

مدل سازی تغییرات بستری پیوندگاه رودخانه های گاماسیاب و قره سو در سیلاب ۱۳۹۸

ایرج جباری* - دانشیار جغرافیا، ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
رسول قبادیان - دانشیار مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
فاطمه خان‌محمدی - دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

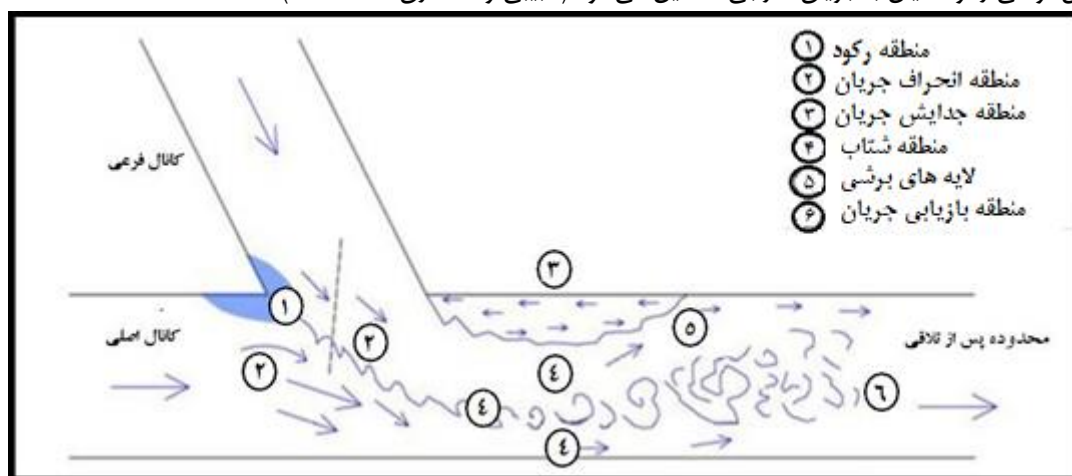
چکیده

تغییرات مورفولوژی بستر رودخانه در پیوندگاه تابعی از پارامترهای مختلف می باشد که سنجش آن در زمان وقوع سیلابها به دلیل تغییرات ناگهانی در جریان آب و رسوب راحت تر اتفاق می افتد. از این رو سیلابی که در سال ۱۳۹۸ رخ داد، این امکان را فراهم کرد که در پیوندگاه ۱۱۰ درجه ای مانند به مانند گاماسیاب و قره سو تغییرات ناگهانی در مورفولوژی بستر در رابطه با نوسانات جریان و رسوب به صورت عددی شبیه سازی شود. مدل SRH-2D که برای این منظور استفاده شد با دریافت داده های جریان آب شروع شد و با برداشت میدانی رسوب و نقشه برداری مجرا ادامه یافت و سپس با بررسی رسوبات در آزمایشگاه و ورود همه این داده ها به نرم افزار، اجرای مدل های مختلف و انتخاب دقیق ترین مدل خاتمه یافت. نتایج مدل SRH-2D که با کنترل های زمینی اعتبار سنجی شد نشان داد که فرسایش بر مرکز و متمایل به بخش بیرونی مانند رودخانه اصلی متمرکز شده و در بخش محدب هر دو مانند رخ می دهد. این رسوبات در قره سو که شیب ساحل کمی دارد بیشتر در جهت عمودی گسترش یافته ولی در گاماسیاب که شیب دره در بخش تحدب آن بیشتر است بیشتر در سطح توزیع شده است. تغییرات فرسایشی در داخل بستر در تمام مراحل سیل فعال است و بعد از اوج سیلاب نیز گسترش می یابد ولی رسوبگذاری تا زمان اوج سیل تقریباً پایان یافته و بعد از آن، رسوبات یا در حاشیه رود به جا گذاشته شده یا به مناطق پایین دست حمل شده است.

واژگان کلیدی: پیوندگاه رودخانه ها، مدل SRH-2D، قره سو- گاماسیاب. شبیه سازی جریان و رسوب، مانند.

مقدمه

پیوندگاه به محدوده ای گفته می‌شود که جریان آب دو رودخانه در آنجا به هم می‌پیوندد. پیوندگاه رودخانه‌ها از اجزای مهم مورفولوژیکی در سامانه‌های رودخانه‌ای می‌باشد. این مکان به عنوان ناحیه‌ای با الگوهای پیچیده از جریان شناخته شده است. به دلیل تغییر در مقدار و جهت سرعت، مقدار دبی جریان و دبی رسوب، پدیده‌های چون فرسایش عمیق در بستر، فرسایش سواحل و رسوب گذاری در پایین دست پیوندگاه اتفاق می‌افتد (بلوچی؛ شفاعی؛ ۱۳۹۰: ۲). بست (۱۹۸۷) مدل مفهومی را پیشنهاد داد که در آن ۶ منطقه متمایز در محل پیوندگاه رودخانه مشخص می‌شود (شکل ۱) - ناحیه رکود (ایستایی)، ۳- ناحیه جدایش، ۴- ناحیه حداکثر سرعت، ۵- ناحیه بازیابی جریان و ۶- ناحیه با لایه‌های برشی (لایت ریبر^۱ و همکاران، ۲۰۱۲، ۱). جریان ناحیه رکود توسط شکست دو جریان در محل پیوند به وجود می‌آید که در ابتدا با افزایش فشار و عمق جریان و سپس با کاهش سرعت جریان و تنش برشی همراه است. تغییر جهت جریان‌های فرعی باعث شکل‌گیری ناحیه جدایش می‌شود که ناشی از جدا شدن جریان از دیواره داخلی در محل پیوندگاه مجرا می‌باشد و دوباره در پایین دست به هم می‌پیوندند. در این ناحیه به علت کاهش فشار و ایجاد جریان چرخشی ذرات ریز ته نشین می‌شوند. ابعاد ناحیه جدایش جریان با افزایش زاویه اتصال آبراهه فرعی و نسبت دبی جریان شاخه فرعی به دبی مجرا اصلی افزایش می‌یابد. ناحیه حداکثر سرعت بعد از محل اتصال جریان‌ها و در محل تنگ شدگی ناشی از ناحیه جدایش شکل می‌گیرد که معمولاً با افزایش تنش برشی و در نتیجه آب‌شستگی همراه می‌باشد. ناحیه لایه‌های برشی نیز در امتداد تماس نواحی رکود سیال با جریان خارجی تشکیل می‌شود (حبیبی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۹).



شکل ۱: مدل مفهومی پیوندگاه رودخانه (بست، ۱۹۸۷)

تغییرات زیاد مورفولوژی پیوندگاه و تنظیمات مورفولوژیک پویای آن مدیریت کاربری اراضی و زیرساختها را با مشکل روبرو می‌سازد. به دلیل ناهمگونی‌های مورفولوژیکی و ژئوشیمیایی در پیوندگاه رودخانه‌ها زیست‌شناسان به این نتیجه رسیده‌اند که این نقاط دارای تنوع زیستی بالایی نیز می‌باشند. از طرفی حتی در پیوندگاه‌هایی که دارای پایداری نسبی هستند برنامه‌ریزی فرایندهای هیدرولیکی و مورفولوژیکی بسیار پیچیده بوده که برای برنامه‌ریزی‌های سازه‌ای، کاربری اراضی و هر گونه فعالیت عمرانی در منطقه مشکل‌ساز خواهد بود (دیکسون^۲ و همکاران، ۲۰۱۸، ۲). علاوه بر این، مجاورت همیشگی رودخانه‌ها با محل اسکان بشر در طول تاریخ و تأثیر گسترده آن بر زندگی انسان نیز باعث شده است تا محققین و پژوهشگران بسیاری تمرکز خود را بر روی درک بهتر و افزایش دانش پیرامون تحولات رودخانه‌ها معطوف کنند.

¹- Leite Ribeiro

²- Dixon

اغلب بررسی های اولیه در این باره براساس مطالعات آزمایشگاهی صورت می گرفت؛ برای مثال، موسلی^۱ (۱۹۷۶) با انجام آزمایش در اتصال Y شکل و با دیواره های فرسایش پذیر نشان داد که فرسایش با ایجاد تل ماسه هایی عمود بر جهت جریان در مجاری فرعی شروع می شود که در ادامه در مجرای پائین دست موازی جهت جریان چرخیده و چاله فرسایشی را در محل اتصال به وجود می آورد و همچنین با افزایش زاویه برخورد از ۱۵ تا ۹۰ درجه عمق چاله فرسایشی به شدت افزایش و سپس تا ۱۸۰ درجه به آرامی ادامه پیدا می کند. همچنین بست (۱۹۸۷) یک مدل تصویری از تغییرات مورفولوژی در محل پیوند ارائه نمود که بر اساس مطالعه آزمایشگاهی در شرایط بسترهای متحرک و در پیوند های نامتقارن (پیوند با زاویه متفاوت با ۹۰ درجه) با مجاری به عرض ۰/۱۵ متر و شیب طولی یکسان به دست آمده بود. در این مطالعه، نسبت های مختلف دبی از حدود ۰/۵ تا ۱/۵ و زوایای پیوند بین ۱۵ تا ۱۰۵ درجه منظور و دانه بندی مناسب نیز در بستر مجرا انتخاب شده بود. از دیگر نتایج به دست آمده توسط این محقق می توان به تعیین بیشترین عمق آبستنگی بستر به عنوان تابعی از نسبت های دبی و زاویه اتصال اشاره کرد.

