

## پایش و بررسی علل تغییرات زمانی و مکانی بستر رودخانه بالهارود براساس پارامترهای هندسی

دریافت مقاله: ۹۶/۹/۱۰ پذیرش نهایی: ۹۷/۱/۲۲

صفحات: ۱۱۱-۱۲۵

طیبه کیانی: استادیار گروه ژئومورفولوژی دانشگاه خوارزمی<sup>۱</sup>

t.kiani@khu.ac.ir

محسن پوربشیر هیر: دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی دانشگاه خوارزمی

Mohsen.pourbashir@gmail.com

### چکیده

رودخانه‌ها و آبراهه‌ها سیستمی کاملاً پویا بوده و الگوی مورفولوژیک آن‌ها به‌طور پیوسته در طول زمان تغییر می‌کند که گاهی اوقات، فرسایش کناره‌ای و آسیب‌رسانی به تأسیسات ساحلی و جابجایی مرز را به دنبال دارند. از این رو بررسی رفتار هیدرولوژیکی آن باید همواره مورد توجه باشد. ایران دارای چندین رودخانه مرزی با همسایگان خود است که مطالعه آن‌ها از رویکرد تغییر بستر باید همواره مورد توجه باشد. در این تحقیق رودخانه مرزی بالهارود که ۶۲ کیلومتر از مرز ایران با جمهوری آذربایجان در استان اردبیل را تشکیل می‌دهد با رویکرد تغییر بستر از طریق مطالعه شاخص‌های هیدرومورفولوژی ضریب سینوسیته، شعاع خمش و زاویه مرکزی برای بازه زمانی ۱۳۳۴ و ۱۳۹۵ به ترتیب با استفاده از نقشه پروتکل ۱/۲۵۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای ETM مطالعه گردید و شاخص‌های مذکور در نرم‌افزار اتوکل و Arc map محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوی پیچان‌رودی بالهارود در طی بازه زمانی ۶۱ ساله شدیدتر شده و میزان تغییرات بستر رودخانه بسیار بالا بوده است به طوری که فقط در مورد شاخص ضریب خمیدگی تعداد خم‌های رودخانه از ۵۹۱ خم در سال ۱۳۳۴ به ۸۵۷ عدد در سال ۱۳۹۵ رسیده که بیانگر تغییر شدید مورفولوژی رودخانه است. مقادیر شعاع خمیدگی در کل بازه، مؤید وجود قوس‌های تقریباً مشابه در می باشد. این شاخص برای سال ۱۳۳۴ نشان‌دهنده حالت پیچان‌رودی تر بخش پایاب نسبت به سراب و برعکس این حالت برای سال ۱۳۹۵ است؛ که می‌تواند به دلیل تغییر شرایط اقلیمی و تکنونیک باشد. همچنین مجموع عواملی مانند: دخالت‌های انسانی، ماهیت خشکی اقلیم، پوشش گیاهی، بافت سست، در روند تغییر بستر دخیل هستند به طوری که بیشتر تغییرات در محدوده مناطق مسکونی با پوشش گیاهی ضعیف‌تر رخ داده است که انجام اقدامات حفاظتی از جمله تثبیت سواحل و افزایش پوشش گیاهی و شناخت موانع دست‌اندازی به حریم رودخانه از اهمیت زیادی برخوردار است.

کلید واژگان: ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی، تغییر بستر رودخانه، بالهارود، GIS.

## مقدمه

مورفولوژی رودخانه‌ها از منظرهای مختلف قابل بررسی است از جمله زمین‌شناسی، نوع مسیر، لایه‌بندی، دانه‌بندی مصالح بستر و سواحل و قدرت و انرژی سیلاب‌ها (Breach, 2008). در بخش‌های مختلف یک محدوده مکانی، رودخانه که به حالات مختلف جاری می‌گردد (بیاتی خطی و زاهدی، ۱۳۸۷). از این‌رو، سیستم‌های رودخانه‌ای بزرگ به‌ندرت از یک نوع الگوی ویژه تبعیت می‌کنند (Edgardo, 2008) و الگوی مورفولوژیک آن‌ها به‌طور پیوسته در طول زمان تحت تاثیر گسل‌ها و درزه‌ها و غیره تغییر می‌کند (huggett, 2007)، از طرفی رودخانه‌های مئاندری از پدیده‌های ژئومورفیک پویا در سطح زمین هستند به‌طوری که مرتباً تغییر مسیر می‌دهند (لوچی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۰) به همین دلیل می‌تواند فرسایش کناره‌ای و آسیب‌رسانی به تأسیسات ساحلی و جابجایی مرز را به دنبال داشته باشد. اگرچه عوامل متعددی مانند انحراف آبراهه در کناره‌ها، فرسایش عمقی کف رود، اختلاف سازند بستر و سیل‌خیزی، باعث تخریب دیواره و تغییر الگوی مجاری رود می‌شود (یمانی و شرفی، ۱۳۹۱) ولی معمولاً یک یا دو عامل غالب این تغییرات را کنترل می‌کنند. بستر رودخانه‌ها در طول زمان به دلیل تحولات دینامیکی و تاثیرات ناشی از آن تغییرات نسبتاً زیادی دارند به‌ویژه رودهایی که سیلابی هستند می‌توانند مزید بر این علت شده و خسارات جدی به تأسیسات انسانی و اراضی کشاورزی وارد سازند. مورفولوژی الگوی بستر رودخانه‌ها در طی زمان تابع عوامل متعددی همچون جنس سازندهای زمین‌شناسی، دبی سیلاب، پوشش گیاهی و توپوگرافی است. اما بررسی‌های تغییر بستر رودخانه‌ها نشان می‌دهد که این نوع مورفولوژی از یک سری قواعد تبعیت می‌کنند به‌عبارت‌دیگر، الگوی تغییر بستر رودخانه‌ها (پیچان‌رودی) تابع فرآیندهای غالب و مجموعه عواملی است که در طی زمان اعمال می‌شود (نوحه‌گر و یمانی، ۱۳۸۲). این تغییرات به‌خصوص برای رودخانه‌های مرزی بسیار حائز اهمیت و درخور توجه است به‌طوری که یکی از موضوعات محوری در مطالعات جغرافیای سیاسی به شمار می‌رود. مطالعات در زمینه مورفولوژی رودخانه‌ها به‌منظور شناسایی کلی شکل، فرآیند توسعه و روند تغییرات آن جهت تحلیل پایداری و فرسایش کناره‌ای رودخانه‌ها و دستیابی به قانونمندی کلی صورت می‌گیرد (احمدی، ۱۳۹۳). بنابراین درک طبیعت و میزان تغییرات انجام‌یافته موجب می‌شود علل فرسایش کناره‌های رودخانه را شناسایی و روند این پدیده را در آینده ارزیابی نمایند که برای رسیدن به این هدف باید متغیرهایی را که در سیستم‌های رسوبی رودخانه‌ای دخیل هستند تحلیل و ارزیابی کرد.

