

تحلیل مورفولوژیکی مجرای رودخانه زرينه‌رود با استفاده از مدل رزگن

منصور خیریزاده اروق* - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز
محمدحسین رضایی‌مقدم - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز
رسول دانش‌فراز - دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه
معصومه رجبی - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۳

چکیده

در این پژوهش مورفولوژی مجرای رودخانه زرينه‌رود با استفاده از مدل ژئومورفولوژیکی رزگن بررسی می‌شود. این پژوهش متکی بر نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۰۰۰ و کارهای میدانی است. زرينه‌رود در بازه‌های بالادست سد نوروزلو عمدتاً از نوع C رزگن است. این رودخانه از پایین‌دست شهر محمودآباد تا پایاب سد انحرافی نوروزلو به نمونه‌ای مشخص از رودخانه‌های نوع C4 با بستر گراولی و مورفولوژی حوضچه-خیزاب تبدیل می‌شود. بازه‌های نوع D، به صورت محلی، در مقطعی دیده می‌شوند که فرسایش‌پذیری شدید مواد کناره و کنترل محدود پوشش گیاهی بستری عریض با نسبت‌های عرض به عمق بالا و پشته‌های نقطه‌ای فعال داخل مجرا به وجود آورده‌اند. بازه‌های نوع F و G در امتداد سد نوروزلو تا شهر میان‌دواب در نتیجه دخالت‌های انسانی - به صورت برداشت بی‌رویه شن و ماسه و گودافتادگی بستر رودخانه - به وجود آمده‌اند. این روند، به صورت منقطع، در امتداد پایین‌دست ادامه می‌یابد و رودخانه به بازه‌ای در حال گذار از نوع C به نوع F تبدیل می‌شود. زرينه‌رود در بازه انتهایی به رودخانه‌های نوع E تبدیل می‌شود. دخالت‌های نسبتاً کم عامل انسانی و دشت سیلابی هموار و توسعه یافته باعث افزایش نسبت گودشدگی شده است. همچنین، چسبندگی بالای مواد کناره به مقادیر پایین نسبت عرض به عمق منجر شده است.

کلیدواژه‌ها: پلان‌فرم، زرينه‌رود، مدل رزگن، مدل HEC-RAS مورفولوژی.

مقدمه

یک اصل اساسی در ژئومورفولوژی بیان می‌کند که «فرم دلالت بر فرایند دارد.»^۱ به همین دلیل، طبقه‌بندی‌های ژئومورفیک بسیاری در رابطه با چشم‌اندازها، دامنه‌ها، و رودخانه‌ها توسعه یافته‌اند. پارادایم فرم - فرایند ابزار بالقوه قدرتمندی برای هدایت بررسی‌های ژئومورفیک کمی است (شرودر، ۲۰۱۳: ۷۳۰). رودخانه‌ها، از منظر مورفولوژیکی، معمولاً دارای بازه‌های مشابه با الگوهای قابل تکرارند که این امر به تلاش‌های متعددی برای طبقه‌بندی آن‌ها منجر شده است (روپر و همکاران، ۲۰۰۸: ۴۱۷-۴۲۷). استفاده از هر گونه سیستم طبقه‌بندی رودخانه‌ای تلاشی است در جهت ساده‌کردن روابط پیچیده بین رودخانه‌ها و آبریزهای آن‌ها (کارگروه بازسازی رودخانه^۲، ۲۰۰۱، فصل ۷: ۲۶). این سیستم‌های طبقه‌بندی اهداف مختلفی را دنبال می‌کنند؛ از جمله نیاز به الزامات قانونی برای استانداردهای زیست‌محیطی؛ بهبود ارتباطات؛ ارائه درک بهتری از فرایندهای رودخانه‌ای (روپر و همکاران، ۲۰۰۸: ۴۱۷-۴۲۷)؛ کاندولف

Email: m_kheirizadeh@yahoo.com

* نویسنده مسئول: ۰۹۳۷۰۶۱۶۳۸۱

۱. این اصل همیشه صادق نیست مخصوصاً در خصوص مسئله هم‌پایانی (Equifinality).

2. The Federal Interagency Stream Restoration Working Group

و پیگی، ۲۰۰۳: ۱۷۸؛ سرویس حفاظت منابع طبیعی^۱، ۲۰۰۸، ضمیمه فنی 3E: ۱). سیستم‌های رودخانه‌ای دینامیک است و به طور مداوم به تغییرات بار رسوب، هیدرولوژی، و فرم پاسخ می‌دهد. در این شرایط، سیستم‌های طبقه‌بندی رودخانه‌ای به درک وضعیت حال و آینده یک سیستم رودخانه‌ای کمک می‌کنند (سرویس حفاظت منابع طبیعی، ۲۰۰۸، فصل ۳: ۱۶). بدیهی است که یک طرح طبقه‌بندی خطر ساده‌سازی بیش از حد یک سیستم بسیار پیچیده را نیز به همراه دارد (رزگن، ۱۹۹۴: ۱۶۹-۱۹۹؛ گارد، ۲۰۰۶: ۸۷). اما دو هدف عمده را می‌توان برای طبقه‌بندی رودخانه‌ها بیان کرد: ۱. درک علمی از نحوه عملکرد رودخانه‌ها؛ وجود آستانه‌های طبیعی ایجادکننده پیچیدگی‌های طولی در مقیاس‌های فضایی مختلف و خوشه‌بندی کانال‌ها به کلاس‌های همگن؛ ۲. ارائه رهنمودهای مدیریتی مبتنی بر ژئومورفولوژی جهت تصمیم‌گیری درباره حفظ و نگه‌داری^۲، بهبود، بازسازی^۳ یا حفاظت کانال. در این مورد، معیارهای ژئومورفیکی ممکن است با معیارهایی از سایر رشته‌ها (از قبیل اکولوژی و شیمی آب) ترکیب شود (کاندولف و پیگی، ۲۰۰۳: ۱۷۷).

در طی دهه‌های گذشته، طبقه‌بندی‌های ژئومورفیک بسیاری در رابطه با رودخانه‌ها ایجاد شده و توسعه یافته است (کاندولف و پیگی، ۲۰۰۳: شرودر، ۲۰۱۳). این طبقه‌بندی‌ها با استفاده از معیارهای عینی، کیفی، یا کمی انجام گرفته است (گارد، ۲۰۰۶: ۸۷). رویکردهای اولیه بر ساختار تکوینی و تکاملی رودخانه‌ها متمرکز بوده است که توسط تکنیک و ساختمان زمین‌شناسی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (شرودر، ۲۰۱۳: ۷۳۱). دیویس (۱۸۹۹) رودخانه‌ها را، بسته به مرحله توسعه آن‌ها، در چرخه فرسایش، به رودخانه‌های جوان، بالغ، و پیر تقسیم کرد (گارد، ۲۰۰۶: ۸۷؛ کاندولف و پیگی، ۲۰۰۳: ۱۷۸). سپس، سیستم‌های طبقه‌بندی دیگری بر اساس ویژگی‌های کیفی و توصیفی رودخانه‌ها توسط ملتون^۴ (۱۹۳۶) و ماتس^۵ (۱۹۵۶) توسعه یافت (رزگن، ۱۹۹۴: ۱۶۹-۱۹۹). اغلب مبانی سیستم‌های جدید طبقه‌بندی رودخانه‌ها در دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ با کارهای لئوپلد و ولمن^۶ (۱۹۵۷)، لین^۷ (۱۹۵۷)، و شوم^۸ (۱۹۶۳) بنیان گذاشته شد (سرویس حفاظت منابع طبیعی، ۲۰۰۸، فصل ۳: ۱۶). لین (۱۹۵۷) داده‌های حاصل از رودخانه‌هایی با بستر ماسه‌ای و مواد درشت‌تر را تحلیل کرد و رودخانه‌ها را براساس پلان فرم به الگوهای مستقیم، منادری، و گیسویی^۹ تقسیم کرد. همچنین، نشان داد که پلان فرم‌ها اساساً تابعی از شیب و دبی لب‌پری‌اند. لئوپلد و ولمن (۱۹۵۷) طبقه‌بندی مشابه لین را دنبال کردند (گارد، ۲۰۰۶: ۸۸). این طرح اولیه طبقه‌بندی الگوها پایه و اساسی محسوب شد که طرح‌های طبقه‌بندی پیچیده‌تری از آن‌ها منشعب شد (مارتین، ۲۰۰۵: ۷). روست^{۱۰} (۱۹۷۸) رودخانه‌ها را براساس سینوزیته و یک پارامتر گیسویی طبقه‌بندی کرد. کلرهایس^{۱۱} و همکاران (۱۹۷۶) نوعی طبقه‌بندی ارائه کردند بر اساس ۱. پلان فرم (مستقیم، سینوسی، نامنظم، و منادریهای منظم)؛ ۲. جزایر (فقدان، تصادفی، و متناوب)؛ ۳. پشته‌های کانال و اشکال اصلی بستر (پشته‌های کناره کانال، پشته‌های نقطه‌ای، و پشته‌های وسط کانال)؛ ۴. فعالیت جانبی کانال (غیرقابل تشخیص، پیشروی^{۱۲} در جهت پایین‌دست، و پیشروی همراه با میان‌برها). بریس^{۱۳} (۱۹۸۴) رودخانه‌ها را براساس سینوزیته، پشته‌های نقطه‌ای، گیسویی‌شدن، و

1. Natural Resources Conservation Service
2. Maintenance
3. Restoration
4. Melton
5. Matthes
6. Leopold and Wolman
7. Lane
8. Schumm
9. Braided
10. Rust
11. Kellerhals
12. progression
13. Brice

آنابرنچینگ طبقه‌بندی کرد (کروساتو، ۲۰۰۸: ۳۱). شوم (۱۹۷۷) کانال‌های آبرفتی را براساس تأمین یا عرضه رسوب طبقه‌بندی کرد. او سه نوع رودخانه را تعریف کرد: کانال‌هایی با بار بستری که به واسطه نسبت‌های عرض به عمق بالا، سینوزیته پایین، و گیسویی شدن مشخص می‌شوند؛ کانال‌هایی با بار مختلط؛ و کانال‌هایی با بار معلق، با نسبت‌های عرض به عمق پایین، سینوزیته بالا، و متاندرشدگی. شوم طرح طبقه‌بندی خود را مجدداً با ارتباط دادن نوع پلان فرم مجرا به تأمین رسوب و توان رودخانه ارائه کرد. سپس، رویکرد مشابهی توسط وان دن برگ^۱ (۱۹۹۵) دنبال شد (کروساتو، ۲۰۰۸: ۳۳). می‌توان گفت که اغلب طبقه‌بندی‌های رودخانه بر طبقه‌بندی الگوی کانال مشتمل‌اند (هندسه پلان فرم، از قبیل مستقیم، متاندری، یا گیسویی) (شرودر، ۲۰۱۳: ۷۳۲). الگوی کانال همچنین یک ممیزی اولیه در طرح‌های طبقه‌بندی توسعه‌یافته توسط پاستین^۲ و همکاران (۱۹۹۲)، روزگن (۱۹۹۴، ۱۹۹۷)، و بریرلی و فریزر^۳ (۲۰۰۵) است (شرودر، ۲۰۱۳: ۷۳۴). رویکردهای جدید طبقه‌بندی رودخانه بر تحلیل‌های حوضه‌ای مرتبط با مدیریت اراضی و بازسازی رودخانه تمرکز دارد. استفاده از یک رویکرد سلسله‌مراتبی درک کل‌نگرتری از فرایندهای حوضه‌ای را امکان‌پذیر می‌کند (شرودر، ۲۰۱۳: ۷۳۹). سیستم‌های رودخانه‌ای به صورت ذاتی می‌توانند سلسله‌مراتبی در نظر گرفته شوند که واحدهای کوچک‌تر در داخل واحدهای بزرگ‌تر جای گرفته‌اند. در یک مقیاس کاهشی، این مدل شامل چشم‌انداز یا منطقه اکولوژیکی، دشت سیلابی یا کریدور (سگمنت‌های دره)، بازه کانال، واحدهای خاص کانال (از قبیل حوضچه‌ها و خیزآب‌ها)، و ریزبوم‌هاست (کاندولف و پیگی، ۲۰۰۳: ۱۷۳). در این زمینه، یکی از متداول‌ترین سیستم‌های طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی مجرا توسط رزگن^۴ (۱۹۹۴ و ۱۹۹۷) توسعه یافت که به طور گسترده‌ای از آن استفاده می‌شود (شرودر، ۲۰۱۳: ۷۴۲). در زمینه مدل رزگن نیز محققان داخلی چندین پژوهش انجام داده‌اند که می‌توان به روستایی و همکاران (۱۳۹۲)، لایقی و کرم (۱۳۹۳)، یمانی و تورانی (۱۳۹۳)، و خیری‌زاده آروق (۱۳۹۵) اشاره کرد. هدف از پژوهش حاضر تحلیل ژئومورفولوژیکی مجرای رودخانه زربینه رود با بهره‌گیری از مدل سلسله‌مراتبی رزگن است.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه زربینه رود (جیغاتی‌چای) مهم‌ترین و پُرآب‌ترین رود حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. 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. رودخانه زربینه رود از کوه‌های چهل چشمه کردستان (بین سقز و بانه) سرچشمه می‌گیرد و از گوشه جنوب شرقی وارد دریاچه ارومیه می‌شود. طول این رودخانه بیش از ۲۰۰ کیلومتر است. در این پژوهش، بازه‌ای از رودخانه زربینه رود به طول تقریبی ۱۳۰ کیلومتر مطالعه می‌شود. این بازه از بالادست شهر شاهین‌دژ و در محل تلاقی رودخانه فصلی قوره‌چای با مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 36' 22''$ عرض شمالی شروع می‌شود و تا شوره‌زارهای دریاچه ارومیه با مختصات جغرافیایی $45^{\circ} 45' 55''$ طول شرقی و $37^{\circ} 09' 35''$ عرض شمالی امتداد می‌یابد (شکل ۱). رودخانه زربینه رود در بازه مطالعاتی، پس از عبور از مجاورت شهرهای شاهین‌دژ، محمودآباد، کشاورز، و میان‌دوب، وارد دریاچه ارومیه می‌شود. سد شهید کاظمی در فاصله سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۳۵۰ بر روی این رودخانه احداث شد. چهار انشعاب اصلی رودخانه زربینه رود یعنی سقزچای، جیغاتوچای، خورخورچای، و ساروق‌چای منبع تغذیه این سد

1. Van den Berg
2. Paustian
3. Brierley and Fryirs
4. Rosgen

می‌باشند. در ۸۰ کیلومتری پایین‌دست سد مخزنی شهید کاظمی و ۱۵ کیلومتری جنوب‌شرق میان‌دوآب سد انحرافی نوروزلو در سال ۱۳۴۶ بر روی این رودخانه ساخته شده که سدی بتنی با سرریز آزاد است.

