

## مطالعه ریخت‌شناسی پیچان رودها با جریان کنترل شده با استفاده از تکنیک‌های RS و GIS (مطالعه موردی: رودخانه زاینده‌رود در پایین‌دست سد زاینده‌رود)

محسن جواهری طهرانی\*، سید فرهاد موسوی و خسرو حسینی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۲/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱/۲۵)

### چکیده

مطالعات ریخت‌شناسی دارای اهمیت ویژه‌ای در ساماندهی رودخانه و تعیین حریم و بستر رودخانه می‌باشد. سدها از جمله سازه‌هایی هستند که بیشترین تأثیر را بر مورفولوژی رودخانه دارند. مطالعات تغییرات رودخانه‌ها معمولاً زمانبر بوده و در بازه‌های زمانی بلند مدت میسر می‌باشد. برای تشخیص این تغییرات، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تهیه‌شده در بازه‌های زمانی مختلف و روش‌های کارتوگرافی سودمند خواهد بود. در این پژوهش، تغییرات مورفولوژیک رودخانه زاینده‌رود در پایین‌دست سد زاینده‌رود، بین دو ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی و پل زمان‌خان، براساس ۷ سری تصاویر ماهواره Landsat از سال (۱۳۵۹ تا ۱۳۹۳) به کمک نرم‌افزار ENVI 4.8 مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج، روش افزایش کنتراست به صورت بسط خطی اشباع‌شده به همراه فیلترگذاری با فیلتر بارزسازی لبه به‌عنوان روشی مناسب در تعیین مرز بین آب و زمین تشخیص داده شد. در مرحله بعد، مسیر رودخانه در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2 وارد شده و پارامترهای هندسی رودخانه مانند طول موج، ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی و شعاع قوس‌ها تعیین گردید. همچنین، تجزیه و تحلیل‌های آماری روی پارامترهای هندسی، در نرم‌افزار SPSS انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که از سال ۱۳۵۹ تاکنون ضریب خمیدگی از ۲/۱۴ به ۲/۳۸ افزایش یافته و شعاع قوس‌های رودخانه و طول موج پیچش‌ها به ترتیب ۵ و ۱۱/۴ درصد کاهش پیدا کرده است. به‌طورکلی رودخانه در هر دوره، از انحنای قوس‌های خود کاسته و پیچ‌ها به سمت پایین دست جابه‌جا شده‌اند. از مهم‌ترین عوامل این پدیده می‌توان به تصرفات صورت گرفته در حاشیه و حریم رودخانه در مارکده و چم کاکا اشاره کرد که روند طبیعی رودخانه را بر هم زده است. در مناطق چم جنگل، چم خلیفه و چم عالی، به دلیل افزایش شیب و عدم پوشش گیاهی مناسب، فرسایش دیواره‌ها به حداکثر می‌رسد. در نهایت، اگرچه دبی سیلابی رودخانه توسط سد زاینده‌رود مهار شده، اما هنوز رودخانه در قسمت‌های پیچان رودی قابلیت فرسایش دارد.

واژه‌های کلیدی: پیچان رود، تغییرات مورفولوژیک، تصاویر ماهواره‌ای، فرسایش و رسوب

۱. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.javahery110@gmail.com

## مقدمه

محدودیت‌های جدی روبرو شده است (۸).

در زمینه تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ها تحقیقات زیادی انجام شده که بیشتر آنها در ارتباط با مسائل مهندسی رودخانه است و به مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ها کمتر توجه شده است. مطالعات ژئومورفولوژی به منظور شناسایی کلی شکل، فرآیند توسعه و روند تغییرات آن جهت تحلیل پایداری و فرسایش کرانه‌های رودخانه‌ها صورت می‌گیرد (۵). شفیع‌فر الگوی مهاجرت رودخانه زهره را که یکی از رودخانه‌های حوضه خلیج فارس در جنوب ایران است، براساس چند سری عکس هوایی و تصویر ماهواره‌ای مطالعه کرده است (۲۸). هدف این پژوهش، مکان‌یابی ساختگاه مناسب جهت پرورش ماهی در ساحل رودخانه است. فرخی و همکاران با بررسی تغییرات پلان رودخانه دز با استفاده از سنجش از دور و GIS نتیجه گرفتند که رودخانه بیشتر از الگوی پیچان رودی تبعیت می‌کند و سواحل آن جابه‌جایی زیادی داشته است. مرید و همکاران روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه کارون را براساس چهار سری تصاویر ماهواره‌ای Landsat و IRS بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که خصوصیات قوس‌ها در حال تغییر است و تراکم و اندازه انحنا قوس‌ها به سمت پایین دست جابه‌جا شده است. از پژوهش‌گران ایرانی که در این زمینه فعالیت کرده‌اند می‌توان به، حقی آبی و همکاران، رنگزن و یمانی و همکاران (۱۱) و ... اشاره کرد (۲، ۵ و ۱۱).

از بین پژوهشگران خارجی، تایمر (۳۱) با بررسی روش‌های کنترل تغییرات رودخانه‌های پیچان رودی بر روی رودخانه تیس‌زا نتیجه گرفت که پیچان رودی شدن رودخانه به شدت تحت تأثیر موقعیت گسل‌ها و فرونشست‌های غیرعادی است. چو و همکاران در سال ۲۰۰۶ با بررسی افزایش تغییرات الگوی رودخانه زرد کنونی (هوانگ هو) در قسمت دلتایی در چین با استفاده از تصاویر سنجش از دور نتیجه گرفتند که در دوره زمانی ۲۰۰۰-۱۹۷۶ میلادی بیشترین فرسایش در بالای دماغه دیاووکو و شینگیانگو رخ داده و به طرف خط ساحلی حدود ۴/۵- و ۷- متر عقب‌نشینی داشته است (۱۳). ساندر (۲۷) در بررسی خود،

خصوصیات مورفولوژیک رودخانه‌ها به واسطه ویژگی پویای آنها، همواره دچار تغییرات هستند و این تغییرات می‌توانند بر سازه‌هایی که روی رودخانه‌ها و یا حاشیه آنها ساخته می‌شوند، اثر منفی بگذارند. عواملی مانند شیب بستر، دبی جریان، مشخصات مصالح بستر و کناره‌ها و فرکانس و شدت سیلاب‌ها، مورفولوژی رودخانه را در بعد مکان و زمان تعیین می‌کنند. در همین راستا، لئوپولد و ولمن (به نقل از ۸) در سال ۱۹۵۷ از نظر ساختار مورفولوژیک، رودخانه‌ها را به سه دسته مستقیم، متاندری (پیچان رود) و چند شاخه (شریانی) تقسیم‌بندی کردند. الگوی پیچان رود، به دلیل فراوانی آن در طبیعت، بیشترین توجه را به خود جلب کرده است (۸).

تورن (۳۰) به لزوم مطالعه رفتار مورفولوژیک رودخانه‌های بزرگ پرداخته و یک چارچوب مطالعاتی در این زمینه ارائه نموده که تأکید آن برپایش منظم مورفولوژی رودخانه با استفاده از روش‌های نوین می‌باشد.

برای رودخانه‌های بزرگ، پایش منظم الگوهای آبراهه‌ای و تحلیل تغییرات زمانی پارامترهای هندسی بسیار دشوار است. در سال‌های اخیر، فن‌آوری سنجش از دور (Remote sensing, RS) با قابلیت‌های خاص خود برای تهیه تصاویر تکراری در وسعت گسترده، امکان پایش تغییرات زمانی رودخانه‌ها را فراهم آورده و در کنار آن سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پردازش آنها را تسهیل و تسریع ساخته است (۴).

در بسیاری از مناطق جهان، پژوهش‌های فراوانی در مورد پدیده متاندری شدن (Meandering) رودخانه‌ها انجام شده و بیش از ۳۰ نظریه درباره روند متاندری (پیچان رودی) شدن آنها بیان شده است (۲)؛ اما به دلیل پیچیدگی فرایندهای حاکم بر این پدیده، که ناشی از تفاوت در ویژگی‌های زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، مورفولوژیک، هیدرولوژیک، هیدرولیکی، پوشش گیاهی، شرایط اقلیمی و بسیاری از عوامل شناخته شده یا ناشناخته دیگر است و همچنین به دلیل تفاوت و تغییر شرایط از رودخانه‌ای به رودخانه دیگر، کاربرد نتایج ارائه شده با

تغییرات کانال رودخانه‌های تی و تومل را در اسکاتلند در شرایط کوتاه و میان مدت با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی بررسی کرد و نتیجه گرفت در شرایط میان مدت میانگین عرض کانال رودخانه‌ها، و در شرایط کوتاه مدت روند تغییر شکل رودخانه‌ها کاهش یافته است (۲۷).

