نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و یکم، شماره ۶۱، تابستان ۱۴۰۰

تعیین الگوی پیچان‌رودی رودخانه قره‌سو با استفاده از شاخص‌های ضریب‌خمیدگی و زاویه‌مرکزی (محدوده روستای انزاب تا پل‌سامیان)

دریافت مقاله: ۹۷/۵/۱۸ **پذیرش نهایی**: ۹۷/۱۲/۱

صفحات: ۱۳۱-۱۱۹

فریبا اسفندیاری‌درآباد: دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران[1]
Email: esfandyari@uma.ac.ir
رئوف مصطفی‌زاده: استادیار گروه آموزشی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
Email: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir
احمد عبیات: استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه نفت امیدیه، امیدیه، ایران
Email: Ahmadabyat@gmail.com
احمد ناصری: دانشجوی کارشناسی‌ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
Email: naseriahmad65@yahoo.com

چکیده

مطالعه رفتار و الگوی پیچان‌رودی رودخانه‌ها به‌منظور جلوگیری از خطرات احتمالی از جمله سیلاب، ناپایداری بستر و حرکات پیچان‌رودی امری ضروری است. در این پژوهش رودخانه قره‌سو واقع در استان اردبیل، بازه مکانی روستای انزاب تا پل‌سامیان، به‌طول ۱۶/۷۰ کیلومتر، مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور تعیین الگوی این رودخانه از ضریب‌خمیدگی(به‌روش لئوپولد) و نیز زاویه‌مرکزی (به‌روش کورنایس)، استفاده شد. باید اشاره شود که تحقیق در این خصوص در منطقه مورد مطالعه انجام نشده است. علاوه بر این رودخانه قره‌سو، در استان اردبیل به‌شدت تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی است، لذا مطالعه تغییرات این شاخص‌ها در بازه‌های مختلف مکانی می‌تواند مفید باشد. نتایج تحقیق نشان داد که میانگین ضریب‌خمیدگی در محدوده مورد مطالعه برابر ۱/۴۷ می‌باشد، که بیانگر بالا بودن نسبت پیچ وخم رودخانه است. اما با توجه به ضرایب به‌دست آمده با روش‌های مورد استفاده نشان می‌دهد که ۷۱/۱۱ درصد مئاندرها با ضریب‌خمیدگی ۱/۵-۱، به طبقه مئاندری کم تعلق دارند. در حالی‌که ۱۷/۷۸ درصد از مئاندرها، ضریب‌خمیدگی ۲-۱/۵ و ۱۱/۱۱ درصد از مئاندرها ضریب‌خمیدگی بزرگ‌تر از ۲ را نشان می‌دهد. این بدین معناست که در منطقه مورد مطالعه حداقل ۵ مئاندر از ۲۴ مئاندر وجود دارد که مستعد تبدیل شدن به دریاچه نعل‌اسبی را دارند. لذا ضرورت تثبیت کناره‌ها و بستر رودخانه مذکور از طریق روش‌های مدیریتی و مهندسی سازه ایجاب می‌نماید.

کلید واژگان: الگوی پیچان‌رود، ضریب‌خمیدگی، رودخانه قره‌سو، زاویه‌مرکزی.

۱. **نویسنده مسئول:** اردبیل، بلوار دانشگاه، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیا

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

مقدمه

طبقه‌بندی رودخانه‌ها مبتنی بر شکل آبراهه، یکی از رایج‌ترین روش‌های طبقه‌بندی رودخانه‌ها است. در حالت طبیعی یک رودخانه تحت‌تأثیر عوامل بیرونی بدون حفاظ است و در نتیجه شکل پلان آن تغییر می‌کند و بسته به نحوه اثر عوامل موثر خارجی می‌تواند اشکال گوناگونی به خود بگیرد. به‌همین دلیل طبقه‌بندی رودخانه‌ها براساس شکل ظاهری آن‌ها مورد توجه پژوهشگران این رشته قرار گرفته است (فریردا سیلوا[1]، ۲۰۰۶: ۵۸۱). پدیده‌های مورفولوژیکی[2]، مجموعه خصوصیات شکلی و ظاهری حاکم بر رودخانه‌های آبرفتی است. این پدیده‌ها و روابط حاکم بر آن‌ها و تناوب و تراکم هر کدام، بیانگر چگونگی رفتار مورفولوژیکی رودخانه مورد نظر و میزان تغییرات و پویایی آن در طول مکان و زمان می‌باشد. مهم‌ترین پدیده‌های مورفولوژیکی رودخانه‌ها شامل خم (قوس)، چم (پیچاب[3])، میانبر[4]، دریاچه نعل‌اسبی، بهمرود[5] اتصال دو یا چند رودخانه، دو شاخگی یا تقسیم رودخانه به دو شاخه جداگانه، دلتا، نیمرخ طولی و جابه‌جایی طولی و عرضی می‌باشد که در منابع گوناگونی، توصیف‌ها و روابط حاکم و معیارهای دسته‌بندی برای هر پدیده بررسی شده است(راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، ۱۳۹۱: ۱۵۰). درجه پیچان‌رودی آبراهه، به نسبت پیچان‌رودی بستگی دارد که به‌صورت نسبت طول مسیر در آبراهه پیچان‌رودی بازه به مسیر مستقیم بازه تعریف می‌شود. اگر نسبت پیچان‌رودی بین ۱ و ۱/۲ باشد درجه پیچان‌رودی کم برآورد می‌شود و اگر نسبت پیچان‌رودی بین ۱/۲ و ۱/۵ باشد درجه پیچان‌رودی محسوس است. چنان‌چه نسبت پیچان‌رودی بیش از ۱/۵ باشد درجه پیچان‌رودی شدید در نظر گرفته می‌شود (طاهر شمسی و ایمان‌شعار، ۱۳۸۸: ۲۲). بررسی و شناخت مئاندری و مورفومتری[6] رودخانه‌ها و حوضه‌ها در زمینه مسائل مختلفی از جمله برای تخمین آبدهی رودخانه‌ها، پیش‌بینی سیلاب ، تعیین محدوده سیلابدشت‌ها، مدیریت زراعی اراضی پایین‌دست و سایر پروژه‌های منابع آب و آبخیزداری حائز اهمیت است (فرجی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳). مطالعات ریخت‌شناسی[7] مشخصات ظاهری و ویژگی‌های یک رودخانه، ناشی از تنظیم مرزهای آن به واسطه جریان و رژیم رسوبی حاکم بر آن می‌باشد. براساس ضریب‌خمیدگی (Mc) و ضریب نسبت عرض به عمق (B/D) رودخانه‌ها را از لحاظ ظاهری به سه دسته مستقیم، پیچان‌رودی و شریانی، تقسیم‌بندی کردند. ضریب‌خمیدگی عبارت از نسبت طول خط‌القعر رودخانه به طول محور آن در فاصله بین نقاط ابتدا و انتهای بازه است (لئوپلد و همکاران، ۱۹۶۴؛ به نقل از: راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، ۱۳۹۱: ۸۵؛ ویسمن[8]؛۱۹۷۲ فریردا سیلوا۹، ۲۰۰۶). ضریب‌خمیدگی یا نسبت پیچشی نشان‌دهنده نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول چم می‌باشد و میزان تکامل

