

تأثیر تغییر مقاطع عرضی بر طغیان و ظرفیت انتقال رسوب رودخانه آبشینه همدان

شهلا عزیزی- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه ملایر.
علیرضا ایلدرمی* - دانشیار گروه مرتع و آبخیز، دانشگاه ملایر.
حمید نوری - دانشیار گروه مرتع و آبخیز، دانشگاه ملایر.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

چکیده

امروزه تحلیل و شبیه‌سازی طغیان و انتقال رسوب با مدل‌های مهندسی رودخانه کاربرد فراوانی در هیدرولیک جریان دارند. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی تأثیر تغییر شکل هندسی مقاطع عرضی رودخانه آبشینه همدان بر فرآیندهای جریان و انتقال رسوب با استفاده از نرم‌افزار SMADA و شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه با مدل HEC-RAS می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات عرضی رودخانه آبشینه به تغییرات مکانی الگوی کنش (فرسایش و رسوب-گذاری) نسبت داده می‌شود که به دلیل تکرار و فراوانی وقوع سیلاب‌های منفرد و بزرگ می‌باشد. همچنین به دلیل فرآیند فرسایش، افزایش سرعت آب و شیب زیاد، مقاطع عرضی بالا دست V شکل بوده و مقاطع میانی به دلیل فرآیند فرسایش و رسوبگذاری به شکل U و در انتهای مسیر به دلیل وجود سد اکباتان و باز شدگی بستر فرآیند انباشت رخ می‌دهد. نتایج حاصل از مدل HEC-RAS نشان می‌دهد که مقدار ظرفیت انتقال رسوب با رواناب و سرعت جریان رابطه مستقیم داشته و میزان رسوب از مقدار دبی و بارش تأثیر می‌پذیرد و بیانگر این است که در مقطع عرضی از دوازده کیلومتری پایین دست تا مقطع عرضی موجود در نزدیکی سد، میزان جریان رسوب نمی‌تواند از بستر رودخانه و کناره‌ها طغیان کند لذا خطری برای مناطق حاشیه رودخانه در پی نخواهد داشت. اما در مقطع عرضی هشت کیلومتری پایین دست حوضه میزان دبی عبوری و رسوب از ظرفیت این مقطع بالا بوده و برای جلوگیری از انباشته شدن رسوبات و بالا آمدن بستر و طغیان رودخانه در این بازه، باید مدیریت لازم و ساماندهی مهندسی رودخانه انجام گیرد.

واژگان کلیدی: مورفولوژی، فرسایش و رسوبگذاری، HEC-RAS، آبشینه.