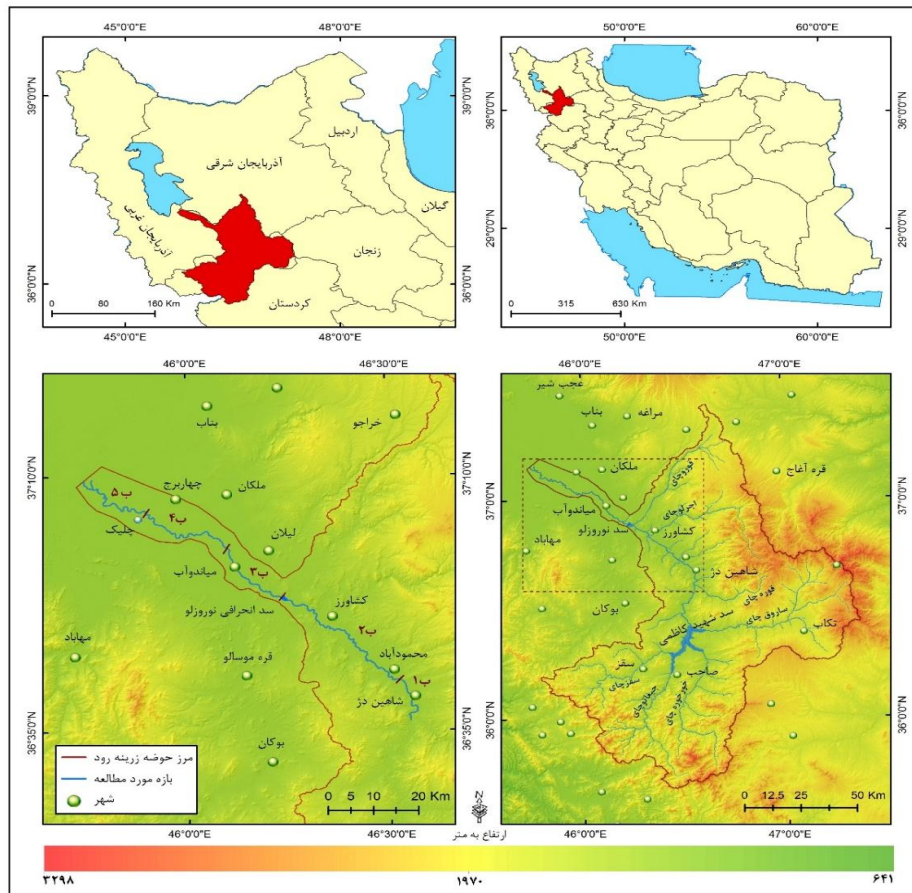
رودخانه زربنه‌رود از پایاب سد مخزنی شهید کاظمی تا مصب خود، با توجه به نقش سد انحرافی نوروزلو بر رژیم دبی، به دو بازه مشخص (بالادست و پایین‌دست سد نوروزلو) قابل تقسیم است. همچنین، براساس متغیرهای مختلف، از قبیل پلان فرم مجرا، کنترل‌های زمین‌شناسی، عرض دشت سیلابی، مواد بستر، و اثرهای آنتروپوژنیک می‌تواند به پنج بازه مختلف تقسیم شود (شکل ۱): بازه ۱ از ابتدای بازه مطالعاتی زربنه‌رود شروع می‌شود و در حدفاصل شهرک صنعتی شاهین‌دژ و شهر محمودآباد خاتمه می‌یابد. مورفولوژی مجرا تا حد زیادی در کنترل متغیر زمین‌شناسی است. مواد تشکیل‌دهنده بستر عمدتاً شامل قلوه‌سنگ و پاره‌سنگ است. بازه ۲ از بالادست محمودآباد شروع می‌شود و تا محل سد انحرافی نوروزلو امتداد می‌یابد. مجرای رودخانه دارای یک دشت سیلابی توسعه‌یافته و تا حدی نامتقارن است. این بازه، نمونه مشخصی از رودخانه‌هایی با بستر گراولی است. افزایش عرض دشت سیلابی و دسترسی رودخانه به مواد فرسایش‌پذیر کناره‌ها، مخصوصاً رسوبات مخروط‌افکنه‌های انشعابی محمودآباد و کشاورز، باعث افزایش دینامیک عرضی مجرا در این بازه شده است. در این بازه، اشکال ژئومورفولوژیکی مربوط به فرایندهای رودخانه‌های مئاندری به فراوانی قابل مشاهده است. بازه ۳ از پایاب سد انحرافی نوروزلو تا شهر میان‌دوآب امتداد می‌یابد. در این بازه، پلان فرم رودخانه در نتیجه اقدامات انسانی به کلی دگرگون می‌شود و به شبه‌مئاندری و مئاندری توسعه‌نیافته تبدیل می‌شود. بازه ۴ منطبق بر بخش میانی مخروط‌افکنه زربنه‌رود است و از پایین‌دست میان‌دوآب تا محدوده روستای چلیک امتداد می‌یابد. در این بازه نیز دخالت‌های انسانی زیاد است؛ اما، پلان فرم مجرا هنوز الگوی مئاندری خود را تا حدودی حفظ کرده است. بازه ۵ از انتهای بازه فوق شروع می‌شود و تا شوره‌زارهای دریاچه ارومیه کشیده می‌شود. دخالت‌های انسانی، نسبت به دو بازه بالادست، کاهش محسوسی می‌یابد. درصد درخور توجهی از مواد بستر و کناره‌های رودخانه متشکل از سیلت و رس است. پلان فرم این بازه از نوع مئاندری توسعه‌یافته است (خیری‌زاده، ۱۳۹۵؛ خیری‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶).

مواد و روش‌ها

این پژوهش متکی بر کارهای میدانی و نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۰۰۰ سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی است که برای بازه مورد مطالعه از زربنه‌رود در حدود ۱۵۵ برگه است. همه این نقشه‌ها به یک پایگاه داده جغرافیایی^۱ تبدیل شد و پس از اصلاح و رفع خطاهای توپولوژیکی، مدل شبکه نامنظم مثلثاتی (TIN)، و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱ متر) منطقه ایجاد شد. نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی)، تصاویر ماهواره‌ای SPOT و Google Earth، و داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری (که مهم‌ترین آن‌ها شامل ایستگاه ساری‌قمیش در بالادست و ایستگاه نظام‌آباد در پایین‌دست بازه مطالعاتی است) به عنوان سایر داده‌های ضروری تحقیق محسوب می‌شوند. به منظور گرانولومتری رسوبات بستر رودخانه، از ابزارهای آزمایشگاهی شامل دستگاه نمونه‌بردار مدل وان وین گرب^۲، شیکر، ترازوی دیجیتالی، و کولیس استفاده شد.

1. Geodatabase

2. Van Veen Grab- Bottom Sampler



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی بازه مورد مطالعه رودخانه زرينه رود

برای تحلیل‌های مورفولوژیکی مجرای رودخانه، از سیستم سلسله‌مراتبی رزگن استفاده شد. رویکرد رزگن شامل چهار مقیاس تحلیل است که از ممیزی بزرگ‌مقیاس لندفرم و انواع دره تا اندازه‌گیری‌های کوچک‌مقیاس فرایندهای فیزیکی (از قبیل انتقال بار بستر و فرسایش کناره) و موجودی‌های^۱ بیولوژیکی (پوشش گیاهی و ارگانیک‌های آبی) را شامل می‌شود (شرودر، ۲۰۱۳: ۷۴۲). اما، در بیشتر موارد، بر روی دو سطح نخست، یعنی خصوصیات ژئومورفیک کلی (سطح ۱) و توصیف مورفولوژیکی (سطح ۲) تمرکز می‌کنند (رزگن، ۱۹۹۴: ۱۶۹-۱۹۹). در این تحقیق، با توجه به هدف و داده‌های موجود، سطح ۱ و سطح ۲ سیستم رزگن بررسی می‌شود. در سیستم رزگن از شش سنجه^۲ مورفولوژیکی استفاده می‌شود که عبارت‌اند از: گودشدهگی؛ نسبت عرض به عمق؛ سینوزیته؛ تعداد مجرا؛ شیب؛ اندازه دانه مواد بستر. از این معیارها برای تعریف هشت کلاس اصلی رودخانه با حدود ۹۰ نوع رودخانه خاص استفاده می‌شود (کارگروه بازسازی رودخانه، ۲۰۰۱، فصل ۷: ۲۹) (شکل ۲). روش محاسبه این معیارهای ممیزی^۲ به شرح ذیل است:

گودشدهگی: گودشدهگی^۳ به صورت محصورشدهگی عمودی رودخانه و میزان حفر در کف دره تعریف می‌شود. بیان کمی این ویژگی به صورت «نسبت گودشدهگی» است که عبارت است از: نسبت عرض ناحیه سیل‌گیر به عرض سطح لب‌پری مجرا. ناحیه سیل‌گیر به صورت عرض اندازه‌گیری‌شده در ارتفاع دو برابر حداکثر عمق لب‌پری تعریف می‌شود. مشاهدات

1. Inventories
2. Delineative criteria
3. Entrenchment

میدانی نشان می‌دهد که این ارتفاع، ارتفاع یک سیل متناوب (دوره بازگشت پنجاهساله) یا کمتر است و نه ارتفاع یک سیلاب نادر. نسبت‌های گودشدگی ۱/۴-۱ نشان‌دهنده آبراهه‌های گودشده، ۲/۲-۱/۴۱ نشان‌دهنده آبراهه‌هایی با گودشدگی متوسط، و نسبت‌های بیشتر از ۲/۲ آبراهه‌هایی با گودشدگی اندک (دشت سیلابی به‌خوبی توسعه‌یافته) است. نسبت عرض به عمق: این نسبت، نسبت عرض مجرای لب‌پری به عمق میانگین لب‌پری است. دبی لب‌پری به عنوان حداکثر جریان پیک لحظه‌ای تعریف می‌شود که چند روز در سال اتفاق می‌افتد و اغلب مربوط به دبی با دوره بازگشت ۱/۵ ساله است (رزگن، ۱۹۹۴: ۱۶۹-۱۹۹). در واقع، رزگن از تعریف دون و لئوپلد^۱ (۱۹۷۸) از لب‌پری استفاده کرد: دبی‌ای که حرکت رسوب، تشکیل یا تخریب پشته‌ها، شکل‌گیری یا تغییر خم‌ها و مئاندرها، و عموماً اجرای کار را صورت می‌دهد و به خصوصیات مورفولوژیک میانگین مجرا منجر می‌شود. دبی لب‌پر و ارتفاع حاصله در محدوده دوره بازگشت معمولاً ۱ تا ۳ سال بر روی یک منحنی فراوانی سالانه با غلبه مقادیر اتفاق‌افتاده در محدوده ۱/۲ تا ۱/۸ سال قرار می‌گیرد. برای انواع کانال C، D، DA، E و E، که تنها اندکی گود شده‌اند، تعریف رزگن از لب‌پری و تعریف دون و لئوپلد بسیار مشابه‌اند. برای کانال نوع B، که به طور متوسط گود شده است، یا انواع کانال‌های A، F و G، که گود شده‌اند، لب‌پری رزگن در ارتفاع بسیار پایین‌تر از رأس کناره‌ها واقع می‌شود (سرویس حفاظت منابع طبیعی، ۲۰۰۸، فصل ۳: ۲۹). سینوزیته: سینوزیته نسبت طول آبراهه به طول دره است. همچنین، می‌تواند نسبت شیب دره به شیب مجرا تعریف شود (رزگن، ۱۹۹۴: ۱۶۹-۱۹۹).