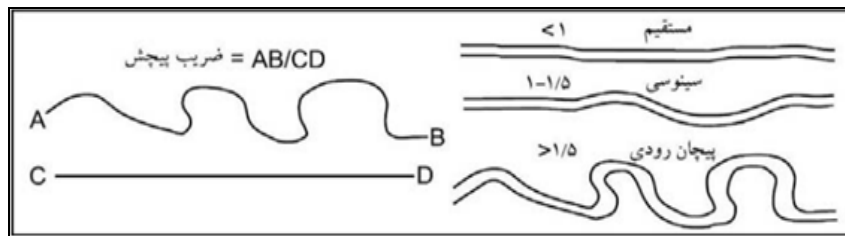
رودخانه‌ها دارای اهمیت بسیار بالای اکولوژیکی هستند و رگ‌های حیاتی ارتباطی جهان به‌شمار می‌روند. محل رویش تعداد زیادی از گیاهان و زیستگاه‌های متنوعی از آبزیان بوده و ساختار زیست‌محیطی پیچیده‌ای دارند. رودخانه‌ها به‌عنوان بخشی از ثروت طبیعی هر کشوری نقش بسیار بااهمیتی در توسعه هر کشور دارد. مساله مرزبندی رودخانه‌هایی که از قلمرو دو یا چند کشور عبور می‌کنند یا قلمرو آنها را از یکدیگر جدا می‌سازند و نحوه بهره‌برداری و تعیین حقا به هر کشور از رودخانه‌های مشترک از جمله مسایلی هستند که حیطه و عمل حقوق بین‌الملل آب را گسترش داده و آن را به یکی از شاخه‌های با اهمیت حقوق بین‌الملل تبدیل کرده است و از جمله موضوعات مورد مناقشه و اختلاف میان کشورهای مختلف است که مخاصمات مسلحانه بین کشورها

را موجب شده و صلح و امنیت بین‌المللی را در مناطق کم‌آب و بحران‌زده به شدت تهدید می‌کند؛ در هیچ جای دنیا به اندازه منطقه خاورمیانه مسئله آب بر شکل‌گیری مسائل سیاسی، معیشتی و اقتصادی مؤثر نبوده است. منطقه غرب آسیا و به‌طور کلی خاورمیانه جزو یکی از خشک‌ترین اقلیم‌های جهان بوده و ایران نیز در این منطقه، شدیداً نیازمند آب و رودخانه‌های جاری در آن است به همین سبب از دیرباز رودخانه‌ها و نحوه استفاده از آب آن‌ها با اهمیت بوده است.

منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر بستر رودخانه بالهارود است که از کوه‌های آجارود سرچشمه می‌گیرد و با رسیدن به مرز حدود ۶۰ کیلومتر مرز مشترک دو کشور ایران و جمهوری آذربایجان را تشکیل می‌دهد و پس از طی این مسافت از خط مرزی گذشته و به دریاچه چاله محمود می‌ریزد؛ در رودخانه مذکور تغییرات در مسیر آب یا جابجایی آن و خصوصاً تغییر بستر آن به چشم می‌خورد به طوری که در سال‌های گذشته بر اثر فرسایش خاک حریم بالهارود، به تدریج و به‌طور طبیعی در ۹ نقطه از مسیر رودخانه، خط مرز به‌طور چشم‌گیری تغییر یافته و باعث شده است که زمین‌های کشاورزی عملاً از دسترس کشاورزان ایرانی به نفع کشور جمهوری آذربایجان، خارج شود و موجبات نگرانی کشاورزان ایرانی را فراهم آورده است؛ به طوری که سرپرست فرمانداری شهرستان گرمی از مذاکره مقام‌های ایران و جمهوری آذربایجان به منظور اصلاح انحراف رودخانه مرزی بالهارود و آزادسازی اراضی کشاورزی مرزنشینان خبر داده است. بنابراین مطالعه تغییرات مورفولوژی رودخانه مذکور به منظور اتخاذ راهکارهای کنترلی مناسب جهت حل مشکلات دینامیکی این رودخانه اهمیت زیادی دارد. چگونگی ایجاد حالت پیچان‌رودی در یک سیستم رودخانه‌ای و تفاوت‌های آن‌ها یکی از نکات مهم مورفولوژی و مهندسی رودخانه است. پیچان‌رودها متداول‌ترین الگو بر اساس شکل و پلان بستر در طبیعت هستند (Ritter et al, 2002). در هنگام تخلیه زیاد در آبراهه‌ها، گرداب‌های چرخنده‌ای درون آب به وجود می‌آید که سبب کاهش و افزایش پی‌درپی شدت جریان می‌شود. تحت این شرایط، جریان تندتر سبب فرسایش حوضچه‌ها شده و موجب کاهش سرعت متوسط جریان در آن‌ها می‌شود و با کم شدن شدت جریان، رسوب‌گذاری نسبی روی می‌دهد. با تکرار این حالت نوسان‌های جانبی جریان توسعه یافته و سبب گسترش پیچ‌وخم رودخانه می‌گردد. در مطالعات مختلف مربوط به الگوی پیچ‌وخم رودخانه‌ها از شاخص‌های ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی و شعاع خم‌ها استفاده می‌شود. به انحنا یا تغییر جهت مسیر رودخانه خم می‌گویند. ضریب خمیدگی یک رودخانه، نسبت طول رودخانه (در امتداد مرکز کانال یا خط القعر) به عمق دره است که رودخانه در آن جریان دارد. ویژگی‌های اصلی یک رودخانه مثانداری به شکل، اندازه و توسعه خم‌های آن وابسته است (گارد<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵). شکل زیر وضعیت رودخانه‌ها را بر اساس ضریب خمیدگی نشان می‌دهد. همچنین ضریب خمیدگی بیش از ۲ نیز نشان دهنده وضعیت پیچان‌رودی توسعه یافته است (پیتز، ۱۳۶۵). همچنین هرچه این مقدار به یک نزدیک باشد نشان دهنده فعال بودن منطقه از نظر تکتونیکی و نقش گسل در تعیین مسیر رودخانه است (زامولی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۵) شکل (۱).

۳- Garde

۴- Zamoliy



شکل (۱): وضعیت ضریب پیچشی رودخانه ها (تلوری، ۱۳۷۱)

زاویه مرکزی نیز معیاری برای تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه پیچان‌رودی یک رودخانه می‌باشد که نسبت بین شعاع خمیدگی و طول قوس جریان است که با استفاده از جدول (۱) می‌توان زاویه مرکزی قوس را اندازه‌گیری کرد (تلوری، ۱۳۷۱).