مقدمه

رودخانه‌ها شریان‌های حیاتی هر کشور می‌باشند که علاوه بر کاربردهای فراوانی که در جوامع بشری دارد، گاهی دارای مخاطراتی نیز می‌باشد. تغییر و دگرگونی جزء صفات همیشگی رودخانه‌هاست که در طول زمان باعث ایجاد چشم‌اندازهای متفاوتی با توجه به محیط مسلط به رودخانه شده و به خاطر ارتباط با زندگی انسان، بررسی آن را اجتناب‌ناپذیر می‌کند (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). رودخانه‌ها یکی از منابع مهم آب‌های سطحی هر کشور می‌باشند که با توجه به نقش مهم آن‌ها در زندگی بشر می‌بایستی مورد توجه و محافظت قرار گیرند. این منابع آبی تحت تأثیر پدیده فرسایش و رسوبگذاری دست‌خوش تغییرات گوناگونی می‌شوند که از آن جمله می‌توان به تغییرات امتداد جابجایی‌های عرضی و طولی، وقوع میانبرها، تغییر نوع رودخانه، تغییر تراز بستر، تغییر دانه‌بندی و دگرگونی ویژگی‌های هندسی مسیر اشاره کرد (اسدی و همکاران، ۱۳۹۶). مورفولوژی هر سیستم رودخانه‌ای در ارتباط و تحت تأثیر فرآیندهای حاکم بر آن از جمله شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری و نیز خصوصیات زمین‌شناسی و توپوگرافی محیط رودخانه‌ای و حوضه بالادست آن است. شناخت ویژگی‌ها و آثار متقابل فرم و فرآیندهای حاکم در سیستم‌های رودخانه‌ای که به شناخت رفتار رودخانه‌ها در محدوده‌های زمانی و مکانی منجر می‌شود، اهمیت ویژه‌ای در توسعه مدل‌های مفهومی در ارتباط با محیط‌های رودخانه‌ای دارد (حاجی بیگلر و همکاران، ۱۳۹۲). مطالعات مورفولوژی رودخانه و سیلاب‌ها به منظور شناسایی کلی شکل، فرایند توسعه و روند تغییرات مکانی جریان و مشخص کردن محدوده جابجایی رودخانه‌ها، جهت تحلیل پایداری آن، یکی از بخش‌های اساسی در مطالعات مهندسی رودخانه و ساماندهی سواحل آن است. رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی، مورفولوژیکی و نحوه بهره‌برداری از آن‌ها در معرض تغییر و تحول هستند. که به صورت فرسایش یا رسوب‌گذاری در بستر، تخریب دیواره‌ها، تغییر راستای جریان، تغییر و جابه‌جایی منادرها و تغییر در فرم رودخانه نمودار می‌شوند (ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۵). برای شناخت پدیده فرسایش یا رسوب‌گذاری و تغییر و جابجایی بستر رودخانه‌ها روابط ریاضی و مدل‌های فیزیکی مختلفی از جمله HEC-6، HEC-RAS، SSIM، MIKE21، FLUVIAL، GSTAR، اراشه شده که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند (اجدادی و محمودیان، ۱۳۸۷). در تحلیل جریان رودخانه‌ها، مدل‌های فیزیکی و ریاضی همچون ابزاری مناسب نقش ایفا می‌کنند. کاربرد مدل‌های فیزیکی به دلیل نیازمندی به فضای وسیع، هزینه زیاد و زمان طولانی جهت انجام دادن آزمایش‌ها اغلب توصیه نمی‌شود. به همین دلیل بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه را می‌توان با مدل‌های ریاضی بررسی کرد. کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب از جمله مدل HEC-RAS جهت بررسی هیدرولیک جریان‌های سیلابی ضروری است. چرا که می‌تواند بین متغیرهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه همبستگی معنی‌داری برقرار نماید. بعلاوه مدل HEC-RAS توانایی مناسبی جهت بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه دارد و به خوبی نقش رواناب و تأثیر آن را در تغییر مورفولوژی رودخانه بررسی می‌نماید (هازاریکا و همکاران، ۲۰۰۵). در رابطه با تغییرات مورفولوژی و فرسایش رودخانه‌ها کارهای متعددی در ایران و جهان صورت گرفته است که این تحقیقات عمدتاً به مسائل مهندسی رودخانه پرداخته‌اند و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای به بررسی وضعیت فرسایش و رسوبگذاری رودخانه شیرین دره با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در بین معادلات انتقال رسوب، تابع لارسن (کوپلند) نسبت به سایر توابع انتقال رسوب، برآورد بهتر و دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. اکبری و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از معادلات انتقال رسوب در مدل HEC-RAS تغییر فرم بستر رودخانه را مورد بررسی و پیش‌بینی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که معادلات انتقال رسوب حساسیت چندانی به روش محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل‌سازی تغییر فرم بستر رودخانه ندارند.