مواد کانال: براساس اندازه D_{50} ، مواد کانال به شش طبقه تقسیم می‌شود: ۱. سنگ بستر (>2048 mm)؛ ۲. تخته‌سنگ (256 mm to 2047.9 mm)؛ ۳. قلوه‌سنگ (64 mm to 255.9 mm)؛ ۴. گراول (2 mm to 63.9 mm)؛ ۵. ماسه (0.062 mm to 1.99 mm)؛ ۶. سیلت/رس (<0.062 mm). در تحقیق حاضر، برای دانه‌بندی و محاسبه D_{50} رسوبات بستر رودخانه در بازه‌های بالادست، که مواد تشکیل‌دهنده بستر عمدتاً شامل پاره‌سنگ^۲ و قلوه‌سنگ^۳ است، از روش شمارش قلوه‌سنگ^۴ توسعه‌یافته توسط ولمن^۵ (۱۹۵۴) استفاده شد. داده‌های شمارش قلوه‌سنگ به صورت درصد تجمعی و درصد توزیع کل ترسیم می‌شود. در سایر بازه‌ها، روش برداشت حجمی رسوبات بستر با استفاده از دستگاه نمونه‌بردار وان وین گرب انجام گرفت. برای بازه مطالعاتی زربنه‌رود، روش شمارش قلوه‌سنگ و برداشت حجمی در ۶۷ مقطع صورت گرفت.

شیب: شیب سطح آب اهمیت عمده‌ای در ویژگی مورفولوژیکی مجرا، رسوب، هیدرولیک، و عملکرد بیولوژیکی آن دارد و از طریق اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع سطح آب در واحد طول آبراهه تعیین می‌شود. محاسبه شیب می‌تواند به‌سادگی و با دقت بسیار زیاد با استفاده از نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گیرد.

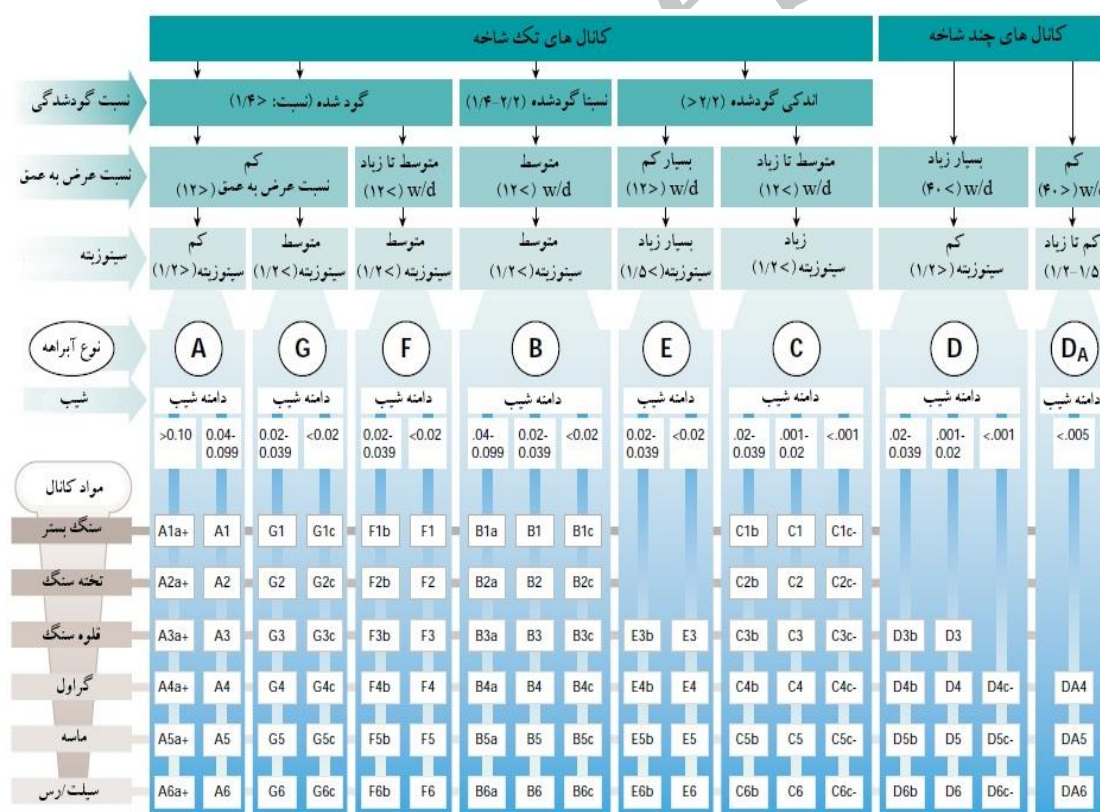
در سیستم رزگن، تعیین پارامترهای نسبت گودشدگی و نسبت عرض به عمق لب‌پری از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در تحقیق حاضر، برای محاسبه این پارامترها از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS به همراه الحاقی HEC-GeoRAS استفاده شد. داده‌های جریان برای HEC-RAS شامل رژیم جریان، اطلاعات دبی، شرایط اولیه، و شرایط مرزی است (مرواد، ۲۰۰۴: ۲۹). برای جریان ماندگار متغیر تدریجی^۶، روش اصلی محاسبه پروفیل‌های سطح آب

1. Dunne and Leopold
2. Cobble
3. Pebble
4. Pebble count
5. Wolman
6. Steady gradually varied flow

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 (معادله برنولی^۱) به صورت زیر بیان می‌شود (مرکز مهندسی هیدرولوژیک^۲، ۲۰۱۰، فصل ۲: ۲):

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

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 است (برای معادلات به فصل دوم منبع فوق مراجعه شود). در این پژوهش، برای محاسبات دوره‌های بازگشت و رابطه دبی-اشل از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری واقع بر مجرای اصلی و انشعابات استفاده شد. همچنین، برای تعیین توزیع ضریب اصطکاک (ضریب زبری مانینگ) مجرا و دشت سیلابی، نقشه پوشش زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و مطالعات میدانی تهیه شد.



شکل ۲. کلید طبقه‌بندی رودخانه‌های طبیعی در سیستم رزگن (سطح ۲) (کارگروه بازسازی رودخانه، ۲۰۰۱، فصل ۷: ۳۲، رزگن، ۱۹۹۷: ۱-۱۱)

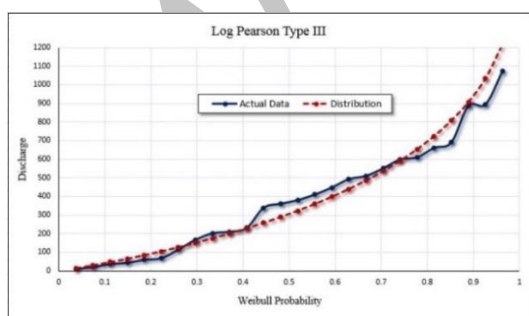
1. Bernoulli
2. Hydrologic Engineering Center

یافته‌های تحقیق

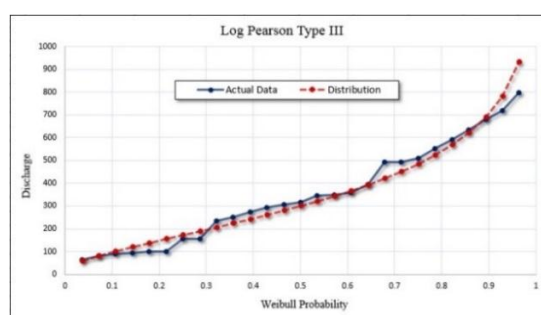
پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه

توابع توزیع و روش‌های تخمین مختلفی برای برآورد توزیع فراوانی سیلاب وجود دارد. روش‌های توصیه‌شده توسط سازمان‌های فدرال امریکا براساس برازش توزیع پیرسون تیپ ۳ به لگاریتم‌های مبنای ۱۰ دبی‌های پیک است (کارگروه بازسازی رودخانه، ۲۰۰۱، فصل ۷: ۵؛ کمیته فراوانی سیلاب‌های رودخانه‌های امریکا، ۱۹۹۹: ۳۹). برای داده‌های پیک سالانه ایستگاه‌های رودخانه زربینه رود انواع توابع توزیع متداول - شامل توزیع نرمال، ۲ پارامتر لوگ نرمال، ۳ پارامتر لوگ نرمال، گامبل اکستریمال تیپ ۱، پیرسون تیپ ۳، و لوگ پیرسون تیپ ۳ - برازش داده شد و سرانجام توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ بهترین توزیع انتخاب شد (شکل‌های ۳ و ۴). برای مجرای رودخانه در بالادست سد انحرافی نوروزلو، یک سیلاب با دوره بازگشت ۱/۳۳ ساله، یعنی دبی با مقدار ۱۷۴ متر مکعب در ثانیه (ایب ساری‌قمیش)، می‌تواند دبی لب‌پری در نظر گرفته شود. این دبی در اغلب بخش‌ها مقاطع عرضی را کاملاً پر می‌کند. برای مجرای رودخانه در پایین دست سد نوروزلو، به‌رغم مشارکت دبی انشعابات فصلی و مسیل‌ها، به دلیل تأخیر و برداشت آب در محل سد نوروزلو، دبی لب‌پری تقریباً منطبق با سیلاب با دوره بازگشت ۱/۵ ساله (۱۶۹ متر مکعب در ثانیه در ایب نظام‌آباد) است (شکل ۵). ذکر این نکته مهم است که این مقدار دبی فقط در بازه‌های پایین دست توانایی پر کردن مجرا را بدون سرریزی دارد. در واقع، مجرای رودخانه زربینه رود از پایاب سد نوروزلو تا پایین دست شهر میاندوآب چنان گود افتاده است که در بسیاری از بخش‌ها حتی یک سیلاب با دوره بازگشت پنجاه ساله نیز قادر به پر کردن مقطع عرضی نیست.

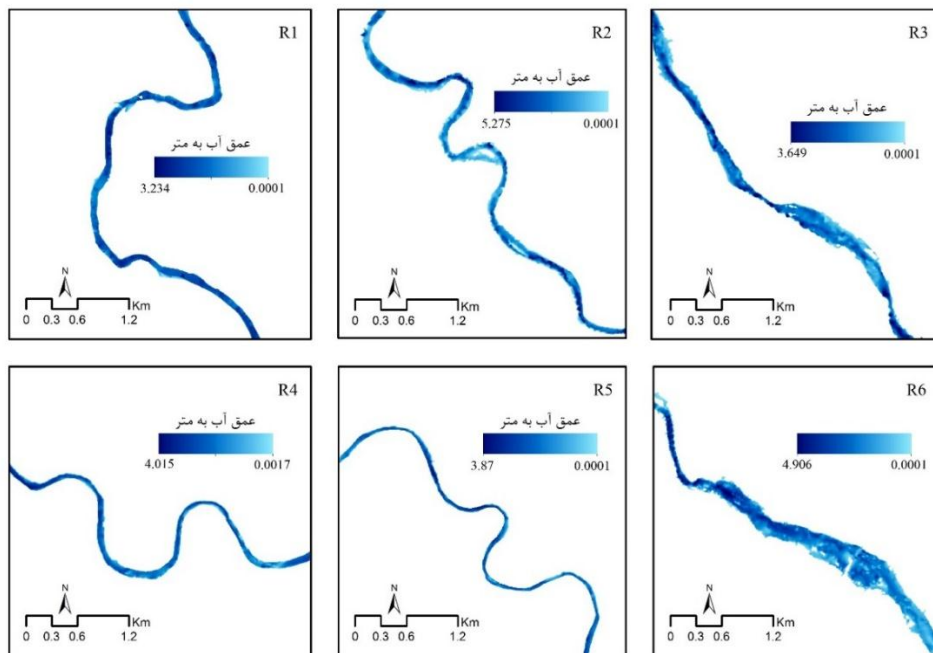
در پژوهش حاضر، برای محاسبه پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS استفاده شد. در شکل ۷ پهنه‌های سیل‌گیر و در شکل ۶ مساحت نواحی سیل‌گیر رودخانه نشان داده شده است. در بازه‌های بالادست سد نوروزلو و بازه انتهایی، روند افزایش مساحت پهنه‌های سیل‌گیر برای سیلاب‌ها تا دوره بازگشت ده‌ساله (مخصوصاً پنج‌ساله) دارای آهنگ نسبتاً زیادی است. این روند برای دوره‌های بازگشت بالاتر به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در نتیجه، استفاده از ناحیه سیل‌گیر با دوره بازگشت پنجاه ساله و کمتر می‌تواند معرف ناحیه در معرض سیلاب مدل رزگن باشد.



