

تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرينه‌رود با استفاده از روش‌های ژئومورفومتریکی

منصور خیری زاده آروق* - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

محمدحسین رضایی مقدم - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

معصومه رجبی - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

رسول دانشفراز - دانشیار گروه عمران، دانشگاه مراغه.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۲/۰۴

چکیده

مجرای رودخانه‌های ابرفتی سیستم‌های دینامیکی هستند که در معرض تغییرات مختلفی می‌باشند. در این رابطه، جابجایی مجرا و فرایندهای مرتبط باعث مخاطراتی از قبیل آب‌سنگری، تخریب جاده‌های ارتباطی و از بین رفتن اراضی می‌شود. از این رو، پایش و نظارت بر تغییرات مجرای رودخانه‌ها از جمله اقدامات اساسی در زمینه مدیریت رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی می‌باشد. در تحقیق حاضر، تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرينه‌رود (جیغاتی‌چای) در طی ۳۰ سال گذشته بررسی شده است. این پژوهش متکی بر کارهای میدانی و آزمایشگاهی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی و داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری می‌باشد. به منظور تحلیل‌های کمی از روش‌ها و شاخص‌های ژئومورفومتریکی به همراه مدل HEC-RAS استفاده شد. مجرای رودخانه در بالادست سد انحرافی نورزولو به دو بازه (از ابتدای بازه مطالعاتی تا شهرک صنعتی شاهین‌دژ به‌عنوان بازه اول و از این شهرک تا محل سد مذکور به‌عنوان بازه دوم) و از پایاب سد انحرافی نورزولو تا چاله ارومیه به سه بازه (از پایاب این سد تا شهر میاندوآب به‌عنوان بازه سوم، از میاندوآب تا روستای چلیک به‌عنوان بازه چهارم و از این روستا تا مصب به‌عنوان بازه پنجم) تقسیم‌بندی شد. پلان‌فرم مجرا در بازه‌های بالادست سد انحرافی از نوع ماندیری با میان‌برهای شوت (میان‌پشته‌ای) می‌باشد. از پایاب سد نورزولو تا شهر میاندوآب، در نتیجه دخالت‌های انسانی تبدیل به شبه‌ماندیری شده و سپس دوباره الگوی ماندیری ظاهر می‌شود. با اینکه توان رودخانه در بازه اول نسبت به سایر بازه‌ها زیاد است اما به علت مواجهه با یک بستر آرمورینگ و برخورد کناره‌های رودخانه به واحد کوهستان، از انجام کار ژئومورفیک محدودی برخوردار می‌باشد. در حالی که توان نسبتاً بالای رودخانه، افزایش پهنه‌های سیل‌گیر، پوشش گیاهی پراکنده، کنترل محدود متغیر زمین‌شناسی و فرسایش‌پذیری زیاد مواد کناره باعث شده است که بازه دوم دارای بیشترین میزان دینامیک عرضی باشد. از پایاب سد نورزولو تا شهر میاندوآب به علت برداشت شن و ماسه بستر و کناره‌ها، رودخانه در بستری عریض و گود افتاده جریان می‌یابد و ارتباط آن با دشت سیلابی خود قطع شده است. این شرایط تا حدودی در بازه پایین دست نیز دیده می‌شود و بنابراین از نظر دینامیک جانبی، غیرفعال محسوب می‌شود. در بازه انتهایی نیز خاصیت چسبندگی رس با توان پایین رودخانه و شیب ملایم کناره‌ها توأم شده و توسعه و مهاجرت ماندرها از آهنگ پایینی برخوردار شده است. نتایج نشان‌دهنده افت چشمگیر دینامیک جانبی مجرا در طی ۱۵ سال گذشته است. شاخص‌های ژئومورفومتریکی برای بازه‌های پایاب سد نورزولو نشان‌دهنده دینامیک بسیار پایین و تنگ‌شدگی مجرا در طی این بازه زمانی می‌باشد. دلیل اساسی این امر مربوط به کاهش شدید دبی رودخانه (تقریباً دو سوم) و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. کاهش دینامیک جانبی در بازه‌های بالادست سد نورزولو به‌صورت افت نرخ مهاجرت جانبی مجرا، کاهش قابل توجه رخداد میان‌برهای شوت و تمایل بیشتر رودخانه به الگوی ماندیری نمایان شده است.

واژگان کلیدی: پلان‌فرم، تغییرات جانبی مجرا، ژئومورفومتری، ماندیری، زرينه‌رود.

مقدمه

رودخانه‌ها توسط آب و رسوب تغذیه می‌شوند و به نوسانات ذاتی این ورودی‌ها پاسخ می‌دهند. بنابراین، همیشه در یک حالت دینامیک می‌باشند (سیکستا^۱، ۲۰۰۴: ۱۳). این تغییرات می‌تواند درون‌زاد یا برون‌زاد باشد. تغییرات درون‌زاد به صورت ذاتی در رژیم رودخانه وجود دارند و شامل مهاجرت^۲ کانال، میان‌برها و تغییر مسیر مجرا می‌باشند. تغییرات برون‌زاد در پاسخ به تغییرات خارجی از قبیل نوسانات اقلیمی یا تغییر رژیم‌های آب و رسوب در نتیجه مداخلات انسانی به وجود می‌آیند (گارد^۳، ۲۰۰۶: ۳۱۵). بنابراین، سیستم‌های رودخانه‌ای در نتیجه فرایندهای عادی فرسایش و رسوب‌گذاری دست‌خوش تغییر می‌شوند و نسبت به تغییر اقلیم، سطح اساس، تکتونیک و اثرات انسانی پاسخ می‌دهند. از این‌روست که در گذر زمان، تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در مورفولوژی و دینامیک سیستم‌های رودخانه‌ای صورت می‌گیرد (کاندولف و پیگای^۴، ۲۰۰۳: ۱۰۵). از طرف دیگر، خودتنظیمی^۵ و تغییرپذیری مجرای رودخانه‌ها می‌تواند مخاطراتی را به صورت سیلاب‌ها، فرسایش کناره یا آب شستگی بستر ایجاد کند (وول^۶، ۲۰۰۴: ۲۹). به همین دلیل است که جابجایی جانبی و پایداری رودخانه‌ها از نظر ژئومورفیکی، مهندسی و اکولوژیکی مورد توجه خاص می‌باشد. جابجایی مجرا می‌تواند زمین‌های با ارزش را فرسایش داده، به عنوان یک مخاطره مطرح شده و سازه‌های مجاور را تهدید کند. در واقع، تمایل رودخانه‌های طبیعی به مهاجرت فعالانه در دشت‌های سیلابی، همراه با استقرار و بهره‌برداری روزافزون انسان از دشت‌های سیلابی منجر به کشمکش بین طبیعت و نوع بشر شده است (سیکستا، ۲۰۰۴: ۱۳).

تحرك جانبی، یکی از مهم‌ترین و معمول‌ترین تغییرات مجرای رودخانه‌ها می‌باشد. بسته به شرایط، حرکت جانبی می‌تواند به شکل‌های مختلفی از قبیل: تنگ‌شدگی، عریض‌شدگی، مهاجرت مماندر، تغییر مسیر و میانبرها صورت گیرد. فرم مختلف پاسخ وابسته به شرایط ورودی، الگوی موجود و هندسه کانال می‌باشد (ریچارد^۷، ۲۰۰۱: ۲۳). آهنگ جابجایی جانبی مجرا بستگی به مقاومت کناره مقعر در مقابل فرسایش، تداوم و بزرگی جریانات، شعاع انحناء مجرا و ظرفیت جریان برای حمل رسوبات دارد (مگدالانو و یوست^۸، ۲۰۱۱: ۱۹۷). در رودخانه‌های مماندری، فرسایش کناره توأم با فرا انباشت^۹ کناره مسئول مهاجرت و توسعه مماندرهای رودخانه است. فرسایش کناره باعث جابجایی مجرا به میزان ۱۰۰-۱۴ متر در سال در ایالات متحده آمریکا و تا ۸۲۴ متر در سال در سراسر جهان می‌شود. بنابراین، فرسایش کناره رودخانه‌ها به عنوان یکی از منابع اصلی رسوب مجرا محسوب می‌شود؛ به طوری که ۳۷ تا ۹۲ درصد از بار رسوب کل را در سراسر جهان شامل می‌شود. از طرف دیگر، رسوب‌گذاری چهارمین عامل اختلال در کیفیت آب می‌باشد. رسوب، آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، مواد مغزی، باکتری‌ها و ویروس‌ها را منتقل می‌کند که کیفیت آب را کاهش می‌دهد و می‌تواند باعث رشد جلبک‌ها در پایین دست شود (کافمن^{۱۰}، ۲۰۰۹: ۱). با توجه به این موارد، نظارت بر تغییرات جانبی مجرا و بررسی علل اساسی این تغییرات از مؤلفه‌های اساسی مدیریت رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی محسوب می‌شود.

۱ - Sixta

۲ - Migration

۳ - Garde

۴ - Kondolf and Piegay

۵ - Self-adjustment

۶ - Wohl

۷ - Richard

۸ - Magdaleno and Yuste

۹ - Accretion

۱۰ - Coffman

فرم یک مجرای رودخانه هم معبری جهت حمل آب و رسوب است و هم نتیجه‌ای از این فرایند می‌باشد (ریچارد، ۲۰۰۱: ۹). از این رو، هنگامی که اندازه‌گیری‌های ژئومورفولوژیست‌ها در رابطه با مقادیر سینوزیته، نسبت عرض به عمق، شیب، ابعاد (عرض، عمق)، و نوع رسوب (بستر و کناره) با اندازه‌گیری‌های مهندسان در خصوص دبی، سرعت و قدرت جریان ترکیب شوند، اطلاعات ضروری برای شناخت یک رودخانه و دانش موردنیاز جهت پیش‌بینی تغییرات آینده فراهم می‌شود (شوم^۱، ۲۰۰۵: ۱۷).

هیکن^۲ (۱۹۸۳) مطالعه تغییرات مجرای رودخانه را به صورت مختصر بدین صورت تعریف کرد: مجموعه‌ای از مطالعات تجربی و تئوریک در ارتباط با تنظیم اندازه مقطع عرضی مجرا، تغییرات فرم و الگو در شرایط محیطی (وینترباتوم^۳، ۱۹۹۵: ۱۰). بعد از جنگ جهانی دوم، جنبه‌های زیادی از مورفولوژی رودخانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. این زمینه‌ها شامل هندسه مجرا، مدل‌سازی ریاضیاتی، اثرات نتوتکتونیک و حرکات توده‌ای بر روی مجرا، سیستم‌های رودخانه‌ای، مورفولوژی رودخانه‌ای تجربی، اثرات اقلیم و هیدرولوژی دیرینه بر روی مجرا، و رودخانه‌های با بستر گراولی می‌باشند (گارد، ۲۰۰۶: ۹). بنابراین، مطالعه تغییرات مجرای رودخانه‌ها یک ویژگی برجسته در مطالعات ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ای می‌باشد و ادبیات فراوانی از چنین بررسی‌هایی حاصل شده است (به‌عنوان مثال: خیری‌زاده، ۱۳۹۵؛ یمانی و فخری، ۱۳۹۱؛ شریفی کیا و مال امیری، ۱۳۹۲؛ میچلی^۴ و همکاران، ۲۰۰۴؛ ریچارد و همکاران، ۲۰۰۵؛ گومن^۵ و همکاران، ۲۰۰۵؛ کیسترا^۶ و همکاران، ۲۰۰۵؛ کومو^۷ و همکاران، ۲۰۰۸؛ هوک^۸، ۲۰۰۸؛ هتو^۹ و همکاران، ۲۰۰۹؛ مگدالنو و یوست، ۲۰۱۱؛ لاب^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۱). در این پژوهش، تغییرات جانبی مجرای رودخانه زربنه‌رود و علل این تغییرات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

منطقه مورد مطالعه

زربنه‌رود (جیغاتی‌چای)، مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. این رودخانه، دارای حوضه آبریز گسترده‌ای است و در حدود ۱۱۸۱۳ کیلومتر مربع از زمین‌های استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان را زهکشی می‌کند. در این پژوهش، بازه‌ای از رودخانه زربنه‌رود به طول تقریبی ۱۳۰ کیلومتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این بازه از بالادست شهر شاهین‌دژ (سایین‌قالا) شروع شده و تا شوره‌زارهای دریاچه ارومیه امتداد می‌یابد (شکل ۱). سد شهید کاظمی در فاصله سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۳۵۰ بر روی این رودخانه احداث گردید. چهار انشعاب اصلی رودخانه زربنه‌رود یعنی سقزچای، جیغاتوچای، خورخورچای و ساروق‌چای منبع تغذیه این سد می‌باشند. در ۸۰ کیلومتری پایین دست سد مخزنی شهید کاظمی و ۱۵ کیلومتری جنوب شرق میاندوآب، سد انحرافی نورزولو در سال ۱۳۴۶ بر روی این رودخانه احداث شده که سدی بتنی با سرریز آزاد است. رودخانه زربنه‌رود با توجه به نقش سد انحرافی نورزولو بر رژیم دبی، می‌تواند به دو بازه مشخص تقسیم‌بندی شود. در بازه بالادست سد نورزولو، برداشت محسوسی از آب رودخانه صورت نمی‌گیرد و در تمام طول سال و تا حدودی به صورت تنظیم‌شده (به استثنای فصل بهار) دارای آب می‌باشد. بیشترین مقدار دبی این بازه مربوط به

۱ - Schumm

۲ - Hickin

۳ - Winterbottom

۴ - Micheli

۵ - Gaeuman

۶ - Keesstra

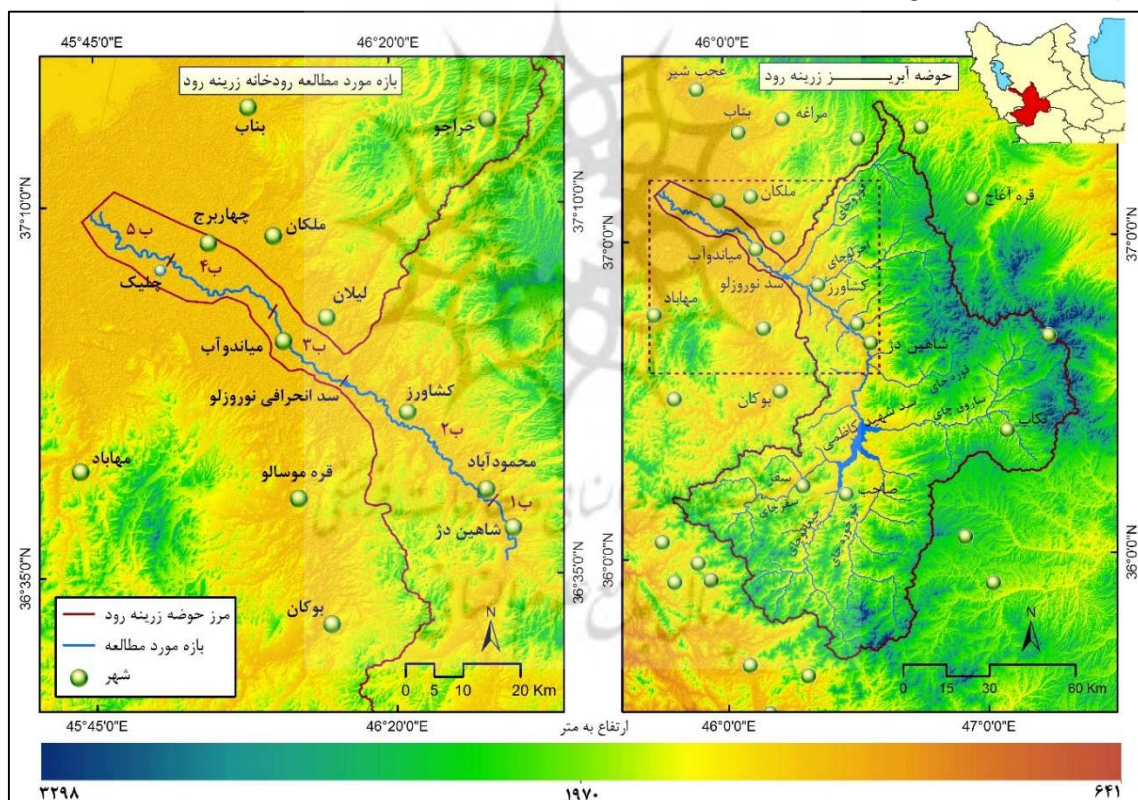
۷ - Kummu

۸ - Hooke

۹ - Heo

۱۰ - Labbe

ماه‌های فروردین و اردیبهشت می‌باشد و اکثر دبی‌های پیک نیز در طی این دو ماه رخ می‌دهند که از نظر فرایندهای ژئومورفولوژیکی دارای اهمیت فراوانی می‌باشند. دبی رودخانه در پایاب سد انحرافی نوروزلو به دلیل انحراف و برداشت آب، افت محسوسی می‌یابد و نقش آن در شکل‌زایی محدود می‌شود. همچنین، این رودخانه بر اساس متغیرهای مختلف، از قبیل پلان فرم مجرا، کنترل‌های زمین‌شناسی، عرض دشت سیلابی، مواد بستر و اثرات آنتروپوژنیک می‌تواند به پنج بازه مختلف تقسیم‌بندی شود: بازه (۱)، از ابتدای بازه مطالعاتی تا شهرک صنعتی شاهین‌دژ؛ بازه (۲)، از شهرک صنعتی تا سد انحرافی نوروزلو؛ بازه (۳)، از سد انحرافی نوروزلو تا شهر میاندوآب؛ بازه (۴)، از میاندوآب تا محدوده روستای چلیک و بازه (۵)، از انتهای بازه فوق تا مصب رودخانه در شورزارهای دریاچه ارومیه (شکل ۱). با توجه به داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری، تغییرات دبی در طی دوره زمانی مورد مطالعه را می‌توان به دو دوره زمانی قبل و بعد از سال ۱۳۷۷ تقسیم‌بندی نمود. بعد از سال ۱۳۷۷ یک کاهش محسوس دبی در هر دو ایستگاه هیدرومتری، مخصوصاً ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد در بازه پایین دست و نزدیک به چاله ارومیه مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری تعطیل شده قنرکُپی و میاندوآب می‌توان گفت که از سال ۱۳۴۴ تا سال ۱۳۹۲ بیشترین کاهش دبی رودخانه (در حدود ۶۰ درصد) از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ اتفاق افتاده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی بازه مورد مطالعه رودخانه زرينه رود (جیغاتی‌چای) در استان آذربایجان غربی

