

## تحولات مورفولوژیکی و الگوی پیچان رودی بستر رودخانه مرزی هریود با استفاده از RS

پروین کهربائیان - مربی گروه آمار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران  
ابوالفضل بهنیاfer - استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران  
حجت شاکری زارع - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی  
محسن رضائی عارفی\* - مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۱۰      تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۱۱/۱۷

### چکیده

تکنیک‌های سنجش از راه دور نقش بسیار مهمی در شناخت تحولات مورفولوژیکی بستر رودخانه‌ها و تحولات پیچان رودی آنها از نظر جایجایی مرز دارند. از سوی دیگر ماندری شدن یکی از مهم‌ترین مسایل مهندسی رودخانه است که فعالیت‌ها و سازه‌های عمرانی را در حاشیه رودخانه‌ها تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین، مطالعه تغییرات مورفولوژیکی کانال‌های رودخانه‌ای به منظور راهکارهای کنترلی مناسب جهت حل مشکلات دینامیکی این نواحی اهمیت دارد. هدف اصلی این مقاله، بررسی روند تحولات بستر و الگوی پیچان رودی هریود با استفاده از تکنیک‌های سنجش از راه دور، شاخص‌های هندسی و تصاویر ماهواره‌ای است. برای رسیدن به این هدف، با توجه به گستردگی مسیر رودخانه و مرزی بودن آن، از مقایسه عکس‌های هوایی سال ۱۳۵۳ و تصاویر ماهواره‌ای لندست و گوگل اِرت سال ۱۳۹۰ با پردازش در محیط جی‌آی‌اس استفاده گردیده است. با رقوم‌سازی مسیر رودخانه در محیط اتوكد، شاخص‌های هندسی (ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی شعاع نسبی و واریانس و انحراف معیار آنها) بر روی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای محاسبه شد و در ۲۵ نقطه از مسیر با عملیات زمینی کنترل گردیدند تا خطاهای احتمالی برطرف شوند. نتایج آشکار نمود که تعداد پیچان رودها از ۱۷۲ در سال ۱۳۵۳ به ۱۶۶ در سال ۱۳۸۷ کاهش یافته و نیمرخ عرضی هریود در طول این دوره زمانی تغییرات زیادی داشته و الگوی پیچان رودی بویژه در بازه دوم مسیر به شدت افزایش یافته است که منجر به تخریب ۱۲ میله مرزی، یک پاسگاه مرزبانی، آسیب دیدگی اراضی زراعی ۸ آبادی و سامانه جاده مرزی در مسیر رود گردیده است. بیشترین تراکم پیچان رودی (با ضریب همبستگی ۰/۹۹۸) مربوط به مسیرهایی است که جنس سازند زمین شناسی بستر از لس‌ها، مارن‌های رسی و آبرفت سست بوده است.

واژگان کلیدی: تحولات مورفولوژیکی، سنجش از دور، تغییرات مجرا، الگوی پیچان رودی، هریود

