پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال هفتم، شماره ۴، بهار ۱۳۹۸
صص. ۳۰-۱۵

بررسی پیچان‌رودهای قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان-زنجان

رضا خوش‌رفتار*- استادیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان.
اصغر احمدی ترکمانای- مربی زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور.
مهدی فیض‌الله پور - استادیار ژئومورفولوژی جغرافیا، دانشگاه زنجان.
نسرین حامدی- دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه زنجان.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۲ تائید نهایی: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

چکیده

تغییرات الگوی رودخانه، یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی رودخانه است که فعالیت‌ها و سازه‌های عمرانی را در حاشیه رودخانه‌ها تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعه تغییرات مورفولوژیکی کانال‌های رودخانه‌ای به‌منظور راهکارهای کنترلی مناسب جهت حل مشکلات دینامیکی این نواحی، اهمیت دارد. در این پژوهش ۹۱ کیلومتر از مسیر رودخانه قزل‌اوزن در شهرستان ماه‌نشان موردبررسی قرارگرفته است. هدف اصلی این مقاله بررسی پیچان‌رودهای قزل‌اوزن در محدوده‌ی ماه‌نشان، از طریق به‌کارگیری شاخص‌های هندسی و تصاویر ماهواره‌ای است. جهت دست‌یابی به این هدف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای IRS باقدرت تفکیک ۲/۵ متر و تصاویر گوگل ارث در محیط، GIS، Auto CAD و Global Mapper اقدام به محاسبه و اندازه‌گیری پارامترهای هندسی رودخانه شده است. با رقومی سازی مسیر رودخانه، شاخص‌های هندسی رود (زاویه مرکزی، شعاع نسبی، شکل پلان، ضریب پیچشی)، محاسبه شد و سپس علل تغییرات با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، داده‌های هیدرولوژیکی و روش میدانی موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد:۱ رودخانه به‌طور میانگین در هر چهار دوره از انحنای قوس‌های خود کاسته است. همچنین تعداد قوس‌ها در سال ۱۳۷۳ نسبت به سال ۱۳۹۴ افزایش چشمگیری داشته است.

واژگان کلیدی: رودخانه قزل‌اوزن، ضریب خمیدگی، مئاندر، تغییرات فرم، ماه‌نشان.

* نویسنده مسئول: E-mail: khoshraftar@znu.ac.ir

مقدمه

ازنظر تاریخی مسیر رودخانه‌ها، جزء اولین اشکال جغرافیایی هستند که روی نقشه نمایش داده‌شده‌اند. نمایش یک رودخانه از نمای بالا، پلانفرم کانال گفته می‌شود. درواقع پلانفرم، بیان‌کننده خلاصه‌ای از جریان، ماهیت و توزیع فرایندهای فیزیکی در انواع مختلف رودها و نشان‌دهنده شکل کانال و دشت سیلابی است. پلانفرم کانال، راهنمای اولیه خوبی جهت تعیین مورفولوژی و تغییرات شکل کانال در رودهای آبرفتی می‌باشد [حسین زاده و اسماعیلی،۱۳۹۴، ۲۳۵]. بررسی الگوی مورفولوژیکی رودخانه‌ها برای درک شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی آن‌ها در آینده ضروری بوده و تنها از این طریق می‌توان عکس‌العمل طبیعی آن‌ها را نسبت به تغییرات طبیعی و یا اقدامات ناشی از اجرای طرح‌های اصلاح مسیر و تثبیت کناره‌ها پیش‌بینی نمود و میزان جابجایی، تغییرات ابعاد و الگوی آن‌ها را تشخیص داد. یکی از موضوعات مهم در ژئومرفولوژی توجه به تغییراتی است که در شکل و الگوی کانال‌های جریانی و در طول مسیر آن‌ها به وقوع می‌پیوندد و ممکن است سبب متروک شدن بخشی از دیواره کانال یا پیوستن بعضی فضاهای متروک کانال‌ها به فضای اصلی شود [یمانی و حسین زاده، ۱۳۸۳، ۱۴۵ به نقل از تلوری، ۱۳۷۳]. مورفولوژی رودخانه به فاکتورهای متعددی چون تغییرات جریان آب، شیب بستر، سطح مقطع رودخانه، زمین‌شناسی منطقه، تکتونیک یا مورفوتکتونیک منطقه و نیز زمان لازم برای شکل‌گیری و تغییر شکل رودخانه، بستگی دارد [رضائی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱، ۲]. با بررسی و شناخت دقیق این عوامل می‌توان الگوی رفتاری صحیح رود را به دست آورد و به واکنش طبیعی و تغییرات احتمالی رودخانه پی‌برد [احمدی، ۱۳۸۵، ۲۲۱]. کانال رودهای آبرفتی می‌توانند انواع مختلفی از الگوها را داشته باشند که شامل الگوی مستقیم، مئاندری، گیسویی (شریانی)، مجاری به‌هم‌پیوسته (آناستوموسینگو آنابرنچینگ) است. رودهای مئاندری و مستقیم جزء رودخانه‌های تک مجرایی هستند یعنی رود تنها یک مسیر جریان دارد و ممکن است پشته میانی تقسیم‌شده باشد اما در الگوی چند مجرایی مانند رودخانه‌های گیسویی و رودخانه دارای چندین کانال و مجرا است که در اطراف پشته‌های ماسه‌ای توسعه پیداکرده‌اند. یک رود می‌تواند دارای الگوهای متفاوتی از بالادست تا پایین‌دست باشد [رضائی مقدم و همکاران، ۱۳۹۴، ۳۰۰]. مئاندرها ازجمله چشم‌اندازهای بسیار زیبا در حوضه زهکشی هستند که در اثر عوامل مختلف تشکیل می‌گردد. حضور این چشم‌اندازها در مسیر رودها از دبی بالا در یک مقطع زمانی خاص حکایت می‌کنند. در واقع حضور آن‌ها پتانسیل بالای رودها را برای وقوع حداکثر، نشان می‌دهند. این مئاندرها از اشکال مهم ژئومورفولوژیکی_ هیدرولوژیکی‌اند و به لحاظ جابه‌جایی‌های مکانی که در محدوده دشت‌های سیلابی انجام می‌دهند، موجب تغییر ابعاد مورفولوژیکی بستر جریان رودخانه‌ها و دشت سیلابی می‌گردند. این پدیده به علت پویایی زیادی که دارند، مسائل و مشکلات عمده‌ای را نیز در محدوده‌های تشکیل به‌وجود می‌آورند. با بررسی مشخصه‌های رفتار این پدیده با توجه به ویژگی‌های محل تشکیل، می‌توان رفتار آن‌ها را پیش‌بینی و تا حدی هم از بروز بسیاری از مشکلات جلوگیری و یا دست‌کم تدابیری را برای کاهش مشکلات احتمالی اتخاذ کرد [بیاتی خطیبی، ۱۳۹۰، ۲].