1- Ferreirda Da Silva
2- Morphologic features
3- Meander
4- Cut off
5- Oxbow Lake
6- Morphometry
7- Morphology
8- Viessman
9- Ferreirda Da Silva

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

چم را نشان می‌دهد. معمولاً در طول یک رودخانه تعداد زیادی چم با مشخصات گوناگون شکل گرفته و این چم‌ها در طول زمان نیز در حال توسعه به‌سمت افزایش شدت و ضریب‌خمیدگی می‌باشد (بیدنهارد[1] و همکاران، ۱۹۹۷: ۵۰؛ ارشد و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۸۳). یکی از عوامل تعیین نوع رودخانه، بررسی خم‌ها و ضریب‌خمیدگی آن‌ها می‌باشد. ضریب‌خمیدگی بزرگ‌تر ۱/۴ تا ۱/۵ بیانگر پیچشی بودن رودخانه و کم‌تر از آن مستقیم بودن رودخانه و بازه مورد نظر است (آل‌یاسین، ۱۳۸۷: ۴۵). بر اساس معیار ولفرت[2]، در مورد تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب میزان ضریب‌خمیدگی، چهار نوع رودخانه شامل مستقیم، سینوسی، پیچان‌رودی و پیچان‌رودی شدید معرفی شده است (ویسمن[3]، ۱۹۷۲).

از میان محققان مختلف، در تحقیق نوحه‌گر و یمانی (۱۳۸۲) وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان‌رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب، مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیده‌اند که پیچ و خم قوس‌ها در طول زمان به آهستگی به سمت پایین رودخانه در حال حرکت است و در نتیجه طول خم‌ها و عرض آن‌ها با افزایش دبی و شیب در اثر آورد رسوب‌های بالادست، افزایش یافته است. محمدی استاد کلایه و همکاران (۱۳۸۵) در پژوهشی، اثرات سیل مرداد ۱۳۸۰ شرق گلستان بر مورفولوژی رودخانه مادرسو را بررسی نمودند. در این تحقیق برای بررسی خصوصیات مورفولوژیکی رودخانه در دوره قبل از وقوع سیل، از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، تصاویر TM و ETM^{+} ماهواره لندست، عرض و عمق متوسط رودخانه و جهت بررسی وضعیت مورفولوژیکی رودخانه پس از وقوع سیل از نقشه‌های پلان و پروفیل طولی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ و پروفیل عرضی با مقیاس ۱:۱۰۰ استفاده گردید. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که بعضی از خصوصیات مورفولوژیکی شامل طول قوس، طول موج، شعاع قوس و ضریب مئاندری در دو دوره قبل و بعد از سیل تفاوت معناداری با هم دارند. تغییرات مورفولوژیکی رودخانه کارون توسط ارشد و همکاران (۱۳۸۶) مورد بررسی گرفت و به این نتیجه رسیده‌اند که خصوصیات قوس‌ها در طول رودخانه در حال تغییر است و مقدار عرض قوس‌ها در مناطق مختلف از یک حالت خطی پیروی نکرده بلکه در بخش‌های مختلف کاملاً متغیر می‌باشد. رضائی‌مقدم و خوشدل (۱۳۸۸) در تحقیقی با عنوان بررسی پیچ و خم‌های مئاندر اهرچای در محدوده دشت ازومدل ورزقان، به این نتیجه رسیده‌اند که مئاندرهای منطقه دارای حرکات عرضی و طولی هستند که این حرکات باعث ایجاد تغییرات در مسیر رودخانه شده است. مقصودی و همکاران (۱۳۸۹)، با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای لندست سال‌های مختلف و مقایسه پارامترهای هندسی اندازه‌گیری شده، روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه خرم‌آباد را بررسی کرده، نتیجه گرفتند که پارامترهای هندسی به‌دست آمده در سه دوره مورد مطالعه، تغییرات شکل پلان رودخانه را نشان می‌دهد. این محققان علت این تغییرات را تغییر کاربری اراضی اطراف رودخانه بیان نمودند. جعفر بیگلو و همکاران (۱۳۹۱)، در تحقیقی تغییرات بستر و ویژگی‌های رودخانه گیلان غرب در سال ۱۳۴۴ و ۱۳۸۱ را با استفاده از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ی TM و IRS بررسی کردند. پس از محاسبه تغییرات بستر، تعداد مئاندرها و تغییرات طول رودخانه در سه دوره، نتیجه گرفتند که علت