شکل ۴. برازش توزیع فراوانی پیرسون تیپ ۳ به لگاریتم‌های جریانات پیک سالیانه ایب نظام‌آباد



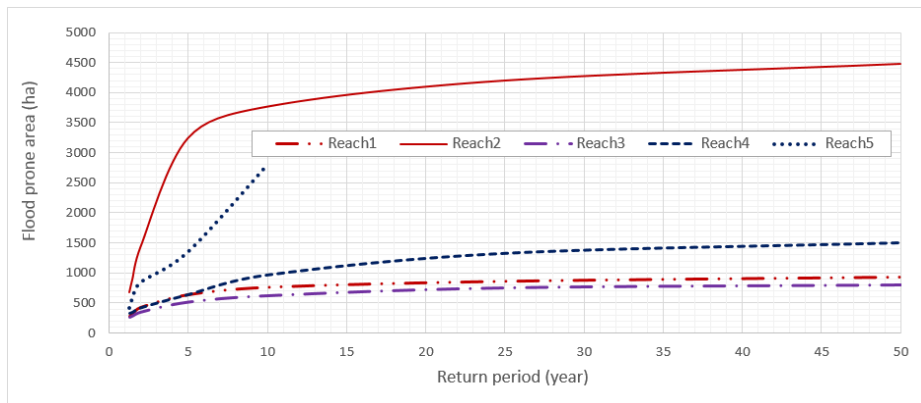
شکل ۳. برازش توزیع فراوانی پیرسون تیپ ۳ به لگاریتم‌های جریانات پیک سالیانه ایب ساری‌قمیش



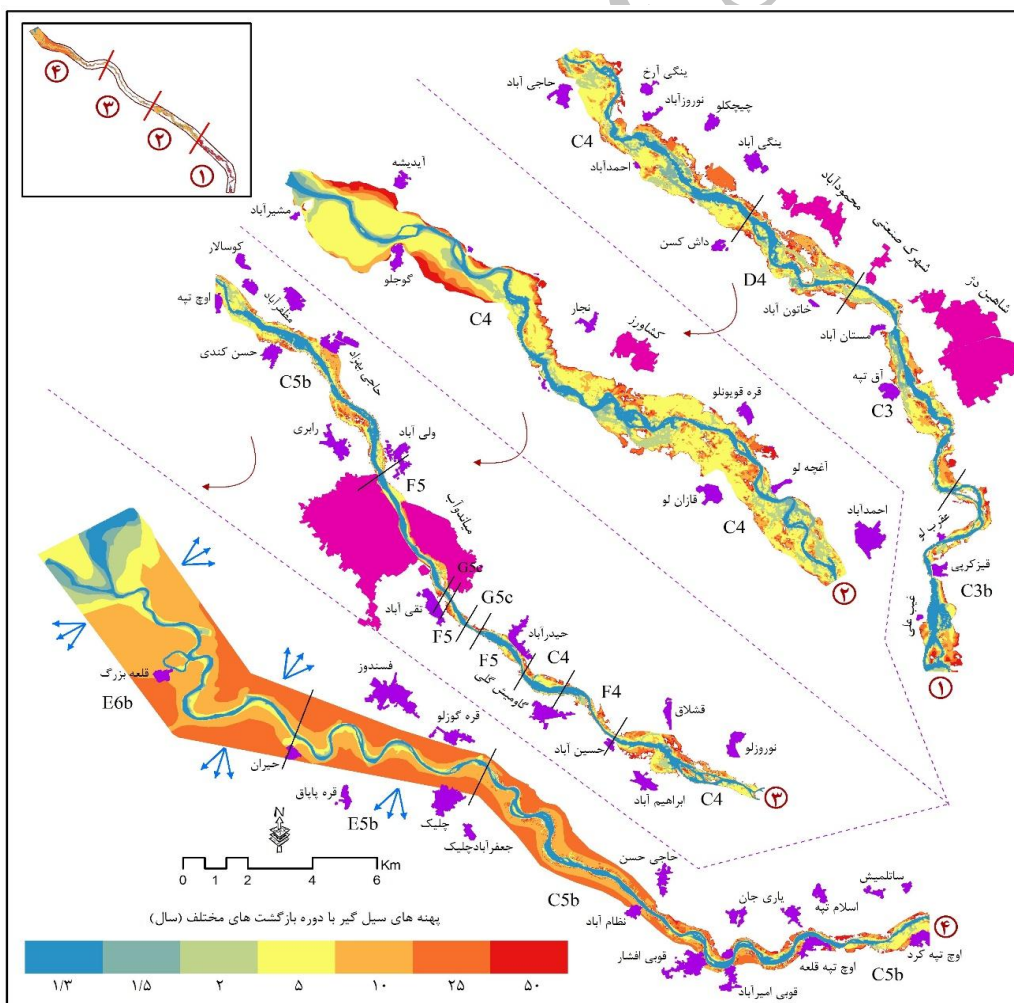
شکل ۵. عمق آب برای سیلاب‌هایی با دوره بازگشت ۱/۳ ساله در بخش‌هایی از بازه‌های مختلف زربینه رود: R1 بازه ۱؛ R2 بازه ۲؛ R3 بازه ۳؛ R4 بازه ۴؛ و R5 بازه ۵. عرض‌شدگی بستر رودخانه در نتیجه برداشت شن و ماسه در بازه‌های پایاب سد انحرافی نوروزلو (R3 و R6)

در بازه‌های بالادست سد انحرافی نوروزلو و بازه انتهایی، ژئومورفولوژی منطقه نقش اساسی در میزان سیل‌گیری رودکنار ایفا می‌کند. در بازه ۱، به علت کم‌عرض بودن دشت سیلابی، پهنه‌های سیل‌گیر نیز محدودند. در این بازه، یک سیلاب، با دوره بازگشت ۲۵ ساله، بیشتر بخش‌های دشت سیلابی را دربر می‌گیرد و فقط برخی تراس‌ها و پشته‌های رسوبی موجود در دشت سیلابی غرقاب نمی‌شوند. در بازه ۲، با افزایش عرض دشت سیلابی، بر پهنه‌های سیل‌گیر نیز افزوده می‌شود. در این بازه نیز ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی دشت سیلابی نقش زیادی در میزان سیل‌گیری حاشیه رودخانه دارد؛ به طوری که کاهش پهنه‌های سیل‌گیر در محدوده شهر کشاورز ناشی از تأثیر مخروپ‌افکنه انشعابی اجرلوچای در دست راست رودخانه است. بخش‌های بالادست و میانی این مخروپ‌افکنه، به سبب مورفولوژی محدب و برجسته، مصون از سیلاب‌هایی با دوره‌های بازگشت مختلف زربینه رود است. علاوه بر این، وجود واحد کوهستان در بلافصل کناره مقابل، سدی در برابر پخش سیلاب به‌شمار می‌رود. برعکس، در محدوده تالاب نوروزلو، سیلاب‌ها به دلیل عرض زیاد و همواربودن دشت سیلابی در گستره وسیعی پخش می‌شوند. این محدوده در پایین دست تلاقی اجرلوچای (به عنوان مهم‌ترین انشعاب بازه مطالعاتی رودخانه زربینه رود) قرار گرفته است. همچنین، رودخانه قورچای مستقیماً به این تالاب منتهی می‌شود. در نتیجه، پهنه‌های سیل‌گیر افزایش بسیار زیادی می‌یابند. مساحت پهنه‌های سیل‌گیر در حد فاصل روستاهای قره‌قویونلو و قازان‌لو نیز درخور توجه است. در این محدوده، عرض پهنه‌های سیل‌گیر برای یک سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله به بیش از ۲/۳ کیلومتر می‌رسد. در بخش‌های پایین دست رودخانه نیز سیلاب‌هایی با دوره‌های بازگشت بالاتر در گستره وسیعی پخش می‌شوند. گودافتادگی اندک مجرا، شیب بسیار ملایم، و عرض زیاد دشت سیلابی و نزدیکی به سطح اساس از مهم‌ترین دلایلی است که عرض سیل‌گیری را افزایش می‌دهد. نکته حائز اهمیت دیگر کم‌عرض بودن پهنه‌های سیل‌گیر در بازه‌های ۳ و ۴ است. در واقع، در این بازه‌ها، به واسطه برداشت بیش از حد شن و

ماسه، بستر رودخانه چنان در دشت سیلابی گود افتاده است که در بسیاری از مقاطع سیلاب‌هایی با دوره بازگشت پنجاه‌ساله نیز قادر به سرریزی نیستند و می‌توان بیان کرد که ارتباط بین مجرای رودخانه و دشت سیلابی قطع شده است.



شکل ۶. نمودار تجمعی مساحت پهناهای سیل‌گیر برای دوره‌های بازگشت مختلف



شکل ۷. پهناهای سیل‌گیر دشت سیلابی رودخانه زین‌رود (به صورت تجمعی) با دوره‌های بازگشت مختلف

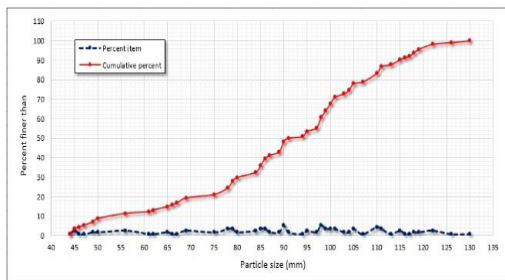
تحلیل نتایج مدل رزگن

بازه‌بندی رودخانه زربینه رود با ادغام و تفکیک قطعاتی از بازه‌های اولیه منطبق بر انواع اصلی رودخانه زربینه است. همچنین، هر بازه، با توجه به تغییرات محلی، به بازه‌های فرعی مجدداً تقسیم می‌شود.

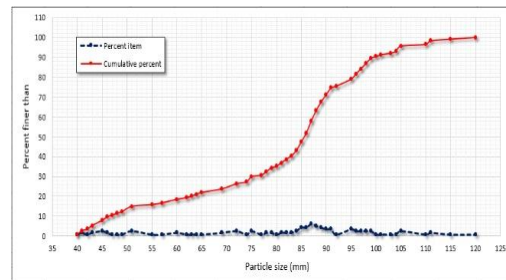
بازه ۱

در بازه ۱، عرض دشت سیلابی به دلیل کنترل متغیر زمین‌شناسی از نوسان زیادی برخوردار است. یک سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله تقریباً کل دشت سیلابی را دربر می‌گیرد و سیلاب‌هایی با دوره بازگشت بالاتر بر عمق، سرعت، تنش برشی، و توان رودخانه می‌افزایند. به دلیل توان زیاد رودخانه، رسوبات در اندازه‌های گراول و ماسه بسیار کم است و غلبه با قلوه‌سنگ و پاره‌سنگ است که بستر رودخانه را تا حدودی آرمورینگ کرده‌اند (برای نمونه، شکل ۱۰). برای حاصل‌شدن توزیع اندازه‌های مواد بستر و محاسبه D_{50} رسوبات از روش شمارش قلوه‌سنگ ولمن استفاده شد (برای نمونه، شکل‌های ۸ و ۹). براساس محاسبات صورت‌گرفته، این بازه در اغلب بخش‌ها از نوع C3 (برای نمونه، شکل ۱۱) و در چند مقطع محدود که عرض دره و دشت سیلابی، به دلیل کنترل متغیر زمین‌شناسی، کاهش محسوسی می‌یابد از نوع B است. به دلیل محدودبودن مقاطع نوع B، با اندکی اغماض می‌توان کل این بازه را از نوع C در نظر گرفت که، با توجه به متغیرهای شیب و مواد بستر، در طبقه C3b در بالادست و C3 در پایین دست قرار می‌گیرند. نسبت گودشدگی از ۱/۳ تا ۱۶/۶ در نوسان است. میانگین این پارامتر در حدود ۷/۵ با ضریب تغییرات ۵۵ درصد است. بالابودن ضریب تغییرات در ارتباط با عرض دشت سیلابی به دلیل کنترل متغیر زمین‌شناسی است. فقط در چند مقطع محدود، گذر از نوع C به نوع B وجود دارد که با اعمال مفهوم پیوستگی رزگن می‌توانند در طبقه C قرار گیرند. پیوستگی برای نسبت‌های گودشدگی اجازه تغییر ± 0.2 واحدی بدون تغییر نوع رودخانه را می‌دهد. در این بازه، نسبت عرض به عمق در همه مقاطع بیشتر از ۱۲ است. میانگین این پارامتر ۱۷/۸ با ضریب تغییرات ۳۳/۹ است. در این بازه، سینوزیته از تغییرپذیری فضایی زیادی برخوردار است و در کل بازه از ۱/۰۱ (سینوزیته پایین) تا ۱/۴۴ (سینوزیته بالا) متغیر است. هرچند براساس مفهوم پیوستگی، نوسان ± 0.2 واحدی این پارامتر بدون تغییر نوع رودخانه مجاز است. میانگین زاویه مرکزی کورنیس در حدود ۸۵ درجه است و پلان فرم مجرا در مرز بین الگوی ماندیری توسعه‌نیافته و توسعه‌یافته قرار می‌گیرد. الگوی ماندیری توسعه‌یافته در بخش‌هایی از دره شکل گرفته است که دارای دشت سیلابی نسبتاً توسعه‌یافته است.

