جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۱۱، تابستان ۱۳۹۳
صص. ۷۰-۵۷

مطالعهٔ تحوّلات ژئومورفولوژی بستر رودخانهٔ هریرود و تأثیر آن بر مرز بین‌المللی

حجت شاکری زارع* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران
ابوالفضل بهنیافر - استادیار جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد
علی قربانی شورستان - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی، مشهد
معصومه هاشمی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران

وصول: ۱۳۹۲/۱۰/۱۳ **پذیرش:** ۱۳۹۳/۱/۲۱

چکیده

با توجّه به روند پیچیدهٔ جابه‌جایی بستر اصلی و فرسایش در رودخانهٔ مرزی هریرود و اهمّیّت زیادی که تغییرات مورفولوژی این رودخانه در مسائل هیدروپلیتیکی دارد، نیاز به شناخت تغییرات مورفولوژی این رودخانه شدیداً احساس می‌گردد. در صورت پیش‌بینی روند تغییرات مورفولوژی کانال‌های رودخانه‌ای، راهکارهای بهتری را می‌توان برای حلّ مشکلات ارائه داد. با کمّی‌سازی مئاندرهای این رودخانه از روی نقشه‌ها و تصاویر زمان‌دار گذشته و حال می‌توان میزان جابه‌جایی‌های بستر اصلی رودخانه را در دو جهت طولی و عرضی شناسایی نمود. روش تحقیق در این مقاله، به صورت تجربی – آزمایشگاهی بوده است و به شیوهٔ استقرایی در حدّ فاصل سرخس تا سه مرزی تایباد در مسیر هریرود انجام شده است این کمّی‌سازی با بهره‌گیری از GIS و نرم‌افزار SPSS و برداشت‌های میدانی صورت گرفته است. همچنین تأثیر متغیّرهای طبیعی همچون تکتونیک، میزان شیب، نوع سازند و دبی رودخانه، مورد سنجش قرار گرفت تا میزان تأثیر هرکدام از این پارامترها بر جابه‌جایی مئاندرها شناسایی گردد. هدف اصلی از این پژوهش، بررسی تغییرات مورفولوژیک بستر هریرود به عنوان یک رودخانهٔ مرزی و بررسی علل و عوامل تأثیرگذار در این تغییرات بوده است. نهایتاً مشخّص گردید یک سری عوامل محیطی و آنتروپوژنی در جابه‌جایی‌های صورت‌گرفته در بستر هریرود نقش داشته و اینکه جابه‌جایی‌ها بیشتر به سمت ایران بوده است.

واژگان کلیدی: مورفولوژی، هیدروپلیتیک، مئاندر، بستر اصلی و طغیانی، آنتروپوژن، هریرود.

*. نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۳۳۳۰۴۸۴ E-mail: shakerizare@yahoo.com

مقدّمه

یکی از ثروت‌های اصلی یک ملّت، آبی است که به صورت جاری در رودخانه‌های آن کشور جریان دارد و به دلیل نقش آن در مکان‌گزینی و گسترش آبادی‌ها و شهرها، راه‌های ارتباطی و کشاورزی، رودخانه‌ها از گذشته دارای اهمّیّت قابل توجّهی بوده‌اند، به گونه‌ای که از بدو سیر پیشرفت و توسعهٔ اجتماعات بشری، جایگاه خود را در هر مرحله از تمدّن بشری نشان داده‌اند. به همین دلیل، سیستم‌های رودخانه‌ای به عنوان یکی از حیاتی‌ترین عناصر تشکیل‌دهندهٔ سطح زمین، از جنبه‌های گوناگون مورد توجّه انسان بوده‌اند (یمانی و همکاران، ۱۳۸۲).

رودخانه‌های طبیعی تحت تأثیر عوامل و متغیّرهای مختلف همواره از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در تغییر هستند. تغییرپذیری رودخانه‌ها در کوتاه‌مدّت ممکن است تدریجی و پیوسته و در درازمدّت یا تحت شرایط خاص، ناپیوسته و ناگهانی باشد از عمده مسائل مربوط به رودخانه‌ها تغییرات بستر در طی زمان است که ممکن است به تأسیسات انسانی اشکالاتی را وارد سازد و در موارد حادتر اینکه یک رودخانه به عنوان مرزی طبیعی بین دو سرزمین مشخّص شده باشد و تبع مسائل ژئوپلیتیکی را پی خواهد داشت (زرقانی، ۱۳۸۶: ۲۱). الگوی رودخانه‌ها در اثر عواملی مانند زمین‌شناسی، تکتونیک، توپوگرافی و اقلیم شکل می‌گیرد. در مناطقی که حرکات نو زمین‌ساخت ادامه دارند، تغییر شکل‌های ناشی از این فعّالیّت سبب بروز پاسخ سیستم رودخانه به این تغییرات خواهد شد. ناپایداری و تغییر شکل در سنگ بستر به وسیلهٔ آشفتگی در شبکه رودخانه نشان داده می‌شود (ریبولینی و پاگنولو[1]، ۲۰۰۷) واکنش سامانه‌های رودخانه‌ای به فعّالیّت‌های زمین‌ساختی، شدّت و نوع این فعّالیّت‌ها، وابسته به اندازهٔ نسبی رودخانه‌ها است (گاسیون[2] و همکاران، ۲۰۰۱) از نظر ژئومورفولوژی تغییر در مشخّصه‌های هندسی و راستای مسیر، بخشی از تکامل رودخانه به منظور نیل به تعادل نهایی و شرایط پایدار تلقّی می‌شود. وجود سیلاب، نوع سازند، شیب کم از جمله فرایندهای طبیعی مؤثّر بر کانال‌های رودخانه‌ای هستند.

پدیدهٔ سیلاب یکی از مهم‌ترین عوامل به شمار می‌آید و هماهنگ با نقش انسان به عنوان بهره‌بردار اصلی رودخانه در سیستم آبرفتی رودخانه‌ای نقش برجسته‌ای را ایفا می‌نماید (نوحه‌گر و یمانی، ۱۳۸۲) به طور قراردادی رودخانه‌های دارای ضریب مارپیچی بزرگتر از ۱/۵ از نوع مئاندری محسوب می‌شوند (لئوپولد و والمن[3]، ۱۹۷۵)

رودخانهٔ هریرود به عنوان مرز بین ایران و افغانستان در تکوین و تکامل طبیعی خود دست‌خوش تغییر و تحوّلات مستمر گردیده است. از آنجا که این رودخانه به لحاظ تقسیمات کرونولوژیک جزو رودخانه‌های پیر محسوب می‌گردد، با افزایش دبی، فضای لازم برای تغییر مسیر را خواهد داشت و تغییر مسیرهای مکرّر را می‌توان با مقایسهٔ تصاویر زمان‌دار گذشته و حال مشاهده نمود و همین افزایش دبی را می‌توان با اقلیم حاکم منطقه (نیمه‌خشک) که رگباری و آنی بودن از خصوصیّات بارز آن محسوب می‌گردد، مرتبط دانست. منابع پژوهشی نشان می‌دهد در رابطه با رودخانه‌های مرزی از نظر ژئومورفولوژی کار زیادی صورت نگرفته. بعد از قرن بیستم ژئومورفولوژیست‌ها و مهندسان کوشش کردند تا فرم مبنای رودخانه‌ها را در شیب‌ها و مناطق