1- Biedenharn
2- Wolfert
3- Viessman

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

تأثیرات نئوتکتونیک[1]، تغییرات رخ داده در طی دوره زمانی ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۱، شدیدتر از دیگر دوره‌ها بوده است. شریفی‌کیا و امیری (۱۳۹۲)، تغییرات الگوی مکانی رودخانه هیرمند را با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای IRS_P5 در بازه‌های زمانی مختلف بررسی نموده و نتیجه گرفتند محور رودخانه تغییرپذیری بین حداقل ۵ تا حداکثر ۳۱ درجه را تجربه کرده است. ویلیامز[2] (۱۹۹۶) در پژوهشی، به‌منظور بررسی کارایی معادله لانگبین[3] و لئوپلد در محاسبه مئاندر رودخانه، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط چندین محقق از کشورهای مختلف، به بررسی و مقایسه نتایج پرداخت، نتایج حاصل از تحقیق ایشان بدین‌گونه است که معادله مذکور، برای محاسبه مئاندر و هندسه رودخانه، دارای دقت بسیار مناسبی است. سارکار[4] و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دینامیک رودخانه‌ای براهماپوترا[5] در هند را در فاصله زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ بررسی نمودند. ایشان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P6LISS_III و IRS 1 A LIS-I و تحلیل آن‌ها، عوامل مؤثر بر تغییرات مورفولوژی رودخانه در فاصله زمانی ۱۰ سال را شناسایی نموده و تصدیق کردند که تحلیل تصاویر ماهواره‌ای آخرین اطلاعات از وضعیت مورفولوژیکی رودخانه را در اختیار محققان قرار می‌دهد. پان[6] (۲۰۱۳) تغییرات حوضه رودخانه بانکورا[7] را با استفاده از فن سنجش از دور و نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده‌های MSS و ETM) در دوره‌های زمانی مختلف، مورد مطالعه قرار داده، شاخص‌های مورفولوژیکی رودخانه از جمله ضریب‌خمیدگی، تقارن مقطع عرضی دره و نسبت پیچان‌رودی را از تصاویر ماهواره‌ای استخراج نمود. نتایج نشان داد که شاخص‌های مورفولوژیکی رودخانه در فواصل زمانی مورد بررسی در حال تغییر بوده و این تغییرات در نواحی مختلف متفاوت می‌باشد.

آزتورک و سسلی[8] (۲۰۱۵) در مطالعه الگوی رودخانه کیسیلرمک[9] به طول تقریبی ۱۳۰۰ کیلومتر، در محیط نرم‌افزار GIS، با استفاده از داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره Landsat TM / ETM$^+$ / OLI سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۳، تغییرات زمانی خصوصیات جریان رودخانه کیسیلرمک را براساس محل سدها، به ۲۱ بخش طبقه‌بندی و بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که مقدار سینوسیته در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۰ در ۱۵ بخش کاهش یافته است. مقادیر BI، B و BR در ۱۱ بخش در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۰ و در ۹ بخش در سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳، کاهش یافته است. ایشان عوامل تأثیر گذار بر تغییرات سینوسیته را احداث سد و برداشت از معادن شن و ماسه از رودخانه دانستند. در مجموع براساس سوابق تحقیق می‌توان گفت که فرآیندهای آبرفتی مرتبط با مورفولوژی رودخانه دارای مراحلی از شکل‌گیری تا تکامل است. در این راستا فرآیندهای طبیعی و نیز فعالیت‌های اصلاحی و تنظیم رودخانه به‌همراه ارتباط دبی جریان، رسوب و بستر رودخانه مورفولوژی رودخانه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. رودخانه قره‌سو در استان اردبیل دارای اهمیت ویژه‌ای بوده و ضمن عبور از اراضی

1- Neotectonic
2- Williams
3- Langbein
4- Sarkar
5- Brahmaputra
6- Pan
7- Bankura
8- Ozturk and Sesli
9- Kisilirmak

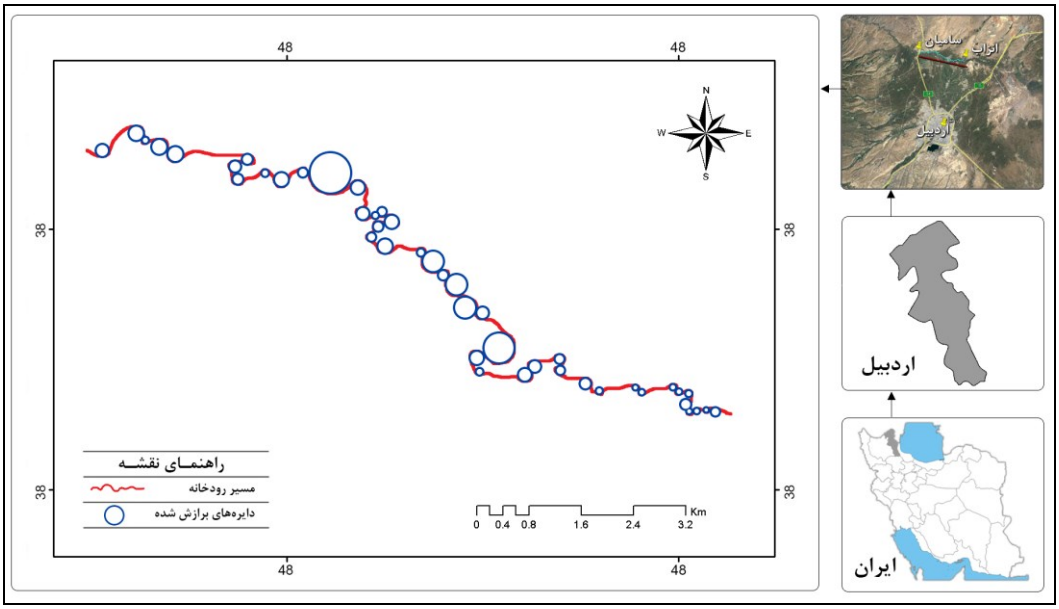
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

کشاورزی دشت اردبیل، در نهایت به سد سبلان می‌ریزد. در این راستا تحولات رودخانه مذکور تحت‌تأثیر فعالیت‌های انسانی و برداشت از جریان رودخانه‌ای است. هدف از پژوهش حاضر، مطالعه الگوی پیچان‌رودی رودخانه قره‌سو با استفاده از شاخص‌های ضریب‌خمیدگی و زاویه‌مرکزی می‌باشد.