مواد و روش‌ها

مهم‌ترین داده‌های پژوهش حاضر عبارتند از: نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۰۰۰ (سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی)؛ داده‌های ژئوتکنیک رودخانه زرينه رود (سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی)؛ نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای Landsat (۱۹۸۵، ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۰۷، ۲۰۱۵)، ASTER (۲۰۰۰ و ۲۰۰۵)، SPOT (۲۰۰۵)، IRS (۲۰۰۵) و Google Earth؛ داده‌های ایستگاه‌های

هیدرومتری مجرای اصلی و انشعابات شامل ایستگاه‌های هیدرومتری ساری قمیش، نظام‌آباد، جان‌آقا، محمودآباد و ایستگاه‌های تعطیل‌شده میان‌دوآب و قیزکری. مهم‌ترین ابزارهای میدانی و آزمایشگاهی تحقیق شامل دستگاه سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، دستگاه نمونه‌بردار رسوبات بستر رودخانه مدل وان وین گرب^۱، شیکر، ترازوی دیجیتال و کولیس می‌باشند. در راستای اهداف تحقیق، از نرم‌افزارهای GIS & RS شامل نرم‌افزارهای Google Earth، ENVI و Arc GIS به همراه الحاقی HEC-GeoRAS و افزونه Planform Statistics؛ نرم‌افزار هیدرودینامیکی HEC-RAS و نرم‌افزار MATLAB (جهت محاسبه مرکز ثقل و شعاع انحنای خم‌ها) بهره گرفته شد. ذکر این نکته مهم است که کارهای میدانی به‌عنوان پایه و اساس تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی محسوب می‌شوند و این پژوهش نیز از این اصل مستثنی نبوده است. در تحقیق حاضر، برای دانه‌بندی و محاسبه D50 رسوبات بستر رودخانه در بازه‌های بالادست که مواد تشکیل‌دهنده بستر عمدتاً شامل پاره‌سنگ^۲ و قلوه‌سنگ^۳ می‌باشند، از روش شمارش قلوه‌سنگ توسعه‌یافته توسط ولمن^۴ (۱۹۵۴) استفاده شد. در سایر بازه‌ها، روش برداشت حجمی رسوبات بستر با استفاده از دستگاه نمونه‌بردار وان وین گرب انجام گرفت. برای بازه مطالعاتی زرینه‌رود، روش شمارش قلوه‌سنگ و برداشت حجمی در ۶۷ مقطع صورت گرفت.

روش‌شناسی و مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر را می‌توان در قالب پردازش تصاویر ماهواره‌ای، مدل هیدرودینامیک HEC-RAS و شاخص‌های ژئومورفومتریکی مورد بحث قرار داد:

- پردازش تصاویر ماهواره‌ای جهت بررسی تغییرات مجرا، استخراج پوشش گیاهی و کاربری اراضی: بدین منظور، بر روی تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه عملیات پیش‌پردازش تبدیل DN به رادیانس و تصحیح اتمسفری خط دید سریع ابرمکعب‌های طیفی^۵ (FLAASH) صورت گرفت. FLAASH یک ابزار تصحیح اتمسفری است که طول موج‌های محدوده مرئی تا مادون قرمز نزدیک و مناطق مادون قرمز موج کوتاه تا 3μm را تصحیح می‌کند (ENVI, 2009: 7). در پژوهش حاضر برای محاسبه تراکم پوشش گیاهی از شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی^۶ (NDVI) و به‌منظور تفکیک آب از سایر عوارض از شاخص تفاضل آب نرمال شده^۷ (NDWI) استفاده شد. این شاخص‌ها به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند (خو^۸، ۲۰۰۷: ۱۳۹۱-۱۳۸۱؛ خو، ۲۰۰۶: ۳۰۳۳-۳۰۲۵؛ پیرس - لوئیز و میلارد^۹، ۲۰۱۰: ۴۶۸-۴۶۳):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{MIR}) / (\text{Green} + \text{MIR}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در روابط بالا NIR یک باند مادون قرمز نزدیک، MIR یک باند مادون قرمز میانی، Red باند قرمز و Green باند سبز می‌باشد.

- مدل هیدرودینامیک HEC-RAS جهت شبیه‌سازی جریان در مجرا و دشت سیلابی رودخانه: جهت محاسبه توان رودخانه و پهنه‌های سیل‌گیر از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS استفاده شد. داده‌های جریان برای HEC-RAS شامل

^۱ - Van Veen Grab- Bottom Sampler

^۲ - Cobble

^۳ - Pebble

^۴ - Wolman

^۵ - Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH)

^۶ - Normalized difference water index (NDVI)

^۷ - Normalized difference water index (NDWI)

^۸ - Xu

^۹ - Pires-Luiz & Maillard

رژیم جریان، اطلاعات دبی، شرایط اولیه و شرایط مرزی می‌باشند (مرواد^{۱۰}، ۲۰۰۴: ۲۹). برای جریان ماندگار متغیر تدریجی^{۱۱}، روش اصلی محاسبه پروفیل‌های سطح آب بین مقاطع عرضی، روش گام مستقیم نامیده می‌شود. روش اصلی محاسباتی، مبتنی بر حل تکرارشونده معادله انرژی است. با توجه به جریان و ارتفاع سطح آب در یک مقطع عرضی، هدف از روش گام استاندارد، محاسبه ارتفاع سطح آب در مقطع عرضی مجاور است. معادله انرژی به صورت زیر بیان می‌شود (مرکز مهندسی هیدرولوژی^{۱۲}، ۲۰۱۰، فصل ۲: ۲):

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن: Z_1 و Z_2 : تراز کف مجرای اصلی؛ Y_1 و Y_2 : عمق آب در مقاطع عرضی؛ V_1 و V_2 : متوسط سرعت جریان (دبی کل تقسیم بر مساحت جریان کل)؛ a_1 و a_2 : ضرایب وزنی سرعت؛ g : شتاب ثقلی و h_e : افت هد انرژی می‌باشد (برای معادلات به فصل دوم منبع فوق مراجعه شود). توان رودخانه^{۱۳} نیز به عنوان یک مفهوم ژئومورفولوژیکی، عبارت است از: مقدار انرژی موجود یک رودخانه برای حرکت یا جابجایی رسوب، سنگ یا مواد چوبی. برای یک مقطع عرضی، توان کل رودخانه در واحد طول کانال می‌تواند به صورت زیر بیان شود (سرویس حفاظت منابع طبیعی^{۱۴}، ۲۰۰۸، فصل ۶: ۹؛ بیکر^{۱۵} و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۸۰-۲۹۰؛ سونگ^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۴۴-۱۳۳):

$$\Omega = \gamma Q S_f \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$= \gamma w d S_f$$

که در آن: γ = وزن واحد (مخصوص) آب (lb/ft^3)؛ Q = دبی (ft^3/s)؛ S_f = شیب انرژی (ft/ft)؛ V = سرعت (ft/s)؛ W = عرض کانال (ft)؛ d = عمق هیدرولیک (ft).

در این پژوهش، برای محاسبات دوره‌های بازگشت و رابطه دبی - اشل از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری واقع بر روی مجرای اصلی و انشعابات استفاده شد. همچنین، جهت تعیین توزیع ضریب اصطکاک مجرا و دشت سیلابی، نقشه پوشش زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و مطالعات میدانی تهیه شد. سایر متغیرهای مورد نیاز مدل HEC-RAS نیز از روی مدل‌های TIN و DEM تهیه شده از روی نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۰۰۰ مجرا و دشت سیلابی رودخانه حاصل گردید.

- شاخص‌های ژئومورفومتریکی جهت تحلیل کمی پلان فرم و تغییرات جانبی مجرای رودخانه: در رابطه با جابجایی جانبی مجرای رودخانه‌ها، مخصوصاً نرخ مهاجرت جانبی مجرا، روش‌ها و شاخص‌های مختلفی با مبنای محاسباتی متفاوت وجود دارد. برخی از محاسبات بر مبنای ترسیم ترانسکت‌هایی عمود بر مسیر رودخانه می‌باشد. هر ترانسکت از طریق خطوطی تحت عنوان خطوط فرسایش - رسوب‌گذاری^{۱۷} به چندین بخش تفکیک می‌شود. این ترانسکت‌ها و خطوط برای تمامی دوره‌های زمانی ثابت باقی می‌ماند و تغییرات مجرا نسبت به آن‌ها به صورت کمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ریچارد

^{۱۰} - Merwade

^{۱۱} - Steady gradually varied flow

^{۱۲} - HEC (Hydrologic Engineering Center)

^{۱۳} - Stream power

^{۱۴} - Natural Resources Conservation Service

^{۱۵} - Baker

^{۱۶} - Song

^{۱۷} - Aggradation/degradation

(۲۰۰۱)، چهار شاخص حرکت جانبی را از طریق اندازه‌گیری ناخالص تغییر خط کناره کل ارائه کرده، سپس حرکت جانبی را به تغییر عرض و مهاجرت تفکیک نمود. این شاخص‌ها عبارتند از:

$$E = \frac{\Delta r + \Delta l}{t_2 - t_1} \quad \text{رابطه (۵). تغییر خط کناره کل}$$

$$N = \frac{\left[\frac{(\Delta r + \Delta l) / 2}{(W_1 + W_2) / 2} \right]}{\Delta t} = \frac{\left[\frac{\Delta r + \Delta l}{W_1 + W_2} \right]}{\Delta t}, \quad (\% \text{ width/year}) \quad \text{رابطه (۶). آهنگ‌های حرکت جانبی نرمال شده}$$

$$dW_{act} = \frac{\Delta W_{act}}{\Delta t} = \frac{W_{act-2} - W_{act-1}}{t_2 - t_1}, \quad (\text{m/year}) \quad \text{رابطه (۷). تغییر در عرض کانال فعال}$$

$$dW_{tot} = \frac{\Delta W_{tot}}{\Delta t} = \frac{W_{tot-2} - W_{tot-1}}{t_2 - t_1}, \quad (\text{m/year}) \quad \text{رابطه (۸). تغییر در عرض کانال کل}$$

$$M = \frac{\Delta r + \Delta l}{t_2 - t_1} - \frac{W_{tot-2} - W_{tot-1}}{t_2 - t_1} = E - dW_{tot}, \quad (\text{m/year}) \quad \text{رابطه (۹). آهنگ‌های مهاجرت جانبی}$$

$$\text{رابطه (۱۰). شاخص پایداری جانبی} = \frac{\text{مساحت کانال فعال تغییر نیافته}}{\text{مساحت کانال فعال قبلی}} = \text{شاخص پایداری جانبی}$$

در روابط فوق: $dr = \Delta r$ = حرکت جانبی بیرونی‌ترین خط کناره راست از زمان t_1 تا t_2 (متر)؛ $dl = \Delta l$ = حرکت جانبی بیرونی‌ترین خط کناره چپ از t_1 تا t_2 (متر)؛ t_1 = سال دوم مساحی (انتهای دوره زمانی)؛ t_2 = سال اول مساحی (شروع دوره زمانی)؛ W_1 = عرض کانال فعال در زمان t_1 (متر)؛ W_2 = عرض کانال فعال در زمان t_2 (متر)؛ و $t_2 - t_1 = \Delta t$ = طول دوره زمانی بین مساحی‌ها به سال؛ ΔW_{act} = تغییر کل در عرض کانال فعال بین t_1 و t_2 (متر)؛ W_{act-1} = عرض کانال فعال در زمان t_1 (متر)؛ W_{act-2} = عرض کانال فعال در زمان t_2 (متر)؛ ΔW_{tot} = تغییر کل در عرض کانال فعال بین t_1 و t_2 (متر)؛ W_{tot-1} = عرض کانال فعال در زمان t_1 (متر)؛ W_{tot-2} = عرض کانال فعال در زمان t_2 (متر). برای رودخانه مورد مطالعه، تمامی روابط فوق با استفاده از ایجاد یک ژئودیتابیس و ترکیب توابع مختلف GIS با دقت بالایی قابل محاسبه می‌باشد. همچنین، برای تعیین مرکز ثقل و شعاع خم (به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی مندرها)، برآورد حداقل مربعات به‌عنوان راه‌حلی جهت جلوگیری و یا محدود نمودن خطاهای تصادفی اندازه‌گیری بکار گرفته شد. در این رابطه، معادله یک دایره با مرکز (مرکز ثقل خم) (a و b) و شعاع R برابر است با (چرنو و لسورت^{۱۸}، ۲۰۰۵: ۲۵۲-۲۳۹؛ چرنو، ۲۰۱۱: ۴۷؛ لیسله^{۱۹}، ۱۹۹۲: ۴۶۱-۴۵۵؛ گری^{۲۰} و همکاران، ۱۹۸۰: ۱۸۴-۱۷۳؛ هتو و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۶۵-۱۵۵):

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2. \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

اگر n مجموعه‌ای از نقاط داده در سطح xy باشد. برای تعیین مقادیر a ، b ، و R که یک تخمین حداقل مربعات از یک دایره بر اساس این نقاط داده ارائه می‌دهد، معادله زیر مینموم می‌شود:

$$F(a, b, R) = \sum_{i=1}^N \left[(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2 \right]^2. \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

برای حل این معادله سه مجهولی از کدهایی که بدین منظور توسط خیری‌زاده (۱۳۹۵) در محیط MATLAB توسعه یافته است استفاده گردید.

