

Research Paper



Estimation of River Migration Rates Based on Monitoring Meander Changes Using Sentinel-2 Satellite Images



Maryam Meftah Halaghi¹ , Abdolreza Zahiri^{2*} | Amir Ahmad Dehghani³ Khalil Ghorbani⁴

1. Ph.D Student of Water Structures, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. mmhmaryam@gmail.com
2. Associated Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. azahiri@gau.ac.ir
3. Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. amirahmad.dehghani@yahoo.com
4. Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. ghorbani.khalil@gau.ac.ir

Keywords

Remote sensing, Morphological Changes, Spectral Indices, river Centerline Iran.

ABSTRACT

Introduction

The Atrak River, as a vital water resource in northeastern Iran, has undergone significant morphological changes due to natural and anthropogenic factors. Field monitoring of river morphological changes—particularly in meandering reaches—is costly, time-consuming, and hampered by limited access to border and inaccessible areas. While previous studies primarily focused on wide rivers, this research addresses the existing knowledge gap by evaluating the efficacy of remote sensing methods for monitoring morphological changes in rivers with average widths under 50 meters. The study examines the Internal Atrak River, a region confronting challenges such as channel migration and increased flood risk due to climate change, erodible geology, and human activities.

Methodology

Leveraging remote sensing advantages—including low cost, extensive coverage, periodic data access, and reduced reliance on complex field measurements—this study utilized Sentinel-2 satellite imagery (5-day temporal resolution) from 2016 to 2021. The research focused on four bends of the Internal Atrak River near Korand and Hootan villages in Golestan Province. After image preprocessing (comprising contrast enhancement, high-pass/low-pass filtering), six spectral indices (NDVI, NDWI, MNDWI, AWEI, WIR, EWI) were computed for river identification. The river centerline was extracted using QGIS software based on these indices. Accuracy was assessed using Root Mean Square Error (RMSE), length difference percentage, and spatial agreement (within a 10-meter buffer). All processing was implemented via Python coding and QGIS tools.

Receive: 2025/08/04

Accepted: 2026/01/07

Published: 2026/09/23

*Correspondin Author: Abdolreza zahiri azahiri@gau.ac.ir

How to cite this article: Meftah Halaghi, Maryam., Zahiri, Abdolreza., Dehghani, Amir Ahmad., & Ghorbani, Khalil. (2026). Estimation of River Migration Rates Based on Monitoring Meander Changes Using Sentinel-2 Satellite Images. *Hydrogeomorphology*, 13(48): 21 – 43.

DOI: [10.22034/hyd.2026.68469.1808](https://doi.org/10.22034/hyd.2026.68469.1808)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

The Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) demonstrated the highest accuracy for 2016 data (RMSE = 6.09 m, agreement = 94.13%, length difference = 0.47 m) and was consequently selected as the reference index for 2021 verification. verification results showed 1.45% length difference and 85.95% agreement. Change pattern analysis revealed all four bends were morphologically unstable, with rotational and extensional patterns dominating meandering sections. Bend 4 exhibited the highest migration (50.10 m), identifying it as the most active bend during the study area.

Conclusions

This study confirms remote sensing as a cost-effective, rapid, and accurate method for monitoring river morphological changes—particularly in narrow rivers and areas with limited field data. MNDWI emerged as the optimal index for extracting the Internal Atrak River's features. Findings on bend instability and change patterns provide critical insights for sustainable river management, riparian land protection, infrastructure safeguarding, and flood risk assessment in the Atrak basin. The use of freely available Sentinel-2 data makes this approach especially practical for resource-limited regions. This research establishes a reliable scientific and operational framework for river morphology studies and facilitates broader adoption of remote sensing in fluvial monitoring.



تخمین نرخ جابه‌جایی رودخانه‌ها بر اساس پایش تغییرات پیچان‌رودها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲



مریم مفتاح هلقی^۱، عبدالرضا ظهیری^{۲*}، امیراحمد دهقانی^۳ و خلیل قربانی^۴

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. mmhmaryam@gmail.com

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. azahiri@gau.ac.ir

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. amirahmad.dehghani@yahoo.com

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. ghorbani.khalil@gau.ac.ir

کلیدواژه‌ها

سنجش از دور، تغییرات مورفولوژیکی، شاخص‌های طیفی، خط مرکزی رودخانه، ایران.

چکیده

پایش تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌های پیچان‌رود، به‌ویژه در مناطق صعب‌العبور یا فاقد داده‌های میدانی، همواره با چالش‌های اجرایی روبرو بوده است. اگرچه فناوری سنجش از دور برای حل چالش‌های پیش رو راه‌حلی امیدبخش ارائه می‌دهد، اما بیشتر مطالعات پیشین بر رودخانه‌های عریض متمرکز بوده و کارایی آن برای رودخانه‌هایی با عرض متوسط کمتر از ۵۰ متر ارزیابی نشده است. این پژوهش با هدف ارزیابی دقت روش‌های سنجش از دور در تخمین نرخ جابه‌جایی و استخراج محور مرکزی رودخانه‌ها، با مطالعه موردی رودخانه اترک داخلی انجام شد. در این مطالعه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ (در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱)، شش شاخص طیفی (WIR، EWI، AWEI، MNDWI، NDWI، NDVI) برای استخراج پهنه آبی بخشی از رودخانه اترک در محدوده روستاهای کرد و هوتن مورد مقایسه قرار گرفت. پس از پیش‌پردازش تصاویر، محور مرکزی رودخانه در محیط QGIS استخراج و دقت آن با استفاده از معیارهای RMSE، درصد اختلاف طول و تطابق فضایی با داده‌های مرجع گوگل ارث ارزیابی شد. نتایج واسنجی در سال ۲۰۱۶ نشان داد که شاخص MNDWI با دارا بودن کمترین خطا ($RMSE = 6/09$ متر)، کمترین اختلاف طول (۰.۴۷ درصد) و بیشترین تطابق فضایی (۹۴/۱۳ درصد)، دقیق‌ترین شاخص برای استخراج محور مرکزی است. صحت‌سنجی این شاخص برای سال ۲۰۲۱ نیز عملکرد قابل قبول آن را با اختلاف طول ۱/۴۵ درصد و تطابق ۸۵/۹۵ درصد تأیید کرد. یافته‌ها به وضوح اثربخشی روش سنجش از دور و برتری شاخص MNDWI را در پایش کمی و دقیق تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌های با عرض متوسط تأیید می‌کند. این روش، به‌عنوان جایگزینی کم‌هزینه، سریع و قابل اعتماد برای پایش میدانی، می‌تواند چارچوبی ارزشمند برای مدیریت پایدار رودخانه‌ها، ارزیابی مخاطرات و برنامه‌ریزی در حوضه‌های آبی مشابه فراهم آورد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

*نویسنده مسئول

رایانامه: azahiri@gau.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2026.68469.1808

ارجاع به این مقاله: مفتاح هلقی، مریم؛ ظهیری، عبدالرضا؛ دهقانی، امیراحمد؛ قربانی، خلیل؛ (۱۴۰۴). تخمین نرخ جابه‌جایی رودخانه‌ها

بر اساس پایش تغییرات پیچان‌رودها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲. هیدروژئومورفولوژی، ۱۳ (۴۸): ۴۳-۲۱.



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

رودخانه‌ها به‌عنوان یک موجود زنده و پویا همواره در معرض تغییر و تحول هستند (اصغری سراسکانرود و پوراحمد، ۱۳۹۴: ۲). اگرچه جریان آب و حرکت رسوبات به‌ویژه در زمان سیلاب به طور ذاتی باعث تغییر در شکل و رفتار رودخانه می‌شود، اما به‌طور کلی عامل اصلی این تغییرات، دخالت انسان در مسیر و حریم رودخانه‌ها (مثل سدسازی، احداث خاکریز برداشت مصالح، ورود پساب به رودخانه، احداث پل، و...) است (احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۳: ۲). تغییرات رودخانه‌ها به‌صورت فرسایش، رسوبگذاری، تعمیق، تعریض و... اتفاق می‌افتد. یکی از انواع مهم فرسایش در رودخانه‌ها، فرسایش جانبی رودخانه است که در رودخانه‌های پیچان‌رود از شدت بیشتری برخوردار است. فرسایش سواحل یکی از علل عمده آلودگی غیرنقطه‌ای منابع آب و افزایش بار رسوب در بسیاری از رودخانه‌ها است.

روش‌ها و مدل‌های متنوعی برای تخمین نرخ جابه‌جایی یا فرسایش کناری رودخانه‌ها مورداستفاده قرار گرفته‌اند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مدل‌ها و روابط تجربی (از قبیل DSAS, BEHI, REBVI, NBS، و...)، روش‌های عملی یا صحرایی (مثل پین‌ها و سوزن‌های فرسایشی، حسگرها و...)، روی هم‌گذاری نقشه‌های تاریخی و تصاویر هوایی رودخانه، مدل‌سازی ریاضی (مثل MIKE11-ST, MIKE21C, WROCLAW, Sobek, Delft3D و...) و استفاده از روش‌های سنجش از دور مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای اشاره نمود. این روش‌ها هرکدام دارای محدودیت‌ها و مزایای می‌باشند (فم^۱، ۲۰۲۴: ۱۶۱). به‌طور کلی و با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلفی مثل زمان، هزینه، دقت، سادگی، عدم قطعیت نتایج و میزان دسترسی به ابزار هر روش، روش‌های مبتنی بر سنجش از دور دارای اولویت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌های تخمین نرخ فرسایش کناری رودخانه‌ها باشند. با وجود این مزایا، کاربرد این فناوری در پایش ریخت‌شناسی رودخانه‌ها با چالش‌های عمده‌ای روبرو است. یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها، عدم وجود یک روش یکپارچه و دقیق برای جداسازی پهنه‌های آبی از غیرآبی در تصاویر ماهواره‌ای، به‌ویژه در مورد رودخانه‌های با عرض متوسط و کم (کمتر از ۵۰ متر) است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۹). اگرچه شاخص‌های طیفی متعددی مانند NDWI, MNDWI, AWEI و EWI برای این هدف توسعه یافته و در مطالعات متعدد به کار رفته‌اند (طاهریان و همکاران، ۱۳۹۶؛ ارفع فتح‌الله‌خانی و همکاران، ۲۰۲۲؛ ستوده‌پور و همکاران، ۱۴۰۳)، اما تمرکز قریب به اتفاق این پژوهش‌ها بر روی رودخانه‌های عریض (عرض بیش از ۱۰۰ متر) و با استفاده از تصاویر لندست (با وضوح مکانی ۳۰ متر) بوده است. این امر منجر به ایجاد یک شکاف تحقیقاتی مشخص شده است. کارایی و دقت شاخص‌های طیفی مختلف در استخراج محور مرکزی و پایش تغییرات رودخانه‌های کم‌عرض که نیازمند داده‌هایی با وضوح مکانی بالاتر (مانند سنتینل-۲) هستند، به‌طور یکپارچه مورد مقایسه و ارزیابی قرار نگرفته است. تاکنون یک چارچوب عملیاتی مبتنی بر بهترین شاخص طیفی برای تخمین نرخ جابه‌جایی رودخانه‌ها (به‌ویژه در حالت فعال مورفودینامیکی)، احساس می‌شود.