در بسیاری از مناطق جهان، پژوهش‌های فراوانی بر روی پدیده مئاندری شدن رودها انجام‌شده و بیش از ۳۰ نظریه درباره روند مئاندری شدن رودخانه‌ها بیان‌شده است؛ اما به‌دلیل پیچیدگی فرایندهای متفاوت حاکم بر پدیده مئاندری شدن که ناشی از تفاوت در ویژگی‌هایی مانند زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، مورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، پوشش گیاهی و اقلیمی، فیزیوگرافی و بسیاری از عوامل شناخته‌شده یا ناشناخته دیگر است، کاربرد نتایج ارائه‌شده با محدودیت‌های جدی روبه‌رو شده است [مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹، ۲۷۶]. واژه مئاندر از نام رودخانه مئاندر[1] که سرچشمه آن در کشور ترکیه است و به دریای اژه می‌ریزد، گرفته‌شده است. این رودخانه درگذشته به‌خاطر مسیرهای پرپیچ‌وخمش مشهور بوده است [یمانی و فخری، ۱۳۹۱، ۱۴۲]. این خم‌ها (پیچان‌ها) در اثر حرکت افقی رود به وجود آمده‌اند و خود

[1]-Maeander

باعث تغییراتی در مسیر رود می‌شوند. درواقع در این رودخانه‌ها بررسی رفتار و نوع تغییر شکل پیچان‌رودها، روشی برای دستیابی به تغییرات آتی در شکل رودها خواهد بود. پیچان‌ها را می‌توان به شکل سینوسی، منظم یا فشرده، بسیار نامنظم، مچاله شده و حتی دیگر اشکال مشاهده نمود. شکل پیچان تابع خصوصیاتی نظیر شیب جریان، عرض رودخانه، جنس مصالح بستر و میزان جریان است [رضائی مقدم وهمکاران، ۱۳۹۱، ۸۶]. ویژگی‌های اصلی و فعالیت یک رود مئاندری به شکل، اندازه و فراوانی تغییرپذیری حلقه‌های مئاندر وابسته است. این ویژگی‌ها نقش مهمی بر فعالیت‌های انسانی استقراریافته در سواحل آن‌ها و نیز طراحی و نگهداری سازه‌های هیدرولیک مانند پل‌ها و سدها دارند [یمانی و فخری، ۱۳۹۴، ۱۴۲]. این پدیده منجر به تخریب سواحل و تداوم فرسایش کناری توأم با مهاجرت حلقه‌های پیچان‌رودی می‌شود. براثر این تغییرات، اراضی کشاورزی، تأسیسات ساحلی، پل‌ها و اماکن عمومی آسیب‌دیده و تخریب می‌گردند [رفاهی، ۱۳۸۲، ۵۸۷].

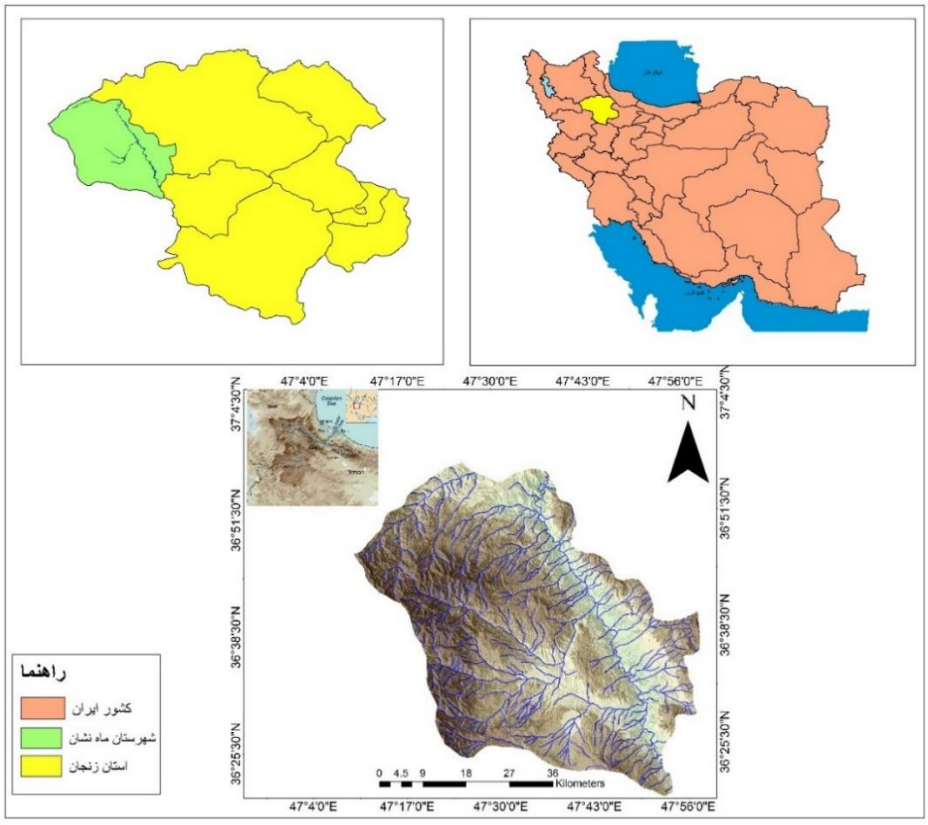
تایمر[1] (۲۰۰۳) با بررسی روش‌های کنترل تغییرات پیچان‌رودی بر روی رودخانه تیس زا[2] نتیجه گرفت که پیچان‌رودی شدن رودخانه به‌شدت تحت تأثیر موقعیت گسل‌ها و فرونشست‌های غیرعادی است. هوک[3] و همکاران (۲۰۰۷) تغییرات و پیچیدگی در رودخانه‌های مئاندری را بررسی کردند. واسلی[4] و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی رسوبات در جلگه ساحلی و تأثیر آن‌ها در جابجایی مئاندرهای رودخانه‌ای پرداخته‌اند. همچنین تایرن[5] و همکاران (۲۰۰۹)، تجزیه‌وتحلیل کمی از رسوبات و ارتباط آن با دبی دریکی از پیچان‌رودی‌های سطح دلتای دانوب انجام دادند. لاچی[6] و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی تغییرات عرضی رودخانه مئاندری و ارتباط آن با تغییرات توپوگرافی بستر در رودخانه بولین انگلستان پرداختند. یمانی و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی مورفوتکتونیک و تأثیر آن بر تغییرات بستر و الگوی رودخانه‌ی قره‌سو به این نتیجه رسیده‌اند که الگوی قره‌سو از فعالیت این گسل تأثیر پذیرفته است زیرا تغییرات عرضی و الگوی بستر این رودخانه در دو ساحل یکسان نبوده و با راستای جهش گسل مذکور انطباق دارد. رضائی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی تغییرات شکل هندسی رودخانه قزل‌اوزن با تأکید بر عوامل ژئومورفولوژیک و زمین‌شناسی به این نتیجه رسیده‌اند که طول زیاد رودخانه و عبور از تشکیلات مارنی و فرسایش پذیر، باعث شده که هندسه رودخانه در بازه دشتی شدیداً تحت تأثیر لیتولوژی بستر شکل بگیرد و فرسایش کناری و توان رودخانه نقش عمده در پیچان‌رودی رودخانه داشته باشد. رضائی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی الگوی پیچان‌رودی قزل‌اوزن با استفاده از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی به این نتیجه رسیدند که با بررسی پارامترهای ذکرشده می‌توان گفت که در محدوده‌ی موردمطالعه یک پیچان‌رود توسعه‌یافته است. یمانی و همکاران (۱۳۹۴) در مقاله پیش‌بینی تغییرات هندسی رودخانه کردان، به این نتیجه رسیده‌اند که در قسمت پیچان‌رودی در سال ۱۳۳۴، حدود ۹۰ درصد قوس‌ها دارای پیچان‌رودی تکامل‌یافته بود و در سال ۱۳۷۸ این مقدار به ۸۱ درصد کاهش‌یافته است. بیاتی خطیبی (۱۳۹۴) در بررسی تغییرات زمانی کانال فعال در مسیرهای پیچان‌دار با استفاده از روش‌های تجربی و با استناد به لایه‌بندی رسوبات کناری آجی چای از روش‌ها تجربی و میدانی، نشان داد که اندازه شعاع قوس خمیدگی در طی زمان به‌طور فراوانی تغییریافته است. رضائی مقدم و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی تغییرات الگوی رودخانه گاماسیاب در رابطه با تغییرات پشته‌های ماسه‌ای، به این نتیجه رسیده‌اند که در طی ۵۶ سال گذشته رود تغییرات قابل‌توجهی داشته است. تغییرات الگوی رود و ایجاد چندین الگوی متفاوت گیسویی، رودخانه با مجاری به‌هم‌پیوسته و جابجایی مئاندر باعث تغییر در مساحت رسوبات میانی و کناری شده است.