^{۱۸} - Chernov and Lesort

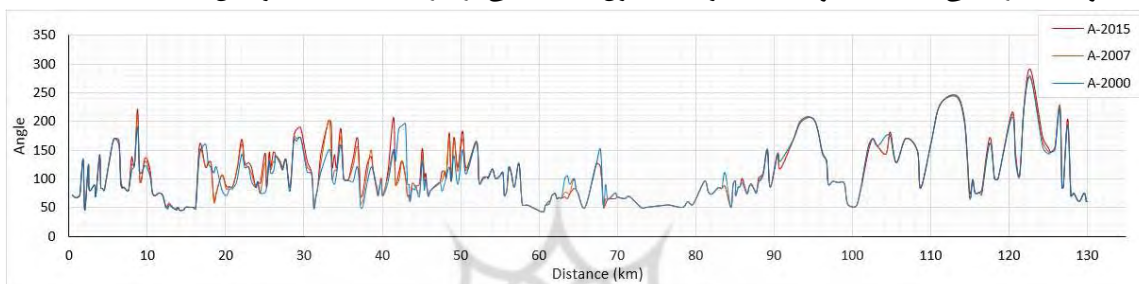
^{۱۹} - Lisle

^{۲۰} - Gray

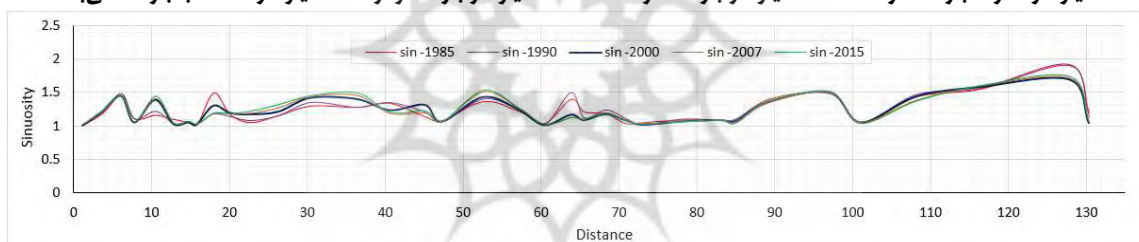
یافته‌های تحقیق

- بررسی دینامیک عرضی مجرای رودخانه با استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریکی

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مجرای رودخانه‌ها، پلان فرم یا شکل مسطحاتی آن‌ها می‌باشد. پلان فرم، نوع فرایندهای موجود در مجرای رودخانه را نشان می‌دهد. برای بررسی پلان فرم مجرای رودخانه زربنده رود از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی کورنیس در ترکیب با تکنیک حداقل مربعات استفاده شد. افزایش زاویه مرکزی، دلیلی بر مهاجرت جانبی مئاندرها در دشت سیلابی و برعکس، کاهش ناگهانی زاویه مرکزی نشان‌دهنده ایجاد میان‌بر و کوتاه‌شدگی مسیر رودخانه یا تغییر مسیر مجرا می‌باشد. با توجه به مقادیر این شاخص‌ها (شکل‌های ۲ و ۳)، پلان فرم مجرای رودخانه زربنده رود متمایل به الگوی مئاندری می‌باشد. اما با توجه به متغیرهای کنترل‌کننده محلی، رفتارهای آستانه‌ای نیز قابل مشاهده است.



شکل ۲: تغییرات زاویه مرکزی مجرای رودخانه زربنده رود از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ م. (از ۰ تا ۱۷ کیلومتر معرف بازه ۱؛ از ۱۶ تا ۵۹ کیلومتر معرف بازه ۲؛ از ۵۹ تا ۸۰ کیلومتر بازه ۳؛ از ۸۰ تا ۱۰۷ کیلومتر بازه ۴ و از ۱۰۷ کیلومتر تا مصب بازه ۵ می‌باشد)

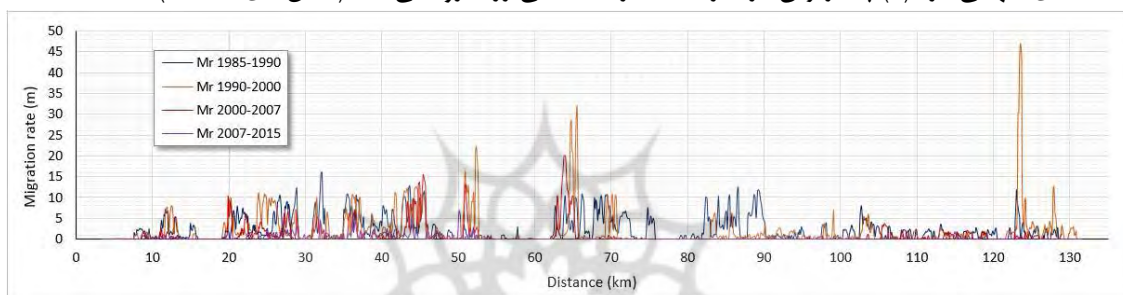


شکل ۳: تغییرات ضریب خمیدگی مجرای رودخانه زربنده رود از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ م.

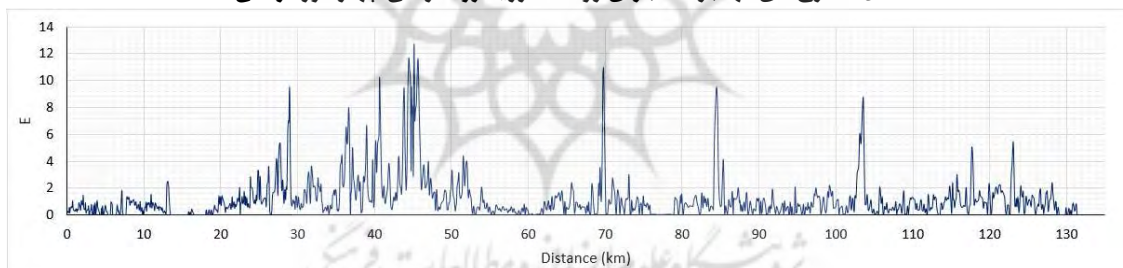
در بازه (۱)، پلان فرم مجرای رودخانه در مرز بین الگوی مئاندری توسعه‌نیافته و توسعه‌یافته قرار می‌گیرد و مقادیر متوسط زاویه مرکزی، در طی دوره زمانی مورد مطالعه، از ۸۵ درجه فراتر نرفته است. در فاصله سال‌های ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۰ م به دلیل رخداد دو میان‌بر، اندکی کاهش و برعکس تا سال ۲۰۰۰ م به دلیل شکل‌گیری و توسعه سه مئاندر متوالی، افزایش یافته است. الگوی مئاندری توسعه‌یافته در قسمت‌هایی از دره شکل گرفته است که دارای دشت سیلابی نسبتاً توسعه‌یافته می‌باشد. مورفولوژی این بازه تا حد زیادی در کنترل متغیر زمین‌شناسی می‌باشد و در اغلب قسمت‌ها، توسعه مئاندرها به دلیل برخورد به واحد مقاوم کوهستان محدود شده است. به همین دلیل است که در این بازه، اثری از میان‌برهای گلوگاهی^۱ دیده نمی‌شود. میانگین آهنگ مهاجرت مجرا در بازه (۱) در طی دو بازه زمانی قبل از سال ۲۰۰۰ م. در حدود ۰/۸ متر در سال بوده است. اما در طی دو بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۰۷ و ۲۰۰۷-۲۰۱۵ به ترتیب به ۰/۲۲ متر در سال و ۰/۱۱ متر در سال افت کرده است. عدم ایجاد و توسعه مئاندرهای جدید و برخورد مئاندرهای پیشین به واحد کوهستان و همچنین کاهش دبی رودخانه را می‌توان مهم‌ترین دلایل کاهش تحرک جانبی به شمار آورد. همچنین، میانگین شاخص آهنگ مهاجرت واقعی (M) (۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵) حدود ۰/۱۵ متر در سال بوده است. برای این بازه، میانگین شاخص حرکت کل کناره‌های کانال (E)، به عنوان ترکیبی از تغییر عرض و مهاجرت جانبی مجرا، ۰/۳۸ می‌باشد. این شاخص، مجموع تغییر خط کناره است. کمترین میزان این شاخص با مقادیر نزدیک به صفر در محدوده شهرک صنعتی شاهین‌دژ دیده می‌شود. آهنگ حرکت

^۱ - Neck cutoff

جانبی نرمال شده (N)، تغییر عرض و مهاجرت جانبی را ترکیب کرده و برای اندازه رودخانه، نرمالیزه می‌سازد. بنابراین، مقایسه بازه‌های مختلف مجرا و همچنین رودخانه‌های مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد. میانگین این شاخص برای بازه (۱)، ۰/۳۳ درصد می‌باشد که نرخ پایینی را به نمایش می‌گذارد. میانگین شاخص تغییر عرض کانال فعال، نزدیک به صفر می‌باشد. اگر مقدار dW_{act} منفی باشد آنگاه کانال تنگ‌شده و اگر مثبت باشد، کانال عریض شده است. با توجه به مقادیر این شاخص‌ها می‌توان گفت که هرچند یک تمایل ملایم به تنگ‌شدگی مجرا دیده می‌شود؛ اما، این بازه معرف تعادل بین این دو فرایند می‌باشد. در ۱۰ سال گذشته با کاهش دبی رودخانه، مخصوصاً دبی‌های پیک، اغلب قسمت‌های این بازه تمایل به پایداری دارند و در اغلب موارد، شاخص پایداری مقادیر نزدیک به واحد (مقدار ۱) را نشان می‌دهد. مقادیر نزدیک به واحد شاخص پایداری جانبی نشان می‌دهد که مجرا تحرکی نداشته و نسبتاً پایدار بوده است. مقادیر کوچک این شاخص نشان‌دهنده این است که مجرا از موقعیت خود در شروع دوره زمانی حرکت کرده است. با توجه به مقادیر این شاخص، قسمت‌های انتهایی بازه (۱) پایدارترین بازه در امتداد بازه مطالعاتی زرينه‌رود می‌باشد (شکل‌های ۴ تا ۱۰).



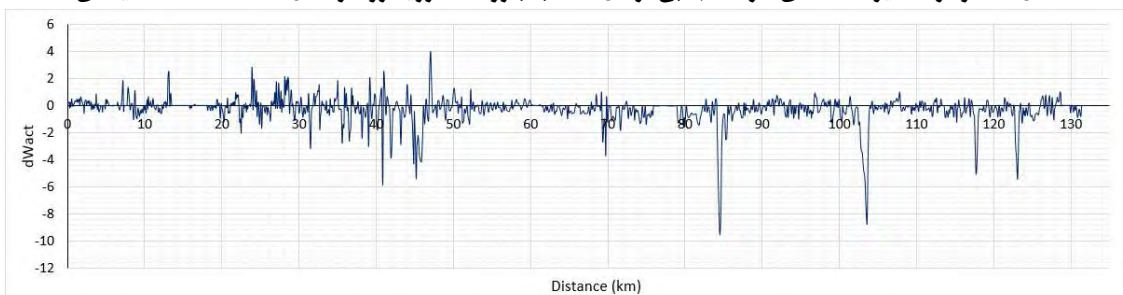
شکل ۴: نرخ‌های مهاجرت مجرای رودخانه زرينه‌رود در طی چهار دوره زمانی



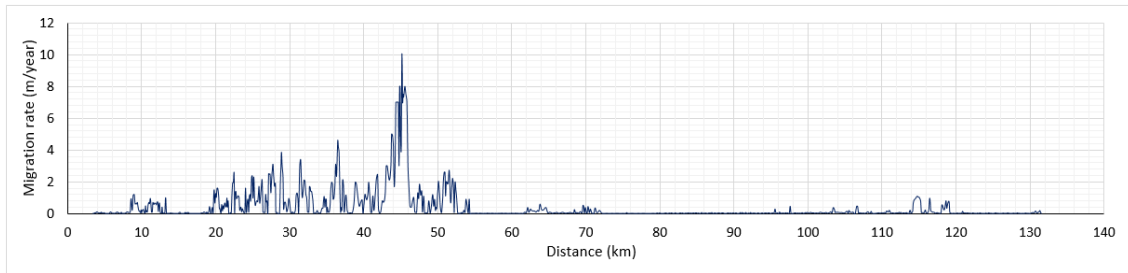
شکل ۵: نمودار مقادیر تغییرات کل خط کناره (E) رودخانه زرينه‌رود از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ میلادی



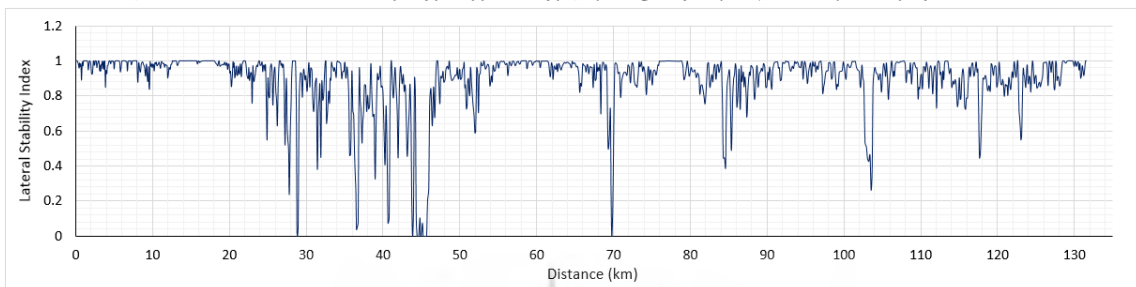
شکل ۶: نمودار مقادیر آهنگ‌های حرکت جانبی نرمال شده (N) رودخانه زرينه‌رود از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ میلادی



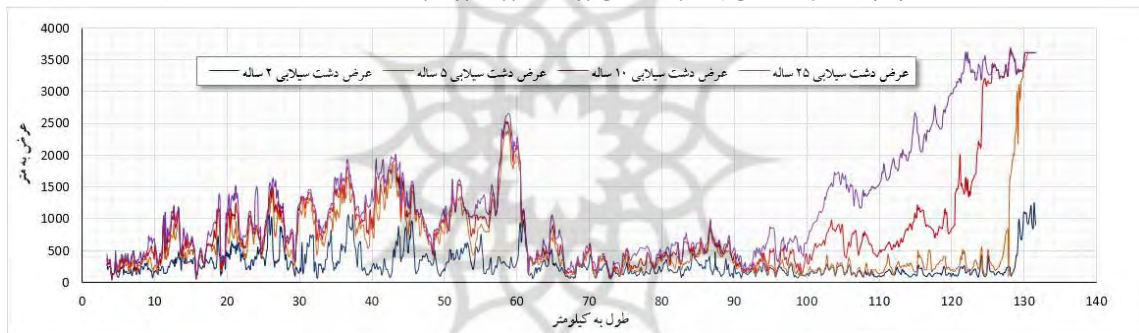
شکل ۷: نمودار مقادیر تغییرات در عرض کانال فعال (dW_{act}) رودخانه زرينه‌رود از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ میلادی



شکل ۸: نمودار مقادیر آهنگ مهاجرت واقعی مجرای رودخانه زرينه رود از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ میلادی



شکل ۹: نمودار مقادیر شاخص پایداری جانبی رودخانه زرينه رود از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ میلادی



شکل ۱۰: عرض دشت سیلابی مجرای رودخانه زرينه رود با دوره‌های بازگشت مختلف

در بازه (۲)، مقادیر زاویه مرکزی کورنیس عمدتاً در دامنه بین ۸۵ تا ۱۵۸ درجه قرار می‌گیرد و از نوع مماندیری توسعه یافته می‌باشد. در این بازه، مقادیر ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی در طی دوره زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۰ م دارای بیشترین میزان تغییرات در مقایسه با سایر بازه‌ها و دوره زمانی بعدی می‌باشد؛ به طوری که، انطباق مسیرها و بررسی تطبیقی تغییرات زاویه مرکزی را بسیار دشوار می‌سازد و به همین دلیل، در شکل (۲) گنجانده نشده‌اند. در طی این دوره زمانی، تحول مماندرهای این بازه از آهنگ بالایی برخوردار بوده است. این شاخص‌ها در قسمت‌های مختلف این بازه در نتیجه فرایندهای فرسایش کناره و توسعه مماندرها به تناوب افزایش پیدا کرده و یا در نتیجه ایجاد میان‌برها دچار کاهش ناگهانی شده‌اند. در این بازه، هر چند که الگوی رودخانه از نوع مماندیری توسعه یافته می‌باشد؛ اما، توسعه مماندرها منجر به میان‌بر گلوگاهی و ایجاد اشکال ژئومورفیکی نعل اسبی نشده است. بلکه، تمامی میان‌برها از نوع شوت^۱ (میان‌پشته‌ای) بوده‌اند و از این رو، با دو شاخه شدن مجرا در محل میان‌بر و متروک شدن خم مماندر، توسعه بیش‌ازحد مماندرها (جهت ایجاد میان‌بر گلوگاهی) محدود شده است. کانال‌های متروک یا برکه‌های قوسی شکل مجاور رودکنار و دشت سیلابی ناشی از همین رخداد میان‌برهای شوت می‌باشند که از پراکندگی فضایی زیادی برخوردار بوده و نشان‌دهنده دینامیک عرضی بالای مجرای رودخانه در این بازه می‌باشند. در طی ۱۵ سال گذشته، به دلیل کاهش محسوس دبی، مخصوصاً دبی‌های پیک، فراوانی میان‌برهای شوت کاهش یافته است. از این رو، علی‌رغم کاهش دینامیک جانبی مجرا، افزایش مقادیر ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی به دلیل

^۱ - Chute cutoff

محدود بودن میان‌برهای شوت بوده است. در طی ۱۵ سال گذشته تنها در بالادست تلاقی اجرلوچای دو میان‌بر شوت به صورت متوالی رخ داده است که مسیر ۲/۵ کیلومتری مجرا را به یک مسیر ۱ کیلومتری کاهش داده است (فرآیند کوتاه‌شدگی).

