

حساسیت شاخص‌های شکل و تحولی مآندرها به پویایی رودخانه‌های کوچک (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو در کرمانشاه)

ایرج جباری* - دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی
طاهره رحیمی جاوید- دانش‌آموخته ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱/۲۷

چکیده

برای بررسی وضعیت پویایی موج‌ها و مآندرها، رودخانه قره‌سو مسیر رودخانه در چهار دوره زمانی بر اساس عکس‌های هوایی سال‌های ۱۳۳۴ و ۱۳۴۶ و تصاویر ماهواره‌ای IRS سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ در محیط نرم‌افزار GIS رقمی شد و فاکتورهای شکل مانند شعاع مآندرها، طول موج، دامنه، و عرض ساحل طغیانی و شاخص‌های تحولی مانند ضریب فعالیت مجرا، میزان جابه‌جایی عرضی، و مساحت تصرف‌شده توسط فعالیت مجرا از آن‌ها استخراج شد. نتایج آزمون‌های آماری نشان داد که در چهار دوره زمانی هیچ اختلاف معنی‌داری بین فاکتورهای شکل رودخانه وجود ندارد؛ ولی شاخص‌های تحولی و شاخص‌های ترکیبی نشان دادند که رود در سه دوره زمانی اول به سمت تعادل ایستا و در دوره چهارم به پویایی تمایل دارد. این شاخص‌های تحولی می‌توانند با دقت بیشتر به شیوه دیگری نیز استخراج شوند. از دو دوره تصویر ماهواره‌ای ۱۳۸۶ و ۱۳۹۴ پهنای رود ترسیم شد و ترکیب آن‌ها با دستور یونیون بازه‌هایی از رودخانه را، که دچار تغییرات مساحت و جابه‌جایی شده بودند، به دقت نشان داد. در رودخانه قره‌سو پویایی رودخانه به بازه مستقیم‌شده در میان دست رود و همچنین چند بازه پایین‌دست آن متمرکز شده است.

کلیدواژه‌ها: پویایی رودخانه، تغییر مجرا، رودخانه قره‌سو، ژئومورفولوژی، مآندر.

مقدمه

رودخانه‌ها به‌طور مداوم در اثر رخدادهای هیدرولوژی تغییر می‌کنند (برایس، ۱۹۹۷: ۱). این تحول و جابه‌جایی در دشت‌های سیلابی به شکل‌گیری مآندرها منجر می‌شود (گبریس و نادور، ۲۰۰۷: ۲۷۵۸). میزان جابه‌جایی مآندرها عموماً یک متر در سال یا کمتر است (لاتگنس و تاروک، ۱۹۹۵: ۴۹۷)؛ ولی در اثر رخدادهای معین هیدرولوژیک ممکن است تا بیست متر نیز جابه‌جا شوند و مورفولوژی متفاوتی ایجاد کنند. میزان جابه‌جایی مآندرها به مقاومت در برابر فرسایش ساحل مقعر رود (نانسون و هیکین، ۱۹۸۶: ۴۹۸)، مدت زمان و بزرگی جریان (اودگارد، ۱۹۸۷: ۱۲۲۵)، شعاع انحنای مجرا (نانسون و هیکین، ۱۹۸۳: ۴۹۷)، و ظرفیت جریان برای انتقال رسوب (نیل، ۱۹۸۷: ۲۲۵)؛ پو هانگ و نمگو، ۲۰۰۹: ۶۲۹) بستگی دارد. در چند دهه گذشته دخالت‌های انسان در طبیعت مستقیم یا غیرمستقیم (با اثرگذاری در متغیرهای پیش‌گفته) تحول مآندرها را در دشت‌های سیلابی تغییر داده است. از آنجا که تفهیم واکنش سامانه‌های رودخانه‌ای برای ارزیابی و پیش‌بینی اثرهای دخالت‌های انسانی در حوضه‌های آبخیز و سامانه‌های رودخانه‌ای ضروری است (لاتاپیه و همکاران، ۲۰۱۴)، بررسی ویژگی‌ها و جابه‌جایی مآندرها نیز به عنوان یکی از نمودهای بارز واکنش سامانه‌های رودخانه‌ای ضرورت پیدا می‌کند.

* E-mail: iraj.jabbari@razi.ac.ir

مقایسه نموداری مجاری (گرانل و همکاران، ۱۹۹۴: ۱۸۹)، پارامترهای خمش (مانند هوک، ۲۰۰۷: ۲۷۸)، سازگاری خمش (لاگسی و همکاران، ۲۰۰۴: ۱)، تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی و مکانی (ادینک و کلینهناس، ۲۰۰۸: ۶)، و مدل‌سازی و طبقه‌بندی تغییرات (هوارد، ۱۹۹۲: ۱) پنج موضوع مهمی هستند که در بررسی مماندها بدان‌ها توجه می‌شود. گانیرلاپ و همکاران (۲۰۱۲: ۲) پژوهش‌های مربوط به مجاری مماندگی را در شش گروه اصلی (قلمرو محیطی، تمرکز بررسی، مقیاس فضایی، مقیاس زمانی، رویکرد روش‌شناختی، و رویکرد مفهومی) و ۲۳ گروه فرعی قرار می‌دهند. این پژوهش‌ها، براساس شاخص‌های کمی مانند پهنا، طول موج، و شعاع انحنا انجام می‌گیرد که تعدادی از پژوهشگران با استفاده از آن‌ها میزان توسعه‌یافتگی پلان بعضی از مجاری رودخانه‌ای ایران (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۹۰؛ بیاتی خطیبی، ۱۳۹۱: ۲۰۹؛ رضایی مقدم و خوش‌دل، ۱۳۸۸: ۱۱۰؛ یمانی و شرفی، ۱۳۹۱: ۲۲) را توضیح داده‌اند. ولی افزایش حجم بهره‌برداری‌های انسان از طبیعت و فشار بر منابع طبیعی کشور در چند دهه اخیر باعث شده است تا رفتار رودها در واکنش به این تغییرات محیطی دگرگون شود و به تبع آن ریخت‌شناسی رودخانه‌ها نیز تغییر یابد. یوسفی و همکاران (۲۰۱۶) تغییرات ریخت‌شناسی کارون را در واکنش به تغییر کاربری زمین و علایی طالقانی و همکاران (۱۳۹۲: ۱۰۵) این تغییرات را با استفاده از شاخص‌های یادشده در رودخانه گاماسیاب توضیح داده‌اند.

