

## تحلیل ژئومورفولوژیکی مجرای رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل سلسله مراتبی رزگن (پایین دست سد

### سیلان تا تلاقی رودخانه اهر جای)

محمدحسین رضائی مقدم\* - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز  
محمدرضا نیکجو - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.  
مهدی یاسی - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران.  
مسعود رحیمی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۵      تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۶/۱۲

### چکیده

در این پژوهش بخشی از مجرای رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل ژئومورفولوژیکی رزگن مورد تحلیل و طبقه‌بندی قرار گرفت. این پژوهش متکی بر نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۰۰۰ و مطالعات میدانی بوده است. در این تحقیق، برای محاسبه پارامترهای نسبت گود شستگی و نسبت عرض به عمق لب‌پری از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS به همراه الحاقی HEC-GeoRAS استفاده گردید. بررسی نتایج مدل رزگن نشان داد که اکثر مقاطع رودخانه قره‌سو در طبقه‌ی C و E مدل سلسله مراتبی رزگن قرار گرفته‌اند. رودخانه قره‌سو در طبقه C دارای مجرای پهن‌تر و کم‌عمق‌تری می‌باشد و همچنین پهنه سیلابی رودخانه در این طبقه توسعه یافته و دره‌های آن عریض است. این رودخانه در طبقه E نیز دارای مجرای عمیق و باریک (نسبت عرض به عمق کم) بوده ولی پهنه سیلابی آن عریض و توسعه یافته است. با در نظر گرفتن متغیر شیب و مواد بستر می‌توان گفت رودخانه قره‌سو، در بازه اول در طبقه‌ی C3b و E3b، در بازه دوم، سوم، چهارم و پنجم در طبقه‌ی C4b، E4b، C5، در بازه ششم در طبقه‌ی E5 و C5 و در نهایت در بازه هفتم در طبقه‌ی C5c و E5 قرار گرفته است. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که رودخانه قره‌سو در بخش‌هایی که مقاطع در طبقه‌ی C قرار گرفته است، دارای حساسیت به آشفستگی بسیار بالا، پتانسیل بازبایی خوب، تأمین رسوب بالا، کنترل پوشش گیاهی بسیار بالا و در بخش‌هایی که مقاطع در طبقه E واقع شده است، رودخانه دارای حساسیت به آشفستگی بسیار بالا، پتانسیل بازبایی خوب، تأمین رسوب متوسط، و کنترل پوشش گیاهی بسیار بالا می‌باشد.

واژگان کلیدی: طبقه‌بندی رودخانه، پهنه‌های سیلابی، مدل رزگن، مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS، رودخانه قره‌سو.

## مقدمه

سیستم‌های رودخانه‌ای در نتیجه فرایندهای عادی فرسایش و رسوب‌گذاری دست‌خوش تغییر می‌شوند. از این رو، در گذر زمان، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مورفولوژی و دینامیک سیستم‌های رودخانه‌ای صورت می‌گیرد (کندولف و پایگی، ۲۰۰۳: ۱۰۵). در برنامه‌ریزی هرگونه پروژه‌ای در امتداد رودخانه‌ها، آگاهی از اصول ژئومورفولوژی رودخانه‌ای و فرایندهای مجرا به محققان اجازه می‌دهد تا رابطه بین فرم و فرایند در چشم‌انداز را درک کنند. ارزیابی‌های ژئومورفیک عموماً شامل جمع‌آوری داده‌ها، بررسی‌های میدانی و ارزیابی پایداری مجرا است که مبنایی برای تحلیل و طراحی تشکیل می‌دهد (کارگروه بازسازی رودخانه ۱، ۲۰۰۱: ۲۶). مورفولوژی رودخانه‌ها در حفاظت و مقابله با سیلاب به‌واسطه پیوند و ارتباط آن با زیستگاه‌های طبیعی و انتقال سیلاب از اهمیت خاصی برخوردار است (سیر و همکاران، ۲۰۰۳: ۲). رودخانه‌ها از منظر مورفولوژیکی معمولاً دارای بازه‌های مشابه، با الگوهای قابل تکرار، می‌باشند که این امر منجر به تلاش‌های متعددی جهت طبقه‌بندی آن‌ها شده است (روپر و همکاران، ۲۰۰۸: ۴۲۷-۴۱۷). استفاده از هرگونه سیستم طبقه‌بندی رودخانه‌ای تلاشی در جهت ساده کردن روابط پیچیده بین رودخانه‌ها و آبریزهای آن‌ها می‌باشد (کارگروه بازسازی رودخانه ۲، ۲۰۰۱: ۲۶). در طی دهه‌های گذشته، طبقه‌بندی‌های ژئومورفیک بسیاری در رابطه با رودخانه‌ها ایجاد و توسعه یافته است (کندولف و پیگی، ۲۰۰۳ و شرودر، ۲۰۱۳). هدف و مقصود اولیه برای طبقه‌بندی سیستم رودخانه بر اساس مورفولوژی، فهمی از شرایط رودخانه و پتانسیل آن می‌باشد. در این راستا مهم است که سیستم کلاس‌بندی، ترکیبی از مباحث مدیریتی رودخانه، توسعه طرح‌های مهندسی رودخانه و بحث احیای رودخانه باشد (وارد، ۲۰۰۸: ۹). در این تحقیق با توجه به هدف و داده‌های موجود، بخشی از پلان فرم مجرای رودخانه قره‌سو (پایین دست سد سبلان تا تلاقی رودخانه اهر چای) به طول ۷۵ کیلومتر با استفاده از مدل سلسله‌مراتبی رزگن، در سطح اول و سطح دوم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

## مبانی نظری

یکی از اولین و پایه‌ای‌ترین طبقه‌بندی‌ها در رابطه با طبقه‌بندی مورفولوژیکی مجرای رودخانه‌ها توسط لئوپلد و ولمن<sup>۳</sup> صورت گرفت که رودخانه‌ها را بر اساس الگوی آن‌ها به سه گروه مئاندری، مستقیم و گیسویی تقسیم‌بندی می‌کنند. لین<sup>۴</sup> داده‌های حاصل از رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای و مواد درشت‌تر را مورد تحلیل قرار داده و رودخانه‌ها را بر اساس پلان فرم به الگوهای مستقیم، مئاندری و گیسویی تقسیم‌بندی نمود (گارد، ۲۰۰۶: ۸۸). شوم<sup>۵</sup> کانال‌های آبرفتی را بر اساس تأمین یا عرضه رسوب طبقه‌بندی نمود. او سه نوع رودخانه را تعریف کرد: کانال‌های با بار بستری، که به‌واسطه نسبت‌های عرض به عمق بالا، سینوزیته پایین و گیسویی شدن مشخص می‌شوند؛ کانال‌های با بار مختلط؛ و کانال‌های با بار معلق، با نسبت‌های عرض به عمق پایین، سینوزیته بالا و مئاندرشدگی. شوم طرح طبقه‌بندی خود را مجدداً با ارتباط دادن نوع پلان فرم مجرا به تأمین رسوب و توان رودخانه ارائه نمود. بعداً، رویکرد مشابهی توسط وان دن برگ<sup>۶</sup> دنبال شد (کروساتو، ۲۰۰۸: ۳۳). این روش‌ها هرچند در ارائه یک تصویری از کانال و توپوگرافی مفید می‌باشند ولی اطلاعات محدودی را در زمینه سیستم رودخانه‌ای ارائه می‌دهد. رویکردهای جدید طبقه‌بندی رودخانه بر روی تحلیل‌های حوضه‌ای مرتبط با مدیریت اراضی و بازسازی رودخانه تمرکز دارند. استفاده از یک رویکرد سلسله‌مراتبی، درک کل‌نگر تری از فرایندهای