بازه (۲)، دارای بیشترین میزان دینامیک جانبی در امتداد بازه مطالعاتی رودخانه زرینه‌رود می‌باشد. میانگین نرخ مهاجرت جانبی این بازه در طی دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۸۵ م. حدود ۲/۹ متر در سال بوده که با اندکی افزایش به ۳/۱ متر تا سال ۲۰۰۰ م. رسیده است. در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵، آهنگ مهاجرت جانبی کاهش محسوسی پیدا می‌کند و به میانگین ۱/۴ متر در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ م. و ۰/۷ متر بین ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ م. کاهش می‌یابد. شاخص آهنگ مهاجرت واقعی (M) بین ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ مقدار متوسط ۰/۹ متر در سال را نشان می‌دهد. در این بازه، نرخ‌های بالای مهاجرت جانبی در مسافتی به طول ۲۸ کیلومتر از شهر محمودآباد تا حدود ۴ کیلومتری شرق شهر کشاورز دیده می‌شود. برعکس، پایین‌ترین مقادیر آهنگ مهاجرت جانبی مجرا، مربوط به ۱۰ کیلومتر انتهایی این بازه می‌باشد. در بازه (۲)، مقادیر شاخص‌های مختلف تحرک جانبی از بیشترین میزان تغییرپذیری فضایی برخوردار می‌باشند (شکل‌های ۴ تا ۱۰). میانگین شاخص حرکت کل کناره‌های کانال (E)، ۱/۹ می‌باشد. مقادیر اندک این شاخص در ۱۰ کیلومتر انتهایی بازه و بیشترین مقادیر آن در مسافت بین ۲۷ تا ۴۶ کیلومتری مجرا (از محدوده بین روستاهای چیچک‌لو و نوروزآباد تا تلاقی رودخانه اجرلو) مشاهده می‌شود. آهنگ حرکت جانبی نرمال شده (N) نیز با مقدار متوسط ۲ درصد، روندی مشابه روند شاخص فوق را نشان می‌دهد و نسبت به بازه بالادست افزایش قابل‌ملاحظه‌ای را نمایان می‌سازد. شاخص تغییر عرض کانال فعال دارای تغییرپذیری فضایی قابل‌ملاحظه‌ای می‌باشد که نشان‌دهنده دینامیک بالای مجرا و فرایندهای فرسایشی و نهشته‌گذاری می‌باشد. میانگین شاخص تغییر در عرض کانال فعال، ۰/۱۸- می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که در طی ۱۰ سال گذشته از توانایی فرسایش کاوشی رودخانه کاسته شده و مجرای رودخانه تا حدودی تنگ‌تر شده است. در این بازه زمانی، در مجموع حدود ۳۸ هکتار از اراضی حاشیه رودخانه در نتیجه فرایندهای فرسایش کناره و ایجاد میان‌بر تخریب‌شده و برعکس، در حدود ۸۴/۹ هکتار از اراضی رودکنار در معرض نهشته‌گذاری قرار گرفته است. داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ م در نتیجه کاهش دبی (مخصوصاً دبی‌های لب‌پری و سرریزی) و توان رودخانه، از قابلیت فرسایشی رودخانه کاسته شده است. این امر منجر به تمایل بیشتر رودخانه زرینه‌رود به الگوی مئاندری تک‌مجرا شده و در نتیجه، بخشی از مجرای فعال سابق دچار فرایند انباشت و پرشدگی شده است. این روند با افزایش دخل و تصرف انسانی به صورت تبدیل کاربری اراضی و توسعه اراضی کشاورزی در رودکنار^۲ تقویت شده است. باین‌حال، هنوز هم در قسمت‌های زیادی از این بازه، فرایندهای فرسایشی از شدت عمل برخوردار می‌باشند که مخصوصاً به صورت فرسایش کناره مقعر مئاندرها و تخریب اراضی رودکنار منعکس شده است. میانگین شاخص پایداری این بازه، ۰/۸ می‌باشد. قسمت‌های محدودی از بالادست و حدود ۱۰ کیلومتر انتهایی این بازه با دارا بودن مقدار شاخص پایداری نزدیک به واحد، نسبتاً پایدار می‌باشند. برعکس در یک مسافت حدود ۱۹ کیلومتری، مقادیر این شاخص به کرات نزدیک صفر می‌شود. مقادیر صفر نشان‌دهنده رخداد میان‌بر می‌باشد که مسیر جریان آب را در یک بازه محدود به کلی تغییر می‌دهد (شکل‌های ۴ تا ۱۰).

در بازه (۲) و تا حدودی بازه (۱)، پلان فرم مجرای رودخانه از نوع مئاندری با فراوانی میان‌برهای شوت می‌باشد (شکل ۱۱). در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، میان‌برهای شوت به عنوان یک رفتار آستانه‌ای گذار از الگوی مئاندری به گیسوئی در نظر گرفته می‌شوند (کلینهناس و وان‌دن‌برگ^۳، ۲۰۱۱؛ ۷۳۸-۷۳۱؛ زولزی^۴ و همکاران، ۲۰۱۲؛ ۲۴-۱). در بازه (۲)، این نوع رفتار آستانه‌ای به دلیل تغییرپذیری بالای قابلیت فرسایش مواد کناره، نقش متغیر پوشش گیاهی در پایداری کناره‌ها و

^۲ - Riparian

^۳ - Kleinhans & Van den Berg

^۴ - Zolezzi

فراوانی سیلاب‌های بهاری می‌باشد. در این بازه، کنترل متغیر زمین‌شناسی بر روی پلان فرم مجرا کم‌رنگ‌تر شده و بیشتر به صورت محلی باقی می‌ماند. با توجه به فیلتر شدن و به دام افتادن رسوبات در پشت سد مخزنی شهید کاظمی و مقاومت مواد کناره و آرمورینگ^۵ بستر رودخانه در بازه (۱)، جریانی کم‌رسوب وارد بازه (۲) می‌شود. از این رو، در قطعاتی که دارای مواد کناره فوق‌العاده فرسایش‌پذیر می‌باشند حجم زیادی از مواد کناره (مخصوصاً در طی سیلاب‌ها) فرسایش یافته و وارد مجرای رودخانه می‌شوند. در برخی قسمت‌ها، قابلیت فرسایش مواد کناره (مخصوصاً در محدوده محمودآباد) به قدری زیاد است که حتی پوشش گیاهی نیز قادر به حفاظت کناره‌ها نیست. فرسایش‌پذیری شدید مواد کناره و ورود حجم زیادی از رسوبات به داخل مجرا منجر به مازاد محلی رسوب و تشکیل پشته‌های نقطه‌ای داخل مجرا و تمایل محلی به الگوی گیسوئی شده است و در واقع، یکی از پیش‌نیازهای اساسی گیسوئی شدن، یعنی فراوانی عرضه رسوب (هیکس^۶ و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۱۴۲-۱۱۲۹) مهیا می‌شود. یک کانال گیسوئی نشان‌دهنده نرخ‌های بالای انتقال و ذخیره محلی رسوب در مجرای رودخانه می‌باشد (سیئر^۷ و همکاران، ۲۰۰۳: ۶۰). کناره‌های سست، منجر به عریض شدن کانال می‌شود که تشکیل پشته‌های داخل مجرا را مساعدت می‌کند (لوئر و پارکر^۸، ۲۰۰۸: ۱۴۹-۱۲۳؛ اشمور^۹، ۱۹۹۱: ۵۲-۳۷؛ پائولا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۱: ۹-۴). میان‌برهای گلوگاهی هنگامی رخ می‌دهند که سینوزیته محلی تا اندازه‌ای افزایش پیدا می‌کند که حلقه‌های مجاور به هم می‌رسند (جاگرس^{۱۱}، ۲۰۰۳: ۸۶). در واقع، به دلیل فرسایش کناره، خم‌های بالادست و پایین دست در گلوگاه یک مئاندر به هم برخورد می‌کنند. در بازه‌های بالادست سد انحرافی نوروزلو (دو بازه فوق‌الذکر) شواهدی از این نوع میانبرها یافت نشد و تمامی میانبرها از نوع شوت می‌باشند. طبق تعریف، میان‌بری که در گلوگاه یک مئاندر به وجود نیاید میان‌بر شوت نامیده می‌شود. میان‌برهای شوت نسبت به میان‌برهای گلوگاهی انحراف‌های جریان طولانی‌تری هستند (کروساتو^{۱۲}، ۲۰۰۸: ۲۸؛ جاگرس، ۲۰۰۳: ۸۶). با توجه به محاسبات مربوط به شعاع انحنا و زاویه مرکزی خم‌ها، اکثر میان‌برهای شوت در مئاندرهای با زاویه مرکزی ۱۲۰ تا ۲۱۹ درجه (مخصوصاً مئاندرهای با زاویه مرکزی ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه) اتفاق افتاده است که خم‌های نسبتاً تیزی می‌باشند. میان‌بر شوت باعث دوشاخه شدن^{۱۳} محلی مجرا و تقسیم آب و رسوب در دو مجرا می‌شود. به دلیل کوتاه‌شدگی و پرشیب شدن مجرا در محل میان‌بر، قسمت اعظم آب و رسوب به این مجرا منتقل شده و مسیر قبلی به تدریج متروک می‌شود (شکل ۱۱). رشد گیاهان آبی، فرایندهای اولیه عمل‌کننده در کناره‌های مجرای در حال متروک شدن و رسوب‌گذاری جریان‌ات سرریزی، به تدریج مجرای سابق را پر کرده و بستر آن را مرتفع‌تر می‌سازد. ادامه این روند منجر به متروک‌شدگی کامل و قطع ارتباط آن با مجرای اصلی می‌شود (شکل ۱۱-ه). این فرایند به تناوب در بازه (۲) تداوم می‌یابد. در واقع، باتلاق‌ها و مرداب‌های موجود در دشت سیلابی این بازه بدین صورت تشکیل شده‌اند. در این بازه، اشکال ژئومورفولوژیکی مربوط به دینامیک رودخانه‌های مئاندری به فراوانی قابل مشاهده است. مجرای رودخانه دارای دشت سیلابی به خوبی توسعه یافته و تا حدی نامتقارن می‌باشد. کانال‌های متروک حاصل از میان‌برهای شوت، تغییر مسیر مجرا، پشته‌های پیچشی^{۱۴} ناشی از مهاجرت خم‌های مئاندرها، پشته‌های نقطه‌ای کناره‌های محدب مئاندرها و پشته‌های نقطه‌ای داخل مجرا از مهم‌ترین اشکال ژئومورفولوژیکی مربوط به دینامیک عرضی این بازه می‌باشند. برخی از کانال‌های

^۵ - Armouring

^۶ - Hicks

^۷ - Sear

^۸ - Lauer and Parker

^۹ - Ashmore

^{۱۰} - Paola

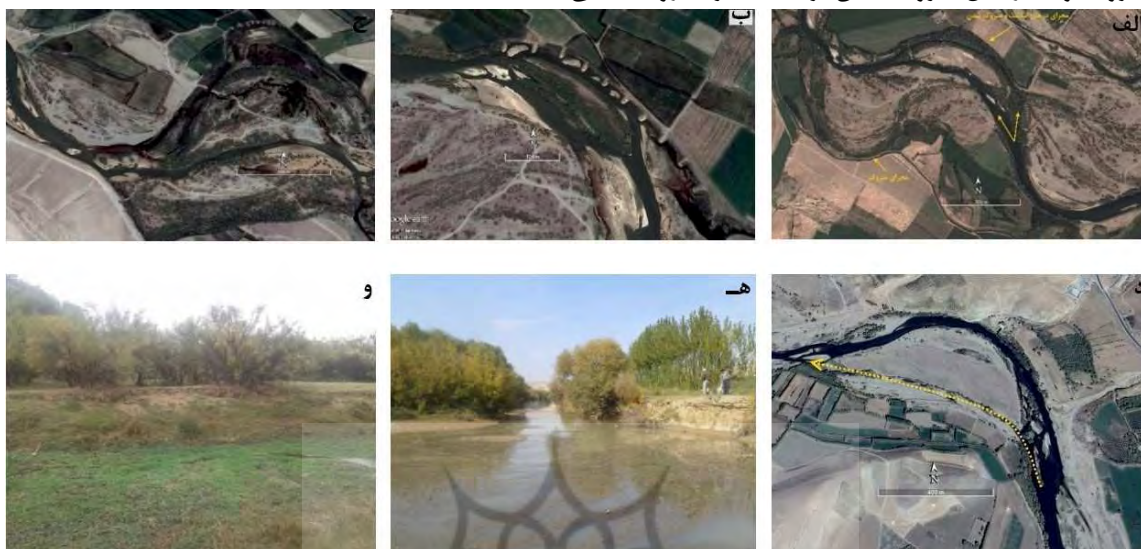
^{۱۱} - Jagers

^{۱۲} - Crosato

^{۱۳} - Bifurcation

^{۱۴} - Scroll bar

متروک به صورت برکه‌های قوسی شکل تظاهر نموده‌اند (شکل ۱۱- ه و ۱۱- و). تشکیل این برکه‌ها به دلایلی از جمله زهکشی آب‌های زائد کشاورزی، زهکشی محلی رواناب‌های ناشی از بارندگی‌ها، و یا دبی‌های سرریزی در کانال‌های متروک و یا در حال متروک شدن نزدیک مجرای رودخانه می‌باشد.



شکل ۱۱: الف: میان‌برهای شوت نوع غالب میان‌بر مجرای رودخانه زیرنه‌رود در بازه‌های بالادست سد انحرافی نوروزلو؛ آثار یک کانال متروک ناشی از میان‌بر شوت قدیمی نیز در اطراف مجرا قابل مشاهده است؛ ب: رخداد میان‌بر شوت در نتیجه احداث دایک‌ها و رسوب‌گذاری در پناه دایک‌ها و انحراف متعاقب جریان آب؛ ج: رخداد جدید میان‌بر شوت و متروک شدن مجرای سابق در سال‌های اخیر؛ د: مراحل اولیه شکل‌گیری میان‌بر شوت در بالادست شاهین‌دژ همراه با پشته‌های نقطه‌ای محل تلاقی و ابتدا و انتهای مسیر میان‌بر احتمالی. این مناندر در نتیجه برخورد به واحد کوهستان از توسعه بیشتر بازمانده است؛ ه: کانالی که در طی چند سال گذشته متروک شده و متعاقب سیل مهرماه ۱۳۹۳ دارای آب شده است. رشد گیاهان آبی و رسوب‌گذاری ناشی از این جریانات، به تدریج باعث پر شدن مجرا می‌شود؛ و: تشکیل باتلاق در یک کانال متروک در دشت سیلابی رودخانه زیرنه‌رود در بازه (۲)

با توجه به مطالعات میدانی و نتایج پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از مدل HEC-RAS، ایجاد میان‌برهای شوت در بازه‌های بالادست سد انحرافی نوروزلو، مخصوصاً بازه (۲)، را می‌توان به چهار دلیل اساسی زیر نسبت داد:

- مهم‌ترین دلیل و در واقع، مسئول اصلی شکل‌گیری میان‌برهای شوت، سیلاب‌های رودخانه می‌باشد. میان‌برهای شوت در طی جریانات سرریزی ایجاد می‌شوند. با توجه به نمودار عرض سیل‌گیری دشت سیلابی (شکل ۱۰) می‌توان گفت که سیلاب‌های با دوره بازگشت ۵ ساله (و نزدیک به آن)، به دلیل تناوب زیاد و در برگرفتن کمربند مناندر، نقش اساسی در ایجاد میان‌برهای شوت دارند.

- عرضه فراوان رسوب (به صورت محلی) یکی دیگر از دلایل ایجاد میان‌برهای شوت می‌باشد که ناشی از تغییرپذیری فضایی قابلیت فرسایش مواد کناره و همچنین آوردهای رسوبی فراوان مسیل‌ها و رودخانه‌های فصلی می‌باشد. عرضه محلی مازاد رسوب باعث نهشته‌گذاری محلی و تمایل به الگوی گیسوئی و رخداد میان‌بر شوت شده است.

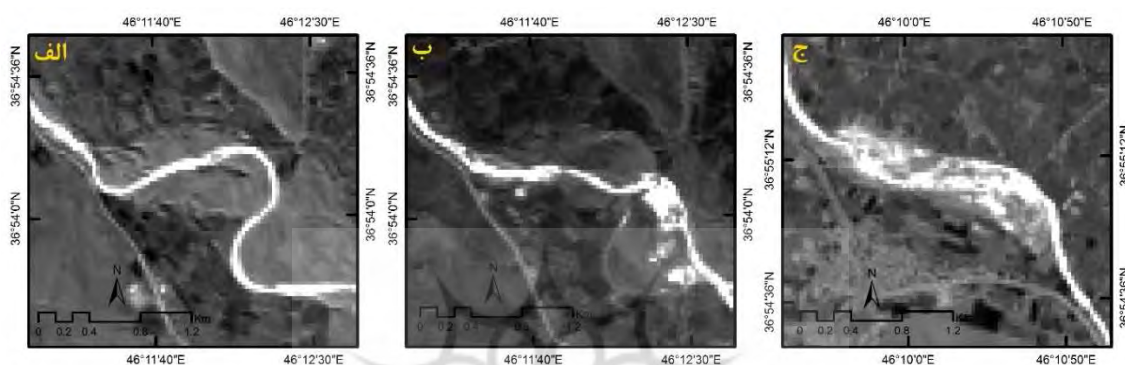
- کنترل محلی متغیر زمین‌شناسی به عنوان یکی از موانع توسعه بیش‌ازحد مناندرها و محدودیت ایجاد میان‌بر گلوگاهی می‌باشد. در برخی مقاطع، مناندرها به واحد کوهستان برخورد کرده و از توسعه بیشتر بازمی‌مانند. در بازه (۱)، این روند همراه با فراوانی جریانات سیلابی دلیل اساسی ایجاد میان‌برهای شوت می‌باشد (شکل ۱۱- د).

