

Research Paper

**Classification and Morphodynamic Analysis of Meander Forms in the Atrak River: An Integrated Multi-temporal Approach Using High-Resolution Satellite and UAV Data; Case Study: Chat-Gonbad Reach**

Mohammadreza Gharibreza¹ , Aiding Kornejady^{2*} , Behrooz Mohseni³ , Saeid Shabani⁴

1- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: gharibreza@scwmri.ac.ir

2- Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. Email: a.kornejady@areeo.ac.ir

3- Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. Email: b.mohseni@areeo.ac.ir

4- Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. Email: Saeidshabani07@gmail.com

Keywords

Geomorphology, Morphodynamics, Satellite, UAV, Floodplain, Chat-Gonbad, Golestan Province, Iran.

Receive: 2026/01/04

Accepted: 2026/06/13

Published: 2024/00/00

ABSTRACT**Introduction**

Meandering rivers represent one of the most dynamic fluvial systems, characterized by continuous adjustments in planform geometry, channel migration, and sediment redistribution in response to hydrological variability, sediment supply, and extreme flood events. Multi-temporal approaches enable the detection of gradual trends as well as abrupt changes related to extreme hydrological events. Meanwhile, the integration of UAV-based data has allowed for unprecedented spatial resolution and accuracy in identifying short-term channel adjustments. Morphodynamic response of meandering rivers to extreme flood events, particularly in terms of transitions between simple and complex planform types, remains insufficiently documented, especially in Iranian river systems. This study addresses these gaps by providing a detailed, multi-temporal morphodynamic analysis of meandering reaches along the Atrak River in the Chat-Gonbad area, northeastern Iran. By integrating high-resolution satellite imagery and UAV-derived data, and by combining qualitative classification of meander forms with quantitative morphometric analysis of the channel centerline, the study aims to clarify how meandering river forms evolve over two decades and respond to a major flood event (the 2019 flood).

Methodology

The study focuses on a meandering reach of the Atrak River within the Chat-Gonbad area of Golestan Province. To capture morphodynamic changes over time, a multi-temporal dataset was employed, consisting of high-resolution satellite images from QuickBird (2005), SuperView (2019), Pléiades (2019), and UAV imagery (2024).

*Corresponding Author: Kornejady. A. Email: a.kornejady@areeo.ac.ir

How to cite this article: Gharibreza, Mohammadreza., Kornejady, Aiding., Mohseni, Behrooz., & Shabani, Saeid. (2026). Classification and Morphodynamic Analysis of Meander Forms in the Atrak River: An Integrated Multi-Temporal Approach Using High Resolution Satellite and UAV Data; Case Study: Chat-Gonbad Reach. *Hydrogeomorphology*, 13(48): 107 – 132.

DOI: [10.22034/hyd.2026.71069.1832](https://doi.org/10.22034/hyd.2026.71069.1832)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

These datasets represent conditions before and after the major flood event of 2019, enabling both long-term trend analysis and event-based assessment. All imagery was geometrically corrected and co-registered to ensure spatial consistency. River centerlines were extracted for each time period using visual interpretation supported by GIS analysis. The centerline was selected as the primary indicator of morphodynamic change because it integrates the cumulative effects of channel migration, erosion, deposition, and hydrodynamic forces, such as centrifugal acceleration and secondary (helical) flows toward the outer bank. The study reach was subdivided into 21 meandering units, each analyzed individually to capture spatial variability in morphodynamic behavior. Meander forms were classified qualitatively based on established geomorphological criteria, distinguishing between straight, simple meandering, and complex meandering patterns, as well as symmetric and asymmetric geometries. Alongside this classification, quantitative morphometric parameters, including sinuosity and changes in channel length, were calculated for each unit and time interval. Morphodynamic changes were categorized into main evolutionary trends, including:

1. Positive longitudinal development accompanied by downstream migration,
2. Negative longitudinal development with downstream displacement, and
3. Lateral expansion and channel widening.

This combined qualitative–quantitative framework allowed for a comprehensive interpretation of river behavior, linking geometric transformations to underlying hydrological and geomorphic processes.

Results and Discussion

Analysis of multi-temporal data reveals a clear trend toward increased planform complexity of the Atrak River meanders between 2005 and 2024. One of the most prominent findings is the complete disappearance of straight channels, with their number decreasing from two in 2005 to zero in 2024. This change indicates a progressive shift away from low-sinuosity forms toward more developed meandering patterns. Conversely, meandering channels with high sinuosity (greater than 1.5) increased over the study period. Specifically, the number of highly sinuous meanders rose from nine in 2005 to ten in 2024, reflecting an overall enhancement of geometric complexity and channel curvature. These results demonstrate that the river system has undergone sustained morphodynamic adjustment rather than oscillating around a stable equilibrium. The impact of the 2019 flood event is particularly evident in the transition from simple symmetric meanders to complex asymmetric forms. Immediately following the flood, the number of simple symmetric channels declined sharply (from nine to three), while complex asymmetric channels increased (from one to three). This rapid reorganization within a short time frame highlights the critical role of extreme hydrological events as triggers for morphological restructuring. Longitudinal analysis further indicates that positive longitudinal development accompanied by downstream migration is the dominant evolutionary trend across most meandering units. This pattern reflects active channel mobility and continued downstream adjustment of the river system. In contrast, negative longitudinal development, observed in several specific units, suggests localized constraints related to reduced discharge, channel slope changes, or boundary conditions imposed by valley geometry or human interventions. Lateral development and channel widening were also observed in selected segments, indicating zones of enhanced bank erosion and sediment redistribution. The spatial heterogeneity of these responses underscores the importance of reach-scale analysis rather than reliance on averaged metrics over long river sections. Compared with previous studies, the results align with broader observations that increased hydrological variability and extreme events promote channel complexity and asymmetric development. However, the high spatial resolution and dense temporal framework employed in this study enable a more precise quantification of short-term morphodynamic responses. The integration of UAV data with satellite imagery proves especially valuable in capturing subtle but geomorphologically significant changes that may be overlooked in coarser-resolution analyses. Overall, the findings demonstrate that combining qualitative geomorphological classification with quantitative morphometric indicators provides a robust framework for interpreting meandering river evolution. This approach not only improves understanding of past and present dynamics but also enhances the potential for predicting future morphological trajectories.

Conclusions

This study presents a comprehensive analysis of the morphodynamic evolution of meandering river forms along the Atrak River over a 20-year period. The results show a clear progression toward increased channel complexity, driven by both long-term processes and the immediate impact of the 2019 flood. The disappearance of straight channels, the rise in highly sinuous meanders, and the shift from symmetric to asymmetric forms collectively indicate an active and evolving river system. The applied multi-temporal, multi-source remote sensing approach, integrating satellite and UAV data, proved effective for detecting both gradual trends and abrupt morphological changes. By linking qualitative classifications with quantitative measures derived from the river centerline, the study provides a transferable methodological framework for morphodynamic analysis of meandering rivers in similar environments.

مقاله پژوهشی



طبقه‌بندی اشکال و تحلیل مورفولوژیک پیچان‌رودها در رودخانه اترک: رویکردی مبتنی بر تلفیق چندزمانه داده‌های ماهواره‌ای و پهنپادی با وضوح بالا، مطالعه موردی: بازه چات گنبد



محمدرضا غریب رضا^۱، آیدینگ کرنژادی^{۲*}، بهروز محسنی^۳، سعید شعبانی^۴

۱- دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. gharibreza@scwmri.ac.ir

۲- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران. a.kornejady@areeo.ac.ir

۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران. b.mohseni@areeo.ac.ir

۴- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران. Saeidshabani07@gmail.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه QuickBird 2005، SuperView 2019 (پیش از سیلاب سال ۱۳۹۸)، Pléiades 2019 (پس از سیلاب سال ۱۳۹۸) و داده‌های پهنپادی ۲۰۲۴ به تحلیل مورفودینامیک و طبقه‌بندی اشکال پیچان‌رودهای رودخانه اترک در بازه چات گنبد استان گلستان پرداخته است. روش تحقیق مبتنی بر تفسیر بصری و تحلیل هندسی ۲۱ بازه پیچان‌رودی شناسایی شده و تفکیک چهار واحد اصلی ژئومورفولوژیک (کانال فعال، ناحیه پوشش گیاهی پایدار و اشکال رسوبی، دامنه‌های کرانه‌ای و سطوح دشتی) بوده است. بررسی تغییرات واحدهای ژئومورفیک نشان داد که سیلاب بزرگ سال ۱۳۹۸ موجب گسترش ناگهانی کانال فعال و تخریب و عقب‌نشینی دامنه‌های کرانه‌ای فرسایشی شده است. در دوره پس از سیلاب (۲۰۱۹-۲۰۲۴)، افزایش و جابجایی اشکال رسوبی داخلی و توسعه تدریجی پوشش گیاهی پایدار بر روی این رسوبات مشاهده شد که بیانگر بازآرایی مورفودینامیک رودخانه و تطبیق آن با الگوهای پیچان‌رودی پیچیده‌تر است. یافته‌های کمی تحقیق نشان می‌دهد که الگوی هندسی رودخانه در حال پیچیده‌تر شدن است. تعداد کانال‌های مستقیم (با سینوزیته پایین) در سال ۲۰۰۵ دو مورد بودند که در سال ۲۰۲۴ کاملاً حذف شدند. در مقابل، کانال‌های با ریخت منادری و سینوزیته بالا (بیش از ۱/۵) از ۹ مورد در سال ۲۰۰۵ به ۱۰ مورد در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته‌اند. سیلاب بزرگ سال ۱۳۹۸ به‌عنوان یک نقطه عطف مورفودینامیکی، تغییرات ساختاری ناگهانی ایجاد کرد؛ به‌طوری که تعداد کانال‌های ساده متقارن بلافاصله از ۹ به ۳ کاهش یافت و همزمان کانال‌های پیچیده نامتقارن از ۱ به ۳ مورد افزایش پیدا کرد. این نتایج نشان‌دهنده پاسخ سریع و حساس رودخانه اترک به رویدادهای هیدرولوژیکی شدید و تشدید گذار از الگوهای ساده به پیچیده در بازه مطالعاتی است. این یافته‌ها می‌تواند مبنای علمی ارزشمندی برای برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع آب در منطقه فراهم آورد.

ژئومورفولوژی، مورفودینامیک، ماهواره، پهنپاد، سیلاب دشت، چات گنبد، استان گلستان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

ارجاع به این مقاله: غریب رضا، محمدرضا؛ کرنژادی، آیدینگ؛ محسنی، بهروز؛ و شعبانی، سعید. (۱۴۰۵). طبقه‌بندی اشکال و تحلیل مورفولوژیک پیچان‌رودها در رودخانه اترک: رویکردی مبتنی بر تلفیق چندزمانه داده‌های ماهواره‌ای و پهنپادی با وضوح بالا (مطالعه موردی: بازه چات گنبد). هیدروژئومورفولوژی، ۱۳ (۴۸): ۱۳۲-۱۰۷.

*نویسنده مسئول: آیدینگ کرنژادی
رایانامه: a.kornejady@areeo.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2026.71069.1832



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

مقدمه

رودخانه اترک یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در استان گلستان است و نقشی کلیدی در آبیاری اراضی کشاورزی و حفظ پایداری زیست‌بوم منطقه بر عهده دارد. با این حال، این رودخانه در معرض تغییرات مورفولوژیکی قابل توجهی قرار دارد که به‌ویژه در بازه‌های پیچان‌رودی می‌تواند بهره‌برداری پایدار از منابع آب را با چالش مواجه کند. فرایندهایی نظیر جابه‌جایی مسیر رودخانه، فرسایش کناره‌ها و رسوب‌گذاری در بستر، از مهم‌ترین نمودهای تغییرات مورفومتری پیچان‌رودها هستند که مستقیماً بر کیفیت و کمیت آب موجود اثر می‌گذارند. از این رو، تحلیل تحول هندسی رودخانه اترک در بازه پیچان‌رودی محدوده چات‌گنبد، علاوه بر آشکارسازی الگوهای طبیعی رفتار جریان، نقش مهمی در طراحی و اجرای سازه‌هایی مانند حوضچه‌های آرامش و رسوب‌گیر برای مدیریت پایدار منابع آب دارد. بررسی‌های یمانی و همکاران (۱۳۹۰) نشان می‌دهد که عوامل هیدروژئومورفیک، شامل تغییرات رژیم هیدرولوژیکی، دانه‌بندی مواد بستر و دیواره‌ها، تحول کاربری اراضی و گسترش کشت برنج در سیلاب‌دشت، از مهم‌ترین محرک‌های تغییر پلان مساحتی و مورفولوژی بازه میانی رودخانه در دهه‌های اخیر بوده‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که در فاصله سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۱ ضریب سینوسی رودخانه از ۱/۵ به ۱/۳ کاهش یافته و طول موج و شعاع دایره مماس بر پیچان‌رودها افزایش پیدا کرده است. همچنین تعداد پیچان‌رودهای واقع در فاصله قازان‌قایه تا چات از ۵۰۲ پیچ در سال ۱۳۴۶ به ۳۲۸ پیچ در سال ۱۳۸۰ کاهش یافته که به معنای حذف ۱۷۴ پیچ، معادل ۳۴.۷ درصد، طی ۳۵ سال است. بیشترین کاهش تعداد پیچان‌رودها در محدوده قازان‌قایه تا آق‌تقه رخ داده است. افزون بر این، طول خط مرکزی رودخانه از ۱۷۳ کیلومتر در سال ۱۳۴۶ به ۱۴۸ کیلومتر در سال ۱۳۸۰ کاهش یافته که بیانگر وقوع برش پیچان‌رودها و افزایش شیب هیدرولیک در این بازه زمانی است. در دهه‌های اخیر، طبقه‌بندی اشکال پیچان‌رود و تحلیل مورفودینامیک آن‌ها به‌طور فزاینده‌ای به داده‌های سنجش از دور و روش‌های کمی مبتنی بر تحلیل پلان فرم وابسته شده است. رویکردهای جدید تلاش می‌کنند با استخراج هندسه مسیر رودخانه از تصاویر ماهواره‌ای، الگوهای پیچان‌رودی را در مقیاس‌های مکانی گسترده و با حداقل دخالت داده‌های میدانی طبقه‌بندی کنند. در این میان، روش‌های آماری مبتنی بر استخراج محور مرکزی، نرمال‌سازی شکل پیچ‌ها و تحلیل ویژگی‌های پلان فرم، توانسته‌اند بانک‌های داده بزرگی از متغیرهای مورفومتری ایجاد کنند که تفکیک‌پذیری بالایی میان انواع کانال‌های پیچان‌رود فراهم می‌کنند (فینوتلو و همکاران^۱، ۲۰۲۰). این مطالعات نشان داده‌اند که تنها با اتکا به هندسه پلان فرم استخراج‌شده از داده‌های سنجش از دور، می‌توان تفاوت بین پیچان‌رودهای آب‌رفتی و جزرومدی و همچنین انواع مختلف پیچ‌های متقارن و نامتقارن را شناسایی کرد. در کنار این رویکردهای آماری، مدل‌های طبقه‌بندی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) جایگاه مهمی در تحلیل پیچان‌رودها یافته‌اند، به‌ویژه در شرایطی که داده‌های میدانی محدود یا غیرقابل دسترس هستند. این مدل‌ها با تلفیق پارامترهایی نظیر عرض کانال، سینوزیته، دامنه و طول موج پیچ‌ها، شدت خمیدگی و موقعیت رسوبات، چارچوب‌های کاربردی برای اهداف مدیریتی و پروژه‌های احیای رودخانه ارائه می‌کنند (تالر و همکاران^۲، ۲۰۲۳). از سوی دیگر، برخی مطالعات زمین‌شناختی کلاسیک نیز اشکال مشخصی از پیچان‌رودها نظیر فرم‌های باز متقارن، باز نامتقارن، زاویه‌دار و پیازی‌شکل را معرفی کرده‌اند که همچنان به‌عنوان مبنای تفسیر ریخت‌شناسی در مطالعات جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند (ژانگ و همکاران^۳، ۲۰۲۵).