روش تحقیق

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه قره‌سو دارای مساحتی حدود ۴۱۰۰ کیلومترمربع است. مختصات جغرافیایی منطقه، ۴۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی، در قسمت شمال غربی ایران واقع شده است. رودخانه قره‌سو از رشته کوه‌های تالش در شرق اردبیل سرچشمه می‌گیرد و در مسیر خود ضمن عبور از دشت اردبیل آب‌های جاری بالیخلوچای که از ارتفاعات سبلان و شهرستان نیر زهکش می‌شود را جمع‌آوری می‌کند. رودخانه مذکور پس از پیوستن به اهرچای، در محل اصلاندوز به رودخانه مرزی ارس می‌ریزد. در شکل(۱)، موقعیت رودخانه قره‌سو درایران و استان اردبیل نشان داده شده است. ارتفاع بلندترین نقطه قله کوه سبلان (نسبت به سطح دریا)، برابر ۴۷۸۸ متر و ارتفاع پست‌ترین نقطه واقع در حوالی پل سامیان برابر ۱۲۰۰ متر می‌باشد (افخمی و نصیری صالح، ۱۳۹۴: ۳۴). در این پژوهش، به‌منظور بررسی وضعیت پیچان‌رودی رودخانه قره‌سو، بازه‌ای به طول ۱۶/۷۰ کیلومتر (محدوده روستای انزاب تا پل سامیان) در نظر گرفته شد.



شکل (۱). موقعیت رودخانه قره‌سو در ایران و استان اردبیل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

داده و روش کار

در این پژوهش، وضعیت پیچان‌رودی رودخانه قره‌سو با استفاده از شاخص‌های ضریب‌خمیدگی به روش لئوپولد و زاویه‌مرکزی به روش کورنایس، مورد بررسی قرار گرفت. تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق، مربوط به سنجنده OLI ماهواره لندست۸ در سال ۲۰۱۸، باندهای (۲، ۳ و ۴) در محدوده طیفی ۴۵۰ تا ۷۵۰ میکرومتر، است. در این پژوهش ابتدا از روش FLAASH در نرم‌افزار ENVI5 به‌منظور تصحیح اتمسفری استفاده گردید. سپس مسیر مورد نظر از منطقه مورد مطالعه (برابر با ۱۶/۷۰ کیلومتر) در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.3 ترسیم شد (صفرزاده و صالحی‌نیشابوری، ۱۳۸۴: ۷۰؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۸۰؛ نوحه‌گر و یمانی، ۱۳۸۲: ۷۲). در جدول(۱)، مشخصات تصویر مورد استفاده در ارزیابی تغییرات رودخانه قره‌سو، ارائه شده است.

جدول (۱). مشخصات تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در ارزیابی تغییرات رودخانه قره‌سو، اردبیل

ماهواره Landsat8، سنجنده OLI_TIRS					
نام منطقه تصویر	مسیر	گذر	تاریخ اخذ	زاویه آزیموت خورشید	زاویه ارتفاع خورشید
اردبیل	۱۶۷	۳۳	۲۰۱۸/۰۱/۰۶	۱۵۷/۸۱۳	۲۵/۳۳۷

سپس به‌منظور استخراج پارامترهای هندسی رودخانه، به‌صورت گرافیکی روی هر یک از قوس‌های رودخانه قره‌سو، دایره‌هایی مماس با پیچان‌رودها، ترسیم، اندازه‌گیری و مقایسه آماری بین آن‌ها صورت گرفت شکل(۲). آن‌گاه براساس دایره‌های مماس، اندازه طول قوس، طول موج و شعاع انحناء به‌دست آمد. سپس از پارامترهای فوق‌الذکر جهت محاسبه، از ضریب‌خمیدگی و زاویه مرکزی استفاده شد(صفرزاده و صالحی‌نیشابوری، ۱۳۸۴: ۷۲؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۸۱).



شکل (۲). نمایی از موقعیت رودخانه و مئاندرها با استفاده از Google Earth در محدوده مورد مطالعه

محاسبه پارامترهای هندسی مورد استفاده در پژوهش

زاویه مرکزی و شعاع پیچان‌رود: زاویه مرکزی به‌عنوان معیاری جهت تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه پیچان‌رودی رودخانه استفاده می‌شود. برای محاسبه آن ابتدا دایره‌هایی مماس بر مئاندر رودخانه در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد. سپس از مرکز هر یک از دایره‌های مماس بر قوس‌ها دو شعاع به نقاط عطف دایره‌ها با دره رودخانه ترسیم شد. زاویه ایجاد شده از محل اتصال دو شعاع، زاویه مرکزی و به شعاع مماس بر دایره قوس‌ها، شعاع دایره گفته می‌شود و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود که در آن، A زاویه مرکزی، R شعاع انحناء، π عدد پی می‌باشد (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۸۴).

$$A = \frac{180 \times L}{\pi \times R}$$

رابطه (۱)

جدول(۲) نشان‌دهنده نحوه طبقه‌بندی پیچان‌رودها براساس اندازه زوایه مرکزی است. زاویه‌مرکزی پیچان‌رود را به ۶ فرم، مستقیم، شبه پیچان‌رود (۴۱-۰)، پیچان‌رود توسعه نیافته (۸۵-۴۱)، پیچان‌رود توسعه یافته (۱۵۸-۸۵)، پیچان‌رود زیاد توسعه یافته (۲۹۶-۱۵۸) و نعل اسبی (۲۹۶<)، طبقه‌بندی می‌کند.