- در مواردی محدود، دخالت عامل انسانی در جهت مقابله و محدود نمودن مهاجرت مناندر، باعث ایجاد میان‌بر شوت شده است. احداث دایک‌ها و رسوب‌گذاری موضعی متعاقب، منجر به انسداد محلی شده که با انحراف جریان آب، شرایط مساعد برای ایجاد میان‌بر شوت مهیا شده است (شکل ۱۱- ب).

در بازه (۳) (از پایاب سد نوروزلو تا شهر میان‌دوآب)، پلان فرم مجرا تبدیل به شبه‌مئاندری و مئاندری توسعه‌نیافته می‌شود که به صورت افت ناگهانی ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی در محدوده بین ۵۷ تا ۷۹ کیلومتری رودخانه منعکس شده است (شکل‌های ۲ و ۳). در این بازه، تمایل مجرا به الگوی مستقیم، ناشی از دخالت‌های انسانی به صورت برداشت شن و ماسه و کانالیزه شدن مجرا در محدوده شهر میان‌دوآب می‌باشد. در دشت سیلابی این بازه، فعالیت‌های کشاورزی به شکل گسترده‌ای صورت می‌گیرد. شن و ماسه بستر و کناره‌های رودخانه (مخصوصاً رسوبات پشته‌های کناره‌های محدب به‌عنوان یکی از ارکان اساسی حفظ و توسعه الگوی مئاندری) در یک مقیاس بسیار وسیع و نظارت‌نشده استخراج می‌شود. بنابراین، پلان فرم طبیعی مجرا و مورفولوژی حوضچه-خیزآب^{۱۵} بستر رودخانه در نتیجه عوامل آنتروپوژنیک از بین رفته و حتی در نتیجه گودافتادگی، ارتباط بین دشت سیلابی و مجرای رودخانه قطع شده است (به‌عنوان مثال شکل ۱۳). در نتیجه، این بازه از نظر دینامیک عرضی طبیعی یک بازه مرده محسوب می‌شود. در ابتدای این بازه، برداشت‌های زیادی از آب رودخانه در محل سد انحرافی نوروزلو صورت می‌گیرد و آب رودخانه جهت مصارف مختلف و در حجمی قابل توجه توسط دو کانال احداثی ساحل چپ و ساحل راست منحرف می‌شود. پردازش تصاویر ماهواره‌ای آشکار می‌سازد که دخالت عامل انسانی در دو بازه زمانی اول (قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی) بسیار کمتر از دو بازه زمانی دوم (بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی) بوده است. توسعه و مهاجرت طبیعی چندین مئاندر در قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی نیز نمایانگر این روند می‌باشد. به دلیل مهاجرت جانبی مئاندرها و ایجاد چندین میانبر، نرخ مهاجرت جانبی در دوره‌های زمانی قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی نسبتاً بالا بوده است (به‌عنوان مثال، شکل ۱۲- الف و ب). به طوری که، میزان مهاجرت برای قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی مقادیر نزدیک به ۱/۷ متر در سال را نشان می‌دهد. بیشترین دینامیک این بازه مربوط به زیربازه‌ای به طول تقریباً ۱۰ کیلومتر از پایاب سد انحرافی نوروزلو می‌باشد. برعکس، مقادیر پایین دینامیک جانبی مربوط به بالادست و محدوده شهر میان‌دوآب می‌باشد که به دلیل کانالیزه شدن و احداث خاکریزها، امکان تحرک جانبی از بین رفته است. در طی ۱۵ سال گذشته، مخصوصاً از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ میلادی، آهنگ مهاجرت جانبی، همانند بازه‌های بالادست، افت محسوس پیدا می‌کند که این افت را می‌توان به بروز خشکسالی و کاهش محسوس دبی و همچنین برداشت بی‌رویه آب در محل سد انحرافی نوروزلو و از طرف دیگر به افزایش دخالت‌های انسانی نسبت داد. میانگین نرخ مهاجرت در طی ۱۰ سال گذشته نزدیک به صفر بوده است. با توجه به کاهش محسوس دبی و ویژگی‌های مورفولوژیکی این بازه، می‌توان گفت که در طی ۱۵ سال گذشته، بخش اعظم تغییرات جانبی و عمودی مجرای رودخانه نتیجه قطعی دخالت‌های انسانی بوده است. این تغییرات مخصوصاً به صورت انحراف و تغییر مسیرهای کوچک مقیاس اتفاق افتاده است. در اغلب قسمت‌های این بازه، مجرای رودخانه در داخل بستری عریض و گود افتاده با کناره‌های پرشیب در جریان است (نسبت عرض به عمق بالا و نسبت گودشدگی پایین). با توجه به افت محسوس دبی، این امر باعث شده است که جریان آب در بسیاری از مقاطع در داخل مجرای به‌دوراز کناره‌های مرتفع مجرای کلی رودخانه در جریان باشد. بنابراین، فرسایش کناره در مقیاسی محدود صورت می‌گیرد. هرچند که در برخی از قسمت‌ها، مجرای رودخانه مستقیماً به این کناره‌های پرشیب برخورد کرده و فرسایش پای کناره منجر به گسیختگی‌هایی در کناره‌ها شده است.

در بازه (۳)، شاخص تغییرات کل خط کناره (E)، ۰/۹ متر و آهنگ حرکت جانبی نرمال شده (N) نزدیک به صفر می‌باشد. میانگین تغییرات در عرض کانال فعال با مقدار ۰/۴- نشان‌دهنده تنگ‌شدگی اندک مجرا می‌باشد که این تنگ‌شدگی را می‌توان به کاهش دینامیک جانبی مجرا و اشغال پشته‌های رسوبی توسط پوشش گیاهی (عمدتاً نیزار) نسبت داد. تغییرات مقادیر شاخص‌های کمی در امتداد بازه (۳) عمدتاً ناشی از دخالت‌های گسترده عامل انسانی به صورت برداشت گسترده شن و ماسه بوده است. شاخص پایداری با میانگین ۰/۹ نشان‌دهنده پایداری کلی این بازه می‌باشد. در واقع، وجود بستری عریض

با گودافتادگی زیاد منجر به توقف دینامیک جانبی مجرا و پایداری آن در مقیاس کلی شده است. فرسایش کناره (به صورت فرسایش پای کناره) در مقیاسی محدود و در بازه‌ای به طول ۵ تا ۶ کیلومتری پایاب سد انحرافی نوروزلو صورت می‌گیرد. تغییر مسیر مجرا به دلیل گودافتادگی و انفصال مجرا از دشت سیلابی امکان‌پذیر نبوده و تنها در مقیاسی محدود و آن هم به دلیل دخالت‌های انسانی در داخل بستر عریض رودخانه امکان‌پذیر می‌باشد. قسمت‌هایی از این بازه نیز منطبق بر محدوده شهر میاندوآب می‌باشد که از نظر دینامیک جانبی، بازه‌ای مرده و غیرفعال محسوب می‌شود. تغییرات مقادیر این شاخص‌ها در امتداد این بازه را می‌توان به تغییرات و دستکاری‌های عامل انسانی نسبت داد. بنابراین، با وجود تغییرات زیاد مقادیر این شاخص‌ها، مقادیر شاخص مهاجرت واقعی در اکثر مقاطع دارای مقادیر نزدیک به صفر می‌باشد.



شکل ۱۲: الف: توسعه دو مئاندر متوالی در قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی و ب: آشفستگی ناشی از ایجاد دو میانبر شوت در محل همان مئاندرها، ج: آشفستگی مجرای رودخانه (انحراف و تشکیل چالاب‌ها) در نتیجه برداشت شن و ماسه در بازه (۳).



شکل ۱۳: الف: کناره‌های پرتگاهی رودخانه در بازه (۳)؛ ب: نوع رسوبات در بالادست این بازه. برداشت نظارت‌نشده شن و ماسه در بازه (۳) باعث آشفستگی، عریض شدگی و گودافتادگی مجرای رودخانه در اغلب قسمت‌ها شده است؛ ج: مجرای عریض و گود افتاده باعث انفصال کریدور رودخانه و دشت سیلابی شده است. همچنان که دیده می‌شود، حتی یک سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله نیز قادر به پر کردن مقطع عرضی مجرای رودخانه نیست.

در بازه (۴) نیز دخالت‌های انسانی نسبتاً زیاد می‌باشد؛ اما، زاویه مرکزی در مقاطع زیادی منعکس‌کننده یک پلان فرم مئاندری توسعه‌یافته می‌باشد. با این حال، رسوبات (با غلبه ماسه) پشته‌های پیچشی کناره‌های محدب مجرا در حال استخراج می‌باشد که ادامه این روند منجر به ایجاد میان‌برهای مصنوعی و تبدیل آن به یک الگوی متمایل به مستقیم می‌شود. امری که در برخی از قسمت‌ها رخ داده و به صورت مقادیر پایین ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی منعکس شده است (شکل - های ۲ و ۳). این بازه، منطبق بر بخش میانی مخروط افکنه زربنه رود (جیغاتی) می‌باشد. رسوبات رودخانه از نوع ماسه‌های درشت تا ریز همراه با سیلت و رس می‌باشد که از پتانسیل فرسایش بالایی برخوردار می‌باشند؛ اما، برداشت قابل توجه آب رودخانه در محل سد انحرافی نوروزلو، استخراج ماسه و فعالیت‌های کشاورزی بسیار گسترده در بلافصل رودخانه، توسعه بیشتر مئاندرها را محدود ساخته است. در مواردی نیز از طریق اقدامات مهندسی از توسعه بیشتر مئاندر جلوگیری شده است (شکل ۱۴- الف). به همین دلیل، در طی دوره زمانی مورد مطالعه، مخصوصاً در طی ۱۵ سال گذشته، تغییرات چندانی در ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی خم‌های این بازه رخ نداد است. روند تغییرات عرضی مجرای رودخانه زربنه رود در بازه (۴)

تا حدودی مشابه سایر بازه‌های رودخانه می‌باشد و در طی ۳۰ سال گذشته یک روند کاهشی در نرخ مهاجرت جانبی دیده می‌شود. میانگین آهنگ مهاجرت جانبی برای چهار دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۸۵، ۲۰۰۰-۱۹۹۰، ۲۰۰۷-۲۰۰۰ و ۲۰۱۵-۲۰۰۷ به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۸، ۰/۱۷۵ و ۰/۰۳ متر در سال بوده است. در طی ۱۵ سال گذشته، تغییرات عرضی ناشی از فرایندهای طبیعی رودخانه‌های مئاندری، بسیار ناچیز بوده و بیشتر تغییرات صورت گرفته نیز مربوط به دخالت‌های عامل انسانی به صورت برداشت ماسه بوده است. آهنگ مهاجرت واقعی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ میلادی نزدیک به صفر بوده است. میانگین شاخص تغییرات کل خط کناره (E) ۱ متر و آهنگ حرکت جانبی نرمال شده (N) نزدیک به صفر درصد می‌باشد. مقادیر میانگین این شاخص‌ها و مقدار میانگین ۰/۵- در تغییرات عرض کانال فعال نشان می‌دهد که هرچند تغییراتی در عرض مجرا رخ داده است؛ اما، این تغییرات عمدتاً در جهت کاهش عرض و تنگ‌شدگی مجرا بوده است. در طی سال‌های اخیر، مقادیر دبی عبوری از این بازه (ایستگاه نظام‌آباد) افت بسیار محسوسی داشته است. این افت، حتی به دلیل برداشت مجدد آب در امتداد بازه (۳) شدیدتر از بازه‌های بالادست بوده است. به همین دلیل است که در بسیاری از مقاطع، ماسه‌های بستر مجرای رودخانه با یک پوشش لای و لجن ناشی از رسوب‌گذاری آب‌های راکد پوشیده شده است. این امر باعث تبدیل بخش‌هایی از مجرا به نیزارهای طبیعی و همچنین دست‌اندازی اراضی کشاورزی به حریم بلافصل رودخانه (مخصوصاً پشته‌های نقطه‌ای کناره‌های محدب مجرا) شده است (شکل ۱۴-ج).

در بازه (۵)، مئاندرها به حداکثر توسعه خود می‌رسند و با دارا بودن میانگین زاویه مرکزی ۱۳۹ درجه، در طبقه مئاندری بیش از حد توسعه یافته جای می‌گیرند. در این بازه، هرچند که در طی دوره زمانی مورد مطالعه، مئاندرها هم در جهت عرضی و هم در جهت بالادست و پایین دست مهاجرت کرده‌اند؛ اما، تنها یک مورد از اشکال ژئومورفیکی نعل اسبی در اطراف رودخانه به وجود آمده که به صورت برکه‌ای نمود یافته است (شکل ۱۴-ب). این امر را می‌توان به پایین بودن نرخ مهاجرت مئاندرها نسبت داد. بطوریکه، همانند بازه بالادست، مقادیر سینوزیته و ضریب خمیدگی تغییرات چندانی را، به‌ویژه در طی ۱۵ سال گذشته، نشان نمی‌دهند. تنها در فاصله زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ م. در نزدیکی مصب رودخانه، فرایند ایجاد میان‌بر گلوگاهی منجر به کوتاه‌شدگی ۲ کیلومتری مسیر رودخانه در محل میان‌بر شده است. با این حال، ضریب خمیدگی به دلیل توسعه سریع و ناگهانی مئاندری دیگر، تغییر چندانی نیافته است. در این بازه، آشفتنگی‌های ناشی از دخالت‌های عامل انسانی در پلان فرم مجرا به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. میانگین نرخ مهاجرت جانبی در طی دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۸۵ در حدود ۱/۳ متر در سال بوده است که به ۲/۲ متر در سال در فاصله زمانی بین ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ میلادی افزایش می‌یابد. دلیل اساسی این افزایش مربوط به توسعه سریع دو مئاندر متوالی در نزدیکی مصب رودخانه می‌باشد که منجر به ایجاد میان‌بر گلوگاهی می‌شود. این فرایند، منجر به مجموعه‌ای از تغییرات جانبی قابل توجه در طی چند سال متعاقب شده است. با توجه به عدم تغییر و حتی کاهش دبی رودخانه در طی این سال‌ها، افزایش دینامیک جانبی مجرا در بالادست محل میان‌بر را نیز می‌توان به اثرات متعاقب این میان‌بر نسبت داد. کوتاه و مستقیم شدن محلی مجرای رودخانه، باعث زنجیره‌ای از بازخوردهای مثبت (اثر گلوله برفی) بین شیب، سرعت، تنش برشی و توان رودخانه شده که منجر به افزایش فرسایش کناره و مهاجرت جانبی مجرا در بالادست میان‌بر شده است. با توسعه مجدد مئاندرهای بالادست و پایین دست و کاهش شیب، بازخورد منفی برقرار شده و مجرا پایدار شده است. همانند سایر بازه‌های رودخانه زرینه‌رود، مهاجرت جانبی در دوره زمانی بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی افت محسوسی می‌یابد و به میانگین ۰/۴ متر در دوره زمانی ۲۰۰۷-۲۰۰۰ و ۰/۰۸ متر در دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۷ می‌رسد. میانگین آهنگ مهاجرت واقعی در طی ۱۰ سال گذشته، همانند بازه بالادست، نزدیک به صفر بوده است. میانگین شاخص تغییرات کل خط کناره (E)، ۰/۹۷؛ میانگین آهنگ حرکت جانبی نرمال شده نزدیک به صفر درصد و میانگین تغییرات عرض کانال فعال ۰/۳- بوده است که مشابه بازه‌های بالادست، نشان‌دهنده تنگ‌شدگی کلی مجرا و غلبه فرایندهای انباشت و نهشته‌گذاری بر فرایندهای فرسایشی می‌باشد (شکل‌های ۴ تا ۱۰).