به‌رغم این، در استفاده از شاخص‌های یادشده ممکن است دو مشکل عمده پدید آید: نخست اینکه اندازه‌گیری آن‌ها، به‌ویژه ترسیم خط مرکزی مجرا، که اندازه‌گیری بعضی از شاخص‌ها نیز به آن وابسته است، همراه خطا باشد و دوم اینکه استفاده از این شاخص‌ها بعضی مواقع و به‌ویژه برای مجاری کوچک توضیح روشنی درباره تحول مجاری ارائه ندهد. خوشبختانه، پژوهشگران نه‌تنها روش‌هایی برای ترسیم خط مرکزی مجرا ارائه داده‌اند، بلکه توانسته‌اند به کمک آن‌ها شاخص‌های دیگری برای نشان‌دادن تحول مجرا تولید کنند (هوک، ۱۹۸۷: ۵۹۵؛ مک‌دونلد و پارکر، ۱۹۹۱: ۳۵؛ شیلد و همکاران، ۲۰۰۰: ۵۷؛ ریچارد و همکاران، ۲۰۰۵: ۳۳۵). شیلد و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از شاخص‌های شکل و یک شاخص تحولی مماندر موفق شدند تغییر دینامیک رودخانه میسوری آمریکا را در پایین‌دست سد فورت پک^۱ توضیح دهند و حتی مگ‌دلانو و فرناندز یوستا (۲۰۱۱ الف: ۲۰۶) تشخیص دادند که این شاخص‌های تحولی بهتر از شاخص‌های شکل می‌توانند پویایی مجاری رودخانه‌های مماندگی^۲ در اسپانیا را نشان دهند. با وجود این، کارایی این شاخص‌ها در مجاری دیگر، که مماندر رودها خیلی توسعه نیافته‌اند، کاملاً مشخص نیست و معلوم نیست که شاخص‌های شکل می‌توانند بیانگر نوع عملکرد و پویایی این نوع رودها باشند یا نه؟ از این رو، در این پژوهش سعی خواهد شد تا تغییرات مجرای رودخانه قره‌سو در دشت کرمانشاه طی ۵۵ سال بررسی شود و نتایج حاصل از شاخص‌های شکل و تحولی برای نشان‌دادن پویایی رود با هم مقایسه شود.

منطقه مورد مطالعه

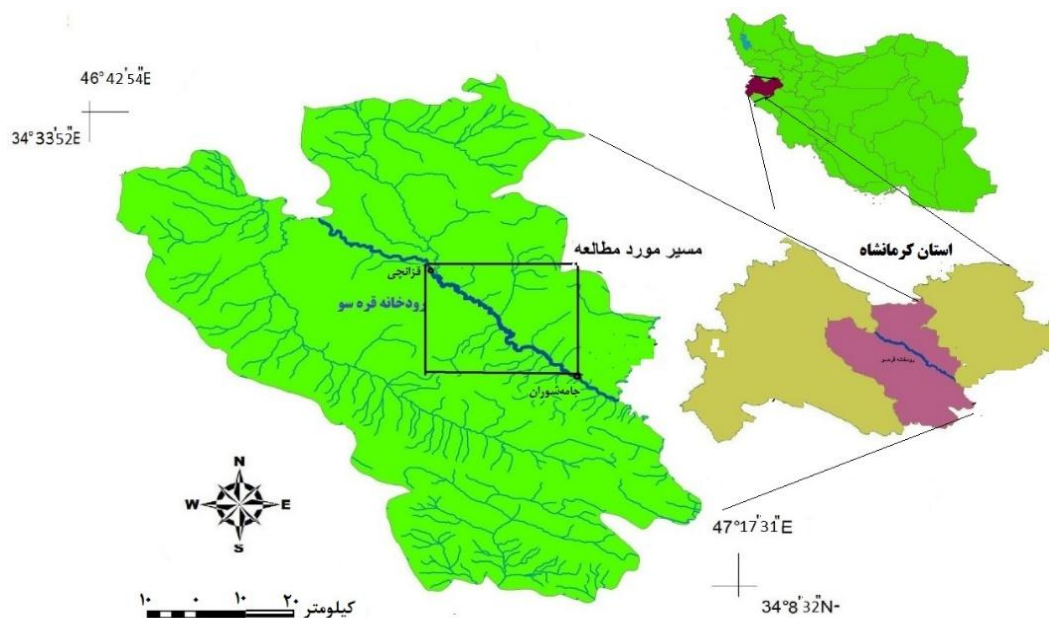
دشت کرمانشاه با ارتفاع ۱۳۲۲ متر یک دشت مرتفع است که در شمال با ارتفاعات اهکی پرآو و پرتگاه‌ها و تیغه‌های بلند و پُرسل و در جنوب با ارتفاعات آهکی و سیلیسی رادیولاریتی و لایه‌بندی نامنظم و کم‌شیب محصور می‌شود. همچنین، جنوب‌شرق این دشت را تپه‌ماهورهای فراوانی از جنس رسوبات رادیولاریتی، فلیشی، و آذرآواری می‌پوشاند. قره‌سو جریان اصلی این دشت است که از ارتفاعات سفیدکوه و شاه‌کوه و چشمه‌های آهکی بالادست سرچشمه می‌گیرد. اصلی‌ترین منبع تغذیه قره‌سو آب چشمه روانسر (واقع در ۵۰ کیلومتری شمال غرب کرمانشاه) است. پس از تشکیل شاخه‌های

1. Fort Peck Dam

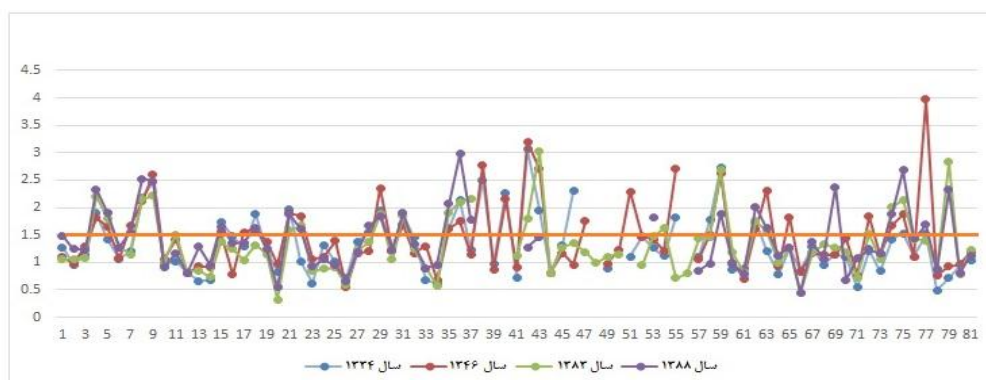
2. Ebro

ابتدایی قره‌سو از ارتفاعات یادشده و جریان‌یافتن در طول مسیر طبیعی، شاخه‌ها و جریان‌های متعددی نظیر رودخانه مرگ و رازآور به آن می‌پیوندد. از این پس، قره‌سو با جهت شمال‌غربی جنوب‌شرقی در مسیر پیچ‌وخم‌دار روی سطح کم‌شیب دشت کرمانشاه جریان می‌یابد. این رود در حین عبور از دشت کرمانشاه آبراهه‌های فراوانی مانند طاق‌بستان و آبشوران را دریافت می‌کند و با متوسط جریان $24/60$ متر مکعب در ثانیه بر روی بستری ملایم و کم‌عمق به سمت گاماسیاب جریان می‌یابد (شکل ۱).