ره‌نورد و همکاران (۱۳۹۱) با شبیه‌سازی انتقال رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS4.1.0 در رودخانه دز (بازه بین ایستگاه حرمله تا بامدژ) نشان دادند که در این بررسی، رابطه لارسن بهترین دقت را داشته است. بیاتی‌خطیبی (۱۳۹۱) در یک بررسی نقش مدت زمان جابه‌جایی‌ها در مسیر رودخانه مئاندری قره‌آغاج در فرسایش کناری را تحلیل نموده است. نتایج این بررسی نشان داد که خطر فرسایش کناری در بخش‌هایی که میزان جابه‌جایی‌ها متفاوت می‌باشد، زیاد است. لشکری و همکاران (۱۳۹۲) در پهنه‌بندی سیلاب رودخانه زرينه‌رود با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC - RAS به این نتیجه رسیدند که توسعه فیزیکی مناطق مسکونی در حاشیه رودخانه امکان گسترش و پیشروی سیل را در اراضی اطراف بیشتر کرده است. حاجی بیگلر و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی تغییرات مورفولوژیکی و ارتباط آن با فرآیندهای حاکم رودخانه فیروزه-شاه‌جوب با استفاده از مدل HEC - Geo RAS به این نتیجه رسیدند که در بین معادلات همبستگی دبی و رسوب، مدل نمایی مناسب‌ترین روابط حاکم بر خصوصیات هندسی و موثر بر رودخانه را ارائه می‌دهد.

روستایی و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی مورفولوژی مجرای رودخانه ليقوان با روش طبقه‌بندی راسکن و مدل هیدرولوژیکی HEC-RAS پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد رودخانه از نوع سینوسی بوده و اکثر بازه‌ها در طبقه‌بندی راسکن از نوع C می‌باشد و در بازه‌های E و B رودخانه پایدار است. یمانی و همکاران (۱۳۹۴) با مطالعه و بررسی مورفومتری و مقایسه تغییرات عرضی رودخانه ارس در طی سه دهه در پایین دست سد میغان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به این نتیجه رسیدند که ضرایب هندسی رودخانه برای دو دوره زمانی بیانگر تغییرات و جابجایی عرضی زیاد طی ۲۶ سال اخیر بوده است. یمانی و همکاران (۱۳۹۴) جهت شبیه‌سازی و طبقه‌بندی رودخانه تلوار از مدل هیدرولیکی HEC - RAS و WMS9.1 و مدل رزگن استفاده کردند. نتایج نشان داد که بخش‌های میانی رودخانه از لحاظ پایداری در سطح ضعیف و سایر بخش‌ها در سطح متوسط و خوب قرار دارند. ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه و نقش آن در فرسایش و رسوبگذاری با استفاده از مدل HEC - RAS (مطالعه موردی: رودخانه خرم آباد- دوآب ویسان) به این نتیجه رسیدند که ظرفیت حمل در بازه اول و سوم رسوبگذاری و در بازه دوم فرسایش رخ می‌دهد.

شیخ علیشاهی و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه ای به پهنه‌بندی سیل رودخانه حوضه آبریز منشاد استان یزد با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC - RAS پرداختند. نتایج نشان داد که تلفیق مدل هیدرولیکی HEC - RAS و GIS در تحلیل مناطق سیل گیر باعث کاهش محاسبات و عملیات میدانی و افزایش دقت می‌شود.

صف شکن و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی و ارزیابی روش شبکه عصبی و مدل HEC - RAS در شبیه‌سازی آنمود بارش - رواناب در حوضه آبخیز کسلیان در صد خطای نسبی را برآورد نمودند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی با روش شبکه عصبی نسبت به مدل HEC-RAS از خطای کمتری برخوردار است.

یاسی و همکاران (۱۳۹۶) به شبیه‌سازی و ارزیابی جریان رودخانه‌هایی با جریان دائمی با دو مدل HEC - RAS و RubarBE در دانوب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تراز سطح آب کمترین حساسیت را به تغییر عوامل دیگر دارد و مدل HEC - RAS در شبیه‌سازی جریان از کارایی بهتری نسبت به مدل RubarBE برخوردار است.

ابوالفتحی و همکاران (۱۳۹۷) در بررسی و مدل‌سازی میزان رسوب رودخانه به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی (نمونه موردی: رودخانه گلرود) شهرستان بروجرد با استفاده از مشخصات فیزیکی زیر حوضه‌ها بیان کردند که هر چقدر میزان این شاخص‌ها کمتر باشد مقدار پیش‌بینی شده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است و شبکه عصبی مصنوعی دقت بهتری را نسبت به دو مدل دیگر در تخمین میزان رسوب منطقه نشان می‌دهد.