شکل ۱۴: الف: احداث دایک‌ها در جهت مقابله با مهاجرت جانبی منادر در بازه (۴). برداشت ماسه از پشت‌های رسوبی کناره‌های محدب منادرها به‌روشنی قابل‌مشاهده است؛ ب: میان‌بر گلوگاهی و تشکیل برکه نعل‌اسبی؛ ج: دست‌اندازی پوشش گیاهی به مجرای رودخانه در پایین‌دست میاندوآب

بررسی مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر دینامیک عرضی مجرای رودخانه زیرنه‌رود

بدون شک، در طی چند دهه گذشته، عوامل آنتروپوژنیک بیشترین نقش را در تحولات مورفولوژیکی رودخانه زیرنه‌رود ایفا نموده‌اند. با بهره‌برداری از سد مخزنی شهید کاظمی و سد انحرافی نوروزلو، رژیم دبی و رسوب و به‌تبع آن، متغیر وابسته مورفولوژی رودخانه دست‌خوش تغییرات شدیدی شده است. به‌طوریکه حتی می‌توان به تغییر الگو از گیسوئی به مئاندری در بازه (۱) و (۲) اشاره کرد. اما از نظر دستکاری مستقیم بر روی مورفولوژی رودخانه، دخالت‌های انسانی در بازه‌های (۱)، (۲) و (۵) به‌صورت محلی باقی‌مانده است. هرچند تغییرات زیادی در کاربری اراضی دشت سیلابی رودخانه صورت گرفته است؛ اما، این تغییرات به‌صورتی نبوده است که تغییرات جدی در پلان فرم و مورفولوژی بستر رودخانه ایجاد کرده باشد. اما می‌توان گفت که تغییرات جانبی و عمودی رودخانه در بازه‌های (۳) و (۴) در کنترل متغیر انسانی بوده است. با توجه به مقیاس زمانی این پژوهش (مقیاس مهندسی)، از نقش تکتونیک فعال در تغییرات مورفولوژیکی مجرا صرف‌نظر شده است.^{۱۶} در ادامه، با توجه به مطالعات میدانی و نتایج کمی مدل‌ها و شاخص‌های مورد‌استفاده، مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده تغییرات جانبی و تغییرپذیری فضایی آن‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد:

– سیلاب‌ها و توان رودخانه

توانایی انجام کار ژئومورفیک رودخانه‌ها، معمولاً به‌عنوان توان رودخانه (SP) بیان می‌شود (بیزی و لرنر^{۱۷}، ۲۰۱۵: ۲۷-۱۶). سیلاب‌ها، با افزایش قابل‌توجه توان رودخانه، نقش چشمگیری در تغییرات مورفولوژیکی مجرای رودخانه‌ها ایفا می‌کنند (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۰-۱). با افزایش دوره بازگشت، به دلیل افزایش دبی رودخانه، بر میزان SP و در نتیجه توان تغییرات مورفولوژیکی افزوده می‌شود که اگر با شرایط محلی، مخصوصاً فرسایش‌پذیری مواد بستر و کناره‌ها ترکیب شود، می‌توان به پتانسیل فرسایش و نهشته‌گذاری در قسمت‌های مختلف مجرا پی برد. در مورد زیرنه‌رود، توان رودخانه نسبت به دبی لب‌پری (دبی با دوره بازگشت ۱/۳۳ سال برای بازه‌های بالادست سد نوروزلو و دبی با دوره بازگشت ۱/۵ سال برای بازه‌های پایاب سد نوروزلو)، برای سیلاب‌های ۲، ۵، ۱۰ و ۲۵ ساله، به ترتیب در حدود ۱۷/۸، ۶۲/۳، ۹۲/۳ و ۱۲۵/۲ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش دوره‌های بازگشت بر میزان پخش سیلاب در پهنه دشت سیلابی افزوده می‌شود و فرسایش دشت سیلابی ناشی از دبی لب‌ریزی و احتمال وقوع میان‌برها و تغییر مسیرها افزایش می‌یابد. در رودخانه زیرنه‌رود، توان رودخانه از تغییرپذیری فضایی و زمانی قابل‌توجهی برخوردار می‌باشد. توان رودخانه، علاوه بر تغییرپذیری زمانی ناشی از رژیم دبی، دارای سه نوع تغییرپذیری فضایی عمده می‌باشد:

^{۱۶} - در امتداد بازه مطالعاتی زیرنه‌رود، در چهار کیلومتری پایاب سد انحرافی نوروزلو گسلی کوچک به طول حدود ۹/۵ کیلومتر مجرای رودخانه را به صورت عرضی قطع نموده است. در یک کیلومتری پایین‌دست این گسل، در محدوده روستاهای قشلاق در دست راست و حسین‌آباد قلعه در دست چپ مجرا، یک نقطه کنیک وجود دارد. با توجه به شواهد میدانی می‌توان گفت که حتی اگر گسل فوق‌الذکر در ایجاد این نقطه کنیک دخالت داشته باشد، نمی‌توان برداشت نابرابر مواد بستر رودخانه در ایجاد این خط شکست شیب را نادیده گرفت.

^{۱۷} - Bizzi & Lerner

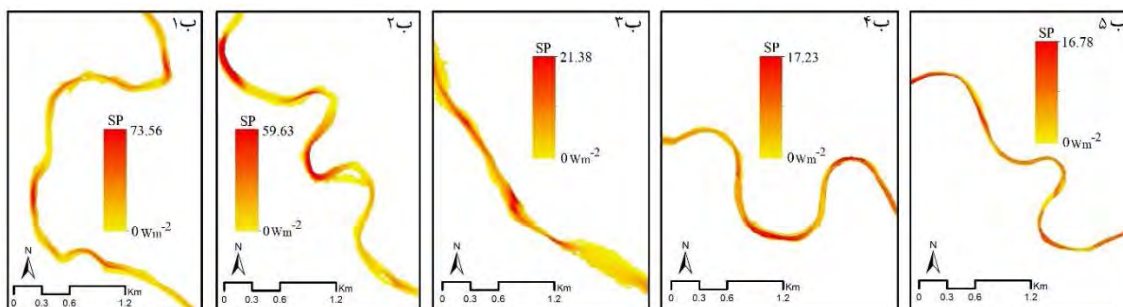
- یک روند کلی کاهش توان رودخانه در جهت پایین دست دیده می‌شود (شکل ۱۵) که علت اصلی آن، کاهش شیب و ازاین‌رو کاهش سرعت و تنش برشی مجرا می‌باشد. علاوه بر این، در جهت پایین دست، انشعاب مهمی که توانایی افزایش محسوس دبی و توان رودخانه را داشته باشد وجود ندارد. این انشعابات بیشتر از نظر تأمین و عرضه رسوب دارای اهمیت می‌باشند.

- تغییرپذیری فضایی ناشی از پلان فرم مجرا. توان رودخانه در نزدیکی کناره‌های خارجی خم‌های ماندرها، بیشتر و در نزدیکی کناره‌های محدب، کمتر می‌باشد. در مقطعی که مجرا به دلیل فرسایش‌پذیری زیاد مواد کناره یا برداشت شن و ماسه رودکنار، عریض‌تر شده است توان رودخانه کاهش پیدا می‌کند.

- تغییرپذیری ناشی از مورفولوژی بستر رودخانه. توان رودخانه در حوضچه‌ها به مراتب بیشتر از خیزآب‌ها می‌باشد. توان رودخانه، مخصوصاً در داخل حوضچه‌های ناشی از آب شستگی خم ماندرها، افزایش محسوسی نسبت به خیزآب‌ها دارد. دو مورد اخیر، نشان‌دهنده پتانسیل مهاجرت ماندرهای رودخانه در دشت سیلابی می‌باشد. پتانسیل انجام کار ژئومورفیک (توان رودخانه) در بازه (۱)، مخصوصاً در داخل خم‌های ماندرها، زیاد است. اما بستر رودخانه در بیشتر قسمت‌ها متشکل از آبرفت‌های در حد پاره‌سنگ و قلوه‌سنگ می‌باشد (D₅₀ این بازه در حدود ۹۰ میلی‌متر است). در نتیجه، توان رودخانه از انجام کار ژئومورفیک محدودی برخوردار بوده و به علت مواجهه با یک بستر آرمورینگ، توانایی کف‌کنی آن اندک است. در مورد فرسایش کناره نیز همین شرایط صادق است؛ بطوریکه، کناره‌های رودخانه یا از نوع رسوبات درشت‌دانه می‌باشند که اغلب به‌خوبی سیمانی شده‌اند و یا اینکه، در نتیجه مهاجرت خم‌ها مستقیماً به واحد کوهستان برخورد کرده‌اند. می‌توان گفت که محدود بودن پشته‌های رسوبی، دلیلی بر حاکمیت فرایند انتقال رسوب و محدودیت نهشته‌گذاری در قسمت اعظم این بازه است. به محض اتمام بازه اول، تغییرات زیادی در عرض دشت سیلابی و به تبع آن، عرض پهنه‌های سیل‌گیر، مواد بستر، مواد کناره و دشت سیلابی دیده می‌شود. این بازه، می‌تواند به صورت نمونه مشخصی از رودخانه‌های با بستر گراولی محسوب شود (D₅₀ این بازه ۱۵ میلی‌متر است). جنس کناره‌ها از رس و سیلت تا گراول متغیر است. هرچند که توان رودخانه نسبت به بازه اول پایین‌تر است؛ اما، کناره‌های رودخانه، عمدتاً منطبق بر حاشیه مخروط‌افکنه‌های محمودآباد و کشاورز یا رسوبات تراس‌های رودخانه است که عموماً لایه‌لایه بوده و ترکیبی از رس و سیلت تا گراول دارند. در این بازه، عوارض فرسایشی و رسوبی به فراوانی در مجاورت هم دیده می‌شود (شکل ۱۶-الف) که علت اصلی آن را می‌توان به تغییرات محلی توان رودخانه نسبت داد. همچنان که بیزی و لرنر (۲۰۱۵) بیان می‌دارند: «برای رودخانه‌های با بستر گراولی، حضور گسترده پشته‌های گراولی فاقد پوشش گیاهی نشان‌دهنده تأمین رسوب غنی از بالادست است، که تا حدی در بازه ذخیره‌شده و به‌طور مداوم توسط سیلاب‌های دوره‌ای دستکاری می‌شوند». در نتیجه، در قسمت‌هایی که توان رودخانه کاهش می‌یابد، می‌توان شاهد نهشته‌گذاری حجم زیادی از رسوبات، هم‌زمان و بعد از گذر موج سیلاب بود؛ بطوریکه، در برخی قسمت‌ها، مجرای رودخانه رفتار آستانه‌ای گذر به الگوی گیسوئی را نشان می‌دهد. در رابطه با سیلاب‌های با دوره بازگشت ۵ سال و بالاتر، پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه افزایش محسوسی می‌یابد (شکل ۱۰). این امر، تأثیر زیادی بر دشت سیلابی (فرسایش و نهشته‌گذاری)، مخصوصاً در محدوده مخروط‌افکنه محمودآباد، می‌گذارد که دارای رسوبات بسیار حساس به فرسایش می‌باشند. این شرایط، منجر به دستکاری شدید دشت سیلابی در طی سیلاب‌های با دوره بازگشت بالاتر شده است (شکل ۱۷-د). در این بازه، میان‌برهای شوت در نتیجه سیلاب‌ها رخ می‌دهند و نشانه‌ای از ناپایداری مجرای رودخانه می‌باشند.

با مقایسه مقادیر توان رودخانه در بازه‌های بالادست و پایین دست سد انحرافی نوروزلو می‌توان به اهمیت نقش توان رودخانه در تغییرات عمودی و جانبی مجرای رودخانه پی‌برد. توان رودخانه از پایاب سد انحرافی نوروزلو افت محسوسی می‌کند. در واقع، انحراف و برداشت مقادیر قابل توجه آب رودخانه در محل این سد باعث کاهش دبی و در نتیجه کاهش توان رودخانه در بازه‌های پایین دست می‌شود. حتی با اینکه در مواقع سیلابی، حجم آب عبوری از این سد قابل توجه می‌باشد؛ اما در

بازه‌های (۳) و (۴)، دبی لب‌پری مفهوم خود را تا حد زیادی از دست می‌دهد. پخش جریان آب در بستری عریض و گود باعث اتلاف قابل‌توجه انرژی رودخانه شده و توان رودخانه مقادیر پایینی را (حتی برای دبی‌های حداکثر سالانه) نشان می‌دهد. از طرف دیگر، از بین رفتن پلان‌فرم مائندری و مورفولوژی حوضچه - خیزآب بستر مجرای رودخانه نیز باعث کاهش نوسانات ذاتی عرضی و طولی مقادیر توان رودخانه و پتانسیل مهاجرت جانبی شده است.



شکل ۱۵: توان رودخانه در قسمت‌های گزینشی پنج بازه (ب تا ه) مجرای رودخانه

- لیتولوژی و مواد دربرگیرنده مجرا^{۱۸}

بازه مطالعاتی رودخانه زرينه‌رود از نوع رودخانه‌های با بستر آبرفتی است و بخش اعظمی از کناره‌های رودخانه منطبق بر آبرفت‌های عهد حاضر و جوان می‌باشد (Q^{al} و Q^{l2}). واحد Q^{al} انباشته‌های خیلی جوان موجود در بستر و کناره‌های مجرای اصلی و انشعابات می‌باشند و عمدتاً شامل آبرفت‌های با اندازه‌های متغیر هستند. اندازه این آبرفت‌ها با صرف‌نظر از آشفستگی-های موجود در محل تلاقی انشعابات (مخصوصاً تلاقی اجرلوچای)، از مواد با غلبه پاره‌سنگ و قلوه‌سنگ در بازه اول تا مواد با غلبه سیلت و رس در بازه (۵) تغییر می‌یابد. واحد Q^{l2} گسترده‌ترین سازند موجود در کناره‌ها و دشت سیلابی رودخانه زرينه‌رود می‌باشد که شامل آبرفت‌های جوان، رسوبات دشت، تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌ها می‌باشد و جنس آن‌ها عمدتاً شامل قلوه‌سنگ، گراول و ماسه می‌باشد. در قسمت‌های محدودی از رودکنار نیز تراس‌های قدیمی یا Q^{l1} رخنمون یافته است و از نظر لیتولوژی، کنگلومرای با سیمان رسی و ماسه‌ای نسبتاً سست است. این واحد به‌صورت محدودی در ساحل مقابل مخروط‌افکنه انشعابی اجرلوچای و کناره چپ واقع در پایاب سد انحرافی نوروزلو دیده می‌شود. این واحد، در مقایسه با سازندهای فوق از مقاومت بیشتری برخوردار است. سایر سازندهای موجود در کناره‌های مجرای رودخانه به‌صورت تپه‌های پراکنده یا کوهستان‌هایی هستند که نسبت به فرایندهای فرسایش رودخانه‌ای از مقاومت زیادی برخوردار می‌باشند. این سازندها در بازه‌های بالادست سد انحرافی نوروزلو، مخصوصاً در بازه (۱)، حضور دارند. واحد Q^{pl} کنگلومرای با افق‌های ماسه‌ای و کمی مارن سیلتی (دوره پلیوکواترنری) می‌باشد (شکل ۱۶-ب). این واحد در ابتدا و انتهای بازه (۱) رخنمون یافته است. کناره‌های منطبق بر این واحد از پایدارترین کناره‌های مجرای رودخانه می‌باشند. مقادیر اندک ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی در محدوده شهر شاهین‌دژ تا محمودآباد به طول تقریباً ۱/۳ کیلومتر به دلیل وجود همین سازند می‌باشد. این زیربازه در طی ۳۰ سال گذشته از کم‌ترین میزان دینامیک عرضی برخوردار بوده است. علاوه بر این سازند، تمامی سازندهای دوره میوسن، اتوسن، کرتاسه و پرمین موجود در منطقه مورد مطالعه به‌عنوان واحدهای با مقاومت بالا در مقابل فرسایش محسوب می‌شوند و تأثیراتی را بر روی مورفولوژی مجرای رودخانه گذاشته‌اند. بیشترین تأثیرات مورفولوژیکی واحدهای مقاوم سنگ‌شناسی، مربوط به بازه (۱) می‌باشد. در این بازه، مائندرها در نتیجه مهاجرت، به واحد مقاوم کوهستان برخورد می‌کنند و به علت مقاومت زیاد مواد کناره خارجی خم، از توسعه بیشتر باز می‌مانند (برای نمونه، شکل ۱۶-د). سازندهای زمین‌شناسی مقاوم این بازه، علاوه بر کنگلومرای فوق‌الذکر، شامل واحد M^1 یا سنگ‌آهک ریفی دوره میوسن (شکل ۱۶-الف) و واحد E_k^1 یا توف سبز، توف ماسه‌ای، ماسه‌سنگ توفی و شیل (سازند کرج) دوره اتوسن می‌باشد (شکل ۱۸).