از کل طول تقریباً ۲۱۹ کیلومتری رودخانه قره‌سو (از سراب روانسر تا منطقه دوآب یعنی محل تلاقی آن با گاماسیاب) ۵۲ کیلومتر آن، از منطقه قزانچی تا حوالی منطقه جامه‌شوران، که در دشت کرمانشاه قرار دارد، منطقه مورد نظر این تحقیق است (شکل ۱). مسیر مورد مطالعه از این جهت انتخاب شده که بلافاصله بعد از رودخانه رازآور قرار گرفته است و با عبور از شهر کرمانشاه، علاوه بر شعبات، رواناب این شهر را دریافت می‌کند و از این رو ممکن است اثرهای تغییر کاربری اراضی نیز در شاخص‌های تحولی مورد توجه قرار گیرد. از سوی دیگر، این رود در دشت کرمانشاه در مسیر یک خط گسله جریان می‌یابد که اجازه تغییرات کمتری را به آن می‌دهد. این ویژگی نیز باعث می‌شود این مکان برای اهداف این پژوهش مناسب باشد. زیرا بررسی موج‌های مجرا در طی شصت سال (از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۹۴) نشان می‌دهد که تعداد مآندرها دائماً کم یا زیاد شده و موج‌ها به مآندر تبدیل گشته یا برعکس از میزان قوس مآندرها تا حد یک موج کاسته شده است. در مجموع، فقط یک‌چهارم پیچ‌وخم‌های این رودخانه را می‌توان در ردیف مآندرها قرار داد (شکل ۲). این اجازه می‌دهد تحقیق بر روی رودخانه نسبتاً کم‌حرکی انجام گیرد که نشان دهد در این نوع رودخانه‌ها کدام شاخص‌های مآندر می‌تواند پویایی آن‌ها را در طول زمان نشان دهد.



شکل ۱. موقعیت رودخانه قره‌سو در دشت کرمانشاه



شکل ۲. پراکنش مماندرها نسبت به موج‌های رودخانه قره‌سو که براساس شاخص نمود ۱٫۵ سنجیده شده است. قطع شدگی در مسیر خطوط مربوط به هر سال مستقیم شدن آن حلقه یا قوس را در آن سال نشان می‌دهد

مواد و روش‌ها

برای اجرای این پژوهش از عکس‌های هوایی سال ۱۳۳۴، در مقیاس ۱/۵۵۰۰۰ و عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۶ در مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک ۵ متر سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ استفاده شده است. دو تصویر ماهواره‌ای مربوط به سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۴ نیز، که دقت یکسانی داشتند، از گوگل‌ارث دانلود شد تا تأثیر شیوه بررسی تغییرات با روش پیشنهادی این پژوهش ارزیابی شود. با استفاده از چهار مجموعه از تصاویر ذکر شده (۱۳۳۴ تا ۱۳۸۸) مسیر رودخانه ترسیم و در محیط ARC GIS نسخه ۱۰ رقومی شد. سپس، بر اساس این تصاویر، هشت پارامتر مماندر اندازه‌گیری شد: طول موج، دامنه، شعاع انحنا، طول مماندر، پهنای طغیانی، بزرگی حرکت جانبی مجرا، مساحت اشغال شده به وسیله مجرای فعال و فعالیت مجرا. از میان این هشت پارامتر، ۵ پارامتر اول پارامترهای شکل و ۳ پارامتر دیگر پارامترهای مربوط به فعالیت زمین‌ریخت‌شناختی‌اند.

پارامترهای طول موج، دامنه، و شعاع انحنا بر اساس آنچه در شکل ۳-الف آمده است به دست آمد؛ به طوری که برای اندازه‌گیری طول مماندر در سراسر بازه طول محور مرکزی مجرا (نقطه مرکزی خطوطی که دو کرانه رودخانه را به هم وصل می‌کنند) به تعداد کل قوس‌ها تقسیم شد. برای به دست آوردن محور مجرا سطح طغیانی، سطح مرتفع‌ترین سدهای رودخانه‌ای که با پوشش گیاهی چوبی اشغال شده در نظر گرفته شده است. پهنای طغیانی میانگین پهنای قطاعی است که به وسیله خطوط مرتبط‌کننده دو کرانه مجرا مشخص شده است (شکل ۳-ب).

سه پارامتر آخر پارامترهای ریخت‌شناختی‌اند که به وسیله فعالیت مجرا در دوره مورد مطالعه ایجاد شده‌اند و اطلاعات تکمیلی را برای بررسی دقیق‌تر پارامترهای قبل تهیه می‌کنند. میانگین مهاجرت جانبی مجرا نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی محور مرکزی مجرا در قوس‌های مورد بررسی است. برای اندازه‌گیری این پارامتر در Arc GIS برحسب میزان پیچ‌وخم رود تعدادی نقاط به طور تصادفی در فواصل ۸۰ تا ۱۶۰ متری انتخاب (در مجموع ۸۶ نقطه) و در هر نقطه میزان جابه‌جایی رود در هر دوره اندازه‌گیری شد. مقدار به دست آمده به شمار سال‌های بازه تقسیم شد تا میزان جابه‌جایی مجرا در هر سال به دست آید.

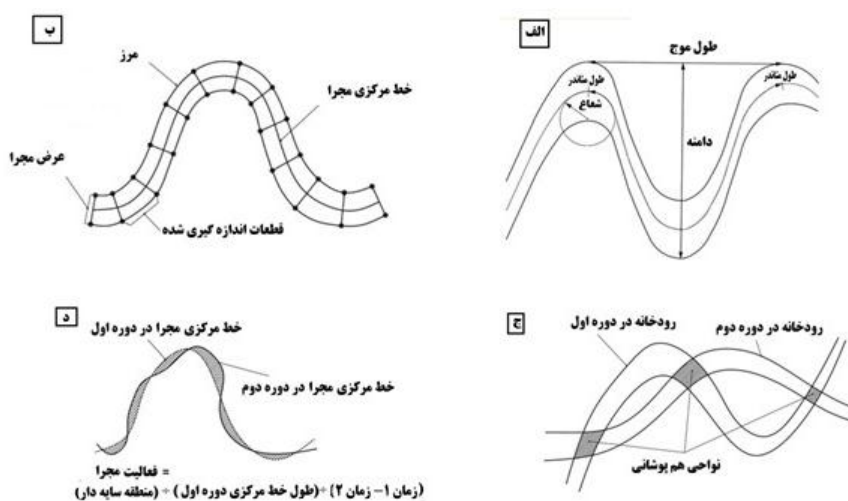
برای محاسبه مساحت تحت اشغال مجرای فعال، کرانه فعال بر اساس همان معیاری که برای تجزیه و تحلیل پهنای طغیانی به کار گرفته شد تشخیص داده شد و سپس مساحتی که بین دو کرانه فعال در دو دوره اشغال می‌شد محاسبه شد.

فعالیت مجرا^۱ مجموع مساحتی از حاشیه مجراست که توسط جابه‌جایی مجرا در دو دوره متوالی تصرف شده است. برای محاسبه این پارامتر، نخست محور مرکزی مجرا در هر دوره ترسیم شد. پس از روی هم قرارگیری محور مرکزی دو دوره متوالی مساحت جابه‌جاشده محاسبه شد. سپس، از طریق فرمول زیر میزان فعالیت مجرا به دست آمد.