جدول (۲). میزان توسعه چم رودخانه قره‌سو اردبیل برمبنای زاویه‌مرکزی

شکل رودخانه	مستقیم	شبه پیچان‌رودی	پیچان‌رودی توسعه نیافته	پیچان‌رودی توسعه یافته	پیچان‌رودی زیاد توسعه یافته	نعل اسبی
زاویه‌مرکزی (درجه)	۰	۴۱-۰	۸۵-۴۱	۱۵۸-۸۵	۲۹۶-۱۵۸	۲۹۶<

طول موج و طول دره: طول موج و طول دره‌ی رودخانه، دو پارامتر اصلی در تعیین ضریب‌خمیدگی رودخانه است. معمولاً بین این دو پارامتر همبستگی بالایی وجود دارد (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۸۶). برای به‌دست آوردن طول موج روی نقشه محور مسیر رودخانه، ابتدا نقاط عطف یا نقاط تغییر انحنای محور رودخانه با دقت زیاد مشخص شد، سپس هر دو نقطه عطف مربوط به یک قوس به یکدیگر متصل و طول پاره‌خط به‌دست‌آمده (وتر مقابل به قوس محور رودخانه) با نرم‌افزار ArcGIS اندازه‌گیری شد. در ادامه برای به‌دست آوردن طول دره نیز با توجه به نقطه عطف یک قوس تا نقطه عطف قوس بعدی در روی مسیر رودخانه مشخص، و برای هر قوس اندازه‌گیری شد.

ضریب سینوسیته (خمیدگی): شاخص ضریب‌خمیدگی یکی از معیارهای کمی است که در تقسیم‌بندی شکل رودخانه استفاده شد. این عامل نشان‌دهنده نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول چم است و میزان تکامل چم را نشان می‌دهد. ضریب‌خمیدگی اولین بار توسط لئوپولد و همکاران (۱۹۶۴)، برای طبقه‌بندی رودخانه‌ها تعریف شده است. ایشان، رودخانه‌ها را با توجه به مقدار ضریب سینوسیته به سه دسته طبقه‌بندی نموده‌اند، در صورتی‌که ضریب سینوسیته رودخانه در حد متوسط یا بزرگ باشد، رودخانه مئاندری محسوب می‌شود جدول(۳).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

جدول (۳). طبقه‌بندی بندی مقدار ضریب سینوسیته رودخانه بر اساس تقسیم‌بندی لئوپولد و همکاران (۱۹۶۴)

رودخانه‌های با ضریب سینوسیته	کم	(۱ < P < ۱/۵)
رودخانه‌های با ضریب سینوسیته	متوسط	(۱/۵ ≤ P < ۲)
رودخانه‌های با ضریب سینوسیته	بزرگ	(P ≥ ۲)

ضریب‌خمیدگی رودخانه با استفاده از رابطه (۲)، که در آن، S ضریب‌خمیدگی، L طول قوس، λ طول موج می‌باشد، محاسبه شد.

$$S = \frac{L}{\lambda/2}$$

رابطه (۲)

نتایج

به علت دیوار کشی بتونی محدوده رودخانه به‌منظور احداث پل‌ها (پل دولت‌آباد و پل سامیان) و دیگر سازه‌های بتنی در مسیر رودخانه شکل(۳-۱)، باعث کاهش پتانسیل تغییرات و آزادی عمل رودخانه در این بازه نسبت به بازه‌های دیگر شده است. هم‌چنین کم نمودن عمق کانال جهت عبور ماشین‌آلات کشاورزی از عرض رودخانه باعث تغییر در عرض و عمق طبیعی کانال شده است شکل(۳-۲). ساخت‌وساز منازل مسکونی در حریم رودخانه شکل(۳-۳)، باعث تثبیت بخش‌هایی از دیواره‌های کانال که منجر به تغییر در نظم طبیعی حرکت و گسترش مئاندر شده است.

بررسی میدانی مسیر مورد مطالعه نشان داد قسمت‌هایی از مسیر رودخانه به‌صورت تجاوز به زمین‌های زراعی اطراف بوده که با انحراف مسیر رودخانه توسط کشاورزان به بستر اصلی، قوس‌خوردگی اصلی از بین رفته است. تغییر مسیر جریان آب رودخانه به‌وسیله موانع چوبی و سنگی به‌منظور کاهش قدرت جریان در برش دیواره‌های بخش مقعر مئاندر رودخانه و حتی در مسیرهای مستقیم رودخانه صورت گرفته است شکل(۳-۴). لذا احتمال می‌رود که دست‌کاری انسان در عرض رودخانه و تغییر در جهت و شدت پیچ‌وخم رودخانه باعث کاهش و یا افزایش ضریب‌خمیدگی در برخی از بازه‌های رودخانه قره‌سو (روستای انزاب تا سد سبلان) شده است.



۳-۱



۳-۲

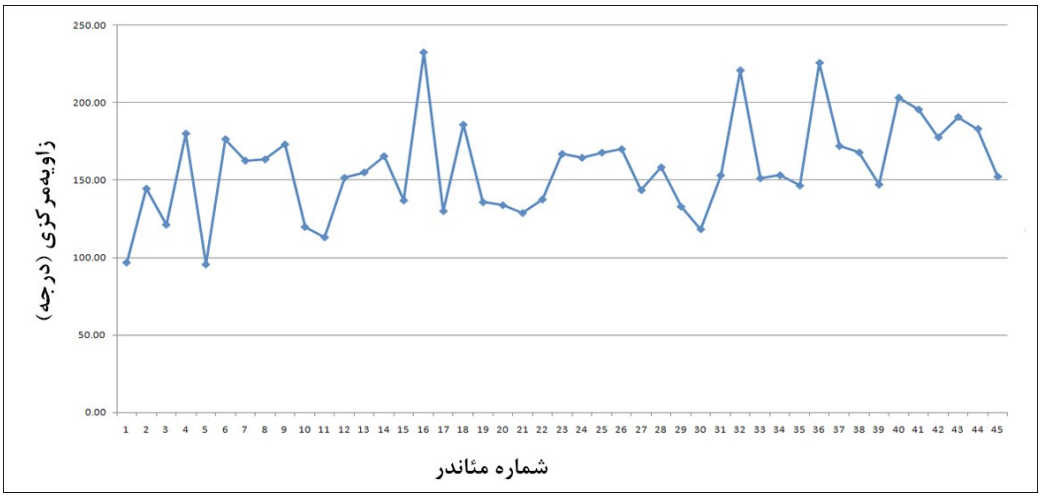
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]