پاپنبرگ و همکاران^۱ (۲۰۰۵) به تحلیل عدم قطعیت جریان غیرماندگار به صورت یک‌بعدی در مدل HEC-RAS با انتخاب مقادیر متفاوت ضریب‌زبری پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد که در برخی از بازه‌ها تغییرات پروفیل طولی و عرضی قابل توجه و در برخی از بازه‌ها به شکل نامناسب به وقوع پیوسته است.

گیسون و همکاران^۲ (۲۰۰۶) در پژوهشی، قابلیت مدل HEC-RAS و HEC-6 را برای محاسبات انتقال رسوب رودخانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد مدل HEC-RAS شبیه‌سازی‌های خوبی را نسبت به مدل HEC-6 ارائه می‌دهد.

کوک^۳ (۲۰۰۸) در پایان‌نامه خود به مقایسه مدل یک‌بعدی HEC-RAS و مدل دو بعدی FESWMS در تهیه نقشه طغیان سیل پرداخته است. نتایج نشان داد تعداد مقاطع عرضی در فرآیند شبیه‌سازی و دقت تعیین وسعت سیل‌خیزی مهم می‌باشد و مدل یک‌بعدی HEC-RAS در تهیه نقشه طغیان سیل از کارایی بهتری برخوردار است.

استیونسون^۴ (۲۰۰۹) طی تحقیقی بر روی رودخانه کلیر، آنالیز حساسیت را با مدل یک‌بعدی HEC-RAS انجام داد. نتایج نشان داد آنالیز حساسیت مدل زمانی که تغییرات ضریب زبری مانینگ $\pm 5\%$ و تغییرات سطح تراز آب در پایین دست $2 \pm \text{cm}$ است، این مسئله نشان می‌دهد، که فرآیند کالیبراسیون به درستی صورت نگرفته و شبیه‌سازی ممکن است دارای خطا باشد. آشوری و همکاران^۵ (۲۰۰۹) با استفاده از مدل یک بعدی HEC-RAS به بررسی تغییر مورفولوژی بستر رودخانه قبل و بعد از احداث سد در پایین دست رودخانه سد ستار خان اهر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با احداث سد به دلیل جلوگیری از ورود جریان سیلاب‌های بزرگ به پایین دست، بستر رودخانه به طور تقریبی در طی سال‌های گذشته پایدار و ثابت باقی مانده است.

عزیزیان و همکاران^۶ (۲۰۱۰) در تحقیقی با عنوان واسنجی نتایج حاصل از مدل عددی HEC-RAS در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری (مطالعه موردی رودخانه زواریان)، اعلام کردند که حساسیت مدل به پارامترهایی همچون سرعت متوسط، عمق جریان و عرض سطح آب و تعیین ضریب مانینگ، در بازه‌های مختلف تحلیل خوبی در شبیه‌سازی جریان ارائه می‌دهد و دقت قابل قبولی را نشان می‌دهد.

شی و همکاران^۷ (۲۰۱۲) با بررسی فرآیند فرسایش و انتقال رسوب و مکانیسم آن بر روی شیب‌های (۱۰، ۲۰، ۱۵، ۲۵ درجه) در چین به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش و انتقال رسوب ذرات بزرگ‌تر از ۱۵۲/ میلی‌متر در مناطق شیب‌دار بستگی به قدرت جریان و دبی داشته و حمل رسوبات با افزایش شیب نیز رابطه مستقیم دارد. بررسی منابع و پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که امروزه استفاده از مدل‌های مهندسی رودخانه در تحلیل و شبیه‌سازی طغیان و انتقال رسوب بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