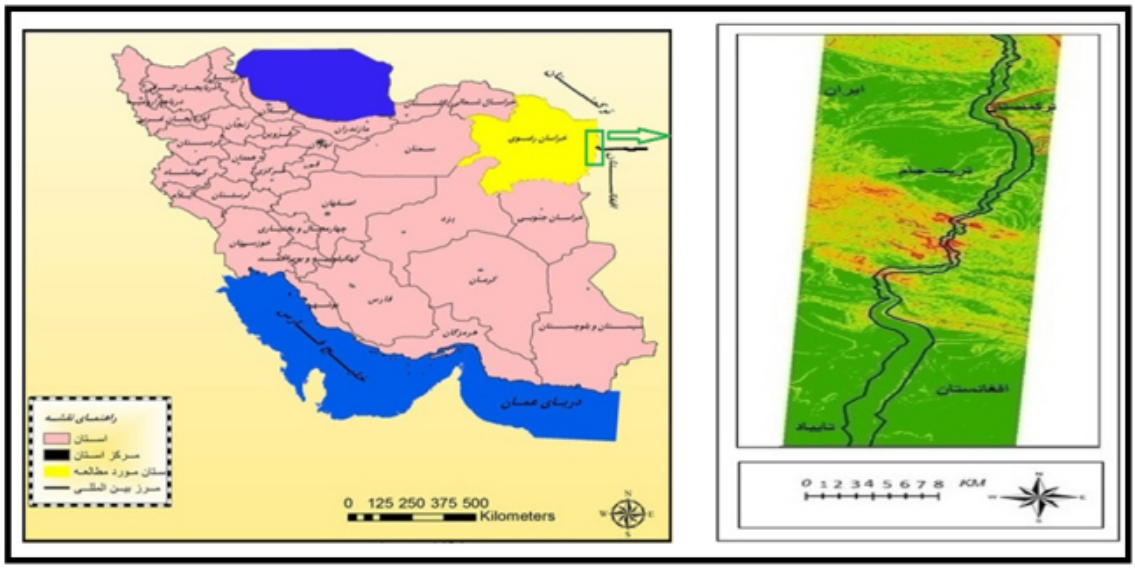
1- Ribolin & Pagnolo
2- Guccione
3- Leopold & Wolman

زهکشی پیش‌بینی کنند. لئوپلد و ولمن (۱۹۷۵) در ارتباط با جدا کردن رودخانه‌های مئاندری از سایر رودخانه‌ها تحقیقاتی را انجام داده‌اند که تأکید زیادی بر تأثیر شیب داشتند کارسون (۱۹۸۴) بر روی مورفولوژی رودخانه‌ها مطالعاتی را انجام داد. شوم و همکاران (۱۹۹۵) در رابطه با سازندهای بستر رودخانه‌های مئاندری آزمایشاتی انجام داد (براین[1]، ۲۰۰۰: ۲).

در ایران نوحه‌گر و یمانی (۱۳۸۲) به بررسی وضعیّت ژئومورفولوژیکی مئاندر و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب پرداخته‌اند. یمانی و حسین‌زاده (۱۳۸۳) در رابطه با ضریب خمیدگی مئاندرهای رودخانه تالار مطالعاتی را انجام دادند. رضایی‌مقدم و خوشدل (۱۳۸۸) به طبقه‌بندی مئاندرها بر اساس زاویهٔ مرکزی کورنایس پرداخته‌اند.

معرّفی منطقهٔ مورد بررسی

محدودهٔ مطالعاتی بین ۶۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۵ دقیقهٔ طول شرقی و ۳۴ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۵ دقیقهٔ عرض شمالی قرار گرفته است رودخانهٔ هریرود در نوار شرقی ایران به عنوان مرز طبیعی بین ایران و افغانستان و ایران و ترکمنستان تعیین شده است (شکل ۱). محدودهٔ آن به ایران به نام پیش رباط واقع در شرق شهرستان تایباد است که پس از گذشتن از شرق شهرستان تربت جام می‌گذرد تا محلّ دریاچهٔ سد دوستی واقع در جنوب شرق شهرستان سرخس ادامه پیدا می‌کند. طول کلّی از سرچشمه تا شهر مرزی سرخس ۹۰۰ کیلومتر (بدون احتساب سرشاخه‌های داخل ایران مانند جام‌رود و کشف‌رود) و مساحت حوضهٔ آن ۷۰۶۰۰ کیلومترمربع است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، ۱۳۸۶: ۶۳).



شکل ۱. موقعیّت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

روش تحقیق شامل تاریخی و تحلیلی - توصیفی و تجربی است برای انجام این تحقیق، از مدل رقومی ارتفاع srtm با دقّت ۳۰ متری از منطقه، نقشه‌های موجود در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که همهٔ منطقه را پوشش می‌دهد، در دسترس نبوده است. لذا برای تکمیل داده‌ها مانند گسل‌های منطقه از سایر منابع مانند نتیجهٔ تحقیقات

1- Brian

سازمان آب منطقه‌ای خراسان که به منظور احداث سد (سد دوستی) بر روی این رودخانه صورت گرفته است استفاده شده است.

ابتدا تصاویر مسیر رودخانه از ورودی به ایران (پیش رباط) تا ابتدای دریاچهٔ سد دوستی در فواصل مشخّص به طوری که وضوح کافی داشته باشد در ۳۲ تصویر پیاپی از محیط گوگل ارث تهیه شد. سپس با بهره‌گیری از GIS و بعد از عملیّات ژئورفرنس نمودن، تصاویر را به طور منظم با در نظر گرفتن پوشش مشترک کنار هم موزاییک شد. در مرحلهٔ بعد با تعریف کردن پروژه در شیپ فایل از نوع پلیگونی به رقومی کردن بستر رودخانه پرداخته شد. از آنجا که تصاویر گوگل ارث جدیدترین تصاویر قابل دسترس هر منطقه محسوب می‌شود برای مقایسه با سال‌های گذشته از تصاویر سازمان جغرافیایی نیروهای مسلّح استفاده شد.

سپس با تعریف پروژه، کدگذاری مئاندرها تعداد مئاندرها مشخّص گردید و در مرحلهٔ بعد هر یک از مئاندرها در محیط GIS با ابزار measure طول واقعی و طول مستقیم جهت محاسبهٔ میزان انحنا اندازه‌گیری شد (میزان انحنا حاصل تقسیم طول واقعی بر طول مستقیم است). نهایتاً اعداد به دست آمده میزان انحناء مئاندرها به نرم‌افزار SPSS منتقل و خروجی‌های لازم مانند میانگین، انحراف معیار و... جهت مقایسه بعد از طبقه‌بندی مئاندرها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در تعیین بافت خاک طی عملیّات میدانی از چند نقطه رودخانهٔ هریرود نمونه خاک برداشت گردید و در آزمایشگاه به روش هیدرومتری نوع بافت خاک مشخّص گردید.

ابزارهای مهم پژوهش حاضر عبارتند از:

الف: مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM با دقّت ۳۰ متری از منطقه

ب: نقشه‌های سایزموتکتونیک و زمین‌شناسی محدوده هریرود.

ج: تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث از منطقهٔ مورد مطالعه.

د: عکس‌های هوایی و داده‌های رقومی تصاویر ماهواره‌ای (داده‌های رقومی تصاویر سنجنده ETM^+ ماهواره لندست با مقیاس ۱۰۰۰۰۰: ۱)

هـ: عملیّات صحرایی در مسیر رودخانه.