---

[1]- Timer
[2]- Tisza
[3]- Hooke
[4]- Wasley
[5]- Tiron
[6]- Luchi

محدوده موردمطالعه

ماه‌نشان، یکی از شهرستان‌های هفتگانه استان زنجان است که در غرب استان قرارگرفته است. این منطقه از لحاظ زمین‌شناسی در واحد شمال غرب و قسمت‌های از زون البرز و ایران مرکزی قرار دارد. این منطقه ساختمان بسیار پیچیده‌ای دارد به‌طوری‌که ساختمان‌های مختلفی را می‌توان در آن مشاهده کرد [جداری عیوضی، ۱۳۹۲: ۳۸]. مرتفع‌ترین قسمت این شهرستان کوه بلقیس با ارتفاع ۳۳۰۰ متر می‌باشد. مهم‌ترین رودخانه این گستره نیز، رودخانه قزل‌اوزن است که از ارتفاعات چهل چشمه کردستان سرچشمه می‌گیرد و با طولی بیش از ۵۵۰ کیلومتر، پس از عبور از استان‌های زنجان، آذربایجان شرقی و اردبیل، ضمن دریافت شاخه‌های گوناگون در طول مسیر، وارد مخزن سد سفیدرود می‌شود؛ و اما طول این رود در محدوده ماه‌نشان ۹۱ کیلومتر اندازه‌گیری شده است. منطقه ماه‌نشان مانند واحد زنجان، شامل رشته‌کوه‌هایی با امتداد شمال غربی–جنوب شرقی است که بین آن‌ها را دشت‌هایی فراگرفته است. رود قزل‌اوزن ازجمله نادرترین رودخانه‌های جهان می‌باشد که در وضعیت استثنایی قرار دارد یعنی از یک منطقه‌ی نیمه‌خشک و خشک به یک منطقه‌ی مرطوب واردمی شود (شکل ۱)[زمردیان، ۱۳۹۲: ۹۸]. لیتولوژی عمده آن، شامل سنگ‌های آذرین، کنگلومرا، مارن، آهک می‌باشد. این سنگ‌ها، متعلق به سازندهای قم، روته، قرمز بالایی و قرمز پایینی هستند. تشکیلات مارن که مربوط به دوران سوم (سنوزوئیک) و دوره‌های میوسن، پلیوسن، الیگوسن و ائوسن هستند، مربوط به بستر دریاها یا دریاچه‌های گذشته بوده و فرسایش‌پذیر بودن آن‌ها باعث شده که هندسه رودخانه تحت تأثیر زمین‌ساخت و لیتولوژی بستر شکل بگیرد. تشکیلات آذرین مربوط به دوران دوم و سوم، در اثر فعالیت‌های آتشفشانی و کوه‌زایی دوره‌های مختلف زمین‌شناسی ایجادشده‌اند [لطفی،۱۳۸۰].

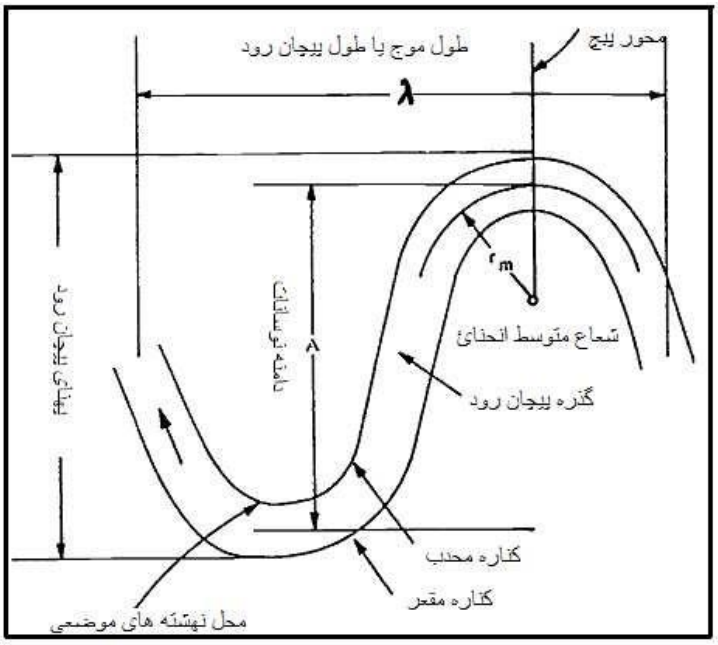


شکل ۱: موقعیت جغرافیایی رود قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان.

مواد و روش‌ها

جهت بررسی سیستم زهکشی و سازندهای زمین‌شناسی حوضه موردنظر، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه موردبررسی قرار گرفت. از نقشه زمین‌شناسی جهت استخراج سازندها، ساختارهای زمین‌شناسی استفاده شد تا ارتباط بین مئاندرهای رود با ساختارها بررسی و ارزیابی شود. بخشی از پیچان‌رودها طی کار میدانی با GPS موقعیت‌یابی شده است. برای مطالعه و بررسی روند تغییر مسیر رود قزل‌اوزن از تصاویر ماهواره‌ای IRS مربوط به سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴ سازمان جغرافیایی مسلح و تصاویر گوگل ارث سال ۱۳۷۳ استفاده شد. با رقومی کردن مسیر رود جزئیات مقدار و موقعیت تغییرات رود آشکار گردید. بر اساس داده‌های مربوط به طول قوس، طول دره و شعاع دایره‌های مماس بر قوس‌های رود، ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی و شاخص سینوسیته محاسبه شد.

پس از پردازش تصاویر رقومی IRS و انتقال آن‌ها به محیط ARC GIS، مسیر و ساحل رودخانه به‌صورت لایه‌های رقومی مستقل استخراج و در مرحله بعد، اقدام به شناسایی پیچان‌رودها شد. سپس نقاط عطف یا نقاط تغییر انحنای محور رودخانه برای هر سه بازه با دقت مشخص گردید. برای هر یک از قوس‌های رود دوایری برازش شد که بیشترین و بهترین تطابق را با قوس داشته باشد. پس‌ازآن، مشخصات هندسی پیچان‌رودها از قبیل طول‌موج، طول قوس، شعاع انحنای و دامنه نوسان با استفاده از توابع موجود در محیط نرم‌افزار ARC GIS، استخراج گردید (شکل ۲). درنهایت با استفاده از رابطه ۱، اندازه ضریب خمیدگی برای هر قوس محاسبه شد.

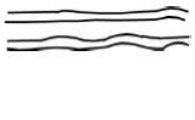
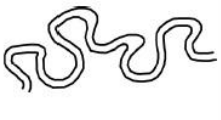


شکل ۲: مشخصات هندسی یک حلقه پیچان‌رود (حمزه حقی آبی، ۱۳۸۳، ۲۶).

الف- ضریب خمیدگی: ضریب خمیدگی با تقسیم طول دره بر طول‌موج در محل هر قوس، محاسبه می‌شود (شکل ۳)(رابطه ۱).

رابطه ۱ $$S=\frac{L}{\lambda}$$

S- ضریب خمیدگی λ / 2 - نصف طول‌موج L- طول قوس

ضریب پیچشی	۱ – ۱/۰۵	۱/۰۶ – ۱/۲۵	۱/۲۵ – ۲	> ۲
شمای رودخانه				
نوع رودخانه	مستقیم	سینوسی	پیچانرودی	پیچانرودی شدید

شکل ۳: تقسیم‌بندی رودخانه‌ها برحسب ضریب پیچش (وزارت نیرو، ۱۳۸۶، ۸۸)

ب– زاویه مرکزی–شعاع قوس‌ها: با مماس کردن دوایر قوس‌ها، می‌توان زاویه مرکزی را اندازه‌گیری کرد. برای این کار ابتدا نقاط عطف قوس‌ها مشخص‌شده و سپس از مرکز دوایر مماس بر قوس، خطوطی را بر نقاط عطف عمود کرده و زاویه مرکزی قوس‌ها محاسبه می‌شود (اسماعیلی، ۱۳۹۰). به این زاویه، زاویه مرکزی و به شعاع مماس بر دایره، قوس‌ها شعاع دایره گفته می‌شود. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار GIS و ترسیم دوایر مماس بر قوس‌های رود در چهار بازه زمانی، زاویه مرکزی برای تک‌تک قوس‌ها در نرم‌افزار GISمحاسبه گردید.