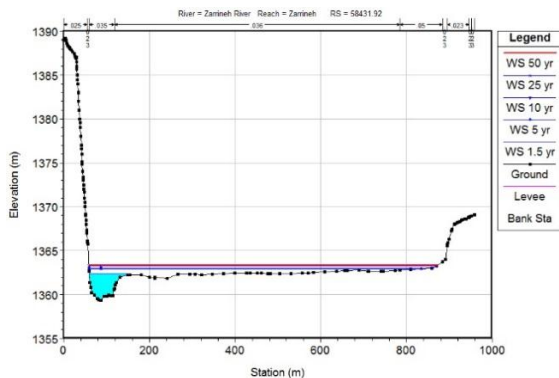
رودخانه‌های نوع C دارای انرژی متوسط و بار رسوب بالاست. اتلاف انرژی از طریق مائدرها، اشکال بستر (با غلبه حوضچه-خیزآب)، و پوشش گیاهی صورت می‌گیرد. همچنین، رودخانه‌های نوع C3 دارای پتانسیل یازیبی خوب، عرضه رسوب متوسط، پتانسیل متوسط فرسایش کناره، و کنترل بسیار بالای پوشش گیاهی است. با اینکه در رودخانه‌های نوع C3 بار رسوبی بالاست، بخش زیادی از رسوبات حوضه زهکشی زربینه رود در پشت سد مخزنی شهید کاظمی ته‌نشین می‌شود. از طرف دیگر، در این بازه، تلاقی مهمی که توانایی عرضه رسوب فراوان به مجرای رودخانه را داشته باشد وجود ندارد. تنها انشعاب مهم رودخانه قوره‌چای است که در بیشتر ایام سال خشک است. بنابراین، ظرفیت حمل رسوب این بازه بیش از عرضه رسوب است. با اینکه متوسط توان رودخانه نسبت به بازه‌های دیگر بالاست و به صورت بالقوه توان فرسایشی رودخانه زیاد است، فرسایش کناره به دلیل کنترل متغیرهای زمین‌شناسی و پوشش گیاهی نسبتاً پایین تا متوسط است. کف کتی بستر رودخانه نیز با دارابودن رسوبات درشت‌دانه تا حد زیادی محدود شده است. فقدان یا گسترش اندک پشته‌های نقطه‌ای در این بازه را می‌توان به محدودبودن عرضه رسوب نسبت داد.



شکل ۹. نمودار توزیع اندازه ذرات بستر رودخانه در محدوده بالادست شاهین دژ با قطر میانه ۹۲ میلی‌متر



شکل ۸. نمودار توزیع اندازه ذرات بستر رودخانه در محدوده شاهین دژ با قطر میانه ۸۶ میلی‌متر



شکل ۱۱. نمونه‌ای از مقطع نوع C در بازه ۱



شکل ۱۰. قلوه‌سنگ‌ها و پاره‌سنگ‌های مواد غالب بستر رودخانه در بازه ۱

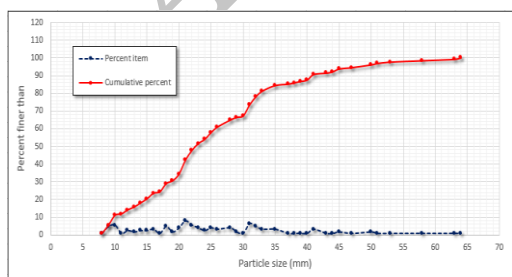
بازه ۲

در محدوده محمودآباد (ابتدای بازه ۲) تغییرات چشم‌گیری در مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه زربنه‌رود نمایان می‌شود. عرض دشت سیلابی توسعه درخور توجهی می‌یابد و کنترل‌های زمین‌شناسی کم‌رنگ‌تر می‌شود. ویژگی بارز دیگر، تغییر مواد لایه دربرگیرنده مجراست. از این منظر، رودخانه زربنه‌رود به نمونه بسیار مشخصی از رودخانه‌هایی با بستر گراولی تبدیل می‌شود که تا پایاب سد انحرافی نوروزلو امتداد می‌یابد. مجرای رودخانه در ابتدای این بازه، یعنی در محل تلاقی رودخانه جوشاتوچای، رفتاری متمایل به رودخانه‌های گیسویی نمایش می‌دهد و در بازه‌ای کوتاه به نوع D4 تبدیل می‌شود. این شرایط به صورت محلی در سراسر بازه ۲ دیده می‌شود که با توجه به مقیاس نقشه‌های خروجی قابل نمایش نیست.

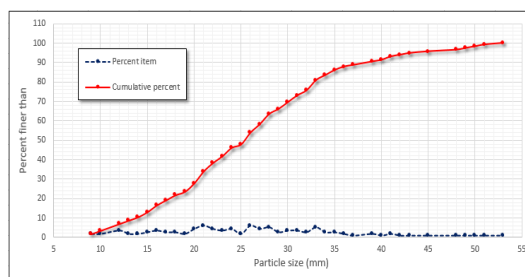
بازه‌های نوع D4 دارای تأمین بسیار بالای رسوب (و در نتیجه بار رسوبی زیاد)، پتانسیل بسیار بالای فرسایش کناره، و کنترل متوسط پوشش گیاهی است. انرژی این نوع از رودخانه‌ها پایین تا متوسط است و از طریق کناره‌ها و رسوبات اتلاف می‌شود. با توجه به مطالعات میدانی، تغییرپذیری فضایی، قابلیت فرسایش مواد کناره همراه با کنترل ضعیف پوشش گیاهی از دلایل اساسی شکل‌گیری نوع D در بخش‌هایی از بازه ۲ است. کناره‌هایی که به سرعت در حال فرسایش‌اند به مقاطع عرضی کم‌عمق عریض منجر می‌شوند (کروساتو، ۲۰۰۸: ۲۳). در واقع، رودخانه‌های گیسویی^۲ هنگامی ظاهر می‌شوند که کناره‌ها سست‌اند (پارکر، ۱۹۷۹: ۱۱۸۵-۱۲۰۱؛ پاتولا و همکاران، ۲۰۰۱: ۹-۴). کناره‌های سست به عریض شدن کانال منجر می‌شود و تشکیل پشته‌های داخل مجرا را مساعدت می‌کند (لاوئر و پارکر، ۲۰۰۸:

1. Substrate
2. Braided

۱۲۳-۱۴۹؛ اش مور، ۱۹۹۱: ۳۷-۵۲). در این بخش‌های رودخانه زربنه رود، فرسایش پذیری زیاد مواد کناره به تنظیم جانبی فعال منجر شده است. در واقع، کناره‌های دست راست رودخانه منطبق بر موادی است که تحت تأثیر دبی‌های سرریزی مجرای اصلی رودخانه زربنه رود و آوردهای رسوبی فراوان جوشاتوچای در طی سیلاب‌ها شکل گرفته است و توالی خاص لایه‌بندی رسوبات (به صورت لایه‌هایی با غلبه گراول و لایه‌هایی با غلبه رس و ماسه) مواد کناره را در مقابل فرایندهای فرسایشی بسیار آسیب‌پذیر کرده است (برای نمونه، شکل ۱۵). در نتیجه، حجم زیادی از رسوبات، مخصوصاً در طی سیلاب‌ها، از کناره‌های رودخانه و دشت سیلابی وارد مجرای رودخانه می‌شود و یکی از پیش‌نیازهای اساسی گیسویی شدن، یعنی فراوانی عرضه رسوب (هیگس و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۱۲۹-۱۱۴۲)، مهیا می‌شود. علاوه بر این، پوشش گیاهی رودکنار عمدتاً به صورت درختچه‌های تنک گز و درختان پراکنده بید است که با توجه به تراکم پایین و فرسایش‌پذیری زیاد مواد کناره نقش محدودی در پایداری کناره‌ها ایفا کرده‌اند. بنا به گفته مورای و پائولا^۱ (۱۹۹۴)، گیسویی شدن نشان‌دهنده نوع پلان فرم پیش‌فرض رودخانه‌ها در رسوبات غیرچسبناک فاقد پوشش گیاهی است. کناره‌هایی با پوشش گیاهی تنک به همراه شدن با رودخانه‌های گیسویی تمایل دارند (کروساتو، ۲۰۰۸: ۴۰). در این بخش‌ها، فرسایش‌پذیری زیاد مواد کناره‌ها باعث عریض و کم‌عمق شدن بستر رودخانه و در نتیجه افزایش نسبت عرض به عمق شده است (بیشتر از ۴۰) (برای نمونه، شکل ۱۴). این پارامتر، در برخی مقاطع به ۶۵ نیز می‌رسد. این امر مقدار سینوزیته را به صورت محلی کاهش داده است. این قطعات به هنگام دبی‌های لب‌پری و سرریزی به بخش‌هایی با عرضه رسوب بالا تبدیل می‌شوند که، با توجه به کم‌رسوب بودن جریان بازه اول، حجم زیادی از رسوبات از محل برداشت می‌شود. رسوبات در اندازه‌های گراول‌های ریزدانه، ماسه، سیلت، و رس از محل تخلیه شده و رسوبات درشت‌تر باقی مانده‌اند که از نوع گراول‌های درشت‌دانه‌اند (برای نمونه، شکل‌های ۱۲ و ۱۳). در واقع، در پشته‌های نقطه‌ای این بازه، مقادیر اندکی از رسوبات در اندازه‌های ماسه و ریزتر، به‌رغم حضور فراوان این رسوبات در کناره‌ها و دشت سیلابی، وجود دارد. بنابراین، در بخش‌هایی از بازه ۲، تمایل محلی به رفتار گیسویی به واسطه غلبه رسوبات منفصل (ماسه و گراول) و عدم تثبیت کناره‌ها توسط پوشش گیاهی مساعدت شده است. این رفتار، به طور محلی، به صورت پشته‌های نقطه‌ای^۲ داخل مجرا و ایجاد میان‌برهای شوت^۳ منعکس شده است. با توجه به اینکه فرایند میان‌برهای شوت ارتباط نزدیکی با انتقال از یک الگوی مئاندری به گیسویی دارد (کلین هانس و وان‌دن برگ، ۲۰۱۱: ۲۳۸-۲۳۱؛ زولزی و همکاران، ۲۰۱۲: ۲۴-۱)، این گونه رفتارهای آستانه‌ای در بازه ۲ را می‌توان به فراوانی عرضه محلی رسوب نیز نسبت داد.



شکل ۱۳. نمودار توزیع اندازه ذرات بستر رودخانه در محدوده محمودآباد با قطر میانه ۲۳ میلی‌متر



شکل ۱۴. نمودار توزیع اندازه ذرات بستر رودخانه در محدوده محمودآباد با قطر میانه ۲۶ میلی‌متر

1. Murray and Paola
2. Point bar
3. Chute cutoff



شکل ۱۵. دشت سیلابی در محدوده محمودآباد با مواد بسیار فرسایش پذیر و درختچه‌های پراکنده



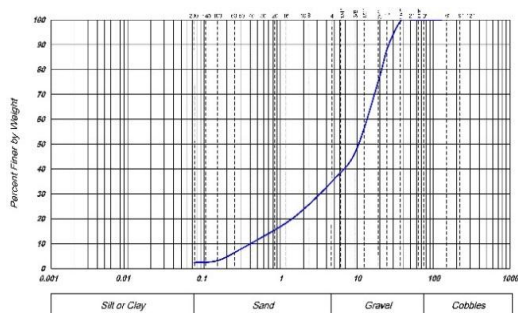
شکل ۱۴. الگوی متمایل به گیسویی در محدوده محمودآباد. بستر عریض و کم عمق باعث افزایش قابل توجه نسبت عرض به عمق شده است

سایر بخش‌های بازه ۲ نمونه بسیار مشخصی از رودخانه‌های نوع C است (برای نمونه، شکل ۱۹) که، با توجه به میزان شیب و مواد بستر، به نوع C4 تعلق دارند. در این بازه، مقادیر پارامتر نسبت گودشدگی بین حداقل ۶/۴ تا حداکثر ۲۹/۶ در نوسان است. میانگین این پارامتر ۱۸/۲ با ضریب تغییرات ۳۴/۶ درصد است. مقادیر نسبت عرض به عمق بین حداقل ۱۴/۷ و حداکثر ۴۰ متغیر است. میانگین این پارامتر ۲۵/۴ با ضریب تغییرات ۲۸/۵ درصد است. مقادیر حداکثر این پارامتر، به صورت محلی، در مقطعی دیده می‌شود که به علت فرسایش پذیری شدید و فقدان یا محدود بودن پوشش گیاهی کناره تنظیم جانبی بسیار فعال است که این امر به ایجاد مقاطع عریض همراه با پشته‌های نقطه‌ای داخل مجرا منجر شده است. انواع رودخانه‌های C دارای دید مسطحاتی مئاندری همراه با پشته‌های نقطه‌ای فعال اند. برای این بازه، میانگین سینوزیته در حدود ۱/۳ است. مقادیر زاویه مرکزی کورنیس عمدتاً در دامنه بین ۸۵ تا ۱۵۸ درجه قرار می‌گیرد که از نوع مئاندری توسعه یافته است. این موارد نشان می‌دهد که این بازه نمونه‌ای تپیک از رودخانه‌های نوع C است که با دارا بودن شیب کمتر از ۰/۲ و مواد بستر متشکل از گراول از نوع C4 است. هرچند، با توجه به تغییرپذیری فضایی قابلیت فرسایش مواد کناره، دانه بندی رسوبات بستر رودخانه از رژیم آشفته‌ای برخوردار است. همچنان که قابل انتظار است و نتایج گرانولومتری نمونه‌های رسوب برداشت شده نیز نشان می‌دهد (برای نمونه، شکل‌های ۱۶ و ۱۷)، یک روند کاهشی در درصد و اندازه گراول‌ها در جهت پایین دست دیده می‌شود. استثنای اصلی مربوط به محل تلاقی رودخانه اجرلوچای است که، در طی سیلاب‌ها، رسوبات درشت‌دانه‌ای در اندازه‌های گراول درشت و حتی قلوه سنگ را وارد مجرای رودخانه می‌سازد و، به صورت محلی، روند کاهش قطر رسوبات را آشفته می‌کند. اجرلوچای انشعابی پُرانرژی است که، با منحرف کردن مسیر مجرای رودخانه زربینه رود، مخروط افکنه‌ای انشعابی با مساحتی در حدود ۱۳ کیلومتر مربع را در طی دوره کوتاه‌تری ایجاد کرده است.