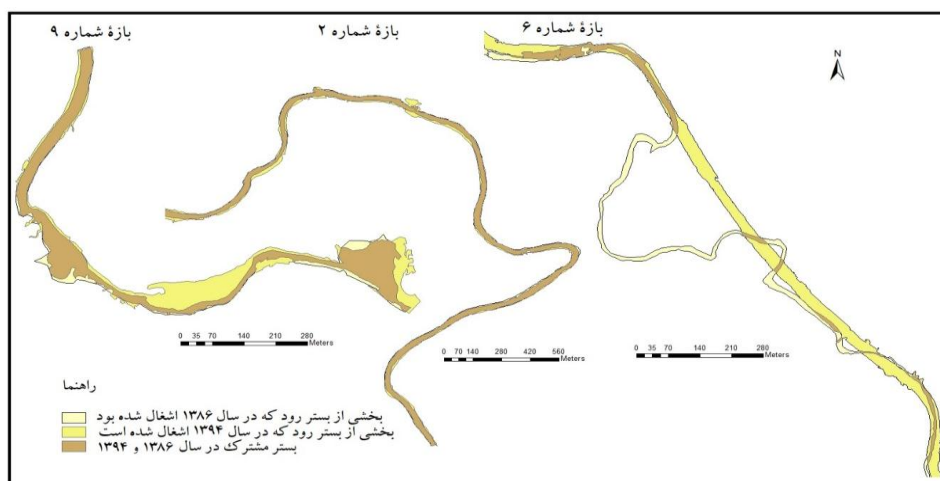
$$\text{فعالیت مجرا} = \frac{\text{طول محور مرکزی دوره اول} / \text{مساحت جابه‌جاشده}}{\text{زمان اول} - \text{زمان دوم}}$$

پس از محاسبه مقادیر هشت پارامتر ذکر شده، تحول زمانی سه پارامتر شکل (طول موج، دامنه، و شعاع قوس) با جزئیات بیشتر مطالعه شد و تجزیه و تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار SPSS برای تعیین میزان تغییرات مقادیر در دوره مورد مطالعه انجام گرفت تا بتوان جزئیات تحول پارامترهای شکل را شناسایی کرد و در مقایسه با پارامترهای زمین‌ریخت‌شناختی پیشنهادی قرار داد و در نهایت بر اساس شواهد تصمیم گرفت که کدام یک از این دو دسته پارامترها (پارامترهای شکل و پارامترهای زمین‌ریخت‌شناسی) پویایی رود را بهتر نشان می‌دهند. برای اجرای این تجزیه و تحلیل، نخست نرمال یا غیرنرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف بررسی شد و سپس بر حسب نرمال یا غیرنرمال بودن آن‌ها آزمون ناپارامتریک کندال و فریدمن و آزمون پارامتریک ANOVA به کار گرفته شد. در نهایت، با توجه به سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ در مورد وجود یا فقدان تفاوت معنی‌دار در مقادیر هر دوره نسبت به دوره‌های بعد نتیجه‌گیری شد.

به نظر می‌رسد نسبت تغییرات پهنای بستر شاخص تحول مناسبی، به‌ویژه برای زمانی که هدف تشخیص بازه‌های پویا از غیرپویا باشد، ارائه دهد. برای بررسی این موضوع در این تحقیق حدود مجرا در دو تصویر ماهواره‌ای ۱۳۸۶ و ۱۳۹۴ ترسیم شد و بر اساس شدت مائندری بودن به بازه‌هایی تقسیم شد؛ به نحوی که بعضی بازه‌ها یک مائند و بعضی بازه‌های دیگر چند موج داشتند (شکل ۴). این بازه‌ها در دو دوره ذکر شده با دستور یونیون در آرک مپ بر هم منطبق شدند. جدول خروجی سه ردیف داده را در باره مساحت اشغال شده در سال ۱۳۸۶، مساحت اشغال شده در سال ۱۳۹۴، و مساحت اشغال شده در هر دو دوره را نشان داد (شکل ۴).



شکل ۳. نمایش شماتیک از اجزای اندازه‌گیری شده مائند رودخانه (تسیلد و همکاران، ۲۰۰۰؛ ریچارد و همکاران، ۲۰۰۵)