ج– طول‌موج و طول دره (طول قوس): طول قوس یا طول دره معادل نصف طول‌موج هر قوس رودخانه هست (اسماعیلی، ۱۳۹۰). طول‌موج و طول دره رودخانه دو پارامتر اصلی در طبقه‌بندی رود و تعیین ضریب خمیدگی رودها هستند و معمولاً بین این دو پارامتر همبستگی بالایی وجود دارد. برای به دست آوردن طول‌موج روی نقشه محور مسیر رود در نرم‌افزار GIS بعد از مشخص نمودن دونقطه عطف هر قوس این دونقطه به هم متصل شدند (طول‌موج). سپس مقدار طول قوس برای هر خمیدگی محاسبه شد.

د– شعاع نسبی: پایداری خمیدگی رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلف کمی و کیفی قرار می‌گیرند. یکی از معیارهای کمی برای شناسایی میزان پایداری و تحت‌فشار بودن خمیدگی‌ها، معیار شعاع نسبی است. این پارامتر از نسبت شعاع دایره محاط بر قوس رودخانه به عرض بستر آن محاسبه و اندازه‌گیری می‌شود.

در ادامه زاویه مرکزی قوس‌ها زده‌شده بر روی هرکدام از بازه‌ها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$\theta = \frac{180L}{R\pi}$$ رابطه ۲

θ– زاویه مرکزی L– طول‌موج قوس R– شعاع انحناء قوس π – عدد پی (۳/۱۴)

با توجه به تقسیم‌بندی کورنایس[1] درصد فراوانی زاویه مرکزی قوس‌های پیچان‌رودی رود قزل‌اوزن محاسبه گردید که نتایج محاسبات در جدول ۱ و ۳ آمده است.

جدول ۱: میزان توسعه پیچان‌رودی به کمک زاویه مرکزی کورنیاس (۱۹۸۰)(حقی آبی، ۱۳۸۳)

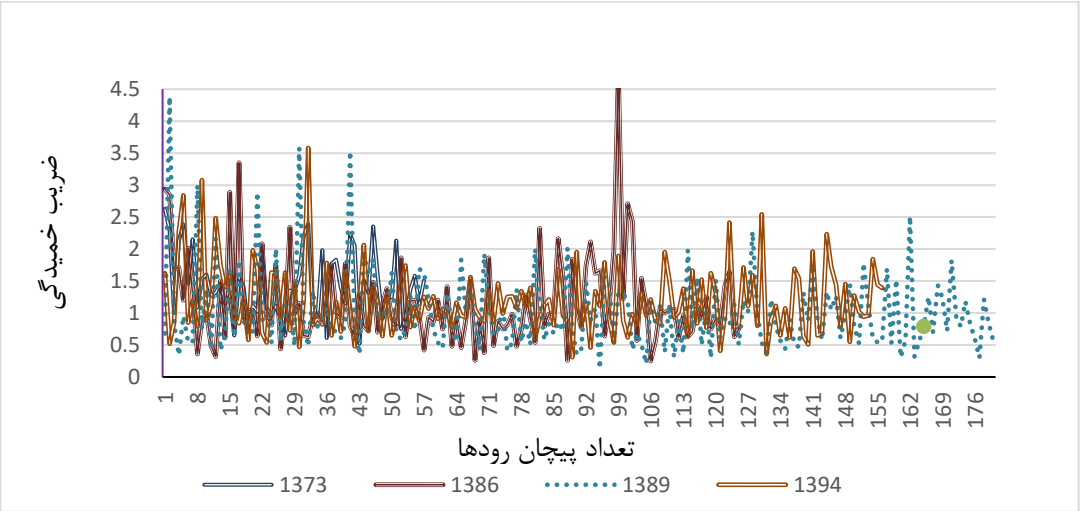
شکل رودخانه	زاویه مرکزی (درجه)
رودخانه مستقیم	–
رودخانه شبه پیچان‌رود	۴۱-۰
رودخانه پیچان‌رود توسعه‌نیافته	۸۵-۴۱
رودخانه پیچان‌رود توسعه‌یافته	۱۵۸-۸۵
رودخانه بیش‌ازحد توسعه‌یافته	۲۹۶-۱۵۸
رودخانه نعل اسبی	بیش از ۲۹۶

یافته‌های تحقیق

بعضی از پارامترها اهمیت زیادی دارند و در بررسی تحولات مورفولوژیکی و طبقه‌بندی الگوی رودخانه‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند [دولتی، ۱۳۸۷، ۱۲۷]. با توجه به اینکه، رودخانه به‌عنوان پدیده‌ای پویا و دارای سیر تکامل باید در نظر گرفته شود لذا تغییرات هندسی ایجادشده در رودخانه قزل‌اوزن سبب بروز رفتار جدید هیدرولیکی در رودخانه شده است.

ضریب خمیدگی رودخانه

ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی مبین میزان توسعه پیچان‌رودی در مسیر می‌باشد [اصغری سراسکانرود، ۱۳۹۲: ۸۲]. فریرس و بریرلی (۲۰۱۲) کانال‌هایی که نسبت طول کانال به طول دره بیشتر از ۱,۳ باشد را رودخانه‌های پیچان‌رودی دانسته و ویژگی‌های مهم مشخص‌کننده این نوع رودخانه‌ها را شیب و انرژی متوسط و ماهیت سینوسی کانال دانسته‌اند [حسین زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۴، ۲۴۱]. در جدول ۲ مقدار ضریب خمیدگی رودخانه، محاسبه‌شده است. نتایج شاخص‌های ذکرشده و در جداول آورده شده است. بررسی شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی قوس‌ها نشان می‌دهد، الگوی غالب رودخانه طی چهار سال بر اساس ضریب پیچشی، پیچان‌رودی است و کلیه پیچان‌رودهای رودخانه بین ۱,۲۵ تا ۲ می‌باشد. درحالی‌که ۵۵ درصد از مئاندرها سینوسیته‌ی بیشتر از ۱,۵ را در منطقه نشان می‌دهند. بنابر مطالعاتی که یمانی و حسین زاده (۲۲) انجام داده‌اند این محدوده نباید شیب بیشتر از ۲ درصد داشته باشد که شیب متوسط رودخانه ۰,۰۷ درصد اندازه‌گیری شده است بنابراین، مئاندرها در مناطقی که سطح دارای شیب بسیار کم باشد، تشکیل‌شده‌اند. متوسط ضریب خمیدگی در طی سال‌های ۱۳۷۳ – ۱۳۸۶ – ۱۳۸۹ – ۱۳۹۴ به ترتیب،۱، ۱,۱۶، ۱,۱۲، ۱,۱۸ بوده که از الگوی پیچان‌رودی شدید کاسته می‌شود و بر الگوی پیچان‌رودی و سینوسی افزوده می‌شود که رودخانه با سرعت نسبتاً زیادی از ضریب خمیدگی پیچ‌های خود بکاهد. در رود قزل‌اوزن بر اساس شکل ۴، از قوس ۱ تا ۱۰، ضریب خمیدگی بالا بوده و نشان‌دهنده‌ی پیچان‌رودهایی هستند که در زمره‌ی پیچان‌رودهای بسیار توسعه‌یافته می‌باشند و بقیه‌ی قوس‌ها در زمره‌ی پیچان‌رود توسعه‌نیافته تا توسعه‌یافته قرار دارند. (جدول ۲) و (شکل ۴ و ۶ و ۷).



شکل ۴: مقادیر ضریب خمیدگی پیچان‌رودهای قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان.