نتایج و بحث

بخش اوّل: تغییرات مورفولوژی

نقشه‌برداری و برداشت‌های میدانی بستر رودخانهٔ هریرود

بر اساس عملیّات صحرائی صورت‌گرفته بر روی یکی از مئاندرهای واقع در محلّ پیش رباط مشخّص گردید ساحل سمت ایران، یعنی بخش تخریب‌یافته، با شیب تند (مقعر) و پرتگاهی با ارتفاع ۴ متر بوده (شکل ۲) و ساحل مقابلش در سمت افغانستان (قسمت برآمدهٔ پیچان‌رود) فاقد پرتگاه و با شیب خیلی ملایم است (شکل ۳). مرکز قوس فاصلهٔ ۲ ساحل در واقع عرض رودخانه ۲۸/۵ متر و همچنین فاصلهٔ دو ساحل قسمت انتهایی مئاندر ۱۷ متر و فاصلهٔ طولی رود بین دو قلّه مئاندر ۹۰ متر اندازه‌گیری شد (شکل ۴).

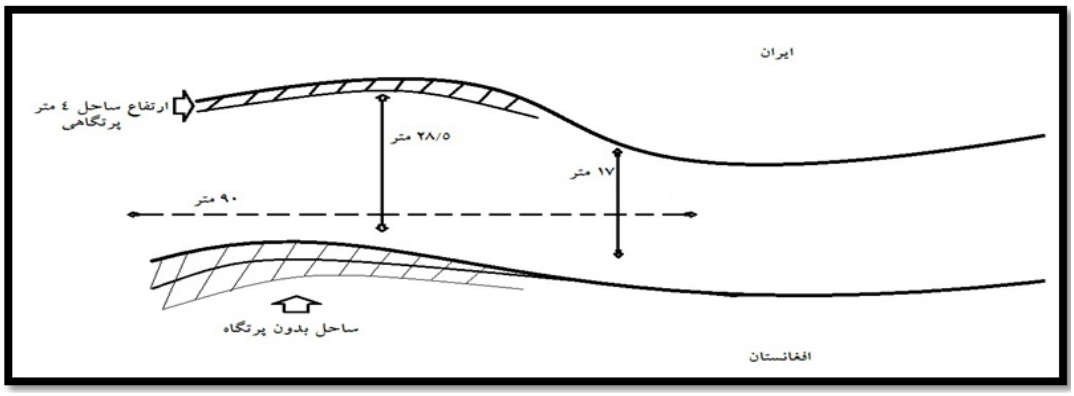
طبقه‌بندی مئاندرهای هریرود در محدودهٔ مورد مطالعه

بعد از شناسایی و شماره‌گذاری مئاندرها (شکل ۵) از روی تصاویر ماهواره‌ای به بررسی آن‌ها پرداخته شد. بستر رودخانه در ابتدای ورود به ایران یعنی مئاندرهای شمارهٔ ۱ تا مئاندر شمارهٔ ۳۹ بیشترین عوامل

تأثیرگذار بر پیچان شدن رودخانه، نوع سازند آبرفتی و شیب کم است. به طوری که بستر بزرگ یا طغیانی پهن‌تر و میزان جابه‌جایی صورت گرفته بستر اصلی بیشتر است؛ و مئاندرهای بیشتر از نوع محاط و دشتی که این مسئله را می‌توان از روی تصاویر ماهواره‌ای زمان‌دار و برداشت‌های صورت‌گرفتهٔ میدانی و وجود مئاندرهای متروک تشخیص داد. مطابق (جدول ۱)، مشاهده می‌شود که میزان میانگین و انحراف معیار مئاندرهای این قسمت از هریرود بیشتر از سایر مئاندرهاست.

شکل ۲. ساحل پرتگاهی سمت ایران

شکل ۳. ساحل با شیب خیلی‌کم سمت افغانستان



شکل ۴. نقاط اندازه‌گیری‌شده طی عملیّات صحرائی، محل پیش رباط، مهرماه ۱۳۹۱

جدول ۱. میانگین، انحراف معیار، واریانس انحناء مئاندرهای با بستر آبرفتی

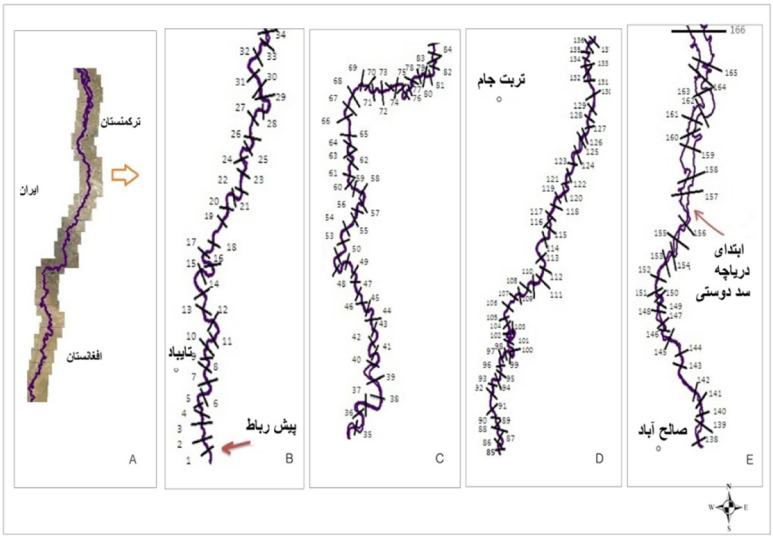
میانگین	۱/۳۷۱۲
انحراف معیار	۰/۵۹۲۶
واریانس	۰/۳۵۱

از مئاندرهای شمارهٔ ۳۹ تا مئاندر ۴۳ کم‌کم وارد بستر سنگی می‌شود و از میزان پهنایی بستر طغیانی کاسته می‌شود و میزان پیشروی بستر طغیانی متأثّر از عوامل تکتونیکی مانند خط گسل و تیغه‌ها است (گسل شهداد در شرق تربت جام، گسل هریرود). از مئاندر شمارهٔ ۴۳ تا ۵۰ با وجود اینکه لبه‌های ساحل دو طرف رودخانه هنوز کاملاً سنگی نبوده و بستر طغیانی کمی پهن و طبق تقسیمات مورفولوژی رودخانه‌ها دارای بستر مئاندری است و از دو خط گسل بزرگ تبعیت می‌کند. از مئاندر شمارهٔ ۵۰ تا ۱۰۴ که وارد ناحیهٔ کوهستانی شده تقریباً مسیر رودخانه ثابت بوده و از پیچ کمتری برخوردار است که می‌توان وضعیّت را متأثّر از جریان خط گسل برشمرد و رودخانه در این ناحیه حالت پیشینه‌رود دارد البتّه سرعت بالا آمدگی زیاد نیست.