<sup>1</sup> - The Federal Interagency Stream Restoration Working Group

<sup>3</sup> - Leopold and Wolman

<sup>4</sup> - Lane

<sup>5</sup> - Schumm

<sup>6</sup> - Van den Berg

حوضه‌ای را امکان‌پذیر می‌سازد (شرودر، ۲۰۱۳: ۷۳۹). در سال ۱۹۹۴ رزگن<sup>۱</sup> با انتشار مقاله طبقه‌بندی رودخانه‌های طبیعی<sup>۲</sup> یک طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی جدیدی را ارائه کرد. این طبقه‌بندی با توجه به این که مباحث مربوط به احیای رودخانه<sup>۳</sup> را دربرمی‌گرفت، به‌سرعت در بین هیدرولوژیست‌ها، ژئومورفولوژیست‌ها و بیولوژیست‌ها موردتوجه واقع شد. این مدل به‌صورت وسیع بر روی رودخانه‌های ایالات متحد آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. طبقه‌بندی رزگن بر اساس چهار سطح صورت می‌گیرد:

سطح اول: ویژگی‌های ژئومورفیک شامل توپوگرافی، لندفرم‌ها، مورفولوژی دره، الگو و پروفیل‌های رودخانه  
سطح دوم: توصیف مورفولوژیکی بر اساس مطالعات میدانی تعیین‌کننده منابع اطلاعاتی بازه‌ها  
سطح سوم: حالت و وضع رودخانه در شرایط پایداری، واکنش و پتانسیل پاسخ  
سطح چهارم: اعتبارسنجی اندازه‌گیری‌ها و بررسی روابط بین فرایندها (وارد، ۲۰۰۸: ۳).

در خصوص پیشینه تحقیق منابعی غنی در دسترس می‌باشد. دانشمندان شاغل در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، مورفولوژی کوتاه‌مدت کانال‌های رودخانه را مورد مطالعه قرار دادند؛ که از جمله می‌توان به لانگبین<sup>۴</sup>، لئوپلد<sup>۵</sup> و ولمن<sup>۶</sup> اشاره کرد. شوم<sup>۷</sup>، موسلی<sup>۸</sup> و ویور<sup>۹</sup> سیستم‌های رودخانه‌ای را مورد مطالعه قرار داده و آزمایشاتی را در محیط‌های آزمایشگاهی جهت مطالعه مورفولوژی رودخانه انجام دادند. آلن<sup>۱۰</sup> کارهای گسترده‌ای در خصوص ویژگی‌ها و طبقه‌بندی اشکال بستر و ساختمان‌های رسوبی با در نظر گرفتن دلتاها، مئاندرها و دشت‌های سیلابی انجام داده است (کارد، ۲۰۰۶: ۶). همچنین مطالعات مختلفی توسط محققان داخلی در زمینه طبقه‌بندی مورفولوژی رودخانه صورت گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: روستایی و همکاران (۱۳۹۲) مورفولوژی مجرای رودخانه ليقوان را با روش طبقه‌بندی رزگن مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها رودخانه ليقوان، به‌جز چند بازه، در رده رودخانه‌های سینوسی جای می‌گیرد و بر اساس طبقه‌بندی رزگن، کل بازه‌ها در یکی از انواع E، C و B قرار می‌گیرند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد این نوع طبقه‌بندی مورفولوژیکی از مجرای رودخانه، می‌تواند در توسعه طرح‌های مهندسی و بحث‌های مدیریتی و احیای رودخانه مورد استفاده قرار گیرد. یمانی و همکاران (۱۳۹۳) طی مطالعه‌ای به طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی الگوی آبراهه طالقان رود بر اساس روش رزگن پرداخته‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که در بازه مورد مطالعه رودخانه در بالادست پل‌های شهرک دارای الگوی D3 یا چند شاخه‌ای بوده و در سرتاسر شهرک تا پل گلینگ دارای الگوی B3 با شکل کلی تک مجرای بوده است. کرم و همکاران (۱۳۹۳) در طی مطالعه‌ای به طبقه‌بندی هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با استفاده از مدل رزگن پرداختند. در این پژوهش آن‌ها ۲۳ کیلومتر از رودخانه جاجرود، حدفاصل سد لتیان و سد ماملو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که بخش اعظم بازه مطالعاتی داری الگوی Da است و بخش کمی از رودخانه دارای الگوی D با وضعیت بسیار نامطلوب می‌باشد. آن‌ها اضافه می‌کنند که در قسمت‌هایی با الگوی جریان D3 تغییر در دبی رودخانه به نفع آن‌ها نمی‌باشد و بایستی تدابیر مدیریتی مناسب مانند مقاوم‌سازی کناره‌های رودخانه انجام گیرد. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۵) طی پژوهشی به طبقه‌بندی و ارزیابی پتانسیل بازسازی رودخانه زرینه‌رود با استفاده از مدل رزگن پرداختند.

<sup>1</sup> -Rosgen

<sup>2</sup> - A Classification of Natural Rivers

<sup>3</sup> -River restoration

<sup>4</sup> - W.B. Langbein

<sup>5</sup> - L.B. Leopold

<sup>6</sup> - M.G. Wolman

<sup>7</sup> - S.A. Schumm

<sup>8</sup> - M.P. Mosley

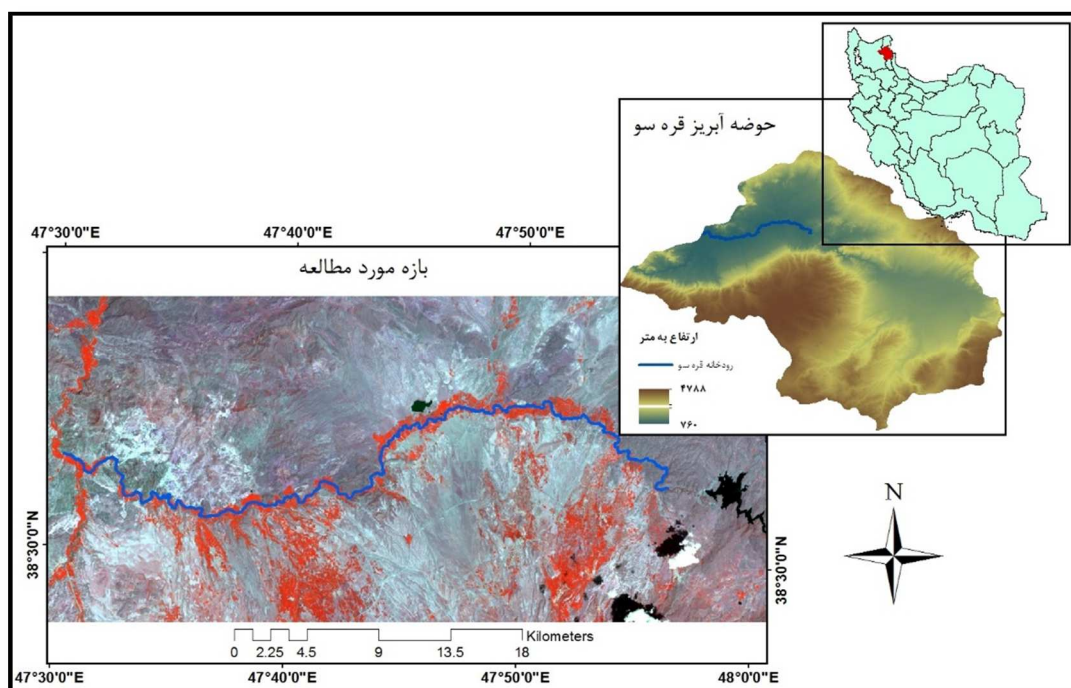
<sup>9</sup> - W.E. Weaver

<sup>10</sup> - J.R.L. Allen

نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد، رودخانه زربینه‌رود از پایین‌دست شهر محمودآباد تا پایاب سد انحرافی نوروزلو، تبدیل به نمونه‌ای مشخص از رودخانه‌های نوع C4 با بستر گراولی و مورفولوژی حوضچه-خیزآب 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 G و F، در امتداد سد نوروزلو تا شهر میاندوآب، در نتیجه دخالت‌های انسانی به صورت برداشت بی‌رویه شن و ماسه و گودافتادگی بستر رودخانه به وجود آمده‌اند.