لذا هدف از این پژوهش بررسی تغییر مورفولوژی و فرآیندهای حاکم بر رودخانه آبشینه همدان با استفاده از مدل-HEC RAS جهت تجزیه و تحلیل روابط بین عوامل حاکم بر رودخانه و تغییرات هندسی آن می‌باشد. با توجه به اهمیت رودخانه مذکور در حوضه آبخیز سد اکباتان همدان، سعی شده تا با استفاده از مدل HEC-RAS وضعیت فرسایش و

¹ Papenberg et al

² Gibson et al

³ Cook

⁴ Stevenson

⁵ Ashouri et al

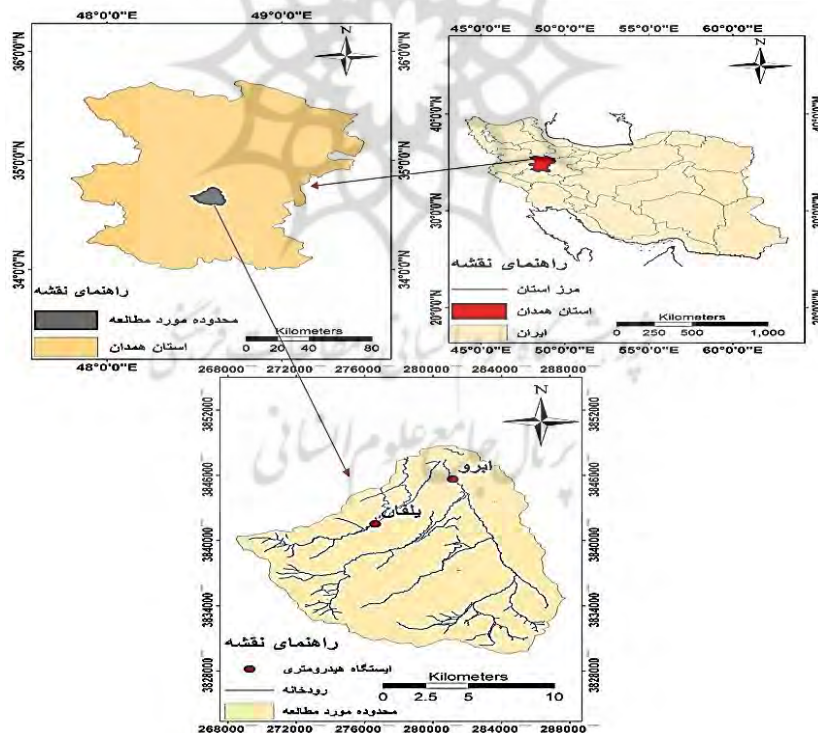
⁶ Azizian et al

⁷ Shi et al

رسوبگذاری رودخانه، مقاطع عرضی و مخاطرات و پیامدهای ناشی از آن بررسی شود. تا تأثیر تغییر مقاطع عرضی بر ظرفیت انتقال و رسوب، طغیان و سیلاب و بالا آمدن بستر مشخص شود و نیز بتوان از نتایج و دستاوردهای آن جهت مدیریت صحیح و علمی در منطقه به ویژه کنترل سیلاب و مسیلبابی، اجرای صحیح طرح‌های مکانیکی آبخیزداری و مدیریت بهینه منابع آب حوضه سد استفاده نمود.

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد اکباتان در جنوب شرقی شهرستان همدان بین $34^{\circ}34'$ و $45^{\circ}34'$ عرض شمالی و $48^{\circ}42'$ و $48^{\circ}48'$ طول شرقی قرار دارد. این حوضه یکی از زیر حوضه‌های رودخانه قره چای می‌باشد که در جنوب غربی کوه الوند واقع شده است (شکل ۱). رودخانه آبشینه از دامنه‌های شمالی کوه الوند سرچشمه و وارد سد اکباتان همدان می‌شوند. دبی متوسط رودخانه آبشینه $4/46$ متر مکعب در ثانیه در سال است. رژیم رودخانه تحت اقلیم نیمه مرطوب سرد کوهستانی برفی-بارانی و دائمی بوده و دارای دو ایستگاه هیدرومتری شامل رودخانه یلفان و ابرو پیش از ورود به سد اکباتان می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه حوضه $312/9$ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه آن $11/3$ درجه سانتی‌گراد است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب 3580 مربوط به قله الوند و 2100 متر خروجی سد و از نظر زمین‌شناسی و لیتولوژی به علت قرار گرفتن در مجاورت توده نفوذی الوند دارای سنگ‌های دگرگونی و نفوذی از نوع گرانیت، شیست، هورنفلس و به شکل محدود دارای تشکیلات آهکی می‌باشد.