جدول ۲: نتایج ضریب خمیدگی پیچان‌رودهای قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان.

ضریب خمیدگی	۱ - ۱,۰۵	۱,۰۶ – ۱,۲۵	۱,۲۵ – ۲	بیشتر از ۲	میانگین
-	مستقیم	سینوسی	پیچان‌رودی	پیچان‌رودی شدید	-
۱۳۷۳	۳,۲	۱۷,۴	۴۷	۳۲,۲	۱
۱۳۸۶	۸	۱۸	۴۳	۳۱	۱,۱۲
۱۳۸۹	۳	۲۶,۵	۴۷,۴	۲۳	۱,۱۶
۱۳۹۴	۵	۲۲	۵۵	۱۸,۵	۱,۱۸

زاویه مرکزی

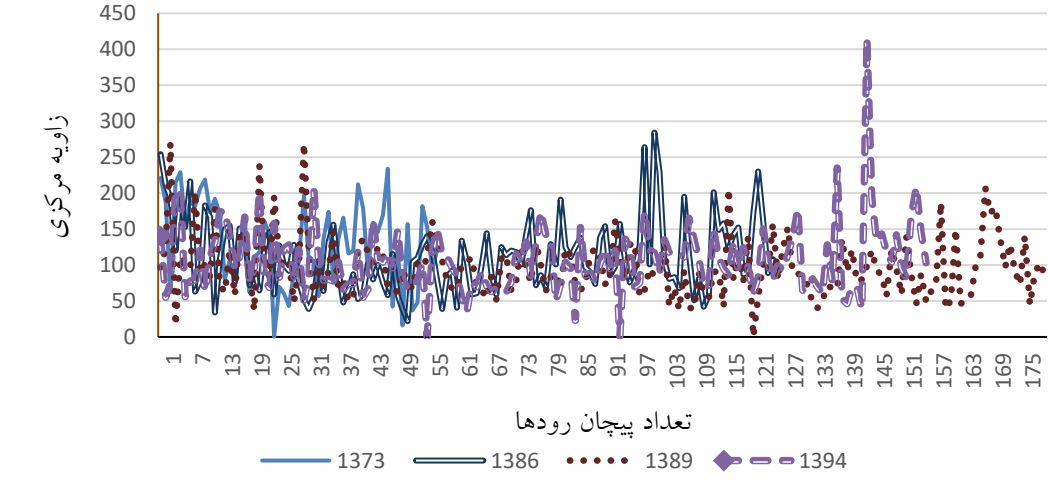
با استفاده از شاخص زاویه مرکزی کورنایس[۱] (۱۹۸۰)، میزان توسعه پیچان‌رودی قزل‌اوزن، در چهار سال به‌طور جداگانه، محاسبه گردید. بررسی مقادیر محاسبه‌شده نشان می‌دهد که در سال ۱۳۷۳ رودخانه بیشتر دارای الگوی پیچان‌رود توسعه‌یافته می‌باشد بطوریکه که ۶۰ درصد را در برگرفته است. الگوی پیچان‌رود خیلی توسعه‌یافته با ۳۰,۵ درصد و حالت میانگین پیچان‌رود توسعه‌نیافته با ۹ درصد را شامل شده است. شبه پیچان‌رودها با ۰,۷ درصد کمترین میزان را نشان می‌دهد. در سال ۱۳۸۶ پیچان‌رود توسعه‌یافته نسبت به سال ۱۳۷۳ افزایش‌یافته و با ۶۴,۳ بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. ۱۸ درصد از قوس‌ها در دسته پیچان‌رودهای خیلی توسعه‌یافته قرارگرفته است که این مقدار نسبت به سال ۱۳۷۳ کاهش‌یافته است. الگوی پیچان‌رود توسعه‌نیافته و شبه پیچان‌رود به ترتیب ۱۶,۳ و ۱,۵ درصد می‌باشد. زاویه مرکزی قوس‌ها در سال ۱۳۸۹ نشان‌دهنده افزایش پیچان‌رود توسعه‌یافته نسبت به سال‌های قبلی با ۶۲,۲ درصد است. ۲۷ درصد از قوس‌ها دارای الگوی پیچان‌رود توسعه‌نیافته، ۹,۳ درصد الگوی پیچان‌رود خیلی توسعه‌یافته، ۱,۶۲ درصد

[۱]- Korins

دارای الگوی شبه پیچان‌رود است همچنین در سال ۱۳۹۴، الگوی پیچان‌رود توسعه‌یافته دارای بیشترین درصد با میزان ۶۶ درصد، الگوی پیچان‌رود توسعه‌نیافته، ۲۴,۵ درصد، ۹ درصد پیچان‌رود خیلی توسعه‌یافته و ۰,۵ درصد الگوی شبه پیچان‌رود می‌باشد. در هیچ یک از سال‌ها، حالت نعل اسبی[۱] وجود نداشته است. زوایای مرکزی قوس‌ها در طی سال‌های ۱۳۷۳ دارای مقدار ۱۳۶ است که نشان‌دهنده‌ی الگوی پیچان‌رودی خیلی توسعه‌یافته است. این مقدار در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴ به ترتیب به ۱۳۱، ۹۶,۵، ۱۰۶,۵ کاهش پیداکرده که نشان‌دهنده الگوی پیچان‌رودی توسعه‌یافته می‌باشد (جدول ۳) و (شکل ۵ و ۶ و ۷). کاهش در الگوی پیچان‌رودی خیلی توسعه‌یافته و افزایش الگوی پیچان‌رودی توسعه‌یافته و توسعه‌نیافته نشان می‌دهد که رودخانه به‌تدریج از پیچ‌وخم قوس‌های خود می‌کاهد.

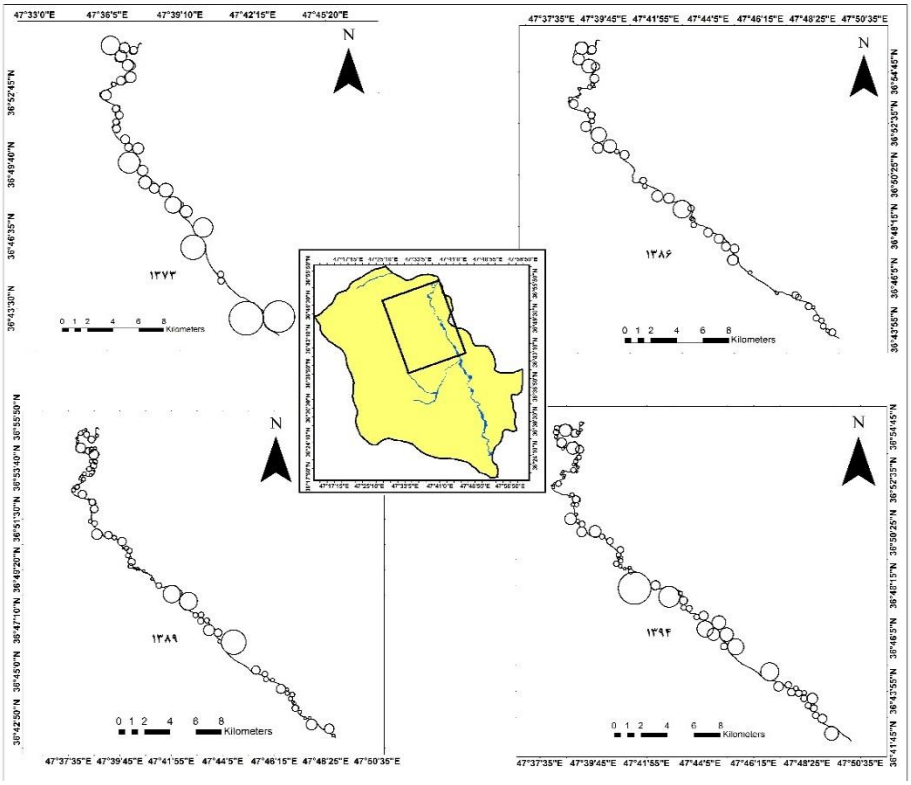
جدول ۳: زاویه مرکزی پیچان‌رودهای قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان.