رنگزن و همکاران امکان پایش و ارزیابی کمی تغییرات مسیر رودخانه ایندوس در پاکستان را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست مورد بررسی قرار دادند. این محققین برای تشخیص خط ساحلی رودخانه، تصویر باندها (باند مادون قرمز نزدیک NIR) تصویر MSS ماهواره لندست را مورد پردازش قرار داده و این باند را به‌عنوان بهترین محدوده طیفی برای جداسازی آب و خاک معرفی نمودند (۲۶). براساس این تحقیقات مسیر رودخانه در دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۷۲ تغییرات زیادی داشته و عمده این تغییرات ناشی از چهار سیلاب بزرگ رخ داده در این دوره زمانی تشخیص داده شد. به نقل از اورفو و استواکس تحقیقی باهدف ارزیابی تغییرات مورفولوژی رودخانه در بعد مکان (تأثیر کاربری در حوضه) و زمان طی سال‌های ۱۹۹۸-۱۹۷۹ برای بررسی امکان برقراری ارتباط این تغییرات با پارامترهای مدیریتی حوضه، پستی و بلندی و سایر فاکتورهای موجود در محدوده مورد نظر با استفاده از عکس‌های هوایی (۱:۴۰۰۰) همراه با تکنیک مطالعه‌های RS، GIS و GPS مطالعه‌ای را در ایالت اورگان آمریکا به انجام رساندند (۲۵). حسین و همکاران با مطالعه تغییرات مورفولوژی رودخانه گنگز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و IRS در بازه زمانی ۳۵ ساله اعلام کردند که این رودخانه دارای قابلیت بالای فرسایش می‌باشد. دلیل اصلی این مسئله، دبی زیاد و مصالح قابل فرسایش در این رودخانه است (۱۸). لی و همکاران با بررسی تصاویر ماهواره لندست با سنجنده ETM مشاهده کردند که حداکثر پشته‌های رسوبی شن و ماسه در پایانه‌های روخانه‌های آبرفتی می‌باشد (۲۰). گارتنر و همکاران با بررسی تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا (QuickBird و WorldView) گزارش کردند که استفاده از RS در ارزیابی خطرات زیست محیطی

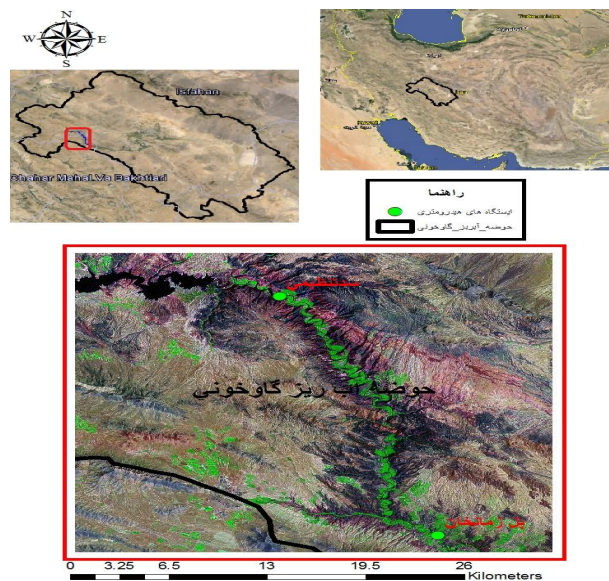
اکوسیستم‌های در معرض خطر بسیار مؤثر می‌باشد (۱۵).

پژوهش حاضر، به بررسی مشخصات هندسی قسمتی از رودخانه زاینده‌رود با استفاده از داده‌های RS و نرم‌افزار Arc GIS پرداخته و هدف آن تعیین و بررسی روند تغییرات مورفولوژی این رودخانه است که هر ساله باعث فرسایش کناری و تخریب زمین‌های کشاورزی و سازه‌های بنا شده در اطراف رودخانه می‌شود.

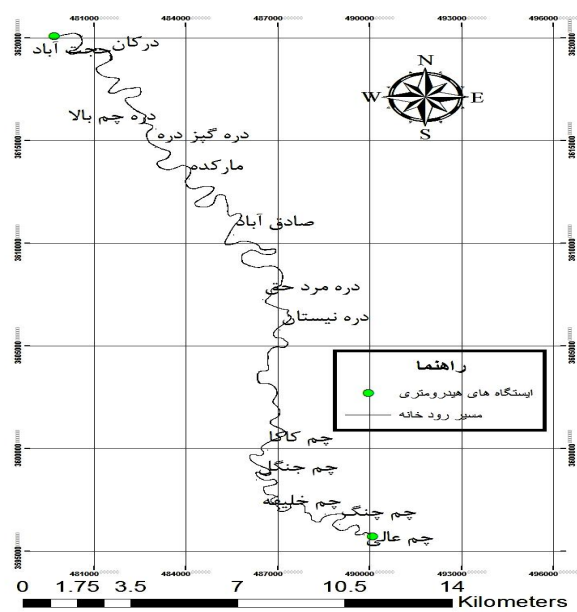
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

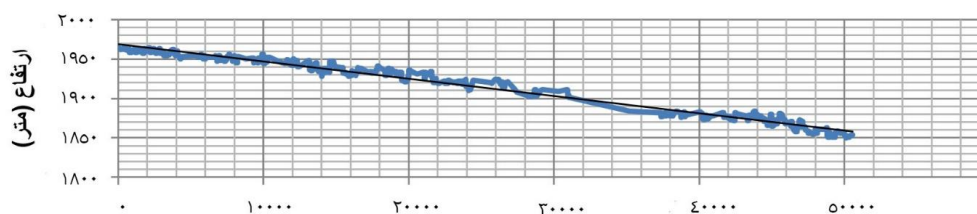
رودخانه زاینده‌رود مهم‌ترین و بزرگ‌ترین رودخانه حوضه گاوخونی (با مساحت حدود ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع) است. رودخانه زاینده‌رود از کوه‌های زاگرس در غرب اصفهان سرچشمه می‌گیرد و در باتلاق گاوخونی در شرق اصفهان به پایان می‌رسد. حداکثر میزان بارش سالانه حوضه در کوه‌رنگ، ۱۴۰۰ میلی‌متر و حداقل بارش حوضه در ورزنه، ۸۸ میلی‌متر است. بخش عمده‌ای از بارندگی حوضه در ماه‌های زمستان رخ می‌دهد و در فصل تابستان بارش مؤثری وجود ندارد (۳۲). به‌همین دلیل، در زمان‌های گذشته، در فصل زمستان سیلاب‌هایی در بستر رودخانه اتفاق افتاده و موجب تغییرات مورفولوژیک در کانال اصلی و دشت‌های سیلابی اطراف آن شده است؛ اما پس از احداث سد زاینده‌رود، بیشتر سیلاب‌ها مهار شده و تغییرات مورفولوژی رودخانه بیشتر به‌دلیل هیدرولیک جریان پایه می‌باشد. به‌منظور مشخص شدن این تغییرات در پایین دست سد زاینده‌رود، بین دو ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی و پل زمان‌خان، بازه‌ای از رودخانه به‌طول حدود ۵۰ کیلومتر انتخاب شد. جهت رودخانه در این مقطع تقریباً شمال غربی به جنوب شرقی می‌باشد. در شکل (۱)، محدوده حوضه آبریز گاوخونی و بازه مورد مطالعه زاینده‌رود و در شکل‌های (۲ و ۳) ایستگاه‌های هیدرومتری و نام محل‌های موجود در مسیر این رودخانه و پروفیل آن نشان داده شده است.



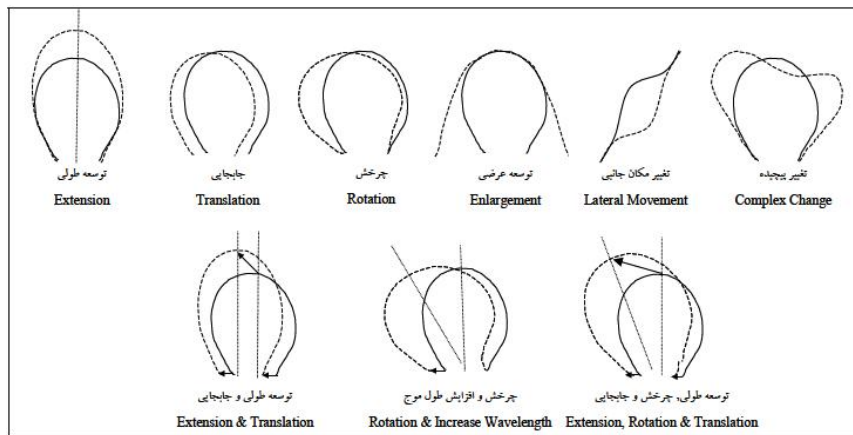
شکل ۱. محدوده حوضه آبخیز گاوخونی و بازه انجام پژوهش در مورد رودخانه زاینده رود



شکل ۲. ایستگاه های هیدرومتری و نام چند محل های در مسیر رودخانه مورد مطالعه



شکل ۳. پروفیل طولی و شیب عمومی بستر رودخانه زاینده رود بین دو ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی و پل زمان خان



شکل ۴. فرم‌های مختلف تغییر شکل پیچان رودها (۱۷)

جدول ۱. مشخصات ماهواره‌های لندست و ویژگی‌های هر یک از آنها

زمان فعالیت	ارتفاع (کیلومتر)	اندازه قاب (کیلومتر)	عرض برداشت (کیلومتر)	سنجنده	ماهواره
۱۹۷۲-۱۹۸۳	۹۱۷	۱۷۰ × ۱۸۰	۱۸۵	MSS	۵-۱ LANDSAT
۱۹۸۲-۱۹۹۹	۷۰۵	۱۸۳ × ۱۷۰	۱۸۵	TM	۵-۴ LANDSAT
تا کنون-۱۹۹۹	۷۰۵	۱۸۳ × ۱۷۰	۱۸۵	ETM+	۷ LANDSAT
تا کنون-۲۰۱۳	۷۰۵	۱۸۵ × ۱۷۰	۱۸۵	LDCM	۸ LANDSAT

پارامترهای هندسی مرتبط با پلان رودخانه تعریف شده که با تجزیه و تحلیل فراوانی و اندازه این خصوصیات هندسی در طول رودخانه و در زمان‌های مختلف، روند تغییرات رودخانه در ابعاد مکان و زمان قابل بررسی خواهد بود.

#### پیش‌پردازش و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای

تعداد ۷ تصویر ماهواره لندست (Landsat) مربوط به ماه می از سال‌های ۱۹۸۰، ۱۹۸۵، ۱۹۹۲، ۱۹۹۸، ۲۰۰۳، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ و همچنین نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای این تحقیق تهیه شد. در جدول (۱) مشخصات فنی ماهواره‌های لندست آورده شده است.