به تدریج به موازات نتایج تحقیقات آزمایشگاهی مدلهایی تولید شد که شروع آن با تحقیقات تیلور (۱۹۴۴) در شرایط آزمایشگاهی و تئوری در پیوندگاه با زاویه های ۱۳۵ و ۴۵ صورت گرفت. این محقق مدلی یک بعدی برای محاسبه نسبت بین عمق های جریان بالادست و پایین دست پیوندگاه با نادیده گرفتن اثرات اصطکاک و با فرض برابری عمق جریان در آبراهه های بالادست ارائه داد. با در نظر گرفتن همین فرضیات وبر و گرتید (۱۹۶۶) آزمایش هایی بر روی پیوندگاه مجاری روباز با زاویه های اتصال ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه انجام دادند. پس از آن نیز مطالعات آزمایشگاهی با کارهای مودی^۲ و همکاران (۱۹۸۱)، بست و راید^۳ (۱۹۸۴)، رامامورتی^۴ و همکاران (۱۹۸۸)، هاگر^۵ (۱۹۸۹)، گورام^۶ و همکاران (۱۹۹۷)، سو^۷ و همکاران (۱۹۹۸)، وبر و همکاران (۲۰۰۱) شایبک^۸ و همکاران (۲۰۰۲) ادامه پیدا کرد و مدل های تک بعدی متعددی برای تخمین عمق جریان بالادست پیوندگاه در صورت تغییر زوایای برخورد، پهنای عرض مجرا، شیب و نیز رژیم های جریان توسعه یافت.

مدل های تک بعدی هرچند از نظر زمان اجرای برنامه مقرون به صرفه اند ولی به دلیل ماهیت سه بعدی جریان دارای خطای زیادی اند و به همین دلیل شبیه سازی سه بعدی جریان در پیوندگاه مجاری روباز یا رودخانه ها در مقیاس صحرایی و آزمایشگاهی با دقت بالایی قابل انجام است (مانند قبادیان و همکاران، ۲۰۱۶). ولی استفاده از آن برای بررسی تغییرات مورفولوژی پیوندگاه رودخانه ها در اثر وقوع یک سیلاب خاص و با زمان تداوم نسبتاً طولانی هزینه محاسبات بسیار بالایی را می طلبد. این کمبودها باعث شده است که مدل های دو بعدی با توجه به نزدیکی بیشتر به ماهیت سه بعدی جریان و داشتن دقت بالا نسبت به مدل های تک بعدی، بیشتر توسعه یابند و نه تنها برای پیش بینی جهت های مختلف جریان و شدت عمل آنها در رابطه با شرایط مرزی به کار روند، بلکه برای نشان دادن جزئیات بیشتر جریان و رسوب در سامانه های رودخانه ای نیز استفاده شوند. مدل SRH-2D که توسط موسسه USBR توسعه داده شده، یکی از این مدل هاست. از جمله کاربردهای این مدل می توان به شبیه سازی جریان و رسوب در محل پیوندگاه شاخه فرعی به اصلی، روندیابی سیلاب و نقشه پهنه بندی سیل، شبیه سازی جریان در اطراف سازه های درون آبراهه ای مثل سرریزها، سدهای انحرافی، دریچه ها، فرازبندها و غیره اشاره کرد. یانگ و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از این مدل بر روی یک مجرای مستطیلی به این نتیجه

¹ - Mosely

² - Modi

³ -- Bestand Reid

⁴ - Ramamurthy

⁵ - Hager

⁶ - Gurram

⁷ - Hsu

⁸ - Shabayek

رسیدند که مدل دوبعدی SRH-2D دارای دقت مناسبی می‌باشد و ماگز^۱ و همکاران (۲۰۱۰) نیز با استفاده از مدل دوبعدی SRH-2D هیدرولیک جریان رسوب در رودخانه‌های مئاندری را شبیه‌سازی نمودند و در نهایت بهترین معادله را برای پیش بینی نیم‌رخ سطح آب و تغییرات بستر در شرایط رسوبی تعیین کردند. توسعه استفاده از این مدل‌ها باعث شد که مرادی و قبادیان (۱۳۹۳) از مدل دو بعدی SRH-2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت، نیم‌رخ طولی سطح آب در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت و نحوه توزیع تنش برشی پردازند. نتایج صحت سنجی مدل‌ها نشان داد که مدل عددی به خوبی میدان جریان در قوس یکنواخت را شبیه‌سازی می‌نماید. ولی علاوه بر صحت سنجی مدل جباری و همکاران (۱۴۰۲) این مدل را برای مطالعه تغییرات ژئومورفولوژیک بستر در پیوندگاه گاماسیاب به دینور در یک پیوند ۴۰ درجه ای پرداختند و نتایج نشان داد که در سیلاب ۱۳۹۸ بیشتر تغییرات بعد از گذشت ۸۰ ساعت از شروع سیلاب رخ می‌دهد و عمدتاً در پایین دست پیوندگاه رخ می‌دهد. با وجود این به نظر می‌رسد این سیلاب در پیوندگاه‌های دیگر با بستر محصور و درجه و نوع پیوند متفاوت رود اثرات ژئومورفولوژیک متفاوتی داشته باشد. از این رو، در این تحقیق سعی می‌شود نتیجه این سیلاب در تغییرات مورفولوژیک پیوندگاه پایین دست دینه‌ور به گاماسیاب، یعنی در پیوندگاه قره‌سو به گاماسیاب که در آن یک پیوند مئاندر به مئاندر و آن هم از بیرون قوس مئاندر رخ می‌دهد، بررسی شود تا علاوه بر نشان دادن نقش مورفولوژی و نوع پیوندها در تولید زمین‌ریختهای ویژه، شیوه تغییرات مورفولوژی رودخانه در طول زمان با تغییرات جریانی که در یک سیلاب رخ می‌دهد به دست آید.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق محل پیوند رودخانه قره‌سو به گاماسیاب می‌باشد که در دشت کرمانشاه واقع شده است. دشت کرمانشاه دشتی وسیع در استان کرمانشاه است که در شمال با ارتفاعات آهکی پرگسل با توپوگرافی پرتگاهی و پرشیب و در جنوب با ارتفاعات آهکی و سیلیسی رادیو لاریتی با لایه بندی نامنظم و کم شیب محصور می‌شود. در جنوب شرق این دشت تپه ماهورهای فراوان از جنس رسوبات رادیولاریتی، فیلیسی و آذرآواری قرار دارند (جباری و رحیمی جاوید، ۱۳۹۷).