شکل رودخانه	شبه پیچان‌رود	پیچان‌رود توسعه‌نیافته	پیچان‌رود توسعه‌یافته	پیچان‌رود خیلی توسعه‌یافته	نعل اسبی	میانگین به درجه	شکل رودخانه
زاویه مرکزی به درجه	۰ – ۴۱	۴۱– ۸۵	۸۵ – ۱۸۵	۱۸۵–۲۹۶	۲۹۶ به بالا	-	-
۱۳۷۳	۰,۷	۹	۶۰	۳۰,۵	–	۱۳۶	پیچان‌رود توسعه‌یافته
۱۳۸۶	۱,۵	۱۶,۳	۶۴,۳	۱۸	–	۱۳۱	پیچان‌رود توسعه‌یافته
۱۳۸۹	۱,۶۲	۲۷	۶۲,۲	۹,۳	–	۹۶,۵	پیچان‌رود توسعه‌یافته
۱۳۹۴	۰,۵	۲۴,۵	۶۶	۹	–	۱۰۶,۵	پیچان‌رود توسعه‌یافته

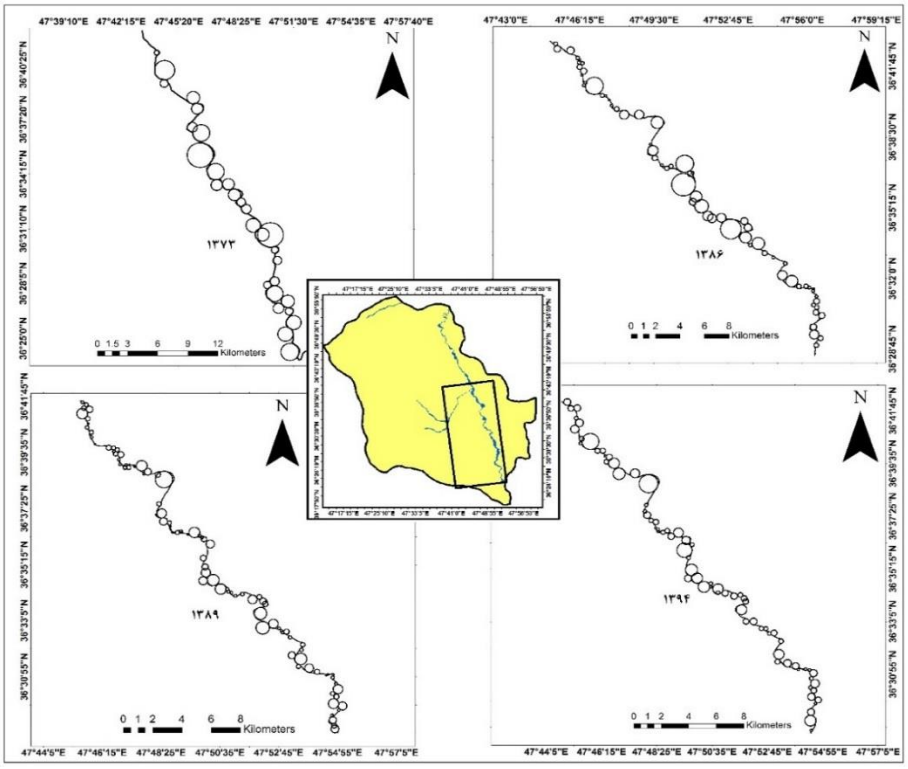


شکل ۵: مقادیر زاویه مرکزی پیچان‌رودهای قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان.

[۱]- Ox- bow



شکل ۶: رود قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان با دوایر برازش شده بر پیچان‌رودها.



شکل ۷: رود قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان با دوایر برازش شده بر پیچان‌رودها.

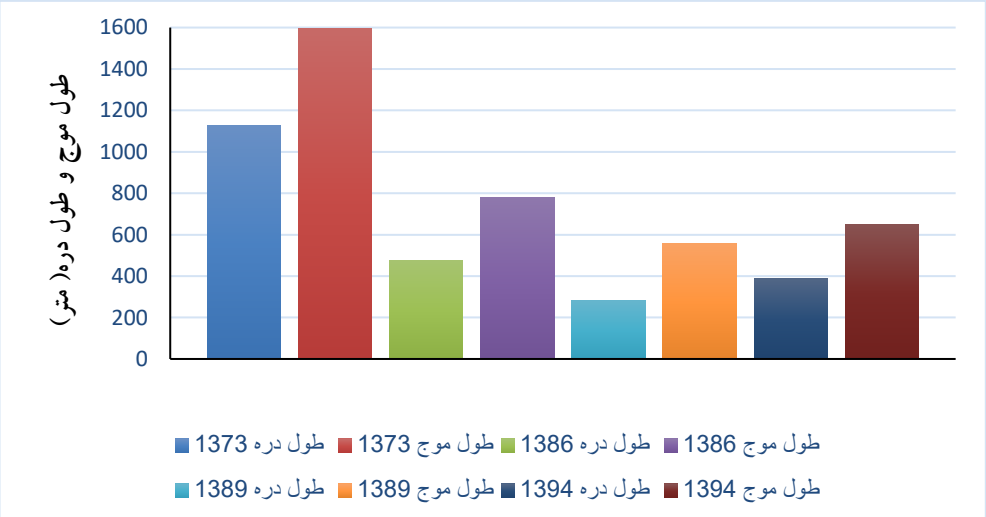
شعاع قوس و طول‌موج و طول دره

میانگین مقادیر شعاع قوس‌ها در محدود موردمطالعه برای چهار سال ۱۳۷۳، ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴ محاسبه گردید که برای سال ۱۳۷۳، ۵۰۶ متر و برای سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴ به ترتیب ۲۵۴٫۵، ۱۶۶، ۲۲۹ متر بود. ملاحظه می‌شود متوسط شعاع حلقه‌های سال ۱۳۷۳ بیشتر از سال‌های دیگر است؛ که این امر به دلیل فرسایش‌پذیری کناره غالباً سست رودخانه بوده و سبب توسعه شعاعی حلقه‌های پیچان‌رود می‌گردد. پارامترهای هندسی بخش‌های موردمطالعه در چهار دوره زمانی سال‌های ۱۳۷۳، ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴ مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت (شکل ۸) و (جدول ۴). تعداد پیچان‌رودهای رودخانه قزل‌اوزن در محدوده موردمطالعه به ترتیب ۵۷، ۱۲۵، ۱۸۰، ۱۵۶ افزایش‌یافته است. فاصله طولی بین دو پیچان‌رود متناوب نسبت به هم در سال ۱۳۷۳ به‌مراتب بیشتر از سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴ است زیادشدن فاصله طولی دو پیچان‌رود متوالی به‌نوعی نشان‌دهنده افزایش حالت پیچان‌رودی است.

جدول ۴: تغییرات پارامترهای هندسی رودخانه قزل‌اوزن.