### منطقه مورد مطالعه

رودخانه قره‌سو یکی از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل می‌باشد که از دامنه‌های شمالی کوه سبلان سرچشمه گرفته و پس از اتصال رودخانه اهر چای به عنوان رودخانه دره رود شناخته شده و در نزدیکی شهرستان اصلاندوز به رودخانه ارس ملحق می‌شود. منطقه مورد مطالعه در بین عرض‌های ۵۶' ۳۸° تا ۳۴' ۳۸° شمالی و طول‌های ۴۸' ۴۷° تا ۲۱' ۴۷° شرقی واقع شده است. از رودخانه‌های مهمی که قبل از پیوستن اهر چای به رودخانه قره‌سو می‌ریزند می‌توان به رودخانه‌های بالیخلی چای و خیاوچای اشاره کرد. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش جهت طبقه‌بندی مورفولوژیکی پلانفرم مجرا، بازه‌ای از این رودخانه است که از پایین‌دست سد سبلان شروع شده و در تلاقی رودخانه اهر چای به پایان می‌رسد. طول تقریبی رودخانه در این بازه ۷۵ کیلومتر می‌باشد. از جمله روستاهای استقرار یافته در حاشیه این رودخانه می‌توان به روستاهای پیرازمیان، لمبر، قدیرلو، کنگرلو، قاراداش، لعل گنج، آق درق، جیدرق و روستای دوست بیگلو اشاره کرد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال غرب کشور (استان اردبیل)

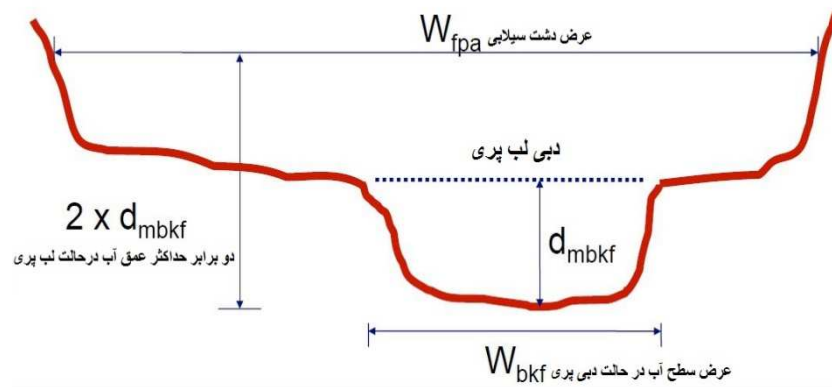
### روش تحقیق

این پژوهش متکی بر کارهای میدانی و نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۰۰۰ سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل می‌باشد. نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰؛ تصاویر ماهواره‌ای IRS و Google Earth و داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری دوست بیگلو و ارباب کندی به عنوان سایر داده‌های ضروری تحقیق محسوب می‌شوند. سیستم رزگن، شش

سنجه مورفولوژیکی را مورد استفاده قرار می‌دهد که عبارتند از: گود شدگی، نسبت عرض به عمق، سینوزیته، تعداد مجرا، شیب، و اندازه دانه مواد بستر. این معیارها برای تعریف هشت کلاس اصلی رودخانه با حدود ۹۰ نوع رودخانه خاص، مورد استفاده قرار می‌گیرند (کارگروه بازسازی رودخانه، ۲۰۰۱: ۲۹) (شکل ۳). مهم‌ترین معیارهای ممیزی در روش رزگن به شرح زیر است:

نسبت گود شدگی<sup>۱</sup>:

این نسبت در حقیقت عرض دشت سیلابی ( $W_{fpa}$ ) به عرض سطح آب در حالت دبی لبریز ( $W_{bkf}$ ) می‌باشد. برای تعیین عرض دشت سیلابی، از عرض رودخانه در ارتفاعی معادل دو برابر حداکثر عمق آب در دبی لبریز استفاده می‌شود. هر چه این نسبت افزایش یابد بیانگر پیشرفت رودخانه در دشت سیلابی می‌باشد. در رودخانه‌های سیلاب‌دستی مقدار شاخص گود شدگی معادل عرض سطح آب در سیل ۵۰ ساله به عرض سطح آب در سیل متوسط (عرض مقطع اصلی) است (یاسی، ۱۳۹۴: ۵۵).



شکل ۲. روش محاسبه عرض دشت سیلابی

نسبت عرض به عمق:

نسبت عرض به عمق، ابعاد و فاکتور شکل ۲ را به صورت نسبت عرض کانال لبریز به عمق میانگین لبریز توصیف می‌کند. دبی لبریز به عنوان حداکثر جریان پیک لحظه‌ای ۳ تعریف می‌شود؛ که چند روز در سال اتفاق می‌افتد و اغلب مربوط به دبی با دوره تناوب ۴ (بازگشت) ۱/۵ ساله می‌باشد (رزگن، ۱۹۹۴: ۱۹۹-۱۶۹).

سینوزیته:

سینوزیته نسبت طول آبراهه به طول دره است. همچنین می‌تواند به عنوان نسبت شیب دره به شیب مجرا تعریف شود (رزگن، ۱۹۹۴: ۱۹۹-۱۶۹). رزگن با استفاده از پروفیل‌های طولی، شکل دره، مقاطع عرضی رودخانه و الگوی پلان، رودخانه‌ها را در قالب دسته‌های A تا G دسته‌بندی نموده است. سپس انواع رودخانه‌ها را بر اساس شیب و ابعاد ذرات بستر به محدوده‌های معین و مشخصی طبقه‌بندی می‌کند. الگوی رودخانه‌ها از نظر شکل پلان کلاس‌هایی مانند رودخانه‌های نسبتاً مستقیم (رودخانه‌های با تیپ A)، رودخانه‌هایی با ضریب پیچشی کم (رودخانه‌های تیپ B)، رودخانه‌های پیچان‌رودی (رودخانه‌های با تیپ C) و رودخانه‌هایی با ضریب پیچشی زیاد (رودخانه‌هایی با تیپ E) طبقه‌بندی می‌شود. همچنین رودخانه‌هایی با الگوی پیچیده و شریانی در دو کلاس D و DA تقسیم‌بندی می‌شوند (یاسی، ۱۳۹۴: ۵۵).

1 - Entrenchment

2 - Shape factor

3 - Momentary maximum peak flow

4 - Recurrence interval

شیب سطح آب:

شیب سطح آب از طریق اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع سطح آب در واحد طول آبراهه تعیین می‌شود (رزگن، ۱۹۹۴: ۱۹۹-۱۶۹).