در بازه (۲)، تأثیرات سازندهای مقاوم زمین‌شناسی بیشتر به صورت محلی باقی می‌مانند. بیشترین تأثیر، مربوط به کناره‌های مقابل مخروط‌افکنه اجرلوچای می‌باشد که منطبق بر واحدهای K_{II}^1 یا سنگ‌آهک میکرایتی متوسط لایه دوره کرتاسه؛ M^{ml} یا تناوب آهک، آهک مارنی و مارن دوره میوسن و واحد M^1 یا سنگ‌آهک ریفی دوره میوسن می‌باشند. جریان پراثرژی و پر رسوب انشعاب اجرلوچای، مجرای اصلی رودخانه را به طور قابل توجهی منحرف ساخته است. اما همچنان که در شکل (۱۸) دیده می‌شود، برخورد مجرای رودخانه به واحدهای مقاوم سنگ‌آهک، مانع از جابجایی بیشتر و توسعه مئاندرها در کناره‌های دست چپ مجرای رودخانه شده است. در امتداد جاده کشاورز - میاندوآب، در قسمت‌هایی که مجرای رودخانه تا نزدیکی جاده جابجا شده است، حضور برخی واحدهای مقاوم مانند واحد K_{II}^s یا تناوب شیل و ماسه‌سنگ دوره کرتاسه مانع از پیشروی و توسعه مئاندرها و تخریب جاده شده است. این واحد شامل تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ، آهک‌های شیلی و شیل‌های آهکی نازک لایه است. هرچند شیل‌های موجود در این سازند در برابر هوازگی و فرسایش آسیب‌پذیر می‌باشند (شکل ۱۶-ج)؛ اما رخنمون این سازند در کناره‌های رودخانه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موانع جابجایی جانبی مجرای رودخانه محسوب می‌شود.

بازه‌های پایاب سد انحرافی نوروزلو، منطبق بر مخروط‌افکنه زربینه‌رود (جیغاتی‌چای) می‌باشند. بنابراین، بستر و کناره‌های رودخانه منطبق بر واحد آبرفت‌های عهد حاضر (Q^{al}) و واحد آبرفت‌های جوان (Q^{al} و Q^{l2}) می‌باشد. در رودکنار این بازه‌ها، به صورت بسیار محدود، واحد مقاوم P_{rd} یا تناوب دولومیت، آهک‌های دولومیتی و سنگ‌آهک دوره پرمین (سازند روته) و واحدهای بسیار مقاوم M^{vbr} یا برش‌های ولکانیکی بازیک دوره میوسن و M^{av} یا سنگ‌های ولکانیکی، آندزیتیک بازالت دوره میوسن رخنمون یافته است (شکل ۱۸).



شکل ۱۶: الف: چین‌خوردگی سنگ‌آهک دوره میوسن (M^1) به صورت یک تاق‌دیس که به صورت محلی یکی از موانع اساسی توسعه مئاندرهای مجرا می‌باشد؛ ب: کنگلومرای پلیوکواترنری (Q_{pl}) حاشیه مجرای رودخانه در بازه (۱)؛ ج: تناوب شیل و ماسه‌سنگ دوره کرتاسه (K_{II}^s) به‌عنوان مانع اصلی تخریب بخشی از جاده میاندوآب - شاهین‌دژ در بازه (۲)؛ د: توقف مهاجرت مئاندر در نتیجه برخورد به واحد کنگلومرای مقاوم در بازه (۱).

مواد کناره، پلان فرم مجرای رودخانه زربینه‌رود را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. تقریباً در تمامی مقاطعی که رس‌ها مواد غالب تشکیل‌دهنده کناره‌ها می‌باشند، الگوی مئاندری توسعه‌یافته شکل گرفته است. عکس‌العمل کناره‌های رسی نسبت به فرایندهای فرسایش رودخانه‌ای (رودخانه‌ای و ژئوتکنیکی)، بسته به شرایط محلی، بسیار متفاوت می‌باشد که عمدتاً وابسته به ارتفاع و شیب کناره‌ها می‌باشد. به‌طوریکه، در محدوده روستاهای نوروزآباد، ینگه آرخ و آغچه‌لو، رس‌های کناره به

دلیل ارتفاع و زاویه نسبتاً زیاد کناره‌ها (مخصوصاً در کناره‌های بُرشی مئاندرها)، در نتیجه فرسایش پای کناره به شدت در معرض گسیختگی‌های توده‌ای قرار گرفته‌اند. در این قسمت‌ها، مکانیسم اصلی توسعه مئاندرها، فرایند گسیختگی توده‌ای کناره‌های مقعر می‌باشد. در نتیجه‌ی این فرایند، اراضی کشاورزی به شدت در حال تخریب می‌باشند (شکل ۱۷-ب و ج). برعکس، در بازه (۵) که کناره‌ها دارای سیلت و رس فراوان می‌باشند (شکل ۱۷-ط)، خاصیت چسبندگی رس با توان پایین رودخانه و شیب ملایم کناره‌ها توأم شده و مهاجرت مئاندرها را محدود ساخته است. در واقع، در یک دشت سیلابی چسبناک رسی، رودخانه‌های مئاندری توسعه می‌یابند (گیبلینگ و دیویس^{۱۹}، ۲۰۱۲: ۱۰۵-۹۹؛ کلینهناس، ۲۰۱۰: ۳۲۶-۲۸۷). برعکس، در قسمت‌هایی که مواد کناره متشکل از گراول‌های ریزودرشت می‌باشد (از قبیل محدوده روستای قره‌قویونلو) (شکل ۱۷-و)، بستر رودخانه به علت تنظیم جانبی فعال، عریض شده و زاویه مرکزی مئاندرها مقادیر پایینی را نشان می‌دهند. این بازه‌ها رفتار آستانه‌ای گیسوئی- مئاندری را نمایش می‌دهند. همین شرایط برای کناره‌هایی که از توالی رس و ماسه و گراول ساخته شده‌اند نیز صادق است (برای نمونه، شکل ۱۷-ه). در این رابطه می‌توان به قسمت‌های بالادست بازه (۲) اشاره کرد که منطبق بر مخروط افکنه تکامل نیافته جوشاتوچای می‌باشند و مواد کناره و دشت سیلابی از فرسایش-پذیری بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. فرسایش‌پذیری زیاد این مواد منجر به عریض‌شدگی مجرا و رفتار آستانه‌ای شده است. داده‌های ژئوتکنیک رودخانه زربینه‌رود (سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی) اطلاعات جامعی درباره مواد کناره سه بازه پایاب سد انحرافی نوروزلو در اختیار قرار می‌دهد. تعداد ۲۹ گمانه در ساحل راست و ۲۸ گمانه در ساحل چپ به روش حفاری دورانی با استفاده از اوگر حفر گردیده است. عمق این گمانه‌ها بین ۷ تا ۱۰ متر متغیر بوده و فاصله آن‌ها به‌طور متوسط حدود ۲ کیلومتر از یکدیگر انتخاب گردید. داده‌های این لوگ‌ها نشان می‌دهد که یک‌لایه رسی روئی به ضخامت‌های مختلف در کناره‌های این بازه‌ها وجود دارد. سپس لایه‌های گراول و ماسه برای بازه‌های (۳) و (۴) غلبه می‌یابد. از محل سد نوروزلو تا شهر میاندوآب به تدریج از میزان گراول کناره‌ها و بستر مجرا کاسته شده و بر میزان ماسه افزوده می‌شود. همچنین، از پایین دست میاندوآب تا مصب رودخانه به تدریج بر مقدار رس افزوده می‌شود به‌طوری‌که لوگ‌های انتهایی نشان‌دهنده غلبه رس و مقداری ماسه بسیار ریزدانه می‌باشد (D₅₀ مواد بستر رودخانه در بازه (۳) تقریباً ۳ میلی‌متر، در بازه (۴) تقریباً ۰/۲ میلی‌متر و در بازه (۵) در حدود ۰/۰۶ میلی‌متر می‌باشد). علی‌رغم فرسایش‌پذیری مواد کناره در بازه‌های (۳) و (۴)، فرسایش کناره به دلیل دخالت‌های انسانی از نرخ‌های بسیار پایینی برخوردار می‌باشد که دلیل اساسی آن، علاوه بر افت محسوس دبی می‌تواند به عریض‌شدن بستر در نتیجه برداشت گسترده شن و ماسه نسبت داده شود. هرچند در برخی از قسمت‌ها، مخصوصاً در پایاب سد انحرافی نوروزلو، فرسایش کناره هنوز هم فعال می‌باشد.



شکل ۱۷: الف: به دلیل فرسایش پذیری شدید کناره‌ها (متشکل از گراول، ماسه و رس) پوشش گیاهی (حتی به صورت درخت) نقش چندانی در تثبیت کناره‌ها ندارند؛ ب و ج: توسعه مماندرها همراه با گسیختگی توده‌ای و تخریب اراضی کشاورزی در کناره‌های رسی؛ د: مواد بسیار فرسایش پذیر دشت سیلابی در محدوده محمودآباد؛ ه: کناره‌های منطبق بر توالی گراول، ماسه و رس؛ و: کناره‌های با غلبه گراول؛ ز: پوشش گیاهی متراکم (درختچه‌های گز) دشت سیلابی در محدوده نورزولو؛ ح: مواد با غلبه ماسه در پایین دست شهر میاندوآب؛ ط: کناره‌های رسی در بازه (۵).

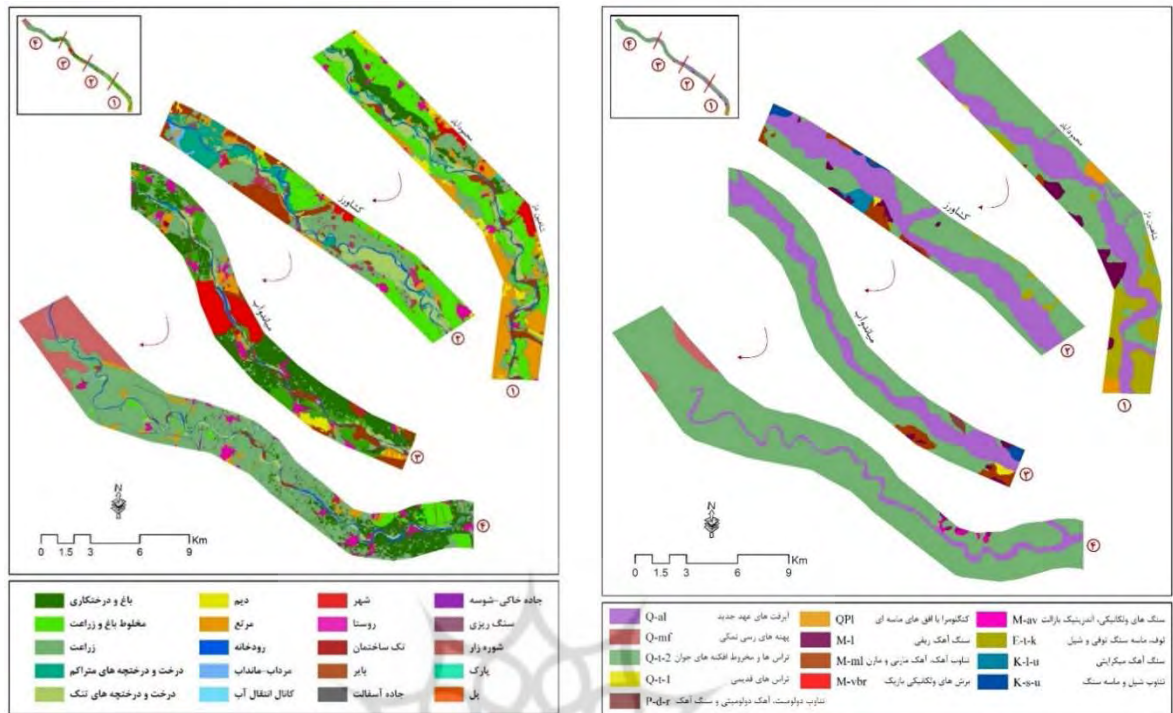
کاربری اراضی و پوشش گیاهی رودکنار

با توجه به شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، در طی ۳۰ سال گذشته، یک روند افزایشی در تراکم پوشش گیاهی منطقه رودکنار و دشت سیلابی رودخانه زربینه رود دیده می‌شود. در طی این بازه زمانی، در حدود ۴۹ درصد بر تراکم پوشش گیاهی رودکنار و دشت سیلابی بازه مطالعاتی زربینه رود افزوده شده است. به استثنای بازه (۳)، در سایر بازه‌های مطالعاتی، پوشش گیاهی از افزایش قابل توجهی برخوردار بوده است. این افزایش به میزان ۶۳ درصد برای بازه (۱)، ۶۹ درصد برای بازه (۲)، ۵۱ درصد برای بازه (۴) و ۸۰ درصد برای بازه (۵) بوده است. در بازه (۳)، در حدود چهار درصد از پوشش گیاهی رودکنار کاسته شده است. در واقع، به دلیل توسعه فیزیکی سکونتگاه‌های موجود در منطقه (مخصوصاً توسعه فیزیکی شهر میاندوآب) و همچنین تخریب پوشش گیاهی قسمت‌هایی از رودکنار (در نتیجه برداشت شن و ماسه)، پوشش گیاهی این بازه در برخی از قسمت‌ها تخریب شده است. در بازه‌های بالادست سد انحرافی نورزولو، پوشش گیاهی رودکنار و دشت سیلابی از تغییرپذیری فضایی بسیار زیادی برخوردار است و از کناره‌های بایر و فاقد پوشش گیاهی تا کناره‌های با پوشش گیاهی متراکم درختچه‌ای و باغات متغیر می‌باشد. با اینکه در طی ۳۰ سال گذشته در بازه‌های بالادست سد انحرافی نورزولو افزایش قابل توجهی در میزان پوشش گیاهی به دلیل تبدیل اراضی دیم و بایر به اراضی کشاورزی آبی صورت گرفته است اما هنوز هم مقاطع زیادی وجود دارند که عاری از پوشش گیاهی می‌باشند و یا پوشش گیاهی بسیار

تُنک و پراکنده‌ای دارند. پوشش گیاهی طبیعی این بازه‌ها، علاوه بر پوشش چمن‌زار، به صورت درختچه‌های پراکنده یا متراکم گز (یولقون) و ردیف‌هایی از درختان بید در مجاورت رودخانه می‌باشد. با اینکه درختچه‌های گز دارای ریشه‌های عمیق می‌باشند اما به دلیل پراکنده بودن و نوع ریشه، نقش محدودی در تثبیت و پایداری کناره‌ها ایفا کرده‌اند. یکی از دلایل اساسی رفتار آستانه‌ای (مئاندری - گیسوئی) در قسمت‌هایی از این بازه‌ها، علاوه بر فرسایش‌پذیری بالای مواد کناره، به پراکنده و متفرق بودن پوشش گیاهی مربوط می‌شود. کناره‌های با پوشش گیاهی تنک، تمایل به همراه شدن با رودخانه‌های گیسوئی دارند (کروساتو، ۲۰۰۸: ۴۰). مهم‌ترین اثرات پوشش گیاهی بر روی مورفولوژی مجرای رودخانه، اثرات تثبیت‌کنندگی و جلوگیری از فرسایش مواد کناره می‌باشد. اما درصد قابل توجهی از کناره‌های رودخانه در بازه (۱) و بازه (۲) تا ابتدای مخروط افکنه انشعابی اجرلوچای دارای پوشش گیاهی ضعیف و پراکنده می‌باشد. این پوشش گیاهی عمدتاً به صورت درختچه‌های پراکنده گز می‌باشد. در قطعاتی نیز، علی‌رغم وجود پوشش گیاهی غنی و متراکم در کناره‌های رودخانه، فرسایش کناره شدید می‌باشد. در واقع، در مواردی که مواد کناره از فرسایش‌پذیری بسیار بالایی برخوردار می‌باشند (محدوده محمودآباد) از اهمیت پوشش گیاهی کاسته می‌شود. در مواردی نیز به علت حضور کناره‌های رسی پرشیب و مرتفع، پوشش گیاهی (حتی به صورت درخت و درختچه) به واسطه فرسایش پای کناره و فعال شدن گسیختگی توده‌ای قادر به حفاظت کناره‌ها در مقابل فرایندهای فرسایشی نمی‌باشند.