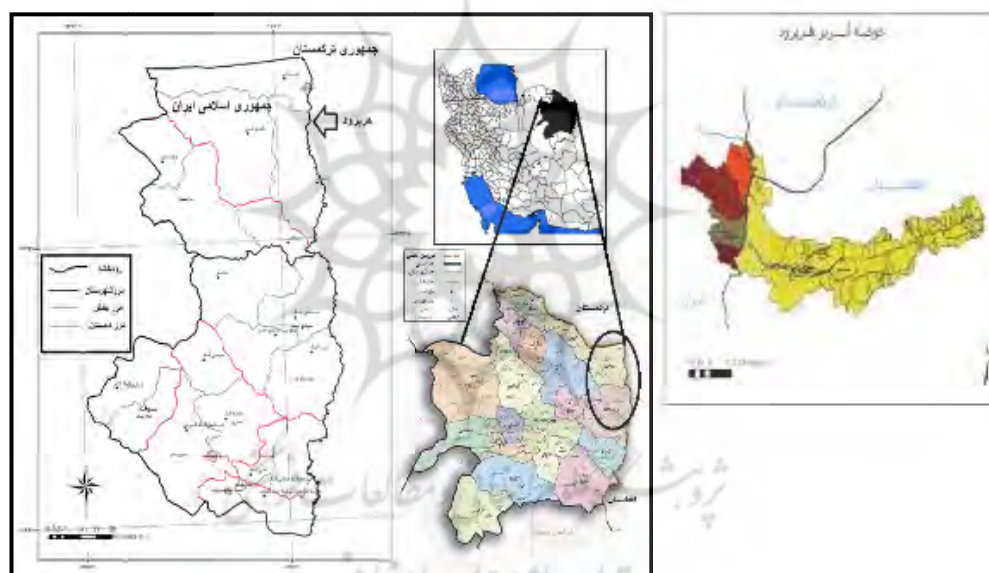
## مقدمه

رودخانه‌ها و آبراهه‌ها سیستمی کاملاً پویا بوده و الگوی مورفولوژیک آنها به طور پیوسته در طول زمان تغییر می‌کند، به همین دلیل فرسایش کناره‌ای و آسیب‌رسانی به تاسیسات ساحلی و جابجایی مرز را به دنبال دارند. اگرچه عوامل متعددی مانند انحراف آبراهه در کناره‌ها، کف کنی رود، فعالیت‌های آنتروپوژن، اختلاف سازند بستر و سیل‌خیزی، باعث تخریب دیواره، کف بستر و تغییر الگوی مجاری می‌شوند (یمانی و شرفی، ۱۳۹۱) ولی معمولاً یک یا دو عامل غالب این تغییرات را کنترل می‌کنند. بستر رودخانه‌ها به دلیل تحولات دینامیکی در طول زمان تغییرات نسبتاً زیادی دارند به ویژه رودهایی که سیلابی بوده و به عنوان خط مرزی در نظر گرفته شده‌اند می‌توانند خسارات جدی به تاسیسات انسانی و اراضی کشاورزی وارد سازند. مورفولوژی الگوی بستر رود در طی زمان تابع عوامل متعددی همچون جنس سازندهای زمین‌شناسی، دبی سیلاب، تغییرات آنتروپوژنیک، پوشش گیاهی، توپوگرافی و حرکات تکتونیکی است ولی بررسی‌های آماری الگوهای پیچان رودی نشان داده‌اند که این مورفولوژی از یکسری قواعد زمین‌آماری تبعیت می‌کنند به عبارت دیگر، الگوی سینوسی بستر رودها تابع نقش غالب فرایندها و مجموعه عواملی است که در طی زمان اعمال می‌شود (نوحه‌گر و یمانی، ۱۳۸۲). طبق نظر بسیاری از ژئومورفولوگ‌ها، بسترهای رودخانه‌ای با ضریب ماریچی بزرگ‌تر از ۱/۵ حالت متآندری شدیدی دارند (لئوپلد و ولمن ۱۹۹۷). تفکیک رودخانه‌های متآندری از سایر رودخانه‌ها بیشتر به خاطر خساراتی است که رودهای گروه اول بوجود آورده‌اند (عشقی و قنبرزاده، ۱۳۷۹). یمانی و حسین‌زاده (۱۳۸۳) ضریب خمیدگی متآندری رودخانه تالار را با مدل‌های آماری و ریاضی محاسبه نمود و رضائی مقدم و خوشدل (۱۳۸۸) طبقه‌بندی متآندریها را بر اساس زاویه مرکزی کوواریانس آنها بدست آورده‌اند که مبین کاربرد مدل‌های زمین‌آماری در تعیین الگوی پیچان رودها می‌باشد. در سراسر مرزهای کشورمان ۲۸ رودخانه و ۳ دریاچه به عنوان مرزهای طبیعی حالت دینامیکی دارند. (داداندیش، ۱۳۸۶). از این ۲۸ رودخانه، هریرود در بخش شمال شرقی کشور به عنوان یک رود مرزی مشترک بیش‌ترین طول مرز مشترک را دارد (توسلی نائینی، ۱۳۸۷). سرچشمه اصلی این رودخانه در خاک افغانستان است. مجموع طول رودخانه‌های مرزی کشور ۱۸۸۸ کیلومتر است. از این مقدار ۳۱٪ مربوط به مرز آذربایجان، ۲۱/۵٪ مربوط به مرز ترکمنستان، ۱۸/۶٪ مربوط به مرز عراق، ۱۲/۵٪ مربوط به مرز افغانستان، ۱۲٪ مربوط به مرز پاکستان و مابقی به مرزهای رودخانه‌ای ارمنستان و ترکیه است (حافظ‌نیا، ۱۳۸۶). اگرچه شاخصهای تعیین مرزهای کشورهای افریقایی با مرزهای کشورهای خاورمیانه تفاوت‌های زیادی دارد ولی تقریباً ۹۵ درصد شاخصهای مرزهای کشورهای خاورمیانه را عوامل طبیعی مانند خط‌الراسها و رودخانه‌ها تشکیل می‌دهند (درايسدل و همکاران، ۱۳۸۳). از این نظر مطالعه بر روی تحولات پیچان رودی رودخانه‌های مرزی یکی از مهم‌ترین مسایل کنترل و مدیریت رودخانه‌های مرزی محسوب می‌شود. هریرود در حدفاصل بین پیش‌ریاض تا نقطه مرزی یاز تپه سرخس دارای متآندریهای زیادی است که تعداد آنها طی ۴۰ سال گذشته تغییرات زیادی داشته و هرگونه شناخت پیرامون این تحولات از لحاظ مهندسی کنترل رودهای مرزی اهمیت اساسی دارد. سوال اصلی تحقیق آن بوده که تغییرات مورفولوژی بستر و الگوی پیچان رودی هریرود به عنوان یک رودخانه مرزی در طی دوره زمانی ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ چگونه بوده و این تحولات در کدام قسمت از مسیر آن بیشتر بوده است؟

در صورت پیش‌بینی روند این گونه تغییرات مورفولوژی کانال‌های رودخانه‌ای، می‌توان راهکارهای بهتری را برای حل مشکل ارائه داد. با کمی‌سازی متآندریهای این رودخانه‌ها و متدهای زمین‌آماری و استفاده از سنجش از دور می‌توان میزان جابجایی‌های بستر اصلی رودخانه را در دو جهت طولی و عرضی شناسایی نمود و الگوهای پیچان رودی را شناسایی و تحولات الگوی پیچان رودی را تعیین نمود.

## قلمرو مطالعاتی

محدوده مورد تحقیق شامل بستر هریرود از ورود به کشور در محلی به نام پیش رباط در مرز تایباد تا یاز تپه شهر سرخس در شمال شرق کشور است. طول این مسیر ۲۳۶ کیلومتر بوده که ۷۵ کیلومتر آن از محل سد دوستی تا یاز تپه سرخس با ترکمنستان نیز مرز مشترک دارد. بخش شمالی این مسیر در دشت سرخس و بخش جنوبی آن در ناهمواری های کپه داغ واقع شده است. حداقل ارتفاع در مرز یاز تپه ۳۰۰ متر و حداکثر آن در ارتفاعات مرزی تربت جام برابر ۱۲۵۰ متر می باشد. از نظر مختصات جغرافیایی، محدوده تحقیق بین ۶۱ درجه و ۰۲ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل (۱) موقعیت محدوده مورد مطالعه از پیش رباط تایباد تا یاز تپه سرخس و حوضه آبریز مرزی هریرود (سازمان نقشه برداری کشور،

۱۳۸۹)