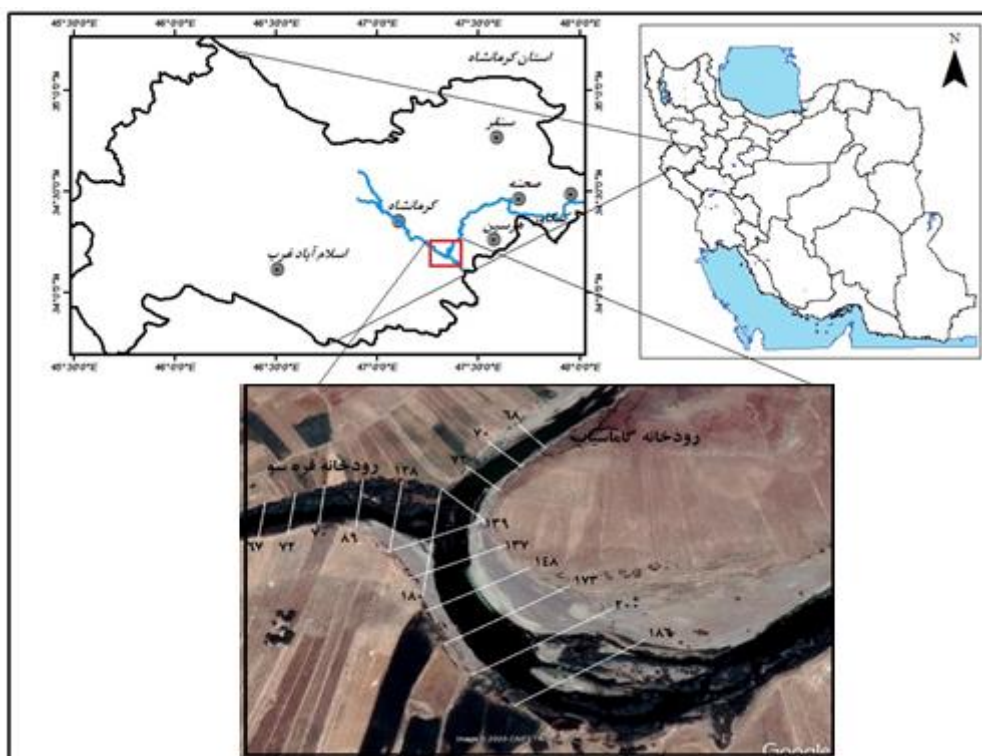
رودخانه قره سو بعد از عبور از شهر کرمانشاه با طی مسافت حدود ۳۰ کیلومتر در مسیر کاملاً مئاندری به رودخانه گاماسیاب می‌پیوندد. هر دو رودخانه در محل پیوندگاه حالت مئاندری دارند. به طور کلی رودخانه گاماسیاب یک رودخانه با مجرای مئاندری است که اغلب بستر آن را گراول پوشانده است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). این رودخانه از سمت نهند با جهت غربی-شرقی وارد شهرستان کنگاور، هرسین و بیستون شده و بعد از عبور از منطقه فرامان و پیوند با رودخانه قره سو در مسیری شمالی جنوبی به مسیر خود ادامه می‌دهد (شکل ۲). متوسط بارندگی سالانه منطقه در یک دوره ۶۰ ساله بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه ۴۳۸ میلی‌متر می‌باشد و متوسط دمای سالانه منطقه در همین دوره برابر با ۱۴/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. ماه‌های تیر و مردادماه گرم‌ترین و دی و بهمن سردترین ماه‌های سال در منطقه می‌باشند.

به دلیل اختلاف ارتفاع کم امتداد دشت، رودخانه‌های فوق یک الگوی مئاندری تشکیل داده اند. حرکت مئاندری این رودخانه‌ها منجر به ایجاد اشکال خاصی مانند دریاچه های نعل اسبی، خاکریزهای طبیعی، پخ‌شکافتها^۲ (مجاری که خاکریزهای طبیعی را بریده‌اند) گردیده است (جباری، ۱۳۹۶، ۲۳۲). رودخانه قره سو به صورت مئاندری با زاویه تقریباً ۱۱۰ درجه از بیرون به انتهای قوس بالایی مئاندر گاماسیاب پیوند خورده و به سمت جنوب غربی با نام رودخانه سیمره ادامه مسیر می‌دهد. این محل، که محل مطالعه این پژوهش می‌باشد پیوندگاه دو مئاندری می‌باشد که شعاع قوس یکی

¹ - Moges

² - crevasse

از آنها (گاماسیاب) ۲۱۶ متر و آن دیگری (قره سو) ۳۲۰ متر می باشد. این دو رودخانه در محل رأس قوس و از قسمت بیرون باهم تداخل ایجاد کرده و رودخانه سیمره را به وجود می آورند.



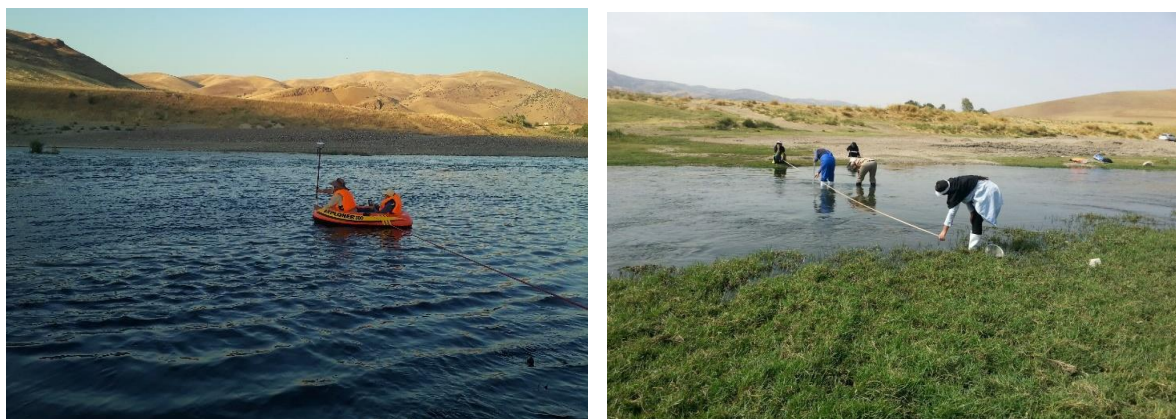
شکل ۲. موقعیت و ویژگی های محدوده مورد مطالعه. در برابر خطوط عمود بر رودخانه پهنای بستر رودخانه به متر آورده شده است.

روش تحقیق

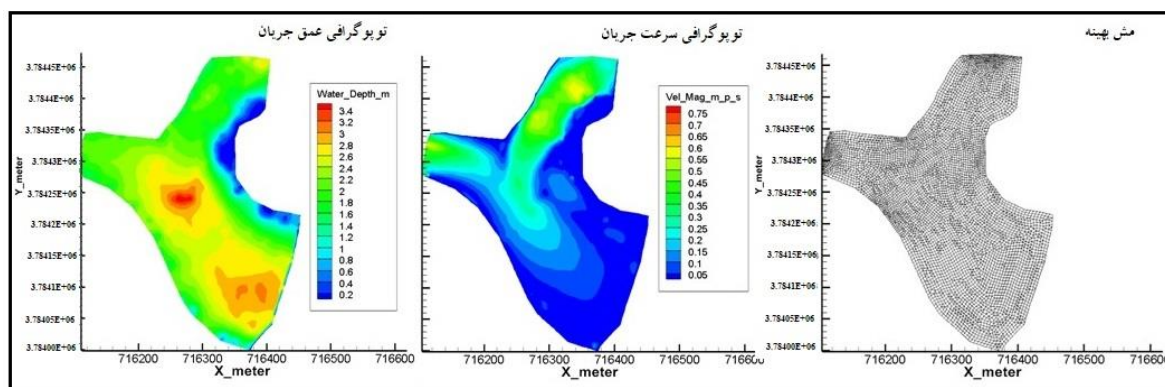
برای مدل سازی تغییرات بستر رودخانه در پیوندگاه دو رودخانه قره سو و گاماسیاب در طی سیلاب ۱۳۹۸ از مدل عددی SRH-2D استفاده شد. در این مدل ورود چند نوع اطلاعات ضروری است: زمان شروع شبیه سازی، گام های زمانی و زمان کل شبیه سازی، نوع مدل آشفتگی، شرایط اولیه، فراخوانی فایل مش تولید شده توسط مدل مش ساز (SMS)، ضریب مانینگ و شرایط مرزی.

به منظور جمع آوری اطلاعات مورد نیاز اولین قدم نقشه برداری ارتفاع و عوارض بستر بود که با استفاده از GPS دو فرکانسی در طی سه مرحله در شهریور سال ۱۳۹۷، تیرماه ۱۳۹۸ و شهریور ۱۳۹۹ انجام گرفت (شکل ۳). در این مدل سازی نخست شبکه بندی برای ایجاد یک نقشه توزیع ناهمواری و تعریف مسیر ورودی و خروجی مناسب نیاز است که بر استفاده از نرم افزار SMS نسخه ۹/۲ صورت گرفت. به منظور انتخاب مش بهینه برای محدوده مورد مطالعه و اطمینان از عدم وابستگی جواب به اندازه مش شش نوع مش بندی با سایزهای بسیار بزرگ تا بسیار ریز توسط نرم افزار SMS ایجاد شد. نهایتاً بزرگترین اندازه مش که بعد از آن دیگر تغییرات قابل ملاحظه ای (کمتر از پنج درصد) در مقادیر سرعت و عمق جریان رخ نداد به عنوان مش بهینه انتخاب شد. این مش با مشخصات ۴۳۳۹۹ عنصر، ۳۷۲۲ گره، و با فاصله ارتفاعی ۱۲۴۷ تا ۱۲۶۳ متر به عنوان مش بهینه انتخاب شد. به منظور انعطاف پذیری بهتر و دقت بیشتر در تقریب مرزها از ترکیب المان های سه وجهی و چهار وجهی در مش بندی محدوده استفاده شد (شکل ۴). در این مش مرز

ورودی و خروجی جریان آب و رسوب تعریف شده و در نهایت فایل ایجاد شده با پسوند 2dm ذخیره شد تا در مدل SRH-2D فراخوانی شود.