اندازه مواد بستر:

اندازه مواد بستر و کناره رودخانه بیانگر درجه پایداری رود است. رزگن مواد بستر رودخانه را به شش دسته تقسیم کرده است: ۱- بستر سنگی ۵ (بالای ۲۰۴۸ میلی‌متر)، ۲- بستر قطعه‌سنگی ۶ (۲۰۴۸-۲۵۶ میلی‌متر)، ۳- بستر قلوه‌سنگی ۷ (۲۵۶-۶۴ میلی‌متر)، ۴- بستر شنی ۸ (۶۴-۲ میلی‌متر)، ۵- بستر ماسه‌ای ۹ (۲-۰/۰۶۲ میلی‌متر)، ۶- بستر رسی ۱۰ (زیر ۰/۰۶۲ میلی‌متر) (یمانی، ۱۳۹۳: ۱۹۳).

در سیستم رزگن، تعیین پارامترهای نسبت گود شدگی و نسبت عرض به عمق لب‌پری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشند. در تحقیق حاضر، برای محاسبه این پارامترها از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS به همراه الحاقی HEC-GeoRAS استفاده شد. بر این اساس جهت شبیه‌سازی سیلاب مجرای رودخانه قره‌سو برای دوره‌های بازگشت ۱/۳ و ۵۰ ساله از نقشه‌های بزرگ‌مقیاس ۱:۲۰۰۰ شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل استفاده شد. این نقشه‌ها پس از انجام اصلاحات در نرم‌افزار ARC GIS تبدیل به نقشه TIN شده و سپس با استفاده از الحاقی HEC-Geo-RAS ۱۱ خط مرکزی جریان ۱۲، مسیر جریان ۱۳ و خط کناره‌های رودخانه ۱۴ و مقاطع عرضی ۱۵ از ساحل چپ به سمت ساحل راست بر روی مجرای رودخانه قره‌سو ترسیم گردید. این داده‌های هندسی به همراه داده‌های جریان رودخانه شامل رژیم جریان، دبی، شرایط اولیه و شرایط مرزی در محیط نرم‌افزاری HEC-RAS برای دوره‌های بازگشت مختلف با استفاده از حل روابط اصلی (رابطه ۱ و ۲) شبیه‌سازی شد. رژیم جریان به صورت زیربحرانی، فوق بحرانی و بحرانی مشخص می‌شود. اطلاعات دبی شامل حداقل یک مقدار جریان در طول هر بازه در سیستم رودخانه می‌باشد. شرایط اولیه و مرزی، برحسب ترازهای سطح آب اولیه در بالادست و پایین‌دست، هیدروگراف جریان یا منحنی سنجح تعیین می‌شود (مرواردی، ۱۶۰۴: ۲۰۰۴).

مدل HEC-RAS محاسبات پروفیل سطح آب را برای جریان پایدار متغیر تدریجی در رودخانه‌ها و کانال‌های مصنوعی در رژیم‌های جریان زیربحرانی، فوق بحرانی و مختلط می‌تواند انجام دهد. محاسبه پروفیل سطح آب با شروع از یک مقطع

5 -Bedrock

6 -Boulder

7 -Cobble

8 -Gravel

9 -Sand

10 -Clay

11 -Extension

12 - Center Line

13 - Flow Path

14 - River Banks

15 - Cross Section

16 - Merward

عرضی به طرف مقاطع دیگر به وسیله حل معادله انرژی به روش استاندارد گام به گام انجام می‌شود. معادله انرژی به صورت زیر است: (برونر ۱۷، ۲۰۱۰: ۲۷)

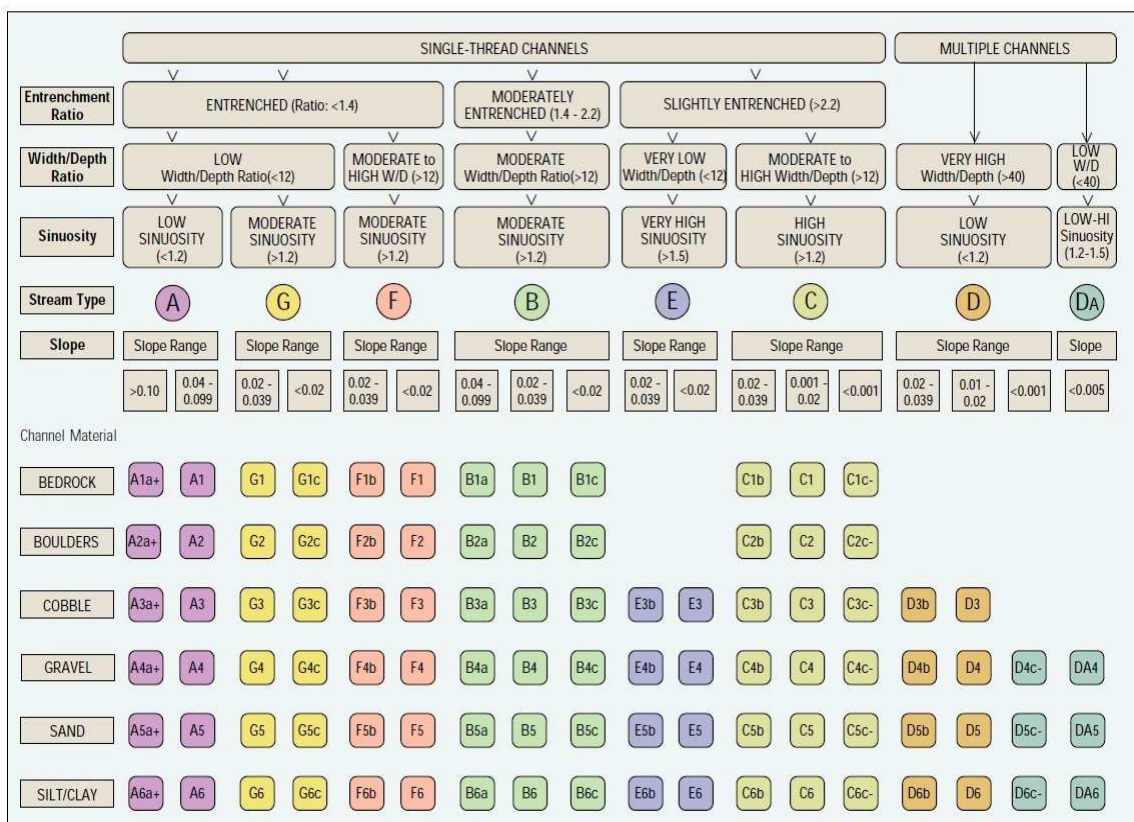
$$Z_1 + Y_1 + a \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + a \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (۱) \text{ رابطه}$$

$Z$  = ارتفاع بستر،  $Y$  = عمق آب،  $V$  = سرعت متوسط،  $\alpha$  = ضریب تصحیح بار سرعت،  $h_e$  = افت انرژی کل،  $g$  = شتاب ثقل.

معادله مونتگم موجود در مدل HEC-RAS به صورت زیر محاسبه می‌شود: (اکرمن، ۲۰۰۹: ۲۳).

$$\frac{Q_2^2 \beta_2}{gA_2} + A_2 \bar{y}_2 + \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) LS_0 - \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) LS_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{gA_1} + A_1 \bar{y}_1 \quad (۲) \text{ رابطه}$$

$\beta$  = ضریب تصحیح مونتگوم،  $\bar{y}$  = عمق اندازه‌گیری شده از سطح آب تا مرکز ثقل سطح مقطع جریان،  $A$  = مساحت منطقه‌ی مرطوب زیر مقطع عرضی،  $S$  = شیب کانال،  $L$  = فاصله بین مقاطع،  $Q$  = جریان دبی. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدرولیکی به محیط ARC GIS فرستاده شده تا از آن‌ها مدل رقومی تراز آب ایجاد گردد. در نهایت هم نقشه‌های پهنه سیلاب (برای دوره‌های بازگشت ۱/۳ و ۵۰ ساله) از مقایسه و بررسی مدل رقومی زمین و مدل رقومی تراز آب در محیط ARC GIS به دست می‌آید.