شکل ۴. سه بازه از مسیر رود قره‌سو که برای مقایسه تغییرات بستر رود ارائه شده است

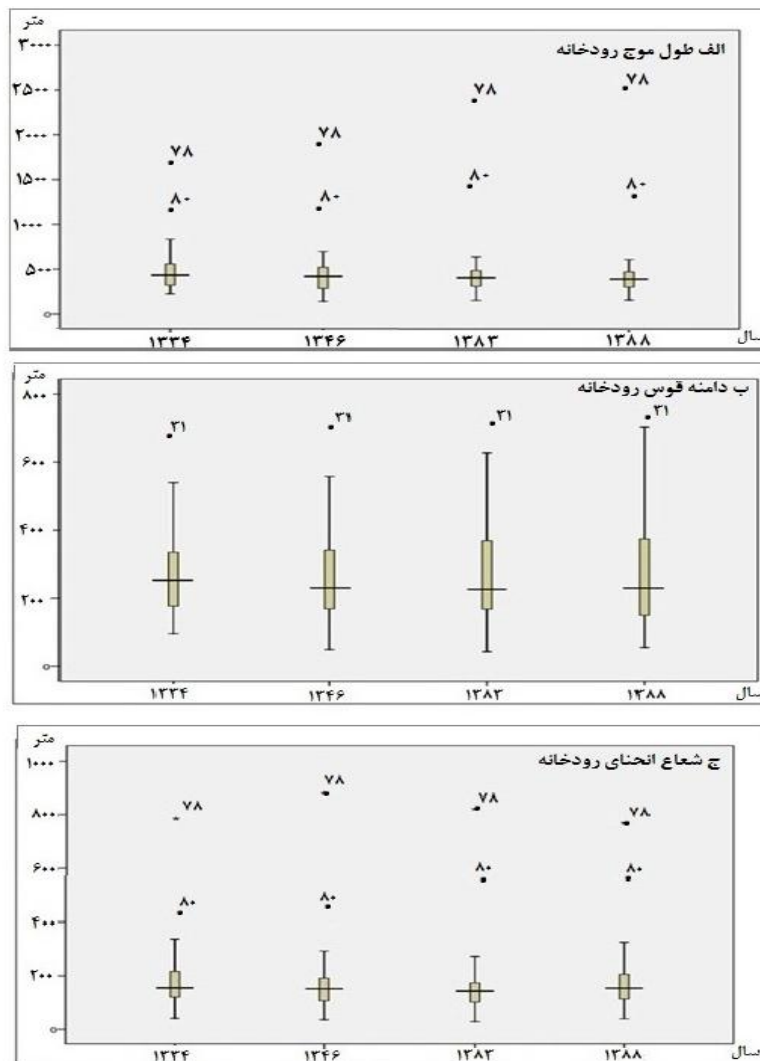
یافته‌های پژوهش

رودخانه قره‌سو در دشت کرمانشاه در مجموع در ۸۱ نقطه پیچ‌وخم (چه به صورت موج و چه به صورت مئاندر) ایجاد کرده است. این نقاط از بالادست به سمت پایین‌دست از ۱ تا ۸۱ شماره‌گذاری شد. بررسی این نقاط در چهار سال با فواصل زمانی مختلف (۱۳۳۴، ۱۳۴۶، ۱۳۸۳، و ۱۳۸۸) نشان می‌دهد که در بعضی نقاط موج‌ها تخفیف یافته و حتی به صورت خطی درآمد و در بعضی جاهای دیگر موج جدیدی به وجود آمده است؛ به طوری که در این چهار مقطع زمانی به ترتیب شمار حلقه‌های موجی و مئاندری از ۷۷ به ۷۹ و سپس ۷۷ و ۶۵ تغییر یافته است (شکل ۲). ویژگی‌های موجی قوس‌های این نقاط نیز در طی این ۵۴ سال تغییر یافته است. ولی سه پارامتر طول موج، دامنه، و شعاع انحنا نوسانات خیلی کمی را متحمل شده‌اند. به طور کلی، در طی این چهار دوره فقط در دوره چهارم افزایش چشم‌گیری در مقادیر آن‌ها مشاهده می‌شود؛ ولی دامنه تغییرات آن‌ها که به وسیله ضریب تغییر نشان داده شده است تفاوت چشم‌گیری رخ نداده است؛ به عبارتی، تا سال ۱۳۸۳ طول موج، دامنه، و شعاع قوس موج‌ها بیشتر شده؛ ولی در مسیر رودخانه نوسان کمتر شده است؛ در حالی که در سال ۱۳۸۸ به طور متوسط سه پارامتر یادشده افزایش یافته؛ ولی نوسان آن‌ها در طول رود کاهش یافته یا ثابت باقی مانده است (جدول ۱). این وضعیت حتی شامل حال مئاندرهای خیلی بزرگ نیز می‌شود؛ به نحوی که قوس‌های شماره ۳۱، ۷۸، و ۸۰ که تفاوت خیلی زیادی با قوس‌های دیگر دارند نیز تقریباً همین روند را طی می‌کنند (شکل ۵). در نموداری که توابع ارزش‌های طبقه‌بندی شده را نشان می‌دهد نیز تغییرات جزئی است (شکل ۶). در این نمودارها داده‌هایی که به طور نزولی مرتب شده در محور Xها و موقعیت نسبی که در رابطه با کل تعداد ارزش‌های اندازه‌گیری شده برحسب درصد بیان شده است در محور Yها نشان داده شده است.

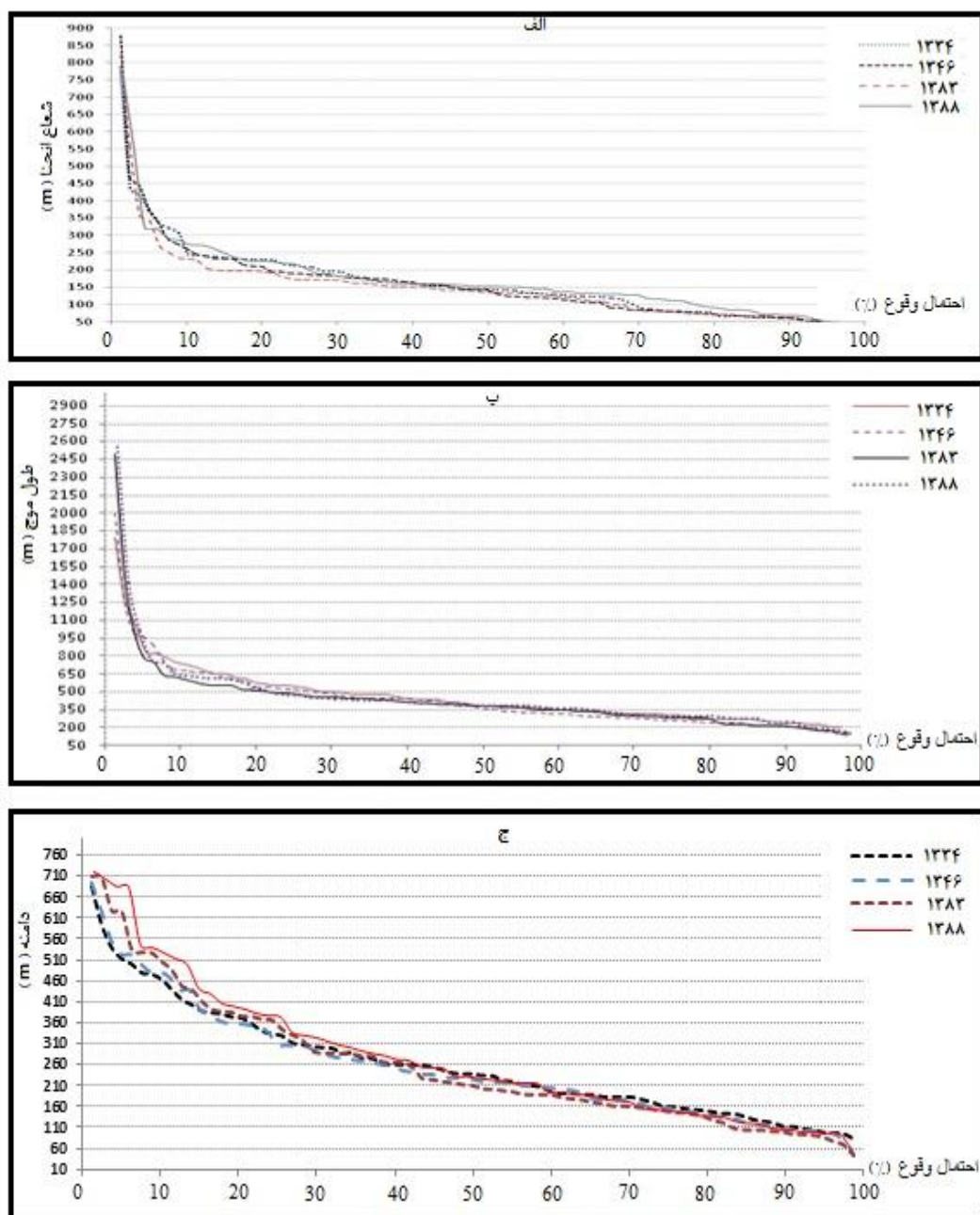
از آنجا که نتایج حاصل از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف روی سه پارامتر شکل (طول موج، شعاع قوس، و دامنه) نشان داد که دو فاکتور اول یعنی طول موج و شعاع قوس توزیع غیرنرمال و دامنه توزیع نرمال دارند (جدول ۲)، آزمون کندال و فریدمن برای داده‌های طول موج و شعاع قوس و آزمون ANOVA برای داده‌های مربوط به دامنه انجام شد. نتایج این آزمون‌ها نشان داد که داده‌های مورد آزمون در چهار دوره زمانی (۱۳۳۴، ۱۳۴۶، ۱۳۸۳، و ۱۳۸۸) هیچ اختلاف معنی‌داری را نشان نمی‌دهند؛ به عبارتی، این فاکتورها در طول ۵۵ سال تغییرات معنی‌داری متحمل نشده‌اند ($p > 0.05$) (جدول ۳).