بیشترین میزان تأثیرگذاری و کارایی پوشش گیاهی بر تثبیت و پایداری کناره رودخانه، نه تنها در بازه (۲)، بلکه در کل مسیر مجرای رودخانه زرينه‌رود مربوط به پایین‌دست بازه (۲) یعنی از محدوده تلاقی رودخانه زرينه‌رود با جاده میان‌دوآب - شاهین‌دژ در فاصله ۶ کیلومتری شهر کشاورز تا سد انحرافی نوروزلو می‌باشد. این منطقه منطبق بر یک پوشش درختچه‌ای متراکم با غلبه درختچه‌های گز همراه با پوشش چمن می‌باشد که در قسمت‌های پایین‌دست منطبق بر تالاب نوروزلو می‌باشد (شکل ۱۷-ز). در این قسمت، در طی ۳۰ سال گذشته مجرای رودخانه از نظر جانبی تغییرات بسیار اندکی داشته است. حتی پشته‌های داخل مجرا نیز با پوشش گیاهی متراکم اشغال شده و تثبیت گردیده‌اند. این بازه را می‌توان به عنوان یک بازه با کناره‌های پایدار در نظر گرفت. درختچه‌های متراکم گز با ریشه‌های درهم‌تنیده، تحرک جانبی مجرای رودخانه را به حداقل ممکن رسانده است. علی‌رغم افزایش قابل توجه پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه در این قسمت، پوشش گیاهی متراکم دشت سیلابی امکان رخداد تغییر مسیر مجرا را به حداقل ممکن کاهش داده است.

در بازه‌های پایین‌دست سد انحرافی نوروزلو، اراضی رودکنار به صورت متراکمی تبدیل به اراضی کشاورزی شده است. فعالیت‌های کشاورزی در این بازه‌ها تا قسمت‌های میانی بازه (۴) (تا محدوده روستاهای یاریجان و اینچه) به صورت باغداری می‌باشد و سپس تبدیل به اراضی زراعی می‌شود. تغییر بافت خاک در قسمت‌های انتهایی بازه (۴) و کل بازه (۵) نقش اساسی در این روند دارد. در نهایت، به طرف شوره‌زارهای دریاچه ارومیه از میزان فعالیت‌های کشاورزی کاسته می‌شود (شکل ۱۹). در بازه‌های پایاب سد انحرافی نوروزلو، هم به دلیل کاهش دبی و دینامیک جانبی مجرا و هم به دلیل توسعه فعالیت‌های کشاورزی، حریم رودخانه به اشغال پوشش گیاهی درآمده است. در طی این فرایند، مخصوصاً پشته‌های پیچشی کناره‌های محدب خم مئاندرها، به اراضی کشاورزی تبدیل شده است. در حالت کلی، کاهش دینامیک مجرای رودخانه و افزایش فعالیت‌های کشاورزی منجر به تنگ‌شدگی مجرا در بازه‌های پایاب سد انحرافی نوروزلو شده است.



شکل ۱۹: کاربری اراضی رودکنار مجرای رودخانه زربنده رود

کل ۱۸: نقشه لیتولوژی رودکنار مجرای رودخانه زربنده رود (منبع: سازمان زمین شناسی کشور)

نتیجه گیری

در این پژوهش، دینامیک جانبی مجرای رودخانه زربنده رود در طی ۳۰ سال گذشته مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، مجموعه‌ای از متغیرهای کمی ژئومورفومتریکی با یافته‌های میدانی ترکیب شد. با توجه به این نتایج، تحولات مورفولوژیکی مجرای رودخانه زربنده رود را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- در طی بازه‌های زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۵-۱۹۸۵م)، علی‌رغم ایجاد میان‌برها و مهاجرت جانبی، میانگین مقادیر سینوزیته و زاویه مرکزی مجرای رودخانه تغییرات چشمگیری نداشته‌اند. این امر نشان می‌دهد که رودخانه در تعادل دینامیک می‌باشد.

- در طی ۱۵ سال گذشته، یک روند کاهشی در نرخ مهاجرت جانبی مجرای رودخانه دیده می‌شود. کاهش دینامیک جانبی مجرا مخصوصاً در بازه‌های پایاب سد انحرافی نورولو قابل توجه بوده است. کاهش تحرک جانبی مجرا در درجه اول مربوط به کاهش دبی، مخصوصاً دبی‌های لب‌پری و لب‌ریزی به‌عنوان دبی‌های شکل‌دهنده مجرا، و در نتیجه کاهش توان رودخانه بوده است.

- تنگ‌شدگی کلی مجرا که در درجه اول ناشی از کاهش دینامیک جانبی مجرا بوده است. این امر منجر به غلبه فرایندهای نهشته‌گذاری بر فرایندهای فرسایشی شده است. اشغال و استقرار پوشش گیاهی طبیعی بر روی پشته‌های نقطه‌ای فعال و دست‌اندازی اراضی کشاورزی به اراضی رودکنار و دشت سیلابی رودخانه از دیگر عوامل مهم تنگ‌شدگی مجرای رودخانه زربنده رود محسوب می‌شوند.

- تمایل به الگوی مئاندری تک مجرا در بازه‌هایی که سابقاً رفتار آستانه‌ای مئاندری - گیسوئی نشان می‌دادند. این روند، مخصوصاً به صورت متروک شدن و غلبه فرایندهای انباشت در مقاطع چند - مجرا و کاهش رخداد میان‌برهای شوت انعکاس یافته است. در دوره زمانی دوم (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ میلادی)، رخداد میان‌برهای شوت کاهش محسوسی داشته است

که این امر را می‌توان به کاهش دبی‌های پیک و جریانات سرریزی نسبت داد. حتی افزایش اندک مقادیر ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، به دلیل محدود بودن میان‌برها بوده است.

در بازه (۱) به علت فرسایش‌پذیری اندک مواد کناره و آرمورینگ بستر مجرا، فرایند انتقال رسوب غلبه دارد. اما در بازه (۲)، افزایش پهنه‌های سیل‌گیر، کنترل محدود متغیر زمین‌شناسی و فرسایش‌پذیری مواد کناره‌ها باعث افزایش دینامیک عرضی مجرا شده است. در بازه مذکور، در طی موج سیلاب، فرسایش شدید کناره‌های خارجی خم‌های مئاندرها حجم زیادی از رسوبات را وارد مجرای رودخانه می‌سازد که با نهشته‌گذاری در مقاطع با توان رودخانه پایین همراه می‌شود. بیزی و لرنر (۲۰۱۵) و بیزی و همکاران (۲۰۰۹)، چنین شرایطی را تعادل ناپایدار نامیدند. یعنی شرایطی که در یک مجرای رودخانه، عوارض فرسایشی گسترده همراه با عوارض رسوبی گسترده حضور دارند. چنین کانال‌هایی به واسطه تحرک جانبی بالا مشخص می‌شوند. مازاد محلی رسوب منجر به رفتار آستانه‌ای (گذر از الگوی مئاندردری به گیسوئی) محلی در این بازه شده است. مورفولوژی دو بازه پایاب سد انحرافی نوروزلو در کنترل متغیرهای آنتروپوژنیک می‌باشند. برداشت شن و ماسه در یک مقیاس بسیار وسیع و نظارت‌نشده پلان‌فرم و مورفولوژی بستر رودخانه را دگرگون کرده است. حتی می‌توان گفت که در این بازه‌ها برداشت رسوب بیش از آوردهای رسوبی می‌باشد. این امر، باعث گودافتادن مجرای رودخانه شده است. در بازه انتهایی، دخالت‌های آنتروپوژنیک به دلیل افت کیفیت خاک دشت سیلابی و همچنین غلبه مواد رسی و سیلتی در بستر و کناره‌های رودخانه کاهش قابل‌توجهی می‌یابد. اما به دلیل شیب ملایم بستر و کناره‌ها، توان رودخانه‌ی بسیار پایین و مواد کناره رسی با چسبندگی بالا، مهاجرت مئاندرها از نرخ پایینی برخوردار می‌باشند.

منابع

- خیری‌زاده آروق، منصور. ۱۳۹۵. تحلیل مورفودینامیک و تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرینه‌رود (از شاهین‌دژ تا دریاچه ارومیه. رساله دکتری، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز.
- خیری‌زاده آروق، منصور؛ رضایی مقدم، محمدحسین؛ رجبی، معصومه. ۱۳۹۵. کاربرد تکنیک حداقل مربعات در کمی‌سازی و محاسبه تغییرات شعاع انحنا مئاندرهای مجرای رودخانه‌ها (مورد: رودخانه زرینه‌رود). چهارمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ رجبی، معصومه؛ دانش‌فراز، رسول؛ خیری‌زاده آروق، منصور. ۱۳۹۵. پهنه‌بندی و بررسی اثرات مورفولوژیکی سیلاب‌های رودخانه زرینه‌رود (از ساری‌قمیش تا سد نوروزلو). جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره هفدهم، صص ۲۰-۱.
- سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی. ۱۳۷۰. طرح کنترل سیلاب رودخانه‌های زرینه‌رود و سیمینه‌رود، مرحله اول، جلد دوم، مطالعات ژئوتکنیک (کنترل سیلاب زرینه‌رود).
- شریفی‌کیا، محمد؛ مال‌امیری، نعمت. ۱۳۹۲. آشکارسازی تغییرات الگوی مکانی رودخانه هیرمند و تحلیل مورفولوژیکی آن، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۴، صص ۱۶۰-۱۴۹.
- یمانی، مجتبی؛ فخری، سیروس. ۱۳۹۱. بررسی عوامل مؤثر در تغییرات الگوی رودخانه جگین در جلگه ساحلی مکران، جغرافیا (فصلنامه علمی - پژوهشی انجمن جغرافیای ایران)، دوره جدید، سال دهم، شماره ۳۴، صص ۱۵۹-۱۴۱.
- Ashmore, P. 1991. Channel morphology and bed load pulses in braided, gravel-bed streams. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography, Vol. 73, pp. 37-52.*
- Barker, Douglas. M., Lawler, Damian. M., Knight, Donald. W., Morris, David. G., Davies, Helen. N., Stewart, Elizabeth. J. 2009. Longitudinal distributions of river flood power: the combined automated flood, elevation and stream power (CAFES) methodology. *Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 34, No. 2, PP. 280-290.*
- Bizzi, S and Lerner, D. N. 2015. The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes. *River Research and Applications, Vol. 31, pp. 16-27.*

- Chernov, N and Lesort, C. 2005. *Least squares fitting of circles*. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol. 23, pp. 239–252.
- Chernov, Nikolai. 2011. *Circular and Linear Regression: Fitting Circles and Lines by Least Squares*. CRC Press, Taylor & Francis Group. 253p.
- Coffman, David K. 2009. *Stream bank Erosion Assessment in Non-cohesive Channels Using Erosion Pins and Submerged Jet Testing*, Dallas/Fort Worth, Texas. A thesis approved by the department of geology submitted to the graduate faculty of Baylor University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. 67p.
- Crosato, Alessandra. 2008. *Analysis and modelling of river meandering*. PhD thesis, Published and distributed by IOS Press under the imprint Delft University Press.
- ENVI. 2009. *Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide*. ENVI.
- Gaeuman, David., Schmidt, John.C., Wilcock, Peter.R. 2005. *Complex channel responses to changes in stream flow and sediment supply on the lower Duchesne River, Utah*. *Geomorphology*, Vol. 64, pp. 185-206.
- Garde, R.J. 2006. *River morphology*. New Age International (P) Ltd., Publishers. 479p.
- Gibling, M. R. and Davies, N. S. 2012. *Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution*. *Nature Geoscience*, Vol. 5, pp. 99-105.
- Gray, Norman. H; Geiser, Peter. A; Geiser, James. R. 1980. *On the least-squares fit of small and great circles to spherically projected orientation data*. *Mathematical geology*, Vol. 12, No. 3, pp. 173- 184.
- HEC (Hydrologic Engineering Center). 2010. *HEC-RAS river analysis system, hydraulic reference manual*. U. S. Army Corps of Engineers.
- Heo, J., Duc, T.A., Cho, H.S., Choi, S.U. 2009. *Characterization and prediction of meandering channel migration in the GIS environment: A case study of the Sabine River in the USA*. *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 152, Issue. 1-4, pp. 155-165.
- Hicks, D.M., Gomez, B and Trustrum, N.A. 2000. *Erosion thresholds and suspended sediment yields, Waipaoa river basin, New Zealand*. *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 4, pp. 1129-1142.
- Hooke, J.M. 2008. *Temporal variations in fluvial processes on an active meandering river over a 20-year period*. *Geomorphology*, Vol. 100, pp. 3-13.
- Jagers, H.R.A. 2003. *Modelling planform changes of braided rivers*. PhD thesis, University of Twente, the Netherlands.
- Keesstra, S.D., Huissteden, J.Van., Vandenberghe, J., Van Dam, O., Gier, J. de., Pleizier, I.D. 2005. *Evolution of the morphology of the river Dragonja (SW Slovenia) due to land-use changes*. *Geomorphology*, Vol. 69, pp. 191-207.
- Kleinhans, M. G. 2010. *Sorting out river channel patterns*. *Progress in Physical Geography*, Vol. 34, pp. 287–326.
- Kleinhans, M. G. and Van den Berg, J. H. 2011. *River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and physics-based method*. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol .36, pp. 721–738.
- Kondolf, G. Mathias & Piegay, Herve. 2003. *Tools in fluvial geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd. 688 P.
- Kumm, Matti., Lu, X.X., Rasphone, Akchousanh., Sarkkula, Juha., Koponen, Jorma. 2008. *Riverbank changes along the Mekong River: Remote sensing detection in the Vientiane–Nong Khai area*. *Quaternary International*, Vol. 186, pp. 100-112.
- Labbe, Jim. M., Hadley, Keith. S., Schipper, Aafke. M., Leuven, Rob. S.E.W., Gardiner, Christine Perala. 2011. *Influence of bank materials, bed sediment, and riparian vegetation on channel form along a gravel-to-sand transition reach of the Upper Tualatin River, Oregon, USA*. *Geomorphology*, Vol. 125, pp. 374-382.

- Lauer, J and Parker, G. 2008. Net local removal of floodplain sediment by river meander migration. *Geomorphology*, Vol. 96, pp. 123–149.
- Lisle, Richard. J. 1992. Least squares best-fit circles (with applications to Mohr's diagram). *Mathematical geology*, Vol. 24, No. 5, pp. 455- 461.
- Magdaleno, Fernando and Yuste, Jose A. Fernandez. 2011. Meander dynamics in a changing river corridor. *Geomorphology*, Vol. 130, pp. 197-207.
- Merwade, V.M. 2004. Geospatial description of river channels in three dimensions. Doctoral thesis, The University of Texas at Austin.
- Micheli, E.R., Kirchner, J.W., Larsen, E.W. 2004. Quantifying the effect of riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, central Sacramento river, California, USA. *River Research and Applications*, Vol. 20, pp. 537-548.
- Natural Resources Conservation Service. 2008. Stream restoration design (National Engineering Handbook 654). United States Department Agriculture.
- Paola, C., Mullin, J., Ellis, C., Mohrig, D.C., Swenson, J.B., Parker, G., Hickson, T., Heller, P.L., Pratson, L., Syvitski, J., Sheets, B., and Strong, N. 2001. Experimental stratigraphy, *GSA Today*, Vol. 11, No. 7, pp. 4-9.
- Pires-Luiz, Carlos. H and Maillard, Philippe. 2010. Inferring fluctuations of the aquifer by monitoring the area of small lakes in a Brazilian savanna region using a temporal sequence of 50 Landsat images. *ISPRS TC VII Symposium-100 Years ISPRS*, Vienna, Austria, July 5–7, 2010, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7B, pp. 463-468.
- Richard, Gigi A. 2001. Quantification and prediction of lateral channel adjustments downstream from Cochiti Dam, Rio Grande, NM. Dissertation In partial fulfillment of the requirements For the Degree of Doctor of Philosophy, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 229p.
- Richard, Gigi. A., Julien, Pierre. Y., Baird, Drew. C. 2005. Statistical analysis of lateral migration of the Rio Grande, New Mexico. *Geomorphology*, Vol. 71, pp. 139-155.
- Schumm, Stanley A. 2005. *River variability and complexity*. Cambridge University Press. 220p.
- Sear, David A., Newson, Malcolm D., Thorne, Colin R. 2003. *Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology*, R&D Technical Report FD1914. Defra. London. 233p.
- Sixta, Michael J. 2004. Hydraulic modeling and meander migration of the middle Rio Grande, New Mexico. Master's Thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 260P.
- Song, Song., Schmalz, Britta., Fohrer, Nicola. 2014. Simulation and comparison of stream power in-channel and on the floodplain in a German lowland area. *Journal of Hydrology Hydromechanics*, Vol. 62, No. 2, pp. 133–144.
- Winterbottom, Sandra J. 1995. An analysis of channel change on the Rivers Tay and Tummel, Scotland, using GIS and remote sensing techniques. Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy.
- Wohl, Ellen. E. 2004. *Disconnected rivers: linking rivers to landscapes*. Yale University.
- Xu, Hanqiu. 2007. Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 73, No. 12, PP. 1381-1391.
- Zolezzi, G., Luchi, R. and Tubino, M. 2012. Modeling morphodynamic processes in meandering rivers with spatial width variations. *Rev. Geophys.* 50, RG4005, pp. 1-24.