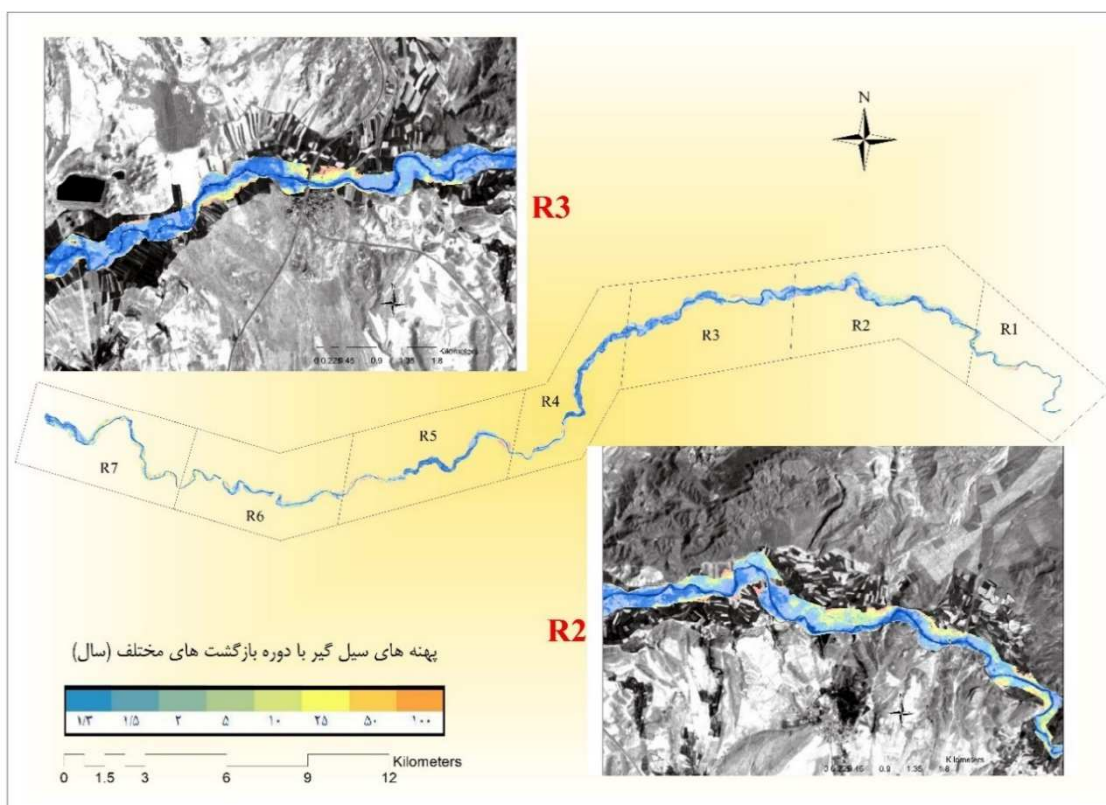


شکل ۳. طبقه‌بندی رودخانه‌های طبیعی بر اساس مدل رزگن (راهنمای مهندسی بازسازی رودخانه، ۲۰۰۷: ۷)

## بحث و یافته‌ها

### پهنه‌های سیل گیر رودخانه

مدل‌های پخش سیلاب ابزار مفیدی برای مدیریت دشت سیلابی هستند. این توانایی در پیش‌بینی سیلاب در کاهش پتانسیل خسارت سیلاب به صورت حفاظت از کاربری‌های اراضی اطراف رودخانه، بالا بردن سطح آگاهی مردمان ساکن در اطراف دشت سیلابی و جلوگیری از ساخت‌وسازها در محدوده ممنوعه دشت سیلابی بسیار مفید بوده است (دی بالداساره، ۲۰۱۰: ۱۶۷). در سیستم رزگن، تعیین پارامترهای نسبت گود شدگی و نسبت عرض به عمق لب‌پری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشند. در تحقیق حاضر، برای محاسبه این پارامترها از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS به همراه الحاقی HEC-GeoRAS استفاده شد. جهت برآورد توزیع فراوانی سیلاب از روش توزیع پیرسون تیپ ۳ به لگاریتم مبنای ۱۰ ارائه شده توسط سازمان‌های فدرال بازسازی رودخانه آمریکا استفاده شد و دبی پیک‌های سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف و احتمال وقوع آن برای ایستگاه‌های هیدرومتری مهم دوست بیگلو و ارباب کندی محاسبه گردید. (شکل ۴)



شکل ۴. پهنه‌های سیل گیر دشت سیلابی رودخانه قره‌سو با دوره بازگشت‌های مختلف

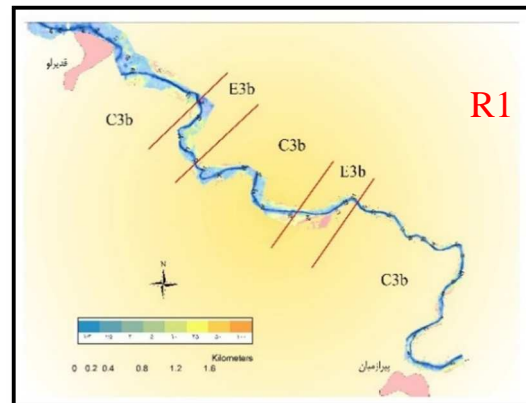
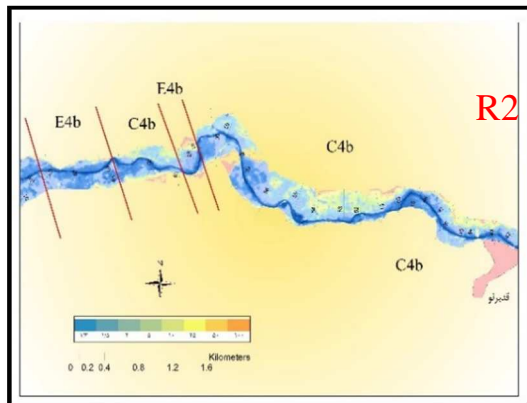
با توجه به نقشه‌ی پهنه‌های سیل گیر دست سیلابی رودخانه قره‌سو، بیشترین عرض پهنه‌های سیلابی برای دوره‌های مختلف در بازه‌های دوم، سوم و چهارم (از روستای قدیرلو تا روستای لعل گنج) قابل مشاهده است. در این بازه‌ها عرض پهنه سیلابی برای دوره بازگشت ۲۵ سال به طور متوسط نزدیک ۵۰۰ متر می‌باشد. در بازه‌های اول و بخشی از بازه ششم و هفتم به علت تنگ‌شدگی مجرا و وجود مانع (جریان رودخانه در واحد کوهستان) از عرض پهنه‌های سیل گیر در این بازه‌ها کاسته و در عوض بر عمق آب‌گرفتگی افزوده شده است. کاربری اراضی اطراف رودخانه قره‌سو بیشتر از نوع کاربری کشاورزی (زراعت و باغات) می‌باشد. هم‌پوشانی لایه‌های پهنه‌های سیلابی بر روی تصویر ماهواره‌ای IRS منطقه نشان می‌دهد که بیشتر این اراضی کشاورزی در ناحیه بستر و حریم رودخانه قرار گرفته (با توجه به دوره بازگشت ۲۵ سال) که این امر می‌تواند خسارات قابل توجهی را هنگام وقوع سیل برای کشاورزان این منطقه تحمیل کند. برای مثال رخداد سیلابی