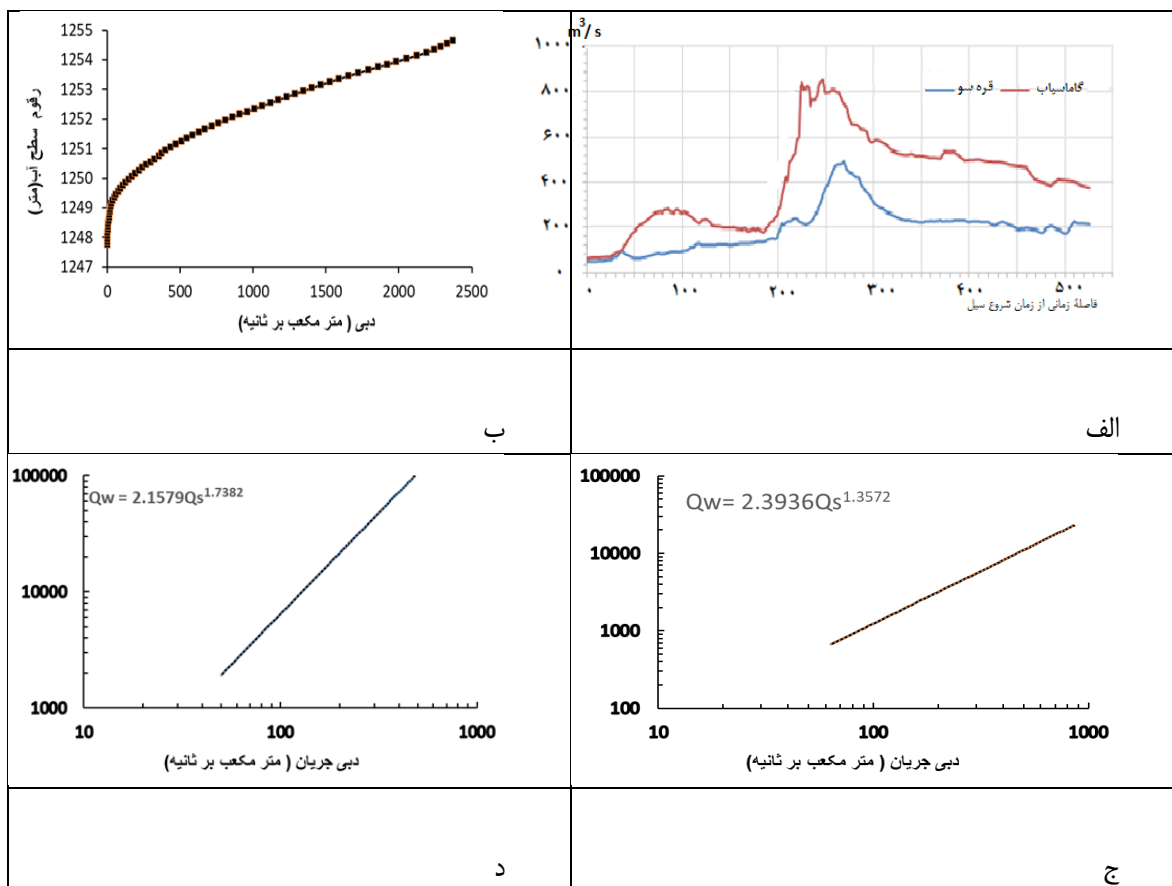


شکل ۳: اندازه گیری‌های فیزیوگرافیک بستر رودخانه های گاماسیاب، قره سو و سیمره در روی زمین تیرماه ۹۸



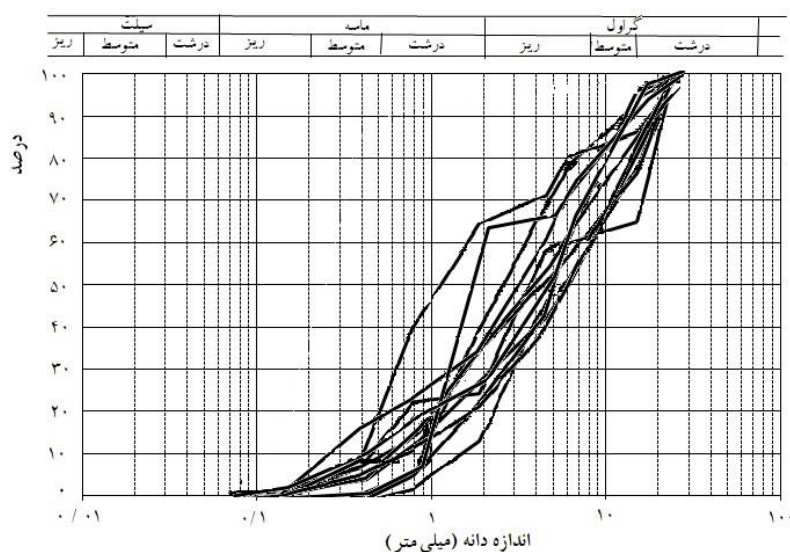
شکل ۴: الگوی مش بندی پیوندگاه دو رودخانه قره سو به گاماسیاب

سیلی که در فروردین ۱۳۹۸ در این منطقه رخ داد، مقدار آب و رسوبی که به مدت ۵۱۴ ساعت به صورت جریان غیر ماندگار از تاریخ ۱۳۹۸/۱/۱ تا ۱۳۹۸/۱/۱۸ آب و رسوب را به این بازه وارد نموده بود به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده و وارد مدل گردید. این دو پارامتر از اندازه گیری که جریان آب و رسوب از دو ایستگاه فرامان (قبلاً با موقعیت کمی متفاوت با نام قورباغستان داده را ثبت کرده بود) برای رود قره سو و پل چهر برای رود گاماسیاب انجام شده بود استفاده شد. رابطه دبی - اشل ساخته شده بر اساس رابطه مانینگ برای ابتدای رودخانه سیمره به عنوان شرط مرزی خروجی جریان در محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ انواع شرایط جریان و رسوب تعریف شده در مدل SRH-2D برای شبیه سازی پیوندگاه رودخانه های گاماسیاب و قره سو نشان داده شده است.



شکل ۵: شرایط مرزی جریان و رسوب محدوده مورد مطالعه الف) هایدرولوگراف ورودی شاخه های گاماسیاب و قره سو از اول فروردین ماه ۱۳۹۸ به مدت ۵۱۴ ساعت، ب) دبی-انسل در مرز خروجی - ابتدای سیمره، ج) رسوب ورودی شاخه گاماسیاب و د) رسوب ورودی شاخه قره سو

از جمله اطلاعات مورد نیاز دیگر برای اجرای مدل توزیع رسوب و زبری بستر در محدوده پیوندگاه می باشد. بدین منظور تعداد ۱۲ نمونه رسوب از بستر و کناره های محدوده برداشت و آزمایش دانه بندی با الک بر روی آنها در آزمایشگاه انجام شد. منحنی های دانه بندی ترسیم شده (شکل ۶) برای این نمونه ها که محدوده دانه بندی رسوبات مواد بستر را در محدوده شن درشت تا ماسه ریز نشان می داد به صورت میانگین خلاصه شده و مشخصات آن در قالب ۵ محدوده ۲۰ درصدی وارد مدل شد. علاوه بر این با توجه به اندازه میانگین دانه رسوب و رابطه استریکلر - مانینگ مقدار ضریب زبری اولیه برای مدل تعریف شد و در نهایت مقدار 0.28 برای شبیه سازی حرکت رسوب در محل پیوندگاه صحت سنجی شد. با توجه به جنس مصالح بستر مقدار جرم مخصوص ظاهری همان مقدار پیش فرض مدل یعنی 1590 کیلوگرم بر متر مکعب و مقدار چگالی ویژه $2/65$ مناسب تشخیص داده شد. در نهایت مدل با مشخصات یاد شده در گام زمانی 0.2 ثانیه به مدت 528 ساعت اجرا شد و خروجی نتایج آن در نرم افزار TECPLOT مشاهده و برای ارائه آماده گردید.