جدول ۱. ویژگی‌های مجرای رودخانه قره‌سو

شاخص محاسبه	۱۳۳۴	۱۳۴۶	۱۳۸۳	۱۳۸۸
P ۱ طول موج (متر)	۴۵۹٫۰۵	۴۳۲٫۱۰	۴۳۰٫۲۷	۴۸۰٫۷۹
میانگین	۰٫۵۴	۰٫۶۴	۰٫۷۲	۰٫۶۸
ضریب تغییر	۲۶۱٫۱۵	۲۵۶٫۹۷	۲۵۹٫۳	۲۷۰٫۱۳
P ۲ دامنه (متر)	۱۶۳٫۱۴	۱۵۸٫۱۸	۱۵۰٫۲۱	۱۸۲٫۸۲
میانگین	۰٫۴۹	۰٫۵۳	۰٫۶	۰٫۶۲
ضریب تغییر	۵۵۷٫۵۷	۵۴۳٫۰۵	۵۴۸٫۱۴	۶۱۵٫۹۱
P ۳ شعاع قوس (متر)	۱۰۷٫۹۳	۹۴٫۸۹	۷۷٫۴۳	۸۱٫۶۱
متوسط طول محور مائدر (متر)	-	-	-	-
P ۴ میانگین پهناى طغیانی رود (متر)	-	-	-	-
P ۵ میانگین مهاجرت جانبی محور رود (متر در سال)	-	۲٫۵	۰٫۹۲	۳٫۵
P ۶ مجموع مساحت اشغال شده به وسیله فعالیت مجرا (هکتار)	-	۷۷۱۰	۸۱۸۰	۹۹۴۰
P ۷ ضریب فعالیت مجرا (متر/سال)	-	۲٫۵۱	۰٫۸۲	۲٫۷۶



شکل ۵. الف) نمودار طول موج؛ ب) دامنه؛ ج) شعاع انحناى ماندرهای رودخانه قره‌سو در چهار دوره زمانی



شکل ۶. نمودار درصد احتمال رخداد شعاع انحنای موج، و دامنه قوس رودخانه قره‌سو در چهار دوره زمانی

جدول ۲. نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنف برای پارامترهای شکل

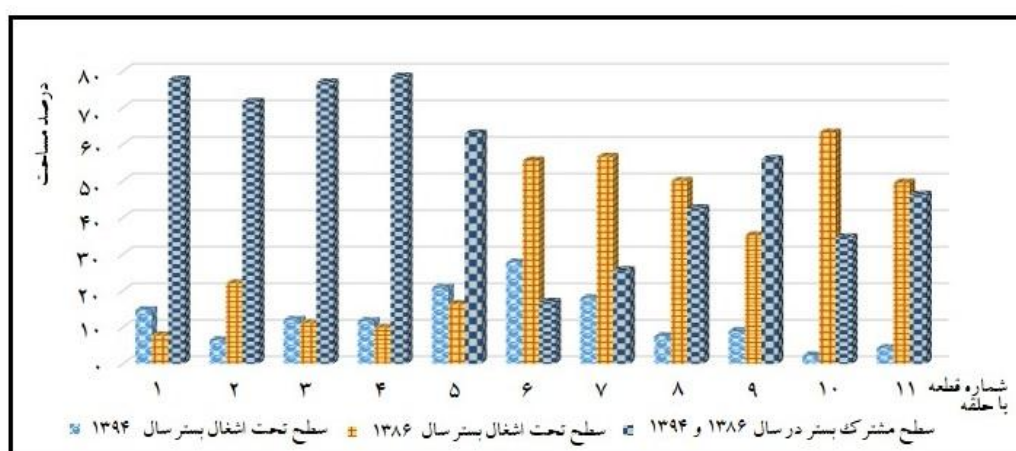
نتیجه آزمون	۱۳۸۸	۱۳۸۳	۱۳۴۶	۱۳۳۴	سال پارامترهای شکل
غیر نرمال	۰۰۰	۰۰۱۰	۰۴۶۰	۰۱۶۰	طول موج
نرمال	۱۶۷۰	۰۶۲۰	۱۵۵۰	۲۱۱۰	دامنه
غیر نرمال	۰۲۸۰	۰۰۴۰	۰۱۷۰	۰۴۱۰	شعاع

جدول ۳. نتایج آزمون آنوا و کندال و فریدمن برای پارامترهای شکل

پارامتر	آزمون	سطح معنی‌دار بودن	Ho: هیچ تفاوت معنی‌داری بین مقادیر میانگین وجود ندارد
طول موج	کندال و فریدمن	۱۰/۰	تأیید
شعاع قوس	کندال و فریدمن	۱۴/۰	تأیید
دامنه	آنوا	۸۶/۰	تأیید

با وجود این، بررسی میانگین پهنای ساحل طغیانی رود در سال‌های مختلف نشان می‌دهد که این فاکتور در سال ۱۳۳۴ در حدود ۱۰۸ متر بوده است و در سال ۱۳۴۶ به ۹۵ متر و در سال ۱۳۸۳ به ۷۷ متر رسیده و در سال ۱۳۸۸ به ۸۹ متر تغییر یافته است؛ یعنی در مدت پنج سال آخر رود پویاتر شده و مجدداً ۱۱ متر بر میانگین آن افزوده شده است. همین روند در مورد میانگین مهاجرت جانبی رود نیز صدق می‌کند؛ به نحوی که در طی دوره اول تا سوم به ترتیب ۲/۵، ۰/۹۲ و ۳/۵ متر در سال متوسط جابه‌جایی مجرای رود بوده است. ولی مجموع مساحت اشغال‌شده به وسیله فعالیت مجرا در این دوره‌های زمانی رو به افزایش داشت. ضریب فعالیت مجرا نیز از ۲/۵۱ در دوره اول به ۰/۸۲ در دوره دوم و ۲/۷۶ در دوره آخر رسیده است (جدول ۱). بنابراین، رودخانه در دوره اول و دوره دوم میل به تعادل ایستا و در دوره چهارم میل به پویایی داشته است. این تغییرات تحولی در سامانه اطلاعات جغرافیایی بهتر نشان داده می‌شود و قدرت تجزیه و تحلیل را نیز بالا می‌برد.

تقسیم رود به ۱۱ بازه یا مائندر مختلف در دو تصویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۳۸۶ و سال ۱۳۹۴ و یونیون آن‌ها نشان داد که تا بازه ۵ سطح پوشش مشترک بستر در دو دوره بیش از ۷۰ درصد مساحت را اشغال می‌کرده است؛ ولی در بازه ۶، که بستر رود به طور مصنوعی مستقیم شده، تغییرات بستر بارزتر شده است. در این بازه برخلاف بازه‌های قبل مساحت تحت اشغال بازه (مساحت خارج از بستر فعال مشترک) در سال ۱۳۹۴ افزایش یافته است. این بدین معنی است که رود از مسیر خود خارج شده و با بستر قبلی (سال ۱۳۸۶) کمتر تطبیق یافته است. از سوی دیگر، به‌رغم مستقیم‌شدن بستر، مساحت بیشتر شده است و این نیز بیانگر افزایش پهنای رود است. این وضعیت به پایین‌دست بازه مستقیم‌شده نیز گسترش می‌یابد (شکل ۷).