جدول (۱): میزان توسعه حالت پیچان‌رودی بر اساس زاویه مرکزی کورنیاس

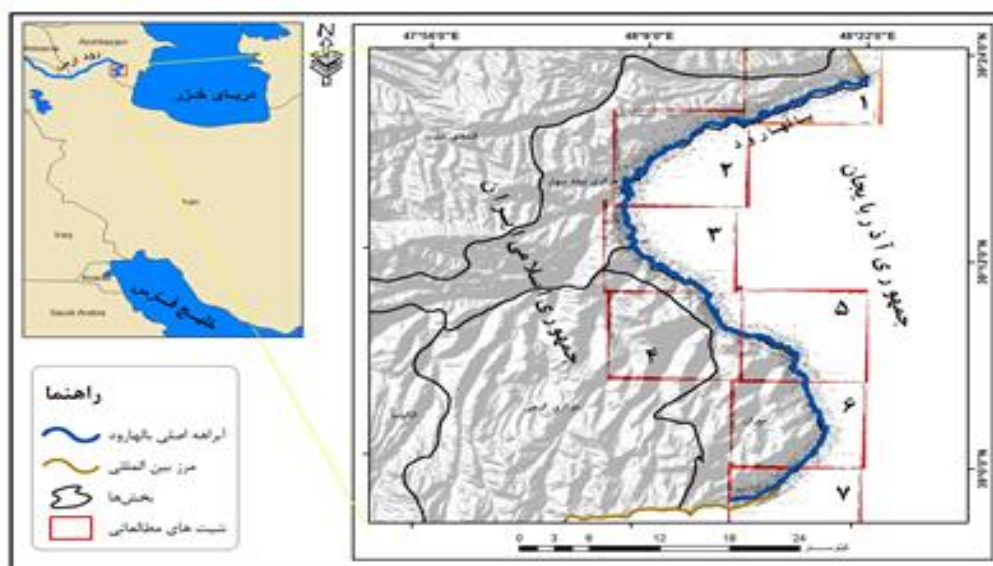
زاویه مرکزی (درجه)	شکل رودخانه
$41 >$	رودخانه شبه پیچان‌رود
۴۱-۸۵	رودخانه پیچان‌رود توسعه نیافته
۸۵-۱۵۸	رودخانه پیچان‌رود توسعه یافته
۱۵۸-۲۹۶	رودخانه بیش از حد توسعه یافته
بیش از ۲۹۶	رودخانه نعل اسبی

در زمینه مطالعات الگوهای رودخانه‌ای مطالعات مختلفی صورت گرفته است به‌عنوان مثال در تحقیقی عشقی و قنبرزاده (۱۳۹۳) سیستم‌های رودخانه‌ای را مورد مطالعه قرار داده و تأثیر مؤلفه‌های مختلف را در تغییر بستر و مسیر رودخانه بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که شکل هندسی رودخانه‌ها تحت تأثیر عواملی همچون مقاومت بستر رود و پوشش گیاهی به‌صورت مماندری درآمده و سپس با اتصال جانبی تغییر مسیر گسترده‌ای در آن به وقوع می‌پیوندد به‌عبارت‌دیگر نقش عوامل ژئومورفولوژیکی در شکل هندسی رودخانه‌ها بسیار مؤثر بوده و تغییر مسیر آن‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. همچنین فیروزی (۱۳۸۷) در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود با عنوان «مطالعه هیدروکلیمای حوضه آبخیز گرمی چای به‌منظور کنترل سیلاب» به بررسی ویژگی‌های هیدروکلیمایی یکی از زیر حوضه‌های بالهارود پرداخته و در نهایت تغییرات کاربری اراضی بستر رود را به‌عنوان عامل اصلی تغییر بستر رود معرفی نموده است. در تحقیقی دیگر تورنث<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) در رابطه با کانال‌های کوچک رودخانه‌ای در جنوب شرق اسپانیا، تأثیر عوامل مختلف در تغییر بستر و عرض کانال‌هایی با جریان کم را بررسی و اظهار کرد که در مجموع به‌طرف پایین‌دست این تغییرات پیوسته افزایش می‌یابد و هر چه به پایین‌دست رودخانه پیش می‌رویم میزان تغییرات بستر رود به واسطه مکانیسم ترسیب

بیشتر در این بخش، روند افزایشی دارد و به نظر می‌رسد به تأثیر عوامل زمین‌شناسی و بافت بستر و پوشش گیاهی در میزان تغییرات بستر توجه کمتری شده است که این عوامل نیز به‌عنوان عوامل تأثیرگذار باید بیشتر مورد توجه قرار می‌گرفت امری که در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفت تا با بررسی شاخص‌های هیدرومورفولوژی، جابه‌جایی بستر رود و تأثیر عوامل مذکور، تحلیل شده و مورد ارزیابی قرار گیرد. هوک<sup>۶</sup> و همکارانش (۲۰۱۴)، تغییرات در رودخانه‌های ماندیری را بررسی و سرعت جریان، عامل انسانی و بافت رسوبات بستر را به عنوان عوامل مهم در تغییر بستر این رودخانه‌ها معرفی کردند.

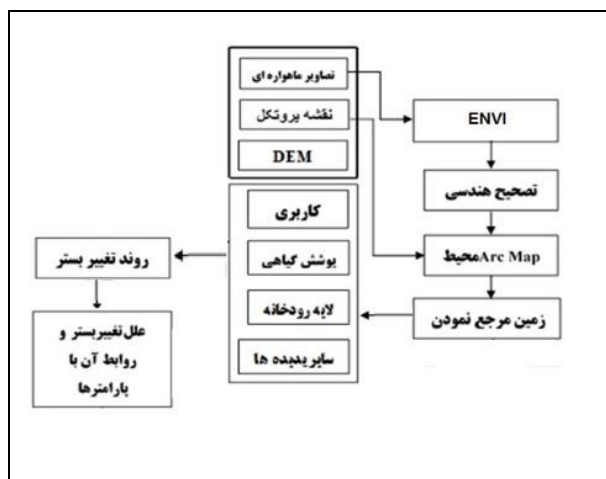
### روش تحقیق

حوضه آبخیز رودخانه بالهارود تقریباً به شکل بیضی بوده که به سمت شمال کشیدگی داشته و در شمال غربی شهرستان اردبیل واقع شده است و مساحت این حوضه ۱۴۸۸۰۰ هکتار است. حوضه آبخیز این رودخانه یکی از زیر حوضه‌های رودخانه ارس می‌باشد. حداقل ارتفاع حوضه از سطح دریای آزاد ۷۵ متر و حداکثر آن ۲۲۰۴ متر بر اساس نقشه ۱/۵۰۰۰۰ گسترده شده است. رودخانه اصلی بالهارود در قسمتی از مسیر خود به طول ۶۲/۵ کیلومتر تا شهر بیله سوار مرز جمهوری اسلامی ایران و جمهوری آذربایجان را تشکیل می‌دهد که از بیله سوار به بعد از کشور ایران خارج شده و وارد خاک آذربایجان می‌گردد. بستر رودخانه مذکور برای مطالعه دقیق‌تر در محیط نرم‌افزار Arc Map به پارسل‌هایی تقسیم گردید که در شکل (۲) دیده می‌شود.