## متدولوژی و مواد

روش تحقیق به صورت تاریخی - تجربی بوده و داده ها با استفاده از مقایسه عکس های هوایی سال ۱۳۵۳ و تصاویر ماهواره ای لندست و گوگل ارث سال ۱۳۹۰ همراه با کنترل عملیات زمینی حاصل شده اند. ابتدا فتواندکس ۱۴۲ عکس هوایی مسیر هریرود (حد فاصل پیش رباط تا نقطه مرزی یاز تپه سرخس) مربوط به سال ۱۳۵۳ شمسی به کمک روش های فتوگرامتری تهیه و در محیط اتو کد رقومی شدند. سپس تصاویر لندست و گوگل ارث سال ۱۳۹۰ با استفاده از نرم افزار ArcGIS و ژئورفرنس نمودن آنها در مسیر بستر، آماده سازی شدند و در مرحله نهایی محاسبه تعداد ماندها و شاخص های هندسی و آماری پیچان رودها در دو مقطع زمانی انجام گرفت. برای پردازش تصاویر ماهواره ای لندست و بازسازی آنها با استفاده از ترکیب باندهای مختلف، بهترین باند (باندهای ۳ و ۴ لندست) یا ترکیب تعیین و نقاط کنترل

زمینی در تصاویر جانمایی شدند و خطاها RMS حذف شدند (۲۵ نقطه برداشت زمینی). مسیر رودخانه به دو بازه از نظر سازند های مقاوم و غیرمقاوم تفکیک گردید و کد گذاری مآندرها در Shapefile از نوع پلیگونی، انجام شد. پس از برداشت های نقاط کنترلی در طول بستر، با استفاده از نرم افزار spss پارامترهای آماری پیچان رودها مانند میانگین، واریانس و انحراف معیار ضریب خمیدگی مآندرها محاسبه گردید. مهم ترین ابزارهای تحقیق عبارتند از:

الف - عکس های هوایی ۱/۲۰۰۰۰ سال ۱۳۵۳ بلوک هریرود و رقومی سازی آنها در محیط اتو کد

ب- تصاویر MSS ماهواره ای لندست و تصاویر گوگل ارث با رقومی سازی آنها در محیط جی آی اس

ج- تهیه مدل دمه های SRTM با دقت ۳۰ متری از مسیر بستر در محیط جی آی اس

د- برداشت های حاصل از کنترل میدانی در ۲۵ نقطه از مسیر بستر

### یافته های تحقیق

برای شناسایی و طبقه بندی مآندرها و محاسبه پارامترهای هندسی آنها اقدام به کد گذاری پیچان رودها در نوار مرزی تایباد، تربت جام و شرق سرخس شد. این کد گذاری از مآندر شماره ۱ در محل پیش رباط تا مآندر شماره ۱۶۶ در محل یازتپه سرخس در جهت جنوب به شمال صورت گرفته است (شکل ۲). همچنین با استفاده از باز دیده های مسیر مرز و نقشه برداری مسیر جاده مرزی، کانون های آسیب دیده توسط رودخانه برداشت گردید. کدگذاری ماندها و نیز نقشه برداری مسیر مرز در نقشه شماره ۲ آورده شده است. برداشت میدانی در دو نوبت در فصول بهار و پاییز در طول نوار مرزی انجام شده است. با توجه به متفاوت بودن ویژگی های ژئومورفیکی مسیر رودخانه، آن را به دو بازه مختلف تفکیک نموده تا پارامترهای هندسی در آنها مورد مقایسه قرار گیرند و نواحی شدیداً مآندری مشخص گردند. بازه اول، از مآندره های شماره ۱ تا ۹۹ را در بر می گیرد که از محل پیش رباط تا اواسط مرز تربت جام را شامل است. اگرچه در بخش فوقانی این قسمت بستر رود سنگی و از جنس آهک سازند مزدوران می باشد (زمردیان ۱۳۹۲، بهنیاfer ۱۳۹۱) ولی به خاطر انطباق خط گسله بر بستر رودخانه، مآندرها بیشتر از آن تاثیر پذیر بوده و بصورت محاط هستند و تاثیر عوامل آنتروپوژن در حداقل خود است. تعدادی مآندر متروکه در این بازه وجود دارد که بیانگر تغییر الگوی مورفولوژیک بستر رود در گذشته می باشند. بازه دوم از مآندر شماره ۱۰۰ شروع شده و تا یاز تپه سرخس تداوم دارد. بستر رودخانه در این بخش عمدتاً از سازندهای سست و آبرفتی و لسی تشکیل شده است و مآندرها از نوع آزاد هستند.

از نظر مقایسه پارامترهای هندسی محاسبات نشان داد که تعداد پیچان رودهای کل مسیر از ۱۷۲ پیچان رود در سال ۱۳۵۳ به ۱۶۶ رودپیچ در سال ۱۳۹۰ کاهش یافته است. به عبارت دیگر در طول ۳۷ سال گذشته تعداد ۶ مآندر حذف شده و هر شش مورد در بازه دوم واقع شده است در سایر قسمتهای رودخانه قوس پیچان رودها تحت فشار و ناپایداری قرار گرفته اند. مقدار سینوسیته در رودخانه های تک مجرای بصورت نسبت طول تالوگ مجرا به طول دره (رضایی مقدم و مهدوی ۱۳۸۷ ص ۲۹۳، رضایی مقدم و همکار ۱۳۸۸) یا نسبت طول مجرا به طول کمربند محوری مجرا (رضایی مقدم و همکاران ۱۳۹۱ ص ۸۹) قابل محاسبه است. مقدار ضریب خمیدگی یا ضریب پیچشی مآندرها در طول مسیر رودخانه از رابطه  $S = L / (Q \div 2)$  محاسبه شد. یعنی با تقسیم کردن طول دره بر نصف طول موج، ضریب خمیدگی برای هر قوس مآندری بدست آمده است. با توجه به دامنه ضرایب خمیدگی ۴ نوع رودخانه را طبق جدول (۱) می توان تقسیم بندی نمود. محاسبات داده های ضریب خمیدگی هریرود در طی دوره ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ نشان می دهد که