تحولات اخیر در حوزه یادگیری ماشین، مسیر جدیدی را در طبقه‌بندی خودکار ریخت رودخانه‌ها گشوده است. استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق مانند ResNet-50، امکان تحلیل مجموعه‌های داده جهانی رودخانه‌ها را با استفاده همزمان از تصاویر دینامیک سطح آب و داده‌های رقومی ارتفاع فراهم کرده است. این رویکردها قادرند رودخانه‌ها را به انواع اصلی شامل پیچان‌رود، شاخه‌ای، مستقیم، آناستوموزی^۴ و آنابرانچینگ^۵ و همچنین زیررده‌های مورفولوژیکی دقیق‌تر تقسیم‌بندی کنند (لی و همکاران^۶، ۲۰۲۵). با این حال، هرچند این روش‌ها قدرت بالایی در تحلیل مقیاس‌های جهانی دارند، اما اغلب از درک دقیق تحولات موضعی و کنترل رویدادهای حدی نظیر سیلاب‌های بزرگ ناتوان هستند. تحلیل مورفودینامیک پیچان‌رودها ذاتاً نیازمند رویکردهای چندزمانه است. مطالعات کلاسیک از

1- Finotello et al.
2- Tallar et al.

3- Zhang et al.
4- Anastomosing rivers

5- Anabranched rivers
6- Li et al.

عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای برای مقایسه تغییرات مسیر رودخانه، سینوزیته و طول مسیر جریان در بازه‌های زمانی مختلف استفاده کرده‌اند (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۷). در ادامه، روش‌های مدرن با تعریف شاخص‌های استاندارد نظیر ضریب سینوزیته، شاخص شاخه‌ای‌شدگی و شاخص آنابرانچینگ، امکان مقایسه منسجم نوع کانال در دوره‌های زمانی متفاوت را فراهم کرده‌اند (لاتلا و همکاران، ۲۰۲۴). ابزارهای تخصصی مانند RivMAP نیز با تحلیل جابه‌جایی محور مرکزی در طول زمان، شناسایی نواحی ژئومورفولوژیک فعال و الگوهای مهاجرت آرام پیچ‌ها را ممکن ساخته‌اند (لاتلا و همکاران^۱، ۲۰۲۴). در مقیاس‌های زمانی بلندمدت، تحلیل‌های چنددهه‌ای و حتی یک‌قرنی نشان می‌دهند که الگوی پیچان‌رودی می‌تواند به‌شدت تحت تأثیر مداخلات انسانی و تغییرات کاربری اراضی دگرگون شود. برای نمونه، بررسی تغییرات هندسی کانال و پوشش گیاهی حاشیه رودخانه طی بازه ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۵ بیانگر افزایش چشمگیر پیچان‌شدگی در برخی بخش‌ها و به‌طور همزمان ساده‌شدن پلان‌فرم در بخش‌های دیگر است (نیتا و همکاران^۲، ۲۰۲۵). تحلیل‌های نیمه‌خودکار مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای Landsat، CORONA و Sentinel-2 نیز امکان استخراج سیستماتیک پارامترهایی چون طول محور مرکزی، عرض کانال و الگوهای پوششی آب و رسوبات را در بازه‌های چنددهه‌ای فراهم کرده‌اند (اسپادا و همکاران^۳، ۲۰۱۵؛ رجبی و همکاران، ۱۳۹۸؛ یونسین و همکاران، ۱۴۰۱).

در این میان، پهپادها (UAV) به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش مورفودینامیک رودخانه‌ها مطرح شده‌اند و با ارائه وضوح مکانی بسیار بالا، شکاف میان داده‌های ماهواره‌ای و برداشت‌های میدانی را پر کرده‌اند. مدل‌های رقومی سطح و زمین تولیدشده با روش تولید ساختار ناشی از حرکت^۴ مستخرج از تصاویر پهپادی، امکان مطالعه دقیق فرآیندهای مهاجرت جانبی پیچ‌ها و تغییرات موضعی بستر و کناره‌ها را فراهم می‌کنند (اوزکان و همکاران^۵، ۲۰۱۸). ترکیب داده‌های UAV با اسکنر لیزری متحرک نیز مدل‌های پیوسته‌ای از بسترهای غرقاب‌شده و بارهای نقطه‌ای ایجاد کرده که برای تحلیل تغییرات کوتاه‌مدت کانال بسیار مؤثر است (فلنر و همکاران^۶، ۲۰۱۳). توسعه سامانه‌های GIS چهاربعدی مبتنی بر داده‌های پهپادی، ابزار قدرتمندی برای رهگیری تکامل زمانی اشکال پیچان و برآورد بودجه رسوبی فراهم کرده است (کاسادو و همکاران^۷، ۲۰۱۷؛ کوئل و همکاران^۸، ۲۰۲۰). در کنار این فناوری‌ها، سنجش از دور ماهواره‌ای با وضوح بالا همچنان نقش محوری در تحلیل مورفولوژی رودخانه‌ها ایفا می‌کند. تصاویر QuickBird و WorldView-2 همراه با الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظیر بیشینه احتمال^۹، امکان استخراج ویژگی‌های مورفولوژیکی و ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی بستر رودخانه را فراهم ساخته‌اند (محمد و همکاران، ۲۰۱۸). ادغام این داده‌ها با نقشه‌های توپوگرافی و اطلاعات میدانی، تحلیل تکامل پیچ‌ها و شناسایی کانال‌ها را به‌طور معناداری بهبود داده است (دبنات و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۲). علاوه بر این، تصاویر ماهواره‌ای امکان توصیف دقیق شعاع انحنا، نرخ مهاجرت و سبک‌های مختلف تحول پیچ‌ها را در رودخانه‌های آبرفتی فراهم می‌کنند؛ موضوعی که در رودخانه‌های ریزدانه با محدودیت روش‌های ژئوفیزیکی سنتی اهمیت دوچندان دارد (اسمیت و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۶).

با وجود پیشرفت‌های ارزنده در زمینه طبقه‌بندی و تحلیل مورفودینامیک پیچان‌رودها، همچنان خلأهای مهمی در این حوزه باقی مانده است. بسیاری از رویکردهای موجود یا در مقیاس‌های بزرگ و با ساده‌سازی بیش از حد توسعه یافته‌اند، یا توان لازم برای تبیین دقیق پاسخ مورفودینامیک رودخانه‌ها به رویدادهای حدی نظیر سیلاب‌های بزرگ را ندارند. افزون بر این، تلفیق نظام‌مند داده‌های چندزمانه ماهواره‌ای با تصاویر پهپادی، به‌ویژه به‌منظور تحلیل گذار اشکال پیچان از فرم‌های ساده به پیچیده، در اغلب مطالعات مورد توجه کافی قرار نگرفته است. از سوی دیگر، پیوند میان تغییرات کمی پارامترهای مورفومتری نظیر سینوزیته و طول مسیر جریان با طبقه‌بندی کیفی ریخت‌شناسی پیچ‌ها همچنان به‌طور کامل تبیین نشده است. در این راستا، مقاله حاضر با اتکا بر تلفیق داده‌های ماهواره‌ای چندزمانه و تصاویر پهپادی با دقت بالا و با تمرکز ویژه بر نقش سیلاب ۱۳۹۸ به‌عنوان یک محرک کلیدی مورفودینامیک، در پی پوشش

1- Latella et al.

2- Niță et al.

3- Spada et al.

4- Structure from Motion

5- Özcan et al.

6- Flener et al.

7- Casado et al.

8- Koehl et al.

9- Maximum Likelihood

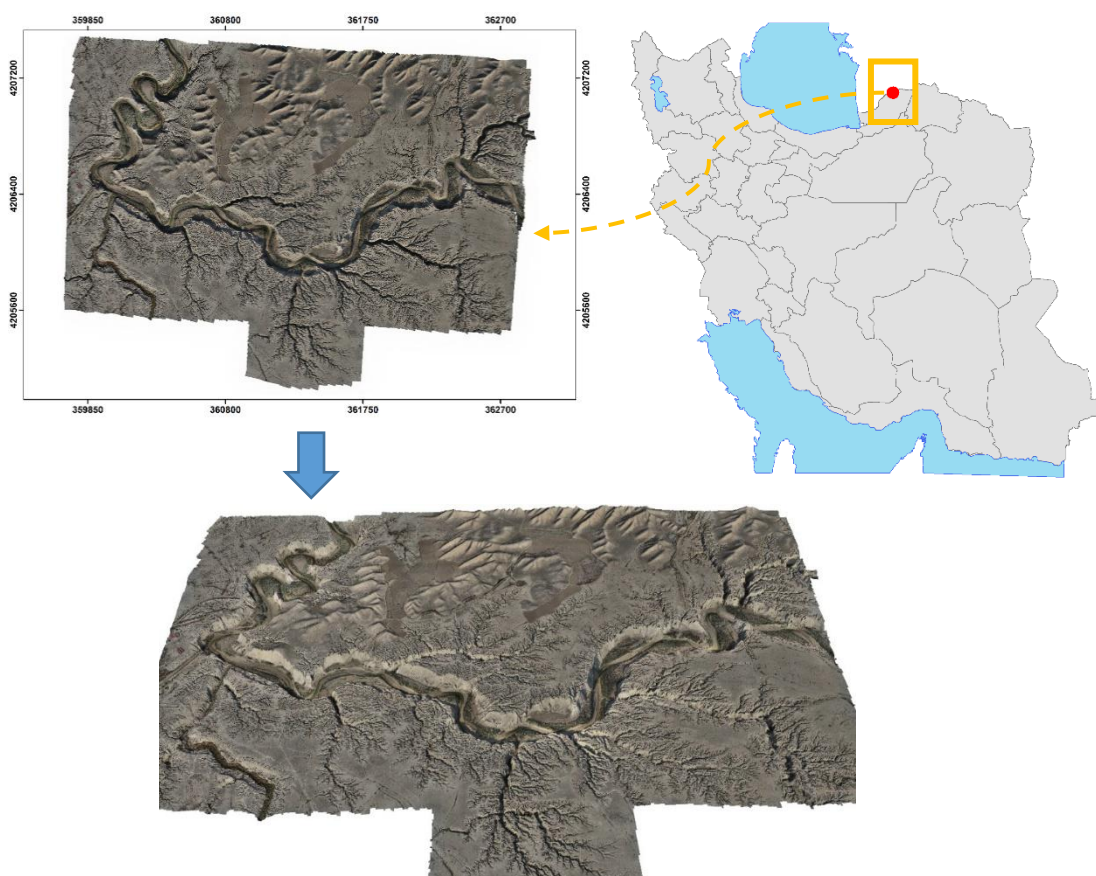
10- Debnath et al.

11- Smith et al.

این خلأها و ارائه چارچوبی کاربردی برای تحلیل تحول هندسی، طبقه‌بندی ریخت‌شناسی و مدیریت پایدار پیچان‌رودها است. این پژوهش همچنین درصدد است تا با تحلیل روند تغییرات، مناطق مستعد فرسایش، رسوب‌گذاری و وقوع پدیده‌هایی مانند برش پیچان‌رود را شناسایی کند تا بتواند مبانی علمی لازم را برای مدیریت پایدار منابع آب و طراحی اقدامات حفاظتی و سازه‌ای در حریم رودخانه اترک فراهم آورد.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه چات‌گنبد واقع در شمال استان گلستان، از اقلیمی نیمه‌مرطوب برخوردار است. میانگین بارش سالانه این منطقه حدود ۴۵۰ میلی‌متر بوده که عمدتاً در فصول بهار و پاییز اتفاق می‌افتد. رودخانه اترک با گذر از این ناحیه و الگوی پیچان‌رودی مشخص خود، تأثیر بسزایی در شکل‌دهی به اراضی کشاورزی و فعالیت‌های انسانی دارد. خاک‌های منطقه عمدتاً شامل سیلت، مارن و رسوبات آبرفتی بوده و در برابر فرسایش و رسوب‌گذاری آسیب‌پذیر هستند. فعالیت‌های کشاورزی و دامداری گسترده در حاشیه رودخانه نیز به‌طور مستقیم بر پویایی و ناپایداری آن تأثیر می‌گذارند. وقوع سیلاب‌های مکرر و گاه ویرانگر، از جمله سیل شدید سال ۱۳۹۸، علاوه بر وارد آوردن خسارات قابل‌توجه به زیرساخت‌ها و زمین‌های کشاورزی، تغییرات محسوسی در مورفولوژی و هندسه رودخانه ایجاد کرده است. تحلیل این تغییرات می‌تواند چارچوب علمی مناسبی برای مدیریت پایدار منابع آب ارائه دهد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی روند بلندمدت فرسایش کرانه‌ای در بازه‌ای انجام شده که تمرکز جمعیتی و کاربری‌های وابسته به رودخانه در آن قابل‌توجه است (شکل ۱).