شکل (۲): محدوده مورد مطالعه

بررسی دقیق الگوی پیچان رودی و مورفولوژیک رودخانه به عنوان پارامتری که می‌تواند منعکس کننده شرایط پویایی رودخانه و تغییرات ناشی از آن باشد در این مطالعه مدنظر قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از مطالعات مختلف خصوصیات هندسی و هیدرومورفولوژی رودخانه بالهارود در دو بازه زمانی (۱۳۳۴-۱۳۹۵) مورد مطالعه قرار گرفت. برای تطبیق روند مورفولوژی و تغییرات بستر رودخانه از تصاویر ماهواره‌ای ETM مربوط به سال ۱۳۹۵ و نقشه‌های پروتکل ۱/۲۵۰۰۰ رودخانه بالهارود به سال ۱۳۳۴ به عنوان دو بازه زمانی برای مقایسه روند تغییر مورفولوژیک رودخانه استفاده شد و الگوی پیچان رودی با استفاده از شاخص‌های ضریب سینوسیته (خمیدگی)، زاویه مرکزی و شعاع خمیدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. در مطالعات ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ENVI، ترکیب رنگ طبیعی از باندهای تصاویر ماهواره‌ای ایجاد شد و پس از اعمال تصحیح خطاهای اتمسفری، تصاویر مطلوب‌تری تهیه گشت و مسیر رودخانه در هر دو بازه استخراج و با یکدیگر برآزش داده شدند و در ادامه، پیچان رودها استخراج و کدگذاری شدند تا شاخص‌های هندسی و آماری آن‌ها محاسبه شود. در این خصوص تحلیل تصاویر ماهواره‌ای همراه با بازدیدهای میدانی و برداشت و کنترل زمینی جهت تدقیق اطلاعات، انجام گرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار Auto Cad به صورت گرافیکی، پارامترهای هندسی رودخانه شامل دایره محاط بر پیچان رود شکل (۳)، طول موج خم‌ها، ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی قوس‌ها و طول دره برای هر دو بازه زمانی به تفکیک شیت‌های مطالعاتی شکل (۲)، محاسبه شدند تا الگوی مسیر رودخانه تعیین گردد که بر این اساس رودخانه‌های "پیچان رودی شدید" با بیشترین پتانسیل تغییر بستر و رودهای با مورفولوژی "مستقیم" دارای کمترین میزان پتانسیل تغییر هستند. در شکل (۳) روند کلی مربوط به روش کار نشان داده شده است.



شکل (۳): مدل مفهومی مراحل انجام تحقیق

## نتایج

نتایج تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزاری Arc Map به تفکیک هر شیت به شرح زیر می‌باشد:  
ضریب خمیدگی (سینوسیته):

بر اساس این ضریب که نشان دهنده میزان توسعه پیچان رودی در مسیر رودخانه است (بیدنهارن<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۰)، انواع الگوی رودخانه برای هریک از شیت های مطالعاتی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): تعداد هریک از الگوهای خم های بالهارود بر اساس ضریب سینوسیته

سال ۱۳۳۴									سال ۱۳۹۵									
درصد	مجموع	شیت ۷	شیت ۶	شیت ۵	شیت ۴	شیت ۳	شیت ۲	شیت ۱	درصد	مجموع	شیت ۷	شیت ۶	شیت ۵	شیت ۴	شیت ۳	شیت ۲	شیت ۱	انواع الگوی خم ها
۱,۶۹	۱۰	۰	۳	۱	۰	۴	۲	۱	۱/۹۸	۱۷	۳	۰	۰	۰	۷	۰	۷	مستقیم
۶۹,۲۰	۴۰۹	۲۰	۳۱	۶۸	۲۹	۷۸	۱۰۸	۷۵	۵۲/۰۴	۴۴۶	۷۱	۷۰	۴۹	۳۱	۸۸	۷۵	۶۲	سینوسی
۲۷,۹۱	۱۶۵	۱۲	۵۶	۱۸	۸	۳۲	۲۴	۱۵	۴۵/۹۷	۳۹۴	۳۶	۸۷	۴۹	۲۷	۶۸	۱۰۱	۲۶	پیچان رودی
۱,۱۸	۷	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	پیچان رودی شدید
۱۰۰	۵۹۱	۳۲	۹۰	۸۷	۳۸	۱۱۵	۱۳۴	۹۵	۱۰۰	۸۵۷	۱۱۰	۱۵۷	۹۸	۵۸	۱۶۳	۱۷۶	۹۵	مجموع

مقادیر نسبتا یکسان ضریب خمیدگی در کل بازه، مؤید وجود قوس های تقریبا مشابه در طول مسیر رودخانه است که این مطلب نشان دهنده این است که در مقیاس هندسه فراکتالی خودمتشابه هستند. به عبارتی در این رودخانه ضریب خمیدگی در مسیرهای منحنی ای که طولانی تر هستند، کمتر از سینوسیته مسیرهای منحنی کوتاه تر است (بارتولد<sup>۸</sup>، ۲۰۰۲). با توجه به جدول (۲) تعداد خم های رودخانه صرف نظر از نوع آنها (مستقیم، سینوسی، پیچان رودی و پیچان رودی شدید) افزایش یافته است به طوری که از تعداد ۵۹۱ خم در سال ۱۳۳۴ به ۸۵۷ عدد در سال ۱۳۹۵ رسیده که بیانگر تغییر شدید مورفولوژی رودخانه به سمت افزایش میزان خمیدگی (پیچان رودی شدن) در کل رودخانه می باشد.

نکته ای که حائز اهمیت است از بین رفتن خم هایی با حالت پیچان رودی شدید است به طوری که از تعداد ۷ عدد از این نوع پیچان رود در سال ۱۳۳۴، امروزه این نوع پیچان رود دیگر دیده نمی شود به نظر می رسد که با گسترش بیش از پیش این پیچان رودها و تبدیل آنها به دریاچه های نعل اسبی<sup>۹</sup> و بازگشت به مسیر مستقیم ابتدایی دیگر امروزه این نوع پیچان رود وجود ندارد اما آثار قطع شدگی آنها که از ویژگی های مهم رودخانه های پیچان رودی می باشد (سلبی<sup>۱۰</sup>، ۱۹۹۰) در بستر رودخانه ها قابل مشاهده باشد که این خود تاییدی بر تغییر مورفولوژیک بالای این رودخانه است که در شکل (۴) این حالت دیده می شود.