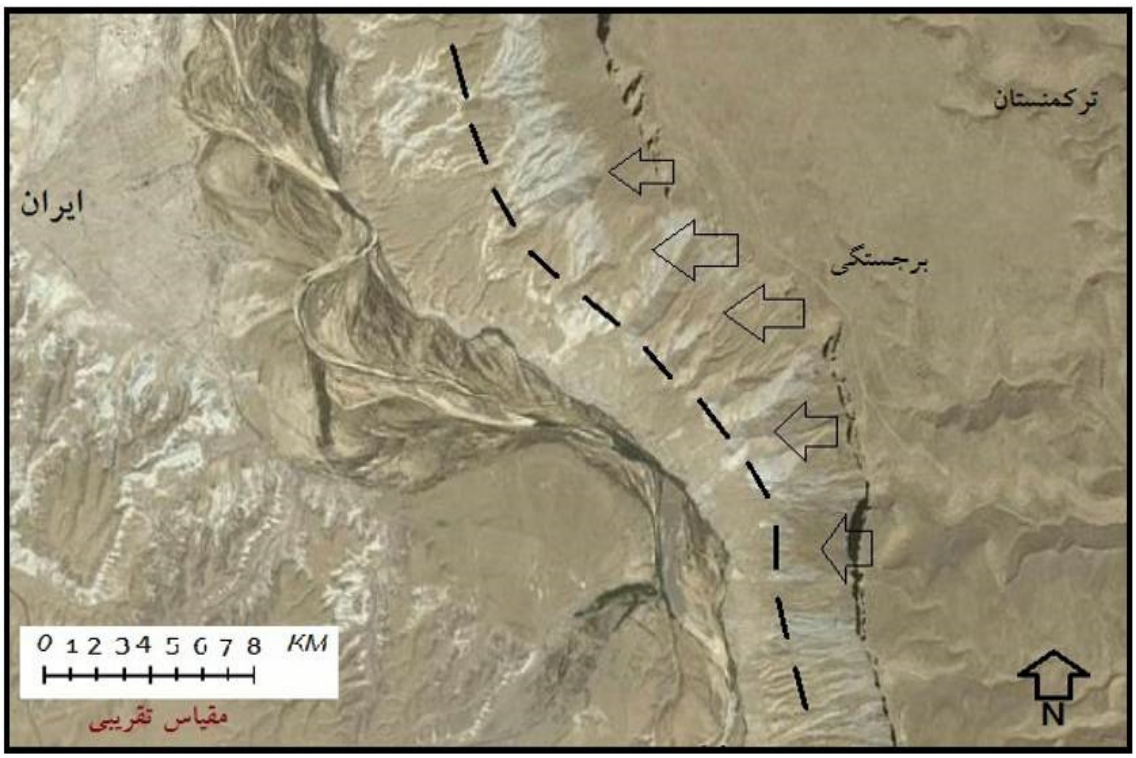
در برخی از بخش‌های در مسیر رودخانه، وجود دیوارهای آهکی باعث فرسایش جداره‌های ساحل رودخانه و از لحاظ عرضی رودخانه پهنای کمی را داراست برای اثبات وجود گسل می‌توان عدم تطابق لایه‌های سنگی یا شکستگی این لایه و یا عمود بر هم بودن لایه‌های چینه نگاری را مدّ نظر گرفت؛ بنابراین به لحاظ تغییر جهت مسیر بستر ظاهری یا اصلی از مئاندر ۵۰ تا ۱۰۴ که در ناحیهٔ کوهستانی جریان دارد می‌توان بیشتر عوامل تکتونیکی را در نظر گرفت به طوری که از روی تصاویر ماهواره‌ای ۲ گسل بزرگ و ۶ گسل کوچک قابل تشخیص است که این خط گسل‌ها منطبق بر بستر رودخانه است. در این ناحیهٔ کوهستانی در برخی نقاط به فاصلهٔ کم، بستر کمی پهن‌تر می‌شود که دلیل آن وجود سازندهای سست در این فاصله‌های کم در بین ناحیهٔ کوهستانی است و این نقاط که بستر پهن‌تر شده مئاندرهای متروک قبلاً در سمت کشور همسایه بوده است. حاشیهٔ ساحل بستر در ناحیهٔ کوهستانی یعنی در بستر سنگی حالت تیغه‌ای و فرم بدلندی دارد. در برخی نقاط مشاهده می‌شود که این تیغه‌ها به صورت ادامه‌دار از وسط بستر سر درآورده‌اند یعنی عمود بر بستر رودخانه که این تیغه یا بالا آمدگی در نتیجه نیروهای تکتونیکی زمین باعث گردید رودخانه تغییر مسیر دهد این مثال را می‌توان در مئاندرهای ۴۳، ۴۵ مشاهده نمود به صورتی که بعد از تغییر مسیر جزئی دوباره بر خط گسل منطبق شده و به مسیر خود ادامه می‌دهد.

از مئاندر شمارهٔ ۱۰۵ به بعد می‌توان اثرات احداث سد که باعث شده سطح اساس افزایش یابد را مشاهده نمود. به این صورت که میزان پهنایی بستر طغیانی از مئاندر شمارهٔ ۱۰۵ تا ابتدای محلّ دریاچهٔ سد دوستی یعنی مئاندر شمارهٔ ۱۴۷ افزایش یافته و میزان جابه‌جایی‌های بستر ظاهری یا اصلی به دلیل کاهش سرعت جریان در نتیجه بالا آمدن سطح اساس است و متقابلاً میزان انحناء نیز افزایش یافته است.

از مئاندر شماره ۱۳۸ (حوالی صالح‌آباد) تا ۱۴۷ ورودی دریاچهٔ سد دوستی در ساحل سمت کشور ترکمنستان برجستگی ممتدی وجود دارد با ظاهری بدلندی که بستر جریان دقیقاً در امتداد این برجستگی که دارای طول تقریبی ۳۵ کیلومتری است جریان دارد (شکل ۶)، امّا در ساحل مقابلش یعنی سمت ایران، به دلیل مسطّح بودن و وجود سازند نرم، امکان پیشروی رودخانه به سمت ایران بیشتر است که تخریب جادّهٔ مرزی در چند نقطه نمایانگر این مسئله است.



شکل ۵. کدگذاری مئاندرهای بستر رودخانهٔ هریرود از ورودی رودخانهٔ هریرود به مرز ایران (شمال شرق شهرستان تایباد) تا دریاچهٔ سد دوستی (جنوب شرق سرخس)

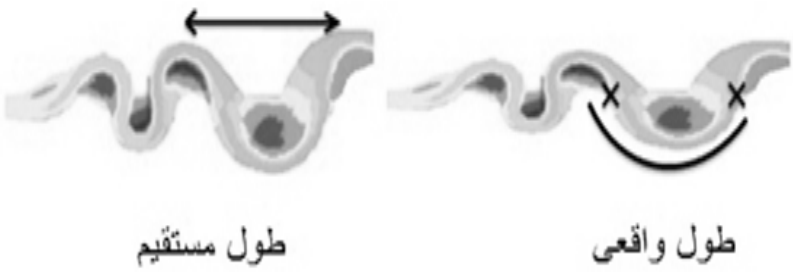


شکل ۶. برجستگی با سازند مارن در امتداد رودخانهٔ هریرود، شمال شرق صالح‌آباد (مأخذ: گوگل ارث)

مقایسهٔ کمّی بستر اصلی رودخانهٔ هریرود در دورهٔ زمانی ۱۳۵۳-۱۳۸۷

برای محاسبه دقیق‌تر این عارضه در مقاطع زمانی یادشده پس از استخراج داده‌های طول بستر (طول واقعی و طول مستقیم) (شکل ۷) میزان خمیدگی هر یک از مئاندرها محاسبه شد. سپس مقایسهٔ میانگین، انحراف معیار و واریانس تمام مئاندرها محاسبه گردید. بعد بر اساس نوع سازند بستر به صورت جداگانه میانگین تغییرات، انحراف معیار واریانس هر طبقه با استفاده از نرم‌افزار SPSS در سال‌های ذکرشده محاسبه می‌گردد.