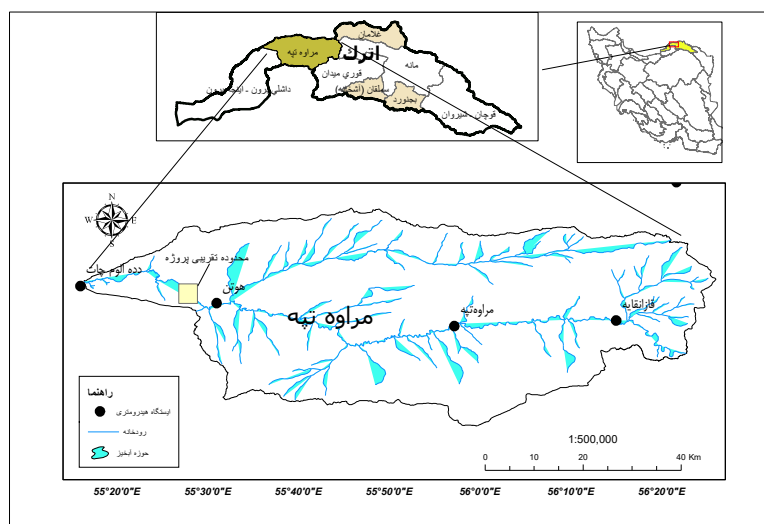
شکل (۱): نقشه موقعیت و مرز محدوده مطالعاتی در استان گلستان و ایران و تصویر ارتوفتوموزائیک و سه بعدی پهباد از پیچان‌رودهای بازه مطالعاتی واقع در رودخانه اترک

Figure (1): Location map and boundary of the study area in Golestan Province, Iran, along with orthophotomosaic and three-dimensional UAV image of the meandering reaches within the study area situated in Atrak River

مواد و روش

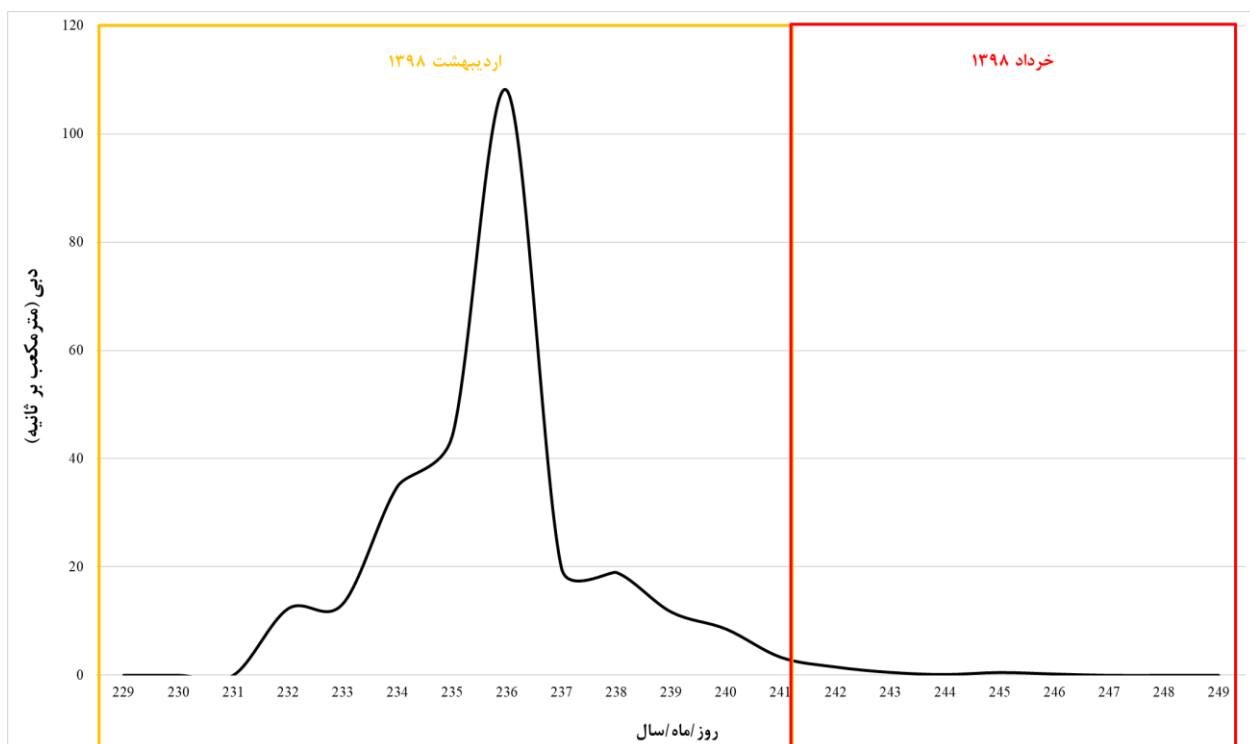
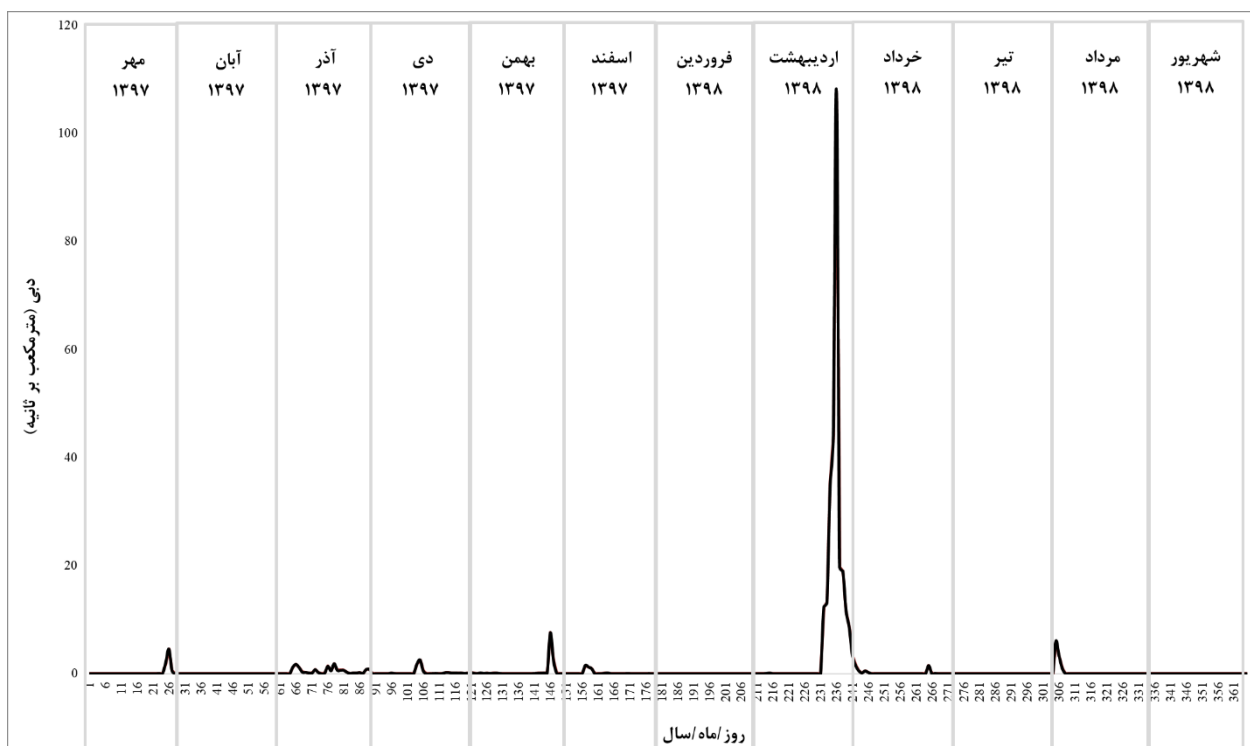
رخداد سیلاب سال ۱۳۹۸

شبکه ایستگاه‌های هیدرومتری در منطقه مورد مطالعه شامل چندین ایستگاه فعال است که جریان را در شاخه‌های اصلی و فرعی پایش می‌کنند (شکل ۲). با بررسی پراکنش مکانی این ایستگاه‌ها، ایستگاه هیدرومتری هوتن به دلیل موقعیت راهبردی آن در پایین‌دست محل تلاقی رودخانه‌های اترک و سومبار و استقرار در آستانه ورودی بازه مطالعاتی (بازه چات-گنبد)، به عنوان ایستگاه مبنا انتخاب شد. انتخاب این ایستگاه تضمین می‌کند که دبی‌های ثبت شده، دقیق‌ترین نماینده از جریان ورودی به بازه مورد مطالعه باشند، چرا که فاصله اندک آن تا محدوده تحقیق، تداخل جریان‌های میان‌حوضه‌ای و تلفات مسیر را به حداقل می‌رساند. بر این اساس، داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری هوتن، به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه مشرف به ورودی بازه مطالعاتی، از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان اخذ گردید. در این پژوهش، رخداد سیلابی عظیم سال ۱۳۹۸ که به مدت ۱۵ روز از ۲۲ اردیبهشت تا ۵ خرداد ۱۳۹۸، معادل ۲۶-۱۲ ماه میلادی می، به طول انجامید، مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). این سیلاب با دبی پیک ۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه در روز ۲۶ اردیبهشت، حجمی معادل ۲۴ میلیون مترمکعب آب را وارد منطقه مطالعاتی نموده که مقدار قابل توجهی است.



شکل (۲): موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مشرف بر محدوده مطالعاتی

Figure (2): Location of hydrometric stations overlooking the study area



شکل (۳): مقادیر دبی ثبت شده در ایستگاه هوتن در سال آبی ۹۸-۹۷ مشرف به بالادست منطقه مطالعاتی (بالا) و رخداد سیلاب عظیم ۱۵ روزه مورخ ۲۲ اردیبهشت تا ۵ خرداد سال ۱۳۹۸

Figure (3): Recorded discharge at the Hootan gauging station for the 2018–2019 water year (top), and the massive 15-day flood event occurring from May 12 to May 26, 2019 (bottom)

جمع‌آوری داده‌های سنجش از دوری

تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش مکانی گسترده و امکان پایش زمانی مستمر، ابزار اصلی در مطالعه تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها محسوب می‌شوند. در این پژوهش، از میان ۹ تصویر موجود با تفکیک‌پذیری بالا طی سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۴، ۱۳۹۷، ۱۳۹۸ (سه تصویر)، ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱، سه تصویر ماهواره‌ای QuickBird آمریکا، SuperView چین و Pléiades فرانسه برای تحلیل مورفومتری بازه مطالعاتی انتخاب شد که در ادامه با تصاویر پهپاد از سال ۲۰۲۴ تلفیق شدند.

تصاویر ماهواره‌ای

مشخصات تصاویر ماهواره‌ای انتخابی در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. نخستین تصویر مربوط به سنجنده QuickBird (مورخ ۲۳ دسامبر ۲۰۰۵ معادل ۲ دی ۱۳۸۴) است که توسط ایالات متحده آمریکا تولید شده و دارای قدرت تفکیک مکانی ۶۱ سانتی‌متر در باند پانکروماتیک و ۲/۴۴ متر در حالت چندطیفی می‌باشد. این تصویر که باندهای پانکروماتیک، آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک را پوشش می‌دهد، به عنوان داده پایه و مرجع برای بررسی تغییرات بلندمدت رودخانه پیش از رخداد سیلاب‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. تصویر دوم از سنجنده SuperView (مورخ ۱۲ مارس ۲۰۱۹ معادل ۲۱ اسفند ۱۳۹۷) متعلق به چین است با رزولوشن مکانی ۵۰ سانتی‌متر (پانکروماتیک) و ۲ متر (چندطیفی) که باندهای آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک را دربرمی‌گیرد. این تصویر وضعیت رودخانه را در آستانه وقوع سیلاب بزرگ سال ۱۳۹۸ منعکس می‌کند. سومین تصویر از سنجنده Pléiades (مورخ ۱۵ ژوئن ۲۰۱۹ معادل ۲۵ خرداد ۱۳۹۸) ساخت فرانسه می‌باشد که از نظر رزولوشن مکانی و طیفی مشابه SuperView است و به طور ویژه برای مستندسازی تأثیرات سیلاب بر رودخانه و تغییرات مورفولوژیکی ناشی از آن به کار رفته است.

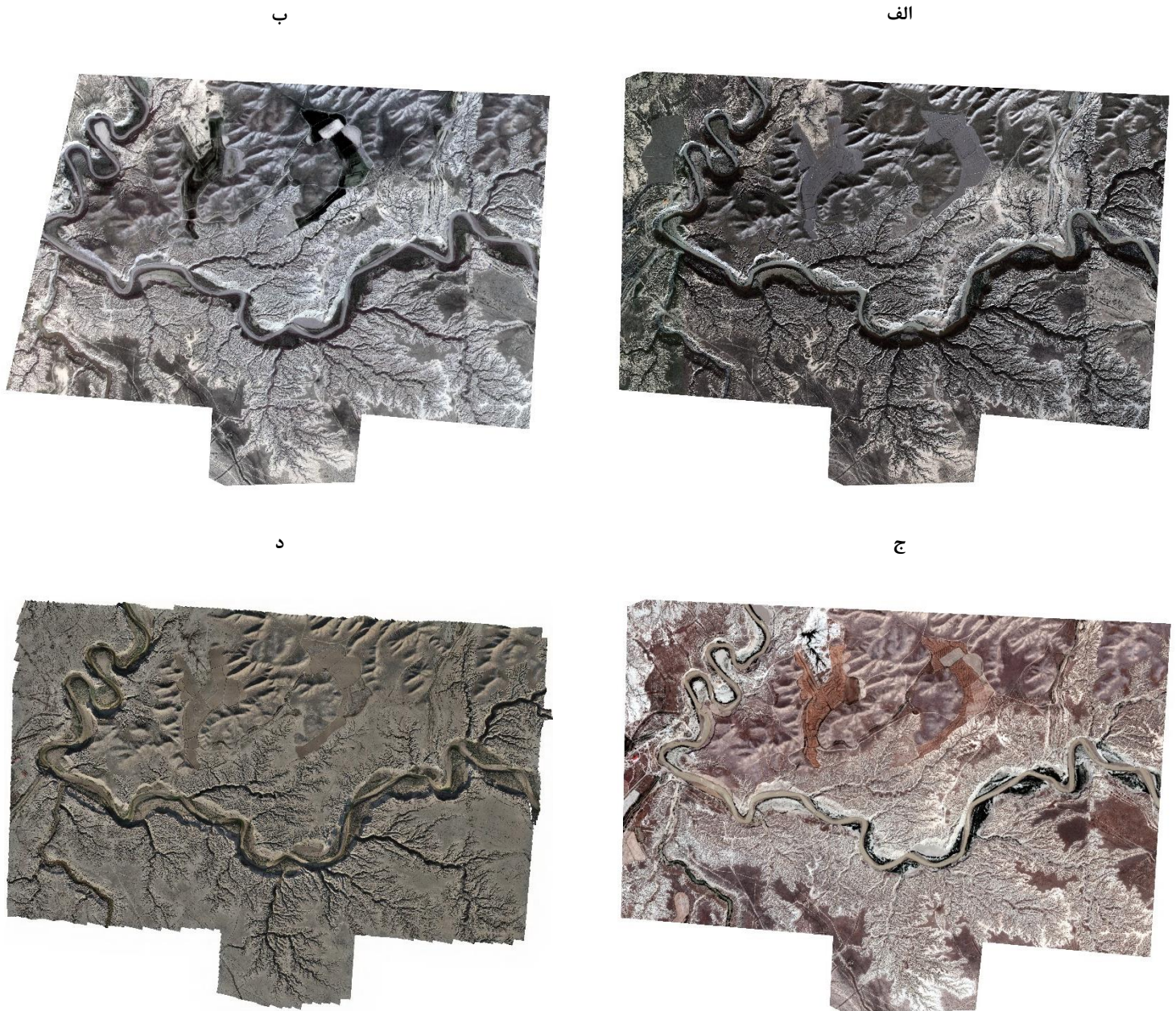
داده‌های پهپادی

تصاویر ارتوفتو و مدل رقومی ارتفاع (DEM) با پهپاد Phantom 4 Pro V2.0 در تاریخ آگوست ۲۰۲۴ (معادل مرداد ۱۴۰۳) تهیه شد. این پهپاد با قدرت تفکیک ۳-۶ سانتی‌متر (GSD) امکان تولید مدل ارتفاعی دقیق در مقیاس ۱:۵۰۰ را فراهم می‌کند (جدول ۱). داده‌های پهپادی پس از تصحیح هندسی و تبدیل به ارتوفتو هم‌مرجع، برای استخراج پارامترهای مورفومتری و تلفیق با تصاویر ماهواره‌ای رزولوشن بالا به کار رفت (شکل ۴). تولید ارتوفتو و DEM از طریق نرم‌افزارهای فتوگرامتری نظیر Agisoft و ContextCapture انجام شد.

جدول (۱): مشخصات طیفی تصاویر ماهواره‌ای و پهپادی مورد استفاده در بازه مطالعاتی

Table (1): Spectral characteristics of the satellite and UAV images used in the study area

ردیف	تصویر	قدرت تفکیک مکانی (متر)	
		Pansharpened	تصویر کامپوزیت RGB
۱	QuickBird	۰/۵	۲
۲	SuperView	۰/۵۴	۲/۹
۳	Pléiades	۰/۵۷	۲/۳
۴	UAV	۰/۰۳	



شکل (۴): تصاویر ماهواره‌ای زمین مرجع و منطبق شده از سطح منطقه (الف: QuickBird، ب: SuperView، ج: Pléiades و د: ارتوفتو پهپاد)
Figure (4): Georeferenced and co-registered satellite images of the study area surface: (a) QuickBird, (b) SuperView, (c) Pléiades, and (d) UAV orthophoto.

طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژیک

محدوده مطالعاتی رودخانه اترک در ناحیه چات گنبد با توجه به فرآیندهای ژئومورفولوژیکی فعال و الگوی متغیر دینامیک رودخانه، به چهار واحد اصلی تفکیک گردید. واحد نخست، کانال فعال رودخانه است که شامل بازه‌های آبدار دائمی و همچنین پهنه‌های مرطوب متناظر با دبی غالب (Dominant Discharge) می‌باشد. این واحد به‌عنوان شاخص اصلی تغییرپذیری رودخانه، مبنای مقایسه‌های چندزمانه و تحلیل روند تغییرات هندسی قرار گرفت. واحد دوم، ناحیه مرز پوشش گیاهی و سازندهای دشت سیلابی است که عوارضی همچون پوشش گیاهی پایدار چندساله، پشته‌های طبیعی (Natural Levees)، سدهای رسوبی داخلی و پادگانه‌های آبرفتی را دربرمی‌گیرد. این بخش به‌عنوان بایگانی رسوبی رودخانه عمل کرده و الگوی انتقال رسوب، نوسانات مرز جریان و همچنین نقاط مستعد

وقوع پدیده برش (Cut-Off) و تشکیل دریاچه‌های ماندری را نشان می‌دهد. واحد سوم، دامنه‌های کرانه‌ای است که از لبه پرتگاه تا پنجه دامنه و پیوندگاه با پشته‌های طبیعی امتداد دارد. این واحد به دلیل قرارگیری در تماس مستقیم با تنش‌های هیدرودینامیکی و فرسایش کناره‌ای، کانون اصلی شناسایی زون‌های ناپایدار و حرکات توده‌ای است و نقش کلیدی در مکان‌یابی سازه‌های حفاظتی و مهندسی رودخانه ایفا می‌کند. در نهایت، واحد چهارم، مناطق دشتی پیرامونی شامل سطوح همواری است که تحت تأثیر کاربری‌های انسانی از قبیل کشاورزی، مرتع، سکونتگاه‌ها و شبکه راه‌ها قرار دارد و در بخش‌هایی نیز عوارض فرسایش آبکندی در آن توسعه یافته است. این طبقه‌بندی چهارگانه، چارچوب ساختاریافته‌ای را برای درک سامانه ژئومورفیک منطقه و تحلیل هدفمند تغییرات رودخانه فراهم می‌سازد (شکل ۵).



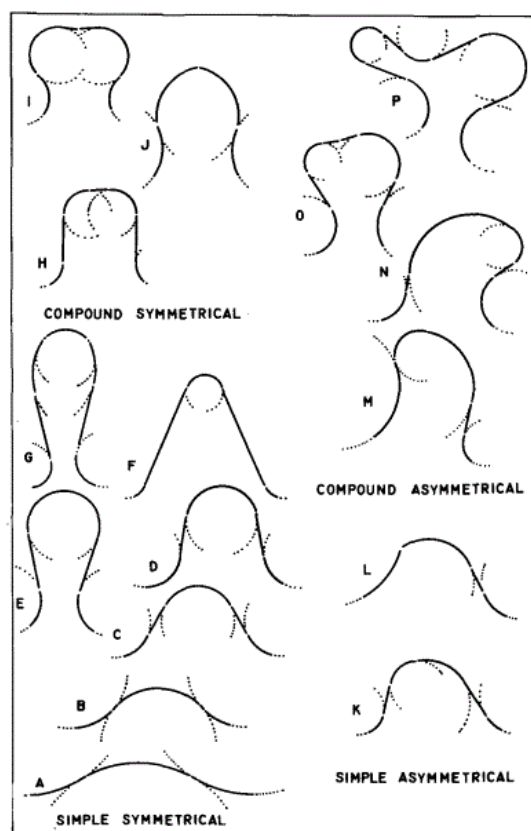
شکل (۵): شماتیک نحوه طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژیک در بازه مطالعاتی مبتنی بر فرآیندهای ژئومورفو-هیدرولوژیک حاکم (تصویر: بازه مطالعاتی چات گنبد، رودخانه اترک)

Figure (5): Schematic representation of the classification of geomorphological units in the study reach based on the dominant geomorpho-hydrological processes (Photograph: Chat Gonbad study reach, Atrak River)

روش طبقه‌بندی ریخت‌شناختی پیچان رودها

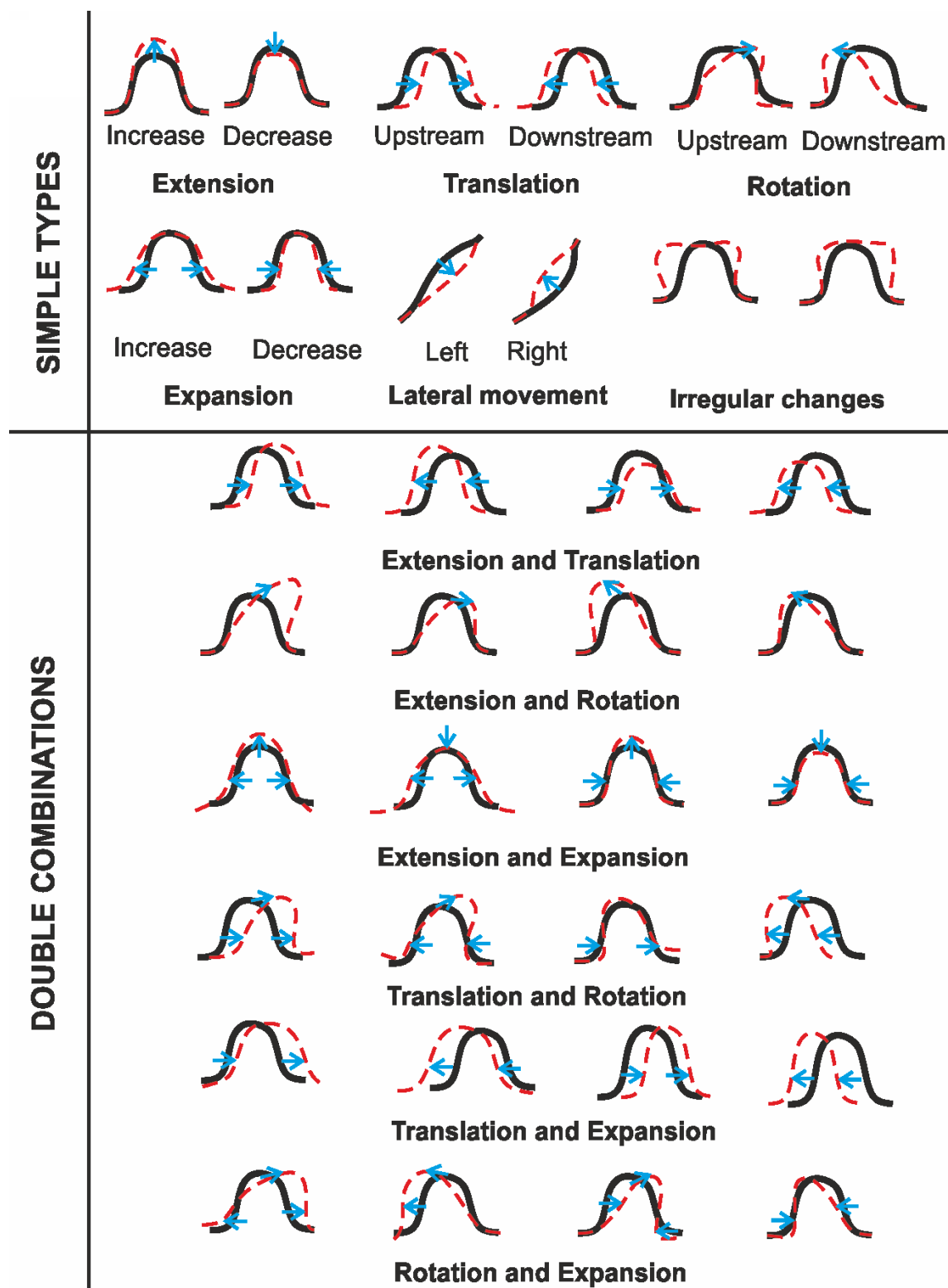
برای درک جامع از دینامیک و تحول زمانی پیچان رودهای رودخانه اترک، از چارچوب‌های طبقه‌بندی معتبر و گسترده‌ای استفاده شد. در گام نخست، روش لووین (۱۹۷۸) بر مبنای دو معیار اصلی سینوزیته و تقارن هندسی به کار گرفته شد (شکل ۶). در این روش، پیچان رودها در گروه‌های «ساده» و «پیچیده» و سپس در زیرمجموعه‌های «مقارن» و «نامتقارن» دسته‌بندی می‌شوند. این طبقه‌بندی امکان شناسایی روند تکاملی پیچ‌ها را از مراحل اولیه تشکیل تا مراحل پیشرفته تغییر شکل و ناپایداری فراهم می‌کند. در گام بعد، برای تحلیل الگوهای مکانی-زمانی حرکت پیچان رودها، از طبقه‌بندی هوک (۱۹۷۷) و دسته‌بندی گورنل و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شد (اشکال ۷ و ۸). این چارچوب‌ها با تمرکز بر شاخص‌هایی نظیر نرخ مهاجرت عرضی، جابجایی طولی محور، گسترش شعاعی و نیز تشکیل یا محو پیچ‌های ثانویه، امکان تفکیک الگوهای حرکتی متفاوتی مانند پیشروی یک‌طرفه، گسترش متقارن، انتقال کلی و یا تثبیت نسبی را ممکن می‌سازند. برای کمی‌سازی این تغییرات، خط مرکزی (Centerline) رودخانه در هر یک از دوره‌های مطالعاتی (۲۰۰۵، ۲۰۱۹ قبل از سیل، ۲۰۱۹ بعد از سیل و ۲۰۲۴) از مجموعه داده‌های ماهواره‌ای و پهپادی با دقت بالا استخراج شد. با مقایسه این خطوط در

ادوار مختلف، میزان و جهت جابجایی‌های عرضی، تغییرات طول مسیر و نیز گسترش یا جمع‌شدگی بازه‌های پیچان‌رودی به‌دست آمد. لازم به ذکر است که اگرچه در مقاطع عرضی، خط تالوگ تحت تأثیر مکانیزم‌های هیدرودینامیکی نظیر جریان ورتکسی (چرخشی) و نیروی گریز از مرکز، به سمت کناره مقعر هر پیچ متمایل می‌شود، اما در این تحلیل، تمرکز اصلی بر روی خط مرکزی به‌عنوان شاخصی کلان از تغییرات هندسی مسیر رودخانه بوده است. این رویکرد ترکیبی، که در آن طبقه‌بندی کیفی ریخت‌شناختی با تحلیل‌های کمی پویایی مسیر تلفیق شده است، نه تنها درک عمیق‌تری از تعاملات پیچیده بین نیروهای هیدرولیکی، فرآیندهای رسوبی و پاسخ مورفولوژیکی رودخانه ارائه می‌دهد، بلکه پایه‌ای علمی و قابل اتکا برای مدل‌سازی روند آینده تحول رودخانه و نیز طراحی راهبردهای مدیریتی مؤثر فراهم می‌سازد. از جمله این راهبردها می‌توان به تعیین نقاط بحرانی نیازمند اقدامات حفاظتی فوری، مکان‌یابی بهینه سازه‌های کنترل رسوب و فرسایش، و پیش‌بینی مناطق مستعد برش و تغییر مسیر اشاره کرد که همگی در راستای مدیریت پایدار منابع آب و حفاظت از اکوسیستم‌های وابسته به رودخانه قرار دارند.



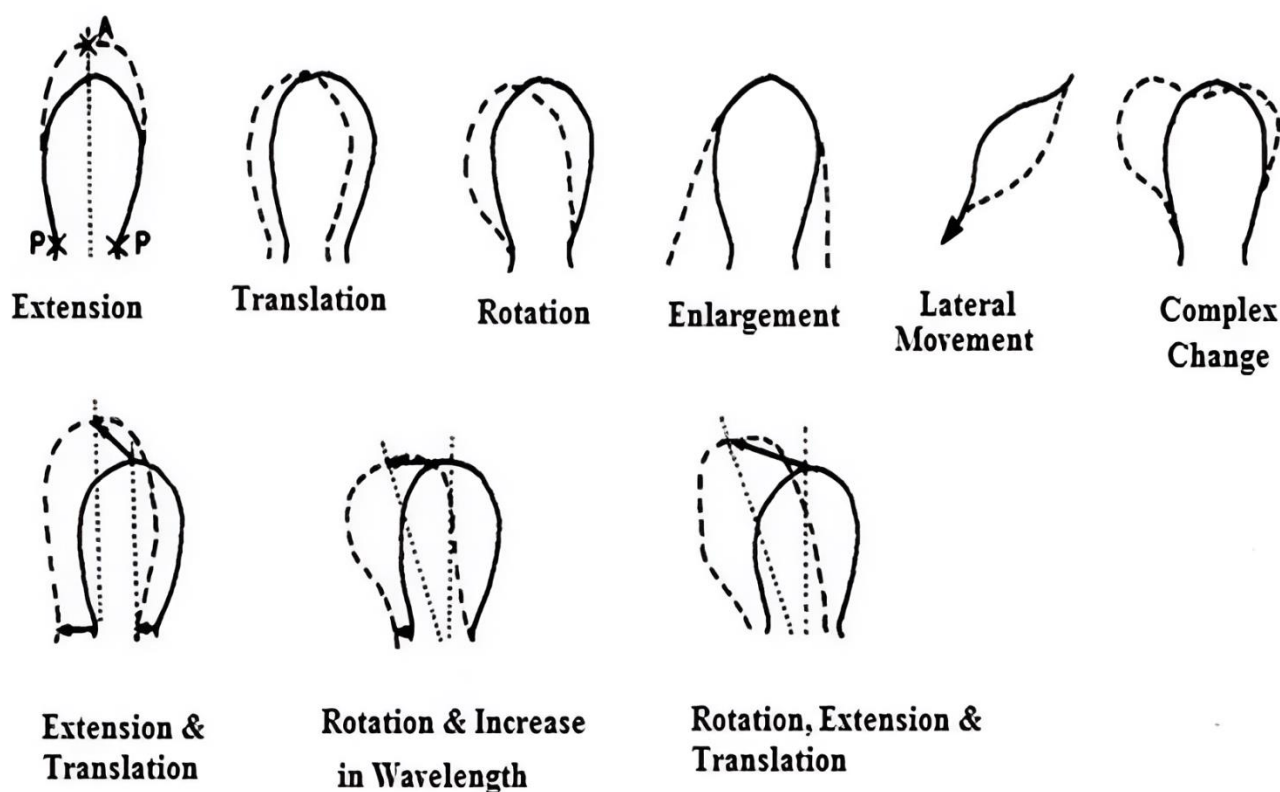
شکل (۶): طبقه‌بندی تحولات پیچان‌رود توسط لووین (۱۹۷۸)

Figure (6): Classification of meander evolution proposed by Lewin (1978)



شکل (۷): انواع تغییرات مکانی-زمانی پیچان رود ارائه شده توسط هوک (۱۹۷۷)