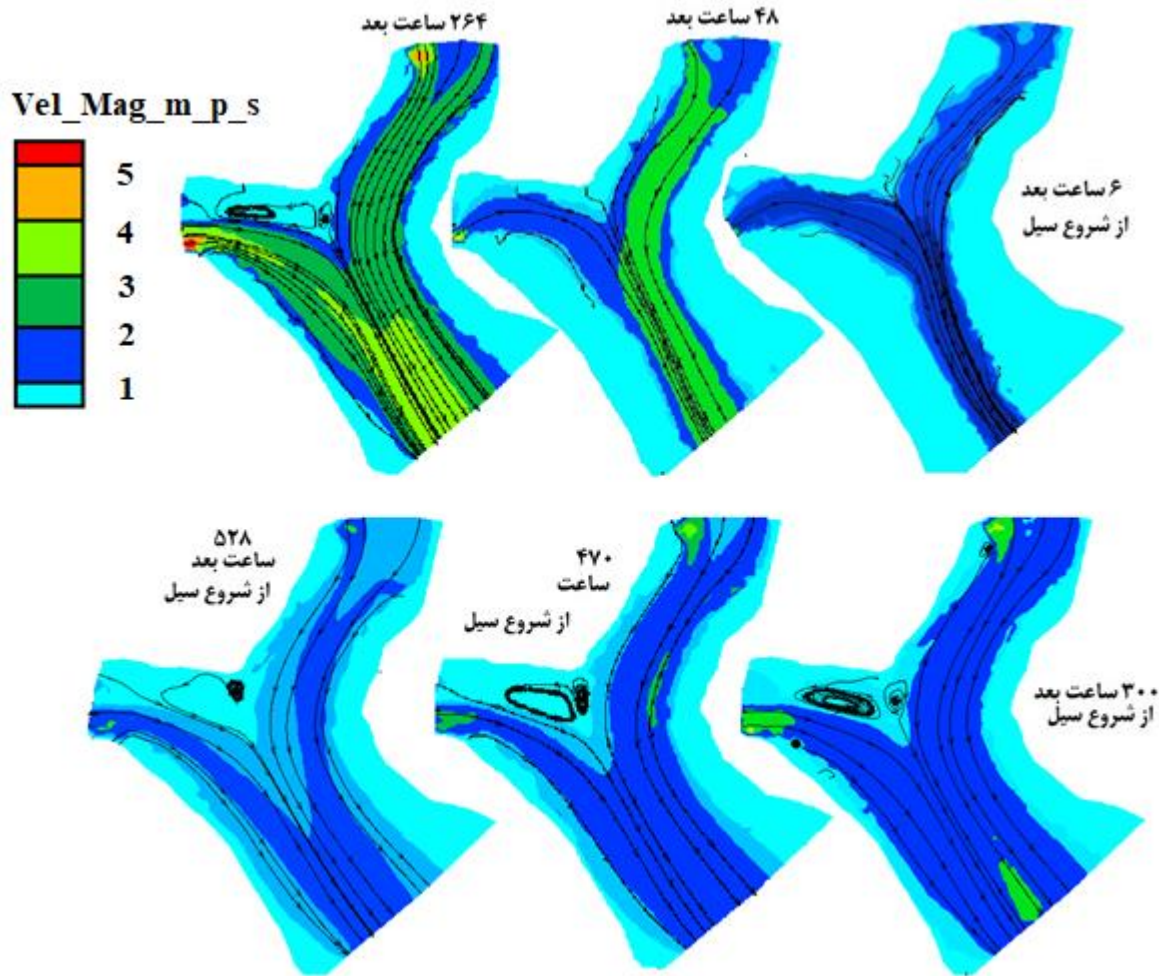


شکل ۶: نتایج گرانولومتری ۱۳ نمونه رسوب برداشت شده از بستر پیوندگاه دو رودخانه گاماسیاب و قره سو

نتایج و بحث

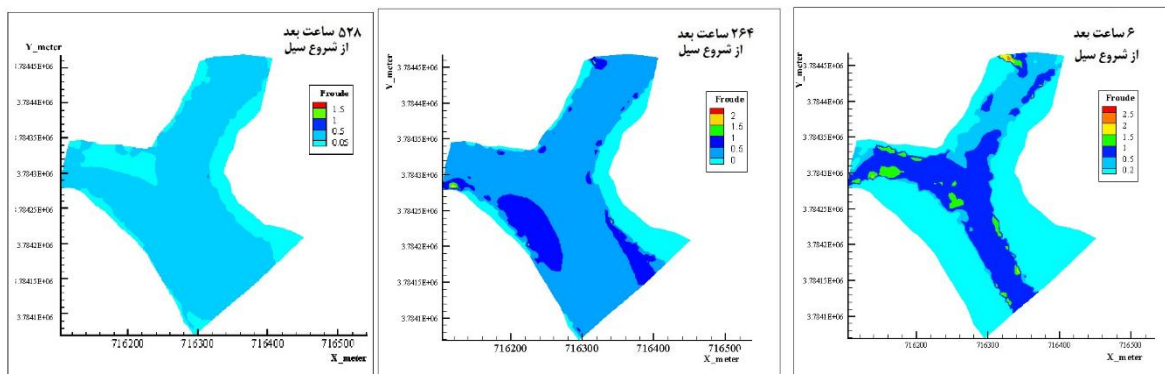
بارندگی که در اسفندماه ۱۳۹۷ در ایستگاه هواشناسی کرمانشاه ثبت شده است در حدود ۷۹/۱ میلی‌متر می‌باشد که وقوع بیشترین آن در اواخر این ماه طغیانی شدن رودها و با تداوم بارش در فروردین ۱۳۹۸ (در حدود ۸/۱۹۴) تشدید وضعیت سیلابی در استان بود. بررسی هایدروگرافی (شکل ۵-الف) که براساس داده‌های دبی اشل‌های دو ایستگاه فرامان و پل چهر به دست آمد نشان می‌دهد که در پیوندگاه دو رود مذکور دبی از ۶۰ متر مکعب در ثانیه شروع شده و پس از طی در دو موج تند تقریباً در ۳۰ ساعت و سپس ۱۹۰ ساعت بعد از شروع اوج گرفته و در تقریباً ۲۷۰ ساعت به بیشترین حد خود با تخلیه ۱۳۰۰ متر مکعب در ثانیه می‌رسد. پس از ۵۰ ساعت فروکش جریان به نقطه عطف خود رسیده و با شیب ملایم رو به کاهش می‌گذارد.

انتخاب ساعاتی از موقعیتهای مختلف هایدروگراف سیل و بررسی تعبیرات ویژگی‌های جریان و رسوب در آن ساعات نشان می‌دهد که بیشترین سرعت‌های جریان در اوج هایدروگراف رخ داده است. در تقریباً ۲۷۰ ساعت بعد از وقوع سیل نه تنها به تدریج تمام بستر از آب اشغال شده است بلکه سرعت‌های جریان در هر نقطه نسبت به ساعات قبل به درجات معین افزایش یافته و در بعضی نقاط جهت معکوس و گردابی به خود گرفته است. مهم‌ترین موقعیتی که در آن جریان‌های گردابی در اوج جریان‌ها شکل یافته است در محل سه سد ماسه‌ای تثبیت‌یافته‌ای است که در وسط دقیقاً انتهای دور رود قره‌سو و گاماسیاب و شروع رود سیمره به وجود آمده‌اند. به تدریج که سیلاب فروکش کرده است سرعت‌ها تخفیف پیدا کرده ولی جریان‌های گردابی پیوندگاه تا آخرین ساعات وضعیت خود را حفظ می‌کند و حتی در ۳۰۰ ساعت بعد از وقوع سیل تقویت نیز می‌شود. اوج‌های سرعت نیز تنها در دو نقطه در شاخه‌های فرعی متمرکز است. در قره سو این موقعیت به فضای جنوبی بین سد رودخانه ای و کرانه رود متمرکز شده است (شکل ۷). شاید بررسی تعبیرات عدد فرود در جریان سیلاب این موضوع را مشخص کند.



شکل ۷: تغییرات سرعت و جهت حرکت جریان در ۶ تا ۵۲۸ ساعت بعد از شروع سیل

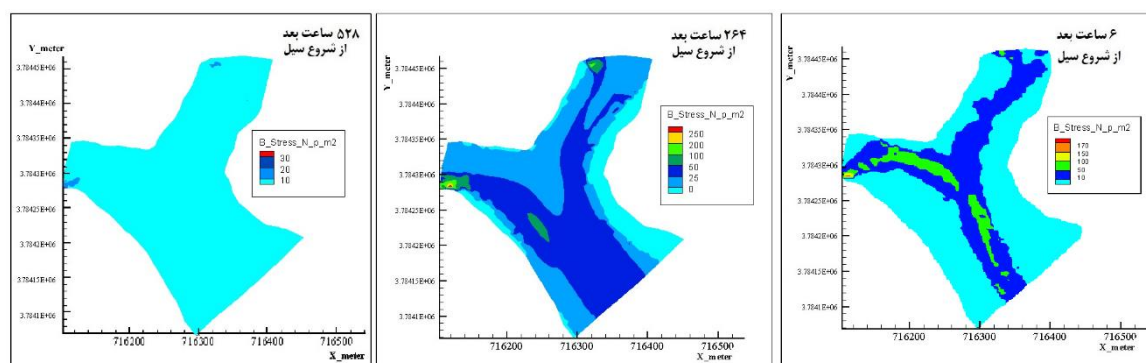
تغییرات مکانی عدد فرود در مجرا در چند ساعت اول جریان سیلاب تنوع خیلی زیادی را دارد و این نشان می‌دهد که بستری که (شاید دستکاری‌های نیز شده باشد) با جریان‌های عادی خود را سازش داده است و هنوز شیب، پهنای مجرا، پستی بلندی‌های بستر با جریان هماهنگ نیستند. به همین دلیل است که در اوایل سیلاب باوجود عدم گسترش زیاد، جریان‌های فوق بحرانی را در چند نقطه از مجرا نشان می‌دهد (شکل ۸). بیشتر این نقاط در کناره بستر قرار گرفته اند که ناشی از کندوکارهای بستر برای برداشت شن و ماسه می باشد. تنگ شدن بستر در شاخه جنوبی قره سو نیز به این موضوع کمک می‌کند تا شرایط مناسب برای سرعت یافتن جریان به وجود آید. نکته قابل توجه این است که تغییرات عدد فرود در طول زمان نشان می‌دهد که تنوع‌هایی که قبلاً در عدد فرود وجود داشت در اوج سیلاب از بین رفته و اعداد فرود بالا ولی زیر بحرانی تنها به چند نقطه متمرکز شده است و در زمان فروکش سیلاب نیز تقریباً شرایط تقریباً یکنواخت و زیر بحرانی در همه پهنه مجرا حاکم می‌شود (شکل ۸) که حکایت از بستر فراخ با کف دارای ناهمواری کم است. تجمع انبوهی از رسوبات ماسه‌ای در سواحل رود که بعد از سیل رخ داده بود و مورد برداشت قرار می گرفت، به همراه کرانه‌های ناگهانی بستر شواهدی از این وضعیت توسیف شده می‌باشند.