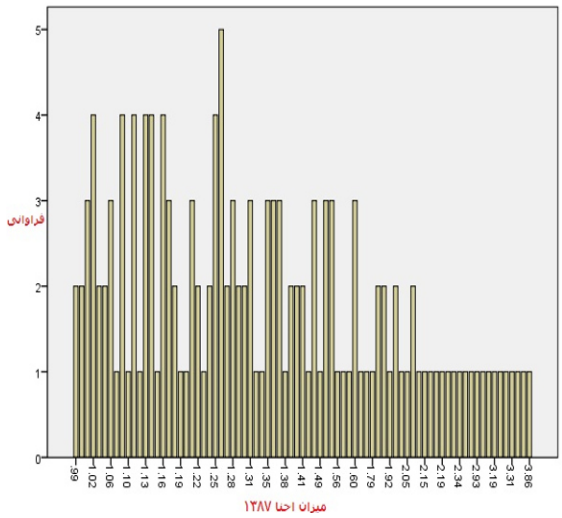
همان‌طور که در جدول ۲ و شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌گردد میانگین انحناء کلّ مئاندرها در دو دورهٔ زمانی ۱۳۵۳ و ۱۳۸۷ با توجّه به اینکه تعداد زیادی از این مئاندرها از بستر سنگی عبور می‌کند و تغییراتی زیادی نداشته‌اند، دارای تفاوت است که خود نمایانگر جابه‌جایی و پویایی رودخانهٔ هریرود است.



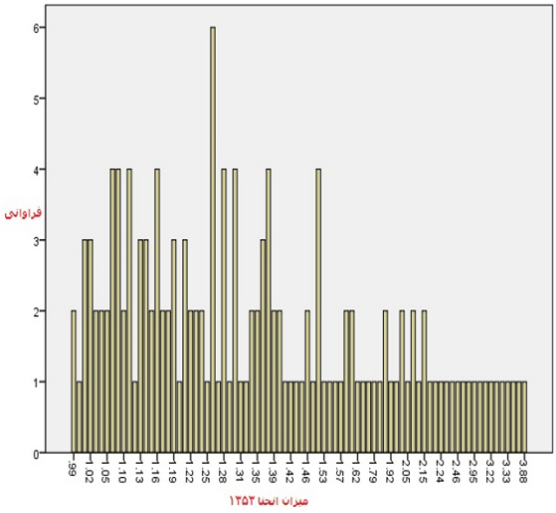
شکل ۷. نمایش طول واقعی و طول مستقیم در رودخانه مئاندری

خمیدگی هر یک از مئاندرها استفاده از رابطهٔ ۱ محاسبه گردیده:

رابطهٔ ۱ طول مستقیم ÷ طول واقعی مئاندر = میزان خمیدگی



شکل ۸. میزان انحناء مئاندرهای بستر هریرود مربوط سال ۱۳۵۳



شکل ۹. میزان انحناء مئاندرهای بستر هریرود مربوط سال ۱۳۸۷

جدول ۲. مقایسهٔ میانگین، انحراف معیار، واریانس انحنا تمام مئاندرها طی سال‌های ۱۳۵۳ و ۱۳۸۷

	میزان انحنا ۱۳۵۳	میزان انحنا ۱۳۸۷
تعداد فراوانی	۱۵۳	۱۴۷
میانگین	۱/۳۹۹۲	۱/۵۲۴۱
انحراف معیار	۰/۵۸۱۶۰	۰/۵۱۱۲۴
واریانس	۰/۳۸۸	۰/۳۴۶

بر اساس محاسبهٔ میانگین و انحراف معیار انحنای مئاندرهای با بستر آبرفتی مطابق (جدول ۳) تفاوت میانگین یعنی ۱/۳۷۱۲ در سال ۱۳۵۲ و ۱/۵۴۷۱ در سال ۱۳۸۷ است، این تفاوت از دید کارشناسان علوم اجتماعی که بیشتر با نرم‌افزار SPSS سروکار دارند از سطح معناداری قوی برخوردار نیست؛ امّا از نقطه‌نظر جغرافیای طبیعی این میزان تفاوت میانگین حائز اهمّیّت است، به این دلیل که طول رودخانه زیاد و در طبیعت از نظر مساحت این تفاوت میانگین نمود بیشتری را دارا است، به‌ویژه اینکه منطقهٔ مرزی نیز باشد. در نهایت اینکه وقتی میانگین انحنا در یک بازهٔ زمانی تغییر کند یعنی جابه‌جایی صورت پذیرفته و نمایانگر پویایی رودخانه است.

جدول ۳. مقایسهٔ میانگین، انحراف معیار، واریانس مئاندرهای با بستر آبرفتی، طی سال‌های ۱۳۵۳ و ۱۳۸۷

	میزان انحنا ۱۳۸۷	میزان انحنا ۱۳۵۳
میانگین	۱/۵۴۷۱	۱/۳۷۱۲
انحراف معیار	۰/۵۲۱۵	۰/۵۹۲۶
واریانس	۰/۳۳۰	۰/۳۵۱

در بسترهای سنگی نواحی کوهستانی اولاً بستر اصلی یا ظاهری با بستر بزرگ یا طغیانی تقریباً یکی است، ثانیاً بستر از جابه‌جای کمی برخوردار می‌باشد، فقط در مدّت‌زمان‌های بسیار طولانی امکان تغییرات جزئی را خواهد داشت البتّه با کمک سایر عوامل و عناصر مکانیکی و شیمیایی. همان‌طور که در (جدول ۴) ملاحظه می‌گردد در رابطه با منطقهٔ مورد پژوهش ما این نکته صدق می‌کند چراکه تفاوت میانگین طی سال‌های ۱۳۵۳ و ۱۳۸۷ بسیار ناچیز بوده است.

جدول ۴. مقایسهٔ میانگین، انحراف معیار، واریانس مئاندرهای با بستر سنگی، طی سال‌های ۱۳۵۳ و ۱۳۸۷

	میزان انحنا ۱۳۸۷	میزان انحنا ۱۳۵۳
میانگین	۱/۸۶۷۱	۱/۷۳۷۵
انحراف معیار	۰/۷۴۱۴۱	۰/۷۳۰۷۲
واریانس	۰/۵۵۰	۰/۵۲۸

بخش دوّم: علل و عوامل تأثیرگذار بر تغییرات بستر هریرود

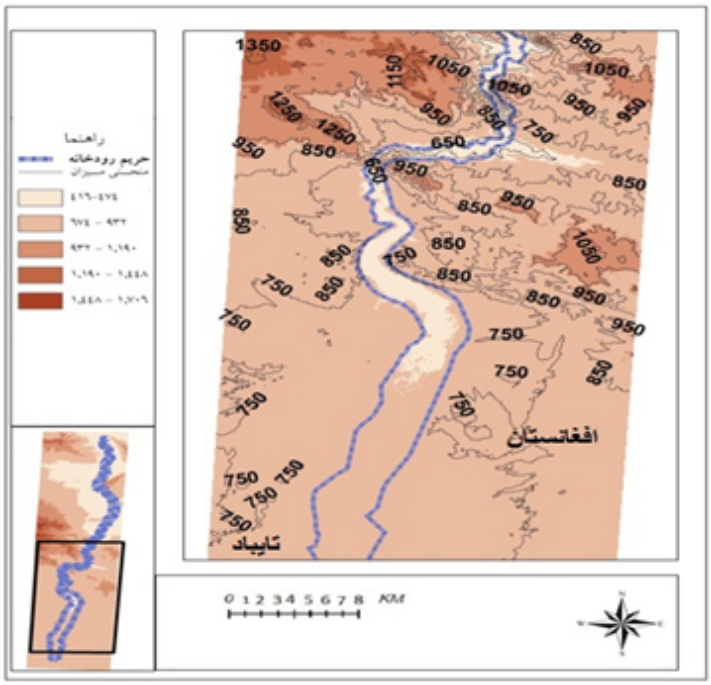
عوامل محیطی و عوامل آنتروپوژن تأثیرگذار بر تغییرات بستر هریرود به صورت زیر می‌باشد (جدول ۵)