رودخانه اترک داخلی، به‌عنوان یک رودخانه حیاتی در شمال شرق ایران، نمونه بارزی از این چالش‌ها است. این رودخانه به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، با نرخ بالای فرسایش کناری و جابه‌جایی مسیر مواجه است که زیرساخت‌ها و اراضی اطراف را تهدید می‌کند. بنابراین، مسئله اصلی این پژوهش، ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان شاخص طیفی پرکاربرد (NDVI, NDWI, MNDWI, AWEI, WIR, EWI) در استخراج محور مرکزی و نهایتاً تخمین نرخ جابه‌جایی قوس‌های رودخانه اترک (با عرض کمتر از ۵۰ متر) در یک بازه زمانی ۵ ساله است. هدف نهایی، معرفی یک روش بهینه، دقیق و کم‌هزینه مبتنی بر سنجش از دور برای پایش تغییرات چنین رودخانه‌هایی است که می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای مدیریت یکپارچه و پایدار حوضه‌های آبی مشابه فراهم آورد.

تحقیقات متعددی در زمینه بررسی تغییرات رودخانه‌ها با استفاده از فناوری سنجش از دور انجام شده است. استفاده از شاخص‌های طیفی یکی از متداول‌ترین روش‌های استخراج پهنه‌های آبی است. شاخص تفاضل نرمال شده آب (NDWI) که توسط مک‌فترز^۲ (۱۹۹۶) ارائه شد، با جایگزینی باند مادون قرمز میانی به جای باند مادون قرمز نزدیک در شاخص NDWI توسط زو^۳ (۲۰۰۶) اصلاح گردید. در

¹ Pham

² McFeeters

³ Xu

روش NDWI، اطلاعات طیفی بهبودیافته آب اغلب با نویز مناطق شهری ترکیب می‌شود و در نتیجه مساحت آب استخراج شده بیش‌برآورد می‌گردد؛ بنابراین MNDWI به دلیل توانایی بالاتر در کاهش یا حذف نویزهای مناطق شهری نسبت به NDWI، برای آشکارسازی و استخراج اطلاعات طیفی آب در مناطقی که زمینه غالب آن‌ها نواحی شهری است، مناسب‌تر است.

فیزا^۱ و همکاران (۲۰۱۴: ۲۳-۳۵) شاخص AWEI را معرفی کردند که دقت استخراج آب را در مناطق سایه‌دار بهبود بخشید. جیانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۴: ۵۰۷۳) یک روش خودکار برای استخراج رودخانه‌ها و دریاچه‌ها از تصاویر لندست ارائه کردند. در این روش، از ترکیب شاخص‌های طیفی و تکنیک‌های پردازش تصویر برای جداسازی آب از سایر انواع پوشش زمین استفاده کردند. این روش مبتنی بر استفاده از یک شاخص طیفی (مانند شاخص تفاضلی آب NDWI) و اعمال آستانه به روش اتسو^۳ به همراه پردازش مورفولوژیکی است و نتیجه گرفتند که روش جدید عموماً از روش‌های آستانه‌گذاری بهتر عمل می‌کند. گمشادزایی و رحیم‌زادگان (۱۳۹۴) شاخص‌های طیفی مهمی از قبیل NDWIF، SWI، AWEI و EWI را به جهت استخراج پهنه‌های آبی برای تصاویر لندست استفاده کردند و شاخص SWI را به عنوان بهترین روش استخراج پهنه‌های آبی معرفی کردند. طاهریان و همکاران (۱۳۹۶: ۱۱۹-۱۲۰)، عملکرد خرد - پیکسلی دو شاخص کارآمد آب شامل MNDWI و AWEI_{shadow} را مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که هر دو شاخص قابلیت تفکیک پیکسل‌های آبی را دارند، اما در مورد پیکسل‌های مخلوط آب، شاخص MNDWI نسبت به شاخص AWEI_{shadow} دقت بیشتری دارد. وانگ^۴ و همکاران (۲۰۱۵: ۹۷-۹۰)، شاخص ساده‌ای به نام شاخص بهبودیافته آب (EWI) مبتنی بر شاخص اصلاح شده تفاضل نرمال شده آب (MNDWI) معرفی کردند که هدف آن تحلیل در سطح زیرپیکسل برای تعیین نسبت سطح آب است. نتایج نشان داد که این مدل قادر است اطلاعات مربوط به نسبت سطح آب در پیکسل‌ها را به طور مؤثر استخراج کند. وانگ و همکاران (۲۰۲۰: ۱-۵)، به استخراج عرض رودخانه مبتنی بر نظریه گراف از تصاویر سنجش از دور پرداختند و از شاخص MuWI برای تعیین پهنه آبی استفاده کردند. جیانگ و همکاران (۲۰۲۱: ۱۶۴۷) به معرفی شاخص جدید آب (SWI) با استفاده از باند ۵ و باند ۱۱ تصاویر سنتینل ۲ پرداختند. باسنایاکا^۵ و همکاران (۲۰۲۲: ۱۰۹۱) با استفاده از داده‌های ماهواره لندست و پلت فرم QGIS تغییرات محور مرکزی رودخانه در یک دوره ۳۲ ساله بررسی و افزایش نرخ مهاجرت قوس‌های رودخانه ددورو اويا را نتیجه گرفتند. هامادا^۶ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ و شاخص طیفی NDWI به تعیین عرض رودخانه در دو حالت صرفاً با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ و استفاده از تلفیق تصاویر سنتینل ۲ و مدل رقومی ارتفاع پرداختند. نتایج نشان داد که این روش‌ها می‌توانند در سراسر رودخانه گرین برای توسعه یک استراتژی صحیح و مقرون به صرفه برای پایش کاهش عرض رودخانه مورد استفاده قرار گیرند. ارفع فتح‌الله‌خانی و همکاران (۲۰۲۲: ۳۶۵۶)، تغییرات مورفولوژیکی رودخانه کارون را با استفاده از تصاویر لندست و شاخص MNDWI از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ شناسایی و تجزیه و تحلیل نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که الگوی غالب رودخانه کارون با توجه به ضریب انحنای آن، پیچان‌رودی است و اغلب بازه‌های این رودخانه در دسته رودخانه‌های پیچان‌رودی توسعه‌یافته قرار دارند.

ستوده‌پور و همکاران (۲۰۲۳: ۸۳-۵۹) به مقایسه شاخص‌های استخراج پهنه‌های آبی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل A2 در سواحل بندر بوشهر در حاشیه خلیج فارس پرداختند و نتیجه گرفتند که برای هر دو تصویر لندست و سنتینل، شاخص اصلاح شده اختلاف آب نرمال شده (MNDWI) بهترین شاخص است.

بررسی مطالعات موجود در زمینه کاربرد سنجش از دور در ارزیابی رفتار رودخانه‌های پیچان‌رود و تخمین نرخ جابه‌جایی آن‌ها نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها با تکیه بر تصاویر لندست (با رزولوشن ۳۰ متر) به رودخانه‌های عریض (عرض بیشتر از ۱۰۰ متر) محدود شده‌اند و فاقد روشی کارآمد برای پایش رودخانه‌های کم‌عرض با استفاده از داده‌های با وضوح مکانی بالا هستند. همچنین، خلاء

¹ Feyisa⁴ Wang² Jiang⁵ Basnayaka³ Otsu⁶ Hamada

چارچوب‌های چندشاخصه برای استخراج خط مرکزی و ارزیابی کمی تغییرات در بازه‌های زمانی میان مدت به‌ویژه در محیط‌های تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی محسوس است.

رودخانه اترک نقش بسزایی در تأمین آب کشاورزی مناطق شمال شرقی ایران دارد. این رودخانه به دلیل تغییرات الگوی جریان ناشی از تغییر اقلیم، نوع سازندهای زمین‌شناسی، فرسایش‌پذیر بودن سازندهای کنار بستر رودخانه، فعالیت‌های انسانی و فرسایش کناره‌ها، با چالش‌های جدی مانند جابه‌جایی مسیر و افزایش ریسک سیلاب مواجه است (شرفی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۲۹). روش‌های سنتی پایش میدانی تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ها، پرهزینه، زمان‌بر و گاهی با محدودیت دسترسی به مناطق مرزی همراه است. بدین جهت استفاده از فناوری سنجش از دور، به‌عنوان راهکاری کارآمد و مقرون‌به‌صرفه، امکان بررسی و تحلیل کمی تغییرات را فراهم می‌کند. عدم نیاز به داده‌های هیدرولیکی یا میدانی، پوشش گسترده و دسترسی به داده‌های جهانی، دسترسی به تصاویر دوره‌ای (هر ۵ روز برای ماهواره سنتینل ۲) و امکان تحلیل سری زمانی، تهیه بدون هزینه و در زمان کمتر، کاربرد در مناطق با داده‌های محدود یا بدون دسترسی و همچنین هماهنگی با ابزارهای پردازش و تحلیل، از جمله مزیت‌های روش سنجش از دور هستند که سبب انتخاب این روش در پژوهش شدند. در این پژوهش با استفاده از تصاویر با وضوح بالا (سنتینل ۲)، ۶ شاخص طیفی مختلف به کمک کدنویسی به زبان پایتون QGIS مقایسه و پس از واسنجی و انتخاب دقیق‌ترین شاخص، مشخصات هندسی و جابه‌جایی ۴ قوس از رودخانه اترک داخلی حاضر و نرم‌افزار

برای اولین بار محاسبه شد.