شکل ۸: عدد فرود در سه مقطع زمانی آغاز، اوج و پایان سیل.

تغییر تنش‌ها در مجاری پیوندگاه گاماسیاب-قره سو

مدل حاصل از این تحقیق الگوی ویژه‌ای را در تنش‌های برشی در پیوندگاه گاماسیاب - قره‌سو نشان می‌دهد. به طور کلی این الگو مانند الگوی توزیع عدد فرود در مراحل مختلف سیل نشان می‌دهد که تنش‌های برشی در پایان سیلاب‌ها نوسانات مکانی خیلی جزئی داشته و در سرتاسر بستر در کمتر از ۱۰ نیوتن بر متر مربع اعمال می‌شود. این در حالی است که در شروع سیلاب وسط مجاری بالای ۵۰ و در قره سو و ادامه آن در سیمره به ۱۰۰ نیوتن در هر متر مربع اعمال می‌شود. در اوج سیلاب نیز مساحت تحت تأثیر نیروی برشی ۵۰ نیوتن بر مترمربع گسترش می‌یابد و ارقام بالاتر به صورت گسسته در بخش‌های مختلف مجرا گستره می‌شود که معنی‌دارترین آن بخش‌هایی از میان مجرا است که ارقام بالاتر از ۵۰ را به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۹). این اطلاعات نشان می‌دهد که در اوج سیلاب عمدتاً ساحل سمت چپ که عدد فرود زیاد و دچار تنش برشی بالا قرار گرفته است تحت تأثیر فرسایش زیاد قرار گرفته، در حالی که بخش‌های ساحلی و منطقه جدایش جریان و منطقه رکود، که از عدد فرود کم و نیروی برشی ضعیفی برخوردار بودند در معرض رسوب گذاری قرار گرفته است. در واقع حجم زیادی از رسوبات که در سواحل رود به جا گذاشته شده است عمدتاً در این مرحله از سیلاب به جا گذاشته شده است.



شکل ۹: الگوی تنش برشی در آغاز، اوج و پایان سیلاب

محل های فرسایش و رسوب گذاری در مجاری پیوندگاهی

اختلاف ارتفاعی که بین کرانه های بستر رودخانه تا عمیق ترین نقطه رودخانه در نتیجه نقشه برداری به دست آمد، در حدود ۲۰ متر (۱۳۴۲ عمیق نقطه بستر و ۱۲۶۲ بالاترین نقطه کرانه) می باشد. در این سیلاب، مدل حداکثر عمق آب را ۱۰ متر ارائه می دهد. این نشان می دهد که در آن همه سطح بستر از آب اشغال شده بود و از آنجا که مجرای رود در یک دره کوهستانی جریان دارد تنها در بخش های داخلی مماندرها که دارای دشت سیلابی می باشد جریان آب به راحتی گسترش یافته و اغلب با دیواره های سنگی محدود می شود. از این رو، فرسایش و رسوبگذاری نیز تابع چنین محدودیتهایی قرار می گیرد.

بررسی روند تغییرات رسوبگذاری در طی تغییرات جریان در خروجی مدل (شکل ۹) نشان می دهد که از همان ساعات اول رسوبگذاری در بخش تلاقی دو رود اتفاق می افتد و سپس در ۱۲ ساعت بعد از سیل در گاماسیاب در میانه رودخانه رسوبگذاری آغاز می شود. رسوبگذاری در داخل بستر تا ۴۸ ساعت بعد از سیل گسترش می یابد، ولی بتدریج تا نزدیک اوج سیل رو به کاهش گذاشته و در عوض تمرکز رسوبگذاری به بخش قوس مقعر سیمه متمرکز می شود. به نحوی که بیشترین آن در فاصله ۱۰ ساعتی بین ساعات ۲۶۰ تا ۲۷۰ رخ داده است. به عبارتی الگوی رسوبگذاری در این رودخانه نخست به صورت پرشدگی نواحی بستری و سپس در کرانه ها است. از ساعت ۲۷۰ ام به بعد رسوبگذاری در بستر متوقف می شود و هر رسوبی که از بالادست آورده شده است به منطقه پایین دست حمل شده است. بنابر این اوج جریان نقطه نهایی برای رسوبگذاری در سرتاسر این بستر شناخته می شود و بعد از آن شرایط متعادلی از نظر رسوبگذاری در بستر حاکم شده است. در حالی که طبق مدل فرسایش را تمام لحظات می توان فعال یافت و حتی اوج آن را نیز تا ۹۰ ساعت بعد از اوج سیل می توان مشاهده نمود.

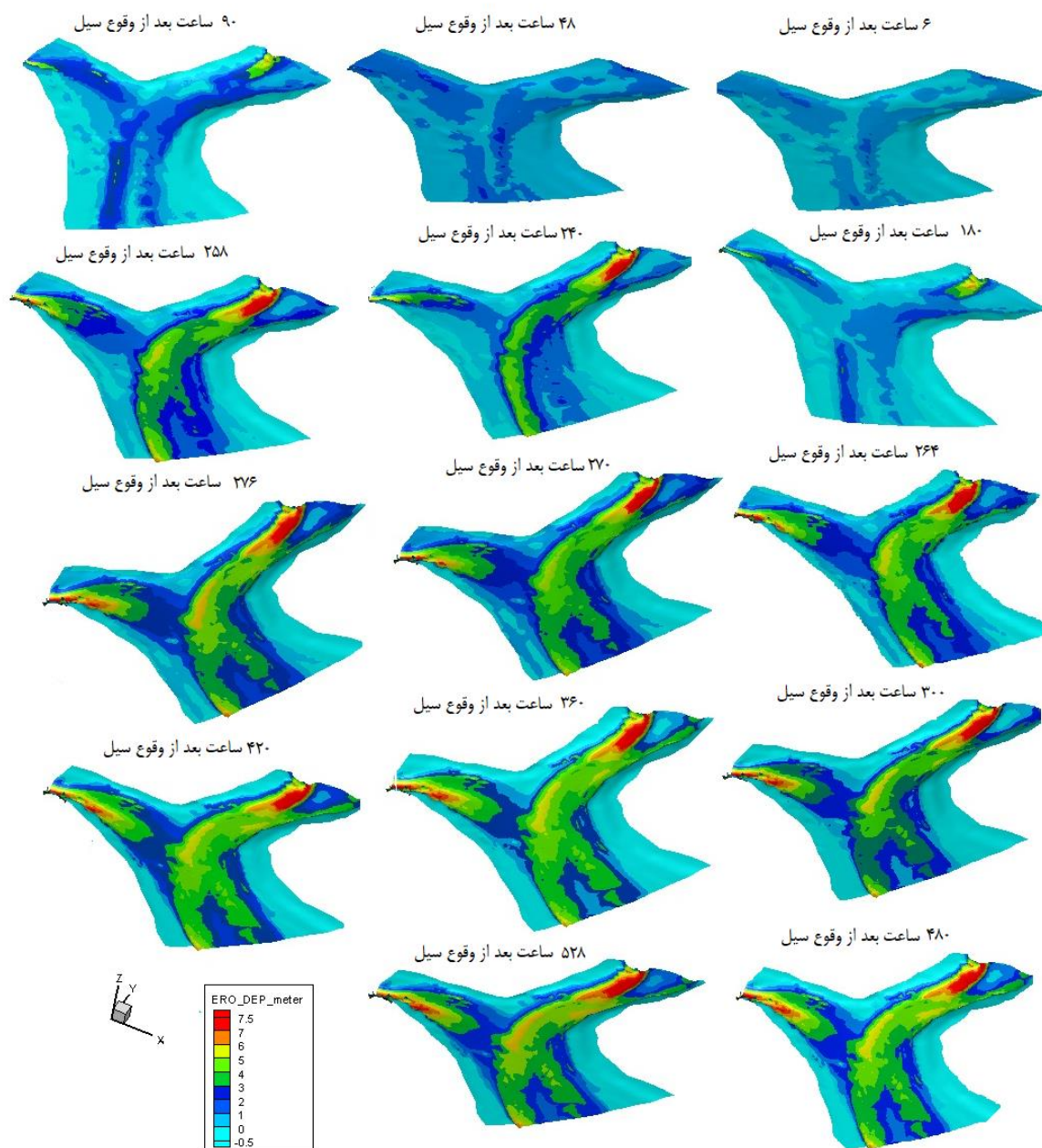
با افزایش دبی تنش ها به بستر افزایش می یابد و در درجه اول بیشترین تنش ها به بخش های از بستر هر دو رودخانه قره سو و گاماسیاب که قبل از رسیدن به پیوندگاه به وسیله دره محدود شده اند وارد می گردد. در تقریباً ۲۰۰ ساعت بعد از سیل بیشترین سایش ها در این محل رخ می دهد ولی به نظر می رسد قبل از اینکه سیل به اوج خود برسد توسعه آن ها تکمیل شده باشد؛ زیرا بعد از آن، گسترش چشمگیری در عمق یا در مساحت آن ها دیده نمی شود. در حالی که در محل تلاقی دو رودخانه تمرکز تنش های برشی و فرسایش در حدود ۵۰ ساعت قبل از اوج جریان رخ می دهد و تولید چاله فرسایش تا دست کم ده ساعت بعد از اوج جریان نیز ادامه می یابد. البته هم زمان با رشد این چاله فرسایشی، بعد از پیوندگاه در بخش مقعر مماندر در نزدیک ساحل چاله دیگری نیز شکل می گیرد.