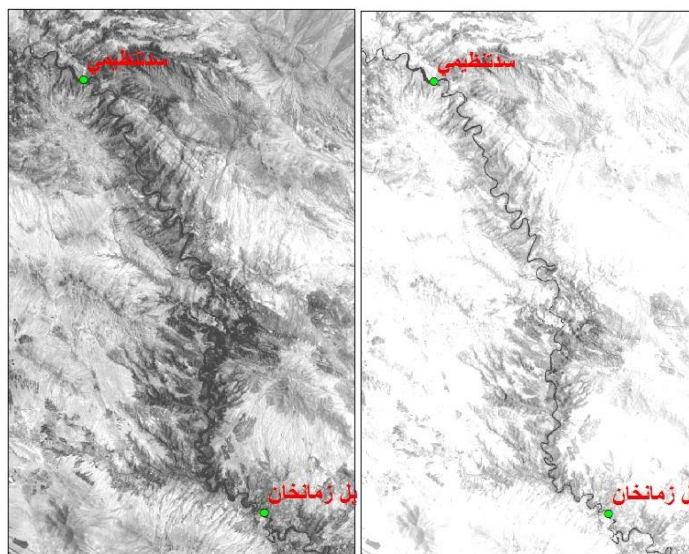
ابتدا، با انجام پیش‌پردازش روی تصاویر از جمله اصلاح هندسی و زمین مرجع کردن، واضح‌سازی مکانی (Enhancement) صورت گرفت و با بررسی هر باندها به تنهایی و همچنین ترکیب باندهای مختلف، بهترین باندها یا بهترین

#### بررسی تغییرات بستر رودخانه

برای بررسی تغییرات بستر رودخانه‌ها اغلب از سه روش تاریخی، مدل تجربی و مدل‌سازی بنیادی استفاده می‌شود (۸). در این پژوهش، بخشی از رودخانه زاینده‌رود، در پایین‌دست سد زاینده‌رود، بررسی شد. مراحل تحقیق به‌صورت زیر می‌باشد.

#### الگوهای آبراه‌های در رودخانه‌ها

همان‌طور که اشاره شد، اغلب تحقیقات در زمینه تغییرات مورفولوژی روی رودخانه‌های با الگوی پیچان رود صورت گرفته است و دلیل آن می‌تواند فراوانی این الگو نسبت به دیگر الگوها باشد. پیچان رودها دارای شکل‌های مختلفی هستند و به‌صورت مختلف دچار تغییر شکل می‌گردند. شکل (۴) اغلب حالاتی که یک قوس پیچان رود به‌خود می‌گیرد را نشان می‌دهد (۱۶). جهت توصیف الگوی آبراه‌های پیچان رود، یکسری



شکل ۵. اعمال فیلتر بالاگذر ۲ روی باند ۵

نسبی گام‌های خاکستری حفظ شده و کنتراست بین نواحی تاریک و روشن نیز افزایش می‌یابد (۱۰). نتایج حاصل از روش‌های مختلف نشان داد که بسط کنتراست به روش خطی، به دلیل وجود دامنه کامل درجه روشنایی پیکسل‌ها (۰-۲۵۵) در تصویر خام باندهای ۵ و ۷، تأثیر چندانی در وضوح تصاویر نداشته است.

#### آشکارسازی مکانی تصاویر یا روش‌های فیلتری

عملیات جداسازی برخی از مؤلفه‌های تصاویر رقومی از قسمت‌های دیگر را آشکارسازی مکانی تصویر یا فیلترگذاری گویند. با اعمال فیلتر بالاگذر ۲ روی تصویر، اطلاعات با فرکانس زیاد به ما این اجازه را می‌دهد که یا جزئیات محلی را ایزوله نموده و یا این‌که تشدید کند (۲۲ و ۶). از مجموع فیلترهای بالاگذر در نرم‌افزار ENVI4.8، فیلترهایی چون بالاگذر و بارزسازی لبه با پنجره ۳×۳ مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از کاربرد این دو فیلتر روی باند ۵ در شکل (۵) آمده است. همچنان که مشخص می‌باشد، تصاویر حاصل از فیلتر بارزسازی لبه نسبت به فیلتر بالاگذر وضوح بیشتری دارد.

#### تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

این تحلیل برای تصاویر منطقه مورد مطالعه به کار رفته است و

ترکیب برای تشخیص انتخاب گردید. کمترین و بیشترین خطای RMSE در عملیات مرجع کردن به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۵/۲ متر برآورد گردید که در حد قابل قبول می‌باشد (۱۶). در این مرحله، برای تصاویر ماهواره لندست، بیشتر از باندهای ۴ و پنجم استفاده گردید.

#### پردازش تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های جداسازی آب و

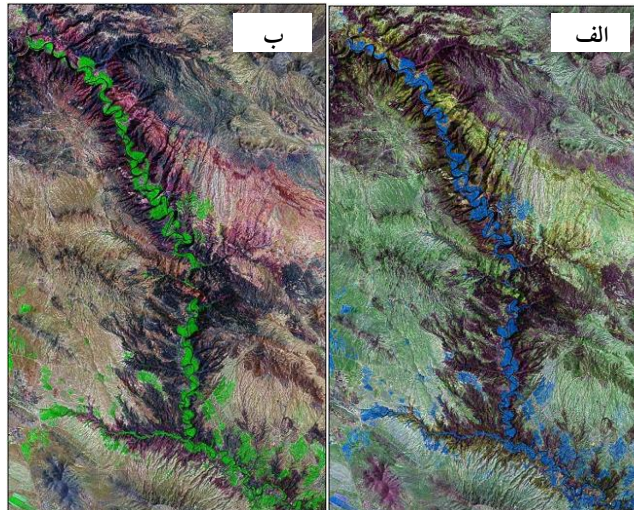
##### زمین در تصاویر ماهواره‌ای

این بخش نقش مهمی در تحلیل‌های مراحل بعدی دارد و دقت زیادی برای آن به کار باید گرفت و هدف آن ارائه بهترین الگوریتم جهت تفکیک و تشخیص خط ساحلی رودخانه‌ها در تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. برای جداسازی خط آب از زمین، بهترین محدوده از امواج الکترومغناطیس، بخش مادون قرمز می‌باشد (۱ و ۲۱). برای ادامه مطالعات در تحلیل‌های تک باندی از این باندها استفاده می‌شود، که توسط برخی از محققین (۴، ۱۰ و ۱۲) نیز توصیه شده است.

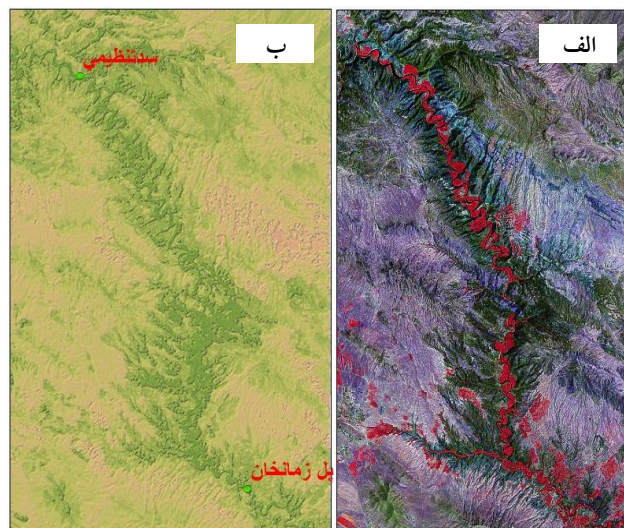
#### بهبود کنتراست

اگر حد گام‌های خاکستری به صورتی تغییر داده شود که در تمامی محور سیاه و سفید گسترده گردد، وضعیتی پیش می‌آید که توزیع





شکل ۶. الف) نمایش توده‌های آبی و ب) نمایش سه مؤلفه اصلی



شکل ۷. الف) نمایش شاخص روشنایی و ب) سبزی و نمناکی

تسلدکپ (Tasseled Cap Transformation) روی تصاویر TM منطقه مورد مطالعه اعمال گردید و ترکیب رنگی از شاخص‌های روشنایی، سبزی و نمناکی تهیه شد و ترکیب رنگی مجازی (۱۲۳، RGB) از شاخص‌های روشنایی، سبزی و نمناکی تهیه گردید (۲۴) که در شکل (۷) ارائه شده است.

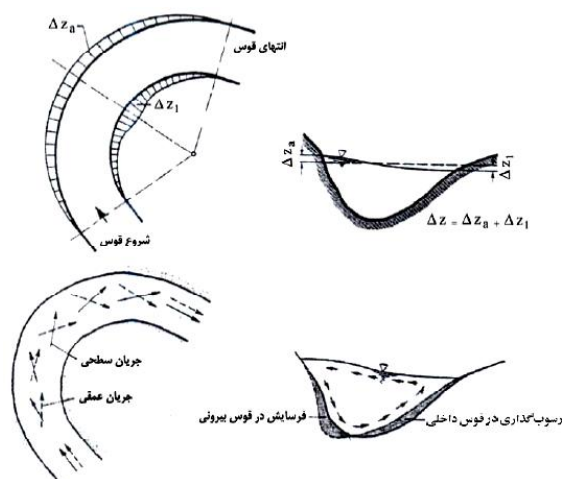
#### انتخاب روش جداسازی آب و زمین

بر اساس نتایج به دست آمده، از بین روش‌های واضح‌سازی، افزایش کنتراست به روش بسط خطی اشباع شده در واضح

مؤلفه‌های اصلی با تبدیل PCA محاسبه شد و مؤلفه اصلی سوم، آنکه نشان‌دهنده توده‌های آبی در تصویر می‌باشد، در شکل (۶-الف) ارائه شده است. همچنین، از سه مؤلفه اصلی، ترکیب رنگی مجازی (۱۲۳، RGB) در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. با این‌که مناطق پوشش گیاهی، خاک و آب در این تصویر با رنگ‌های مختلف نشان داده شده ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود مرز بین آب و زمین با دقت کافی مشخص نیست.

#### تبدیل تسلدکپ

بر اساس تحقیقات ارائه شده توسط نجفی دیسفانی (۲۴) تبدیل



شکل ۸. نمای شماتیک جریان در یک خم و تأثیر جریان حلزونی بر بستر رودخانه در محل خم (۸)

### تعیین پارامترهای هندسی رودخانه

در مطالعه و بررسی رودخانه‌های پیچان رودی، برای کمی کردن میزان توسعه پیچان رودی و تعیین الگوی رفتاری و تغییرات آن در طول زمان، باید مشخصات هندسی رودخانه نظیر زاویه مرکزی، شعاع پیچان رود، طول موج، طول دره و ضریب خمیدگی اندازه‌گیری و تحلیل شود تا بتوان تغییرات ایجادشده در مسیر رودخانه را در گذشته نسبت به حال مشخص کرد. در ادامه، به تشریح خلاصه‌ای از پارامترهای هندسی مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است.