سال	۱۳۷۳	۱۳۸۶	۱۳۸۹	۱۳۹۴
میانگین طول‌موج (متر)	۱۵۹۷٫۵	۷۷۶٫۵	۵۵۹	۶۵۳
میانگین شعاع قوس (متر)	۵۰۶	۲۵۴٫۵	۱۶۶	۲۲۹
تعداد پیچان‌رود	۵۷	۱۲۵	۱۸۰	۱۵۶

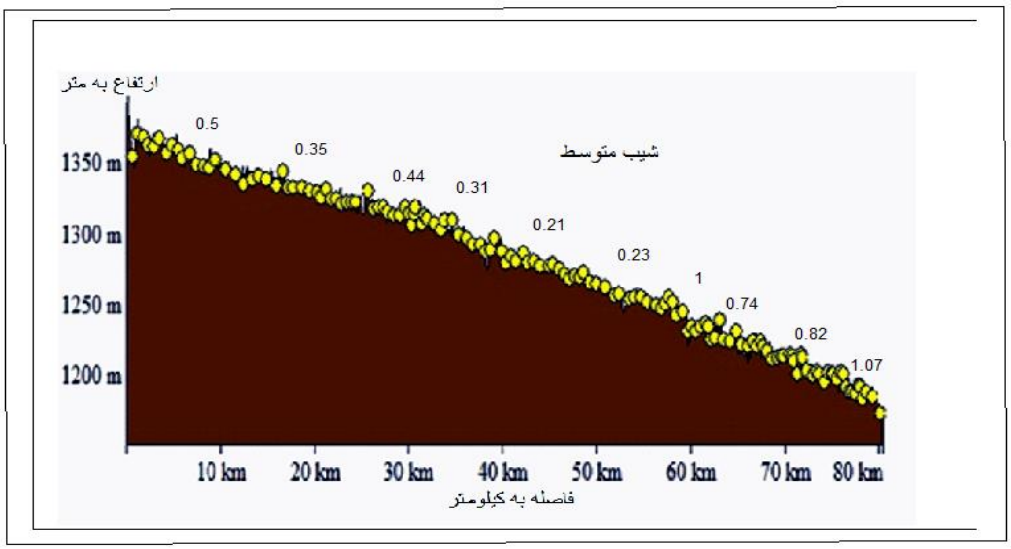
طول‌موج و طول دره رودخانه دو پارامتر اصلی در طبقه‌بندی رودخانه و تعیین ضریب پیچشی رودخانه‌ها بوده، معمولاً همبستگی بالایی بین آن‌ها وجود دارد. طبق شکل (۸) تغییرات طول‌موج و طول دره در چهار دوره زمانی موردبررسی در رودخانه قزل‌اوزن نشان می‌دهد؛ که میزان طول‌موج و طول قوس از سال ۱۳۷۳ به سال ۱۳۹۴ کاهش‌یافته که به معنی کاهش فاصله پیچان‌رودهای متوالی و افزایش قدرت مانور رود به علت آبرفتی و سست بودن بستر است.



شکل ۸: تغییرات طول‌موج و طول دره در رودخانه قزل‌اوزن در سال‌های ۱۳۷۳، ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴

پروفیل طولی رودخانه

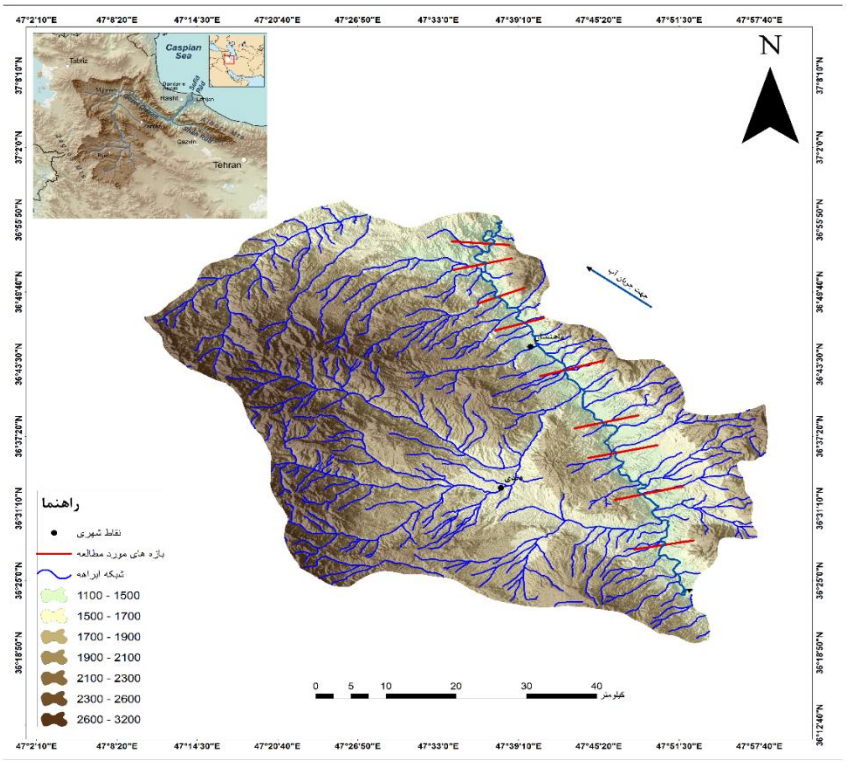
استرنبرگ[۱] و شولیتز[۲] (۱۹۸۵) شیب را عامل پیچان‌رودی می‌دانند، چون شیب تابعی از اندازه ذرات مواد بستری فرض می‌شود، لذا وقتی شیب از حدی که برای انتقال ذرات لازم است، تجاوز کرد، مکانیسمی رخ می‌دهد که مسیر رودخانه را به‌صورت پیچانی درآورده و با افزایش طول، شیب آن کاهش می‌یابد [حقی آبی و همکاران، ۱۳۸۳ :۴۴]. رشد زمانی حلقه‌های یک پیچان‌رود و ضریب خمیدگی آن، ناشی از این تلاش رود برای کاهش شیب می‌باشد[حقی آبی و همکاران، ۱۳۸۳ :۶۲]. پروفیل طولی رودخانه قزل‌اوزن نشان می‌دهد که شیب بستر از بالادست به‌طرف پایین‌دست افزایش می‌یابد. شیب متوسط رودخانه ۰,۰۷ درصد است، همچنین پروفیل طولی نمایان می‌کند که در ابتدا رود دارای شیب ملایمی است، میزان تغییرات زیاد است و رودخانه حالت پیچان‌رودی پیدا می‌کند که می‌توان سازند لیتولوژی فرسایش‌پذیر را علت پیچان‌رودهای توسعه‌یافته در ابتدای رودخانه دانست؛ که این تغییرات اغلب، به شکل فرسایش کناری سواحل رود دیده می‌شود. به‌طرف پایین‌دست رود، تعداد گسل‌های که در طول رودخانه وجود دارند افزایش‌یافته که روی شیب تأثیر می‌گذارد و در نتیجه شیب را در قسمت انتهایی رود، افزایش می‌دهد (شکل ۹)(شکل ۱۰ و ۱۱).



شکل ۹: پروفیل طولی رود قزل‌اوزن در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان.

۱- Strenberg

۲- Shulits



شکل ۱۰: بازه‌های موردمطالعه برای محاسبه شیب پروفیل طولی در محدوده‌ی شهرستان ماه‌نشان.

شکل ۱۱: تندآب ایجادشده در مسیر رودخانه و ایجاد تغییر شیب.

شکل ۱۲: فرسایش کناری رودخانه و شکل‌گیری مئاندر.