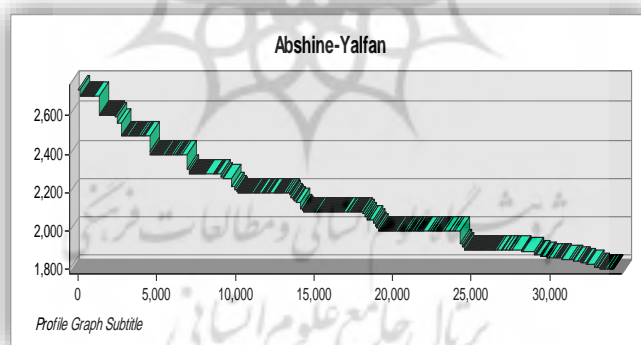


شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌ها و رودخانه آبشینه در استان و ایران

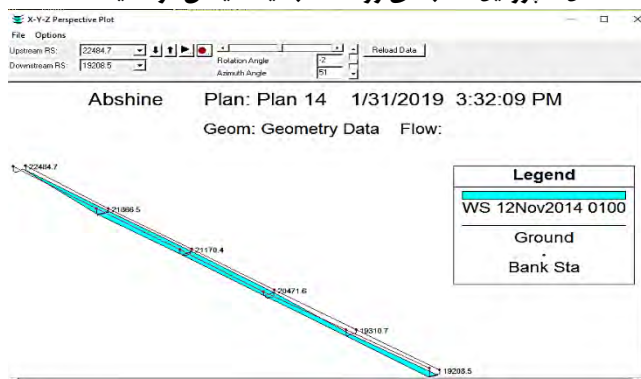
مواد و روش‌ها

رودخانه یلفان-آبشینه بیش از 52 کیلومتر طول دارد که برای مطالعه حاضر فقط 12 کیلومتر از طول اصلی رودخانه نزدیک به سد که دارای خصوصیات هیدرولوژیکی یکسان از نظر عمق، شیب و زبری می‌باشد، انتخاب شده است. تا تمام بررسی‌ها در یک بازه نسبتاً ثابت انجام تا بتوان تأثیر جریان (دبی) و ظرفیت انتقال رسوب (فرسایش و رسوبگذاری) را بر روی مقاطع