Figure (7): Types of spatio-temporal meander changes proposed by Hooke (1977)

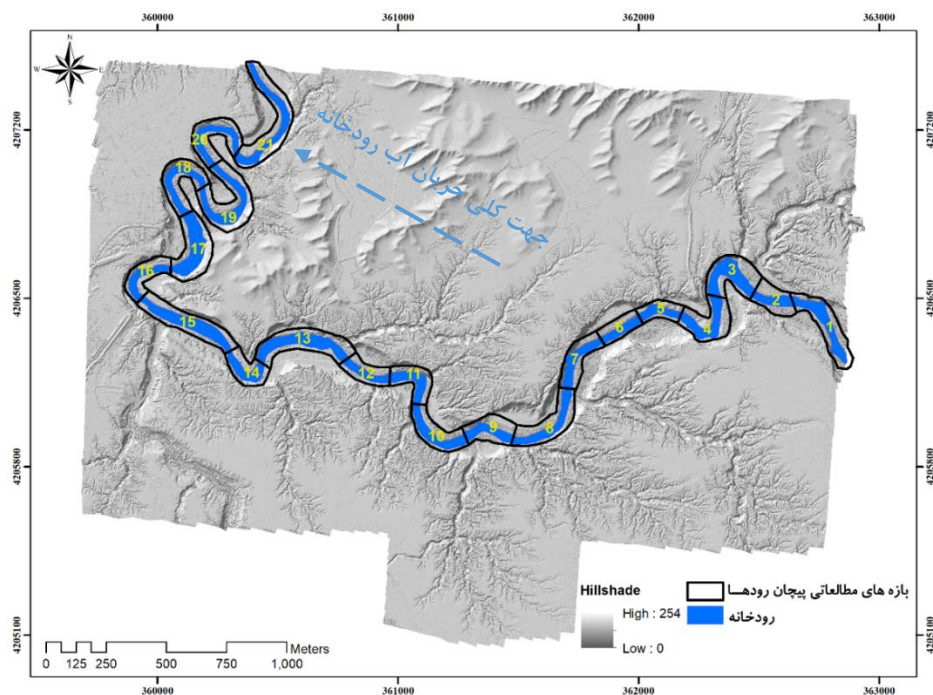


شکل (۸): طبقه‌بندی تغییرات شکل پیچان رود بر اساس تحقیقات گورنل و همکاران (۲۰۱۲)
Figure (8): Classification of meander planform changes based on the studies of Gurnell et al. (2012)

یافته‌ها و بحث

طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژیک

در راستای تحلیل ساختار ژئومورفولوژیکی بازه مورد مطالعه، چهار واحد اصلی فعال در پهنه رودخانه اترک و حریم پیرامونی آن بر اساس تفسیر بصری تصاویر با وضوح بالا و مشاهدات میدانی، در ۲۱ پیچ شناسایی شده (شکل ۹) ترسیم و تفکیک شدند. این واحدها شامل: (۱) کانال فعال و نوار مرطوب معادل دبی غالب، (۲) ناحیه پوشش گیاهی پایدار و اشکال رسوبی دشت سیلابی (پشته‌های طبیعی، سدهای رسوبی داخلی و پادگانه‌های آبرفتی)، (۳) دامنه‌های کرانه‌ای و پرتگاه‌های فرسایشی و (۴) سطوح دشتی با کاربری‌های انسانی و عوارض فرسایش آبکندی می‌باشند. نقشه پهنه‌بندی این واحدها در ادوار مطالعاتی چهارگانه (۲۰۰۵-۲۰۲۴) در شکل ۱۰ ارائه شده است.

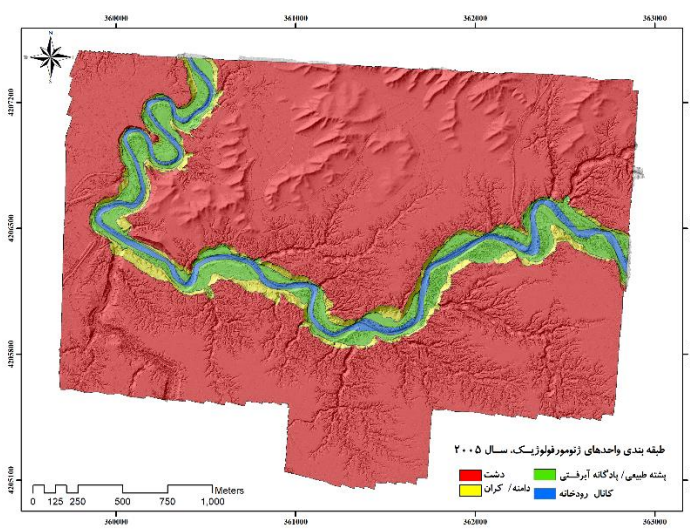
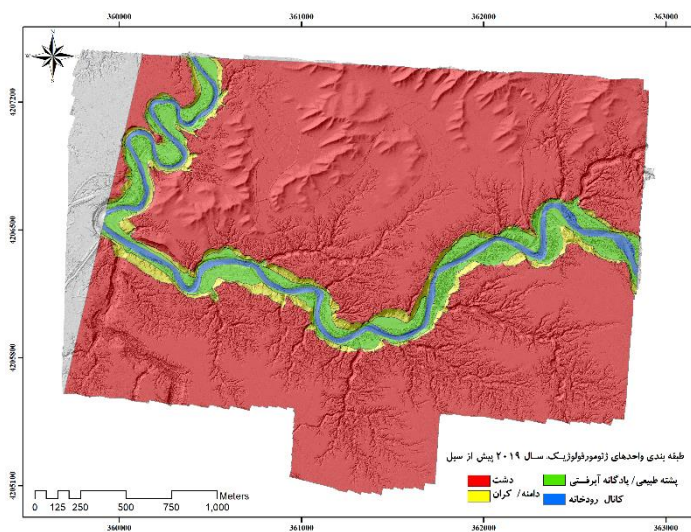


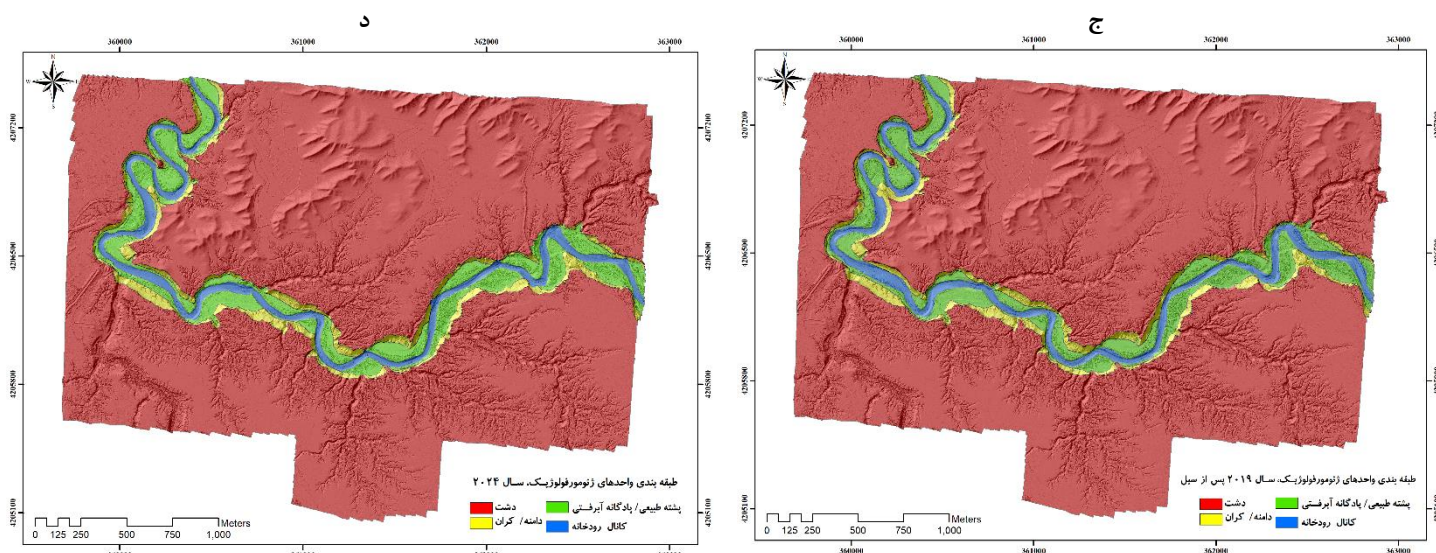
شکل (۹): بازه های مورفولوژیک ۲۱ گانه برای محاسبه پارامترهای هندسی پیچان رود

Figure (9): The 21 morphologically defined reaches used for calculating the geometric parameters of the meandering river

ب

الف





شکل (۱۰): طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژیک در بازه مطالعاتی طی دوره ۲۰ ساله ۲۰۰۵ الی ۲۰۲۴ (الف: QuickBird، ب: SuperView، ج: Pléiades و د: ارتوفتو پنهاد)

Figure (10): Classification of geomorphological units in the study reach over the 20-year period from 2005 to 2024: (a) QuickBird, (b) SuperView, (c) Pléiades, and (d) UAV orthophoto.

تحلیل مورفودینامیک و طبقه‌بندی ریخت‌شناختی پیچان‌رودها

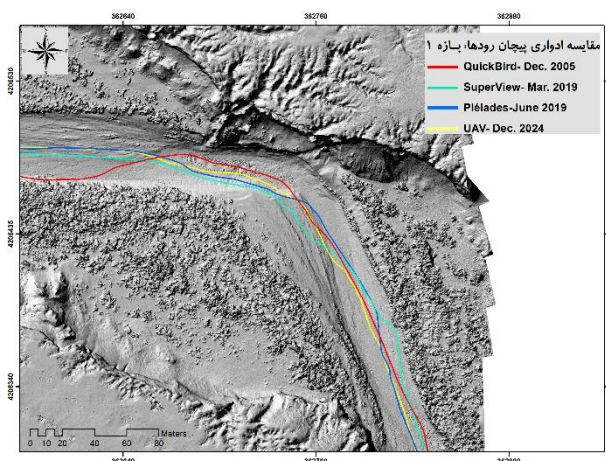
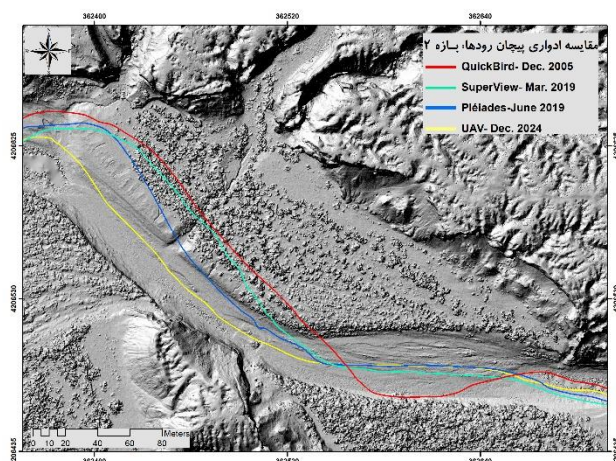
مبتنی بر طبقه‌بندی لووین، بازه مطالعاتی چات در ادوار مطالعاتی چهارگانه بر اساس ویژگی‌های هندسی پیچان‌رود، به پیچ‌های ساده، پیچیده، متقارن و نامتقارن طبقه‌بندی شدند (جدول ۲).

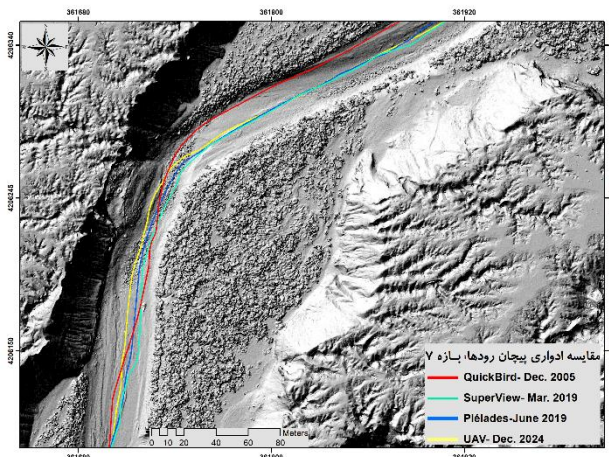
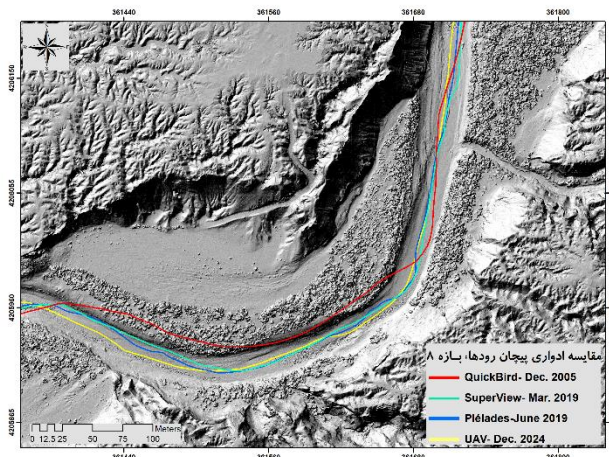
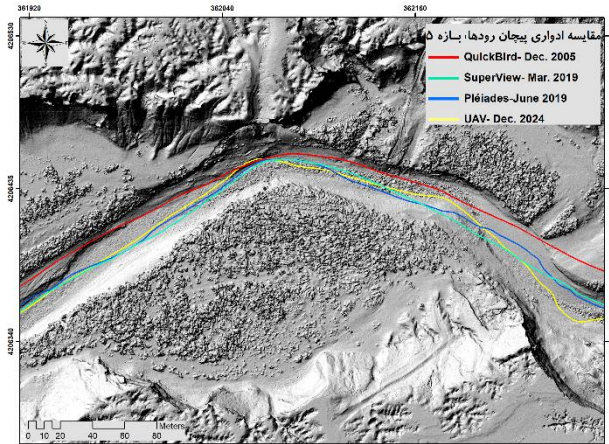
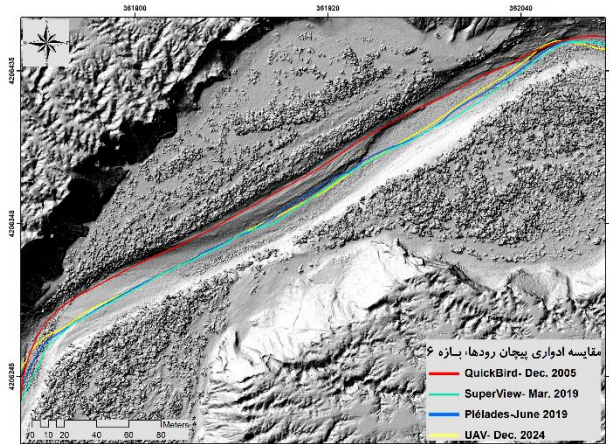
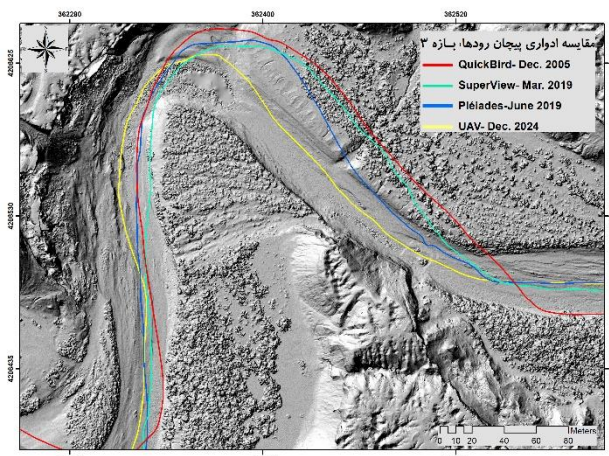
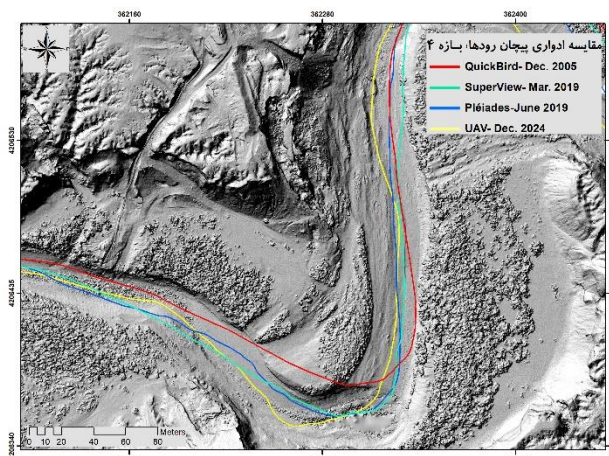
جدول (۲): طبقه‌بندی اشکال پیچان‌رودهای محدوده مطالعاتی بر اساس تحقیقات لووین (۱۹۷۸)
Table (2): Classification of meandering river forms in the study area based on the work of Lewin (1978)