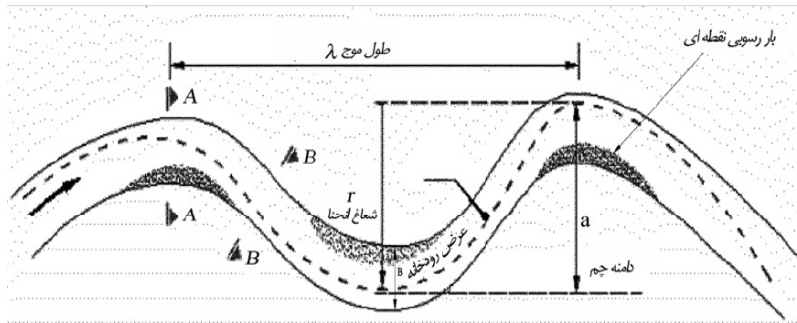
### الف) خم

به انحنا یا تغییر جهت مسیر رودخانه خم می‌گویند. ورود جریان به انحنای رودخانه و اعمال نیروی جانب مرکز به جریان، موجب تغییر رقوم سطح آب می‌گردد. به طوری که سطح آب در قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۸)، حداکثر اختلاف رقوم در نزدیکی‌های رأس قوس به وقوع می‌پیوندد که میزان آن برابر با اختلاف ارتفاع سطح آب در قوس خارجی و قوس داخلی می‌باشد. این اضافه ارتفاع با تلفات انرژی در طول کف رودخانه ترکیب شده و یک سرعت عرضی و در نهایت جریان چرخشی (جریان حلزونی) را ایجاد می‌نماید که از ناحیه بالایی قوس خارجی شروع و به سمت قوس داخلی حرکت

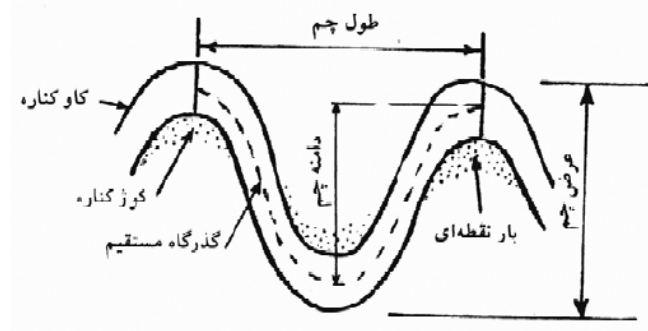
سازی تصاویر مؤثرتر عمل می‌نماید و همچنین باند ۵ نسبت به باند ۷ به طور مطلوب‌تری در جداسازی مرزها کارایی دارد؛ اما چون این روش تنها واضح‌سازی طیفی را پوشش می‌دهد، لازم دیده شد تا جهت استخراج مطلوب‌تر مرز بین آب و خاک با روش‌های دیگر به صورت تکمیل‌کننده به کار رود. در این مورد، واضح‌سازی مکانی از روش‌های معمول است. بدین منظور از روش‌های فیلترگذاری متفاوتی استفاده شد که فیلتر بارزساز لبه روی باند ۵ نتایج بهتری را نسبت به بقیه ارائه داد. همچنین، به این دلیل که فیلتر مذکور پدیده‌های موجود در تصویر را به مقدار کمی تحت تأثیر قرار می‌دهد، استخراج مرز بین آب و زمین و حتی اراضی پست مرطوب و آب، به خصوص برای باند ۵، بسیار مطلوب‌تر انجام شده است. در پردازش بقیه تصاویر از روش کنتراست و بسط خطی اشباع شده به همراه فیلترگذاری با فیلتر بارزساز لبه روی باند ۵، TM به دلیل سهولت و سرعت کاربرد آن و ارائه نتایج بهتر استفاده شد.

پس از رقومی کردن مسیر رودخانه، با فرمت اتوکد از آن خروجی گرفته شده است. در ادامه، مشخصات هندسی قوس‌ها مانند شعاع قوس، طول موج، زاویه مرکزی، طول دره و ضریب خمیدگی در هر یک از دوره‌های زمانی با نرم‌افزار اتوکد استخراج شده است. سپس، با نرم‌افزار آماری SPSS و پارامترهای به دست آمده، تجزیه و تحلیل‌های آماری روی این پارامترها صورت گرفته است.





شکل ۹. عوامل مشخصه یک چم



شکل ۱۰. نمای شماتیک یک چم رودخانه

پاره‌خطی که از اتصال نقاط عطف به‌دست می‌آید، به‌عنوان وتر قوس شناخته می‌شود و این طول معادل نصف طول موج ( $\lambda/2$ ) یا نصف چم رودخانه است. طول منحنی حاصل از اتصال نقطه عطف یک قوس تا نقطه عطف قوس بعدی در روی مسیر رودخانه نیز اندازه‌گیری می‌شود. نسبت این طول به طول چم رودخانه را ضریب خمیدگی می‌گویند. چنانچه ضریب خمیدگی بزرگتر از  $1/4$  تا  $1/5$  باشد، رودخانه پیچان رود بوده و چنانچه کمتر از مقادیر فوق باشد، نشان‌دهنده مستقیم بودن رودخانه در بازه مورد نظر است (۹). پارامترهای معرف یک چم رودخانه در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. کورنیس (۱۹) برای بیان کمی میزان توسعه و پیشرفت پیچان رودی شدن در رودخانه‌ها و تمایز آنها از یکدیگر، با استفاده از زاویه مرکزی، یک تقسیم‌بندی مطابق جدول (۲) انجام داد.

### نتایج و بحث

#### پارامترهای هندسی رودخانه

پلان تغییرات رودخانه زاینده‌رود در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵

می‌کند و موجب فرسایش در قوس بیرونی و حمل رسوبات بستر به سمت قوس داخلی و رسوب‌گذاری در این ناحیه می‌گردد.

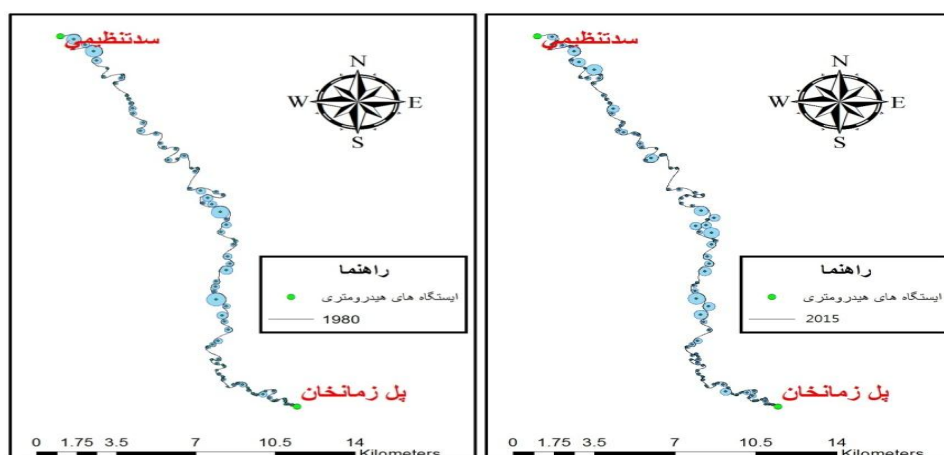
#### ب) پیچاب

پیچاب، یا چم، قسمتی از یک رودخانه می‌باشد که از دو خم متوالی و معکوس که به‌وسیله یک گذرگاه به هم متصل شده‌اند، تشکیل می‌گردد (شکل ۹). عوامل مشخصه یک چم شامل دامنه، عرض، نسبت چم، طول چم و نسبت پیچشی (ضریب خمیدگی) می‌باشد.

برای تعیین ابعاد خم و چم در رودخانه، ابتدا محور رودخانه ترسیم می‌گردد. آنگاه، دایری بر بازه‌های منحنی رودخانه مماس نموده و زاویه مرکزی و شعاع این دایر تعیین می‌گردد. این مقادیر به‌عنوان زاویه مرکزی و شعاع پیچان رود خوانده می‌شوند. پس از ترسیم دایر، نقاط عطف یا نقاط تغییر انحنای محور رودخانه تعیین می‌گردند (۳). نقاط عطف یا نقاطی که محور رودخانه تغییر انحنای آن را با دقت تعیین نموده و این نقاط به یکدیگر متصل می‌گردند. طول

جدول ۲. تقسیم‌بندی رودخانه طبق نظر کورنیش (۱۵)

میزان زاویه مرکزی (درجه)	شکل رودخانه
----	مستقیم
۰ تا ۴۱	شبه مئاندري
۴۱ تا ۸۵	شبه مئاندري توسعه نیافته
۸۵ تا ۱۵۸	مئاندري توسعه یافته
۱۵۸ تا ۲۹۶	مئاندري بیش از حد توسعه یافته
بیش از ۲۹۶	شاخ گوی



شکل ۱۱. پلان رودخانه زاینده‌رود و ترسیم دواير مماس بر مسیر منحنی رودخانه در بازه مطالعاتی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵

که نشانه ثابت ماندن وضعیت مورفولوژیک رودخانه است. با تمرکز بر مقادیر میانه در جداول (۳ تا ۹)، می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۳، زاویه مرکزی در حدود ۹۵ درجه، طول موج در حدود ۱۷۲۵ متر و ضریب خمیدگی حدود ۱/۷ می‌باشد. لیکن در سال ۲۰۱۳، مقدار میانه زاویه مرکزی به ۱۲۲ درجه رسیده است، ولی میانه دیگر پارامترها چندان تغییر نکرده است. بنابراین، نمی‌توان با تحلیل آماری یک یا دو پارامتر مشخص به بررسی مورفولوژی کل یک رودخانه پرداخت. لذا، لازم است پارامترهای رودخانه در زیربازه‌های مشخصی از آن بررسی شده و تغییرات پارامترهای مورفولوژیک با عنایت به اثرات و دخل و تصرفات انسانی مطالعه گردند. ضرایب چولگی محاسبه شده برای پارامترهایی از جمله