۳-۴ ۳-۳

اشکال(۳). دخالت و دست‌کاری انسان در رودخانه قره‌سو اردبیل (روستای انزاب تا سد سبلان)

هم‌چنین با توجه به نتایج بررسی‌های به عمل آمده از شکل(۴)، در مورد زاویه مرکزی کورنایس در ۴۵ نقطه از رودخانه قره‌سو در بازه مکانی روستای انزاب تا پل‌سامیان نشان می‌دهد که فراوانی زاویه‌مرکزی قوس‌ها در طبقه‌بندی پیچان‌رود توسعه یافته و پیچان‌رود خیلی توسعه یافته قرار دارند. با توجه به شکل(۴) هر ۴۵ مورد دارای زوایه بزرگ‌تر از ۸۵ درجه بوده که تعداد ۲۳ زاویه‌مرکزی از ۴۵ مورد دارای زاویه بین ۱۵۸-۸۵ درجه بوده، در رده پیچان‌رودی توسعه‌یافته و تعداد ۲۲ مورد از مجموع زاویه‌ها دارای زاویه بین ۲۹۶-۱۵۸ درجه در رده پیچان‌رودی بسیار توسعه‌یافته قرار دارند. لازم به‌ذکر است که به‌جزء مئاندرهای شماره ۱۶، ۳۲، ۳۶ و ۴۰، تقریباً همه مئاندرها با اختلافی کم و بیش در محدوده بین ۱۰۰ الی ۲۰۰ درجه قرار دارند اما ۴ مئاندر فوق‌الذکر دارای زاویه مرکزی بیش از ۲۰۰ درجه می‌باشند و بیانگر وجود ۴ مئاندر در منطقه مورد مطالعه است که سیر تکاملی خود را بیش‌تر از بقیه مئاندرها طی نموده‌اند.



شکل (۴). مقادیر زاویه‌مرکزی کورنایس در مئاندرهای رودخانه قره‌سو اردبیل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

براساس محاسبه میانگین، زاویه مرکزی قوس‌های رودخانه قره‌سو ۱۵۷/۷۸ درجه به‌دست آمد. لذا زاویه‌مرکزی منطقه مورد مطالعه براساس طبقه‌بندی زاویه‌مرکزی کورنایس تنها در دو طبقه پیچان‌رود توسعه‌یافته و پیچان‌رود خیلی توسعه‌یافته قرار دارند. هم‌چنین این مقادیر نشان‌دهنده توسعه یافتگی بازه پیچان‌رودی منطقه مورد مطالعه است. بیش‌ترین درصد فراوانی به میزان ۵۱/۱۱ درصد مربوط به زاویه مرکزی ۱۵۸-۸۵ است که پیچان‌رود توسعه یافته محسوب می‌شود. دومین فراوانی به‌میزان ۴۸/۸۹ درصد ما بین زاویه مرکزی ۲۹۶-۱۵۸، مربوط به پیچان‌رود خیلی توسعه یافته می‌باشد. در حالی‌که هیچ موردی در محدوده ۴۱-۰ و درجه بزرگ‌تر از ۲۹۶ (نعل اسبی) قرار نگرفته است جدول(۴).

جدول (۴). میزان رشد قوس‌های پیچان‌رودی در روخانه قره‌سو اردبیل بر اساس زاویه‌مرکزی

شکل رودخانه	درصد فراوانی	زاویه‌مرکزی (درجه)
شبه پیچان‌رود	۰	۴۱-۰
پیچان‌رود توسعه نیافته	۰	۸۵-۴۱
پیچان‌رود توسعه یافته	۵۱/۱۱	۸۵ –۱۵۸
پیچان‌رود خیلی توسعه یافته	۴۸/۸۹	۱۵۸ -۲۹۶
نعل‌اسبی	۰	بزرگ‌تر از ۲۹۶

هم‌چنین با توجه به جدول(۵)، میانگین سینوسیته در مقاطع مورد مطالعه در رودخانه قره‌سو ۱/۴۷ می‌باشد که این نکته براساس طبقه‌بندی مقدار ضریب‌خمیدگی رودخانه توسط لئوپولد و همکاران (۱۹۶۴)، ضریب‌خمیدگی رودخانه قره‌سو (روستای انزاب تا پل سامیان) در طبقه رودخانه‌هایی با ضریب‌خمیدگی کم قرار دارد. اما مقدار حداکثر ضریب‌خمیدگی بازه مورد مطالعه (۲/۲۶)، بیانگر وجود مئاندرهایی با ضریب‌خمیدگی بزرگ و توسعه‌یافته است.

جدول (۵). ضریب‌خمیدگی قوس‌ها در رودخانه قره‌سو اردبیل

میانگین ضریب‌خمیدگی	حداکثر ضریب‌خمیدگی	حداقل ضریب‌خمیدگی
۱/۴۷	۲/۲۶	۱/۱۲

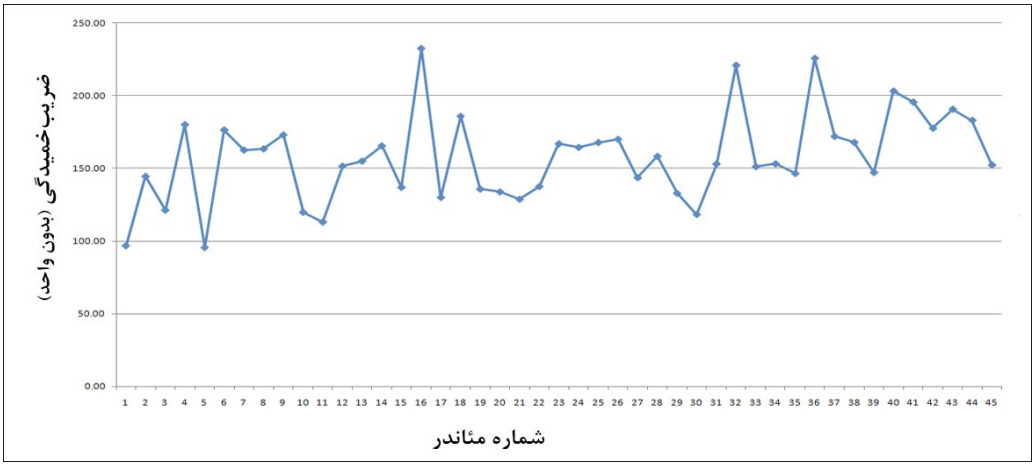
براساس جدول(۶)، ۷۱/۱۱ درصد مئاندرها (۳۲ مئاندر) با ضریب‌خمیدگی ۱/۵-۱، به طبقه مئاندری کم تعلق دارند. در حالی‌که ۱۷/۷۸ درصد از مئاندرها، ضریب‌خمیدگی ۲-۱/۵، (۸ مئاندر) و ۱۱/۱۱ درصد از مئاندرها ضریب‌خمیدگی بزرگ‌تر از ۲، (۵ مئاندر) را نشان می‌دهد. این بدین معناست که در منطقه مورد مطالعه حداقل ۵ مئاندر وجود دارد که مستعد تبدیل شدن به دریاچه نعل‌اسبی را دارند.