جدول ۵. عوامل محیطی و عوامل آنتروپوژن تأثیرگذار بر تغییرات بستر هریرود

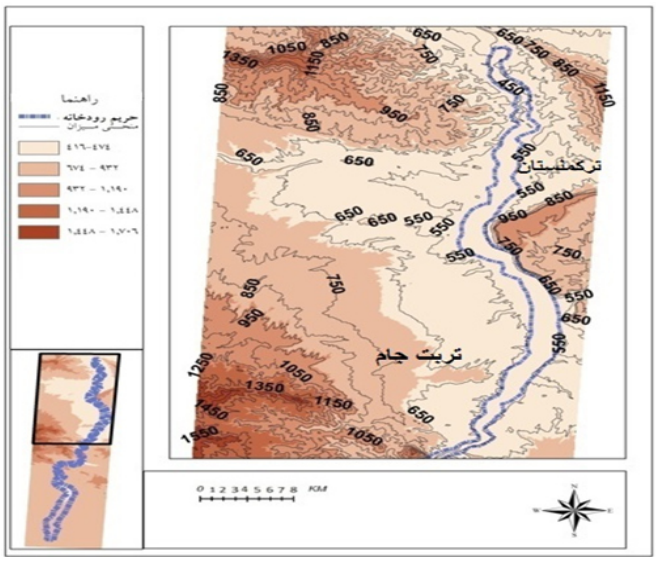
عوامل محیطی	عوامل آنتروپوژن
توپوگرافی	تخلیه روستاهای مرزی (حاشیه رودخانه)
شیب	ساخت سد دوستی
نوع سازند زمین‌شناسی و خاکشناسی	عدم اجرای طرح‌های مناسب آبخیزداری
میزان بارندگی و دبی رودخانه	از بین بردن گیاهان مؤثّر

الف: عوامل محیطی

از نظر ژئومورفولوژی ساختمانی منطقهٔ مورد مطالعه جزو سیستم ناهمواری کپه‌داغ بوده و در انتهای جنوب شرقی این رشته‌کوه و در مرز تلاقی صفحه توران و صفحه ایران واقع شده است (شرکت سهامی آب خراسان رضوی،۵۱:۱۳۸۷). ارتفاعات در این منطقه دارای روند شمال غرب – جنوب شرق می‌باشد که با روند ارتفاعات در کپه داغ همسو است. در حوضهٔ مورد مطالعه بیشترین مساحت مربوط به طبقه ارتفاعی ۶۴۷ تا ۹۳۲ متر یعنی ۲۰۸۷ هکتار معادل ۲۰۸۷۰۰۰۰ مترمربع و کمترین مساحت مربوط به طبقه ارتفاعی ۱۴۴۸ تا ۱۷۰۶ متر، ۱۴ هکتار معادل ۱۴۰۰۰۰ مترمربع اندازه‌گیری شد که مربوط ناحیهٔ کوهستانی می‌باشد. (شکل‌های ۱۰ و ۱۱، جدول ۶).



شکل ۱۰. نقشهٔ توپوگرافی منطقهٔ مورد مطالعه از پیش رباط (شرق تایباد) تا تربت جام.



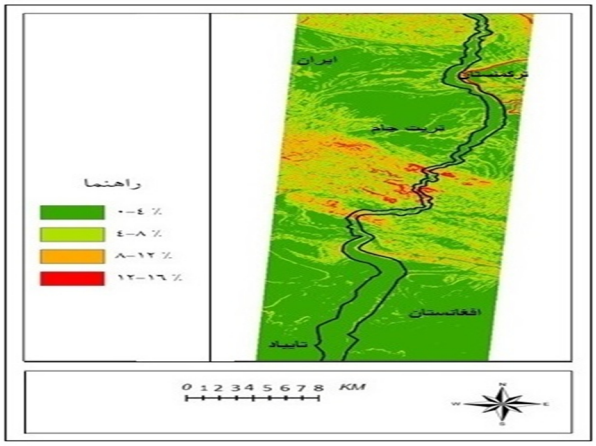
شکل ۱۱. نقشهٔ توپوگرافی منطقهٔ مورد مطالعه از تربت جام تا محلّ سد دوستی.

جدول ۶. طبقات ارتفاعی منطقهٔ مورد مطالعه همراه با مساحت هر طبقه

طبقهٔ ارتفاعی	مساحت به کیلومترمربع
۴۱۶-۴۷۴	۶
۴۷۴-۹۳۲	۲۰
۹۳۲-۱۱۹۰	۲
۱۱۹۰-۱۴۴۸	۰/۲
۱۴۴۸-۱۷۰۶	۰/۱

از نظر شیب نیز در یک رده‌بندی کلّی می‌توان منطقه را در دو پهنه پرشیب و شیب ملایم طبقه‌بندی کرد که بر طبق این دسته‌بندی واحدهای کوهستان و دشت از هم تفکیک شده‌اند.

منطقهٔ مورد مطالعه دارای شیب کم با دشت‌های سیلابی است که از سرعت رواناب کاسته شده و متناسب با این شیب کم، رسوب‌گذاری مواد صورت می‌گیرد و هم شرایط برای تغییر مسیر جریان و ایجاد مئاندرهای آزاد فراهم می‌آید که این قسمت در طبقه ۰ تا ۴ درصد قرار دارد که در شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد. نهایتاً مساحت هر طبقه شیب محاسبه شده (جدول ۷) که بیشترین مساحت مربوط به طبقه ۰ تا ۴ درصد یعنی ۱۹۹۹ هکتار معادل ۱۹۹۹۰۰۰۰ مترمربع به دست آمد.

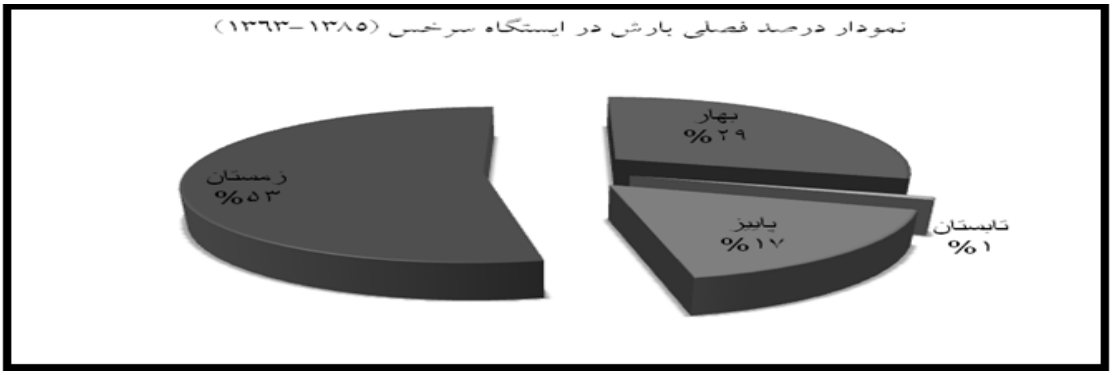


شکل ۱۲. شیب از پیش رباط (شرق تایباد) تا محل سد دوستی

جدول ۷. طبقات شیب منطقهٔ مورد مطالعه به همراه مساحت

درصد تجمّعی	درصد	شیب	مساحت (کیلومترمربع)	میانگین	شیب وزنی
۰/۴	۰/۴	۴۰	۲۰	۲	۰-۴
۰/۷۶	۰/۳۶	۳۶	۶	۶	۴-۸
۰/۹۶	۰/۲	۲۰	۲	۱۰	۸-۱۲
۱	۰/۰۴۲	۴/۲	۰/۳	۱۴	۱۲-۱۶
	۱	۱۰۰			