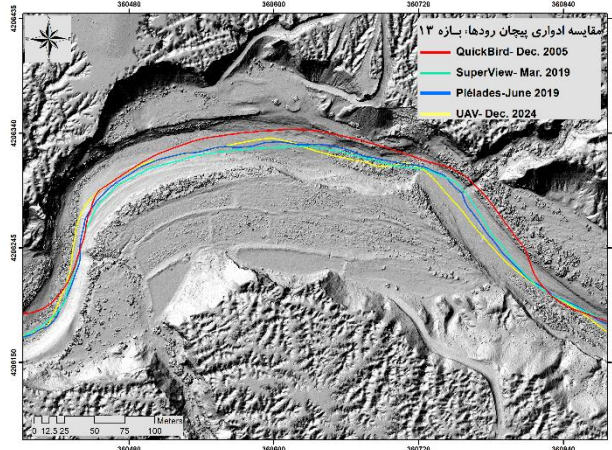
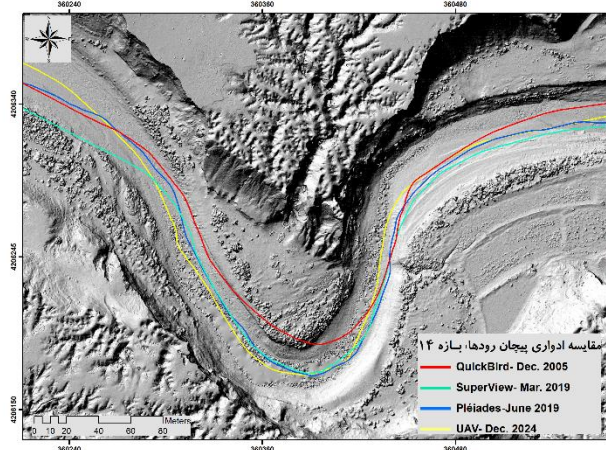
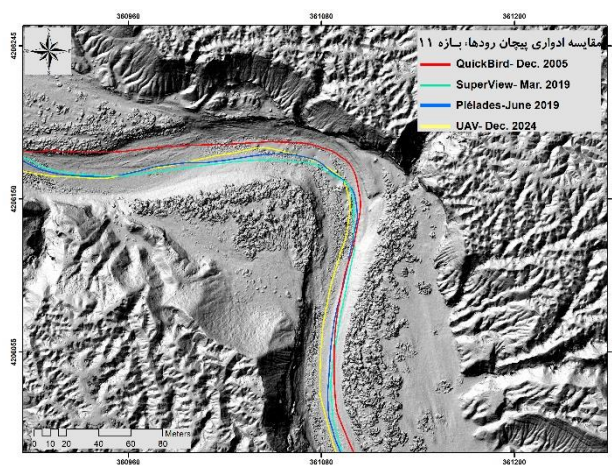
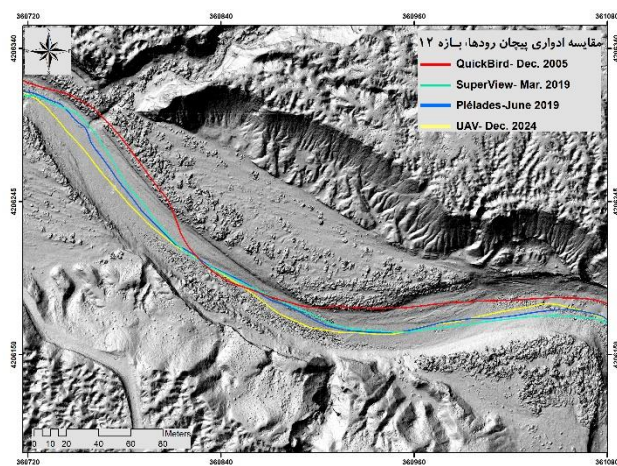
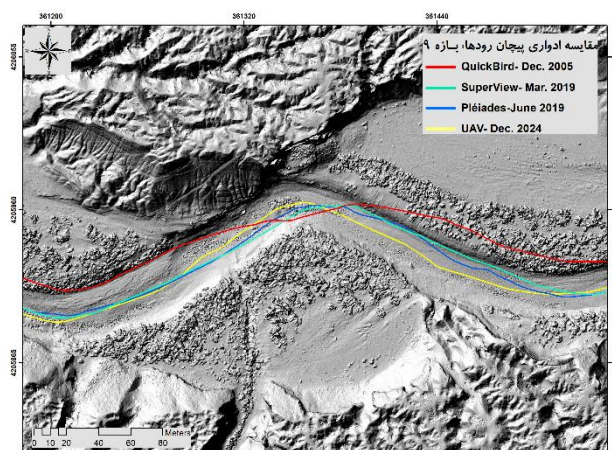
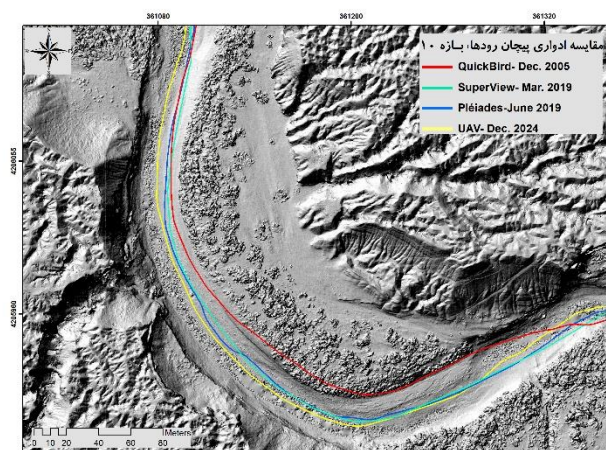
سال	تعداد کانال‌های مستقیم	تعداد کانال‌های نیمه متاندری (سینوزیته زیر ۱/۵)	تعداد کانال‌های متاندری (سینوزیته بالای ۱/۵)	شکل پیچ			
				ساده متقارن	ساده نامتقارن	پیچیده متقارن	پیچیده نامتقارن
۲۰۰۵	۲	۱۰	۹	۹	۱۰	۰	۲۱
۲۰۱۹ (پیش از سیلاب)	۲	۱۰	۹	۶	۱۲	۰	۲۱
۲۰۱۹ (پس از سیلاب)	۰	۱۲	۹	۳	۱۴	۳	۲۱
۲۰۲۴	۰	۱۱	۱۰	۱۰	۷	۲	۲۱

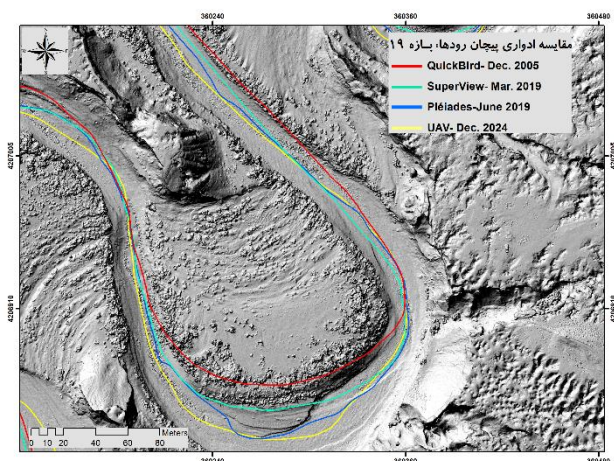
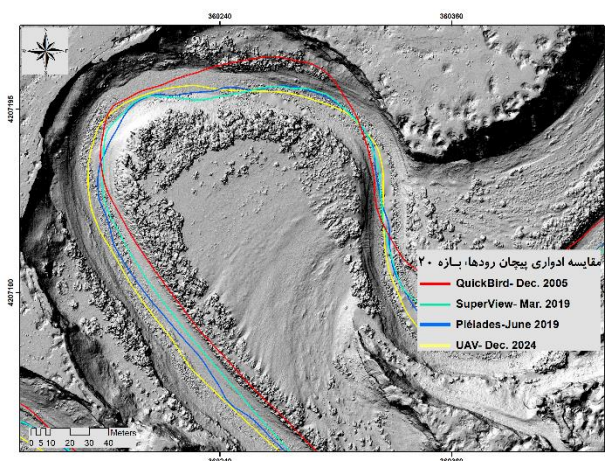
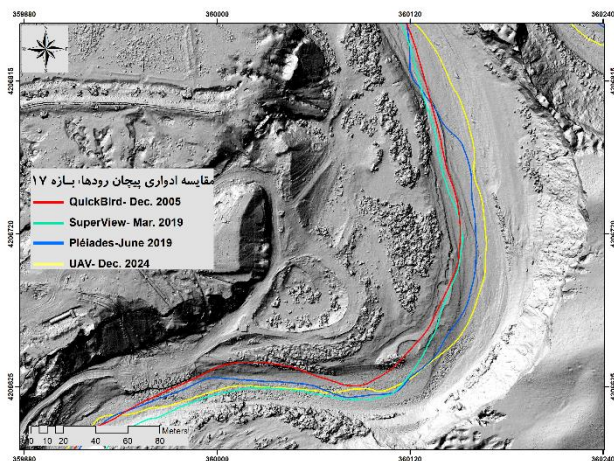
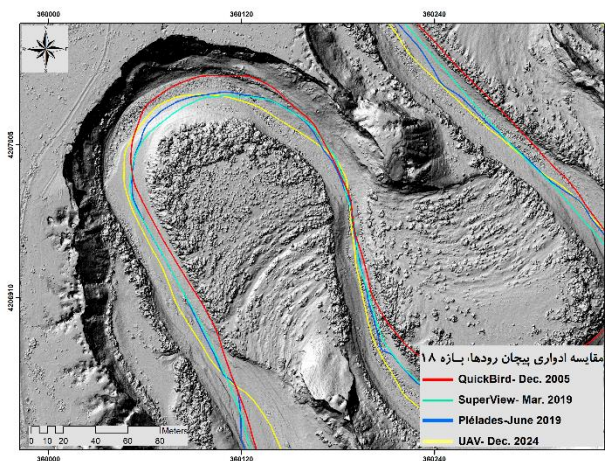
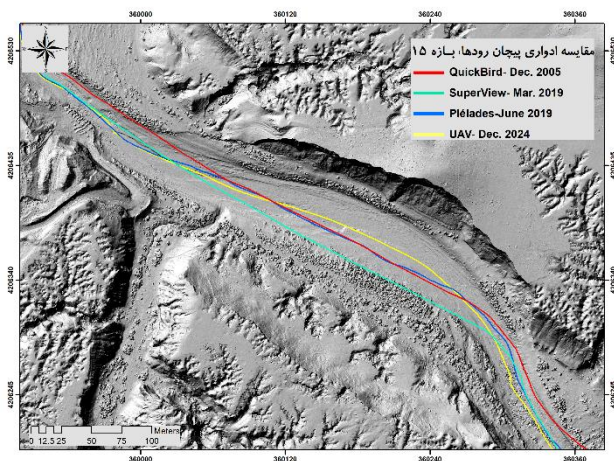
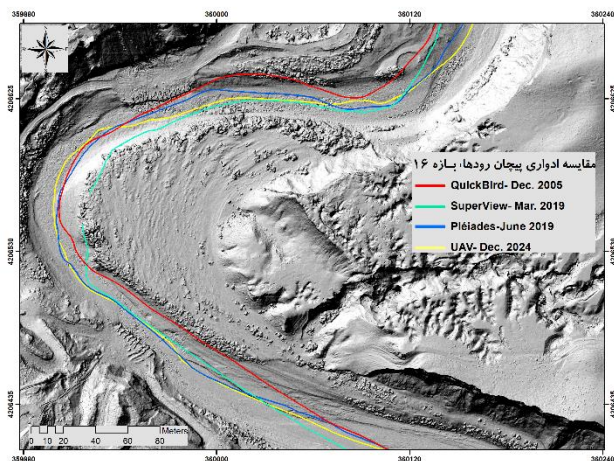
در جدول فوق، کانال‌ها بر اساس سینوزیته (که معیاری برای پیچیدگی هندسی رودخانه است) و دسته‌بندی‌های مختلف از جمله «ساده» و «پیچیده» (با زیرمجموعه‌های متقارن و نامتقارن) طبقه‌بندی شده‌اند. در سال ۲۰۰۵، تعداد کانال‌های صاف ۲ عدد، تعداد کانال‌های نیمه متاندری (با سینوزیته زیر ۱/۵) ۱۰ عدد و تعداد کانال‌های متاندری (با سینوزیته بالای ۱/۵) ۹ عدد بوده است. همچنین، در این سال، بیشتر کانال‌ها به شکل «ساده» و در حالت «نامتقارن» طبقه‌بندی شده‌اند (۹ کانال ساده متقارن و ۱۰ کانال ساده نامتقارن). کانال‌های پیچیده به میزان کمی وجود داشته و هیچ‌یک از آن‌ها به شکل پیچیده متقارن نبوده‌اند. در سال ۲۰۱۹ (قبل از سیل)، تغییرات مشخصی در الگوهای مورفولوژیکی مشاهده می‌شود. تعداد کانال‌های صاف هنوز همان ۲ عدد باقی مانده است، ولی تعداد کانال‌های نیمه متاندری و متاندری افزایش یافته‌اند. در این سال، تعداد کانال‌های ساده متقارن کاهش یافته و به ۶ عدد رسیده، در حالی که کانال‌های