عرضی به خوبی تحلیل نمود. ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ در محیط GIS-ARC توسط الحاقیه HEC-GeoRAS و تصاویر Google Earth پروفیل رودخانه ترسیم شد. همچنین در این بررسی خط مرکزی جریان، خطوط کناره‌ها و مائندر رودخانه آبشینه بررسی و مقاطع عرضی همراه با بازدیدهای میدانی بر اساس داده‌های مشاهداتی در طول ۱۲ کیلومتر انتخاب شد. سپس بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، برای انجام مقایسه سرعت برشی و قدرت جریان در قسمت‌های مختلف رودخانه، مسیر مورد مطالعه به سه بازه تقسیم گردید. به طوری که در بازه ۱ از سرشاخه‌ها به طول ۴ کیلومتر، جنس بستر اغلب تخته سنگی تا قلوه سنگی از جنس گرانیت است، که با توجه به شیب و سرعت زیاد آب به عنوان منطقه اول انتخاب و بازه ۲ با توجه به کاهش شیب و تغییر جنس بستر که بیشتر از نوع تشکیلات هورنفلس و شیست است و مسیر رودخانه همچنان حالت دره‌ای خود را حفظ کرده و تا حدودی رودخانه الگوی مائندری به خود گرفته، به طول ۵ کیلومتر و بازه سوم در نزدیکی سد اکباتان دارای شیب ملایم و به عنوان خروجی مسیر رودخانه با جنس بستر بیشتر از رسوبات انباشتی از نوع ماسه، سیلت و رس و به طول ۳ کیلومتر در نظر گرفته شد. به منظور شبیه‌سازی تأثیر تغییر شکل هندسی مقاطع عرضی رودخانه آبشینه بر فرآیندهای انتقال جریان و رسوب، ابتدا تعداد ۶ مقطع عرضی رودخانه در طول ۱۲ کیلومتر و در سه بازه به تعداد پنج مقطع عرضی در فاصله ۱۲، ۱۰، ۸، ۶، ۴ کیلومتری پایین دست و مقطع شماره ۶ در نزدیکی سد اکباتان انتخاب و چهار نمونه از مصالح بستر و جناحین رودخانه، با توجه به تغییرات دانه‌بندی رسوبات، تغییر وضعیت شیب (توپوگرافی)، اتصال مسیل‌های مهم به رودخانه اصلی و یکنواختی مصالح، جنس بستر و لیتولوژی و کناره‌برداشت و آزمایشات مکانیک خاک، قطر ذرات و دانه‌بندی بستر بررسی شد. برای نمونه‌گیری رسوب بستر و کناره‌ها ابتدا پلان رودخانه رسم و محل‌های اخذ نمونه‌های رسوب مشخص شد. با توجه به کوتاه بودن مسیر ۱۲ کیلومتری رودخانه آبشینه سعی شده تا محل نمونه‌ها با دقت بیشتری انتخاب شوند (اشکال ۲ و ۳).



شکل ۲: پروفیل سه بعدی رودخانه آبشینه - یلفان در محیط GIS



شکل ۳: نمای سه بعدی از بازه مورد مطالعه رودخانه در طول ۱۲ کیلومتر و محل مقاطع عرضی

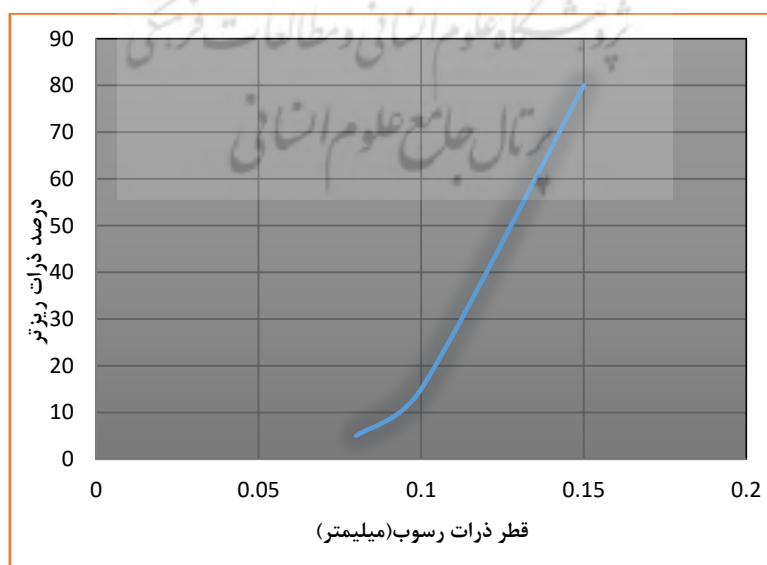
به منظور برآورد دبی جریان با دوره بازگشت‌های مختلف از آمار ایستگاه هیدرومتری یلفان و همچنین آمار بارندگی ایستگاه کلیماتولوژی سد اکباتان (سال‌هایی با آمار کامل) طی دوره آماری (از سال ۱۳۸۶ تا سال ۱۳۹۵) استفاده و با نرم‌افزار SMADA توزیع‌های مختلف آماری بررسی و توزیع لوگ پیرسون نوع سه با توجه به بهترین برازش برای این مطالعه انتخاب شده است. بنابراین با استفاده از توزیع مزبور مقادیر دبی حداکثر لحظه‌ای با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه گردید. به منظور شبیه سازی میزان انتقال رسوبات رودخانه آبشینه نیز از اطلاعات دبی و رسوب مربوط به سال‌های ۸۶-۹۵ ایستگاه یلفان و داده‌های رقوم سطح آب محاسبه شده و خط القعر موجود در آرشیو رودخانه آبشینه و مقاطع عرضی برداشت شده و موجود در اداره امور آب استان همدان استفاده گردید (جدول ۱ و ۲). سپس با استفاده از داده‌های رسوب منحنی دبی- رسوب ترسیم و به عنوان شرایط مرزی برای بازه بالادست و پایین‌دست انتخاب و وارد مدل شد. در ادامه با توجه به میزان ذرات ریزدانه و چسبندگی از رابطه روبی (Ruby) در تعیین سرعت سقوط و انتقال رسوبات استفاده و منحنی‌های دانه بندی در دوره آماری (۱۳۸۶-۱۳۹۵) ترسیم و تجزیه و تحلیل و به مدل معرفی شدند (شکل ۴).