از نظر اقلیمی بیشترین پارامتر تأثیرگذار بارندگی است چراکه بارندگی‌های آنی و یا رگباری از ویژگی‌های این منطقه بوده و موجب تشکیل سیلاب‌های مؤثّر بر مورفولوژی رودخانه‌ها گردیده است (شرکت سهامی آب خراسان رضوی، ۱۳۸۳: ۲۶) آمار و محاسبات بارندگی‌های فصلی سرخس نشان می‌دهند که از کل بارندگی‌های سالانه سرخس که برابر ۶/۱۸۷ میلی‌متر است. ۵۴/۸ میلی‌متر آن در بهار، ۱/۲ میلی‌متر آن در تابستان، ۳۱/۵ میلی‌متر آن در پاییز و ۱۰۰/۱ میلی‌متر آن در زمستان رخ می‌دهد؛ یعنی بارندگی سالانه در بهار ۲۹ در صد، تابستان ۱ درصد، پاییز ۱۷ درصد و زمستان ۵۳ درصد رخ می‌دهد (شکل ۱۳)؛ بنابراین بیش از ۵۰ درصد از بارندگی‌ها در فصل زمستان رخ می‌دهد.



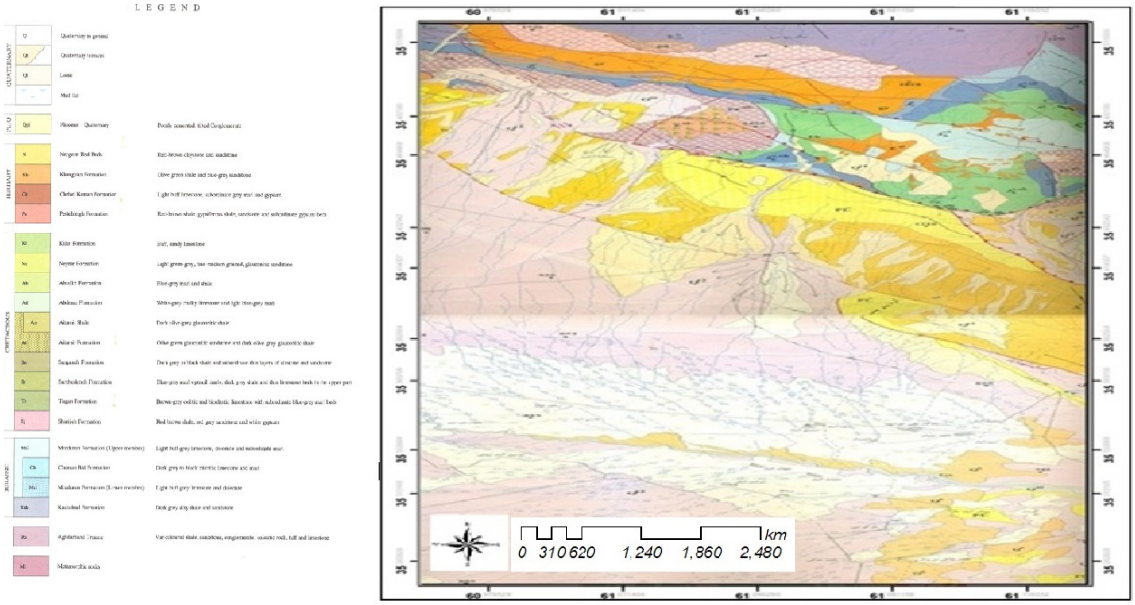
شکل ۱۳. نمودار درصد فصلی بارش در ایستگاه سرخس (۱۳۶۳-۱۳۸۵)

از نظر زمین‌شناسی نیز بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازندهای غالب بستر هریرود بیشتر نهشته‌های آبرفتی جوان و در برخی نقاط پوشیده از ماسه‌های بادی می‌باشد (افشار حرب، ۱۳۷۳: ۴۸). در برخی نقاط در طول مسیر به سمت شمال دارای قطع‌شدگی توسّط سایر سازندها مثل کنگلومرای دانه متوسّط به رنگ زرد است البتّه در طول مسیر نهشته‌های آبرفتی قدیمی نیز مشاهده می‌شود، آن قسمت از بستر رودخانه که از ناحیهٔ کوهستانی عبور می‌کند به صورت مارن‌های گچ‌دار قرمزرنگ، سیلت سنگ و ماسه‌سنگ است. (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، ۱۳۷۸: ۴۱)

ب: عوامل آنتروپوژن

به طور یقین در کنار عوامل محیطی عوامل انسانی نیز در جابه‌جایی‌های صورت گرفته در بستر هریرود تأثیرگذار بوده که مهم‌ترین آن‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

- تخلیهٔ روستاها البتّه بیشتر در سمت ایران، این مسئله از این جهت حائز اهمّیّت است که بودن انسان در حاشیهٔ رودخانه‌ها، مانع از طغیان و پیشروی آب به سمت مزارع و روستا می‌گردد در حالی که با مشاهدهٔ تصاویر ماهواره‌ای می‌بینیم که بیشتر روستاهای تخلیه‌شده در حاشیه رودخانه در زمان طغیان آب به زیر آب رفته و به سمت ایران پیشروی داشته است.



شکل ۱۴. نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقهٔ مورد مطالعه

- ساخت سد دوستی، از آنجایی که دریاچهٔ این سدّ عظیم ۳۵ کیلومتر طول دارد (شرکت طوس آب مشهد، ۱۳۸۴: ۱۶) و باعث کُند شدن جریان آب رودخانه به‌ویژه در قسمت منتهی به دریاچه سد می‌شود، رودخانه این فرصت را پیدا می‌کند تا به سمتی که دارای شیب کمتر و سازند سست‌تر است جریان و قوس پیدا نماید.
- عدم اجرای طرح‌های آبخیزداری در آن قسمت که رودهای کوچک و فرعی وارد رودخانه می‌شود (ضیائی، ۱۳۸۰: ۵۵). به این صورت که در زمان ورود به رودخانه اصلی باعث عقب‌نشینی دهانه خروجی رود فرعی می‌گردد.
- از بین بردن گیاهان به منظور اینکه محلّی برای کمین قرار گرفتن اشرار و قاچاقچیان نباشد.

نتیجه‌گیری

با مقایسه تصاویر زمان‌دار و شمارش تعداد مئاندرها در دو دورهٔ زمانی و نهایتاً اندازه‌گیری ضریب انحنای هرکدام از مئاندرها و محاسبه میزان میانگین و انحراف معیار کلّ مئاندرها (جدول ۸) در دو دورهٔ زمانی و همچنین مئاندرهای که در بستر آبرفتی و سنگی به صورت جداگانه محاسبه گردید، مشخّص شد بستر اصلی بر روی بستر بزرگ جابه‌جایی‌های داشته است.