شکل ۷. مقایسه درصد مساحت‌های اشغال‌شده در ۱۱ بازه قره‌سو در دو سال ۱۳۸۸ و ۱۳۹۶

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی چگونگی تحول پویایی رودخانه قره‌سو مجموعه‌ای از شاخص‌های شکل و تحولی به کار گرفته شد. مقادیر سه شاخص شکل شامل طول موج، دامنه، و شعاع قوس، که از جمله شاخص‌های رایج در پژوهش‌های مربوط به پویایی رود است، در طی زمان نوساناتی را نشان می‌دهند که از نظر آماری معنی‌دار نیستند. به عبارت دیگر، این شاخص‌ها هیچ نشانه‌ای از رفتار مشخص رود در زمان را ارائه نمی‌دهند و عملکرد فضایی رود را نیز غیرپویا نشان می‌دهند. این نتیجه حتی برای رودخانه‌هایی با مئاندرهای بزرگ مانند رودخانه‌های بزرگ مدیترانه (مگ‌دلانو و فرناندز یوستا، ۲۰۱۱ ب) یا رود ابرو در اسپانیا (مگ‌دلانو و فرناندز یوستا، ۲۰۱۱ الف) نیز صدق می‌کند. در حالی که بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که رودخانه قره‌سو دست‌کم در بعضی بخش‌ها پویا بوده است. فرسایش کرانه‌های بیرونی مئاندرها در سیلاب‌های متوسط باعث می‌شود که رودخانه بستر خود را به طور عرضی گسترش دهد. نمونه‌ای از این مورد در شمال کرمانشاه با برش‌های کاملاً مشخص در بستر سیلابی این موضوع را تأیید می‌کند (شکل ۸، سمت راست). این واکنش رود زمانی که در بستر آن دخل و تصرف انجام گرفته است به شیوه بارزتری خود را نشان داده است. در داخل شهر کرمانشاه، که جهت بستر رود تغییر یافته (شکل ۸، سمت چپ)، واکنش‌ها به این تغییرات مشخص‌تر بوده است. مجموع این تغییرات طبیعی و انسانی و واکنش‌های ریخت‌شناختی رود نشان می‌دهد که رود دست‌کم ساکن نبوده است و تغییرات در آن در حال رخ دادن است. ولی شاخص‌های شکل، که معمولاً استفاده می‌شوند، نمی‌توانند این وضعیت کم‌پویا را نشان دهند. نتایج آزمون‌های آماری (جدول‌های ۲ و ۳) میزان معنی‌دار نبودن رابطه یا به عبارتی درجه ناکارایی این شاخص‌ها برای این نوع رودخانه‌ها را به قدری کم نشان می‌دهند که حتی اگر طیف زمانی اندازه‌گیری مقذور بود (عکس‌های هوایی چندین دهه قبل موجود بود و جدیدترین تصاویر ماهواره‌ای نیز در دسترس بودند) باز در نتیجه تغییری ایجاد نمی‌شد.



شکل ۸. تغییرات طبیعی رود در شمال شهرک الهیه که فرسایش آرام دیواره مجرا را در سیلاب‌های متوسط نشان می‌دهد (سمت راست) و تغییرات ناگهانی مجرا ناشی از فعالیت‌های انسان در داخل شهر کرمانشاه (سمت چپ)

مرور دوباره داده‌های به دست آمده از این تحقیق، که در جدول ۱ آمده است، نشان می‌دهد که میانگین پهنای طغیانی، میانگین مهاجرت جانبی رود، مجموع مساحت اشغال شده به وسیله فعالیت مجرا، و ضریب فعالیت مجرا در سال ۱۳۸۸ افزایش داشته است. به عبارت دیگر، مجرا در فاصله زمانی ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ پویاتر شده است.

از سوی دیگر، شاخص‌های ترکیبی مانند نسبت شعاع قوس به پهنای طغیانی وجود دارد که ارزش‌های متفاوت آن‌ها بیانگر فعالیت ویژه رودخانه است (نلسون و هیکن، ۱۹۸۳ و ۱۹۸۶). بر اساس این شاخص، حداکثر مهاجرت مجرا در بین دو رقم ۲ تا ۴ قرار می‌گیرد و در محدوده‌های خارج از این طیف مهاجرت کاهش می‌یابد یا متوقف می‌شود. نتایج حاصل از شاخص یادشده برای رودخانه قره‌سو نشان می‌دهد که این رودخانه روند مهاجرتی خیلی آرامی داشته است؛ ولی فعالیت آن در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۸ روند شدیدتری به خود گرفته است (جدول ۴).

جدول ۴. شاخص ترکیبی که تغییرات پویایی رود قره‌سو را نشان می‌دهد

فاکتور ترکیبی	۱۳۳۴	۱۳۴۶	۱۳۸۳	۱۳۸۸
نسبت شعاع قوس به پهنای طغیانی	۵۱٫۱	۶۶٫۱	۹۳٫۱	۰٫۶۲

بنابراین، تنها بررسی شاخص‌های شکل (طول موج، دامنه، و شعاع قوس) نمی‌تواند پویایی رودخانه‌ای مانند قره‌سو را آشکار کند و نیاز است شاخص‌های تحولی و ترکیبی مانند میانگین پهنای طغیانی، میانگین مهاجرت جانبی رود، مجموع مساحت اشغال شده به وسیله فعالیت مجرا، ضریب فعالیت مجرا، و شاخص‌های نسبت شعاع قوس به پهنای طغیانی نیز به کار گرفته شود. نتایج این شاخص‌ها برای رودخانه قره‌سو در دشت کرمانشاه نشان می‌دهد که این رود در حالت تعادل پویا بوده و دست‌کم از سال ۱۳۸۳ پویایی آن افزایش یافته است. این پویایی با توسعه شهرنشینی با گسترش فعالیت‌ها و طرح‌های عمرانی هم‌زمان بوده است.

بررسی بیشتر این شاخص‌ها به تولید شاخص‌های مناسب‌تر در میزان تحول رودخانه‌ها منجر می‌شود و موجب می‌شود که باقی‌مانده پوشش مشترک مجرای فعال نتایج بهتری ارائه دهد. باقی‌مانده پوشش مشترک مجرای فعال در واقع با هم‌پوشانی مجرای فعال دو دوره و مساحت غیرمشترک آن‌ها به‌دست می‌آید. در نرم‌افزارهای GIS این مساحت از یونیون (اجتماع) دو لایه به‌دست می‌آید. آماده‌کردن لایه‌های مساحت سطح بستر برای بازه‌های یک رود در دوره‌های مختلف اجازه می‌دهد شاخص‌های تحولی متعددی به‌دست آید و نتایج دقیق‌تری نسبت به شاخص‌های شکل به‌دست می‌دهد.