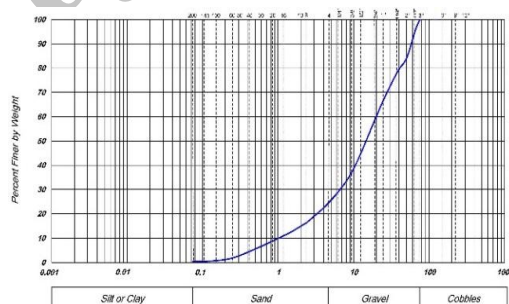
بازه ۲ دارای دره‌ای باز و عریض همراه یک دشت سیلابی توسعه یافته است و، از نظر دینامیک جانبی، پویاترین بازه رودخانه زربینه رود است. تراس‌ها، کانال‌های متروک، پشته‌های پیچشی، و میان‌برها مهم‌ترین ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی این بازه به‌شمار می‌رود. این بازه مشخصه‌های کامل رودخانه‌های نوع C4 را نشان می‌دهد؛ به نحوی که دارای تأمین رسوب بالا، پتانسیل بسیار بالای فرسایش کناره، و کنترل بسیار بالای پوشش گیاهی است. در واقع، پوشش گیاهی در ترکیب با قابلیت فرسایش مواد کناره تعیین کننده میزان تنظیم جانبی و پایداری این بازه است. بیشتر مئاندرهای این بازه فعال اند که در برخی موارد اراضی کشاورزی حاشیه رودخانه را به شدت فرسایش می‌دهند. عرضه رسوب عمدتاً در نتیجه فرسایش کناره‌های خارجی مئاندرها صورت می‌گیرد که همراه گسیختگی توده‌ای در کناره‌های

رسی است. این گونه ناپایداری‌های ژئومکانیکی مخصوصاً در جاهایی اتفاق می‌افتد که کناره‌ها پُرشیب و مرتفع‌اند یا توسط فرسایش پای کناره دچار زیربردگی^۱ شده‌اند (شکل ۱۸).

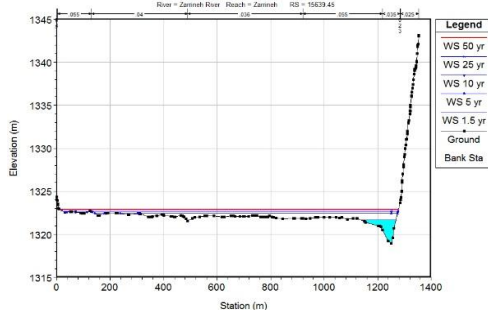
در این بازه، رودخانه زربینه رود به نمونه مشخصی از رودخانه‌های گراولی با مورفولوژی بستر حوضچه-خیزآب^۲ تبدیل می‌شود. این مشخصه یکی از ویژگی‌های بسیار بارز این بازه نسبت به سایر بازه‌هاست و از اهمیت زیادی در رابطه با حفظ تعادل و اکوتومورفولوژی رودخانه برخوردار است. هرچند که توالی حوضچه-خیزآب تقریباً در همه کانال‌های دائمی دارای مواد بستر بزرگ‌تر از ماسه درشت ظاهر می‌شوند، ویژگی بارز رودخانه‌هایی با بستر گراولی به‌شمار می‌روند (مونت‌گومری و بافینگتون، ۱۹۹۷: ۶۱۱-۵۹۶؛ لئوپلد و همکاران، ۱۹۶۴: ۱۹۴؛ لئوپلد و وولمن، ۱۹۵۷: ۸۵-۳۹). توالی‌های حوضچه-خیزآب دارای طیف متنوعی از اندازه مواد بستر با یک لایه درشت بر روی لایه سطحی و یک لایه ریزتر زیرسطحی‌اند. معمولاً، توالی‌های حوضچه-خیزآب در شیب‌های پایین عموماً کمتر از ۲ درصد به‌وجود می‌آیند (مونت‌گومری و بافینگتون، ۱۹۹۷: ۶۱۱-۵۹۶؛ مادج، ۱۹۹۹: ۱۱۵۳-۱۱۶۹؛ کارلینگ، ۱۹۹۱: ۱۹-۳۱). نوع غالب مورفولوژی پلان‌فرم یک توالی حوضچه-خیزآب الگوی ماندندی است که طول یک مجرا را افزایش و شیب آن را کاهش می‌دهد (لئوپلد و همکاران، ۱۹۶۴: ۱۹۴). این ویژگی‌ها به‌وضوح در این بازه از رودخانه زربینه رود انعکاس یافته است. حوضچه‌ها پستی‌های توپوگرافیک بستر و خیزآب‌ها بلندی‌های توپوگرافیک‌اند و به صورت مجتمع یک فرم بستر مواج ایجاد کرده‌اند. در این بازه، حوضچه‌ها به صورت آزاد^۳ شکل گرفته‌اند (برای نمونه، شکل ۱۸) و هیچ‌گونه حوضچه‌ی تحمیلی یا ناشی از موانع انسدادی مشاهده نشد. در کل مجرای مطالعاتی زربینه رود، فقط چند مورد حوضچه‌ی انسدادی یا تحمیلی در بازه‌های ۳ و ۴ ناشی از سنگ‌چینی در داخل مجرای رودخانه ایجاد شده است.



شکل ۱۷. نمودار گرانولومتری نمونه رسوب در پایین دست بازه ۲ با ۶۴٫۹ درصد گراول، ۳۲٫۸ درصد ماسه، و ۲٫۳ درصد سیلت و رس



شکل ۱۶. نمودار گرانولومتری نمونه رسوب در بالادست بازه ۲ با ۷۵٫۲ درصد گراول، ۲۴٫۴ درصد ماسه، و ۰٫۴ درصد سیلت و رس



شکل ۱۹. نمونه‌ای از مقطع نوع C در بازه ۲

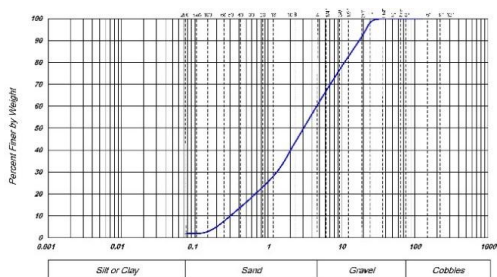


شکل ۱۸. مورفولوژی حوضچه-خیزآب-پشته و مهاجرت ماندنر توأم با ناپایداری ژئومکانیکی در کناره‌های مرتفع رسی

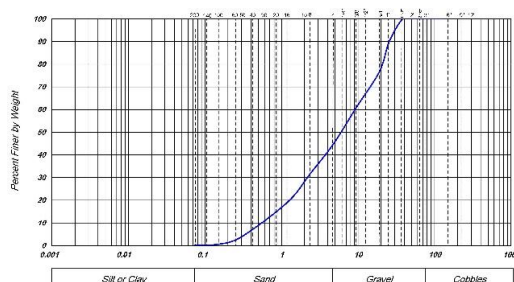
1. Undermined
2. Pool-Riffle
3. Freely

بازه ۳

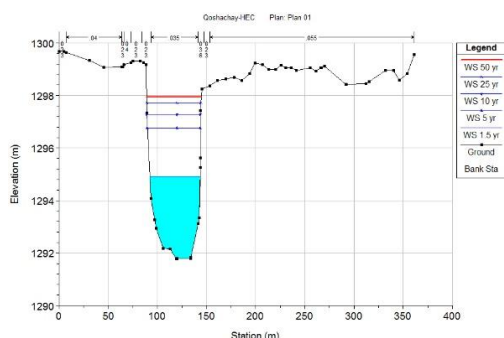
بازه ۳ از پنج کیلومتری پایاب سد انحرافی نورزولو تا پایین دست شهر میاندوآب در اغلب مقاطع تبدیل به رودخانه نوع G و F می‌شود (شکل‌های ۲۲ و ۲۳). به دلیل دخالت‌های انسانی، آشفته‌گی‌های زیادی در این بازه وجود دارد که واریس‌های مجدد میدانی و اعمال مفهوم پیوستگی رزگن را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. این بازه، با توجه به دو پارامتر ممیزی مهم، یعنی نسبت گودشدگی و نسبت عرض به عمق به نوع G و F تعلق دارد که، با توجه به مواد تشکیل‌دهنده بستر و میزان شیب، به سه نوع F4، G5c، و F5 تفکیک‌شدنی است. مقادیر نسبت گودشدگی نزدیک به مقدار آستانه گذار این نوع رودخانه یعنی ۱/۴ است. درحالی‌که مقادیر نسبت عرض به عمق بسیار متغیر است. درواقع، اختلاف اساسی بین رودخانه‌های G و F مربوط به مقادیر پارامتر نسبت عرض به عمق است. مواد بستر رودخانه در بخش‌های بالادست، گراول ماسه‌ای (شکل ۲۰)، و در بخش‌های پایین دست از نوع ماسه گراولی (شکل ۲۱) است. در این بازه، یک نوع تبدیل از نوع C (C4) در بالادست و C5 در پایین دست) به نوع G و F قابل تصور است. این تبدیل به واسطه کف‌کنی^۱ منتج از فرایندهای طبیعی (از قبیل فعالیت‌های نئوتکتونیک) صورت نگرفته است؛ بلکه دلیل اساسی آن در ارتباط با دخالت‌های بسیار گسترده آنتروپوژنیک بوده است. در این بازه، برداشت شن و ماسه در مقیاسی بسیار وسیع و نظارت‌نشده از بستر و کناره‌های رودخانه صورت می‌گیرد. علاوه بر این، در بالادست این بازه سد انحرافی نورزولو به عنوان یک تله رسوبی عمل می‌کند. می‌توان بیان کرد که در این بازه برداشت رسوب بیش از آوردهای رسوبی است. بستر رودخانه تا چندین متر گود افتاده (برای نمونه، شکل‌های ۲۲ و ۲۳) و کناره‌های رودخانه غالباً با شیبی تند و عمودی از دشت سیلابی جدا و محصور شده است؛ به نحوی که حتی سیلاب‌هایی با دوره بازگشت پنجاهساله نیز قادر به پُر کردن بیشتر مقاطع عرضی رودخانه نیستند. تأثیر گودافتادگی بر پهنه‌های سیل‌گیر این بازه‌ها به وضوح نمایان است (شکل ۷). بنابراین، ارتباط مجرای رودخانه با دشت سیلابی خود قطع شده است. انفصال مجرای رودخانه از دشت سیلابی را می‌توان به کل بازه ۳ و بخش‌های زیادی از بالادست بازه ۴ تعمیم داد. در این بازه، افزایش مقادیر پارامتر نسبت عرض به عمق و تبدیل رودخانه به نوع F به دلیل برداشت شن و ماسه از کناره‌های رودخانه و منطقه رودکنار است. در بخش اعظمی از این دو بازه، کناره‌ها با شیبی تند از دشت سیلابی منفک شده است. به واسطه فعالیت‌های استخراج شن و ماسه، مورفولوژی حوضچه-خیزآب از بین رفته و بستر رودخانه بسیار نامنظم شده است؛ حتی، در مواردی، برداشت‌های نابرابر شن و ماسه به ایجاد نقاط کینیک در بستر رودخانه منجر شده است. در برخی موارد، برداشت به صورت گزینشی صورت گرفته و، با غربال کردن، رسوبات در اندازه ماسه برداشت شده و گراول‌ها در محل باقی مانده‌اند. پلان فرم رودخانه در نتیجه اقدامات انسانی به کلی دگرگون و به شبه‌مئاندری و مئاندري توسعه‌نیافته تبدیل شده است. این امر به صورت افت ناگهانی ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی در محدوده این بازه انعکاس یافته است. بنابراین، تمایل مجرا به الگوی مستقیم ناشی از دخالت‌های انسانی به صورت برداشت شن و ماسه (مخصوصاً رسوبات پشته‌های کناره‌های محدب به عنوان یکی از ارکان اساسی حفظ و توسعه الگوی مئاندري) و کانالیزه‌شدن مجرا در محدوده شهر میاندوآب است. رودخانه‌های نوع F4، G5، و F5 دارای پتانسیل بازیابی بسیار ضعیف، تأمین رسوب بسیار بالا، پتانسیل بسیار بالای فرسایش کناره، و کنترل بالای پوشش گیاهی است. در این بازه، این مشخصه‌ها به دلیل دخالت‌های بسیار گسترده انسانی از نمود چندانی برخوردار نیست و می‌توان گفت که مدل رزگن در تبیین فرایندهای ژئومورفیک حاکم بر این بازه از کارایی پایینی برخوردار است. این بازه، از نظر دینامیک عرضی طبیعی، یک بازه مرده به‌شمار می‌رود.