مواد و روش

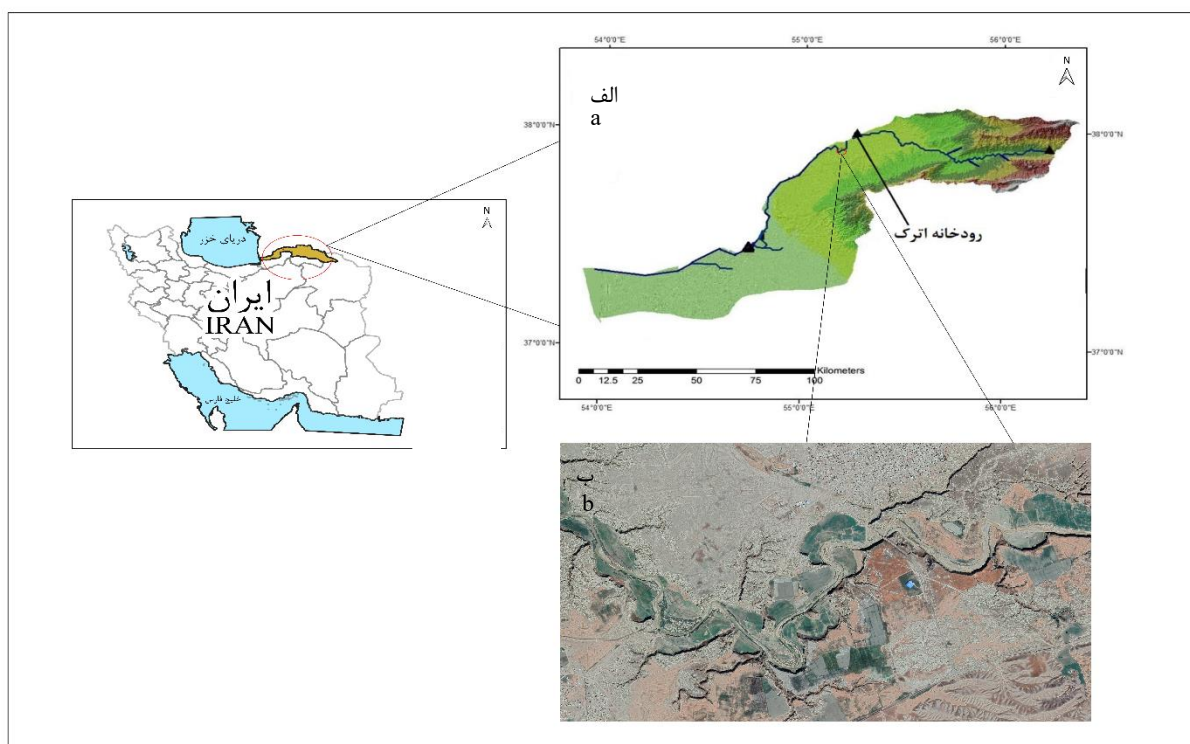
موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز اترک با مساحت ۳۴۰۰۰ کیلومترمربع در استان‌های خراسان رضوی، خراسان شمالی، گلستان و کشور ترکمنستان قرار دارد. این حوزه بین طول‌های ۵۴°-۴۰° تا ۵۹°-۴۰° و عرض‌های ۳۶°-۵۷° تا ۳۸°-۱۷° واقع شده و به سه قسمت داخلی، خارجی و مرزی شده است. مساحت اترک داخلی ۲۶۴۳۰ کیلومترمربع و شامل استان‌های خراسان رضوی (۷ درصد)، خراسان شمالی (۶۲ درصد) (۳۱ درصد) می‌شود. رودخانه اترک داخلی بخشی از رودخانه اترک محسوب می‌شود که در محدوده جغرافیایی ایران بوده و از تقسیم و گلستان

ارتفاعات شمالی استان خراسان رضوی سرچشمه گرفته و تا منطقه چات در مرز ترکمنستان (واقع در شمال استان گلستان) امتداد می‌یابد. رودخانه اترک داخلی حدود ۵۵۰ کیلومتر طول دارد و از این نظر پنجمین رودخانه طویل ایران محسوب می‌شود. شیب متوسط این رودخانه ۰/۰۳ است، اما این شیب در ابتدای مسیر نسبتاً تند و حدود ۰/۰۶ و در بخش‌های انتهایی بسیار ملایم و کمتر از ۰/۰۰۶ است. در این پژوهش ۴ قوس از اترک داخلی در محدوده روستای کُرنَد و هوتن (مطابق شکل ۱) به دلیل تغییرات زیاد در سال‌های اخیر، نزدیکی به زمین‌های کشاورزی، مناطق و تأسیسات انسان‌ساخت، برای بررسی جابه‌جایی و مشخصات هندسی انتخاب شدند (مفتاح هلقی، ۱۳۹۰: ۲۱۳ و شرفی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۳۳).

روش انجام کار

در این پژوهش از ۲ تصویر ماهواره سنتینل ۲ مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۶/۰۷/۱۱ و ۲۰۲۱/۰۸/۰۹ که از پایگاه داده کوپرنیکوس^۱ تهیه شده بود، استفاده شد. ماهواره سنتینل ۲ دارای ۱۳ باند طیفی است که شامل ۴ باند با تفکیک مکانی ۱۰ متر، ۶ باند با تفکیک مکانی ۲۰ متر و ۳ باند با تفکیک مکانی ۶۰ متر می‌شود (جیانگ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۶۴۷). همچنین، این ماهواره هر ۵ روز یک‌بار پوششی از منطقه ارائه می‌کند؛ در حالی که تصاویر گوگل ارث با تفکیک مکانی یک متر، چنین تناوب زمانی را ندارند. بنابراین در این پژوهش، از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ استفاده شد. با توجه به اینکه در فصل خشک سال، دبی جریان رودخانه اترک کاهش می‌یابد و آب فقط در محور اصلی رودخانه جریان دارد، بنابراین از تصاویر در فصل خشک سال و با حداکثر ۱ درصد پوشش ابر استفاده شد.



شکل (۱): منطقه مطالعاتی، الف) نقشه بخشی از حوضه آبریز اترک داخلی واقع در استان گلستان (برزعلی و همکاران، ۱۴۰۱:۱۳۵) ب) تصویر گوگل ارث از منطقه مطالعاتی

Figure (1): Study area, a) Map of part of the internal Atrak basin located in Golestan province (Barzali et al., 2022:135) b) Google Earth image of the study area

از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای پیش‌پردازش و پردازش تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید. تصاویر با اعمال روش یکسان‌سازی هیستوگرام^۱ افزایش کنتراست یافت. سپس فیلتر پایین‌گذر گاوسی^۲ برای حذف سیگنال‌های نامطلوب^۳ و فرکانس پایین و فیلتر بالاگذر لاپلاسیان^۴ برای تقویت لبه‌ها روی باند مادون قرمز نزدیک (NIR) اعمال گردید. سپس تصویر شاخص‌های طیفی با خروجی فیلتر لاپلاسیان تلفیق و در نهایت با اعمال آستانه مناسب پهنه‌های آبی (مسیر رودخانه) مشخص شد.

یکی از متداول‌ترین روش‌های تفکیک پیکسل‌های آب و غیرآب برای تصاویر چند طیفی، استفاده از شاخص‌های طیفی است. مقادیر شاخص طیفی آب، نشان‌دهنده یک عدد برای هر پیکسل است که از طریق روابط مختلف با کمک دو یا چند باند طیفی به دست می‌آیند (جدول ۱). یک آستانه مناسب بر روی مقادیر، اعمال شده و سپس با کمک آن، پیکسل آب از سایر پوشش‌های زمین بر اساس ویژگی‌های طیفی جداسازی می‌شوند (فرجی و فاطمی نصرآبادی، ۱۴۰۱:۴۷). طراحی یک شاخص طیفی آب بر این اساس است که آب در محدوده مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز، انرژی الکترومغناطیس را جذب می‌کند، ولی اجسام غیر آب در این محدوده انرژی الکترومغناطیس را بازتاب می‌کنند. از طرفی، آب در محدوده باندهای آبی و سبز، بازتاب نسبتاً بالایی نسبت به سایر باندها دارد (لایتنکوگل، ۲۰۱۰).

1 Histogram Equalization

2 Gaussian

3 noises

4 Laplacian

جدول (1): روابط شاخص‌ها طیفی

Table (1): Spectral indices relations

شاخص طیفی	رابطه	مرجع
شاخص تفاضل نرمال شده آب	$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$	McFeeters, 1996
شاخص اصلاح شده تفاضل نرمال آب	$MNDWI = (GREEN - SWIR1) / (GREEN + SWIR1)$	Xu, 2006
شاخص تفاضل نرمال پوشش گیاهی	$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$	Carlson and Ripley, 1997
شاخص خودکار جداسازی آب	$AWEI_sh = BLUE + 2.5(GREEN) - 1.5(NIR + SWIR1) - 0.25(SWIR2)$	Feyisa et al., 2014
شاخص نسبت آبی	$WRI = (GREEN + RED) / (NIR + SWIR1)$	Shen and Li, 2010
شاخص بهبود یافته آب	$EWI = (GREEN - SWIR1 + m) / ((GREEN + SWIR1) * (NDVI + n))$	Wang et al., 2015

در جدول ۱، GREEN بیانگر بازتابندگی باند سبز، NIR بازتابندگی باند مادون قرمز نزدیک، SWIR1 بازتاب باند قرمز موج کوتاه در محدوده ۱/۵۶ تا ۱/۶۵ میکرومتر، SWIR2 بازتاب باند قرمز موج کوتاه در محدوده ۲/۱ تا ۲/۳ میکرومتر و n یک مقدار تجربی است که برای منفی نشدن مخرج کسر لحاظ می‌شوند. مقدار m نیز از طریق آزمایش‌های متعدد و مشاهدات تجربی مطابق پژوهش مرجع تعیین می‌گردد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵: ۹۲).

ترسیم محور مرکزی رودخانه

پس از تفکیک پهنه‌های آبی و شناسایی مسیر رودخانه، محور مرکزی آن باید استخراج شود. این رویکرد به دلیل مزیت محور مرکزی (مستقل بودن آن از نوسانات تراز سطح آب) انتخاب گردید. با توجه به اینکه تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در شرایط کم‌آبی یا خشکی (با تراز سطح آب بسیار پایین) ثبت شده‌اند، تعیین دقیق خطوط ساحلی رودخانه با عدم قطعیت همراه است؛ چرا که مرزهای آبی-خشکی در چنین وضعیتی به طور معناداری جابه‌جا می‌شوند. در مقابل، خط مرکزی معیاری پایدارتر برای تحلیل تغییرات مکانی رودخانه در بازه‌های زمانی مختلف است. محور مرکزی رودخانه در نرم‌افزار QGIS با پردازش تصاویر طیفی و اعمال الگوریتم r.thin انجام شد. این الگوریتم به کمک نازک‌سازی^۱ توده‌های آبی شناسایی شده، محورهای مرکزی را تولید می‌کند.

واسنجی

بر اساس پژوهش‌های فیزا و همکاران (۲۰۱۴) و جیانگ و همکاران (۲۰۱۴)، در این تحقیق از تصاویر Google Earth برای واسنجی^۲ و صحت‌سنجی^۳ محورهای مرکزی رودخانه استفاده شد. از تصاویر با وضوح بالا در Google Earth، محور مرکزی واقعی رودخانه در سال

¹ Thinning

² Calibration

³ Validation

۲۰۱۶ برای واسنجی و محور مرکزی واقعی رودخانه در سال ۲۰۲۱ برای صحت‌سنجی استخراج شد. برای ارزیابی دقت محورهای مرکزی استخراج‌شده از روش‌های مختلف، چهار معیار یا شاخص آماری زیر مورد استفاده قرار گرفت:

۱. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

فاصله عمودی بین هر نقطه از محور مرکزی محاسباتی و نزدیک‌ترین نقطه روی محور مرکزی واقعی محاسبه شد. RMSE با استفاده از رابطه ۱ برحسب متر گزارش گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i)^2}{n}} \quad (1)$$

که در آن d_i فاصله عمودی نقطه i ام و n تعداد نقاط نمونه است.