منابع

- بیاتی خطیبی، م. (۱۳۹۱). بررسی رفتار پیچان رودها در دشت‌های سیلابی نواحی نیمه‌خشک، مطالعه موردی: دشت‌های سیلابی دامنه‌های جنوب شرقی کوهستان سه‌سند (رودخانه شور و قره‌آعاج)، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی؛ س ۲۷، ش ۳، ۱۸۴۴۸-۱۸۴۷۲.
- رضایی مقدم، م.ج. و خوش‌دل، ک. (۱۳۸۸). بررسی پیچ‌وخم‌های مائندر اهرچای در محدوده دشت ازو مدل ورزقان، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ش ۷: ۴۰-۵۸.
- علایی طالقانی، م.؛ حاصلی، ف. و احمدی ملاوردی، م. (۱۳۹۲). ارزیابی نقش انسان در فرسایش کناره‌ای و گسترش جانبی مائندهای رودخانه گاماسیاب در دشت بیستون، مجله جغرافیا و پایداری محیط، ۶: ۱۰۷-۱۲۰.
- مقصودی، م.؛ شرفی، س. و مقامی، ی. (۱۳۸۹). روند تغییرات الگوی مورفولوژیکی رودخانه خرم‌آباد با استفاده از Auto Cad و GIS، RS، مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، ۱۴ (۳): ۲۷۵-۲۹۴.
- یمانی، م. و شرفی، س. (۱۳۹۱). ژئومورفولوژی و عوامل مؤثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۳۳(۱): ۱۵-۳۲.
- Addink, E. and Kleinhans, M. (2008). Recognizing meanders to reconstruct river dynamics of the Ganges. In: Hay, G., Blaschke, T., Marceau, D. (Eds.), GEOBIA (Pixels, Objects, Intelligence: Geographic Object Based Image Analysis for the 21st Century). Vol. 48, part 4/C1 of The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Int. Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Calgary, Canada.
- Alaee Taleghani, M.; Haseli, F. and Ahmadi Malaverdi, A. (2013). Assessing Human Role in Lateral Erosion and Lateral Extension of Gamasiab River in Bistoon Plain, *Journal of Geograpy and Environmental Sustainability*, 6: 102-107.
- Bayati Khatibi, M. (2012). Investigation the behavior of meanders on flood plains in semi-arid regions, Case study: Flood plains on North East of Sahand Mt., *Geographical Research*, 3 (136): 182-212.
- Brice, J.C. (1977). Air Photo Interpretation of the Form and Behavior of Alluvial Rivers. Final Report to the U.S. Army Research Office—Durham. Washington University, St. Louis, MO. 10 pp.
- Gbris, G. and Nador, A. (2007). Long-term fluvial archives in Hungary: response of the Danube and Tisza rivers to tectonic movements and climatic changes during the. Quaternary: a review and new synthesis, *Quaternary Science Reviews*, 26: 2758-2782.
- Gurnell, A.M.; Downward, S.R. and Jones, R. (1994). Channel planform change on the River Dee meanders, 1876–1992, *Regulated Rivers: Research & Management*, 9(4): 187-204.
- Güneralp, I.; Abad, J.D.; Zolezzi, G. and Hooke, J. (2012). Advances and challenges in meandering channels research, *Geomorphology*, 163-164: 1-9.
- Hooke, J.M. (1987). Changes in meander morphology. In: International Geomorphology, Part 1, ed. V. Gardiner, pp. 591-609. Chichester, UK: John Wiley and Sons, Ltd.
- Hooke, J.M. (2007). Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river, *Geomorphology*, 84(3-4): 277-296.
- Howard, A.D. (1992). Modeling channel migration and floodplain sedimentation in meandering streams. In: Carling, P.A., Petts, G.E. (Eds.), *Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives*, John Wiley and Sons, Chichester, UK.

- Lagasse, P.F.; Zevenbergen, L.W.; Spitz, W.J. and Thorne, C.R. (2004). Methodology for Predicting Channel Migration, NCHRP Web-Only Document 67 (Project 24-16), National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Latapie, A.; Gamenon, B.; Rodrigues, S.; Paquier, A.; Bouchard, J.P. and Moatar, F. (2014). Assessing channel response of a long river influenced by human disturbances, *Catena*, 121: 1-12.
- Lutgens, F.K. and Tarbuck, E.J. (1995). *Essentials of Geology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- MacDonald, T.E.; Parker, G. and Leuthe, D.P. (1991). Inventory and analysis of stream meander problems in Minnesota, St Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA: 37 pp.
- Magdaleno, F. and Fernández-Yuste, J.A. (2011a). Hydrogeomorphological alteration of a large Mediterranean river: relative role of high and low flows on the evolution of riparian forests and channel morphology, *River Research and Applications*, 27(3): 374-387.
- Magdaleno, F. and Fernández-Yuste, J.A. (2011b). Meander dynamics in a changing river corridor, *Geomorphology*, 130: 197-207.
- Maghsoodi, M.; Sherefi, S. and Meghami, Y. (2010). The Trend of Morphologic pattern Changes in Khoremabad River using RS, Auto Cad and GIS, *The Journal of Spatial Planning*, 14(3): 275-294.
- Nanson, G.C. and Hickin, E.J. (1986). A statistical analysis of bank erosion and channel migration in Western Canada, *Geological Society of America Bulletin*, 97(8): 497-504.
- Nanson, G.C. and Hickin, E.J. (1983). Channel migration and incision on the Beaton River, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 109(3): 327-337.
- Neill, C.R. (1987). Sediment balance considerations linking long-term transport and channel processes, In: Thorne, C.R., Bathurst, J.C., Hey, R.D. (Eds.), *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, Wiley, New York, pp. 225-242.
- Po-Hug, Y. and Namgyu, P. (2009). Maximum migration distance of meander channel in sand using hyperbolic function approach, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135(8): 629-639.
- Rezaie Moghadem, M.H. and Khoshdel, K. (2019). The Study of Meanders Curvatures of Aher-Chai in Vezerghan plain Area, *Geography and environmental planning*, 7: 40- 58.
- Richard, G.A.; Julien, P.Y. and Baird, D.C. (2005). Case study: modeling the lateral mobility of the Rio Grande below Cochiti Dam, New Mexico, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 131 (11): 931-941.
- Shields Jr, F.D.; Simon, A. and Steffen, L.J. (2000). Reservoir effects on downstream river channel migration, *Environmental Conservation*, 27(1): 54-66 .
- Yamani, M. and Sharafi, S. (2011). Geomorphology and effective factors on lateral erosion in Hor Rood River, Lorestan province, *Geomorphology and environmental planning*, 23(1): 15-23.
- Yousefi, S.; Pourghasemi, H.R.; Hooke, J. and Navartil, O. (2016). Changes in morphometric meander parameters identified on the Karoon River, Iran, using remote sensing data, *Geomorphology*, 271: 55-64.