تغییرات ژئومورفولوژیک بستر مجرا

مدل عمق فرسایش (شکل ۹) بیشترین تغییرات ایجاد شده از نظر فرسایش را در ساعت ۳۶۰ ام به صورت یک مسیر قوسی در میان هر دو مجاری قره سو و گاماسیاب نشان می دهد که بعد از پیوندگاه نیز تداوم یافته است. در داخل این مسیر مجرای چاله هایی به وجود آمده اند که توالی ریفل ها و پول ها را تداعی می کند (جباری، ۱۳۹۶: ۲۲۱). یافته های پتیت^۱ (۱۹۸۷) نیز نشان می دهد که تحول این چاله ها در زمان دبی نزدیک به لب پر بیشتر صورت می گیرد که با افزایش تنش برشی که در این زمان رخ می دهد سنگریزه های ته نشین شده در دبی های پایین تر، دوباره جابه جا می شوند. به همین دلیل است که با افت جریان و پرشدگی این چاله ها در تنش های برشی و عدد فرود یکنواختی خاصی رخ می دهد. البته در این یکنواختی رسوبگذاری در بخش های دیگر نیز به این امر کمک می کند. مهم ترین عوارضی که در این رسوبگذاری به وجود می آیند سدها یا نوارهای رودخانه ای است که در طی این سیلاب گسترش یافته اند. سدهای دماغه ای نیز در بین این سدها پراهمیت ترین اند. ولی در این محل توسعه مماندر گاماسیاب به وسیله رودخانه قره سو محدود

1- Petit

شده و از آنجاکه در بخش داخلی آن شیب تند دره اجازه رسوب رود را نداده است، رسوبگذاری نتوانسته است در تمام سطح قوس داخلی آن انجام گیرد. در عوض این وظیفه را قره سو برعهده گرفته و رسوب را در سطح داخلی قوسی که ایجاد می کند به جا می گذارد. مطالعات میدانی بعد از سیلاب نشان داد که حجم رسوب در این محل از نظر سطح نسبتاً به ساحل مقابل کم ولی از نظر حجم خیلی بیشتر می باشد.



شکل ۹: مراحل مختلف تحول بستر پیوندگاه گاماسیاب - قره سو در سیلاب سال ۱۳۹۸ در مدت ۵۲۸ ساعت. در این تصاویر رنگ آبی در بعضی ساعات صفر و در بعضی ساعات زیر صفر را نشان می دهد.

مقایسه نتایج شبیه سازی سازی شده با واقعیت و مطالعات پیشین

مشاهدات میدانی مناطق فرسایش یافته و رسوب گذاری بعد از سیلاب و همچنین مقایسه دو تصویر ماهواره ای قبل و بعد از سیل (شکل ۱۰) نشان داد که مدل SRH_2D، دقت و صحت قابل قبولی را برای نشان دادن تغییرات بستری در طی فرایند سیل ارائه می دهد. مشاهده عوارض باقیمانده از سیل در این تصاویر و همچنین بررسی موقعیتهای رسوبگذاری و فرسایشی که صورت گرفت دست کم برای توجیه تغییرات مورفولوژیک که با تغییرات دبی رخ می دهد، کفایت کرده و زمینه را برای بررسی تغییرات انواع مجاری پیوندگاهی باز می کند.

مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق اخیر (جباری و همکاران، ۱۴۰۲) که در همین سیلاب ولی در پیوندگاهی (پیوندگاه گاماسیاب-دینور) با فاصله ۳۷ کیلومتر بالاتر از موقعیت این تحقیق صورت گرفته نتایج نسبتاً متفاوتی را نشان می دهد (جدول ۱). هر چند که از پیوندگاه گاماسیاب-دینور با حجم سیلاب (در زمان اوج سیل $700 \text{ m}^3/\text{s}$ گاماسیاب و دینور $200 \text{ m}^3/\text{s}$) و زمان اوج سیلاب (تقریباً ۱۰۰ ساعت بعد از شروع سیل) کمتر از سیل محل مورد بررسی ظرفیت ایجاد تغییر را باید انتظار داشت ولی تفاوتها در شیوه تغییرات به نحوی است که نقش مورفولوژی مجرا را خیلی بااهمیت نشان می دهد. این تفاوتها را می توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- تفاوت در محل رسوبگذاری- در آن تحقیق در طی همین سیلاب منطقه رکود و منطقه تعمر مئاندر گاماسیاب جزو فعال ترین مناطق از نظر رسوبگذاری بودند در حالی که در این تحقیق منطقه رکود تغییرات چندانی را از نظر مورفولوژی تجربه نکرد و منطقه تحذب گاماسیاب و همچنین شاخه فرعی آن (قره سو) از نظر نهشته گذاری دچار تغییرات زیادی گردید.

۲- تفاوت در زمان رسوبگذاری- در آن تحقیق رسوبگذاری بعد از اوج سیلاب گسترش می یابد، در حالی که در گاماسیاب قره سو بعد از اوج رسوبگذاری محدود می شود.

۳- تفاوت در توسعه فرسایش- فرسایش از نظر نحوه گسترش در گاماسیاب دینور از پایین دست مجرای اصلی شروع می شود و به صورت قهقراپی تا بالادست ادامه پیدا می کند. ولی در این تحقیق فرسایش از بخشهایی از شاخه های فرعی شروع می شود و سپس موقعی که سیل اوج می گیرد محل پیوند مهم ترین مکان برای تولید چاله آب شستگی می گردد و سپس به سمت پایین دست توسعه پیدا می کند.

۴- تفاوت در زمان توسعه فرسایش- زمان بندی توسعه چاله فرسایشی در گاماسیاب-دینور تا اوج سیلاب ادامه پیدا کرده و در این زمان، دیگر تقریباً متوقف می شود در حالی که در گاماسیاب قره سو فرسایش ساعتها بعد از اوج سیلاب به حداکثر توسعه خود می رسد.

این تفاوتها در فرایند، موقعیت و زمان رخداد تغییرات مورفولوژیک بیشتر از این که به ویژگی های جریان نسبت داده شود باید به ویژگی های توپوگرافیک و ژئومورفولوژیک زمین در ارتباط قرار داده شود. درست است که پیوندگاه گاماسیاب-دینه در دشت قرار دارد ولی مقاومت دیواره در بخش مقعر مئاندر و در پیوندگاه گاماسیاب-قره سو در بخش تحذب آن وجود دارد. سدها و توارهای رودخانه ای تثبیت شده در موقعیت های مختلف هر دو رودخانه، زبری های بستر متفاوت ناشی از مواد بستری و پوشش گیاهی، موقعیت پیوند رودخانه فرعی به اصلی تفاوت های آشکاری است که تحول این دو پیوندگاهها را به طور متفاوت توجیه می کنند.