۲. درصد اختلاف طول

طول کل محور مرکزی محاسباتی ($L_{محاسباتی}$) و محور مرکزی واقعی ($L_{واقعی}$) در نرم‌افزار QGIS اندازه‌گیری شد و درصد اختلاف با رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$(\%) \text{ اختلاف طول} = \left| \frac{L_{محاسباتی} - L_{واقعی}}{L_{واقعی}} \right| \times 100 \quad (2)$$

۳. درصد تطابق فضایی با منطقه حائل ۱۰ متری

یک منطقه حائل 10^1 متری حول محور مرکزی واقعی در نرم‌افزار QGIS ایجاد شد. طول قسمتی از محور مرکزی محاسباتی که داخل این منطقه حائل قرار گرفت (تطابق L) اندازه‌گیری شد و درصد تطابق از رابطه ۳ به‌دست آمد:

$$(\%) \text{ تطابق} = \left| \frac{L_{تطابق}}{L_{واقعی}} \right| \times 100 \quad (3)$$

مقادیر زیر ۱۰۰ درصد نشان می‌دهند که بخشی از محور مرکزی محاسباتی خارج از منطقه حائل ۱۰ متری واقعی قرار گرفته است و همچنین ذکر این نکته ضروری است که مقدار درصد تطابق فضایی در مواردی می‌تواند از ۱۰۰ درصد فراتر رود. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که طول کل محور مرکزی محاسباتی که درون منطقه حائل ۱۰ متری محور مرکزی واقعی قرار می‌گیرد، به دلیل داشتن پیچ‌وخم‌های ریز یا جزئیات بیشتر در الگوریتم استخراج محور مرکزی، از طول محور مرکزی واقعی بیشتر شود. بنابراین، مقادیر اندکی بیش از ۱۰۰ فقط نشان‌دهنده یک ویژگی ذاتی خط استخراج‌شده (پرپیچ‌وخم‌تر بودن) است. مقدار بسیار بیشتر از ۱۰۰ درصد می‌تواند نشانه نویز زیاد یا بیش‌برآورد شدید مسیر باشد.

۴. واسنجی بر مبنای مشخصات هندسی و ژئومورفولوژی رودخانه

درجه انحنای کلی مسیر و طول قوس، درجه انحنای و نرخ مهاجرت هر قوس برای تمامی شاخص‌های طیفی و محور مرکزی استخراج شده از گوگل ارث (۲۰۱۶) محاسبه شد. تمامی این محاسبات در محیط QGIS و با استفاده از ابزارهای هندسی آن از جمله پلاگین QAD انجام شد.

محاسبه مشخصات هندسی و ژئومورفولوژی رودخانه از تصاویر سنجش از دور

در تحلیل مورفودینامیک رودخانه‌های پیچان‌رود، محاسبه کمی ویژگی‌های هندسی قوس‌ها ضروری است. در این مطالعه، چهار پارامتر شامل شعاع قوس، زاویه مرکزی، درجه انحنای و نرخ جابه‌جایی برای بازه‌های منتخب محاسبه شد.

۱. شعاع قوس: شعاع قوس با استفاده از پلاگین QAD در QGIS محاسبه شد (شکل ۲).

۲. زاویه مرکزی: با استفاده از شعاع و طول قوس، زاویه مرکزی θ برحسب درجه مطابق رابطه ۴ محاسبه شد:

$$\theta = \left(\frac{s}{r} \right) * \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (4)$$

¹ Buffer

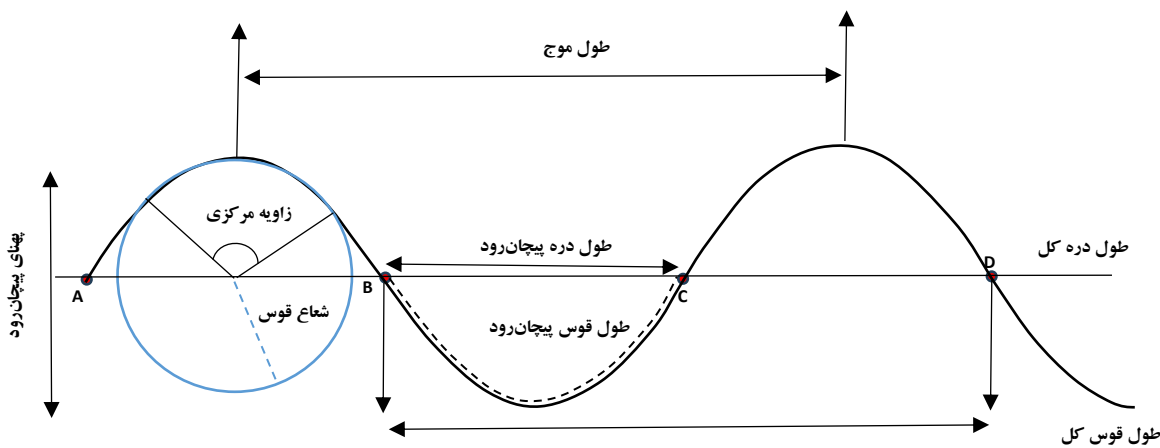
S و T در رابطه فوق به ترتیب بیانگر طول و شعاع قوس هستند.

۳. درجه انحنا^۱: با استفاده از طول قوس محور مرکزی و طول دره مستقیم می‌توان درجه انحنا را با استفاده از رابطه ۵ محاسبه کرد (ناگل و همکاران، ۲۰۲۳):

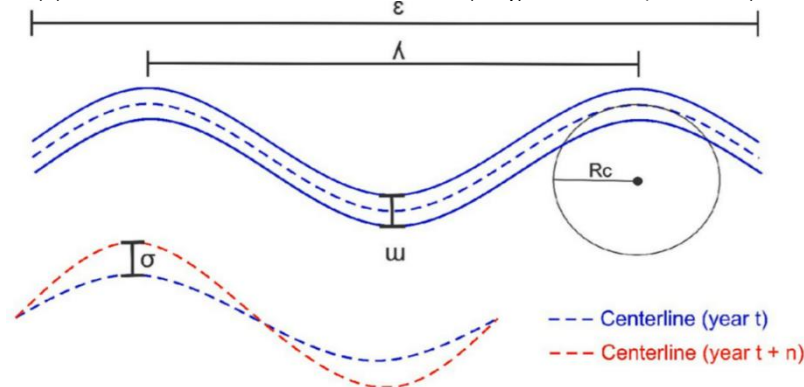
$$\text{Sinuosity} = \frac{T}{L} \quad (5)$$

L و E در روابط فوق به ترتیب طول قوس محور مرکزی و طول دره مستقیم می‌باشند (شکل ۲).

۴. نرخ جابه‌جایی^۲: نرخ جابه‌جایی رودخانه را مطابق شکل ۳ و با استفاده از رابطه ۶ می‌توان محاسبه کرد (ناگل و همکاران، ۲۰۲۳):



شکل (۲): مشخصات هندسی رودخانه (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۷:۲۰۱۷)
Figure (2): Geometric characteristics of the river (Maghsoudi et al., 2017:367)

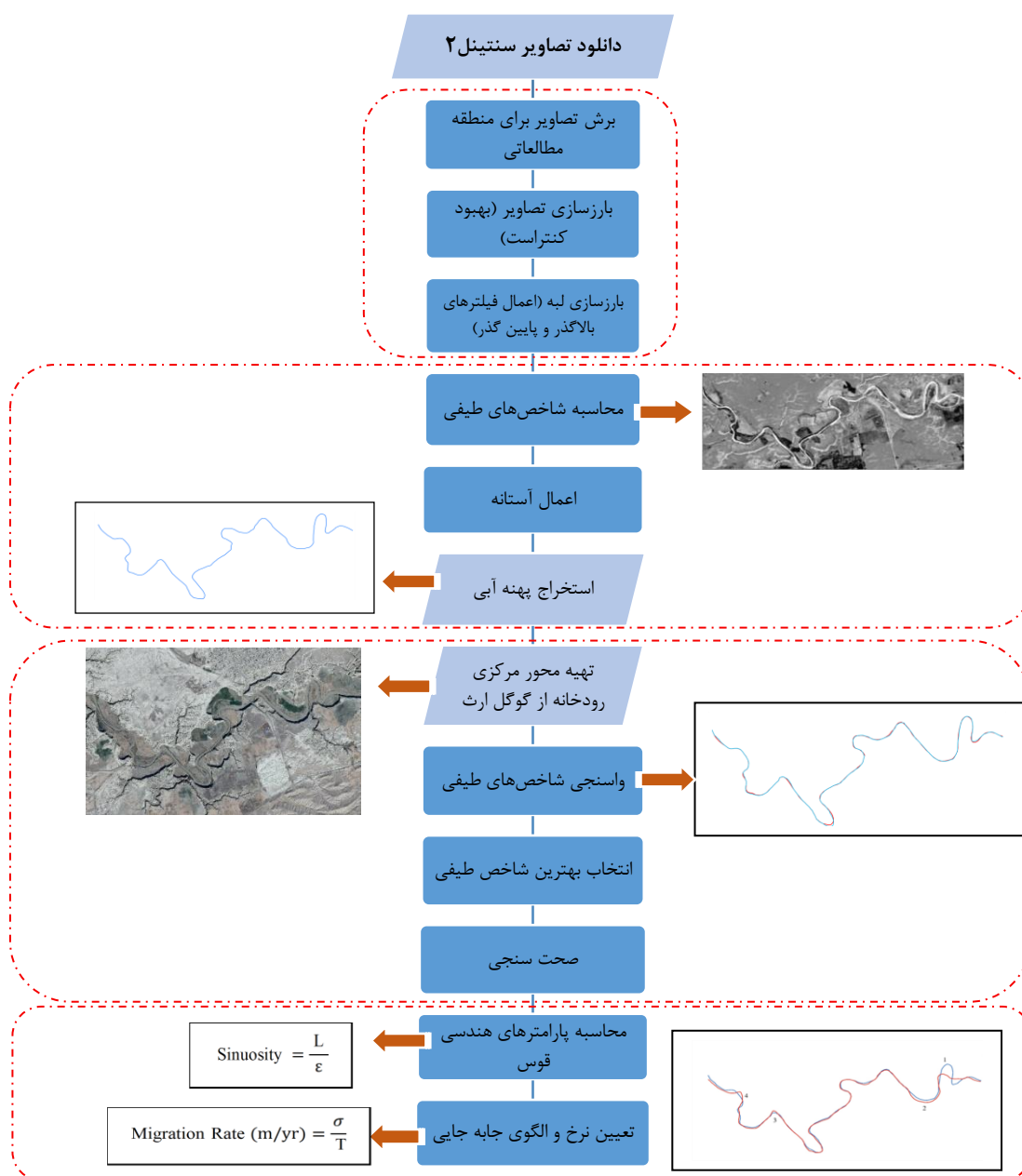


شکل (۳): مشخصات مورفولوژی رودخانه (ناگل و همکاران، ۲۰۲۳:۴)
Figure (3): Morphological characteristics of the river (Negal et al., 2023:4)

$$\text{Migration Rate (m/yr)} = \frac{\sigma}{T} \quad (6)$$

σ در رابطه فوق بیانگر جابه‌جایی رأس قوس و T اختلاف زمانی دو محور مرکزی است. مراحل محاسباتی فوق به صورت یک فلوچارت یا روندنما در شکل ۶ نشان داده شده است.