میانگین ضریب خمش رودخانه در سال ۱۳۵۳ برابر ۱/۳۹ بوده است که در سال ۱۳۹۰ به ۱/۷۳ افزایش یافته و مبین الگوی پیچان رودی است حتی در سال ۱۳۹۰ در بازه دوم بستر رودخانه، میانگین این ضریب به بیش از ۲ افزایش یافته که بسوی رودخانه های با الگوی پیچان رودی شدید گرایش دارد (جدول ۴). ضریب خمش برخی از مئاندرها تا بیش از ۴/۵ میرسد. علت این مسئله وجود سازندهای سست مارنی - لسی آبرفتی و به ویژه تشدید کاربری تا ساحل رودخانه بوده است شعاع این مئاندرها در بازه دوم بسیار زیاد بوده و همین مسئله بارها موجب تخریب و آسیب دیدگی جاده مرزی پل خاتون به سرخس شده است. محاسبه شعاع نسبی مئاندرها بر اساس شعاع دایره محاط بر قوس رودخانه نسبت به عرض رود در نرم افزار اتوکد صورت گرفته است. بر این اساس هرچقدر شعاع نسبی بزرگتر باشد نشانه ملایم بودن قوس های رودخانه می باشد و هر چقدر شعاع نسبی کمتر باشد نشان دهنده تحت فشار بودن و ناپایداری قوس رودخانه است (جدول ۲). مقدار شعاع نسبی در بازه اول هریرود از ۷/۵ در سال ۱۳۵۳ به ۴/۱ در سال ۱۳۹۰ کاهش یافته و نشانگر محدود شدگی و ناپایداری قوس ها می باشد ولی در بازه دوم مقدار شعاع نسبی از ۶/۵ به ۳/۴ کاهش یافته است که مبین تحت فشار قرار گرفتگی و ناپایداری شدید مئاندرها در این قسمت است.

جدول (۱) تقسیم بندی مورفولوژی رودخانه ها بر اساس ضریب خمیدگی (یمانی و همکاران ۱۳۹۱)

بیشتر از ۲	۱/۲۵ تا ۲	تا ۱/۰۶	تا ۱	ضریب پیچشی
		۱/۲۵	۱/۰۵	
پیچان رودی شدید	پیچان رودی	سینوسی	مستقیم	مورفولوژی رودخانه

جدول (۲) مورفولوژی رودخانه ها بر اساس مقدار شعاع نسبی (چن ۱۳۷۳)

زاویه مرکزی به درجه	وضعیت نوع چم رودخانه
۴/۵ تا ۵	آزاد
۷ تا ۸	محدود شده
۲/۵ تا ۳	تحت فشار

مقدار زاویه مرکزی نیز، شاخصی برای تشخیص مورفولوژی رودخانه ها محسوب می شود. کورنیس برای بیان کیفی مورفولوژی رودخانه و توسعه پیچان رودها و تمایز آنها از یکدیگر معیار زاویه مرکزی را مهم تر می داند (تلوری ۱۳۷۱) . دامنه این مقادیر طبق جدول (۳) برای تعیین مورفولوژی بستر رودخانه ها قید شده است. برای محاسبه زاویه مرکزی هریرود و شعاع دایره پس از برآزش دواير مماس بر قوس های مسیر رودخانه، زاویه مرکزی هر قوس در محیط اتوکد بدست آمد. با توجه به جدول (۴) در طول دوره زمانی مورد مطالعه شاخص زاویه مرکزی هریرود از ۱۱۲ (الگوی پیچان

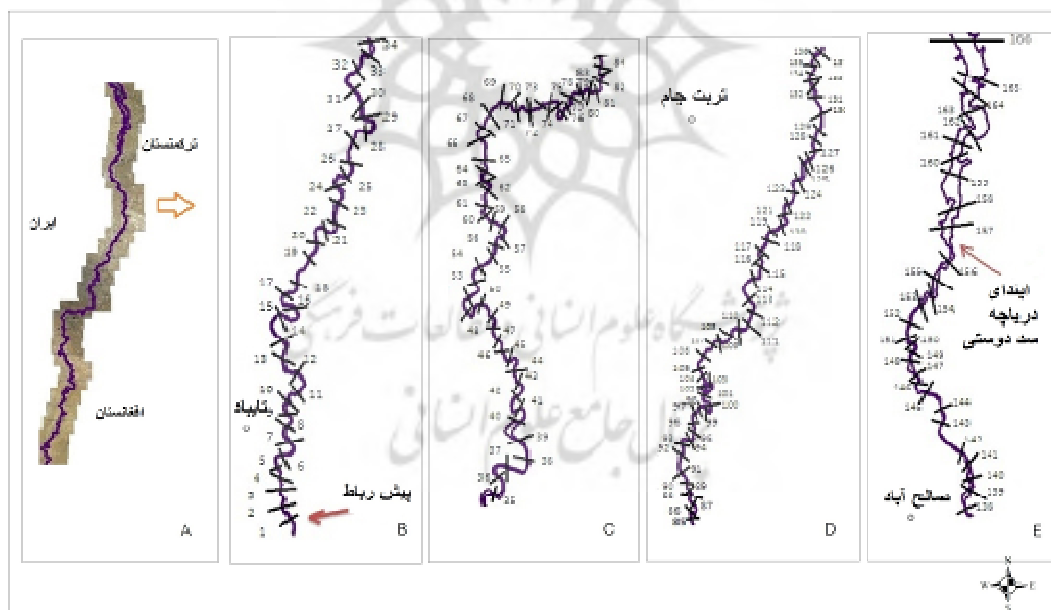
رودی توسعه یافته ( به ۲۲۳ (الگوی پیچان رودی تکامل یافته) رسیده است مقدار توسعه مئاندر شدگی در بازه اول به دلیل کوهستانی بودن و محاط شدگی مئاندرها کمتر بوده و از ۸۶ در سال ۱۳۵۳ به ۱۴۶ در سال ۱۳۹۰ افزایش یافته که نشان دهنده روند الگوی پیچان رودی به الگوی پیچان رودی شدید است ، ولی در بازه دوم به خاطر تشدید فعالیت های آنتروپوژن و سست بودن ساحل رودخانه مقدار زاویه مرکزی از ۱۵۶ در سال ۱۳۵۳ به ۲۹۷ در سال ۱۳۹۰ افزایش داشته که بیانگر الگوی پیچان رودی توسعه یافته به الگوی شاخ گاوی می باشد. به عبارت دیگر میزان توسعه یافتگی پیچان رودی در بازه دوم بسیار بیشتر از بازه اولی بوده است و آسیب های جدی در همین قسمت از جاده مرزی بوجود آمده است. آثار این مئاندر شدگی ها از روستای شیر تپه تا قوش سرزری در مسیر جاده مرزی مشهود می باشد. بطوریکه بخش های نسبتا وسیعی از اراضی زراعی آبادی ها توسط پیچان رودها در این قسمت تخریب شده اند (عشقی ۱۳۸۲ ص ۸۲). تغییرات عرض بستر هریرود نیز در راس قوس های مئاندرها طی دوره ۳۷ ساله زیاد بوده است بطوریکه با افزایش ضریب خمیدگی پیچان رودها عرض بستر نیز توسعه پیدا کرده است مقدار عرض قوس ها از مقایسه فرکانس های ضرایب انحنای مئاندرها در طی دوره ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ مشخص می شود که ، اگرچه تعداد مئاندرها از ۱۷۲ در سال ۱۳۵۳ به ۱۶۶ در سال ۱۳۹۰ کاهش یافته است ولی مقدار ضریب انحنای پیچان رودها طی این دوره بشدت افزایش داشته است . بویژه در بازه دوم هریرود (از مئاندر شماره ۱۰۰ به طرف یازتپه سرخس) به خاطر دشتی شدن پیچان رودها و شدت فعالیت های کاربری در حاشیه بستر این ضریب خمیدگی افزایش بیشتری داشته و خسارات بیشتری را در بر داشته است (جدول ۴). بدین ترتیب آشکار می شود که الگوی مورفولوژیکی مجرای رودخانه تغییرات زیادی داشته است زیرا در طی این دوره خمیدگی پیچان رودها افزایش یافته و بتدریج به صورت اشکال نعل اسبی درآمده اند و در نهایت رودپیچ حذف شده و به صورت مستقیم درآمده است .