۷ - Biedenharn

۸ - Bartholdy

۹ - Ox Bow

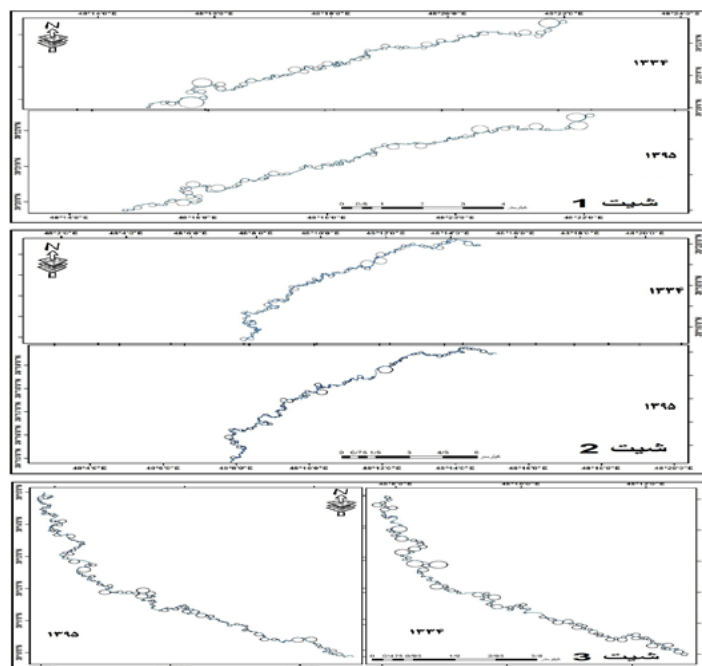
۱۰ - Selby



شکل (۴): احداث جاده خاکی در بستر خشک شده پیچان رود

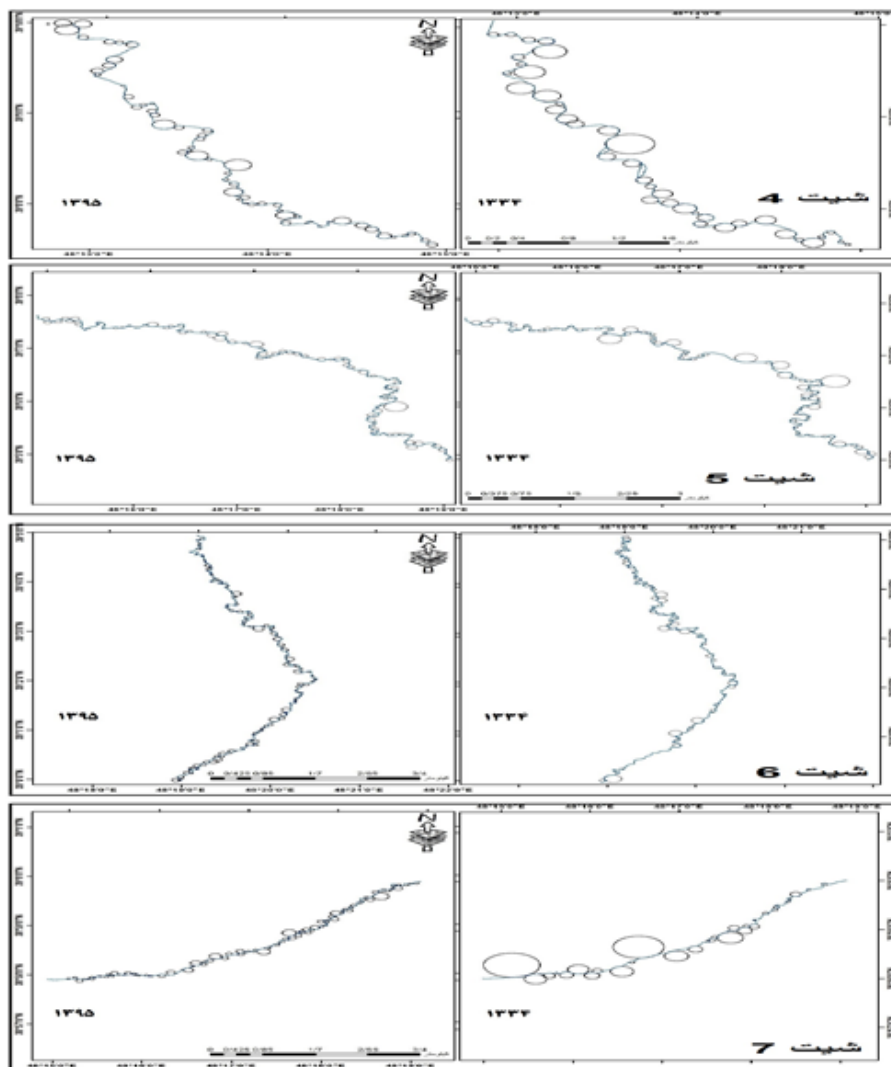
شعاع خمیدگی:

به منظور تعیین شعاع قوس‌های پیچان رودی بعد از اینکه مسیر رودخانه ترسیم گردید، بر هر یک از قوس‌های رودخانه دوایری برازش داده می‌شود که بیشترین و بهترین تطابق را با قوس داشته باشد. بعد از ترسیم دوایر، شعاع خمیدگی به دست می‌آید (یمانی و شرفی، ۱۳۹۱). که با ترسیم این دوایر منطبق با مسیر آبراهه‌های پیچ‌وخم دار می‌توان این ضریب را به دست آورد (ماکاسکی<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹) ترسیم این دوایر در محیط نرم‌افزار اتوکد انجام گرفت که در اشکال (۵) و (۶) دیده می‌شود و میانگین آن برای هریک از شیت‌ها به تفکیک سال در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل (۵): دوایر برازش شده بر قوس‌های خمیدگی شیت‌های ۱، ۲ و ۳ به تفکیک سال





شکل (۶): دواپر برازش شده بر قوس‌های خمیدگی شیت‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ به تفکیک سال

جدول (۳): مقادیر میانگین شعاع خمیدگی به تفکیک سال و شیت

میانگین	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شیت سال
۶۴/۲	۱۰۳/۶۲	۳۶/۹۱	۴۷/۵۱	۶۷/۸۶	۶۵/۱	۶۵/۴	۶۳/۰۱	۱۳۳۴
۴۱/۴	۳۶/۷	۲۷/۱۸	۴۰/۵۷	۴۰/۴	۴۰/۸۸	۴۴/۹۶	۵۹/۱۳	۱۳۹۵