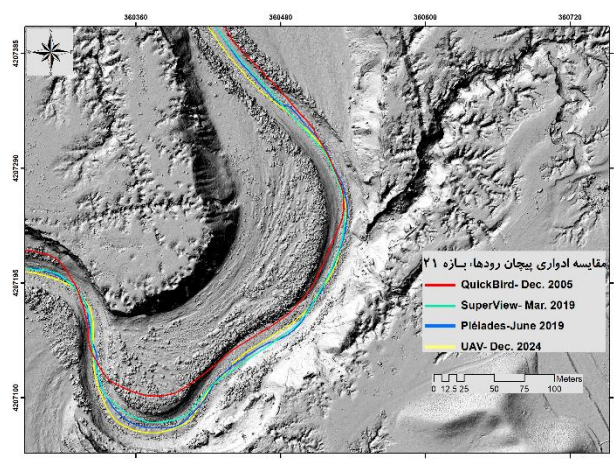
ساده نامتقارن افزایش یافته‌اند (۱۲ عدد). همچنین، تغییرات در دسته‌بندی پیچیده‌ها نیز مشاهده می‌شود که یکی از کانال‌ها به شکل پیچیده نامتقارن در آمده است. در سال ۲۰۱۹ (بعد از سیل)، وضعیت تغییرات مورفولوژیکی قابل توجه است. کانال‌های صاف به صفر کاهش یافته‌اند و کانال‌های نیمه مئاندری به بیشترین تعداد خود (۱۲ عدد) رسیده‌اند. همچنین، تعداد کانال‌های مئاندری همچنان ۹ عدد باقی مانده است. در این سال، تعداد کانال‌های ساده متقارن به ۳ عدد کاهش یافته، در حالی که تعداد کانال‌های پیچیده نامتقارن افزایش پیدا کرده است (۳ عدد). در سال ۲۰۲۴، تغییرات عمده‌ای در ساختار پیچان‌رودها مشاهده می‌شود که بیشتر در گروه‌های «ساده» و «پیچیده» قابل توجه است. در این سال، تعداد کانال‌های صاف به طور کامل به صفر کاهش یافته است. همچنین، تعداد کانال‌های نیمه مئاندری (با سینوزیته زیر ۱/۵) در مقایسه با سال ۲۰۱۹ پس از سیلاب به میزان کمی کاهش یافته و به ۱۱ عدد رسیده است. در عین حال، تعداد کانال‌های مئاندری با سینوزیته بالای ۱/۵ افزایش یافته و به ۱۰ عدد رسیده است، که بیانگر افزایش پیچیدگی هندسی رودخانه‌ها و تغییرات در الگوهای جریان آب می‌باشد. در این سال، برخلاف سال‌های گذشته، تعداد کانال‌های پیچیده متقارن (۲ عدد) افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که رودخانه‌ها با افزایش تنوع در شکل و ساختار خود به تدریج به اشکال پیچیده‌تری وارد شده‌اند. همچنین، روند مشابهی با سال ۲۰۱۹ پس از سیلاب در خصوص افزایش کانال‌های مئاندری با سینوزیته بالای ۱/۵ مشاهده می‌شود، که حاکی از تحولات عمده در دینامیک رسوب و جریان آب در این نواحی است. این تغییرات احتمالاً به دلیل تأثیرات سیلاب‌ها و تغییرات اقلیمی یا هیدرولوژیکی در طی سال‌های اخیر اتفاق افتاده است. در مجموع، روند تغییرات در سال ۲۰۱۹ پس از سیلاب و ۲۰۲۴ نشان‌دهنده افزایش پیچیدگی ساختاری رودخانه‌ها است که می‌تواند ناشی از فرآیندهای رسوبی و هیدرودینامیکی در اثر سیلاب‌های اخیر باشد. شکل ۱۱ وضعیت خطوط مرکزی رودخانه را در بازه‌های ۲۱ گانه در ادوار زمانی مختلف نمایش می‌دهد. بر این اساس، بازه‌های ۲۱ گانه به لحاظ درجه تحول و فعالیت مبتنی بر دو مکتب طبقه‌بندی هوک (۱۹۷۷) و گورنل و همکاران (۲۰۱۲) در جدول ۳ طبقه‌بندی شدند.











شکل (۱۱): وضعیت خطوط مرکزی رودخانه در بازه‌های ۲۱ گانه در ادوار زمانی مختلف در محدوده چات گنبد (نقشه Hillshade پس زمینه مربوط به وضعیت کنونی توپوگرافی بستر رودخانه می‌باشد)

Figure (11): Planform configuration of river centerlines across the 21 defined reaches during different time periods in the Chat Gonbad study area (the hillshade background map represents the current topographic condition of the river bed)

جدول (۳): درجه تحول و فعالیت پیچان رودها در بازه‌های ۲۱ گانه در محدوده چات گنبد

Table (3): Degree of development and activity of meanders across the 21 defined reaches in the Chat Gonbad study area

بازه	۲۰۰۵ – ۲۰۱۹ (۱)	۲۰۱۹ (۲) – ۲۰۱۹ (۱)	۲۰۱۹ (۲) – ۲۰۲۴
۱	توسعه طولی منفی و جابجایی پایین دست	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	توسعه طولی مثبت
۲	توسعه طولی منفی و جابجایی پایین دست	توسعه طولی منفی و جابجایی پایین دست	جابجایی پایین دست
۳	توسعه طولی منفی و جابجایی پایین دست	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست
۴	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	جابجایی پایین دست	توسعه طولی منفی و جابجایی پایین دست
۵	توسعه طولی منفی	توسعه طولی مثبت	توسعه طولی مثبت
۶	توسعه طولی منفی	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	جابجایی پایین دست
۷	توسعه طولی و عرضی منفی	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست
۸	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	جابجایی پایین دست	جابجایی پایین دست
۹	توسعه طولی مثبت و عرضی منفی	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست
۱۰	توسعه طولی و عرضی مثبت	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست
۱۱	توسعه طولی و عرضی منفی	جابجایی پایین دست	جابجایی پایین دست
۱۲	تغییر مکان جانبی	تغییر مکان جانبی	تغییر مکان جانبی
۱۳	توسعه طولی منفی	توسعه طولی مثبت	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست
۱۴	توسعه طولی و عرضی مثبت	توسعه عرضی منفی	جابجایی پایین دست
۱۵	تغییر مکان جانبی	تغییر مکان جانبی	تغییر مکان جانبی
۱۶	توسعه طولی و عرضی منفی	توسعه طولی مثبت	توسعه طولی مثبت
۱۷	توسعه طولی مثبت	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست	توسعه طولی مثبت و جابجایی پایین دست
۱۸	توسعه طولی و عرضی منفی	توسعه طولی مثبت و عرضی پیچیده	توسعه طولی مثبت و عرضی پیچیده
۱۹	توسعه طولی مثبت	توسعه طولی مثبت	توسعه طولی مثبت
۲۰	توسعه طولی منفی	توسعه طولی مثبت و عرضی پیچیده	توسعه طولی مثبت و عرضی پیچیده
۲۱	توسعه طولی مثبت و عرضی منفی	توسعه طولی مثبت و عرضی منفی و پیچیده	توسعه طولی مثبت و عرضی منفی و پیچیده

بر اساس جدول ۳، تغییرات و تحولات در بازه‌های زمانی مختلف (۲۰۰۵-۲۰۱۹، ۲۰۱۹-۲۰۲۴) در خصوص توسعه طولی و عرضی، جابجایی پایین دست و تغییرات جانبی قابل بررسی است. در ادامه، تحلیل کلی از روند تغییرات در این بازه‌ها ارائه می‌شود.

۱. توسعه طولی و جابجایی پایین دست: در اکثر بازه‌ها، روند توسعه طولی مثبت همراه با جابجایی پایین‌دست مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تحرک فعال و حرکت مداوم بستر رودخانه به سمت پایین‌دست است. این روند در بازه‌های ۱، ۳، ۵، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۱ دیده می‌شود. این تحول نشان‌دهنده اثرات طبیعی و پایداری نسبی رودخانه در این بخش‌ها است.

۲. توسعه طولی منفی و جابجایی پایین‌دست: در بازه‌های ۲، ۴، ۶، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، گاهی شاهد توسعه طولی منفی همراه با جابجایی پایین دست بوده‌ایم که نشان‌دهنده محدودیت‌های موجود در بستر رودخانه و تغییرات ناشی از تغییرات محیطی و فرآیندهای فرسایشی است. این روند می‌تواند به دلایلی چون کاهش میزان جریان، تغییرات شیب رودخانه و یا اثرات بشر بر روند رودخانه‌ها باشد.

۳. توسعه عرضی و تغییر مکان جانبی: در بازه‌های ۱۲، ۱۵، ۱۸، شاهد تغییر مکان جانبی و توسعه عرضی بوده‌ایم که نشان‌دهنده مهاجرت و تغییر موقعیت اصلی بستر رودخانه است. این تغییرات معمولاً در شرایطی که رودخانه با تغییرات محیطی پیچیده‌تری مواجه است، رخ می‌دهند و می‌توانند به تدریج منجر به جابجایی‌های عمده در رودخانه شوند.

۴. توسعه عرضی پیچیده: در بازه‌های ۱۸ و ۲۰، توسعه عرضی پیچیده مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات بیشتر در محیط رودخانه است که می‌تواند به دلایل مختلفی همچون تغییرات فیزیکی در بستر یا فرسایش و رسوب‌گذاری باشد. این پیچیدگی‌ها باعث می‌شود روند حرکت و گسترش رودخانه به‌طور قابل توجهی متفاوت از دیگر بازه‌ها باشد.

یافته‌های این پژوهش مبنی بر کاهش مستمر کانال‌های صاف (از ۲ عدد در سال ۱۳۸۴ به صفر در سال ۱۴۰۳) و افزایش همزمان کانال‌های مئاندری با سینوزیته بالا (از ۹ به ۱۰ عدد) با روندهای کلی گزارش‌شده در مطالعات چندزمانه دیگر همخوانی دارد. برای مثال، تحقیقاتی که از داده‌های ماهواره‌ای چنددهه (مانند اسپادا و همکاران، ۲۰۱۸) یا تلفیق سنجش از دور و پهپاد (نظیر فلنر و همکاران، ۲۰۱۳؛ کوئل و همکاران، ۲۰۲۰) استفاده کرده‌اند، نیز کاهش فرم‌های ساده و افزایش پیچیدگی هندسی را در پاسخ به تغییرات هیدرولوژیکی و اقلیمی ثبت نموده‌اند. با این حال، در حالی که طبقه‌بندی‌های جهانی مبتنی بر یادگیری عمیق (مانند Li و همکاران، ۲۰۲۵) یا مدل‌های آماری گسترده (نظیر فینوتلو و همکاران، ۲۰۲۰) اغلب بر روندهای بلندمدت و در مقیاس کلان متمرکزند، این مطالعه با وضوح مکانی بسیار بالا (ترکیب تصاویر ماهواره‌ای QuickBird، SuperView، Pléiades و ارتوفوتوهای پهپادی) و تفکیک بازه‌های ۲۱‌گانه، توانسته است گذار دقیق اشکال از ساده به پیچیده را در مقیاس محلی و در بازه‌های کوتاه‌مدت (پیش و پس از یک رویداد حدی) کمی‌سازی کند. به‌طور مشخص، واکنش مورفودینامیک سریع به سیلاب ۱۳۹۸، که موجب کاهش چشمگیر کانال‌های ساده متقارن (از ۹ به ۳) و افزایش کانال‌های پیچیده نامتقارن (از ۱ به ۳) تنها در یک بازه یک‌ساله شد، همسو با یافته‌های مطالعات میدانی و پهپادی در رودخانه‌های دیگر (مانند کاسادو و همکاران، ۲۰۱۷؛ اوزکان و همکاران، ۲۰۱۸) است که سیلاب‌ها را به‌عنوان محرک‌های اصلی بازآرایی کانال معرفی می‌کنند. با این تفاوت که رویکرد تلفیقی این پژوهش (استفاده همزمان از طبقه‌بندی‌های ریخت‌شناختی لووین و تحلیل پارامترهای کمی توسعه طولی/عرضی) نه‌تنها تأثیر فوری سیلاب، بلکه تداوم روند پیچیده‌شدن را در سال‌های پس از رویداد (تا ۱۴۰۳) نشان می‌دهد و بنابراین چارچوبی جامع‌تر برای پایش تحولات مورفودینامیک در پاسخ به محرک‌های تدریجی و ناگهانی ارائه می‌دهد. در نهایت، اگرچه مطالعات پیشین (مانند دنبات و همکاران، ۲۰۲۲؛ اسمیت و همکاران، ۲۰۱۶) بر اهمیت یکپارچه‌سازی داده‌های میدانی و سنجش از دور برای درک الگوهای مهاجرت پیچان‌رودها تأکید کرده‌اند، این تحقیق با کمی‌سازی مستقیم رابطه بین شاخص‌های مورفومتری (نظیر سینوزیته) و طبقه‌بندی کیفی ریخت‌شناسی (ساده/پیچیده، متقارن/نامتقارن) در یک بازه زمانی ۲۰ ساله، گامی فراتر نهاده و ابزاری عملی برای پیش‌بینی روندهای آتی تحول هندسی رودخانه‌های مشابه تحت تأثیر رویدادهای حدی و تغییرات محیطی فراهم می‌آورد.

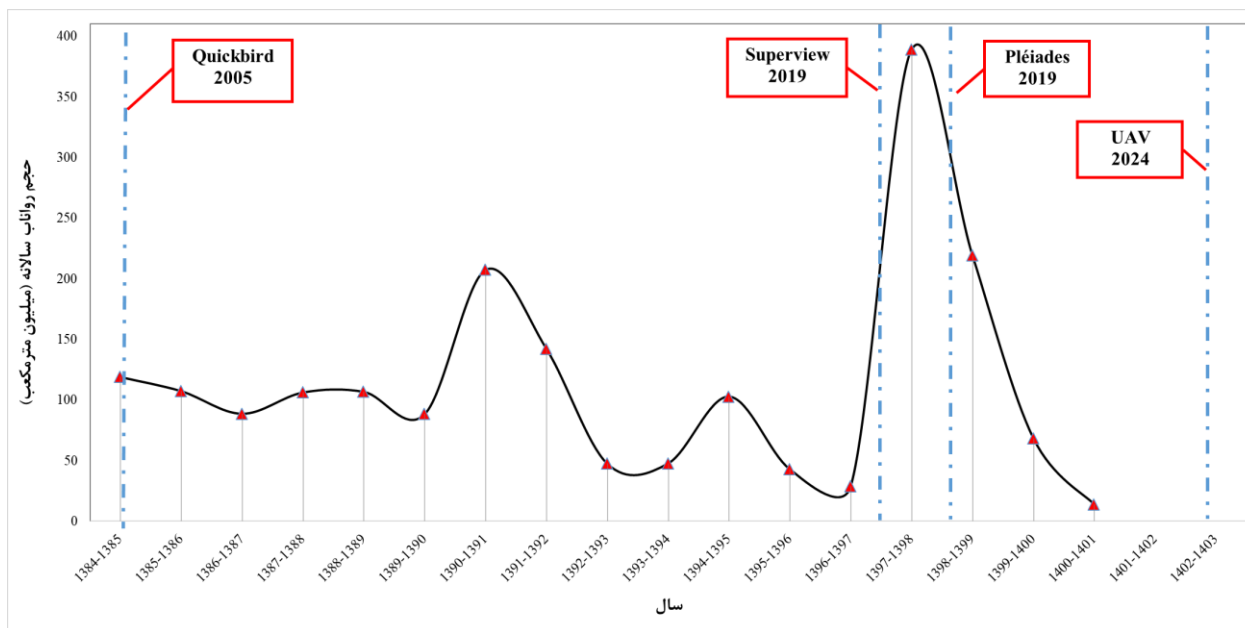
تحلیل یکپارچه تحولات ریخت‌شناختی تحت تأثیر سیلاب ۱۳۹۸