جدول (۳) تقسیم بندی مورفولوژی پیچان رودها بر اساس زاویه مرکزی (تلوری ۱۳۷۱)

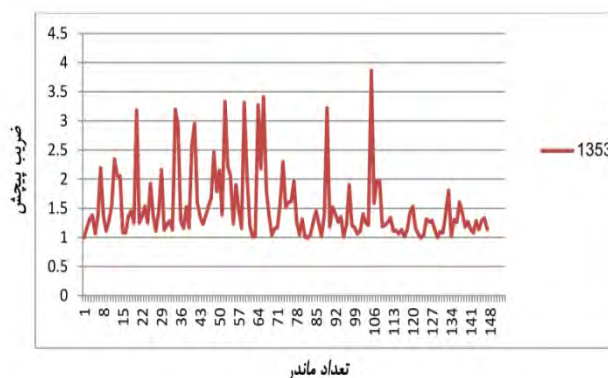
مورفولوژی بستر رود	زاویه مرکزی به درجه
۰	مستقیم
۰ تا ۴۱	شبه پیچان رودی
۴۱ تا ۸۵	پیچان رودی توسعه نیافته
۸۵ تا ۱۵۸	پیچان رودی توسعه یافته
۱۵۸ تا ۲۹۶	پیچان رودی شدید
بیش از ۲۹۶	شاخ گاوی/نعل اسبی

جدول ۴- مقایسه تعداد مائدرها و مشخصات آماری آنها در دوره ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ در مسیر هریرود (محاسبه، نگارندگان بر اساس عکس های هوایی ، سنجش از دور و کنترل میدانی )

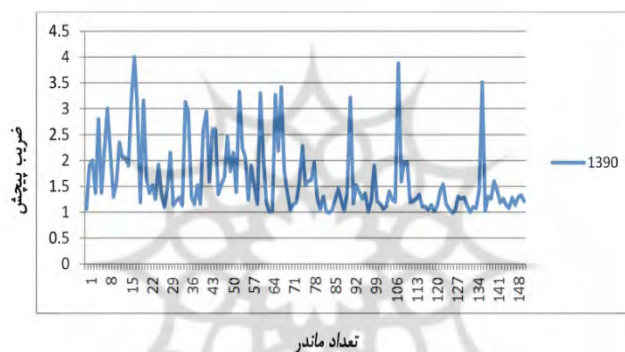
نوع پارامتر	سال ۱۳۵۳	سال ۱۳۹۰
تعداد مائدرها/ فرکانس	۱۷۲	۱۶۶
میانگین ضریب خمش $\alpha$	۱/۳۹	۱/۷۳
انحراف معیار ضریب خمش	۰/۵۸	۰/۵۱
واریانس ضریب خمش var	۰/۳۸	۰/۳۴
شاخص زاویه مرکزی	۱۱۲	۲۲۳
شاخص شعاع نسبی	۵/۸	۴/۹
حداکثر ضریب خمیدگی	۳/۱۹	۳/۸۸
حداقل ضریب خمیدگی	۱/۰۶	۱/۲



شکل (۲)- کدگذاری مائدرهای بستر فعلی رودخانه هریرود از ورودی رودخانه به مرز ایران (شمال شرق شهرستان تایباد) تا یازتپه (جنوب شرق سرخس).