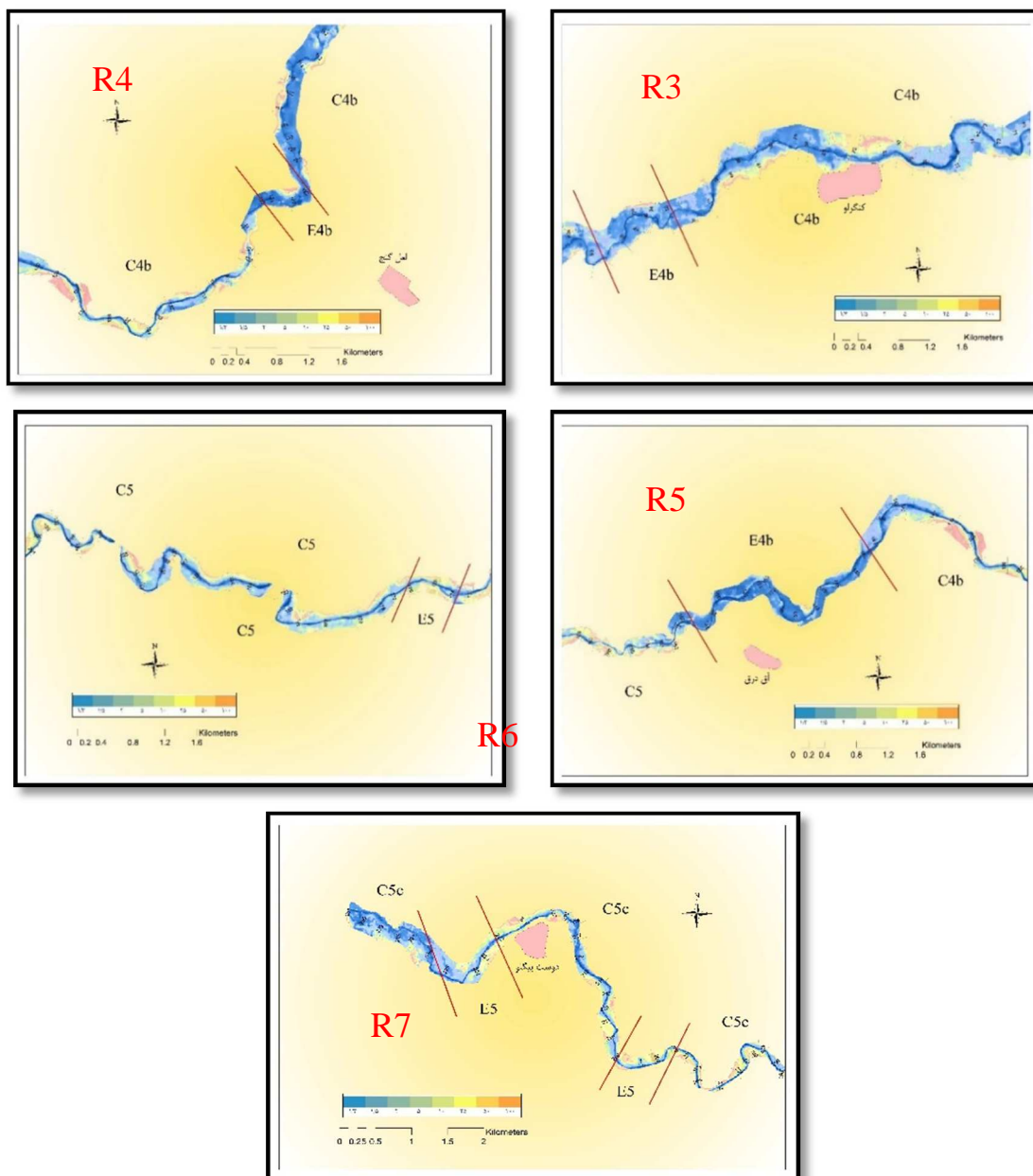


با دوره بازگشت ۲۵ ساله محدوده‌ای به مساحت ۱۰۸۵ هکتار از اراضی کشاورزی و باغات حاشیه رودخانه قره‌سو را تحت تأثیر قرار داده و موجب ایجاد خسارت می‌شود.

### تحلیل نتایج مدل رزگن

بر اساس محاسبات صورت گرفته ۷ بازه مورد بررسی در تحقیق در طبقه C و E مدل سلسله مراتبی رزگن قرار گرفته است. رودخانه قره‌سو در طبقه C دارای مجرای پهن تر و کم عمق تری می‌باشد و همچنین پهنه سیلابی رودخانه در این طبقه توسعه یافته و دره‌های آن عریض است. رودخانه قره‌سو در طبقه E نیز دارای مجرای عمیق و باریک (نسبت عرض به عمق کم) بوده ولی پهنه سیلابی آن عریض و توسعه یافته است. در بازه ۱ عرض دشت سیلابی به دلیل کنترل متغیر زمین‌شناسی کم است. در این بازه به دلیل بالا بودن توان رودخانه، بیشتر رسوبات بستر رودخانه از نوع قلوه‌سنگ و گراول است که این امر باعث شده بستر رودخانه در این بازه از نوع آرمورینگ ۱۸ شود. با توجه به این که نسبت عرض به عمق در این بازه بیش از ۱۲ بوده است. بخش بسیار زیادی از این بازه در طبقه C واقع شده و تنها در ۲ بخش کوچکی از این بازه، این نسبت به کمتر از ۱۲ رسیده و سبب شده رودخانه در این بخش‌ها در طبقه E قرار گیرد. با توجه به مفهوم پیوستگی مدل رزگن شیب رودخانه در یک بازه بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۳۹ درصد قرار گرفته است. با در نظر گرفتن متغیرهای شیب و مواد بستر این بازه، در طبقه C3b و E3b واقع شده است. میانگین متغیر گود شدگی برای این بازه ۱۹/۴۱ محاسبه شده است. رودخانه‌های نوع C دارای انرژی متوسط و بار رسوبی بالا می‌باشد. اتلاف انرژی از طریق مائندرها، اشکال بستر (حوضچه-خیزآب) و پوشش گیاهی صورت می‌گیرد. همچنین رودخانه‌های نوع C3 دارای پتانسیل بازایی خوب، عرضه رسوب متوسط، پتانسیل متوسط فرسایش کناری و کنترل بسیار بالای پوشش گیاهی است. در بازه ۲، ۳، ۴ و ۵ عرض دشت سیلابی توسعه قابل توجهی می‌یابد و نقش کنترل زمین‌شناسی کم‌رنگ‌تر می‌شود. در این بازه‌ها جنس بستر رودخانه تغییر کرده و بیشتر از نوع گراول و ماسه می‌باشد. شیب رودخانه در این بازه‌ها بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۳۹ قرار گرفته است.