تحلیل هیدروگراف سیلاب بهار ۱۳۹۸ در ایستگاه هوتن نشان‌دهنده یک رخداد حدی با انرژی فرساینده بسیار بالا است که به عنوان محرک اصلی در دگرگونی تیپولوژی پیچان‌رودهای بازه چات گنبد عمل کرده است. ورود حجمی معادل ۲۴ میلیون مترمکعب آب تنها در یک بازه ۱۵ روزه، که بیش از ۵۷ درصد آن (معادل ۱۳/۷ میلیون مترمکعب) در فاز تهاجمی بالارونده^۱ با دبی پیک ۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه تنها در ۵ روز تخلیه شد، انرژی لازم برای عبور از آستانه‌های پایداری ژئومورفولوژیک را فراهم کرده است. این تمرکز حجمی و فشار هیدرولیکی در مدت‌زمانی کوتاه، فرآیندهای گسترش شعاعی^۲ و انتقال طولی^۳ را بر اساس مدل هوک تسریع کرده، به طوری که انرژی حاصل از سیلاب با تخریب دیواره‌های خارجی و فرسایش کناره‌های مقعر، مسیرهای مستقیم و نیمه‌ممانداری را به سمت تشکیل پیچ‌های با سینوزیته بالا (بالای ۱/۵) و تغییر مکان کلی پلان‌فرم سوق داده است. این فشار هیدرولیکی عظیم، مستقیماً در تغییر طبقه‌بندی اشکال ممانداری بر اساس مدل گورنل منعکس شده است؛ به گونه‌ای که بلافاصله پس از این سیلاب، تعداد کانال‌های ساده متقارن از ۹ مورد به ۳ مورد کاهش یافته و در مقابل، بر تعداد کانال‌های پیچیده نامتقارن افزوده شده است. در واقع، دبی پیک ۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه در فاز بالارونده، تنش‌های برشی فراتر از آستانه مقاومت واحدهای ژئومورفولوژیک منطقه ایجاد کرده و منجر به ناپایداری فرم‌های پایدار قدیمی شده است. از سوی دیگر، تخلیه ۴۳ درصد از حجم کل سیلاب در فاز طولانی‌تر فروکش، فرصت لازم برای رسوب‌گذاری در پشته‌های نقطه‌ای و تثبیت الگوهای نامتقارن جدید را فراهم آورده است. تطبیق این روند با مدل لووین نشان می‌دهد که رودخانه اترک در این بازه، تحت تأثیر این رخداد ۱۵ روزه، از یک حالت تعادل نسبی به سمت یک وضعیت تحولی و ناپایدار حرکت کرده است تا با افزایش طول مسیر و ایجاد پیچ‌های پیاپی شکل و مرکب، انرژی عظیم ورودی را مستهلک نماید. این نتایج تایید می‌کند که سیلاب ۲۰۱۹ نه یک نوسان گذرا، بلکه یک نقطه عطف در بازآرایی ساختار فضایی و تیپولوژیک مماندهای اترک بوده است.

تحلیل نهایی علل تغییرات ریخت‌شناختی در دوره‌های زمانی مختلف

تحولات ریخت‌شناختی رودخانه‌ها فرآیندی پویا و تحت تأثیر مستقیم نوسانات هیدرولوژیکی است که با رخدادهای حدی شدت می‌یابد. نمودار حجم رواناب سالانه در طول دوره مطالعاتی، نقش محوری رویدادهای هیدرولوژیکی را در شکل‌دهی و بازآرایی پلان‌فرم رودخانه اترک در بازه چات گنبد به‌وضوح نشان می‌دهد (شکل ۱۲). در بازه زمانی ۲۰۰۵ (زمان تصویربرداری Quickbird) تا پیش از رخداد سیلاب ۱۳۹۸ (۲۰۱۹، زمان تصویربرداری Superview)، حجم رواناب سالانه، اگرچه با نوساناتی همراه بوده، اما هرگز به مقادیر مشاهده‌شده در سال ۱۳۹۸ نرسیده است. پیک‌های رواناب در این دوره (مثلاً حدود ۲۱۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱) منجر به فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری تدریجی، تعریض نسبی کانال و افزایش آهسته سینوزیته شده است که این تغییرات آرام‌تر و در چارچوب نوسانات معمول رژیم هیدرولوژیکی رودخانه رخ داده‌اند. در این دوره، رودخانه احتمالاً در یک تعادل دینامیکی نسبی با محرک‌های هیدرولوژیکی قرار داشته و تغییرات ریخت‌شناختی غالباً به صورت تدریجی، مانند گسترش شعاعی آهسته مماندها یا انتقال طولی محدود، اتفاق افتاده است.

¹ Rising Limb² Radial Expansion³ Translation



شکل (۱۲): نوسانات حجم رواناب سالانه (میلیون مترمکعب) در ایستگاه هوتن و انطباق آن با توالی زمانی اخذ تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های پهپاد (۱۳۸۴-۱۴۰۳)

Figure (12): Variations in annual runoff volume at Hootan station and its synchronization with the timeline of satellite imagery and UAV data acquisition (2005-2024)

همان‌طور که در نمودار حجم رواناب سالانه مشهود است، سال ۱۳۹۷-۱۳۹۸ (معادل ۲۰۱۹ میلادی) با ثبت حجم روانابی در حدود ۳۹۰ میلیون مترمکعب، یک رخداد بی‌سابقه و منحصر به فرد هیدرولوژیکی در طول دوره آماری مورد بررسی محسوب می‌شود. این حجم عظیم رواناب سالانه، دربرگیرنده سیلاب شدید ۱۵ روزه‌ای است که با دبی پیک ۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه و حجم کل ۲۴ میلیون مترمکعب، به عنوان یک نقطه عطف ژئومورفولوژیک عمل کرده است. تمرکز بیش از ۵۷ درصد از حجم این سیلاب در فاز تهاجمی بالارونده، انرژی جنبشی عظیمی را بر رودخانه تحمیل نموده است. این انرژی فرساینده، موجب عبور از آستانه‌های پایداری کناره‌ها و تشدید فرآیندهای هیدرومورفولوژیکی گردیده که در سه گزاره زیر قابل تحلیل است:

- گذار تیپولوژیک: بر اساس مدل گورنل، انرژی بالای این سیلاب، تعداد پیچ‌های ساده متقارن را از ۹ به ۳ کاهش داده و به افزایش تعداد پیچ‌های پیچیده نامتقارن منجر شده است.
- جابجایی پلان‌فرم: مکانیزم‌های گسترش شعاعی و انتقال طولی بر اساس مدل هوک به شدت تسریع شده، که حذف کانال‌های مستقیم و حرکت به سمت سینوزیته بالاتر را توجیه می‌کند.
- خروج/ازتعداد: رودخانه بر اساس مدل لووین از حالت تعادل نسبی خارج شده و برای مستهلک کردن انرژی سیلاب، به افزایش پیچیدگی پلان‌فرم و طول مسیر روی آورده است.

پس از اوج بی‌سابقه در سال ۱۳۹۸، حجم رواناب سالانه به شدت کاهش یافته و در سال‌های بعدی به مقادیر بسیار پایین‌تر (مانند حدود ۲۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱) برگشته است. فاصله بین تصاویر ماهواره‌ای Pléiades (سال ۲۰۱۹ بلافاصله پس از سیلاب) و پهپاد (سال ۲۰۲۴)، بازآرایی و تعدیل رودخانه را در واکنش به رژیم هیدرولوژیکی جدید نشان می‌دهد. در این دوره، با کاهش انرژی جریان، فرآیندهای رسوب‌گذاری در بخش‌های داخلی قوس‌ها و تثبیت پشته‌های نقطه‌ای جدید اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. با این حال، اثرات سیلاب عظیم ۱۳۹۸ همچنان بر ریخت‌شناسی رودخانه غالب بوده و الگوی پیچیده نامتقارن تثبیت‌شده پس از سیلاب،

همچنان در حال تکامل در این رژیم هیدرولوژیکی با انرژی کمتر است. این دوره، در واقع مرحله‌ای از تلاش رودخانه برای دستیابی به یک تعادل جدید پس از یک آشفتگی بزرگ ژئومورفولوژیک است.

نتیجه‌گیری

تحلیل مورفودینامیک و طبقه‌بندی اشکال پیچان رودهای رودخانه اترک در بازه چات گنبد نشان‌دهنده تحول قابل توجه هندسی و افزایش پیچیدگی مسیر رودخانه طی دو دهه گذشته است. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه با قدرت تفکیک مکانی بالا و داده‌های پهپادی، چهار واحد ژئومورفولوژیک اصلی شامل کانال فعال، ناحیه پوشش گیاهی پایدار، دامنه‌های کرانه‌ای و سطوح دشتی تفکیک شدند. نتایج کمی بیانگر کاهش مستمر کانال‌های صاف و افزایش پیوسته کانال‌های مائندی با سینوزیته بالا است. به‌طور مشخص، تعداد کانال‌های صاف از ۲ مورد در سال ۲۰۰۵ به صفر در سال ۲۰۲۴ رسیده، در حالی که کانال‌های با سینوزیته بالا از ۹ به ۱۰ مورد افزایش یافته‌اند. سیل سال ۲۰۱۹ به‌عنوان یک محرک سریع، تغییرات ساختاری قابل توجهی ایجاد کرد که از جمله آن می‌توان به کاهش کانال‌های ساده متقارن و افزایش کانال‌های پیچیده نامتقارن اشاره کرد. این روند نشان می‌دهد رودخانه اترک در حال گذار به سمت الگوهای پیچیده‌تر و ناپایدارتر است که عمدتاً تحت تأثیر رویدادهای هیدرولوژیکی شدید و فرآیندهای رسوبی-فرسایشی پویا قرار دارد. چنین تغییراتی نه تنها بر پایداری هندسی رودخانه، بلکه بر کاربری‌های اراضی، زیرساخت‌های انسانی و مدیریت منابع آب تأثیر مستقیم دارد. بنابراین، اتخاذ رویکردهای مدیریتی مبتنی بر پایش مستمر چندزمانه، محدودیت‌گذاری در توسعه حریم رودخانه و طراحی سازه‌های تطبیقی برای کنترل فرسایش و رسوب‌گذاری ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش نشان می‌دهد تلفیق داده‌های سنجش از دور با تفکیک‌پذیری بالا و در عین حال متفاوت (ماهواره‌ای و پهپادی) می‌تواند ابزار قدرتمندی برای ردیابی تغییرات مورفودینامیک رودخانه‌های پیچان رودی و ارائه راهکارهای عملیاتی برای حفاظت و مدیریت پایدار آن‌ها باشد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر با حمایت سازمان اتکا و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به‌عنوان بخشی از فعالیت‌های انجام‌شده در قالب زیرپروژه مکان‌یابی و طراحی حوضچه رسوبگیر و ذخیره آب در رودخانه اترک و ایستگاه پمپاژ با کد مصوب ۰۳۵-۰۳-۰۶۹-۲۹-۲۹-۰۱۴ انجام شده است که بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی نویسندگان اعلام می‌شود.

References

- Casado, R. M., González, R. B., Ortega, J. F., Leinster, P., & Wright, R. (2017). Towards a transferable UAV-based framework for river hydromorphological characterization. *Sensors*, 17(10), 2210.
- Debnath, J., Meraj, G., Das Pan, N., Chand, K., Debbarma, S., Sahariah, D., ... & Kumar, P. (2022). Integrated remote sensing and field-based approach to assess the temporal evolution and future projection of meanders: A case study on River Manu in North-Eastern India. *Plos one*, 17(7), e0271190.
- Finotello, A., D'Alpaos, A., Bogoni, M., Ghinassi, M., & Lanzoni, S. (2020). Remotely-sensed planform morphologies reveal fluvial and tidal nature of meandering channels. *Scientific reports*, 10(1), 54.
- Flener, C., Vaaja, M., Jaakkola, A., Krooks, A., Kaartinen, H., Kukko, A., ... & Alho, P. (2013). Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-photography. *Remote sensing*, 5(12), 6382–6407.
- Gurnell, A.M., Bertoldi, W. and Corenblit, D. (2012) Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. *Earth-Science Reviews*, 111(1–2), 129–141.

- Hooke, J. (1977). An Analysis of Changes in River Channel Patterns: The Example of Streams in Devon. Ph.D. thesis, University of Exeter, 452 pp.
- Koehl, M., Piasny, G., Thomine, V., Garambois, P. A., Finaud-Guyot, P., Guillemain, S., & Schmitt, L. (2020). 4D GIS for monitoring river bank erosion at meander bend scale: case of Moselle River. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 44, 63–70.
- Latella, M., Notti, D., Baldo, M., Giordan, D., & Camporeale, C. (2024). Short-term biogeomorphology of a gravel-bed river: Integrating remote sensing with hydraulic modelling and field analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(3), 1156–1178.
- Lewin, J. (1978) Floodplain geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 2(3), 408–437.
- Li, Y., Zhang, Y., Zheng, N., Li, L., Ji, H., Bao, Z., & Feng, Z. (2025). Global classification of river morphology based on inland water dynamics characterization and digital elevation data. *Scientific Reports*, 15(1), 14258.
- Maghsoudi, M., Zamanzadeh, S. M., Yamani, M., & 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(04), 358.
- Mohamad, N., Khanan, M. F. A., Musliman, I. A., Kadir, W. H. W., Ahmad, A., Rahman, M. Z. A., ... & Zain, R. M. (2018, June). Spatio-temporal analysis of river morphological changes and erosion detection using very high resolution satellite image. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 169, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- Niță, M. D., Suarez, J. D., & Nicolae, I. A. (2025). Morphological evolution and land cover changes in the Mureș River riparian area over a century of anthropogenic pressure. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(7), 796.
- Özcan, O., & Akay, S. S. (2018, July). Modeling morphodynamic processes in meandering rivers with UAV-based measurements. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 7886–7889). IEEE.
- Rajabi, M., Roostaei, S., & Akbari, B. (2019). Investigation of Meandering Pattern of Aji-Chay River Using Central Angle Indices and Curvature coefficient (Area between Bakhshayesh and Khajeh). *Journal of Hydrogeomorphology*, 6(20), 21-40.
- Smith, G. S. H., Best, J. L., Leroy, J. Z., & Orfeo, O. (2016). The alluvial architecture of a suspended sediment dominated meandering river: the Río Bermejo, Argentina. *Sedimentology*, 63(5), 1187–1208.
- Spada, D., Molinari, P., Bertoldi, W., Vitti, A., & Zolezzi, G. (2018). Multi-temporal image analysis for fluvial morphological characterization with application to Albanian rivers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), 314.
- Tallar, R. Y., Pattipawaej, O. C., Desiani, A., Saputra, Y. A., Joelin, G. C., & Lehman, A. S. (2023). Examining meandering stream by using geomorphological characteristics with GIS-based analysis. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 429, p. 02010). EDP Sciences.
- Yamani M, Dowlati, J, Zarei A. 2010. The influence of hydro-geomorphic factors on temporal and spatial changes in the middle section of the Atrak River. *Geographical Research*, 25(99): 1–24.
- Yunesian, Z., Hemmati, F., & Hossein Zade, M. M. (2022). Investigation of changes in the meandering pattern of Darbadam river, Quchan city. *Journal of Hydrogeomorphology*, 9(30), 138-125.
- Zhang, Y., Li, C., Li, J., Luo, X., Cheng, M., Zhang, X., & Lu, B. (2025). A New Method of Geological Modeling for the Hydrocarbon Secondary Migration Research. *Applied Sciences* (2076-3417), 15(6).