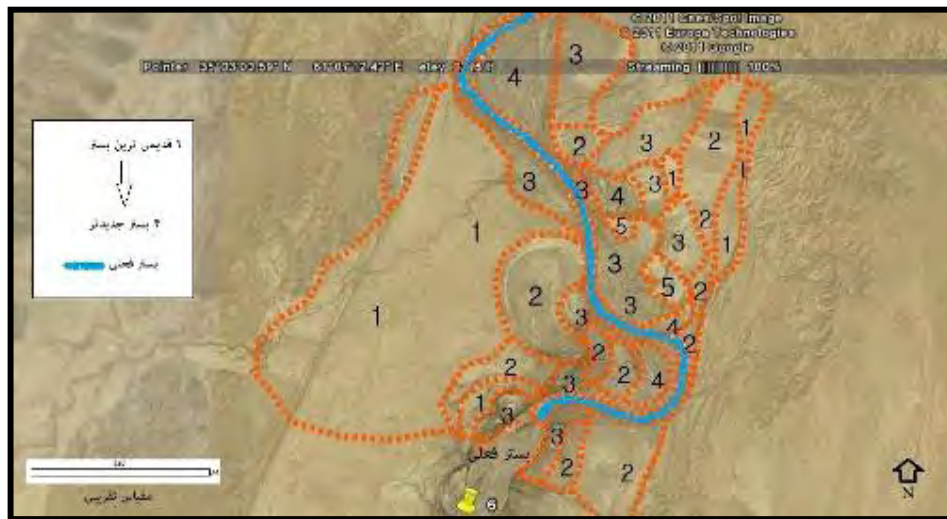
شکل (۳) فرکانس‌های ضریب خمیدگی مآندره‌های بستر رودخانه هریرود بعنوان یک شاخص آماری طی دوره ۱۳۵۳ (محاسبه بر اساس عکس‌های هوایی ۱/۲۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره ای)



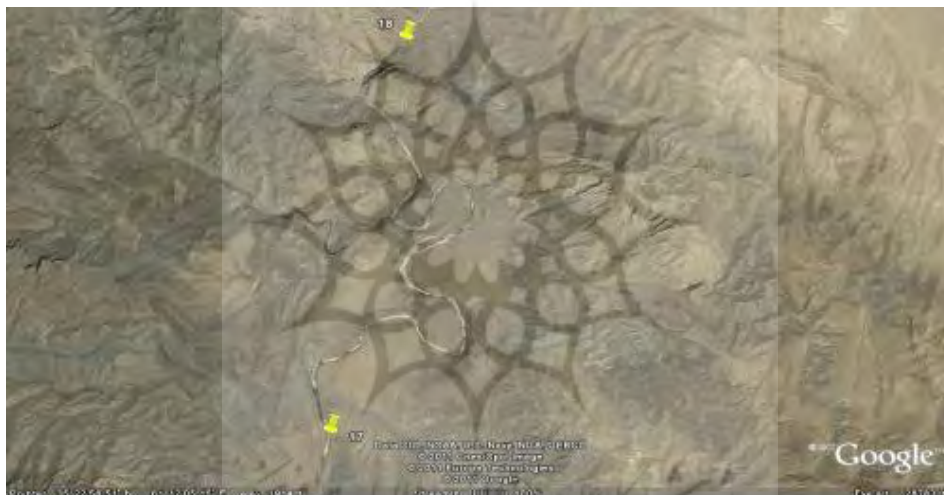
شکل (۴) فرکانس‌های ضریب خمیدگی مآندره‌های بستر رودخانه هریرود بعنوان یک شاخص آماری طی دوره ۱۳۹۰ (محاسبه بر اساس عکس‌های هوایی ۱/۲۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره ای)

بررسی و مقایسه تصاویر ماهواره ای سال ۱۳۹۰ با عکس‌های هوایی سال ۱۳۵۳ نشان داد که بیشتر دیرینه پیچان رودهای مسیر هریرود در سمت ایران بوجود آمده اند و همین مسئله منجر به آب بردگی جاده مرزی و آسیب دیدگی تأسیسات مرزی شده است. موقعیت بستر فعلی هریرود و تعدادی از دیرینه مآندرها، در شکل‌های (۴ و ۵) نشان داده شده است. این پیچان رودهای متروکه شده در واقع همان مسیرهای قبلی بستر هریرود بوده اند که با افزایش ضریب خمیدگی رودخانه و تبدیل آنها به مانداب‌های نعل اسبی، تغییر مسیر داده اند. بنابراین الگوی کلی بستر هریرود از ورود به مرز کشورمان تا خروجی آن از سرخس به صورت مآندری شده است و با هر سیلاب و تغییرات شدید کاربری زمین این الگوی مآندری در حال تشدید شدن است. تغییر الگوی مورفولوژیکی بستر هریرود رابطه مستقیم با سازندهای مسیر بستر داشته است به طوریکه تحولات مورفولوژیکی در مآندره‌های با جنس آبرفتی و سست بسیار بیشتر از مآندره‌های با بستر سخت (آهک و دولومیت) بوده است (جدول شماره ۲). از مجموع ۱۷۲ مآندر در سال ۱۳۵۳ تعداد ۱۰۳ مآندر در بستر سخت و ۶۹ مآندر در بستر سست و همراه با مواد آبرفتی واقع بوده اند. در حالیکه در سال ۱۳۹۰ تعداد مآندره‌های با بستر سخت به ۹۹ و مآندره‌های با بستر سست به ۶۷ مآندر کاهش یافته است ولی ضریب خمیدگی این مآندرها تغییرات شدیدی داشته است.