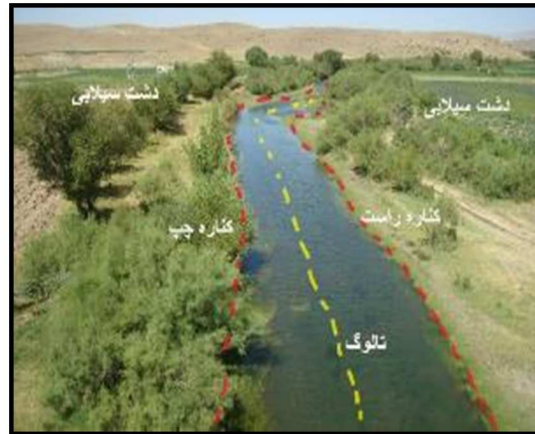
شکل ۵. طبقه‌بندی مقاطع عرضی و بازه‌های رودخانه قره‌سو بر اساس مدل رزگن

در این بازه‌ها (۲، ۳، ۴، ۵) رودخانه در بیشتر قسمت‌ها در طبقه‌ی C4b مدل رزگن واقع شده و تنها در تعدادی از مقاطع رودخانه در طبقه E4b قرار گرفته است. میانگین نسبت عرض به عمق برای مجموع این بازه‌ها ۱۶/۱۴ محاسبه شده است. در این بازه‌ها پوشش گیاهی رودکنار عمدتاً به صورت درختچه‌های مترکم می‌باشد که این تراکم بالای پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری کناره‌های رودخانه در این بازه‌ها ایفا کرده است. در این بازه‌ها (۲، ۳، ۴، ۵) رودخانه قره‌سو تبدیل به نمونه مشخصی از رودخانه‌های گراولی با مورفولوژی بستر حوضچه - خیزاب می‌شود. هرچند که توالی حوضچه - خیزاب تقریباً در تمامی کانال‌های دائمی دارای مواد بستر بزرگ‌تر از ماسه درشت ظاهر می‌گردد. اما به‌عنوان ویژگی بارز رودخانه‌هایی با بستر گراولی محسوب می‌شود (بافینگتون، ۱۹۹۷: ۶۱۱). نوع غالب

مورفولوژی پلانفرم یک توالی حوضچه - خیزآب الگوی مئاندري می‌باشد که طول مجرا را افزایش داده و شیب آن را کاهش می‌دهد. این ویژگی‌ها به‌وضوح در این بازه‌ها از رودخانه‌ی قره‌سو قابل‌مشاهده است.



شکل ۷. دشت سیلابی و مجرای رودخانه قره‌سو در بخشی از (بازه پنجم)



شکل ۸. کشت محصولات کشاورزی در محدوده بستر و دشت سیلابی رودخانه (بازه دوم)



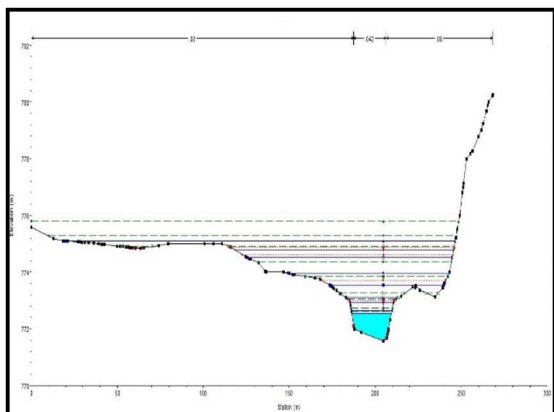
شکل ۹. بستر قلوه‌سنگی و گراولی رودخانه قره‌سو در (بازه اول) با مورفولوژی حوضچه - خیزاب



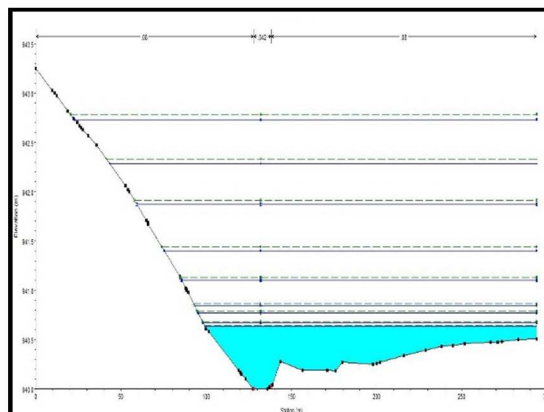
شکل ۱۰. پشته‌های میانی تثبیت‌شده در داخل مجرای رودخانه قره‌سو (بازه دوم)

در قسمت انتهایی بازه ۵ و بیشتر قسمت‌های بازه ۶ شیب رودخانه بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۲ قرار گرفته و جنس بستر رودخانه غالباً از نوع ماسه‌ای می‌شود که این باعث می‌شود رودخانه در این بخش در طبقه‌ی C5 مدل سلسه‌مراتبی رزگن قرار گیرد. میانگین نسبت عرض به عمق در این بازه ۱۵/۴۶ می‌باشد. در بازه ۷ شیب رودخانه به کمتر از ۰/۰۰۱ رسیده اما جنس بستر رودخانه همچنان از نوع ماسه می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده بخش‌های عمده این بازه در طبقه C5c واقع شده و تنها در بخش‌های کوچکی از رودخانه که نسبت عرض به عمق ۲۰ کمتر از ۱۲ شده است، مقاطع عرضی در طبقه‌ی E5 قرار گرفته است. در این بازه میانگین نسبت عرض به عمق نیز ۱۵/۳۳ محاسبه شده است.

۲۰- این نسبت از تقسیم عرض لب پری به میانگین عمق لب پری حاصل می‌شود. برای محاسبه میانگین عمق لب پری، در محیط نرم‌افزار Arc GIS داده‌های لایه عمق با استفاده از توابع شرطی به لایه عرض رودخانه منتقل شد. به دین ترتیب برای هر مقطع میانگین محاسبه گردید.



شکل ۱۱. مقطع عرضی نوع E و سطوح سیلابی برای دوره بازگشت ۱/۳ ساله (بازه پنجم)



شکل ۱۰. مقطع عرضی نوع C و سطوح سیلابی برای دوره بازگشت ۱/۳ ساله (بازه دوم)

شکل ۱۰ و ۱۱، نشان‌دهنده دبی غالب ۲۱ رودخانه قره‌سو در طبقه‌ی نوع C و E رزگن است که به علت فراوانی تکرار این دبی، کنترل فرم و ابعاد عمومی مجرای رودخانه قره‌سو بر عهده این دبی می‌باشد. به عقیده لئوپلد و ولمن این دبی (دبی غالب) بر دوره بازگشت ۱/۴ ساله منطبق می‌باشد (یاسی، ۱۳۹۴: ۸۴). بررسی مقاطع عرضی رودخانه قره‌سو نشان می‌دهد که با افزایش دوره بازگشت میزان دبی نیز افزایش یافته و بر سطح سیلاب در هر یک از مقاطع افزوده می‌شود. همچنین با افزایش سطح مقطع پروفیل عرضی، ارتفاع پهنه‌ی سیل نیز کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که رودخانه قره‌سو در بخش‌هایی که مقاطع در طبقه‌ی C قرار گرفته است دارای حساسیت به آشفته‌گی بسیار بالا، پتانسیل بازیابی خوب، تأمین رسوب بالا، کنترل پوشش گیاهی بسیار بالا و در بخش‌هایی که مقاطع در طبقه‌ی E واقع شده است، رودخانه دارای حساسیت به آشفته‌گی بسیار بالا، پتانسیل بازیابی خوب، تأمین رسوب متوسط، و کنترل پوشش گیاهی بسیار بالا است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش مجرای رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل ژئومورفولوژیکی رزگن در سطح اول و سطح دوم مورد طبقه‌بندی قرار گرفت. مدل رزگن با وجود استفاده گسترده، از جانب برخی از محققان مورد انتقاد بوده است. در واقع طبقه‌بندی رزگن با مشکلاتی چون: تعیین ابعاد لب پری مخصوصاً در رابطه با کانال‌های کف کنده ۲۲ و ادغام کردن رسوبات بستر و کناره در یک گروه خاص مواجه است (سایمون، ۲۰۰۷: ۲). شاید جدی‌ترین انتقاد در طی سال‌های اخیر مربوط به روپر ۲۳ و همکاران (۲۰۰۸) با تأکید بر اختلافات و عدم توافق محققان مختلف در تعیین انواع رودخانه رزگن باشد. آن‌ها، عدم توافق اساسی محققان در تعیین انواع رودخانه رزگن را به اختلافات در تعیین مقادیر نسبت گود شدگی نسبت می‌دهند (خیری زاده، ۱۳۹۵: ۶۶). در این تحقیق با ترکیب این مدل (رزگن) با مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS از برخی مسائل مطرح شده توسط این محققان اجتناب شد. نتایج پهنه‌بندی سیلاب رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل HEC-RAS نشان داد بیشترین عرض پهنه‌های سیلابی برای دوره‌های مختلف در بازه‌های دوم، سوم و چهارم (از روستای قدیرلو تا روستای لعل گنج) قابل مشاهده است. در این بازه‌ها عرض پهنه سیلابی برای دوره بازگشت ۲۵ سال به طور متوسط نزدیک ۵۰۰ متر می‌باشد. در بازه‌های اول و بخشی از بازه ششم و هفتم به علت تنگ‌شدگی مجرا و وجود مانع (جریان رودخانه در واحد کوهستان) از عرض پهنه‌های سیل گیر در این بازه‌ها کاسته و در عوض بر عمق آب‌گرفتگی افزوده شده است. همچنین نتایج مدل