¹ Sinuosity
² Migration Rate
³ Negal



شکل (۴): روندنمای پژوهش حاضر
Figure (4): Present study Flowchart

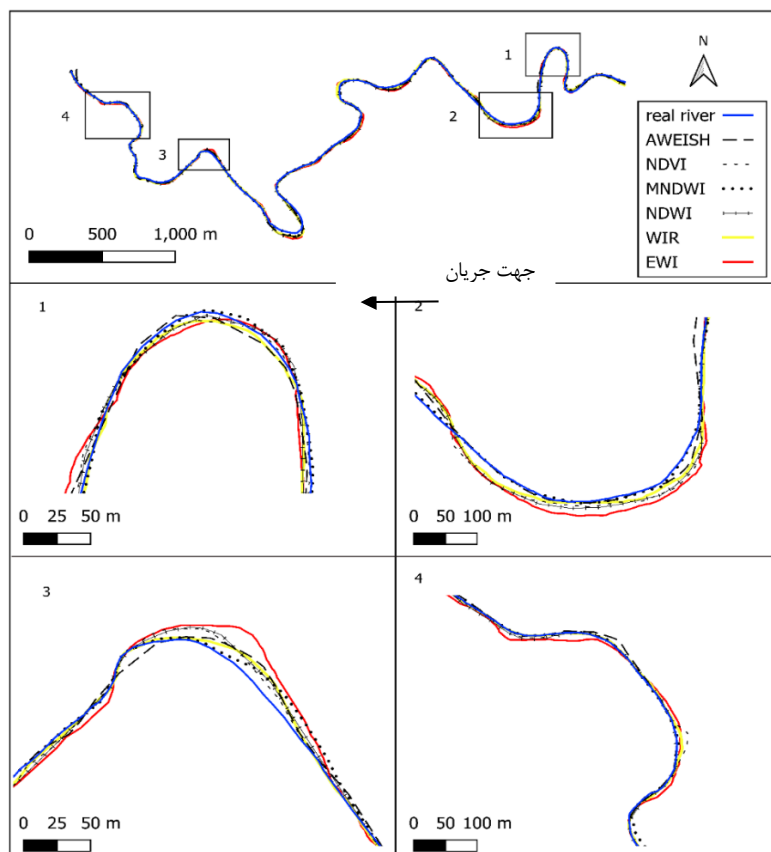
یافته‌ها و بحث

این پژوهش با هدف استخراج محور مرکزی رودخانه اترک داخلی (محدوده روستاهای کرد و هوتن) از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ انجام شد. نتایج در سال ۲۰۱۶ با داده‌های گوگل ارث واسنجی شد و برای سال ۲۰۲۱ صحت‌سنجی گردید. به‌منظور تحلیل تغییرات چشمگیر اخیر، چهار قوس منتخب از مسیر رودخانه (باتوجه به مجاورت زمین‌های کشاورزی و تأسیسات انسان‌ساخت) نیز به‌صورت دقیق بررسی شدند.

نتایج کلی مسیر رودخانه

شکل ۵ مقایسه محور مرکزی واقعی با محورهای مرکزی استخراج‌شده از شاخص‌های طیفی مختلف شامل NDVI، NDWI، MNDWI،

EWI و WIR را در بخشی از رودخانه اترک پایینی طی سال ۲۰۱۶ (دوره واسنجی) نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که محور مرکزی محاسباتی حاصل از شاخص MNDWI با خطای RMSE برابر با ۶/۰۹ متر، اختلاف طولی ۰/۴۷٪ و تطابق فضایی ۹۴/۱۳٪ نزدیک‌ترین انطباق را با داده‌های مرجع داشته و عملکردی برتر نسبت به سایر شاخص‌ها از خود نشان می‌دهد. این مقادیر بیانگر دقت بالای شاخص MNDWI در استخراج محور مرکزی رودخانه است (جدول ۲). در مقابل، شاخص EWI با RMSE برابر با ۱۳/۳ متر، اختلاف طول ۴/۷۱٪ و تطابق فضایی ۶۶/۵۸٪ کمترین دقت را داشت. همچنین درجه انحنای واقعی کل مسیر ۱/۹۱ و مقدار محاسباتی آن با شاخص MNDWI، ۱/۹۲ است که نزدیک‌ترین مقدار به درجه انحنای واقعی مسیر می‌باشد (جدول ۳).



شکل (۵): مقایسه محور مرکزی مشاهداتی و به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای برای رودخانه اترک در سال ۲۰۱۶ (واسنجی)

Figure (5): Comparison of the observed and calculated centerline for the Atrak River in 2016 (calibration)

جدول (۲): واسنجی بر اساس معیارهای RMSE، درصد اختلاف طول و تطابق فضایی (با منطقه حائل ۱۰ متری)

Table (2): Calibration based on RMSE, length difference percent, and spatial agreement (with a 10-meter buffer)

شاخص طیفی	RMSE (m)	اختلاف طول (%)	تطابق فضایی (%)
EWI	۱۳/۳۰	۴/۷۱	۶۶/۵۸
WIR	۹/۴۶	۲/۲۰	۸۰/۳۷
NDVI	۱۰/۵۱	۲/۵۵	۸۱/۲۰
NDWI	۹/۶۳	۲/۳۲	۷۸/۳۰
MNDWI	۶/۰۹	۰/۴۷	۹۴/۱۳
AWEIsh	۹/۹۴	۱/۳۵	۸۱/۴۵

جدول (۳): درجه انحنا ی واقعی و محاسباتی رودخانه با شاخص های طیفی مختلف برای سال ۲۰۱۶

Table (3): Real and calculated river sinuosity with different spectral indices in 2016

شاخص طیفی	درجه انحنا
EWI	۱/۲۰
WIR	۱/۹۵
NDVI	۱/۹۶
NDWI	۱/۹۵
MNDWI	۱/۹۲
AWEIsh	۱/۹۳
Real (2016)	۱/۹۱

این نتایج نشان می دهند که شاخص MNDWI به طور کلی در تخمین محور مرکزی رودخانه از دقت و تطابق بالاتری برخوردار است.

تحلیل واسنجی چهار قوس انتخابی (سال ۲۰۱۶)

چهار قوس از مسیر رودخانه به دلیل تغییرات زیاد در سال های اخیر، نزدیکی به زمین های کشاورزی و مناطق انسان ساخت انتخاب شدند. برای چهار قوس مذکور، معیارهای شعاع قوس، زاویه مرکزی، درجه انحنا، اختلاف طول و تطابق فضایی محاسبه و با مقادیر واقعی مقایسه شدند. نتایج تحلیل این قوس ها به شرح زیر است:

- قوس ۱: شاخص EWI با شعاع قوس ۶۴/۹۵ متر و شاخص AWEIsh با شعاع ۶۴/۹۳ متر نزدیک ترین مقادیر به شعاع واقعی (۶۲/۸۰ متر) بودند. زاویه مرکزی محاسباتی با شاخص MNDWI (۲۶۶/۶۵ درجه)، کمترین اختلاف با مقدار واقعی (۲۷۶/۶۹ درجه) را داشت و همچنین شاخص MNDWI با ۱/۶۳٪ بالاترین تطابق فضایی را نشان داد. شاخص AWEIsh با درجه انحنا ۱/۸۹ و شاخص MNDWI با درجه انحنا ۱/۸۹ نزدیک ترین مقادیر به درجه انحنا واقعی ۱/۸۹ بودند. شاخص NDWI با ۰/۴۱٪ کمترین اختلاف طول را داشت (جداول ۴ و ۵).

جدول (۴): مشخصات هندسی قوس اول سال ۲۰۱۶
Table (4): First meander geometric characteristics in 2016

شاخص طیفی	طول قوس (m)	شعاع قوس (m)	زاویه مرکزی (درجه)	درجه انحنا
EWI	۲۹۹/۸۰	۶۴/۹۵	۲۶۴/۴۶	۱/۸۸
WIR	۲۹۴/۲	۷۰/۰۵	۲۴۰/۶۴	۱/۹۰
NDVI	۲۹۹/۴۶	۷۰/۷۲	۲۴۲/۶۲	۱/۸۲
NDWI	۳۰۲/۰۶	۷۰/۲۲	۲۴۶/۴۷	۱/۹۱
MNDWI	۳۰۸/۲۵	۶۶/۲۳	۲۶۶/۶۵	۱/۸۹
AWEIsh	۲۹۹/۱۰	۶۴/۹۳	۲۶۳/۹۲	۱/۸۹
Real (2016)	۳۰۳/۲۹	۶۲/۸۰	۲۷۶/۶۹	۱/۸۹

جدول (۵): واسنجی قوس اول بر اساس درصد اختلاف طول و تطابق فضایی (با منطقه حائل ۱۰ متری) سال ۲۰۱۶

Table (5): First meander calibration based on length difference percent and spatial agreement (with a 10-meter buffer) in 2016

شاخص طیفی	اختلاف طول (%)	تطابق فضایی (%)
EWI	۱/۱۵	۹۸/۸۵
WIR	۳/۰۰	۹۷/۰۰
NDVI	۱/۲۶	۹۸/۷۳
NDWI	۰/۴۱	۹۹/۵۹
MNDWI	۱/۶۳	۱۰۱/۶۳
AWEIsh	۱/۳۸	۹۸/۶۲

قوس ۲: مطابق جدول ۶ شعاع قوس محاسباتی با شاخص AWEIsh (۱۹۷/۱۴ متر) و شاخص MNDWI (۱۹۵/۰۵)، نزدیک‌ترین به شعاع واقعی (۱۹۶/۱۴) بودند. شاخص MNDWI زاویه مرکزی را ۲۱۴/۰۹ درجه (واقعی: ۲۱۲/۰۵ درجه)، درجه انحنا را ۱/۵۷ (واقعی: ۱/۵۶)، درصد اختلاف طول را ۰/۴۰٪ و درصد تطابق منطقه حائل را ۱۰۰/۴۰٪ محاسبه کرد که میان سایر شاخص‌های طیفی بهترین نتیجه را نشان داد (جدول ۷).

جدول (۶): مشخصات هندسی قوس دوم سال ۲۰۱۶

Table (6): Second meander geometric characteristics in 2016

شاخص طیفی	طول قوس (m)	شعاع قوس (m)	زاویه مرکزی (درجه)	درجه انحنا
EWI	۷۹۸/۴۶	۲۰۰/۹۲	۲۲۷/۶۹	۱/۷۱
WIR	۷۵۹/۳۳	۲۰۱/۵۷	۲۱۵/۸۳	۱/۶۷
NDVI	۷۷۳/۰۸	۲۰۳/۴۳	۲۱۷/۷۴	۱/۷۰
NDWI	۷۶۸/۷۸	۱۹۸/۴۱	۲۲۲/۰۱	۱/۶۹
MNDWI	۷۲۸/۸۳	۱۹۵/۰۵	۲۱۴/۰۹	۱/۵۷
AWEIsh	۷۳۷/۶۴	۱۹۷/۱۴	۲۱۴/۳۸	۱/۶۷
Real (2016)	۷۲۵/۹۳	۱۹۶/۱۴	۲۱۲/۰۵	۱/۵۶

جدول (۷): واسنجی قوس دوم بر اساس درصد اختلاف طول و تطابق فضایی (با منطقه حائل ۱۰ متری) سال ۲۰۱۶

Table (7): Second meander calibration based on length difference percent and spatial agreement (with a 10-meter buffer) in 2016

شاخص طیفی	اختلاف طول (%)	تطابق فضایی (%)
EWI	۹/۹۹	۲۳/۳۷
WIR	۴/۶۰	۵۰/۹۸
NDVI	۶/۵۰	۴۲/۹۷
NDWI	۵/۹۰	۲۷/۲۰
MNDWI	۰/۴۰	۱۰۰/۴۰
AWEIsh	۱/۶۱	۸۲/۶۲

- قوس ۳: شاخص NDVI، شعاع قوس را ۵۶/۳۹۱ متر (واقعی: ۵۴/۱۲ متر) و زاویه مرکزی را ۲۶۸/۸۷ درجه (مقدار واقعی: ۲۶۷/۰۷ درجه) برآورد کرد که نزدیکترین مقدار به مقادیر واقعی میان شاخص‌ها بود (جدول ۸). همچنین شاخص NDVI با ۹۱/۸۲٪ بالاترین تطابق فضایی را نشان داد. از طرفی برای این قوس شاخص MNDWI با ۱/۴۰٪ نزدیکترین به درجه انحنا واقعی (۱/۴۱) بود و شاخص AWEIsh با ۱/۲۳٪ و شاخص MNDWI با ۲/۲۲٪ کمترین اختلاف طول را داشتند (جدول ۹).