شکل ۱۰: تغییرات بستر در محل پیوندگاه قره سو به گاماسیاب بر روی تصویر ماهواره ای الف: قبل از وقوع سیلاب ب: در زمان اوج سیلاب ج: بعد از وقوع سیلاب

جدول ۱: ویژگی‌های پیوندگاه مورد مطالعه و پیوندگاه گاماسیاب- دینور

پیوندگاه	زاویه اتصال	محل اتصال	زمان بیشترین فرسایش	دوره بازگشت سیلاب
گاماسیاب- دینور	۴۰	داخل مئاندر اصلی	۸۰ ساعت بعد از وقوع سیلاب	۳۵
گاماسیاب- قره سو	۱۱۰	بیرون از قوس مئاندري	۵۰ ساعت بعد وقوع سیلاب	۳۵

نتیجه گیری

مورفولوژی مجاری در پیوندگاه‌ها دچار تغییرات متفاوتی می‌شوند. این تغییرات را عوامل متعددی همچون عوامل هیدرولوژیک، عوامل ژئومورفولوژیک، عوامل زمین شناسی، عوامل توپوگرافیک و حتی اکولوژیک رقم می‌زند. بررسی این تغییرات می‌تواند اطلاعات مهمی را در اختیار پژوهشگران قرار دهد تا به میزان اثر عوامل متعدد در تحول مجرا پی ببرند. از سوی دیگر انتخاب یک حادثه سیل برای بررسی تغییرات مجرا بی نیز شرایطی را فراهم می‌کند تا اطلاعاتی که

دسترسی به آن در شرایط دبی عادی وقت گیر بود، در کوتاه ترین زمان به دست آید. مدل های هیدرولوژیک امکان زیادی را فراهم می کنند تا این اطلاعات به دست آیند ولی این تحقیق نشان داد که برای کسب اطلاعات ژئومورفولوژیک نیاز به تفسیر دارند. نتیجه این اطلاعات می تواند با شرایط عادی تطبیق داده شود و میزان تغییرات محیط را در شرایط عادی با توجه به عوامل تأثیرگذار تشریح کند. در پیوندگاه های رودخانه های کوهستانی که از نظر محیطی مشابه با منطقه مورد مطالعه این تحقیق می باشند، یعنی عمدتاً یک شاخه مئاندری شاخه دیگری را با زاویه بزرگ دریافت می کند ساختمان زمین ریخته های رسوبی تا اوج سیلاب شکل گرفته و عوارض فرسایشی در تقریباً وسط مجاری تا ساعاتی بعد از اوج سیلاب نیز توسعه می یابند، این در حالی است که تنها چند کیلومتر بالاتر که تلاقی دیگری با همین رودخانه ولی با مورفولوژی و در توپوگرافی متفاوت صورت گرفته، نوع تحول و شکل تحول به نوع دیگری صورت گرفته است. نتیجه این که مورفولوژی مجرا متغیرهای گوناگونی را از نظر زاویه برخورد دو شاخه، شیوه برخورد (مئاندری یا غیرمئاندری)، موقعیت پیوند (نقطه برخورد دو مئاندر)، محدودیت دره، شیب طرفین مجرا و زمین ریخته های قبلی به وجود می آورد که می توانند بر عوامل هیدرولیک جریان و رسوب اثر بگذارند و در تولید زمین ریخته های جدید مجرا نقش ایفا کنند.

منابع

- بلوچی بهنام، شفاعی بجستان، محمود، ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تاثیر آورد رسوب شاخه ی اصلی بر الگوی رسوب در محل پیوند رودخانه ها، فصل نامه ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب.
- حبیبی، سحر و همکاران، ۱۳۹۳. بررسی عددی الگوی جریان و رسوب در محل پیوند رودخانه ها. نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری. سال هشتم. شماره ۲۴. بهار.
- جباری ایرج، ۱۳۹۶، ژئومورفولوژی: ساختمان، فرایند و زمین ریخته ها، انتشارات سمت. ۴۳۹ ص.
- -جباری ایرج، قبادیان رسول و جدیدی انیس، ۱۴۰۲، تأثیر سیل فروردین ۱۳۹۸ بر ریخت شناسی پیوندگاه مئاندری دو رودخانه دینور به گاماسیاب با استفاده از مدل عددی *SRH-2D*، جغرافیا و توسعه، دوره ۲۱، شماره ۷۰.
- جباری، آیدین، برقی، سید محمود، ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی الگوی رسوب و فرسایش در محل اتصال مجراها، چهارمین کنگره مهندسی عمران، تهران.
- قبادیان، رسول، شفاعی بجستانی، محمود، ۱۳۸۶. پیش بینی حداکثر عمق فرسایش بستر در محل پیوند رودخانه ها. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. شماره ۱، بهار.
- قبادیان رسول رشفاعی بجستان محمود رآذری آرش، ۱۳۸۷. بررسی زاویه اتصال بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در محل پیوند رودخانه ها با استفاده از مدل فیزیکی. پژوهش های آب، خاک و گیاه در کشاورزی. جلد هشتم. شماره چهارم. ۱۰۷-۱۲۲.
- رضایی مقدم، محمد حسین. جباری، ایرج و پیروزی نژاد، نوشین، ۱۳۹۵. بررسی الگوهای رودخانه ای مئاندری، شریانی و آنابرنچینگ با استفاده از شاخص های شریانی و خمیدگی در رودخانه گاماسیاب. پژوهشنامه مدیریت آبخیز. سال هفتم، شماره ۱۳. ۲۹۹-۳۲۰.
- مرادی، مهرداد، قبادیان رسول، ۱۳۹۳. شبیه سازی دو بعدی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت با استفاده از مدل دو بعدی *SRH-2D*. چهارمین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب. دانشگاه شهید باهنر کرمان.

- Ashmore, P. and Parker, G. 1983. Confluence scour in coarse braided stream *Water Resour Research*, 19: 392 – 402.
doi.org/10.1029/WR019i002p00392
- Best, J. L. and Reid, I. 1984. "Separation zone at open – channel junctions". *Journal of Hydraulic Engineering*. Volume 110, Issue 11 , 1588–1594.
- Best, J. L. 1987. Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology. *Recent Devel. In: , F.G. Etheridge, R.M. Floers and M.D. Harvey (eds), Fluvial Sedimentology, SEPM Spec. Publ. 39., 27-35.*
- Dixon, S. J., Sambrook, S., Gregory, H., Best, J., Nicholas, A. P., Bull, J. M., Vardy, M. E., Sarker, M. H., Goodbred, S., 2018. The planform mobility of river channel confluences: Insights from analysis of remotely sensed imagery. *Earth-Science Reviews*, 176, 1-18.
- Ghobadian, R., Tabar, Z. S., and Koochak, P. 2016. Numerical study of junction-angle effects on flow pattern in a river confluence located in a river bend. *Water SA*, 42(1), 43-51.
- Gurram, S. K., Karki, S. , K. and Hager, W. H. 1997. Subcritical junction flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 5, 123, 447-455.
- Hager, W. H. 1987. Discussion: Separation zone at open channel – junctions. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 5, 115, 595-616.
- Hsu, C.C., Lee, W.J., and Chang, C.H. 1998. Sub critical open – channel junction flow. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 124(8): 847-855.
- Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Roy, A. G. and Schleiss A. J. (2012), Flow and sediment dynamics in channel confluences. *Journal of Geophysical Research*, Vol.117.
- Mosely, M.P. 1976, "An experimental study of channel confluences" *J. of Geol. Elsevier Science*, 84, p. 535-562.
- Modi, P.N. Ariel, P.D, and Dandkar, m. m. 1981. Conformal mapping for channel junction flow. *J. Hydr. Engrg.* 107(12), pp. 1713-1733.
- Moges EM, , 2010 "Evaluation of sediment transport equations and parameter sensitivity analysis using the SRH-2D model", PhD Thesis, Universität Stuttgart.
- Petit, F., 1987, The relationship between shear stress and the shaping of the bed of a pebble-loaded river la ruelles—Ardenne, *CATENA*, 14, 5, 453-468.
- Ramamurthy, A. S., Carballada, L. B. and Tran, D. M. 1988. Combining open channel flow at right.
- Shabayek, S., Steffler, P., and Hicks, F. 2002. "Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions", *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), pp. 821-828.

- Taylor EH, 1944. *Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. American Society of Civil Engineers - Proceedings 70: 119-121.*
- Webber NB and Greated CA, 1966. *An investigation of flow behavior at the junction of rectangular channels. Institute Civil Engineers, Pp.321-334, Proc.34, London.*
- Yong G.Lai and Blair P.Greimann. 2007. *Numerical modeling of alternate bar formation downstream of a dike .ASCE world environmental and water resources congress, tampa, florida, 15-19.*