جدول ۸. مقایسهٔ میانگین، انحراف معیار، واریانس انحنا تمام مئاندرها طی سال‌های ۱۳۵۳ و ۱۳۸۷ مئاندر ۱ تا ۱۴۷

	میزان انحنا ۱۳۵۳	میزان انحنا ۱۳۸۷
تعداد فراوانی	۱۵۳	۱۴۷
میانگین	۱/۳۹۹۲	۱/۵۲۴۱
انحراف معیار	۰/۵۸۱۶۰	۰/۵۱۱۲۴
واریانس	۰/۳۸۸	۰/۳۴۶

بررسی‌های انجام شده در بخش پایین‌دست هریرود آشکار نمود که از لحاظ سیکل فرسایش هریرود در نقطه مرزی به مرحلهٔ پیری رسیده و شروع به مئاندرهای زیاد از نوع محاط و دشتی می‌کند از آنجا که رودخانه‌ها حالت دینامیکی دارند قلمداد کردن آن‌ها به عنوان خط مرزی با مشکلات زیادی روبه‌رو می‌شود. زیرا رودخانه‌ها در طی زمان با تغییر بستر و تحوّلات مورفولوژیک در حواشی مواجه‌اند.

بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی رودخانهٔ هریرود از محل پیش رباط (شرق تایباد) تا ابتدایی دریاچهٔ سد دوستی مهم‌ترین پارامترهایی میزان شیب، نوع سازند، تغییرات دبی و تکتونیک به ترتیب اثرگذار بوده، به دلایلی که بیان می‌شود:

شیب: رودخانهٔ هریرود بیشتر در شیب ۴ و کمتر از ۴ درصد جریان دارد و این شیب شرایط را برای مئاندرهای محاط و دشتی فراهم می‌سازد. چراکه در این شیب کم، بستر جریان امکان پیشروی به اطراف را دارا می‌باشد. این مئاندرها بیشتر از محل پیش رباط تا ابتدایی ورود به ناحیهٔ کوهستانی (شرق تربت جام) یعنی آن قسمت از هریرود که مرز ایران – افغانستان محسوب می‌شود متمرکز هستند.

نوع سازند: بر اساس نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی (شکل ۱۴)، نوع سازند قسمت اعظم هریرود آبرفت‌های جدید و قدیم می‌باشد؛ و به لحاظ جنس و بافت خاک، بر اساس نمونه‌های برداشت‌شده از بستر رودخانهٔ هریرود و انجام مطالعات آزمایشگاهی ابتدا به روش هیدرومتری مشخّص گردید، بافت بستر فعلی شنی لومی است؛ که بافت سنگین محسوب می‌شود؛ و بسترهای متروکه پوشیده از ماسه‌بادی و دارای بافت لومی شنی می‌باشد؛ که این سازند زمینه را جهت جابه‌جایی و پیشروی بستر اصلی فراهم می‌سازد البتّه با شیب کم بیشتر نمود پیدا می‌کند.

دبی: با توجّه افزایش میزان دبی و متقابلاً افزایش قدرت جریان در فصل زمستان و بهار در بسیاری از نقاط باعث تغییر بستر جریان شده که بر روی تصاویر ماهواره‌ای قابل مشاهده است و همچنین تخریب و عقب‌نشینی قسمت کاو مئاندر. این عامل نیز در بسترهای با شیب کم و سازند سست بیشتر اثرگذار است.

تکتونیک: این عامل در برخی نقاط که خط گسل و با امتدادی عمود بر بستر جریان می‌باشد، باعث تغییر مسیر بستر جریان شده؛ امّا خط گسل‌های که در امتداد مسیر بستر جریان می‌باشد باعث شده تا مسیر جریان از امتداد خط گسل تبعیت کند و دچار تغییرات چندانی نشود.

منابع

افشار حرب، عباس (۱۳۷۳) **زمین‌شناسی کپه‌داغ**، چاپ اول، تهران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

جهاد دانشگاهی، ۱۳۸۹، **طرح آمایش**، مشهد.

رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ خوشدل، کاظم (۱۳۸۸) بررسی پیچ‌وخم‌های مئاندر اهرچای در محدوده دشت ازومدل و رزقان، **جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای**، ۳۳، صص. ۱۱۲-۱۰۱.

زرقانی، سید هادی (۱۳۸۶) **مقدمه‌ای بر شناخت مرزهای بین‌المللی**، انتشارات دانشگاه علوم انتظامی.

سازمان نقشه‌برداری کشور (۱۳۸۹) **نقشه‌های توپوگرافی ۵۰۰۰۰: ۱ منطقه هریرود و تصاویر هوایی ۴۰۰۰۰: ۱ منطقه**.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان (۱۳۷۸) **زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی**، کتاب اول، جلد اول، شمارهٔ گزارش ۱۲۲۳ـ۲۳۲: مشهد.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان (۱۳۸۳) **پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی دشت سرخس، هواشناسی و هیدرولوژی**، جلد اول، شماره گزارش، ۱۹۷۱/۱ـ۲۳۰۱۹۴، مشهد.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان (۱۳۸۶) **مطالعات تلفیقی هیدروژئولوژی، تغذیهٔ مصنوعی و آب زیرزمینی**، مرحلهٔ اوّل، شمارهٔ گزارش ۳۰۵۸-۴۳۰۲۸۲، مشهد.

شرکت طوس آب (۱۳۸۴) **مطالعات واحد سدسازی**: مشهد.

ضیائی، حجت اله (۱۳۸۰) **اصول مهندسی آبخیزداری**، دانشگاه امام رضا، مشهد.

نوحه‌گر، احمد؛ یمانی، مجتبی (۱۳۸۲) بررسی وضعیّت ژئومورفولوژیکی پیچان‌رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب (پایین‌دست سد میناب)، **پژوهش‌های جغرافیایی**، ۵۱، صص. ۸۴-۶۵.

یمانی، مجتبی؛ حسین‌زاده، محمد مهدی (۱۳۸۲) روش‌های بررسی تغییرات بستر و الگوی رودخانه بابل در محدوده جلگه ساحلی، **نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی**، ۲ (۲)، صص. ۷۲-۵۱.

یمانی، مجتبی؛ حسین‌زاده، محمد مهدی (۱۳۸۳) بررسی الگوهای پیچان‌رودی رودخانه تالار با استفاده از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، **فصلنامه تحقیقات جغرافیایی**، ۷۳، صص. ۱۵۴-۱۴۴.

Brian P. B (2000) **Logistic analysis of channel pattern thresholds: meandering, braiding, and incising.**

Guccione, M. J., Mueller, K., Champion, J., Shepherd, S., Carlson, S.D., Odhiambo, B., Tate,A. (2001) Stream Response to Repeated Coseismic Folding, Tiptonville Dome, New Madrid Seismic Zone, **Geomorphology**, 43, pp. 313-349.

Lazervitz, D.J (1994) **The flow of international water law**: a violable in: www. Worldwaterdayo2. Org, 10-11.

Leopold, Wolman (1957) **Meanders**, Geo. soc America Bun. V71.

Tim Othy J; Martin L.B; Pollok, M. M; Baker, S; Davies, I. (2006) **Channel pattern and rivor- floodplain dynamics in for ested.**

Ribolin, A., Pagnolo, M. (2007) Drainage Network Geometry versus Tectonics intheArgentera Massif (French-Italian Alps), **Geomorphology**, 93 (3-4), pp. 253-266.