جدول (۸): مشخصات هندسی قوس سوم سال ۲۰۱۶
Table (8): Third meander geometric characteristics in 2016

شاخص طیفی	طول قوس (m)	شعاع قوس (m)	زاویه مرکزی (درجه)	درجه انحنا
EWI	۲۸۳/۵۷	۶۴/۷۲	۲۵۱/۰۲	۱/۶۰
WIR	۲۶۰/۱۷	۷۱/۰۸	۲۰۹/۷۲	۱/۴۶
NDVI	۲۶۴/۶۲	۵۶/۳۹	۲۶۸/۸۷	۱/۴۸
NDWI	۲۶۵/۸۲	۶۰/۸۳	۲۵۰/۳۶	۱/۴۸
MNDWI	۲۵۷/۸۷	۶۵/۵۵	۲۲۵/۴۱	۱/۴۰
AWEIsh	۲۵۵/۳۶	۶۳/۷۲	۲۲۹/۶۳	۱/۴۳
Real (2016)	۲۵۲/۲۷	۵۴/۱۲	۲۶۷/۰۷	۱/۴۱

جدول (۹): واسنجی قوس سوم بر اساس درصد اختلاف طول و تطابق فضایی (با منطقه حائل ۱۰ متری) سال ۲۰۱۶

Table (9): Third meander calibration based on length difference percent and spatial agreement (with a 10-meter buffer) in 2016

شاخص طیفی	اختلاف طول (%)	تطابق فضایی (%)
EWI	۱۲/۴۱	۵۲/۳۰
WIR	۳/۱۳	۸۶/۶۹
NDVI	۴/۹۰	۹۱/۸۲
NDWI	۵/۳۷	۸۵/۳۱
MNDWI	۲/۲۲	۸۱/۷۷
AWEIsh	۱/۲۳	۷۹/۵۳

- قوس ۴: شاخص AWEIsh شعاع قوس را ۱۸۱/۱۶ متر و شاخص MNDWI، شعاع قوس را ۱۸۱/۱۷ متر (واقعی: ۱۸۰/۶۸ متر) برآورد کردند. همچنین شاخص MNDWI زاویه مرکزی را ۱۶۶/۳۲ درجه (واقعی: ۱۶۶/۱۱ درجه)، طول قوس را ۵۲۵/۸۸ متر (واقعی: ۵۲۳/۸۴ متر)، اختلاف طول را ۰/۳۹٪ و تطابق فضایی را ۱۰۰/۳۹٪ تخمین زد که بیشترین تطابق با مقدار واقعی را داشت (جدول ۱۰ و ۱۱). همچنین مقدار درجه انحنا محاسباتی با شاخص MNDWI (۱/۴۱) برابر با مقدار درجه انحنا واقعی مسیر (۱/۴۱) بود.

جدول (۱۰): مشخصات هندسی قوس چهارم سال ۲۰۱۶
Table (10): Fourth meander geometric characteristics in 2016

شاخص طیفی	طول قوس (m)	شعاع قوس (m)	زاویه مرکزی (درجه)	درجه انحنا
EWI	۵۳۷/۰۲	۱۷۵/۳۴	۱۷۵/۴۸	۱/۴۷
WIR	۵۳۰/۷۹	۱۸۱/۵۳	۱۶۷/۵۳	۱/۴۲
NDVI	۵۴۴/۱۴	۱۷۸/۳۱	۱۷۴/۸۴	۱/۴۷
NDWI	۵۲۷/۸۴	۱۷۸/۵۱	۱۶۹/۴۲	۱/۴۲
MNDWI	۵۲۵/۸۸	۱۸۱/۱۷	۱۶۶/۳۲	۱/۴۱
AWEIsh	۵۳۲/۲۴	۱۸۱/۱۶	۱۶۸/۳۴	۱/۴۲
Real (2016)	۵۲۳/۸۴	۱۸۰/۶۸	۱۶۶/۱۱	۱/۴۱

جدول (۱۱): واسنجی قوس چهارم بر اساس درصد اختلاف طول و تطابق فضایی (با منطقه حائل ۱۰ متری) سال ۲۰۱۶

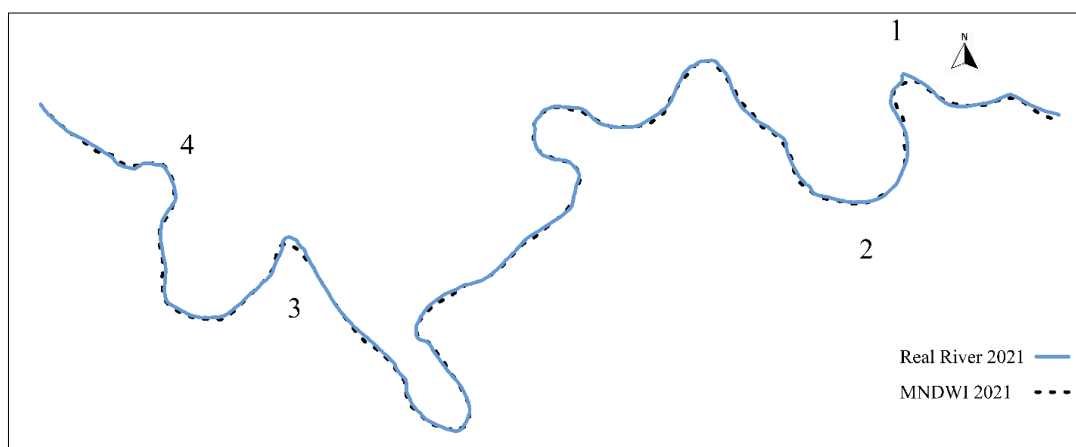
Table (11): Fourth meander calibration based on length difference percent and spatial agreement (with a 10-meter buffer) in 2016

شاخص طیفی	اختلاف طول (%)	تطابق فضایی (%)
EWI	۲/۵۲	۸۷/۱۴
WIR	۱/۳۳	۱۰۱/۳۳
NDVI	۳/۸۸	۹۳/۱۳
NDWI	۰/۷۶	۱۰۰/۷۶
MNDWI	۰/۳۹	۱۰۰/۳۹
AWEIsh	۱/۶۰	۹۸/۶۲

نتایج فوق نشان می‌دهند که شاخص MNDWI به دلیل برتری معنادار معیارهای ارزیابی شامل RMSE، اختلاف طول، تطابق فضایی و نیز ارائه مقادیر نزدیک‌تر به واقعیت در پارامترهای هندسی قوس‌ها (شعاع، زاویه مرکزی و درجه انحنا)، از دقت و قابلیت اطمینان بالاتری در تخمین محور مرکزی رودخانه اترک برخوردار است. در تحلیل قوس‌های منتخب نیز همین شاخص به‌طور کلی در معیارهای شعاع قوس، زاویه مرکزی، اختلاف طول و درجه انحنا، مقادیر نزدیک‌تری به واقعیت ارائه داد. با این حال، در قوس سوم، شاخص NDVI در شعاع قوس و زاویه مرکزی عملکرد بهتری داشت. در قوس اول نیز، شاخص EWI در شعاع قوس و شاخص NDWI در اختلاف طول، نتایج بهتری نشان دادند.

نتایج صحت‌سنجی برای سال ۲۰۲۱ و جابه‌جایی قوس‌ها

با انتخاب شاخص MNDWI به عنوان دقیق‌ترین شاخص، صحت‌سنجی برای سال ۲۰۲۱ انجام شد (شکل ۶). درجه انحنا محور مرکزی محاسباتی (۱/۹۱) در مقایسه با درجه انحنا واقعی (۱/۸۸)، درصد اختلاف طول ۱/۴۶٪ و درصد تطابق فضایی ۸۵/۹۵٪ دقت قابل‌قبولی را نشان دادند (جدول ۱۲).



شکل (۶): مقایسه محور مرکزی مشاهداتی و به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای برای رودخانه اترک در سال ۲۰۲۱ (صحت‌سنجی)

Figure (6): Comparison of the observed and calculated centerline for Atrak River in 2021 (verification)

جدول (۱۲): نتایج صحت‌سنجی برای سال ۲۰۲۱

Table (12): Verification results in 2021

شاخص طیفی	اختلاف طول (%)	تطابق فضایی (%)
MNDWI	۱/۴۶	۸۵/۹۵

طول قوس واقعی، محاسباتی و درصد اختلاف طول برای ۴ قوس انتخابی در سال ۲۰۲۱ در جدول ۱۳ ارائه شده است:

جدول (۱۳): طول قوس واقعی، محاسباتی و درصد اختلاف طول برای ۴ قوس انتخابی سال ۲۰۲۱

Table (13): Real and calculated meander length and length difference percent for 4 selected meanders in 2021

	قوس ۱	قوس ۲	قوس ۳	قوس ۴
MNDWI	۲۴۴/۹۱	۷۹۱/۹۵	۱۱۰/۴۸	۳۴۱/۲۹
Real	۲۶۷/۲۹	۷۸۸/۰۴	۹۹/۵۲	۳۳۸/۷۴
اختلاف طول (%)	۸/۳۷	۰/۵۰	۱۱/۰۱	۰/۷۵

درجه انحنای واقعی و محاسباتی برای ۴ قوس انتخابی با شاخص MNDWI برای سال ۲۰۲۱ به شرح جدول ۱۴ است:

جدول (۱۴): درجه انحنای واقعی و محاسباتی برای ۴ قوس انتخابی برای سال ۲۰۲۱

Table (14): Real and calculated sinuosity for 4 selected meanders in 2021

	قوس ۱	قوس ۲	قوس ۳	قوس ۴
MNDWI	۱/۶۹	۱/۷۳	۱/۳۴	۱/۴۵
Real	۱/۶۴	۱/۷۹	۱/۶۵	۱/۵۶

شعاع قوس واقعی و محاسباتی برای ۴ قوس انتخابی با شاخص MNDWI برای سال ۲۰۲۱ مطابق جدول ۱۵ ارائه شده است:

جدول (۱۵): شعاع قوس واقعی و محاسباتی برای ۴ قوس انتخابی برای سال ۲۰۲۱

Table (15): Real and calculated meander radius for 4 selected meanders in 2021

	قوس ۱	قوس ۲	قوس ۳	قوس ۴
MNDWI	۶۷/۹۷	۲۲۰/۳۵	۳۶/۴۱	۱۰۳/۸۳
Real	۸۰/۲۲	۲۱۳/۲۵	۲۹/۲۳	۱۱۲/۱۷

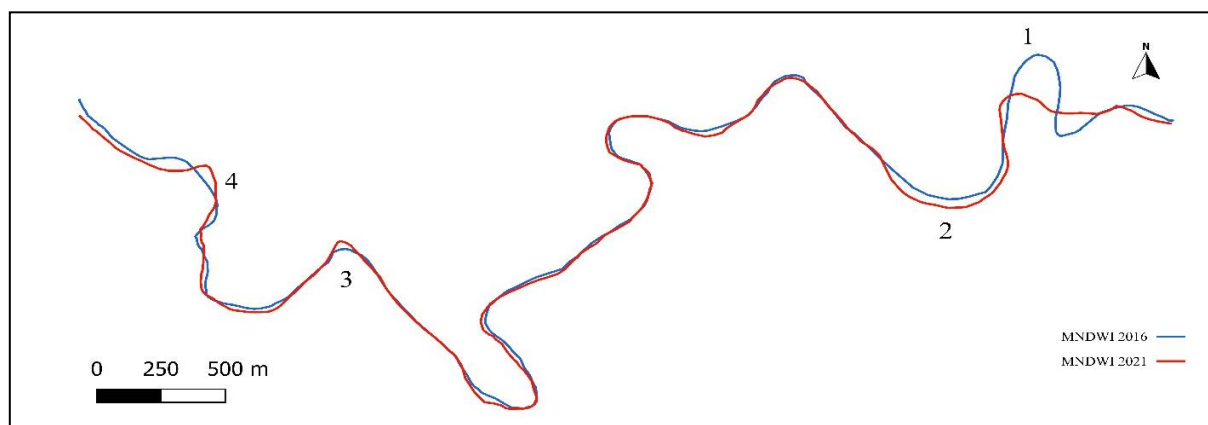
زاویه مرکزی واقعی و محاسباتی برای ۴ قوس انتخابی با شاخص MNDWI برای سال ۲۰۲۱ به شرح جدول ۱۶ است.

جدول (۱۶): زاویه مرکزی واقعی و محاسباتی برای ۴ قوس انتخابی برای سال ۲۰۲۱

Table (16): Real and calculated central angle for 4 selected meanders in 2021

	قوس ۱	قوس ۲	قوس ۳	قوس ۴
MNDWI	۲۰۶/۴۳	۲۰۵/۹۲	۱۷۳/۸۵	۱۸۸/۳۳
Real	۱۹۰/۹۱	۲۱۱/۷۳	۱۹۵/۱۱	۱۷۳/۰۳

برتری همگن شاخص MNDWI در واسنجی شاخص‌های طیفی و دقت بالای این شاخص در صحت‌سنجی خط مرکزی رودخانه استخراج شده، سبب انتخاب این شاخص به‌عنوان دقیق‌ترین شاخص برای تخمین نرخ جابه‌جایی رودخانه در بازه ۵ ساله مورد مطالعه شد (شکل ۷).



شکل (۷): جابه‌جایی محور مرکزی محاسباتی رودخانه
Figure (7): Calculated river centerline migration

جابه‌جایی و نرخ جابه‌جایی چهار قوس بین سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ مطابق جدول ۱۷ و ۱۸ محاسبه شد:

جدول (۱۷): جابه‌جایی واقعی و محاسباتی راس ۴ قوس (متر) در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱

Table (17): Real and calculated 4 meander apex migrations (m), 2016–2021

	قوس ۱	قوس ۲	قوس ۳	قوس ۴
MNDWI	۲۳۱/۵۶	۲۳/۵۷	۵۰/۷۷	۵۰/۱۰
Real	۲۳۰/۵۹	۲۳/۲۷	۶۱/۸۲	۵۰/۲۵

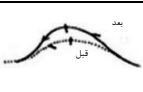
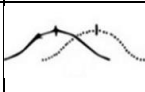
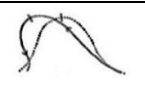
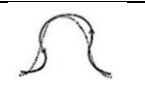
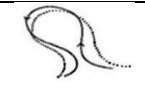
جدول (۱۸): نرخ جابه‌جایی واقعی و محاسباتی ۴ قوس (بر حسب متر در سال)

Table (18): Real and calculated 4 meander migration Rates (m/yr)

	قوس ۱	قوس ۲	قوس ۳	قوس ۴
MNDWI	۴۶/۳۱	۴/۷۱	۱۰/۱۵	۱۰/۰۲
Real	۴۶/۱۲	۴/۶۵	۱۲/۳۶	۱۰/۰۵

نتایج نشان‌دهنده دقت بالای MNDWI در تخمین جابه‌جایی و نرخ جابه‌جایی، به‌ویژه در قوس‌های ۱، ۲ و ۴ است. همچنین الگوی تغییرات ۴ قوس انتخابی بر اساس مطالعات شوم مطابق جدول ۱۹ ارائه گردید.

جدول (۱۹): تغییرات در الگوی قوس‌ها بر اساس مطالعات شوم
 Table (19): Meander pattern changes based on Schumm's studies

قوس	گسترش	انتقال	چرخش	همگرایی	میان‌بر گردنه قوس	میان‌بر کانال قوس
۱						
۲	✓		✓			
۳	✓					
۴	✓		✓	✓		✓

مطالعات دیرینه‌شناسی رودخانه‌ها نشان می‌دهد که هنگامی که در پیچان رودها، میان‌بر ایجاد می‌شود، طول رودخانه کوتاه‌تر شده و شیب طولی آن افزایش می‌یابد، درحالی‌که با توسعه پیچان رودها، طول رودخانه افزایش یافته و شیب آن کاهش می‌یابد. هرگاه آب و رسوبات در مجرای رودخانه جریان یابند، انتظار تغییر الگو در مسیر رودخانه وجود دارد. جدول ۱۹ حالت‌های مختلف رفتار حلقه‌های پیچان رودی را مطابق مشاهدات بریس^۱ (۵۸۳:۱۹۷۴) و مطالعات شوم^۲ (۱۳:۱۹۸۵) نشان می‌دهد. تمام این تغییرات مربوط به رودخانه‌هایی است که می‌توان آن‌ها را ناپایدار تلقی کرد. با این حال، درجات مختلفی از پایداری وجود دارد و حتی یک رودخانه پایدار ممکن است شاهد پدیده‌های قطع‌شدگی پیچان رودها و همچنین جابجایی و توسعه سریع آن‌ها باشد. همان‌طور که در جدول ۱۹ نشان داده شده است، هر ۴ قوس ناپایدار بوده و الگوی چرخش و گسترش الگوی غالب در بخش‌های پرپیچ‌وخم هستند. همچنین قوس ۴ فعال‌ترین قوس می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و شاخص‌های طیفی، تغییرات مورفولوژیکی چهار قوس از رودخانه اترک داخلی در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ تحلیل شد. نتایج نشان داد که شاخص MNDWI با RMSE برابر ۶۰۹ متر، درصد اختلاف طول ۰/۴۷ درصد و تطابق فضایی ۹۴/۱۳ درصد در سال ۲۰۱۶، دقیق‌ترین عملکرد را در استخراج محور مرکزی رودخانه ارائه می‌دهد. این برتری MNDWI را می‌توان از منظر طیفی تحلیل کرد؛ شاخص MNDWI با ترکیب باند سبز (که بازتاب نسبتاً بالایی از آب دارد) و باند مادون قرمز میانی (SWIR1، که آب در آن جذب بالایی دارد)، تداخل طیفی ناشی از پوشش گیاهی حاشیه‌ای، رسوبات آبرفتی و سازه‌های انسانی در منطقه مطالعاتی (روستاهای کوند و هوتن) را به حداقل می‌رساند. شاخص MNDWI به دلیل بهره‌گیری از باند مادون قرمز میانی (SWIR1) در ترکیب با باند سبز، عملکرد بهتری در استخراج مسیر رودخانه اترک پایینی نسبت به سایر شاخص‌ها نشان می‌دهد. این برتری عمدتاً ناشی از ویژگی‌های طیفی منحصربه‌فرد باند SWIR است که بازتاب بسیار کم آب در این محدوده طیفی را با بازتاب بالاتر پوشش‌های غیرآبی مانند خاک خشک، پوشش گیاهی و سطوح مصنوعی ترکیب می‌کند. در محیط‌های پیچیده نظیر منطقه روستاهای کوند و هوتن که ترکیبی از زمین‌های کشاورزی، پوشش گیاهی حاشیه‌ای، رسوبات، و سازه‌های انسانی است، شاخص MNDWI با کاهش تداخل طیفی ناشی از این عوامل، تمرکز بهتری بر تشخیص دقیق مرزهای آب دارد. برخلاف شاخص‌هایی مانند NDWI یا NDVI که از باند مادون قرمز نزدیک (NIR) استفاده می‌کنند و تحت تأثیر بازتاب بالای گیاهان یا خاک مرطوب قرار می‌گیرند، MNDWI با حذف این اثرات، خطاهای ناشی از اشتباه‌گرفتن آب با پوشش‌های مشابه را به حداقل می‌رساند. همچنین، آب‌های گل‌آلود یا کم‌عمق

¹ Brice

² Schumm

که در باندهای مرئی و NIR ممکن است با سایر سطوح اشتباه گرفته شوند، در باند SWIR به دلیل جذب بالا و بازتاب نزدیک به صفر، به وضوح شناسایی می‌شوند. این شاخص حتی در شرایط جوی نامساعد یا مناطق سایه‌دار نیز پایدارتر عمل می‌کند، زیرا باند SWIR نسبت به ابر و سایه حساسیت کمتری دارد. این تحلیل طیفی با یافته‌های Du و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد، که نشان داد MNDWI در محیط‌های پیچیده شهری و کشاورزی، مساحت آب را دقیق‌تر برآورد می‌کند و منجر به کاهش چشمگیر نویز و بیش‌برآورد مساحت نسبت به شاخص NDWI می‌شود. همچنین، تلفیق MNDWI با فیلترهای پیش‌پردازش (مانند گاوسی پایین‌گذر برای حذف نویز بالاگذر برای تقویت لبه‌ها) در این مطالعه، انطباق فضایی را تا ۹۴٪ بهبود بخشید، که این رویکرد را برای رودخانه‌های با آب‌ها و لاپلاسی

عرض متوسط (کمتر از ۵۰ متر) کارآمدتر می‌سازد. دقت کمتر MNDWI، در قوس ۳، ممکن است به تغییرات شدید در مسیر رودخانه، وجود موانع طبیعی یا انسانی و یا محدودیت وضوح ۱۰ متری تصاویر سنتینل ۲ مرتبط باشد. در چنین مواردی، استفاده از شاخص‌های ترکیبی یا روش‌های پیشرفته‌تر پردازش تصویر می‌تواند دقت را بهبود بخشد.