جدول (۶): طبقه‌بندی مقدار ضریب سینوسیته رودخانه قره‌سو اردبیل

	قوس‌های با ضریب‌خمیدگی ۱/۵-۱	قوس‌های با ضریب‌خمیدگی ۲-۱/۵	قوس‌های با ضریب‌خمیدگی بزرگ‌تر از ۲
تعداد	۳۲	۸	۵
درصد	۷۱/۱۱	۱۷/۷۸	۱۱/۱۱
طبقه	مئاندری کم	مئاندری متوسط	مئاندری زیاد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

شکل(۵)، ضریب‌خمیدگی مئاندرهای محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد، در این شکل به‌وضوح دیده می‌شود اکثر مئاندرهای مسیر مورد مطالعه (۳۲ مئاندر از ۴۵ مئاندر) دارای ضریب‌خمیدگی کم و در محدوده ۱/۵-۱ و ۸ مئاندر از مجموع کل مئاندرها با ضریب‌خمیدگی بیش از ۱/۵ در طبقه مئاندری متوسط قرار دارند در حالی که ۵ مئاندر از مئاندرهای مطالعه شده، ضریب‌خمیدگی زیاد دارند و تبدیل شدن آن‌ها به دریاچه نعل‌اسبی، در صورت وقوع سیلاب دور از انتظار نیست.



شکل (۵). مقادیر ضریب سینوسیته رودخانه قره‌سو اردبیل (براساس ضریب‌خمیدگی لئوپولد و همکاران، ۱۹۶۴)

نتیجه‌گیری

رودخانه قره‌سو (روستای انزاب تا پل‌سامیان) از زمین‌های کشاورزی وسیع گذشته و پادگانه‌های آن بر اساس مطالعات میدانی، حاصل تغییرات کشاورزان منطقه به‌منظور افزایش زمین‌های زیر کشت، ساخت‌وساز پل و سازه‌های بتنی در مسیر رودخانه، برداشت بی‌رویه آب رودخانه، احداث منازل مسکونی در حریم رودخانه و تخلیه فاضلاب‌های شهری و روستاهای منطقه موردمطالعه، است. براساس مطالعات میدانی در برخی از بازه‌ها افزایش ارتفاع پادگانه‌ها و تثبیت دیواره‌های کانال با مصالح سنگی و چوبی به‌منظور حفظ زمین‌های کشاورزی از سیلاب، دست‌کاری عمق و عرض کانال به‌منظور عبور دام و تجهیزات کشاورزی و هم‌چنین انحراف مسیر بازه‌ای از مسیر رودخانه توسط کشاورزان، مانع گسترش طبیعی مئاندرهای منطقه مورد مطالعه شده است.

با توجه به اینکه درجه سینوسیته در منطقه مورد مطالعه شدید نیست و راهکارهایی به‌صورت پراکنده توسط کشاورزان منطقه جهت مقابله با سیلاب اعمال شده است. اما وجود پیچان‌رودهای بسیار توسعه یافته این پتانسیل را دارند که در طی یک جریان کاتاستروفیک باعث ایجاد اشکال نعل‌اسبی شوند و احتمالاً باعث خساراتی نیز شوند، رودخانه قره‌سو نیز در محدوده روستای انزاب تا پل‌سامیان این پتانسیل را دارد که در صورت وقوع سیلاب‌هایی با دوره بازگشت بیش از ظرفیت آبراهه، باعث قطع‌شدگی مسیر رودخانه شده و خسارات زیادی را به وجود آورد. هم‌چنین با توجه به تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد در منطقه مورد بررسی مئاندرهای بسیار توسعه یافته وجود دارند که در صورت بروز جریان‌هایی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

که بیش از ظرفیت مجرای رودخانه باشند، اراضی کشاورزی و مسکونی زیادی در معرض خطر قرار خواهند گرفت.

همان‌طور مقصودی و همکاران (۱۳۸۹) به عامل تغییر کاربری اراضی در تغییرات پلان رودخانه اشاره نموده‌اند، وجود اراضی کشاورزی در اطراف محدوده مورد مطالعه از مواردی است که تحول رودخانه و توسعه مئاندرها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. هم‌چنین براساس نتایج تحقیق آزتورک و سسلی (۲۰۱۵) که به تأثیر احداث سد بر کاهش سینوسیته رودخانه، اشاره نموده‌اند. باید اشاره شود که احداث سد یامچی در بالادست رودخانه بالیخلوچای بر بیلان رسوب رودخانه تأثیر گذاشته و با کاهش رسوبات در پایین‌دست، زمینه توسعه فرسایش و گسترش مئاندرها را فراهم نموده است. اما با توجه به بررسی میدانی مسیر مورد مطالعه، دست کاری انسان در عرض و عمق رودخانه را نمی‌توان نادیده گرفت. در اکثر بازه‌ها دخل و تصرف انسان در انحراف مسیر رودخانه، تثبیت و یا حذف مئاندرها، کاهش عرض رودخانه به‌منظور افزایش زمین‌های کشاورزی و یا کاهش عمق بخش‌هایی از رودخانه برای تردد ماشین‌آلات کشاورزی، نمایان است. لذا علاوه بر اثرات سد یامچی، دخالت انسان نیز بر شدت ضریب‌خمیدگی رودخانه قره‌سو (روستای انزاب تا پل سامیان) تاثیر گذاشته است.