21 - Dominant Discharge

22 - Incised channel

23 - Roper

رزگن نیز نشان داد که اکثر مقاطع رودخانه قره‌سو در طبقه‌های C و E مدل سلسله مراتبی رزگن قرار گرفته‌اند. رودخانه قره‌سو در طبقه C دارای مجرای پهن‌تر و کم‌عمق‌تری می‌باشد و همچنین پهنه سیلابی رودخانه در این طبقه توسعه یافته و دره‌های آن عریض است. این رودخانه در طبقه E نیز دارای مجرای عمیق و باریک (نسبت عرض به عمق کم) بوده ولی پهنه سیلابی آن عریض و توسعه یافته است. با در نظر گرفتن متغیر شیب و مواد بستر می‌توان گفت رودخانه قره‌سو، در بازه اول در طبقه‌های C3b و E3b، در بازه دوم، سوم، چهارم و پنجم در طبقه‌های C4b، E4b، C5، در بازه ششم در طبقه‌های E5 و C5 و در نهایت در بازه هفتم در طبقه‌های C5c و E5 قرار گرفته است. همچنین در بازه‌های (۲، ۳، ۴، ۵) رودخانه قره‌سو تبدیل به نمونه مشخصی از رودخانه‌های گراولی با مورفولوژی بستر حوضچه - خیزآب می‌شود. رودخانه قره‌سو در بخش‌هایی از مقاطع نوع E دارای تأمین رسوب پایین، پتانسیل متوسط فرسایش کناره و کنترل بسیار بالای پوشش گیاهی می‌باشند. این رودخانه‌ها در حمل رسوب، بسیار کارآمد می‌باشند. انرژی رودخانه پایین بوده، اتلاف انرژی از طریق مئاندرها، اشکال بستر و پوشش گیاهی صورت می‌گیرد. همچنین این رودخانه در بخش‌هایی از مقاطع نوع C نیز دارای تأمین رسوب بالا، پتانسیل بسیار بالای فرسایش کناره و کنترل بسیار بالای پوشش گیاهی می‌باشد. در واقع، پوشش گیاهی رود کنار ۲۴ در ترکیب با قابلیت فرسایش مواد کناره، تعیین‌کننده میزان تنظیم جانبی و پایداری این رودخانه است.

#### منابع

- خیری زاده، منصور، ۱۳۹۵، تحلیل مورفودینامیک و تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرنه‌رود (از شاهین‌دژ تا دریاچه ارومیه)، رساله دکتری، استاد راهنما، رضایی مقدم، محمدحسین، رشته‌ی ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ معصومه، رجبی؛ خیری زاده، منصور؛ ۱۳۹۵، طبقه‌بندی و ارزیابی پتانسیل بازسازی رودخانه زرنه‌رود با استفاده از مدل رزگن، چهارمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی، صص ۱۱۱-۱۰۸.
- روستایی، شهرام؛ خورشید دوست، علی‌محمد؛ خالقی، سمیه، ۱۳۹۲، ارزیابی مورفولوژی مجرای رودخانه لیقوان با روش طبقه‌بندی راسگن، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۴، صص ۱۶-۱.
- لایقی، صدیقه؛ کرم، امیر؛ ۱۳۹۳، طبقه‌بندی هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با مدل رزگن، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، صص ۱۴۳-۱۳۰.
- یاسی، مهدی؛ ۱۳۹۴، جزوه درسی مهندسی رودخانه پیشرفته (قسمت اول)، کارشناسی ارشد و دکتری، گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه.
- یمانی، مجتبی؛ تورانی، مریم، ۱۳۹۳، طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی الگوی آبراهه طالقان رود در محدوده شهرک طالقان از طریق روش رزگن، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۲، صص ۱۹۸-۱۸۳.
- Ackerman, C. T. (2009). *HEC-GeoRAS GIS Tools for support of HEC-RAS using ArcGIS*. United States Army Corps of Engineers, Davis.
- Brunner, Gary .W (2010). *Hec-ras River analysis system system hydraulic reference manual, us army corps of engineers, version 4.1*.
- Crosato, Alessandra. (2008). *Analysis and modelling of river meandering*. PhD thesis, Published and distributed by IOS Press under the imprint Delft University Press.
- Di Baldassarre, G. (2012). *Floods in a Changing Climate: Inundation Modelling (Vol. 3)*. Cambridge University Press.
- Garde, R.J. (2006). *River morphology*. New Age International (P) Ltd., Publishers. 479p.
- Garde, R.J. (2006). *River morphology*. New Age International (P) Ltd., Publishers. 479p.

- Kondolf, G. Mathias and Piegay, Herve. (2003). *Tools in fluvial geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd. 688 P.
- Kondolf, G. Mathias and Piegay, Herve. 2003. *Tools in fluvial geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd. 688 P.
- 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.
- *National Engineering Handbook* (2007), *Rosgen Geomorphic Channel Design*, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Chapter 11, No.7.
- Roper, Brett B., Buffington, John M., Archer, Eric, Moyer, Chris, Ward, Mike. (2008). *the role of observer variation in determining rosgen system types in northeastern Oregon mountain streams*. *Journal of the American water resources association*, vol. 44, No. 2. pp: 417- 427.
- Rosgen, David L. (1994). *A classification of natural rivers*. *Catena* 22, pp. 169-199.
- Sear et al. 2003. *Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology*, R&D Technical Report FD1914. Defra. London.
- Shroder, John F. (2013). *Treatise on geomorphology, volume 9: treatise on fluvial geomorphology*. Elsevier Inc. 860p.
- Simon, A., Doyle, M., Kondolf, M., Shields, F. D., Rhoads, B., & McPhillips, M. (2007). *Critical Evaluation of How the Rosgen Classification and Associated "Natural Channel Design" Methods Fail to Integrate and Quantify Fluvial Processes and Channel Response*.
- *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.
- *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.
- Ward, Andy, L. Dabrosio, Meckleburg, Den (2008) *Stream Classification, Agriculture and natural resources*, AEX -445-01, pp 1-8.