اگرچه شاخص‌های متعددی مانند NDVI و NDPI نیز برای تشخیص عوارض آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما عملکرد آن‌ها در محیط‌های همگن که از نظر نوع پوشش زمین، بسیار یکنواخت و یکدست است، بهینه می‌باشد. برای مثال، شاخص NDVI که عمدتاً برای پوشش گیاهی طراحی شده، در تمایز بین آب‌های کم‌عمق و خاک‌های مرطوب با شکست مواجه می‌شود. از طرفی، شاخص‌هایی مانند NDWI که از باند مادون قرمز نزدیک (NIR) استفاده می‌کنند، به دلیل بازتاب بالای پوشش گیاهی حاشیه رودخانه و همچنین نفوذپذیری کمتر NIR در آب‌های حاوی رسوبات معلق، ممکن است مرزهای رودخانه را با خطا مواجه سازند. این در حالی است که باند SWIR به کار رفته در MNDWI، فارغ از میزان شفافیت یا کدورت آن تقریباً به طور کامل توسط آب جذب می‌شود. این ویژگی مهم، MNDWI را به ابزاری برتر برای رودخانه‌ای مانند اترک، که دارای بار رسوبی معلق و آب‌های گل‌آلود است، تبدیل می‌کند.

تحلیل قوس‌های منتخب نشان‌دهنده ناپایداری مورفولوژیکی رودخانه اترک در محدوده مطالعاتی است. قوس ۱ با جابه‌جایی ۲۳۱/۵۶ متر و نرخ ۴۶/۳۱ متر در سال، فعال‌ترین قوس شناسایی شد، که می‌تواند به عوامل هیدروژئولوژیکی و انسانی نسبت داده شود. از منظر مورفودینامیک، این فعالیت با الگوی چرخش و گسترش همخوانی دارد، که طبق مدل‌های شوم (۱۹۸۵)، در رودخانه‌های آبرفتی با شیب ملایم (مانند شیب متوسط ۰.۰۰۳ رودخانه اترک) ناشی از افزایش بار رسوب و فرسایش جانبی است. از نظر طبیعی، رودخانه از الگوی پیچان‌رودی تبعیت می‌کند که در آن فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی رخ می‌دهد. این فرآیند به خودی خود باعث پیشروی قوس‌ها می‌شود، اما مقیاس بالای تغییرات مشاهده‌شده، تنها با این مکانیزم قابل توضیح نیست. به نظر می‌رسد افزایش بار رسوبی ورودی از بالادست، همراه با شیب ملایم رودخانه، شرایط را برای ناپایداری جانبی تشدید کرده است. در کنار این عوامل، فعالیت‌های انسانی نیز سهم بزرگی داشته‌اند.

این پژوهش قابلیت بالای شاخص MNDWI در استخراج محور مرکزی رودخانه‌ای با الگوی ریخت‌شناسی پیچیده مانند اترک را اثبات می‌کند. قابل ذکر است که دقت و پایایی این شاخص در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مورد تأیید قرار گرفت و استحکام آن برای کاربردهای عملی تضمین شد. بر این اساس، شاخص MNDWI می‌تواند به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای پایش تغییرات و جابه‌جایی‌های رودخانه اترک در دوره‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. این قابلیت از این جهت حائز اهمیت است که به عنوان روشی مقرون به صرفه و دقیق، امکان تعیین خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه را بدون نیاز به مسیر واقعی رودخانه و داده‌های هیدرولیکی، صرفاً با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و محاسبه این شاخص، فراهم می‌کند. این رویکرد با بهره‌گیری از داده‌های رایگان و ابزارهای متن باز، نه تنها چارچوبی قابل اعتماد برای مدیریت و مطالعه محیط‌های رودخانه‌ای فراهم می‌کند، بلکه زمینه‌ساز کاربردهای آتی در پایش رودخانه‌ها با استفاده از سنجش از دور شد. از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند در مدیریت منابع آبی استان گلستان مانند پیش‌بینی جابه‌جایی به سمت اراضی کشاورزی و کاهش ریسک سیلاب مفید باشد.

نتایج با مطالعات مشابه در سایر مناطق نیز نشان می‌دهد که شاخص MNDWI در بیشتر موارد عملکرد بهتری دارد (طاهریان ۱۳۹۶: ۱۲۰-۱۱۹؛ ستوده‌پور و همکاران، ۱۴۰۳: ۷۱). این نتایج می‌توانند در مطالعات و مدیریت منابع آبی، به ویژه در مناطقی مقایسه

- با تغییرات زیاد در مسیر رودخانه‌ها، مورد استفاده قرار گیرند. همچنین استفاده از شاخص MNDWI می‌تواند به بهبود دقت پایش تغییرات رودخانه‌ها کمک کند. در ادامه این تحقیق و برای مطالعات آینده، موارد زیر برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردند:
- ۱- استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح مکانی بالاتر به منظور افزایش دقت مکانی استخراج محور مرکزی رودخانه
 - ۲- به کارگیری ترکیب بهینه شاخص‌های طیفی متناسب با ویژگی‌های هیدرولوژیکی و پوشش اراضی منطقه
 - ۳- تلفیق روش‌های یادگیری ماشین با شاخص‌های طیفی برای بهبود خودکار سازی و کاهش خطای انسانی
 - ۴- توسعه پایگاه داده‌های زمینی جامع از طریق برداشت‌های میدانی مستمر برای افزایش دقت واسنجی و اعتبارسنجی نتایج

References

- Ahmazadeh, H., Saeedabadi, R & Nouri, E. (2015). A Study and Zoning of the Areas Prone to Flooding with an Emphasis on Urban Floods (Case Study: City of Maku). *Journal of Hydrogeomorphology*, 2, 1-23. (In Persian).
- Asghari Sarskanrood, S. and Poorahmed, M. (2016). Detection and Extraction of Changes in Zarineh Rud River's Variation between 1989 and 2014 via Remote Sensing Data. *Journal of Hydrogeomorphology*, 2(5), 1-16. (In Persian).
- Barzali, M., Azimi, M., Abdolhosseini, M., Lotfi, A. (2022). The Assessment of Rangeland Ecosystem Services in sediment retention via InVEST Model (Atrak Watershed, Golestan Province). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 29(1), 133-144. (In Persian).
- Faraji, M. & Fatemi, B. (2022) Comparative analysis of remote sensing water indexes for wetland water body monitoring using Landsat images and the Google Earth Engine Platform (A Case study: Meighan Wetland, Iran). *Journal of geospatial Information Technology*, 10 (2), 39-62. (In Persian).
- Gamshadzaei, M.H., Rahimzadegan, M. (2015). Determining the Surface Area of Water Bodies Using Satellite Imagery and Applying Spectral Indices. 2nd National Conference of Water Crisis in Iran and the Middle East, Shiraz. (In Persian).
- Meftah Halaghi M. (2011). Use of Different Water Quality Indexes for Purification of Water, Case Study: Atrak river. *Water Soil Cons*, 18(2), 211-20. (In Persian).
- Rezaei Moghaddam, M. H. , Mohammadzade, K. and Pishnamaz Ahmadi, M. (2020). Investigating and comparing object-oriented algorithms used for extraction of water bodies from sentinel imagery. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(115), 21-34. (In Persian).
- Sharafi, S., Shami, A., & Yamani, M. (2014). Morphological changes of river Atrak a period of 20 years. *Geographical planning of space quarterly journal*, 4(14), 129-150. (In Persian).
- Sotoudehpour, A., Madadi, A., & Asghari, S. (2024). Comparing water extraction indexes using landsat8 and sentinel2A images. Case study: Bushehr shoreline. *Journal of Marine Science and Technology*, 23(1), 59-83. (In Persian).
- Taherian E, khastar-Broujeni M, Samadi H. (2017). Comparison of sub pixel MNDWI and AWEI shadow indices capability for shallow and narrow river extraction. *Engineering Journal of Geospatial Information Technology*, 5 (2) ,99-122. (In Persian).
- Arfa-Fathollahkhani, A., Ayyoubzadeh, S. A., Shafizadeh-Moghadam, H., & Mianabadi, H. (2022). Spatiotemporal characterization and analysis of river morphology using long-term landsat imagery and stream power. *Water*, 14(22), 3656.
- Basnayaka, V., Samarasinghe, J. T., Gunathilake, M. B., Muttill, N., Hettiarachchi, D. C., Abeynayaka, A., Rathnayake, U. (2022). Analysis of meandering river morphodynamics using satellite remote sensing data—an application in the lower Deduru Oya (River), Sri Lanka. *Land*, 11(7), 1091.
- Brice, J. C. (1974). Evolution of meander loops. *Geol. Soc. Am. Bull*, 85, 581-86.
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241-252.

- Du Y, Zhang Y, Ling F, Wang Q, Li W, Li X. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*. 2016; 8(4):354.
- Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. and Proud, S.R. (2014). Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35.
- Hamada, Y., Walston, L. J., & Hayse, J. W. (2022). Estimating Channel Width for the Middle Green River Using Remote Sensing (No. ANL/EVS-20/10). Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL (UnitedStates).
- Jiang, H., Feng, M., Zhu, Y., Lu, N., Huang, J., & Xiao, T. (2014). An Automated Method for Extracting Rivers and Lakes from Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 6(6), 5067-5089.
- Jiang W, Ni Y, Pang Z, Li X, Ju H, He G, Lv J, Yang K, Fu J, Qin X. (2021). An Effective Water Body Extraction Method with New Water Index for Sentinel-2 Imagery. *Water*, 13(12),1647.
- Leinenkugel, P. (2010). The Combined Use of Optical and SAR Data for Large Area Impervious Surface Mapping. Doctoral dissertation, University Salzburg.
- Maghsoudi, M. , Zamanzadeh, S. , Yamani, M. and Hajizadeh, A. (2017) Morphometric Assessment of Meandering River in Arid Region Using Improvement Model (Case Study: Maroon River). *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 358-377.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
- Nagel, G. W., Darby, S. E., Leyland, J. (2023). The use of satellite remote sensing for exploring river meander migration. *Earth-Science Reviews*, 104607,1-15.
- Pham-Duc, B. (2024). Comparison of multi-source satellite remote sensing observations for monitoring the variations of small lakes: a case study of Dai Lai Lake (Vietnam). *Journal of Water and Climate Change*, 15(1), 157-170.
- Schumm, S. A. (1985). Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13(1), 5–27.
- Shen, L., Li, C. (2010). Water body extraction from Landsat ETM+ imagery using adaboost algorithm. In 2010 18th International Conference on Geoinformatics. IEEE.
- Wang, S., Baig, M. H. A., Zhang, L., Jiang, H., Ji, Y., Zhao, H., & Tian, J. (2015). A simple enhanced water index (EWI) for percent surface water estimation using Landsat data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(1), 90-97.
- Wang, Z., Li, J., Lin, Y., Meng, Y., & Liu, J. (2020). GrabRiver: graph-theory-based river width extraction from remote sensing imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1-5.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.