و پراکندگی این نسبت، در بخش دوم (انحراف معیار ۱/۲) بیش‌تر از بخش‌های ابتدای و انتهای رودخانه (۰/۵ و ۰/۸) بوده است؛ این روند افزایشی بیانگر این است که مقادیر میانگین R/W در دوره‌های پیش از سد به مرور افزایش یافت که ناشی از گسترش شعاع قوس‌ها تحت نیروی برشی جریان طبیعی نظیر سیلاب‌ها بود.

(بخش ۳) کم‌ترین شدت را داشت. تغییر توزیع فراوانی قوس‌ها از مدل غالب توسعه‌یافته به توسعه‌نیافته و نهایتاً شبه‌پیچانرودی (با ظهور مقادیر جزئی U-شکل در بخش ۲) نشان‌دهنده تثبیت مورفولوژیک بستر پس از مدیریت مصنوعی جریان است.

ارزیابی نسبت شعاع به عرض رودخانه: در بررسی نسبت شعاع منحنی به عرض بستر (R/W) در سه بخش مورد مطالعه مطابق شکل ۱۲ مشاهده شد که در هر چهار دوره نمونه‌برداری (۱۹۸۵، ۱۹۹۶، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴) میانگین این نسبت به طور پیوسته افزایش یافته



شکل ۱۱- طبقه‌بندی رودخانه بر مبنای شاخص زاویه مرکزی در سه بخش رودخانه و چهار دوره زمانی.

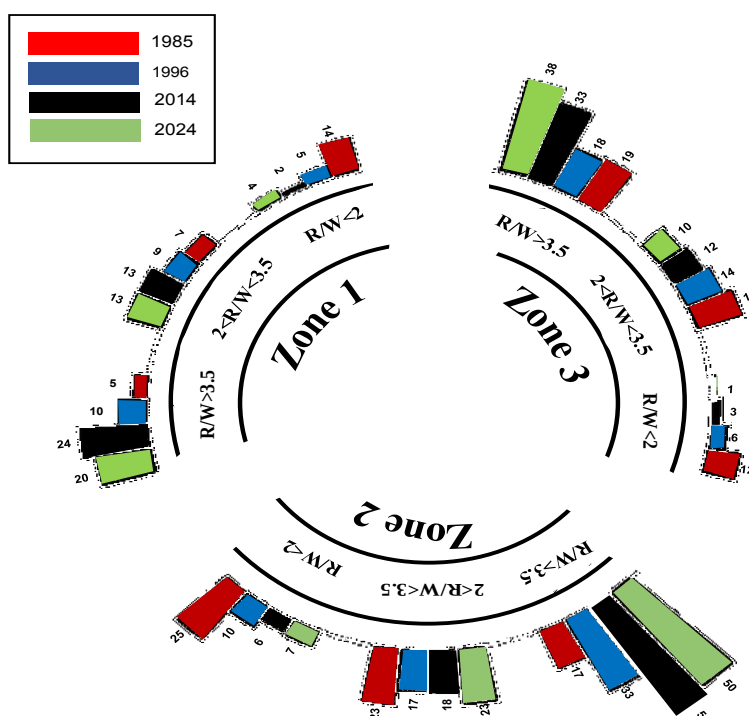
Figure 11. River classification based on central angle index in three river Zones and four time periods.

بخش‌های پیشین، نشان می‌دهد عرض بستر به دلیل کاهش حجم جریان نسبت به شعاع انحنا قوس‌ها بیش‌تر کاهش یافته است. به عبارتی دیگر پس از احداث سد شعاع انحنا پیچان رودها با افزایش و

می‌توان بیان داشت با کاهش زاویه مرکزی در سال‌های پس از احداث سد کرخه شعاع انحنا رودخانه افزایش یافته است بنابراین افزایش قابل توجه R/W پس از احداث سد باتوجه به یافته‌های

به دلیل تثبیت میزان دبی رودخانه رخ داده است که این موضوع به طور عمده ناشی از ساخت سد مخزنی و تنظیم جریان رودخانه کرخه بوده است. این تحقیق نیز به خوبی نتایج پژوهش حاضر در زمینه تأثیرات سد مخزنی بر میزان جریان و پارامترهای هیدرولیکی رودخانه کرخه را تأیید می‌کند (۴۴).