نتیجه‌گیری

مئاندرها از علل اصلی فرسایش کناری و بروز تغییرات در دشت‌های سیلابی محسوب می‌شوند. وقوع این تغییرات زیاد و فرسایش کناری در حد تشدید شده است (شکل ۱۲). یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که در چهار دوره زمانی موردپژوهش تغییرات چشمگیری در رودخانه دیده می‌شود؛ با بررسی پارامترهای ذکرشده و مشاهدات میدانی در این تحقیق می‌توان گفت که محدوده موردمطالعه رودخانه قزل‌اوزن یک رودخانه پیچان‌رود توسعه‌یافته است. فریرس و بریرلی[۱] (۲۰۱۲) کانال‌هایی که نسبت طول کانال به طول دره بیشتر از ۱,۳ باشد را رودخانه‌های پیچان‌رودی دانسته و ویژگی‌های مهم مشخص‌کننده این نوع رودخانه‌ها را شیب و انرژی متوسط و ماهیت سینوسی کانال دانسته‌اند [حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۲۱]. هر چه به سمت پایین‌دست رودخانه می‌رویم شیب زیادتر می‌شود به همان نسبت ضریب خمیدگی افزایش می‌یابد. با توجه به ضریب خمیدگی، در سال ۱۳۷۳ و ۵۵ درصد، در سال ۱۳۸۶ و ۴۷,۴ درصد، سال ۱۳۸۹ و ۴۳ درصد، سال ۱۳۹۴ و ۴۰ درصد مابین ۲–۱,۲۵ قرار دارد. چارلتون[۲] اظهار می‌دارد که هر چقد مقادیر عددی به‌دست‌آمده از ضریب خمیدگی بیش‌تر از ۱,۵ باشد، حاکی از نزدیک شدن رودخانه به حالت تعادل و هر چقد کمتر باشد دلیل فعال بودن تکتونیک می باشد [اصغری سراسکانرود، ۱۳۹۲: ۸۵]. هم‌چنین با توجه با مقادیر به‌دست‌آمده از زوایای مرکزی، نشان می‌دهد؛ که به ترتیب از سال ۱۳۷۳ تا سال ۱۳۹۴ از مقدار زاویه مرکزی پیچان‌رود خیلی توسعه‌یافته کاسته شده و مقدار زاویه مرکزی پیچان‌رود توسعه‌یافته و توسعه‌نیافته افزایش‌یافته است. بیشتر زاویه مرکزی برای سال‌های موردمطالعه در دسته ۸۵–۱۵۸ درجه‌ای که مربوط پیچان‌رود توسعه‌یافته است، قرار می‌گیرد. ملاحظه می‌شود که میزان طول‌موج و شعاع قوس سال ۱۳۷۳ بیشتر از سال ۱۳۹۴ است بدین معنی که از سال از ۱۳۷۳ به سال ۱۳۹۴ روند کاهشی دارد؛ که به معنی کاهش فاصله پیچان‌رودهای متوالی و افزایش قدرت مانور رود به علت آبرفتی و سست بودن بستر است و اما بالعکس تعداد پیچان‌رودها رابطه عکسی با میزان طول‌موج و شعاع قوس‌ها دارد و روند افزایشی را به دنبال دارد.

۱- Fryirs and Brierley

۲- Charlton

منابع

- احمدی، حسن، ۱۳۸۵، ژئومرفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم، ۷۱۴.
- اصغری سر اسکانرود، صیاد، ۱۳۹۲، بررسی و تحلیل الگوهای متفاوت رودخانه شهر چای ارومیه، فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی، سال اول، شماره اول، صص ۸۸-۷۵.
- بیاتی خطیبی، مریم، ۱۳۹۰، بررسی پتانسیل خطر وقوع سیل در مسیر رودخانه‌های مئاندر، با استفاده از شاخص LFH(مطالعه) موردی: رودخانه شور، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۵، ۱۷-۱.
- بیاتی خطیبی، مریم، ۱۳۹۴، بررسی تغییرات زمانی کانال فعال در مسیرهای پیچان دار با استفاده از روش‌های تجربی و با استناد به لایه‌بندی رسوبات کناری (مطالعه موردی: مسیر پیچان دار آجی چای)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲، ۴۹-۶۶.
- جداری عیوضی، جمشید (۱۳۹۲)، ژئومورفولوژی ایران، تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ سیزدهم، ص ۱۰۶.
- حسین زاده، محمدمهدی؛ اسماعیلی، رضا؛ ۱۳۹۴، ژئومورفولوژی رودخانه‌ای مفاهیم، اشکال و فرایندها، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی تهران، ۳۳۸.
- حقی آبی، امیر حمزه؛ حبیبی، مهدی؛ احمدی پور، محمدرضا؛ جواهری، نصر اله، (۱۳۸۳)، نظریه‌های ایجاد و تحول پیچان‌رودها، انتشارات دانشگاه لرستان.
- دولتی، جواد، ۱۳۸۷، استاد راهنما: مجتبی یمانی، (بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی بخش میانی رودخانه اترک با استفاده از Gis پایان‌نامه کارشناسی ارشد)، دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا.
- زمردیان، محمد جعفر، (۱۳۹۲)، ژئومورفولوژی ایران، جلد اول: فرایندهای ساختمانی و دینامیک های درونی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۵۴ ص.
- رفاهی، حسینقلی، ۱۳۸۲، فرسایش آبی و کنترل آن، دانشگاه تهران، ۵۸۷.
- رضایی مقدم، محمدحسین، خوش‌دل، کاظم؛ ۱۳۸۴، بررسی مخاطرات ژئومورفولوژیکی دشت ازومدل ورزقان، کنفرانس بین‌المللی مخاطرات زمین و بلایای طبیعی، دانشگاه تبریز، ۱، ۱۱۲-۱۰۱.
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ ۱۳۹۱، بررسی الگوی پیچان‌رودی قزل‌اوزن با استفاده از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی (محدوده‌ی بین ۳۰ کیلومتری شهرستان میانه تا مرز سیاسی استان زنجان)، فصلنامه علمی-پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، ۱۰، ۳۴، ۸۵-۱۰۲.
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد، ۱۳۹۱، بررسی تغییرات هندسی رودخانه قزل‌اوزن با تأکید بر عوامل ژئومورفولوژیک و زمین‌شناسی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۷، ۱۸-۱.
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ پیروزی نژاد، نوشین؛ جباری، ایرج، ۱۳۹۴، بررسی تغییرات الگوی رودخانه گاماسیاب در رابطه با تغییرات پشته‌های ماسه‌ای، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲، ۳۲۰-۲۹۹.
- لطفی، م، ۱۳۸۰، شرح نقشه زمین شناسی چهار گوش ماه نشان با مقیاس ۱۰۰۰۰۰: ۱، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- مقصودی، مهران؛ شرفی، سیامک؛ مقامی، یاسر؛ ۱۳۸۹، روند تغییرات الگوی مورفولوژیکی رودخانه خرم‌آباد با استفاده از Rs، Gis، $Auto\ cad$، مدرس علوم انسانی-برنامه ریزی و آمایش فضا، ۱۴، ۳، ۲۷۵-۲۹۴.
- وزارت نیرو ۱۳۸۶، پیش‌نویس راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، نشریه شماره ۳۱۴.

- یمانی، مجتبی؛ علایی طالقانی، محمود؛ شهبازی، صبریه، ۱۳۹۰، مورفوتکتونیک و تأثیر آن بر تغییرات بستر و الگوی رودخانه‌ی قره‌سو، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۱۷، ۱۴۳-۱۲۵.
- یمانی، مجتبی؛ گوراپی، ابوالقاسم؛ علیزاده، شهناز، ۱۳۹۴، پیش‌بینی تغییرات هندسی رودخانه کردان در محدوده پیچان‌رودی، پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۴-۱.
- یمانی، مجتبی؛ فخری، سیروس؛ ۱۳۹۱، بررسی عوامل مؤثر در تغییرات الگوی رودخانه جگین در جلگه ساحلی مکران، فصلنامه علمی- پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، ۱۰، ۳۴، ۵۹-۴۱.
- یمانی، مجتبی، حسین زاده، محمدمهدی، ۱۳۸۳، بررسی الگوی پیچان‌رودی رودخانه تالار با استفاده از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۱۹، ۷۳، ۱۵۴-۱۴۴.
- *Hooke, J.M. 2007, Complexity self-Organization and variation in Behaniour in Meandering River, Geomorphology91, P 236-258.*
- *Gabor. Timer (2003), Controls on Channel sinuosity Changes. A case study of the Tisza River, The Great Hungarian plain. Quaternary science River.22. P 2206.*
- *Luchi, R. Hooke, J.M. Zolezzi, G. Bertoldi, W. 2010, Width Variations and mid-channal bar inception in meander: River Bollin (UK) Geomorphology 119, p 1-8.*
- *Tiron, T.R, Scheideger, A.E. 1970, Chain model of river meanders, Journal of Hydrology12, P25-47.*
- *Wesley, L.J.G.2008, Net Local removal of flood plain sediment by river meander migration, Geomorphology,P 123-149.*