با توجه به اینکه هر چه شعاع دایره مماس بر خم رودخانه کوچکتر باشد خم رودخانه پیچان رودی تر می‌شود، پایین بودن میانگین شعاع قوس‌ها در سال ۹۵ نسبت به سال ۳۴ نشان‌دهنده تغییر مورفولوژی رودخانه بالهارود به حالت پیچان‌رودی است. این شاخص برای سال ۱۳۳۴ نشان‌دهنده حالت پیچان‌رودی تر بخش پایاب (آبریز) یعنی شیت‌های ۱ و ۲ نسبت به سراب (آبخیز) یعنی شیت‌های ۷ و ۶، و برعکس این حالت برای سال ۱۳۹۵ است؛ که عوامل مختلفی می‌تواند در بروز این حالت دخیل باشد به‌طور مثال می‌توان به تغییر شرایط اقلیمی و تکتونیکی اشاره کرد، در زمان حاضر این رودخانه در فصول پرآبی باریکه آبی بیش نیست که خشک شدن آن در فصول خشک سال، باعث می‌شود که این رودخانه در مسیرهای منتهی به خروجی حوضه جریان نداشته باشد و این عامل سبب عدم وجود رودخانه به‌عنوان عامل دینامیکی تغییر شکل بستر می‌شود و به همین دلیل برای سال ۱۳۹۵ مقادیر شعاع خمیدگی برای این بخش از بستر بیشتر از مقادیر آن برای بخش‌های سراب حوضه به‌دست‌آمده است و یا از طرف دیگر فعال شدن فعالیت تکتونیکی بعد از سال ۱۳۳۴ در بخش‌های سراب حوضه باعث اثرگذاری در تغییرمسیرهای جانبی رودخانه شده و به‌صورت مزید بر این علت عمل کرده است. به‌طوری‌که در سال ۱۳۳۴ مقادیر شعاع خمیدگی نشان می‌دهد که بخش‌های پایاب حوضه پیچان‌رودی تر از بخش‌های سراب بوده است.

#### زاویه مرکزی کورنیاس:

برای رودخانه بالهارود میزان زاویه مرکزی برای هر شیت در جدول (۴) نشان داده‌شده که گویای افزایش چشمگیر تعداد شبه پیچان‌رودهای توسعه‌یافته است. این روند به‌طور مثال در شیت شماره ۲ به‌خوبی خود را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که تعداد شبه پیچان‌رود توسعه‌نیافته کاهش یافته و در عوض شبه پیچان‌رودهای توسعه‌یافته به‌صورت چشمگیری (از ۲۴ عدد به ۱۰۱ عدد) افزایش یافته است. به‌عبارت‌دیگر شبه پیچان‌رودهای توسعه‌نیافته تبدیل به حالت توسعه‌یافته شده‌اند.

جدول (۴): مقادیر زاویه مرکزی خم‌های بالهارود

سال ۱۳۳۴								سال ۱۳۹۵								
حالت خم	شیت ۱	شیت ۲	شیت ۳	شیت ۴	شیت ۵	شیت ۶	شیت ۷	مجموع	شیت ۱	شیت ۲	شیت ۳	شیت ۴	شیت ۵	شیت ۶	شیت ۷	مجموع
شبه پیچان‌رود توسعه یافته	۱	۲	۴	۰	۰	۲	۰	۱۰	۷۴	۱۰۸	۷۸	۲۹	۶۷	۳۱	۲۰	۴۰۸
شبه پیچان‌رود توسعه یافته	۱۵	۲۴	۳۲	۸	۱۸	۵۶	۱۲	۱۶۵	۱۵	۲۴	۳۲	۸	۱۸	۵۶	۱۲	۱۶۵
شبه پیچان‌رود خیلی توسعه یافته	۵	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نعل اسبی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

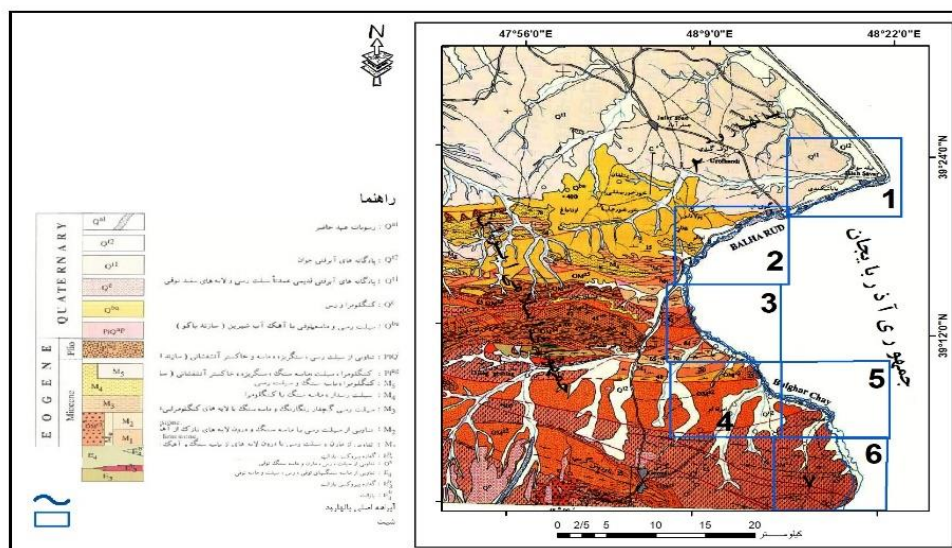
#### نتیجه‌گیری

بحث در مورد سیستم‌های رودخانه‌ای می‌تواند بسیار پیچیده باشد به همین دلیل در تحلیل‌ها بایستی هم بر ارتباط با لیتولوژی و هم بر توان رودخانه توجه شود. چنانچه یکی از اقدامات مهم در این زمینه، تلاش در جهت

یافتن یک ارتباط قوی بین رفتار هیدرولوژیکی با ساختار زمین‌شناسی و استفاده از این ارتباط با اهداف مختلف در تحقیقات بوده است.