عرض بستر رودخانه با کاهش روبه رو بوده است. سلحشور و وفائی نژاد در پایش تغییرات سیلاب‌دشت‌های رودخانه کرخه به واسطه احداث سد مخزنی کرخه با استفاده از سنجش از دور و GIS در دوره‌های قبل و بعد از بهره‌برداری از سد (سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۸ میلادی) نشان داد که کاهش مساحت رودخانه کرخه در پایین‌دست سد



شکل ۱۲- فراوانی شاخص R/W در سه بخش از رودخانه کرخه در چهار دوره زمانی مختلف.

Figure 12. Frequency of R/W index in three parts of Karkheh River in four different time periods.

درصد و ۵۹/۷ درصد کاهش یافته‌اند که کاهش جریان‌های سیلابی، میانگین و حداقلی را نشان می‌دهد. این روند، به‌ویژه در کاهش جریان‌های حداقلی، می‌تواند اثرات منفی مستقیمی بر زیست‌بوم‌های آبی پایین‌دست داشته باشد. از سوی دیگر، افزایش ۵۸/۴ درصد در شاخص BFI و ۳۱/۱ درصد در IHA نشان‌دهنده افزایش کنترل و یکنواختی جریان، همراه با از بین رفتن تنوع طبیعی جریان‌هاست. از دیدگاه مورفولوژیکی، کاهش دبی و انرژی جریان باعث تقویت فرآیند

نتیجه‌گیری کلی

تغییرات ریخت‌شناسی و مؤاندرهای رودخانه‌ها یکی از ویژگی‌های مهم در مطالعات هیدرولوژی، زمین‌شناسی و مدیریت منابع آب به شمار می‌روند. نتایج این مطالعه بیانگر تغییرات قابل‌توجه در رفتار هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی رودخانه کرخه در پی ساخت و بهره‌برداری از سد مخزنی کرخه است. از منظر هیدرولوژیکی، مقادیر شاخص‌های دبی مانند Q5، Q50، Q95 به ترتیب ۴۷/۱ درصد، ۲۸/۱

آن‌جا که رودخانه به سمت ساحل راست رودخانه مهاجرت می‌کند، سرزمین‌های ساحلی غربی رودخانه مستعد تغییر خواهد بود.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دسترسی به داده‌ها، آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات و مدل‌سازی، تهیه پیش‌نویس مقاله. نویسنده دوم: نظارت تحقیق، مشارکت در آنالیزها، طرح تحقیق و روش‌شناسی، بازبینی مقاله، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

نویسندگان از حمایت‌های مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب گرنت نویسنده دوم کمال تشکر را دارند (SCU.WH1404.43525).

رسوب‌گذاری و کاهش فرسایش کناری شده است که نتیجه آن افزایش محسوس در تعداد قوس‌های رودخانه است. به‌طور نمونه، در بازه زمانی ۲۰۲۴ نسبت به ۱۹۸۵، تعداد قوس‌ها در بخش اول ۶۰ درصد، در بخش دوم ۳۳ درصد و در بخش سوم ۲۹ درصد افزایش یافته است. همچنین میانگین ضریب خمیدگی در اکثر بخش‌ها پس از سال ۲۰۰۱ اندکی کاهش یافته یا تثبیت شده، ولی تعداد قوس‌های دارای ضریب خمیدگی بیش از دو (پیچان‌رودی شدید) افزایش یافته‌اند. در مجموع، داده‌ها حاکی از تثبیت ساختار پیچان‌رودی با پیچ‌وخم‌های ملایم‌تر اما پرتعدادتر است که نشانه‌ای از پاسخ رودخانه کرخه به شرایط جدید هیدرولوژیکی است. این تحقیق بیان می‌کند که احداث سدهای بزرگ می‌تواند خصوصیات مورفولوژیکی را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهد. در سایر مطالعات دیگر رودخانه‌های استان خوزستان نیز شرایط یکسانی در ریخت‌شناسی رودخانه، قبل و بعد از احداث سد مشاهده شده است. در این مقاله با بررسی روند طولانی‌مدت تغییرات رودخانه کرخه نشان داده شد که احداث سد آن را به یک سامانه پیچان‌رودی توسعه‌یافته تبدیل کرده است. باتوجه‌به کاهش میزان دبی جریان، عرض رودخانه کاهش یافته است. اگر روند فعلی ادامه یابد، مناطق زراعی و مناطق شهری در قسمت‌های شکننده رودخانه در معرض خطر بالایی خواهند بود. علاوه بر این، از