پیشنهادات

رودخانه قره‌سو بدلیل تامین آب مصرفی روستاها و اراضی کشاورزی زیادی که در اطراف آن قرار دارند از اهمیت زیادی برخوردار است و نیاز به نظارت و حفاظت از حریم رودخانه دارد. لذا پیشنهاد می‌شود مطالعات گسترده‌ای در این زمینه صورت گیرد و حریم رودخانه تعیین گردد.

منابع

ارشد، صالح؛ مرید، سعید؛ میرابولقاسمی، هادی. (۱۳۸۶). **بررسی روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: رودخانه کارون از گتوند تا فارسیاب ۸۲-۱۳۶۹)**، علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۶): ۱۹۴-۱۸۰.

افخمی، مریم؛ نصیری صالح، فرزین. (۱۳۹۴). **ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی و یکپارچه در شبیه‌سازی متوسط روزانه دبی جریان درحوضه آبریز رودخانه قره‌سو ـ اردبیل**، مهندسی عمران مدرس، ۱۵: ۳۱-۴۰.

آل یاسین، احمد. (۱۳۸۷). **کاربرد مهندسی رودخانه در رودخانه‌های دز و کارون**، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، چاپ دوم، ۷۳۶ ص.

جعفر بیگلو، منصور؛ باقری، سجاد؛ نگهبان، سعید؛ صفرراد، طاهر. (۱۳۹۱). **بررسی تغییرات بستر و ویژگی‌های مورفولوژیکی رودخانه گیلان غرب در سال‌های ۱۳۴۴ تا ۱۳۸۸**، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲: ۱۰۲- ۸۷.

راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، (۱۳۹۱). نشریه شماره ۵۹۲، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی، ۱۸۷-۱.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]

رضائی مقدم، محمد حسین؛ خوشدل، کاظم. (۱۳۸۸). **بررسی پیچ و خم‌های مئاندر اهرچای در محدوده دشت ازومدل ورزقان**، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۰(۱): ۱۱۲-۱۰۱.

شریفی کیا، محمد، مال امیری، نعمت. (۱۳۹۲). **آشکارسازی تغییرات الگوی مکان رودخانه هیرمند و تحلیل مورفولوژیکی آن**، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴: ۱۶۰-۱۴۹.

صفرزاده، اکبر؛ صالحی نیشابوری، سید علی اکبر. (۱۳۸۴). **مطالعه هیدرودینامیک الگوی آشفته جریان قوس رودخانه با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی**، تحقیقات منابع آب ایران، ۱(۳): ۷۷-۶۵.

طاهر شمسی، احمد؛ ایمان‌شعار، فرهاد. (۱۳۸۸). **بررسی رابطه بین پارامترهای هندسی رودخانه و ضریب سینوسیته**، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۴۱ (۲): ۲۶-۱۹.

فرجی، عبدالله؛ دوستکامیان، مهدی؛ نوروزی، خدیجه؛ بیرانوند، آذر. (۱۳۹۱). **بررسی ویژگی‌های مورفومتری و فیزیوگرافی حوضه رودخانه ایزدخواست با استفاده از GIS**، اولین همایش بین‌المللی بحران‌های زیست‌محیطی ایران و راهکارهای بهبود آن، دانشگاه آزاد علوم تحقیقات اهواز، ۸-۱.

محمدی استاد کلایه، امین؛ مساعدی، ابوالفضل؛ علاقمند، سینا. (۱۳۸۵). **بررسی اثرات سیل مرداد ۱۳۸۰ شرق بر مورفولوژی رودخانه مادرسو**، علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۱): ۱۷-۹.

مقصودی، مهران؛ شرفی، سیامک؛ مقامی، یاسر. (۱۳۸۹). **روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه خرم آباد با استفاده از RS، GIS و Auto Cad**، فصلنامه علوم انسانی مدرس، ۶۸: ۲۹۴-۲۷۵.

نوحه‌گر، احمد؛ یمانی، مجتبی. (۱۳۸۲). **بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان‌رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب (پایین‌دست میناب)**، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۷(۲): ۸۵-۶۵.

Biedenharn, D.S., Elliot, C.M. and Watson, C.C. 1997. **The WES stream investigation and stream bank stabilization handbook,** U.S. Army Engineering, 286 p.

Ferreirda Da Silva, A.M. 2006. **On why and how do rivers meander**, Journal of Hydraulic Research, 44: 579-590.

Leopold, L.B., Wolman, M., and Miller, J.P. 1964. **Fluvial processes in geomorphology,** W.H. Freeman, San Francisco, 522 pp.

Ozturk, D., and Sesli, F. A. 2015. **Determination of temporal changes in the sinuosity and braiding characteristics of the Kizilirmak River, Turkey**, Polish Journal of Environmental Studies, 24(5): 2095-2112.

Pan, S. 2013. **Application of remote sensing and GIS in studying changing river course in Bankura District, West Bengal**, International Journal of Geometrics and Geosciences, 4(1): 149-163.

Sarkar, A.; Garg, R. D. and Sharma, N. 2012. **RS-GIS based assessment of river dynamics of Brahmaputra River in India**, Journal of Water Resource and Protection, 4: 63-72.

Viessman, J.R. 1972. **Introduction to Hydrology**, Pergamon Press, New York.

Williams, G. P. 1986. **River meanders and channel size**. Journal of Hydrology, 88(1-2): 147-164.

Wolfert, H.P. 2001. **Geomorphologic change and River Rehabilitation, Case studies on Lowland Fluvial systems in the Netherlands**, Alterra Green World Research, Wageningen, 197 p.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.61.5.3]
[DOI: 10.52547/jgs.21.61.119]