در شکل (۱۱) آورده شده است. روی این شکل، برخی از دواير مماس شده بر مسیر جریان نیز نشان داده شده است. تحلیل آماری پارامترهای هندسی این رودخانه برای دوره مطالعه ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ با کاربرد نرم‌افزار SPSS انجام گرفته و نتایج در جداول (۳ تا ۹) آورده شده‌اند. همچنان که از این جداول مشاهده می‌گردد، با توجه به زاویه مرکزی حدود ۹۵ درجه و ضریب خمیدگی بیشتر از ۱/۴ در کلیه بازه‌ها، این رودخانه جزو رودخانه‌های پیچان رودی (مئاندري) توسعه یافته محسوب می‌شود. در کلیه سال‌های مطالعه شده، رودخانه شکل مئاندري خود را حفظ نموده است. در کلیه سال‌ها، متوسط طول مسیر مستقیم رودخانه حدود ۹۶۰ متر ولی متوسط طول منحنی مسیر رودخانه از ۲۰۲۵ متر تا ۲۳۰۰ متر متغیر بوده است. نرخ تغییرات زمانی این متغیر در سال‌های اخیر بسیار کند می‌باشد

جدول ۳. تحلیل آماری پارامترهای رودخانه زاینده‌رود در سال ۱۹۸۰

ضریب خمیدگی	فاصله مستقیم (متر)	طول موج (متر)	زاویه مرکزی (درجه)	طول کمان (متر)	شعاع (متر)	پارامترهای هندسی
۲/۱۴۱	۹۵۹/۴۲	۲۰۵۴/۱۲	۹۳/۷۲	۲۲۶/۲۶	۱۳۶/۸۶	میانگین
۴۹۷/۱	۲۸/۳۴۷	۴۵/۵۵۶	۵۸۳/۳۸	۶۵/۱۶۱	۱۷۹/۷۵	انحراف از معیار
۴۸۰/۸۴	۷۷/۱۰۴۷	۳/۲۳۷۸	۱۷۷	۷۴۸/۹۲۱	۹/۳۸۷	دامنه تغییرات
۷۵۸/۱	۳۳/۳۹۲	۶۷/۶۶۷	۳۰	۵۱۲/۵۹	۶۸/۴۱	حداقل
۵۵۶۶/۵	۱/۱۴۴۰	۷/۳۰۴۵	۲۰۷	۲۶/۹۸۱	۵۸/۴۲۹	حداکثر
۹۱۷/۲	۱۸/۰	۲۷۴۷۶/۰	۳۰۱۶/۰	۳۰۸۳/۲	۸۸۴۵/۱	چولگی
۱۸۰۲/۷	۷۴۸۲/۱	۳/۳	۵۸۱۱/۲	۸۶۸۱/۹	۱۸۲۹/۷	کشیدگی
۱/۷۰۹۱	۱۳/۹۸۰	۳/۱۷۲۳	۹۴	۳/۱۶۶	۴/۱۱۶	میانه

جدول ۴. تحلیل آماری پارامترهای رودخانه زاینده‌رود در سال ۱۹۸۵

ضریب خمیدگی	فاصله مستقیم (متر)	طول موج (متر)	زاویه مرکزی (درجه)	طول کمان (متر)	شعاع (متر)	پارامترهای هندسی
۲/۲۷۷	۹۶۱/۸۴	۲۱۹۰/۱۱	۹۳/۳۰	۲۲۱/۵۱	۱۳۵/۴۱	میانگین
۸۲/۱	۷۹/۳۳۹	۳۲/۵۷۹	۴۰/۸۷۷	۶/۱۶۷	۴۰۴/۶۹	انحراف از معیار
۳۱۳۷/۴	۲۲/۱۰۶۳	۳/۲۵۱۰	۱۵۹	۲۵/۱۰۸۲	۲۱/۴۰۸	دامنه تغییرات
۶۸۵/۱	۷۸/۳۷۵	۳/۷۰۴	۲۱	۴۹/۳۴	۲۵/۳۰	حداقل
۳۸۲۲/۵	۱۴۳۹	۶/۳۲۱۴	۱۸۰	۳/۱۱۱۶	۴۶/۴۳۸	حداکثر
۷۷۴/۲	۲۷۱/۰	۴۹۹۴/۰	۰/۲۴۳	۹۴۱۹/۲	۲۰۵/۲	چولگی
۱۴۸۸/۷	۷۸۸۵/۱	۳۶۲۵/۳	۲/۷	۸۹۶/۱۴	۵۴۶۱/۸	کشیدگی
۱/۷۱۸۲	۴۴/۹۸۹	۸/۱۷۴۱	۹۴	۵۳/۱۵۹	۳۳/۱۱۱	میانه

مشاهده می‌گردد که زاویه مرکزی قوس در حدود ۹۵ درجه و طول موج در حدود ۲۲۰۰ متر می‌باشد. ضمناً تا سال ۱۹۹۸، تغییرات چولگی شعاع و طول کمان بین یک و دو متغیر بوده است. ولی در این سال این چولگی به حدود ۴ الی ۵ رسید. در ادامه تا سال ۲۰۱۵، چولگی به حدود یک تا دو بازگشته است.

#### مقایسه تغییرات پارامترهای هندسی در سال‌های مختلف

بررسی آماری و مقایسه میانگین‌های پارامترهای هندسی رودخانه در سال‌های مورد مطالعه با آزمون LSD در سطح ۰/۵

شعاع قوس، زاویه مرکزی، طول موج و ضریب خمیدگی در کلیه سال‌های تحلیل شده مثبت بوده که حکایت از کشیدگی این پارامترها به سمت مقادیر بالاتر را دارد. تنها پارامتر دارای ضریب چولگی منفی، طول مستقیم رودخانه می‌باشد. از آنجایی که این پارامتر نزدیک به صفر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که در کلیه سال‌های آماری، این مسیرهای مستقیم رودخانه دارای طولی در حدود ۹۶۰ متر می‌باشند و تغییر چندانی ننموده‌اند. پس از فاصله مستقیم، زاویه مرکزی قوس و طول موج دارای چولگی کمتر می‌باشند. در جداول (۳ تا ۹)

جدول ۵. تحلیل آماری پارامترهای رودخانه زاینده‌رود در سال ۱۹۹۲

پارامترهای هندسی	شعاع (متر)	طول کمان (متر)	زاویه مرکزی (درجه)	طول موج (متر)	فاصله مستقیم (متر)	ضریب خمیدگی
میانگین	۱۳۸/۹۷	۲۱۶/۹۸	۹۶/۳۹	۲۲۵/۸۷	۹۶۲/۳۳	۲/۳۱۳
انحراف از معیار	۳۶۱/۷۲	۳۵/۱۲۸	۵۴۲/۴۲	۵۷/۵۶۶	۹/۳۳۸	۱۰۱۴۷/۱
دامنه تغییرات	۵۸/۴۰۹	۹۷۶/۶۸۷	۲۱۴	۹۶/۲۴۱۴	۵۱/۱۰۳۳	۳۶۲۲/۴
حداقل	۶۳/۳۱	۱۵۴/۲۸	۱۷	۴۴/۷۱۲	۶۹/۳۹۴	۶۱۲/۱
حداکثر	۲۱/۴۴۱	۱۳/۷۱۶	۲۳۱	۴/۳۱۲۷	۲/۱۴۲۸	۴۲۳۴/۵
چولگی	۸۴۳۳/۱	۲۷۵۱/۱	۵۷۶۲۶/۰	۳۹۹۳/۰	۲۴۰۴/۰	۷۷/۲
کشیدگی	۱۰۲/۷	۹۵۲۷/۴	۲۵۸۳/۳	۱۱۴۶/۳	۷۳۸۹/۱	۱۵۶۴/۲۷
میانه	۹۴/۱۱۸	۵۶/۱۹۷	۹۲	۲/۱۷۴۳	۷۹/۹۸۸	۱/۷۲۳۶

جدول ۶. تحلیل آماری پارامترهای رودخانه زاینده‌رود در سال ۱۹۹۸

پارامترهای هندسی	شعاع (متر)	طول کمان (متر)	زاویه مرکزی (درجه)	طول موج (متر)	فاصله مستقیم (متر)	ضریب خمیدگی
میانگین	۱۳۵/۱۷	۲۱۲/۲۷	۹۴/۱۴	۲۲۷۳/۹۷	۹۶۱/۵۱	۲/۳۶۵
انحراف از معیار	۴۸/۱۴۸	۵۴/۲۴۴	۵۹۴/۴۲	۴/۵۶۵	۵۹/۳۵۰	۷۷/۱
دامنه تغییرات	۱۵/۱۲۸۵	۲۹/۱۹۷۲	۱۸۵	۵/۲۳۸۱	۴/۱۰۲۹	۲۶۹۵/۴
حداقل	۶۵/۳۵	۳۱۴/۳۳	۲۶	۷/۷۲۵	۲/۳۷۵	۵۸/۱
حداکثر	۸/۱۳۲۰	۶/۲۰۰۵	۲۱۱	۲/۳۱۰۷	۶/۱۴۰۴	۳۲۷۵/۵
چولگی	۵۲۲۸/۵	۵۰۵۱/۴	۲۱۸۶/۰	۳۳۸۴۹/۰	۱۵۵/۰	۹۸۸۶/۱
کشیدگی	۹۹۹/۴۱	۳۷۷/۳۰	۴۳۲/۲	۴۴۹/۳	۶۶۴۵/۱	۷۱۱۳/۶
میانه	۷۶/۱۲۷	۶۲/۱۹۹	۹۹	۳/۱۷۴۰	۴۴/۹۱۳	۱/۷۱۳۶

شکلی در مسیر رودخانه زاینده‌رود دارد.