منابع

1. Abbass, Z. D., Maatooq, J. S., & Al-Mukhtar, M. M. (2023). Monitoring and Modelling Morphological Changes in Rivers Using RS and GIS Techniques. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 9(3), 531-543. Scopus. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-03>.
2. Akay, S. S., Özcan, O., Sanli, F. B., Görüm, T., Sen, Ö. L., & Bayram, B. (2020). UAV-based evaluation of morphological changes induced by extreme rainfall events in meandering rivers. *PLoS ONE*, 15(11 November). Scopus. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241293>.
3. Chatterjee, S., Chakraborty, K., & Mura, S. N. S. (2022). Investigating the present status, spatial change, and emerging

- issues related to riparian wetlands of Bhagirathi-Jalangi Floodplain (BJF) in lower deltaic West Bengal, India. *Environment, Development and Sustainability*, 24(5), 7388-7434. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01710-8>.
4. Sonowal, G., Thakuria, G., & Hazarika, S. (2022). Role of Channel Migration and Influencing Hydro-Geomorphologic Attributes in Dibru River Basin Using Remote Sensing and GIS. *Nature Environment and Pollution Technology*, 21(5), 2035-2054. Scopus. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2022.v21i05.003>.
5. Ramani, R. S., Patel, P. L., & Timbadiya, P. V. (2021). Key morphological changes and their linkages with stream power and land-use changes in the Upper Tapi River basin, India. *International Journal of Sediment Research*, 36(5), 602-615. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.03.003>.
6. Tiwari, H., Rai, S. P., & Shivangi, K. (2016). Bridging the gap or broadening the problem? *Natural Hazards*, 84(1), 351-366. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2422-x>.
7. Lewis, Q. W., Edmonds, D. A., & Yanites, B. J. (2020). Integrated UAS and LiDAR reveals the importance of land cover and flood magnitude on the formation of incipient chute holes and chute cutoff development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(6), 1441-1455. Scopus. <https://doi.org/10.1002/esp.4816>.
8. Maddheshiya, S. K., Jha, M., Tignath, S., & Singh, N. (2023). Hydrogeomorphic and Spatio-Temporal Analysis of Riverine Wetlands in the Interfluvial Zone of Ganga and Sai Rivers, Uttar Pradesh, India. *Wetlands*, 43(1). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13157-022-01654-3>.
9. Knighton, A. D. (1999). Downstream variation in stream power. *Geomorphology*, 29(3-4), 293-306. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00015-X).
10. Minghui, Y. U., Hongyan, W., Liang, Y., & Chunyan, H. U. (2010). Study on the stability of non-cohesive river bank. *International Journal of Sediment Research*, 25(4), 391-398.
11. Kondolf, G. M. (1997). Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551. <https://doi.org/10.1007/s002679900048>.
12. Petts, G., & Gurnell, A. M. (2005). Dams and geomorphology: Research progress and future directions. *Geomorphology*, 71(1-2), 27-47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.02.015>.
13. Williams, G. P., & Wolman, M. G. (1984). *Downstream effects of dams on alluvial rivers* (No. 1286). U.S. Geological Survey.
14. 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>.
15. Grant, G. E., Schmidt, J. C., & Lewis, S. L. (2003). A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. In *A peculiar river* (Vol. 7, pp. 209-225). American Geophysical Union.
16. Biedenharn, D. S., Thorne, C. R., & Watson, C. C. (2013). The effects of sluicing on a sand-bed river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), 523-537.
17. Scherler, D., Bookhagen, B., & Strecker, M. R. (2015). Quantifying the dynamics of river migration and sediment transport using remote sensing. *Earth Surface Dynamics*, 3(3), 549-566. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-549-2015>.
18. Bag, R., Mondal, I., & Bandyopadhyay, J. (2019). Assessing the oscillation of channel geometry and meander migration cardinality of Bhagirathi River, West Bengal, India. *Journal of Geographical Sciences*, 29(4), 613-634. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1618-z>.