#### لیتولوژی و تغییر بستر

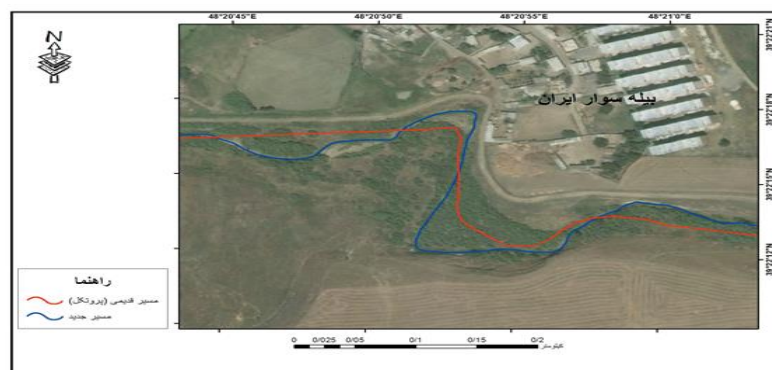
یکی از عوامل مهم در میزان فرسایش‌پذیری بستر و کناره‌های رودخانه، جنس طبقات زمین است. سازندهای واقع در کناره‌های مسیر بالهارود عمدتاً شامل سازندهای جوان کواترنری و نهشته‌های آبرفتی شامل مارن‌ها، پادگانه‌های کهن و جوان است که فرسایش عمیق و خندقی و نیز لغزش‌های شایع در این سازند سبب شده که رودخانه در این بازه‌ها از ناپایداری بالایی برخوردار باشد. این حالت به‌جز در بخش سراب حوضه (شیت‌های ۷، ۶ و ۵) که منطقه‌ای نسبتاً کوهستانی است، در کل بستر رودخانه قابل‌مشاهده است. در بازه کوهستانی، لیتولوژی عمده، شامل سنگ‌های آذرین و آذر آوری ائوسن به همراه طبقات (رسوبی شیلی و ماسه‌سنگی است مورفولوژی رودخانه و پیچان‌رودی آن تحت تاثیر عوامل زمین‌ساختی و زمین‌شناختی قرار دارد. در میان حلقه‌های متاندر این بخش، تعدادی از حلقه‌ها اندازه بسیار بزرگ نشان می‌دهند شکل (۶). این حلقه‌های بزرگ متاندر در مناطقی که سازندهای زمین‌شناسی از مقاومت بالایی برخوردارند تشکیل می‌شوند (معماریان، ۱۳۷۴) که می‌توان در این خصوص به دواير شیت‌های ۳ و ۴ اشاره کرد که به دلیل سازند کنگلومرا ( $OM^{cl}$ ) و گدازه پروکسن بازالت ( $E^b_3$ ) حلقه‌های متاندر اندازه بسیار بزرگی دارند شکل (۶). در تایید این نکته می‌توان اشاره کرد به مطالعات انجام‌گرفته توسط فیروزی (۱۳۸۷) بر روی رودخانه بالهارود در قسمت مورد مطالعه که مؤید این نکته است که در مقاطع با کناره‌های مقاوم به فرسایش، فرسایش بستر تاثیر کرده و رودخانه بستری عمیق و کم‌عرض پیدا کرده است. در مورد مقطعی که کناره‌های فرسایش‌پذیر داشته باشند، بستر عریض و کم‌عمق می‌باشد.



شکل (۷): نقشه زمین‌شناسی ورقه مغان ۱:۱۰۰۰۰۰

## سرعت آب (توان) و تغییر بستر

تغییرات توان رودخانه‌ای و فرآیند متوالی کاوش و تراکم بار در مسیر کانال رودخانه که به نحوی ناشی از تغییرات شیب و اثر جریان‌های فرعی است، سبب تغییر جهت ناگهانی رودخانه شده و الگوی هندسی جریان رودخانه را بر هم زده و سبب پخش وسیع آب و یا انحراف آن در یک مقطع رودخانه شده است. این حالت به خوبی در محل دشت سیلابی دیده می‌شود شکل (۷). در مواقعی که میزان بارها افزایش چشم‌گیر نشان می‌دهد سبب چندشاخگی رودخانه و یا شریانی شدن آن گردیده است شکل (۸).



شکل (۷): برهم خوردن الگوی هندسی رودخانه



شکل (۸): الگوی شریانی در حال توسعه

با بررسی پارامترهای مذکور در این تحقیق می‌توان گفت که رودخانه بالهارود یک رودخانه پیچان‌رود نسبتاً توسعه‌یافته است. نتایج نشان داد که میزان تغییرات مورفولوژیک رودخانه بسیار بالاست و مجموع عواملی مانند: ماهیت خشکی اقلیم، پوشش گیاهی، بافت سست بستر، اقدامات تخریبی انسان و غیره در روند تغییر بستر دخیل هستند به طوری که بیشتر تغییرات در محدوده مناطق مسکونی و با پوشش گیاهی فقیرتر رخ داده است و

باعث تغییر بستر رودخانه می‌شود و این عامل باعث از دسترس خارج شدن زمین‌های هر دو کشور ایران و آذربایجان به نفع طرف مقابل می‌شود که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده حدود ۱۴۸/۵ هکتار از خاک‌های سرزمینی ایران به نفع جمهوری آذربایجان و همچنین حدود ۱۰۴/۹ هکتار از خاک جمهوری آذربایجان به نفع ایران، از دسترس این کشورها خارج شده است که در این بین سهم ایران بیشتر است و از طرف دیگر با توجه به اینکه بیشتر این زمین‌ها، شامل زمین‌های کشاورزی و زراعی بوده که مردم از آن برای امرامعاش استفاده می‌کردند، موجبات نارضایتی و اعتراض کشاورزان ایرانی شده که لازم است در این خصوص مذاکرات با طرف‌های مقابل هر چه سریع‌تر انجام گیرد. مقادیر زاویه مرکزی و ضریب خمیدگی نشان می‌دهد که در کل بازه، تغییرات ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی (به‌جز نسبت اندک در برخی مناطق) در یک دامنه محدود مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وجود قوس‌های تقریباً مشابه در طول مسیر رودخانه است.

با توجه به مرتفع و کوهستانی بودن حوضه، بسیاری از نزولات جوی به‌صورت برف نزول می‌کند که در برخی سال‌ها، برف تا اواخر فصل گرم هم دوام می‌آورد که از مهم‌ترین منشأ تأمین آب رودخانه محسوب می‌شود و آبدهی رودخانه را در یک سیکل زمانی ۱۲ ماهه تنظیم می‌کند. با ذکر این توضیحات مشخص می‌شود که نوسان مقدار دبی در حوضه کاملاً در ارتباط با بارش و دما است به‌گونه‌ای که می‌توان گفت در فصل بهار عوامل درجه حرارت و بارش، تنظیم‌کننده جریان رودخانه‌ای هستند از طرفی ماهیت خشک و نیمه خشک حوضه سبب می‌شود در هنگام بروز بارش‌های طغیانی جریان‌ات سیلابی در منطقه رخ دهد؛ که یکی از عوامل کاوشی بستر رودخانه محسوب می‌شود.