#### تحلیل منطقه‌ای تغییرات دیواره رودخانه زاینده‌رود

به دلیل طولانی بودن مسیر بررسی رودخانه و همچنین این که اکثراً الگوی فرسایش و رسوب یکسان در بازه‌های مختلف آن مشاهده شد، چهار بازه از رودخانه که دارای ویژگی خاصی در فرسایش و رسوب کناره‌ها هستند، انتخاب گردیدند. این مناطق عبارتند از:

در جدول (۱۰) آورده شده است. با در نظر گرفتن میانگین‌ها، ضریب خمیدگی بین سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۵ و سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۸ تغییرات معنی‌داری نداشته است. به بیان دیگر، می‌توان گفت که با توجه به کنترل دبی‌های سیلابی بالادست رودخانه توسط سد زاینده‌رود، حدود معنی‌داری برای ضریب خمیدگی این رودخانه حدود ۱۰ سال می‌باشد. البته باید به این نکته نیز توجه شود که در ۱۵ سال اخیر با توجه به اقدامات تثبیت دیواره‌های رودخانه و کاهش دبی پایه آن، تغییرات در این بازه زمانی معنی‌دار نبوده که نشان از به حداقل رسیدن تغییرات

جدول ۷. تحلیل آماری پارامترهای رودخانه زاینده‌رود در سال ۲۰۰۳

پارامترهای هندسی	شعاع (متر)	طول کمان (متر)	زاویه مرکزی (درجه)	طول موج (متر)	فاصله مستقیم (متر)	ضریب خمیدگی
میانگین	۱۳۴/۴۵	۲۱۳/۲۸	۹۴/۶۸	۲۲۸۵/۶۰	۹۶۲/۳۶	۲/۳۷۵
انحراف از معیار	۵۰۷/۹۸	۲۱/۱۲۸	۳۴۱/۳۴	۶/۵۵۷	۱/۳۳۴	۲۲۹/۱
دامنه تغییرات	۵۷/۵۰۴	۳۰۴/۶۹۴	۱۵۹	۸۷/۲۳۴۰	۹۶/۱۰۴۶	۳۳۸۶/۴
حداقل	۹/۴۴	۱۵۶/۴۹	۲۴	۶۳/۷۳۵	۳۷/۳۹۲	۶۵۱/۱
حداکثر	۶۶/۵۴۸	۴۶/۷۴۳	۱۸۳	۵/۳۰۷۶	۳/۱۴۳۹	۴۰۳۷/۵
چولگی	۷۳۸۸/۱	۴۵۹۸/۱	۵۶۳۴۷/۰	۴۲۱۴۶/۰	-۰/۱۷۵	۴۲/۲
کشیدگی	۱۱۰۶/۶	۸۷۲۵/۵	۸۱۰۷/۲	۴۵۲/۳	۷۶۵۴/۱	۷۶۱۳/۶
میانه	۷۲/۱۲۲	۳/۱۹۷	۸۳	۹/۲۰۱۷	۶۹/۹۴۷	۱/۷۱۰۳

جدول ۸. تحلیل آماری پارامترهای رودخانه زاینده‌رود در سال ۲۰۱۰

پارامترهای هندسی	شعاع (متر)	طول کمان (متر)	زاویه مرکزی (درجه)	طول موج (متر)	فاصله مستقیم (متر)	ضریب خمیدگی
میانگین	۱۳۲	۲۰۹/۹۵	۹۶/۳۱	۲۲۹۰/۵۵	۹۶۲/۱	۲/۳۸۱
انحراف از معیار	۸۱۶/۷۲	۵۲/۱۵۵	۲/۳۸	۲۳/۵۳۶	۱۳/۳۳۵	۹۴۵۶۲/۰
دامنه تغییرات	۳۸/۴۳۸	۹۱۴/۹۱۲	۱۷۸	۶/۲۹۱۲	۴/۱۰۱۵	۹۰۸/۳
حداقل	۳۴/۱۰	۱۶/۲۲	۳۲	۵۴/۷۲۲	۴۶/۴۲۱	۵۸۲/۱
حداکثر	۷۲/۴۴۸	۹۴/۹۳۴	۲۱۰	۶/۳۰۳۴	۵/۱۴۳۶	۹۶۶۲/۴
چولگی	۸۷۹/۱	۷۰۹۲/۲	۵۴۰۶۸/۰	۲۹۳۴۴/۰	-۰/۱۰۰۱	۸۰۲۴/۱
کشیدگی	۱۳۸۳/۷	۸۷۳/۱۱	۵۸۱/۳	۱۹۱۸/۳	۷۸۲۸/۱	۸۲۱۱/۵
میانه	۲۶/۱۵۵	۸۱/۱۷۸	۱۲۲	۳/۱۷۳۹	۱۳/۹۴۵	۱/۷۲۹۱

### الف) حجت آباد

این بازه در فاصله ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ متری پایین دست سد تنظیمی قرار دارد. در شکل (۱۲)، موقعیت چم در تصویر ماهواره‌ای و تغییرات آن در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ نشان داده شده است. به نظر می‌رسد امتداد کلی چم بین این سال‌ها تغییر نکرده، لیکن طی این دوره، چم رودخانه به سمت قوس خارجی متمایل شده و حدود ۶۰ متر جابه‌جا شده است. با توجه به این‌که آب رها شده از سد تنظیمی به سبب زلال بودن و افزایش توان حمل رسوب رودخانه، قادر به فرسایش رودخانه می‌باشد، در نتیجه

سبب فرسایش در قوس خارجی رودخانه گردیده است. این حالت یکی از معروف‌ترین الگوهای فرسایش در رودخانه است که محققین زیادی از جمله عاشوری و همکاران (۷)، مقصودی و همکاران (۱۰)، لی و همکاران (۲۰) و سانگ و همکاران (۲۹) آن را گزارش کرده‌اند.

### ب) مارکده

در شکل (۱۳)، عکس ماهواره‌ای و مسیر جدید و قدیم رودخانه در نزدیکی روستای مارکده نمایش داده شده است. در

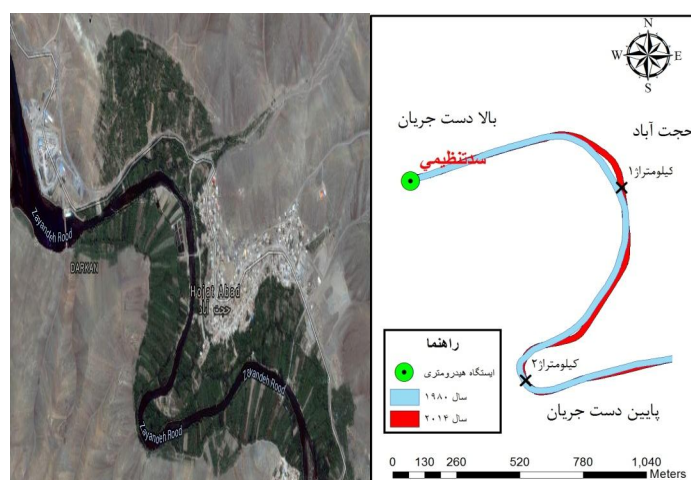
جدول ۹. تحلیل آماری پارامترهای رودخانه زاینده‌رود در سال ۲۰۱۵

پارامترهای هندسی	شعاع (متر)	طول کمان (متر)	زاویه مرکزی (درجه)	طول موج (متر)	فاصله مستقیم (متر)	ضریب خمیدگی
میانگین	۱۳۰/۱۷	۲۰۰/۴۰	۹۷/۴۲	۲۲۹۴/۹۴	۹۶۲/۲۴	۲/۳۸۵
انحراف از معیار	۵۶۵/۷۵	۹۴/۱۱۵	۴۶۳/۳۴	۱۳/۵۳۹	۷/۳۴۱	۷۵۲/۱
دامنه تغییرات	۷۴/۳۳۸	۹۶۱/۶۷۶	۱۷۳	۲۱/۲۲۴۷	۷۶/۱۰۴۹	۵۲۸۸/۴
حداقل	۸۵/۳۶	۲۹/۳۷	۲۵	۳۹/۶۹۰	۸۴/۳۹۰	۴۶۹/۱
حداکثر	۳۲/۳۷۵	۹۹/۷۱۳	۱۹۸	۶/۲۹۳۷	۶/۱۴۴۰	۵۷۵۷/۵
چولگی	۴۱۷۹/۱	۹۳۱۷/۱	۵۷۳۴/۰	۲۱۵۸۶/۰	-۰/۱۶	۱۷۷/۲
کشیدگی	۳۴۹۴/۴	۵۵۳۷/۸	۷۹۹۸/۲	۸۶۰۴/۲	۷۲۶۱/۱	۷۱۳۵/۶
میانه	۶۲/۱۰۳	۵۵/۱۷۰	۸۶	۹/۱۷۲۳	۲۳/۹۳۹	۱/۷۱۴۵