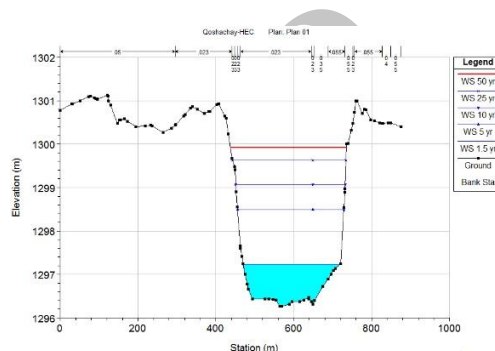
شکل ۲۱. نمودار گرانولومتری نمونه رسوب در پایین دست بازه ۳ با ۳۹/۲ درصد گراول، ۵۹/۰ درصد ماسه، و ۱/۸ درصد سیلت و رس



شکل ۲۰. نمودار گرانولومتری نمونه رسوب در بالادست بازه ۳ با ۵۵/۲ درصد گراول، ۴۴/۶ درصد ماسه، و ۰/۲ درصد سیلت و رس



شکل ۲۳. نمونه‌ای از مقطع نوع G در پایین دست بازه ۳



شکل ۲۲. نمونه‌ای از مقطع نوع F در بالادست بازه ۳

بازه ۴

برای بازه ۴، پارامترهای ممیزی مدل رزگن نشان‌دهنده نوع C است که، با توجه به مواد دربرگیرنده مجرا و میزان شیب، به نوع C5b تعلق دارد. میانگین نسبت گودشدگی ۶/۱ با ضریب تغییرات ۲۳/۶ درصد است. در این بازه، پهنه‌های سیل‌گیر به دلیل دخالت‌های انسانی کاهش یافته است. نواحی سیل‌گیر عمدتاً منطبق بر پشته‌های پیچشی توسعه یافته در کناره‌های محدب مئاندرهاست. دخالت‌های آنتروپوژنیک، به صورت احداث خاکریزها و برداشت ماسه، به کاهش مقادیر نسبت گودشدگی منجر شده است. میانگین نسبت عرض به عمق ۲۸/۲ با ضریب تغییرات ۲۰/۲ درصد است. این نسبت از حداقل ۲۰/۳ تا حداکثر ۳۷/۷ متغیر است. مواد تشکیل‌دهنده بستر در بخش‌های بالادست از نوع ماسه درشت‌دانه است که به سمت پایین دست از قطر ماسه‌ها کاسته می‌شود (شکل‌های ۲۴ و ۲۵). از لایه نازک رسی موجود در برخی بخش‌های این بازه صرف نظر شد. این لایه به دلیل کاهش محسوس دبی و آب‌های راکد موجود در حوضچه‌ها در طی فصول خشک ایجاد شده است. دخالت‌های انسانی به صورت کاهش محسوس دبی، برداشت بی‌رویه ماسه، و احداث خاکریزها (در جهت مقابله با سیلاب) مورفولوژی رودخانه را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. هرچند برداشت ماسه در مقیاس وسیع صورت می‌گیرد، پلان فرم مجرا هنوز الگوی مئاندري خود را تا حدودی حفظ کرده است و زاویه مرکزی در اغلب بخش‌ها منعکس‌کننده یک پلان فرم مئاندري توسعه یافته است. در این بازه، رسوبات (ماسه) پشته‌های پیچشی کناره‌های محدب مجرا در حال استخراج است که ادامه این روند به ایجاد میان‌برهای مصنوعی و تبدیل آن به یک الگوی متمایل به مستقیم یا شبه‌مئاندري منجر می‌شود؛ امری که در برخی از بخش‌ها رخ داده و به صورت مقادیر پایین ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی نمایان شده است. در این بازه، هرچند که بین دشت سیلابی و مجرای رودخانه ارتباط محدودی برقرار است، با ادامه روند کنونی برداشت بی‌رویه ماسه، تبدیل این بازه به نوع F بسیار محتمل است. این بازه، به دلیل

آشفته‌گی‌های آن‌تروپوژنیک، از ویژگی‌های تیپیک انواع رودخانه‌های C برخوردار نیست و بهتر است بازه‌ای در حال تبدیل از نوع C به نوع F در نظر گرفته شود.

بازه ۵

بازه ۵ به نمونه‌ای از رودخانه‌های نوع E تبدیل می‌شود که، با توجه به مواد بستر و شیب، به دو نوع فرعی E5b در بالادست و E6b در پایین‌دست تفکیک‌شدنی است. در این بازه، دشت سیلابی بسیار وسیع و توسعه‌یافته است و، با توجه به محدودبودن خاکریزهای رودکنار، استخراج محدود رسوبات بستر (به دلیل غلبه ماسه‌های بسیار ریزدانه، سیلت، و رس)، و شیب بسیار کم (شکل ۲۶)، پهنه‌های سیل‌گیر برای دوره‌های بازگشت بالاتر افزایش محسوسی می‌یابد. به همین دلیل، نسبت گودشدگی مقادیر بالایی را نشان می‌دهد (گودشدگی اندک) و از مقاطع عرضی ترسیم‌شده فراتر می‌رود. میانگین نسبت گودشدگی بیش از ۲۱/۵ است. عرض مجرا به دلیل چسبندگی مواد کناره کاهش می‌یابد (شکل ۲۷) و در نتیجه، نسبت عرض به عمق مقادیر پایینی (کمتر از ۱۴) را نشان می‌دهد. ماسه‌های ریزدانه، سیلت، و رس مواد غالب بستر و کناره‌های رودخانه را تشکیل می‌دهد. رودخانه‌های نوع E دارای تأمین رسوب پایین، پتانسیل متوسط فرسایش کناره، و کنترل بسیار بالای پوشش گیاهی است. این رودخانه‌ها در حمل رسوب بسیار کارآمدند. انرژی رودخانه پایین است و اتلاف انرژی از طریق مئاندرها، اشکال بستر، و پوشش گیاهی صورت می‌گیرد. در این بازه، توان رودخانه به علت کاهش شیب افت محسوسی می‌یابد. کاهش محسوس شیب در ارتباط با نزدیک‌شدن رودخانه به سطح اساس (چاله ارومیه) و پلان فرم مئاندری توسعه‌یافته است؛ به‌گونه‌ای که در بخش‌های انتهایی این بازه جریان بسیار آرام توأم با پس‌زدگی آب مشاهده می‌شود. به علت کاهش محسوس دبی در طی سال‌های گذشته، مئاندرهای رودخانه مهاجرت بسیار محدودی داشته‌اند. درصد درخور توجهی از مواد بستر و کناره‌های رودخانه متشکل از سیلت و رس است و در بخش‌های پایین‌دست تقریباً به طور کامل به سیلت و رس تبدیل می‌شود (شکل ۲۷). این مواد از خاصیت چسبندگی بسیار زیادی برخوردارند که با شیب ملایم کناره‌ها و پوشش گیاهی توأم شده و کناره‌هایی پایدار را به‌وجود آورده‌اند. پوشش گیاهی و رسوبات چسبناک پایداری کناره را افزایش می‌دهند (وان دیجک، ۲۰۱۳: ۲۲). پلان فرم رودخانه از نوع مئاندری بیش از حد توسعه‌یافته است و مقدار سینوزیته در حدود ۱/۵ است. هرچند، به دلیل میزان پایین مهاجرت مئاندرها، فقط یک مورد از اشکال ژئومورفیکی نعل اسبی در اطراف رودخانه وجود دارد که برکه‌ای را تشکیل داده است. در این بازه، شکل‌گیری الگوی مئاندری توسعه‌یافته در ارتباط با توان پایین رودخانه و مواد کناره چسبناک است. در یک دشت سیلابی چسبناک رسی رودخانه‌های مئاندری توسعه می‌یابند (گیبلینگ و دیویس، ۲۰۱۲: ۹۹-۱۰۵؛ کلینهنس، ۲۰۱۰: ۲۸۷-۳۲۶). به علت شیب بسیار اندک مجرا و دشت سیلابی، تغییر مسیرهای ناگهانی (البته نادر) می‌تواند یکی از فرایندهای تحول رودخانه در این بازه در نظر گرفته شود.

SAMPLE STATISTICS						
SAMPLE IDENTITY: SAMPLE TYPE: Unimodal, Moderately Sorted SEDIMENT NAME: Very Fine Gravelly Medium Sand			ANALYST & DATE: . TEXTURAL GROUP: Gravelly Sand			
GRAIN SIZE DISTRIBUTION						
MODE 1	μm	φ	GRAVEL: 14.7%	COARSE SAND: 29.0%		
MODE 2			SAND: 85.3%	MEDIUM SAND: 37.0%		
MODE 3			MUD: 0.0%	FINE SAND: 2.2%		
D ₁₀	318.2	-1.374		V FINE SAND: 0.1%		
MEDIAN or D ₅₀	646.2	0.630	V COARSE GRAVEL: 0.0%	V COARSE SILT: 0.0%		
D ₉₀	2592.2	1.652	COARSE GRAVEL: 0.0%	COARSE SILT: 0.0%		
(D ₉₀ / D ₁₀)	8.147	-1.202	MEDIUM GRAVEL: 0.0%	MEDIUM SILT: 0.0%		
(D ₇₅ / D ₂₅)	2.274.1	3.026	FINE GRAVEL: 0.0%	FINE SILT: 0.0%		
(D ₇₅ / D ₅₀)	2.972	-2.972	V FINE GRAVEL: 14.7%	V FINE SILT: 0.0%		
(D ₇₅ + D ₂₅)	872.9	1.571	V COARSE SAND: 17.0%	CLAY: 0.0%		
METHOD OF MOMENTS						
	Arithmetic		Geometric		FOLK & WARD METHOD	
	μm	φ	μm	φ	Description	
MEAN (X)	655.5	252.3	0.602	778.1	0.362	Coarse Sand
SORTING (σ)	493.6	9.446	0.784	1.908	0.932	Moderately Sorted
SKEWNESS (Sk)	0.873	-1.923	0.099	0.143	-0.143	Coarse Skewed
KURTOSIS (K)	3.210	5.123	2.439	0.612	0.612	Very Platykurtic

شکل ۲۵. آماره‌های گرانولومتری نمونه‌ای از رسوب در پایین دست بازه ۴

SAMPLE STATISTICS						
SAMPLE IDENTITY: SAMPLE TYPE: Unimodal, Poorly Sorted SEDIMENT NAME: Very Fine Gravelly Medium Sand			ANALYST & DATE: . TEXTURAL GROUP: Gravelly Sand			
GRAIN SIZE DISTRIBUTION						
MODE 1	μm	φ	GRAVEL: 29.7%	COARSE SAND: 20.4%		
MODE 2			SAND: 70.3%	MEDIUM SAND: 25.1%		
MODE 3			MUD: 0.0%	FINE SAND: 8.1%		
D ₁₀	251.4	-2.109		V FINE SAND: 1.7%		
MEDIAN or D ₅₀	835.9	0.259	V COARSE GRAVEL: 0.0%	V COARSE SILT: 0.0%		
D ₉₀	4312.6	1.992	COARSE GRAVEL: 0.0%	COARSE SILT: 0.0%		
(D ₉₀ / D ₁₀)	17.16	-0.945	MEDIUM GRAVEL: 0.0%	MEDIUM SILT: 0.0%		
(D ₇₅ / D ₂₅)	4051.2	4.101	FINE GRAVEL: 0.0%	FINE SILT: 0.0%		
(D ₇₅ / D ₅₀)	5.917	-1.193	V FINE GRAVEL: 29.7%	V FINE SILT: 0.0%		
(D ₇₅ + D ₂₅)	1869.3	2.565	V COARSE SAND: 15.0%	CLAY: 0.0%		
METHOD OF MOMENTS						
	Arithmetic		Geometric		FOLK & WARD METHOD	
	μm	φ	μm	φ	Description	
MEAN (X)	551.8	101.9	0.630	746.8	0.421	Coarse Sand
SORTING (σ)	572.3	17.58	1.004	2.077	1.054	Poorly Sorted
SKEWNESS (Sk)	1.106	-0.885	0.627	-0.423	0.423	Very Fine Skewed
KURTOSIS (K)	3.375	2.007	2.684	0.452	0.452	Very Platykurtic