برداشت بی‌رویه علوفه از مراتع برای تغذیه دام و طیور در فصل سرد و چرای زودرس در فصل بهار باعث شده چهره پوشش گیاهی کم تراکم شود و با شروع بارندگی، جریان‌های انتقال آب سریعاً شروع به فعالیت می‌کنند که بر مورفولوژی رودخانه تأثیر مستقیم می‌گذارد که بر تغییر رفتاری و بستر و مورفولوژی مجرا منجر می‌گردد. در بخش‌هایی از مسیر رود که شیب بسیار کمی دارد سرریز شدن رودها از محل قوس‌های پیچان‌رودی در مواقع سیلابی شدن رود، به تغییر مسیر آن‌ها منجر می‌شود.

به‌طور کلی شرایط مناسب برای فرسایش ساحلی از جمله فقر پوشش گیاهی، بافت ریزدانه، شیب کم و غیره سبب ایجاد شرایط مناسب برای تغییرات مورفولوژیکی رودخانه بالهارود شده است.

روند فرسایش تاکنون در جهان به‌صورت مدل ریاضی درنیامده است و پی بردن به اینکه فرسایش بعدی در کجا و در چه مقطعی به وقوع خواهد پیوست جز با مطالعه رفتار طولانی‌مدت رودخانه از طریق تفسیر عکس‌های هوایی در مقاطع زمانی مختلف و جمع‌آوری اطلاعات محلی از طریق افراد ذیصلاح بومی امکان‌پذیر نمی‌باشد. ساختن مدل فیزیکی رودخانه در مقطعی که در معرض تخریب بیشتر قرار دارند نیز می‌تواند اطلاعاتی کیفی به ما بدهد، با علم به این مطالب گفتنی است که تاکنون راه‌حل‌های شناخته‌شده جهانی جهت جلوگیری از فرسایش دیواره‌ها عبارت‌اند از: تثبیت سواحل و کانالیزه کردن.

در پایان ذکر این نکته در مورد تحقیق حاضر و همچنین برای همه مطالعاتی که با اهداف آبخیزداری و مدیریت منابع آب‌و خاک انجام می‌شوند ضروری است و آن‌هم اینکه، آنچه مسلم است پایدارسازی و از سوی اصلاح مسیر بستر و تقویت گونه‌های گیاهی سازگار و اصلاح شیوه‌های کشت و آبیاری و جلوگیری از دست‌کاری‌های

مخرب بشر و استفاده از سازه‌های انسان‌ساخت حفاظتی، راهکارهای اجرایی چندمنظوره خواهند بود که هر یک مطالعات جداگانه و مفصلی را می‌طلبد. در این میان، تعیین حریم برای تمرکز فعالیت‌های کشاورزان و مردم محلی و توجه به اولویت‌های مطالعاتی، سریع‌ترین و کوتاه‌مدت‌ترین راهکار اجرایی برای نیل به اهداف مدیریتی به شمار می‌رود.

### منابع

- احمدی، لیلا، (۱۳۹۳)، *ارزیابی فرسایش و رسوب در حوضه شیراز با روش بی‌ثباتی (پایان‌نامه کارشناسی ارشد)*، دانشگاه شیراز، ص ۳۰.
- بیاتی خطیبی، مریم. مجید زاهدی، (۱۳۸۷)، *هیدرولوژی*، انتشارات سمت، تهران.
- تلوری، عبدالرسول، (۱۳۷۱)، *شناخت فرسایش کناری رودخانه در دشت های رسوبی*، موسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع، ص ۲۸.
- عشقی، ابوالفضل، هادی قنبرزاده، (۱۳۹۳)، *ویژگی‌های جغرافیایی آسیای میانه و قزاقستان*، نشر نیما، ۴۳.
- فیروزی، داور، (۱۳۸۷)، *مطالعه هیدروکلیمای حوضه آبخیز گرمی چای به منظور کنترل سیلاب (پایان‌نامه کارشناسی ارشد)*، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل.
- معماریان، حسین، (۱۳۷۴)، *زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک*، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، ۹۵۳.
- نوحه‌گر، احمد، مجتبی یمانی، (۱۳۸۴)، *بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب*، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، ۵۱: ۸۵-۶۵.
- یمانی، مجتبی، سیامک شرفی، (۱۳۹۱)، *پارامترهای هندسی و نقش آن‌ها در تغییرات زمانی و مکانی بستر رودها مطالعه موردی رودخانه هرود سرشاخه رود کرخه در استان کردستان*، مجله جغرافیا و توسعه، ۲۶.
- Bartholdy, j., and Billi, p., (2002) **Morph dynamics of a pseudo meandering gravel bar reach**. *Geomorphology*. Vol: 42 . : 293-310.
- Biedenharn D.S., Elliot, C.M. and Watson, C.C (2010). **The WES stream investigation and stream bank stabilization handbook**. US. Army Engineering. P 286.
- Breach, J. S., (Translated by: Rezaei moghaddam, M. and Saghafi, M.), (2008), **Rivers and floodplains, Vol. 1: Processes and dynamic**, Ministry of culture and Islamic Guidance press *Geomorphologie*, Supplementband 36:233–244.
- Edgardo, M. L., (2008), **Patterns of Anabranching Channels: The Ultimate End-Member Adjustment of Mega Rivers**, *Geomorphology*:130-145.
- Garde, r.j, (2005), **River morphology**, published by new age intemational (p) ltd. P: 209-211.
- Hooke, J.M, (2014), **complexity self – organization and variation in Behaviour in meandering rivers**, *geomorphology* 91: 236-258.

- Huggett, R. J., (2007), **Fundamentals of Geomorphology, 2<sup>th</sup> Ed, Rutledge Publication.**
- Luchi, R, Hooke, JM, Zolezzi, G, Bertoldi, W, (2010), **widthvariations and mid-channel bar inception in meanders: river Bollin (UK)**, *Geomorphology* 119: 1-8.
- Makaske bart, derald g, smith, (2009), **hydraulic and sedimentary processes causing anastomosing morphology of the upper Colombia river**, *geomorphology* vol: 111: 194- 205.
- Petts, G,E. et al, (1986), **historical changes in large Alluvial River**, John Wiley & Sons, USA.
- Ritter, F. D., Kochel, C. & Mill, R. J., (2002), **Process Geomorphology, 4th Ed, McGraw-Hill**, New York.
- Selby, M.J, (1990), **Earth changing surface**, Oxford University Publication.
- Thornes, J. B. (2013), **Structural instability and ephemeral channel behavior.** *Zeitschrift fur.*
- Zamoliy, A, Szekey, B, Drganits, E, Timar, G, (2015), **neotectonic control on river sinuosity at the western margin of the little hongarian plain**, *Geomorphology* 122: 231-243.