جدول ۱۰. مقایسه میانگین‌های پارامترهای هندسی رودخانه در سال‌های مورد مطالعه

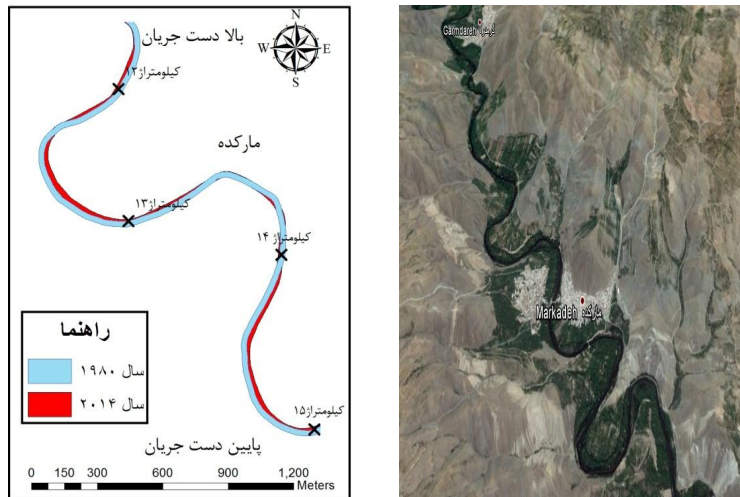
سال	ضریب خمیدگی	فاصله مستقیم (متر)	طول موج (متر)	زاویه مرکزی (درجه)	طول کمان (متر)	شعاع (متر)
۱۹۸۰	۲/۱۴۱ <sup>a</sup>	۹۵۹/۴۲ <sup>a</sup>	۲۰۵۴/۱۲ <sup>a</sup>	۹۳/۷۲ <sup>a</sup>	۲۲۶/۲۶ <sup>a</sup>	۱۳۶/۸۶ <sup>a</sup>
۱۹۸۵	۲/۲۷۷ <sup>a</sup>	۹۶۱/۸۴ <sup>a</sup>	۲۱۹۰/۱۱ <sup>b</sup>	۹۳/۳۰ <sup>a</sup>	۲۲۱/۵۱ <sup>a</sup>	۱۳۵/۴۱ <sup>a</sup>
۱۹۹۲	۲/۳۱۳ <sup>b</sup>	۹۶۲/۳۳ <sup>b</sup>	۲۲۲۵/۸۷ <sup>c</sup>	۹۶/۳۹ <sup>b</sup>	۲۱۶/۹۸ <sup>b</sup>	۱۳۸/۹۷ <sup>b</sup>
۱۹۹۸	۲/۳۶۵ <sup>b</sup>	۹۶۱/۵۱ <sup>b</sup>	۲۲۷۳/۹۷ <sup>c</sup>	۹۴/۱۴ <sup>a</sup>	۲۱۲/۲۷ <sup>b</sup>	۱۳۵/۱۷ <sup>a</sup>
۲۰۰۳	۲/۳۷۵ <sup>c</sup>	۹۶۲/۳۶ <sup>b</sup>	۲۲۸۵/۶۰ <sup>c</sup>	۹۴/۶۸ <sup>a</sup>	۲۱۳/۲۸ <sup>b</sup>	۱۳۴/۴۵ <sup>a</sup>
۲۰۱۰	۲/۳۸۱ <sup>c</sup>	۹۶۲/۱ <sup>c</sup>	۲۲۹۰/۵۵ <sup>c</sup>	۹۶/۳۱ <sup>b</sup>	۲۰۹/۹۵ <sup>b</sup>	۱۳۲ <sup>c</sup>
۲۰۱۵	۲/۳۸۵ <sup>c</sup>	۹۶۲/۲۴ <sup>c</sup>	۲۲۹۴/۹۴ <sup>d</sup>	۹۷/۴۲ <sup>c</sup>	۲۰۰/۴۰ <sup>c</sup>	۱۳۰/۱۷ <sup>c</sup>

در هر ستون، میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشابه دارند اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ ندارند



شکل ۱۲. عکس ماهواره‌ای و نمای شماتیک از مسیر جدید و قدیم رودخانه در پایین دست سد تنظیمی (منطقه حجت‌آباد)





شکل ۱۳. عکس ماهواره‌ای و نمای شماتیک از مسیر جدید و قدیم رودخانه در محل روستای مارکده



شکل ۱۴. قرار دادن شاخه و تنه درختان در مسیر رودخانه زاینده‌رود

به دلیل پوشش مناسب دیواره و اقدامات پیش‌گیرانه همچون سنگ‌چین کردن لبه‌های خارجی قوس‌ها، در ۳۴ سال گذشته تغییرات بسیار کم بوده، به طوری که در حادترین شرایط (بین ۲۲ تا ۲۳) کمتر از ۱۰ متر جابه‌جایی دیواره‌های رودخانه را شاهد هستیم. این نتایج با تحقیقات دابوجانی و همکاران (۱۴)، گارتنر و همکاران (۱۵) و گارنل و همکاران (۱۷) مطابقت دارد. وضعیت لبه رودخانه و پوشش گیاهی مناسب در این منطقه در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.

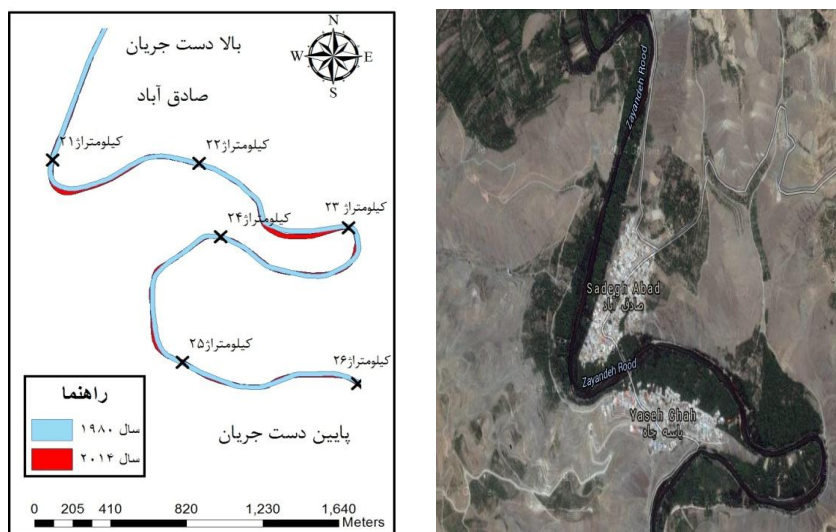
#### (د) چم جنگل

بازه روستای چم جنگل در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در این بازه که حدوداً بین ۴۰ تا ۴۲ کیلومتر پایین‌دست سد

منطقه مارکده، بین ۱۲ تا ۱۳، بر خلاف معمول، حرکت دیواره رودخانه به سمت داخل قوس می‌باشد. مهم‌ترین دلیل این موضوع، دخالت‌های انسانی در جابه‌جایی و فرسایش لبه‌ها در این منطقه می‌باشد. از جمله این دخالت‌ها می‌توان به ساخت و سازها در حریم رودخانه و قرار دادن شاخه و تنه درختان در مسیر رودخانه (شکل ۱۴) اشاره کرد. منطقه چم کاکا نیز وضعیتی شبیه به بازه مارکده دارد.

#### (ج) صادق‌آباد

در شکل (۱۵)، موقعیت جغرافیایی حوالی منطقه صادق‌آباد نشان داده شده است. در پایین‌دست روستای صادق‌آباد، از ۲۱ تا ۲۶، اگر چه رودخانه حالت پیچان رودی دارد اما



شکل ۱۵. عکس ماهواره‌ای و نمای شماتیک از مسیر جدید و قدیم رودخانه زاینده‌رود در محل روستای صادق‌آباد

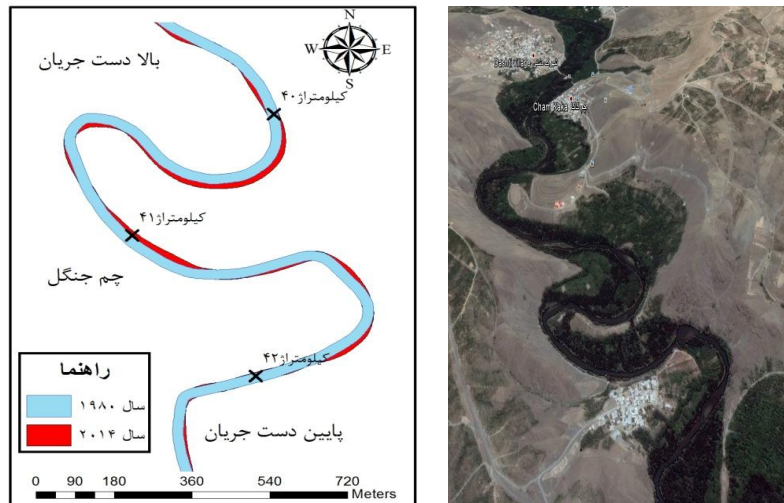


شکل ۱۶. پوشش گیاهی مناسب و حفاظت دیواره‌ها با سنگ‌چین کردن بخشی از رودخانه زاینده‌رود در حوالی صادق‌آباد

### نتیجه‌گیری

تغییرات مورفولوژی رودخانه زاینده‌رود در پایین‌دست سد تنظیمی، در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ برای ۷ دوره، از طریق بررسی پارامترهای مشخصه انجام گرفته است. در این تحقیق، تصاویر ماهواره‌ای لندست از بازه واقع بین سد تنظیمی و پل زمان‌خان، به طول ۴۲ کیلومتر، تهیه شد. با ترکیب و فیلتر نمودن لایه‌ها در این تصاویر، مسیر رودخانه شناسایی و سپس در نرم‌افزار اتوکد پارامترهای مشخصه قوس‌ها تعیین گردید. مقادیر متوسط، میانگین، بیشینه، کمینه، دامنه تغییرات و ضرایب چولگی و کشیدگی برای کلیه پارامترهای مرتبط با قوس‌ها تعیین گردید. این مقادیر نشان‌دهنده روند یکنواخت تغییر پارامترهای مورفولوژیک رودخانه بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۸

تنظیمی قرار گرفته، دو الگوی مختلف مشاهده می‌شود. در بخش‌های بالادست که عملیات ساماندهی صورت نگرفته، الگوی توسعه متناظر مطابق روند طبیعی صورت گرفته، به گونه‌ای که متناظر به سمت خارج قوس گسترش می‌یابد. در بخش‌های ساماندهی شده، این روند توسعه محدود گشته است. الگوی فرسایش دیواره‌ها به نحوی است که قوس‌ها به سمت پایین‌دست در حرکت هستند و ناحیه خارجی قوس مستعد فرسایش می‌باشد. الگوی فرسایش در این منطقه و مناطق مشابه به صورت چرخش و توسعه طولی می‌باشد. تغییرات در مناطق چم عالی و چم خلیفه همانند بازه چم جنگل می‌باشد که برای اختصار مقاله، نتایج ارائه نشده است.



شکل ۱۷. عکس ماهواره‌ای و نمای شماتیک از مسیر جدید و قدیم رودخانه زاینده‌رود در محل روستای چم جنگل

بررسی‌های میدانی نشان داد که در بازه چم کاکا، چم خلیفه و چم عالی، به دلیل افزایش شیب، فرسایش دیواره‌ها به حداکثر می‌رسد که باید برای حفاظت سواحل این رودخانه از فرسایش، روش‌های کنترلی اتخاذ گردد.

### سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان که در تهیه بخشی از داده‌های این پژوهش همکاری لازم را انجام دادند و آقای مهندس احسان تیموری که در انجام مراحل تهیه پارامترهای هندسی رودخانه همکاری کردند، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

بود. در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۸ باید تغییرات اساسی در رودخانه رخ داده باشد. دیگر نتایج نشان می‌دهد که ضریب خمیدگی از ۲/۱۴ به ۲/۳۸ افزایش یافته است و شعاع انحنای رودخانه و طول موج پیچش‌ها به ترتیب ۵ و ۱۱/۴ درصد کاهش پیدا کرده است. به‌طورکلی، رودخانه، در هر دوره، از انحنای قوس‌های خود کاسته است و پیچ‌ها به سمت پایین دست جابه‌جا شده‌اند. از مهم‌ترین عوامل این پدیده می‌توان به ساخت و سازهای حاشیه رودخانه اشاره کرد که روند طبیعی رودخانه را برهم زده است. از این موارد می‌توان به چم‌های جنگل و مارکده اشاره کرد. در نهایت، اگر چه دبی سیلابی رودخانه توسط سد زاینده‌رود مهار شده است، اما هنوز رودخانه در قسمت‌های پیچان رودی قابلیت فرسایش دارد.

### منابع مورد استفاده

۱. ارشد، ص.، س. مرید و ه. میر ابوالقاسمی. ۱۳۸۶. بررسی روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها با استفاده از سنجش از دور. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۴(۶): ۸۰-۶۶.
۲. حق‌آبی، ا.، م. حبیبی، م. ح. احمدی پور و ن. جواهری. ۱۳۸۳. نظریه‌های ایجاد و تحول پیچان‌رودها. فرهنگ زبان، تهران.
۳. رضایی مقدم، م. ح. و ک. خوش‌دل. ۱۳۸۸. بررسی پیچ و خم‌های مئاندر اهرچای در محدوده دشت ازومدل ورزقان. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی ۲۰(۳۳): ۱۱۲-۱۰۱.
۴. رضایی مقدم، م. ح.، ع. محمدی‌فر و خ. ولی‌زاده. ۱۳۹۲. بررسی کمی پیچان رودهای رودخانه آجی‌چای در محدوده خواجه تا

- ونیار. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی ۱۷(۴۴): ۱۷۸-۱۶۱.
۵. رنگزن، ک.، ب. صالحی و پ. سلحشوری. ۱۳۸۷. بررسی تغییرات منطقه پایین‌دست سد کرخه قبل و بعد از ساخت سد با استفاده از تصاویر چند رسانه Landsat. اولین همایش ژئوماتیک ایران. مجموعه مقالات، ص. ۱۱-۱.
۶. شریفی‌کیا، م. و ن. مال‌امیری. ۱۳۹۲. آشکارسازی تغییرات الگوی مکانی رودخانه هیرمند و تحلیل مورفولوژیکی آن. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی ۴: ۱۶۹-۱۴۹.
۷. عاشوری، م.، م. ح. رضایی مقدم و ز. زهرا. ۱۳۹۲. بررسی تغییرات مورفولوژی بستر رودخانه پیش و پس از احداث سد با استفاده از HecRas و GIS. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی ۴۵(۱): ۸۷-۱۰۰.
۸. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. ۱۳۹۱. راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها. نشریه شماره ۵۹۲، انتشارات معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، تهران.
۹. معصومی، ح.، م. ر. غریب‌رضا و ا. معتمد. ۱۳۹۰. بررسی مورفولوژی و الگوی پیچان رودی رودخانه زهره در جلگه ساحلی هندیکان. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز ۳(۲): ۱۱۲-۱۰۲.
۱۰. مقصودی، م.، س. شرفی و ی. مقامی. هزار و سیصد و هشتاد و نه. روند تغییرات الگوی مورفولوژی رودخانه خرم‌آباد با استفاده از GIS، RS و Auto Cad. علوم انسانی، برنامه‌ریزی و آمایش فضا ۳: ۷۸-۶۸.
۱۱. یمانی، م.، م. حسین‌زاده و ا. نوحه‌گر. ۱۳۸۵. هیدرودینامیک رودخانه تالار و بابل و نقش آن در ناپایداری و تغییرات مشخصات هندسی آنها. پژوهش‌های جغرافیایی ۱۵۵: ۳۳-۱۵.
12. Carbonneau, P., M. A. Fonstad, W. A. Marcus and S. J. Dugdale. 2012. Making riverscapes real. *Geomorphol.* 137(1): 74-86.
13. Chu, Z. X. X., G. Sun, S. k. Zhai, K. H. XU. 2006. Changing Pattern of Accretion/Erosion of the Modern Yellow River (Huanghe) Subaerial delta. China: Based on Remote Sensing Images. 294: 13-30.
14. Dabojani, D., D. Mithun and K. K. Kanti. 2014. River change detection and bankline erosion recognition using remote sensing and GIS. *Forum Geogr.* 1: 12-17.
15. Gärtner, P., M. Förster, A. Kurban and B. Kleinschmit. 2014. Object based change detection of Central Asian Tugai vegetation with very high spatial resolution satellite imagery. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 31: 110-121.
16. Gregory, K. J. 1977. *River Channel Changes*. John Wiley & Sons, PP. 198-212.
17. Gurnell, A. M., W. Bertoldi and D. Corenblit. 2012. Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. *Earth-Sci. Rev.* 111(1): 129-141.
18. Hossain, M. A., T. Y. Gan and A. B. M. Baki. 2013. Assessing morphological changes of the Ganges River using satellite images. *Quat. Int.* 304: 142-155.
19. Kornish, M. 13980. Meander travel in alluvial streams. *Proceedings of the International Workshop on Alluvial River Problems*, New Delhi, India.
20. Li, J., M. E. Donselaar, S. E. Hosseini Aria, R. Koenders and A. M. Oyen. 2014. Landsat imagery-based visualization of the geomorphological development at the terminus of a dryland river system. *Quat. Int.* 352: 100-110.
21. Liu, T. and X. Yang. 2015. Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, GIS and landscape metrics. *Appl. Geogr.* 56: 42-54.
22. Longbotham, N., S. Member, F. Paci, T. Glenn, A. Zare, M. Volpi, D. Tuia, E. Christophe, J. Michel, A. Member and J. Inglada. 2012. Multi-modal change detection. *J. Selec. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.* 5(1): 331-342.
23. Mahapatra, M., R. Ramakrishnan and A. S. Rajawat. 2014. Monitoring long-term morphological changes of Narmada estuary using remote sensing and GIS techniques. *J. Geomatics* 8(1): 125-129.
24. Najafi Disfani, M. 1998. *Computer processing of remote sensing images*. Pub. SAMT. 1<sup>st</sup> Edition. 257p.
25. Orfeo, O. and J. Stevaux. 2002. Hydraulic and morphological characteristics of middle and upper reaches of the Parana' River (Argentina and Brazil). *Geomorphology* 44(5): 309-322.
26. Rangzan, K. M., M. Toolaee Nezhad and S. Piraste. 2002. Study the effects of rivers migration on civil structure in

- Khuzestan Plain using satellite data. Proc. of 6<sup>th</sup> International Conference of River Engineering in Ahvaz. 169-181.
27. Sandra, j. 2000. Medium and short - Term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel. Scotland Geomorphology 34: 195-208.
  28. Shafieefar, M. 2001. Migration pattern of final bends of Zohreh River case study of a young river. Proc. of XXIX IAHR Hydraulic 413-422.
  29. Song, W., H. Jia, J. Huang and Y. Zhang. 2014. A satellite-based geographically weighted regression model for regional PM2.5 estimation over the Pearl River Delta region in China. Remote Sens. Environ. 154: 1-7.
  30. Thorne, C. R. 2002. Geomorphic analysis of large alluvial rivers. J. Geomorphology 44(5): 203-219.
  31. Timer, G. 2003. Controls on channel sinuosity changes. A case study of the Tisza River, The Great Hungarian plain. Quaternary science Reviews 22: 2199-2207.
  32. <http://www.esrw.ir/>



## Morphologic Study of Meandering Rivers Under Controlled Flow Using RS and GIS Techniques (Case study: Zayandehrud River at the downstream of Zayandehrud dam)

M. Javahery-Tehrani\*, S. F. Mousavi and Kh. Hosseini<sup>1</sup>

(Received: April 21-2015 ; Accepted : April 9-2016)

### Abstract

Morphologic study of rivers is very important in stabilization and determination of river boundaries. Dams are structures which have the highest effects on river morphology. Studies of river changes are usually time-consuming and possible only in the long-term timescales. To detect these changes, using satellite images over specific time periods and cartographic methods are useful. In the present study, morphological changes of Zayandehrud River, at downstream of Zayandehrud dam, between hydrometric stations of Sad-e-Tanzimi and Pol-e-Zamankhan, were investigated through 7 series of Landsat satellite photos from 1980 to 2015 by applying ENVI 4.8 and Arc GIS10.2 software. Based on the results, the method of enhancing the contrast as saturated linear expansion, along with the edge enhancement filter, was found an appropriate method for determining the boundary between land and water. In the next step, the river path was entered into Arc GIS 10.2, and geometric parameters of the river such as wavelength, sinuosity ratio, central angle and radius of circle tangent to the curve were determined. Also, statistical analysis of geometric parameters was performed by applying SPSS software. Results showed that from 1986 up to now the sinuosity ratio has risen from 2.14 to 2.38, while the radius of river curvatures and wavelength of meanders have decreased by 5% and 11.4%, respectively. Overall, the river has decreased its arcs' curvature and bends have been moved to downstream. The main cause of this phenomenon is constructions in the river borders (e.g. in Markadeh and Cham-Kaka), which have disturbed the natural situation of the river. In Cham-Jangal, Cham-Khalifeh and Cham-Ali regions, due to the increase in slope and improper vegetation cover, bank erosion has reached to its highest degree. In general, although flood events have been contained by Zayandehrud dam, yet the river has great potential for erosion in the meandering sections.

**Keywords:** Erosion and sedimentation, Meandering River, Morphologic changes, Satellite images.

---

1. Dept. of Water Eng., Faculty of Civil Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: m.javahery110@gmail.com