19. Clavijo-Rivera, A., Sanclemente, E., Altamirano-Moran, D., & Muñoz-Ramirez, M. (2023). Temporal analysis of the planform morphology of the Quevedo River, Ecuador, using remote sensing. *Journal of South American Earth Sciences*, 128. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104467>.
20. Morais, E. S., Rocha, P. C., & Hooke, J. (2016). Spatiotemporal variations in channel changes caused by cumulative factors in a meandering river: The lower Peixe River, Brazil. *Geomorphology*, 273, 348-360. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.026>.
21. Rathore, V. K. S., Verma, P. K., Singh, A. K., Patel, A., Singh, M. M., Bhatt, S. C., & Singh, S. K. (2023). Channel Dynamics of a Middle Reach of Rapti River, Eastern Indo-Gangetic Plain, India. *Journal of the Geological Society of India*, 99(7), 995-1005. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12594-023-2420-z>.
22. Peña-Monné, J. L., & Sampietro-Vattuone, M. M. (2021). Geomorphological dynamics and human interactions in a semiarid valley in Northwestern Argentina: The Cafayate depression (Salta Province). *Journal of South American Earth Sciences*, 107. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103028>.
23. Talukdar, G., Bhattacharjya, R. K., & Sarma, A. K. (2023). Understanding the effect of long term and short term hydrological components on landscape ecosystem. *Ecological Informatics*, 77. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102267>.
24. Ahmad, M. D., & Giordano, M. (2010). The Karkheh River basin: The food basket of Iran under pressure. *Water International*, 35(5), 522-544. <https://doi.org/10.1080/02508060.2010.510326>.
25. Sharifi, A., Kalin, L., & Tajrishy, M. (2013). System Dynamics Approach for Hydropower Generation Assessment in Developing Watersheds: Case Study of Karkheh River Basin, Iran. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 1007-1017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000711](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000711).
26. Kiss, T., & Andrási, G. (2015). Characteristics of meander development under human impact—A case study on two bends of the Dráva River. *Journal of Landscape Ecology*, 13(1), 73-88. Scopus.
27. Arnaud, F., Piégay, H., Schmitt, L., Rollet, A. J., Ferrier, V., & Béal, D. (2015). Historical geomorphic analysis (1932–2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology*, 236, 163-177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.009>.
28. Razavizadeh, S., Lotfinasab Asl, S., Dargahian, F., & Saeedifar, Z. (2021). The Impact of Karkheh Dam and Meteorological Parameters on the Annual and Peak Regime and Flood Plains of Karkheh River. *Journal of Watershed Management Research*, 12(24), 236-248. <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.24.236>.
29. Adib, A., Foadfar, H., & Roozy, A. (2016). Role of construction of large dams on river morphology (case study: The Karkheh dam in Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 9(15). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2693-2>.
30. Azarang, F., Telvari, A., Sedghi, H., & Shafai Bajestan, M. (2016). Evaluating of Erosion and Sedimentation of Karkheh River at Downstream of Reservoir Dam. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 10(34), 15-26.
31. Liyaghat Ali, Adib Arash, & Ghafouri Hamid Reza. (2017). Downstream Reaches Using the CCHE2D Software (Case Study the Karkheh Dam). 10(34), 61-71.
32. Sanyal, J. (2017). Predicting possible effects of dams on downstream river bed