شکل (۵) - موقعیت بستر فعلی و بسترهای قدیمی قسمتی از رودخانه هریرود که نشان دهنده تغییر الگوی مورفولوژیک آن است



شکل (۶) مورفولوژی مئاندری بستر هریرود بین نوار مرزی تایباد و تربت جام

جدول (۵) نتایج محاسبه ضریب خمش پیچان رودهای با بستر سست و سخت طی دوره ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ (نگارندگان)

بازه دوم، پیچان رودهای با بستر سست (Qt)		بازه اول، پیچان رودهای با بستر سخت (آهک و دولومیت)		نوع پارامتر
۱۳۹۰	۱۳۵۳	۱۳۹۰	۱۳۵۳	
۱/۹۰	۱/۶	۱/۵۱	۱/۲۸	میانگین
۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۳۳	۰/۳۵	واریانس
۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۵۲	۰/۵۹	انحراف معیار
۶۷	۶۹	۹۹	۱۰۳	تعداد رودپیچ
۲۸۰	۱۱۵	۸۵	۳۰	میانگین عرض در راس قوس ها به متر
۲۹۷	۱۵۶	۱۴۶	۸۳	زاویه مرکزی (درجه)

شعاع نسبی	۷/۵	۴/۱	۶/۵	۳/۴
-----------	-----	-----	-----	-----

در بستر های سنگی نواحی کوهستانی به دلیل استحکام نوع سازند اولاً بستر اصلی یا ظاهری با بستر طغیانی تقریباً یکنواخت می باشد و در نتیجه بستر از جابجایی کمی برخوردار بوده و مورفولوژی آن کمتر تغییر کرده است. از سوی دیگر فرم نیمرخ های عرضی مئاندرها در بسترهای سست و آبرفتی بازتر از نیمرخ های مئاندرهای با بستر سخت و مقاوم می باشد. برای محاسبه سینوسیته بازه دوم هریرود که چند مجرایبی بوده است متوسط طول تعدادی از قطعات مجرا با رتبه خاص خود در یک مرحله مشخص از نحوه جریان رودخانه بدست آمد و محاسبات در محیط اتوکد انجام شد تا دقت تغییرات مجرا در طول زمان بیشتر باشد. مقدار سینوسیته این بخش از هریرود بیش از ۱/۵ بدست آمده که نشان دهنده رودخانه های مئاندری شدید می باشد.

جدول (۶) نتایج محاسباتی پارامترهای هندسی هریرود و الگوی مجرا در بازه های مورد مطالعه (نگارندگان ۱۳۹۲)

بازه اول	دوره	ضریب خمشی	زاویه مرکزی	شعاع نسبی	الگوی رودخانه	میانگین حداکثر جابجایی بستر به متر
بازه اول	سال ۱۳۵۳	۱/۲۸	۸۳	۷/۵	شربانی و پیچان رودی محاط	-
	سال ۱۳۹۰	۱/۵۱	۱۴۶	۴/۱	پیچان رود	۷۵
بازه دوم	سال ۱۳۵۳	۱/۴۴	۱۵۶	۶/۵	الگوی رود پیچان رود	حداکثر جابجایی ساحل به متر
	سال ۱۳۹۰	۱/۷۰	۲۹۷	۳/۴	پیچان رود شدید	۳۵۶

### نتیجه گیری

بطور کلی ریخت شناسی رودخانه ها از دو جنبه اهمیت دارند. یکی از جنبه زمین شناسی و سازندهای مسیر بستر و دره ی آن که بر مورفولوژی بستر تاثیر می گذارد. و دوم از جنبه هیدرولیکی و آنتروپوژنیک که تغییرات هندسی بستر رودخانه را سبب می شود. شناسایی روند الگوی پیچان رودی رودخانه های مرزی از طریق روش های آماری دقت بیشتری نسبت به مدل های دیگر دارد. بررسی پارامترهای هندسی و شاخص های زمین آماری رودخانه هریرود نشان می دهد که در طول دوره ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ تعداد پیچان رودها از ۱۷۲ به ۱۶۶ کاهش یافته است و تغییرات خط مرزی را بویژه در بازه دوم به همراه داشته است. همچنین میانگین ضریب خمیدگی در بازه اول رودخانه از ۱/۲۸ به ۱/۵۱ و در بازه دوم از ۱/۴۴ به ۱/۷۰ افزایش یافته است و مبین مئاندر شدگی این رود بویژه در بازه دوم بوده است. سازندهای آبرفتی و لسی

فرسایش پذیر و تشدید کاربری ها تا ساحل رودخانه از مهم ترین عوامل این متاخرشدگی ها می باشد. نتایج محاسبات زاویه مرکزی و شعاع نسبی هریرود نیز مشخص نمود که مورفولوژی مجرا در دوره ۳۷ ساله تغییرات زیادی داشته است. بطوریکه مقدار زاویه مرکزی هریرود از ۱۱۲ به ۲۲۳ رسیده و تغییرات آن در بازه دوم بویژه از پل خاتون تا یاز تپه سرخس بیشتر بوده است (جدول ۶). بنابراین با توجه به افزایش دبی سیلاب ها و بار رسوبی و تشدید کاربری ها در مسیر رودخانه مرزی هریرود الگوی شریانی و پیچان رودی رودخانه به الگوی پیچان رودی شدید تبدیل گردیده است. مهم ترین عوامل کنترل کننده الگوی مجرا در بازه اول فرایندهای رسوبی و دبی سیلاب بوده که در طی فصول تغییرات زیادی داشته است ولی این عوامل در بازه دوم بیشتر مربوط به سازندهای لسی - آبرفتی سست بستر و تشدید کاربری ها تا لبه رودخانه بوده است که منجر به الگوی شدید پیچان رودی مجرای رودخانه گردیده است. این تغییرات موجبات تخریب و آسیب دیدگی تاسیسات عمرانی از جمله تخریب جاده مرزی، آب بردگی تعدادی از میله های مرزی و اراضی زراعی روستاها گردیده است. با توجه به نتایج داده های جدول (۶) و تغییرات اقلیمی بوجود آمده به نظر می رسد که این الگوی متاخرشدگی با شدت بیشتری (بویژه در فصول بهار و پاییز) تداوم می یابد و ضرورت یک برنامه ریزی پایدار مدیریت و ساماندهی رودخانه های مرزی را می طلبد.

### قدردانی و سپاسگزاری

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی تحت عنوان (کاربرد تکنیک های زمین آماری و RS در الگوی مورفولوژیکی بستر رودخانه هریرود) بوده است که با مساعدت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد در سال ۱۳۹۲ انجام شده است و صمیمانه از زحمات این معاونت و کارشناسان آن حوزه سپاسگزاری می شود.