شکل ۲۴. آماره‌های گرانولومتری نمونه‌ای از رسوب در بالادست بازه ۴



شکل ۲۷. جریان آهسته آب و کناره‌های رسی با شیب ملایم و گودشدگی اندک باعث پایداری کناره‌ها در بازه انتهایی شده است



شکل ۲۶. دشت سیلابی هموار با مواد رسی و سطح آب زیرزمینی بالا در بازه انتهایی

نتیجه گیری

در این پژوهش، رودخانه زربنه رود (جیغاتی چای) براساس سیستم ژئومورفولوژیکی رزگن بررسی شد. با وجود استفاده گسترده از این مدل، برخی محققان از آن انتقاد کرده‌اند. شاید جدی‌ترین انتقاد مربوط به روپر و همکاران (۲۰۰۸) با تأکید بر اختلافات محققان در تعیین انواع رودخانه زربنه رود باشد. آن‌ها عدم توافق اساسی محققان در تعیین انواع رودخانه زربنه رود را به اختلافات در تعیین مقادیر نسبت گودشدگی نسبت می‌دهند. در این تحقیق، به واسطه ترکیب این مدل با مدل هیدرودینامیک HEC-RAS از برخی مسائل مطرح شده توسط این محققان اجتناب شد. اما، در دو بازه پایاب سد انحرافی نوروزلو (بازه‌های ۳ و ۴)، ناسازگاری‌هایی، به‌ویژه در رابطه با دو پارامتر نسبت گودشدگی و نسبت عرض به عمق، باقی ماند که دلیل اساسی آن آشفتگی‌های شدید ناشی از عوامل آنتروپوژنیک است. در این موارد، از طریق بازدیدهای میدانی مجدد، نوع رودخانه تعیین شد. کارایی مدل رزگن در بازه‌های بالادست سد انحرافی نوروزلو و بازه انتهایی نسبتاً مناسب است و تقریباً همه مقاطع با انواع رودخانه‌های رزگن سازگارند. در این بازه‌ها، فرم و الگوی رودخانه تا حد زیادی منعکس‌کننده فرایندهای حاکم بر مجرای رودخانه است و مورفولوژی در کنترل تغییرات توان رودخانه و تغییرپذیری شرایط کناره رودکنار است. فرسایش شدید کناره در برخی بخش‌ها همراه تغییرات کاربری اراضی رودکنار از مهم‌ترین مسائل ژئومورفولوژیکی این بازه‌ها به‌شمار می‌آید. در دو بازه ۳ و ۴، به سبب کنترل شدید عوامل آنتروپوژنیک، توانایی تعیین مدل رزگن محدود می‌شود و ناسازگاری‌ها و تناقض‌هایی در رابطه با تعیین نوع رودخانه زربنه رود دیده می‌شود. در این بازه‌ها، مشابه کار روپر و همکاران (۲۰۰۸) در منطقه اورگان امریکا به مقطعی برخورد شد که با هیچ یک از انواع رودخانه زربنه رود همخوانی نداشت و، یا برعکس، برخی از مقاطع یک نوع از رودخانه منحصر به فرد را نشان ندادند. اما در حالت کلی، بیشتر مقاطع بازه واقع در پایاب سد انحرافی نوروزلو تا شهر میاندوآب (بازه ۳) از نوع C، F و G است. در واقع، به دلیل برداشت بی‌رویه شن و

ماسه و گودشدگی بستر مجرا و همچنین احداث خاکریزهای سیل‌بند، ارتباط مجرای رودخانه با دشت سیلابی خود قطع شده است. بازه ۴، در پایین دست بازه فوق، هرچند از نوع رودخانه C رزگن است، فرایندهای مشخص این نوع از رودخانه‌ها را نشان نمی‌دهد. این بازه در حال تبدیل از نوع C به نوع F (به دلیل برداشت ماسه از کناره‌ها و افزایش نسبت عرض به عمق) است. در واقع، تغییرات آنتروپوژنیک در این بازه باعث شده است تا فرم رودخانه در یک حالت گذار باشد. بازه انتهایی رودخانه زربینه رود به نمونه مشخصی از رودخانه‌های نوع E تبدیل می‌شود. برداشت بسیار محدود مواد بستر (به علت غلبه ماسه‌های بسیار ریزدانه با درصد قابل توجه سیلت و رس) و وجود دشت سیلابی هموار و وسیع باعث افزایش مقادیر پارامتر نسبت گودشدگی شده است. برعکس، چسبندگی زیاد مواد کناره، به دلیل وجود سیلت و رس فراوان، به کم‌عرض شدن مجرا و کاهش مقادیر پارامتر نسبت عرض به عمق لب‌پری منجر شده است.

رزگن (۱۹۹۷) چهار اولویت را در رویکرد ژئومورفولوژیکی خود برای بازسازی رودخانه‌های کف‌کننده^۱ ارائه کرد که به ترتیب اولویت شامل بازگردانی رودخانه به ارتفاع اولیه خود و ارتباط مجدد دشت‌های سیلابی، گسترش و عریض کردن عرض کمربند جهت ایجاد یک کانال جدید در ارتفاع موجود، تغییر نوع رودخانه‌ها، و تثبیت کانال کف‌کننده موجود در محل است. با عطف به اینکه احیا و بازسازی رودخانه‌های نوع G و F دشوار است، بهتر است، با اعمال محدودیت‌هایی در زمینه برداشت ماسه، از تبدیل بازه پایین دست میاندوآب (بازه ۴) به نوع G و F جلوگیری شود. برای بازه‌های نوع F و G، اولویت اول، به دلیل تراکم بالای جمعیتی منطقه و افزایش احتمال رخداد سیلاب، پیشنهاد نمی‌شود. با توجه به نوع غالب رودخانه در این بازه، یعنی نوع F (با نسبت عرض به عمق بالا) اولویت دوم- یعنی تبدیل نوع F و یا G به C یا E- و برقراری مجدد دشت سیلابی در ارتفاع موجود یا بالاتر و نه در تراز اولیه پیشنهاد می‌شود.

منابع

- خیری زاده آروق، م. (۱۳۹۵). تحلیل مورفودینامیک و تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرینه رود (از شاهین دژ تا دریاچه ارومیه)، رساله دکتری، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز.
- خیری زاده آروق، م.؛ رضایی مقدم، م.ح.؛ رجبی، م. و دانش فراز، ر. (۱۳۹۶). تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرینه رود با استفاده از روش های ژئومورفومتریکی، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۵(۴): ۷۶-۱۰۲.
- روستایی، ش.؛ خورشید دوست، ع.م. و خالقی، س. (۱۳۹۲). ارزیابی مورفولوژی مجرای رودخانه ليقوان با روش طبقه بندی راسگن، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۱(۴): ۱-۱۶.
- لایقی، ص. و کرم، ا. (۱۳۹۳). طبقه بندی هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با مدل رزگن، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۳): ۱۳۰-۱۴۳.
- یمانی، م. و تورانی، م. (۱۳۹۳). طبقه بندی ژئومورفولوژیکی الگوی آبراهه طالقان رود در محدوده شهرک طالقان از طریق روش رزگن، پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۴۶(۲): ۱۸۳-۱۹۸.
- Ashmore, P. (1991). Channel morphology and bed load pulses in braided, gravel-bed streams, *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 73: 37-52.
- Carling, P. (1991). An appraisal of the velocity-reversal hypothesis for stable pool-riffle sequences in the River Severn, England, *Earth Surface Processes and Landforms*, 16: 19-31.
- Committee on American River Flood Frequencies, National Research Council. (1999). *Improving American river flood frequency analyses*, National Academy Press.
- Crosato, A. (2008). Analysis and modelling of river meandering, PhD thesis, Published and distributed by IOS Press under the imprint Delft University Press.
- 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*, 5: 99-105.
- HEC (Hydrologic Engineering Center) (2010). HEC-RAS river analysis system, hydraulic reference manual, U. S. Army Corps of Engineers.
- 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.
- Keirizadeh, M.; Rezaei Moghaddam, M.H.; Rajabi, M. and Daneshfaraz, R. (2017). Analyzing Lateral Changes of the Zarrineh-Roud River Channel Using Geomorphometric Techniques, *Quantitative geomorphological researches*, 5(4): 76-102. (In Persian).
- Kheirizadeh Arouq, M. (2017). Analysis of Morphodynamics and Channel Lateral Changes of the Zarrineh-Rud River (From Shahin-Dejh to Urmia Lake), PhD thesis, Faculty of Geography and Planning, University of Tabriz. (In Persian).
- Kleinhans, M.G. (2010). Sorting out river channel patterns, *Progress in Physical Geography*, 34: 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*, 36: 721-738.
- Kondolf, G. Mathias and Piegay, H. (2003). *Tools in fluvial geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, 688 P.
- Lauer, J. and Parker, G. (2008). Net local removal of floodplain sediment by river meander migration, *Geomorphology*, 96: 123-149.
- Layeghi, S. and Karam, A. (2014). Hydrogeomorphological classification of Jajroud River using Rosgen model, *Quantitative geomorphological researches*, 3(3): 130-143. (In Persian).

- Leopold, L.B. and Wolman, M.G. (1957). River channel patterns: braided, meandering, and straight, Geological Survey Professional Paper 282-B. United States Government Printing Office, WA, USA. pp. 39-85.
- Leopold, L.B.; Wolman, M.G. and Miller, J.P. (1964). Fluvial Processes in Geomorphology, Dover Publications Inc., New York, NY. USA. 504p.
- Madej, M.A. (1999). Temporal and spatial variability in thalweg profiles of a gravel-bed river, Earth Surface Processes and Landforms, 24(12): 1153-1169.
- Martin, Derek J. (2005). Geospatial analysis of gravel bar deposition and channel migration within the Ozark national scenic riverways, Missouri (1955-2003). A thesis presented to the graduate college Of Southwest Missouri State University in partial fulfillment of the requirements for the degree master of science, geospatial sciences. 109p.
- Merwade, V.M. (2004). Geospatial description of river channels in three dimensions, Doctoral thesis, The University of Texas at Austin.
- Montgomery, D.R. and Buffington, J.M. (1997). Channel reach morphology in mountain drainage basins, Geological Society of America Bulletin, 109(5): 596-611.
- Natural Resources Conservation Service (2008). Stream restoration design (National Engineering Handbook 654), Technical Supplement 3E: Rosgen Stream Classification Technique-Supplemental Materials, 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, 11(7): 4-9.
- Parker, G. (1979). Hydraulic geometry of active gravel rivers, Journal of the Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers, 105: 1185-1201.
- Roper, Brett B.; Buffington, John M.; Archer, E.; Moyer, Ch. and Ward, M. (2008). The role of observer variation in determining rosgen system types in northeastern Oregon mountain streams, Journal of the American water resources association, 44(2): 417- 427.
- Rosgen, David L. (1994). A classification of natural rivers, Catena, 22: 169-199.
- Rosgen, David L. (1997). A geomorphological approach to restoration of incised rivers, Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision, pp: 1-11
- Roustaei, Sh.; KhorshidDoust, A.M. and Khaleghi, S. (2013). Evaluating morphology of Liqvan-Chay river channel using Rosgen classification, Quantitative geomorphological researches, 1(4): 1-16. (In Persian).
- Shroder, John F. (2013). Treatise on geomorphology, Vol. 9: treatise on fluvial geomorphology, Elsevier Inc, 860p.
- The Federal Interagency Stream Restoration Working Group (2001). Stream corridor restoration: principles, processes, and practices, Adopted part 653 of National Engineering Handbook, USDA-Natural Resources Conservation Service.
- Van Dijk, W. M. (2013). Meandering rivers - feedbacks between channel dynamics, floodplain and vegetation. PhD thesis, Department Physical Geography Faculty of Geosciences, Utrecht University, 206p
- Yamani, M. and Toorani, M. (2014). Geomorphological Classification of Taleghan River Pattern in Taleghan Town by Rozgen Method, Physical geography research quarterly, 46(2): 183-198. (In Persian).
- Zolezzi, G.; Luchi, R. and Tubino, M. (2012). Modeling morphodynamic processes in meandering rivers with spatial width variations, Rev. Geophys, 50, RG4005: 1-24.