- changes of a Himalayan river with morphodynamic modelling. *Quaternary International*, 453, 48-62. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.063>.
33. Nakamura, F., Watanabe, Y., Negishi, J., Akasaka, T., Yabuhara, Y., Terui, A., Yamanaka, S., & Konno, M. (2020). Restoration of the shifting mosaic of floodplain forests under a flow regime altered by a dam. *Ecological Engineering*, 157. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105974>.
 34. Liu, T. H., Wang, Y. K., Wang, X. K., Duan, H. F., & Yan, X. F. (2020). Morphological environment survey and hydrodynamic modeling of a large bifurcation-confluence complex in Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 737. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139705>.
 35. Zagmajster, M., Mori, N., Bračko, G., Brancelj, A., Borko, Š. D. B., Delić, T., Fišer, Ž., Koselj, K., Prevorčnik, S., Zakšek, V., & Fišer, C. (2024). Investigation of the hyporheic zone of two gravel-bed rivers after reservoir draining. *Fundamental and Applied Limnology*, 197(3), 235-253. Scopus. <https://doi.org/10.1127/fal/2024/1504>.
 36. Wang, S. (2025). Variations in Sedimentation Rate and Corresponding Adjustments of Longitudinal Gradient in the Cascade Reservoirs of the Lower Jinsha River. *Water (Switzerland)*, 17(2). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w17020262>.
 37. Adib, A., Foadfar, H., & Roozy, A. (2016). Role of construction of large dams on river morphology (case study: The Karkheh dam in Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 9(15). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2693-2>.
 38. Asghari, S., Setayeshi Nesaz, H., Mostafazadeh, R., & Madadi, A. (2023). Determining the long-term changes in the flow regime of the Khiavchai mountainous river using the the Range of Variability Approach (RVA). *Quantitative Geomorphological Research*, 12(2), 91-108. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.386970.1422>.
 39. Darvishzadeh, F., Shahrood University of Technoogy, Emamgholizadeh, S., Shahrood University of Technoogy, Azhdary, K., Shahrood University of Technoogy, Saiari, M., & Isfahan regional water. (2021). Study of the morphological changes and meander pattern of the Zohre River using satellite images. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research*, 11(1), 113-131. <https://doi.org/10.52547/jeer.11.1.113>.
 40. Wolfert, H. P. (2001). *Geomorphological change and river rehabilitation: Case studies on lowland fluvial systems in the Netherlands*. Wageningen University and Research. <https://search.proquest.com/openview/9d974ec35235ec5944e187b66771620d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.
 41. Azarang, F., Telvari, A., Sedghi, H., & Shafai Bajestan, M. (2017). Large Dam Effects on Flow Regime and Hydraulic Parameters of river (Case study: Karkheh River, Downstream of Reservoir Dam). *Water and Soil*, 31(1), 11-27. <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i1.48743>.
 42. Liaghat, A., Adib, A., & Gafouri, H. R. (2017). Evaluating the Effects of Dam Construction on the Morphological Changes of Downstream Meandering Rivers (Case Study: Karkheh River). *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(2), 1515-1522. <https://doi.org/10.48084/etasr.969>.
 43. Hou, J., Zeng, Q., Hu, P., Jiang, Y., A, Y., Yang, Q., Zhao, B., Liu, H., Yang, Z., & Qu, X. (2024). Characteristics and multi-factor mechanisms of dam construction on food web structure in cold-region rivers. *Journal of Hydrology*, 630, 130625. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130625>.
 44. Salahshouri, P., & Vafaeinezhad, A. R. (2012). *Change detection of Karkheh river floodplains of the Karkheh dam reservoir using remote sensing and GIS*. <https://www.sid.ir/paper/189424/en>.