### منابع

- احمدی، حسن (۱۳۸۹) ژئومورفولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران
- افشار حرب، عباس، (۱۳۷۳)؛ زمین شناسی کپه داغ، چاپ اول، تهران: انتشارات سازمان زمین شناسی کشور.
- بهنیا فر و همکاران (۱۳۹۱) مکانیزم های جریان های کوهرفتی در نواحی کوهستانی نمونه موردی، حوضه کنگ در بینالود، مجموعه مقالات همایش ژئومورفولوژی و آمایش و مدیریت زمین، دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز
- پرسکات، جی، ار (۱۳۷۰)؛ گرایش های تازه در جغرافیای سیاسی، ترجمه: دره میرحیدر، انتشارات دانشگاه تهران.
- توسلی نائینی، منوچهر (۱۳۸۷)؛ قانون اساسی و تغییر مرزهای آبی ایران در دریای مازندران، فصلنامه ژئوپلتیک، ماهنامه اطلاعات سیاسی - اقتصادی، صص ۲۵۸-۲۵۷.
- تلوری، عبدالرسول، (۱۳۷۱) شناخت فرسایش کناری در دشتهای رسوبی، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع، انتشارات دانشگاه تهران
- حافظ نیا، محمد رضا و همکاران (۱۳۸۶)؛ علائق ژئوپلتیکی ایران در آسیای مرکزی و فرصت های پیش رو، فصلنامه ژئوپلتیک، شماره ۳.
- داداندیش، پروین (۱۳۸۶)؛ گفتمان ژئوپلتیک در آسیای مرکزی، عرصه های تعامل ایران و روسیه، فصلنامه ژئوپلتیک، شماره ۱.

- درایسدل و همکاران (۱۳۸۳)؛ جغرافیای سیاسی خاورمیانه و شمال آفریقا، ترجمه: میرحیدر، دفتر مطالعات سیاسی و بین‌المللی.
- رضائی مقدم، محمدحسین و خوشدل، کاظم (۱۳۸۸)؛ بررسی پیچ و خم‌های مئاندر اهرچای در محدوده دشت ازومدل و رزقان، جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره پیاپی ۳۳.
- زرقانی، سیدهادی، (۱۳۸۶)؛ مقدمه‌ای بر شناخت مرزهای بین‌المللی، انتشارات دانشگاه علوم انتظامی.
- زرقانی، هادی (۱۳۸۶)؛ عوامل ژئوپلیتیکی موثر بر نقش و کارکرد مرزها با تأکید بر مرزهای ایران، فصلنامه ژئوپلیتیک، شماره ۲.
- زمردیان، محمد جعفر (۱۳۹۱) ژئومورفولوژی ایران، جلد دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد
- زمردیان، محمد جعفر (۱۳۹۲) تکنونیک ژئومورفولوژی، جلد اول، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد
- سازمان نقشه برداری کشور (۱۳۸۹)، تصاویر ماهواره‌ای لندست منطقه شرق کشور
- رضایی مقدم، محمد حسین، ثروتی، محمد رضا و اصغری سراسکنرود، صیاد (۱۳۹۱) بررسی الگوی پیچان رودی رودخانه قزل با استفاده از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، فصلنامه جغرافیا، انجمن جغرافیایی ایران، سال دهم، شماره ۳۴، پاییز ۱۳۹۱
- رضایی مقدم، محمد حسین، ثقفی، مهدی (۱۳۸۷) رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی جلد اول، دینامیک و فرآیندها، انتشارات سمت
- علیزاده، حسین، زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی (۱۳۷۸) جلد اول، شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، (۱۳۸۳)؛ پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی دشت سرخس، هواشناسی و هیدرولوژی، جلد اول، مشهد.
- صفوی، سید یحیی (۱۳۸۸)؛ جغرافیای سیاسی جهان اسلام، عوامل توانمندساز برای دستیابی به وحدت، مجله سپهر، شماره ۷۲، انتشارات وزارت دفاع.
- ضیائی، حجت‌اله (۱۳۸۰) اصول مهندسی آبخیزداری، مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا.
- عشقی، ابوالفضل، قنبرزاده، هادی (۱۳۷۹)؛ ویژگی‌های جغرافیایی آسیای میانه و قزاقستان، انتشارات نیما.
- عشقی، ابوالفضل (۱۳۸۲) نقش عوامل مورفودینامیکی هریرود و عملکرد فرسایش انسانی در تغییرات خط مرز شمال شرق کشور، مجله سپهر، شماره ۴۷ وزارت دفاع و پشتیبانی نیروی‌های مسلح در زمینه نقشه برداری و دورسنجی و علوم جغرافیایی
- معتمد، احمد (۱۳۹۱) ژئومورفولوژی، جلد سوم، فرایندهای دامنه‌ای، آبراهه‌ای، ساحلی و بادی، انتشارات سمت، تهران
- نوحه‌گر، احمد و یمانی، مجتبی (۱۳۸۲)؛ بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب (پایین دست سد میناب)، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۱.
- یمانی، مجتبی و شرفی، سیامک (۱۳۹۱) پارامترهای هندسی و نقش آنها در تغییرات زمانی-مکانی بستر رودها نمونه موردی: رودخانه هرود سرشاخه رود کرخه در استان کردستان، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۲۶
- یمانی، مجتبی و حسین زاده، محمد مهدی (۱۳۸۳)؛ بررسی الگوهای پیچان رودی رودخانه تالار با استفاده از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره پیاپی ۷۳.
- *Brian P. Bledsoe, (2000) Logistic analysis of channel pattern thresholds: meandering, braiding, and incising.*
- *Lazervitz, D.J (1994), The flow of international water law: a violable in: www. Worldwaterdayo2. org: 10-11.*
- *Leopold and Wolman (1997) Meanders , Geo . soc America Bun . no102.*
- *Tim othy J. Beechie, martin liermann, Michael M. Pollok, sava baker, Ieremy Davies (2006) Channel pattern and rivor- floodplain dynamics in for ested.*