جدول ۱: مشخصات ایستگاه هیدرومتری یلفان

نام رودخانه	ایستگاه	سال تاسیس	حوضه آبریز	مشخصات جغرافیائی				ادوات نصب شده		
				x	y	ارتفاع	اشل	لمینوگراف	پل	دیتالاگر
آبشینه	یلفان	۱۳۳۴	قره چای	۲۸۱۶۹۱	۳۸۴۴۸۰۶	۱۹۱۱	دارد	ندارد	دارد	دارد

جدول ۲: مقادیر دبی حداکثر لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه) بر آورد شده با دوره بازگشت‌های مختلف (۱۳۸۶-۱۳۹۵)

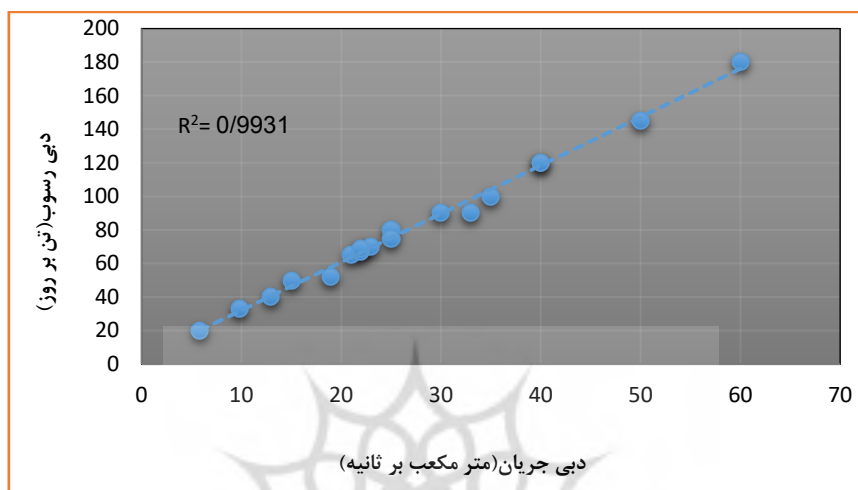
دوره بازگشت (سال)	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
دبی حداکثر لحظه‌ای	۱۳/۴	۴۴/۹	۷۳/۷	۱۱۵/۲	۱۵۰/۴	۱۸۷/۶



شکل ۴: نمونه‌ای از منحنی دانه‌بندی ذرات رسوب

بررسی‌ها نشان می‌دهد که دبی رسوبات معلق بصورت تابعی از دبی جریان بوده که با توجه به آمار موجود، تابع مربوطه محاسبه شد (رابطه ۱). بررسی مقدار R^2 به میزان ۰/۹۹۳۱ نشان می‌دهد که داده‌های مربوط به دبی و رسوب دارای همبستگی بسیار خوبی می‌باشند (شکل ۵ و رابطه ۱).

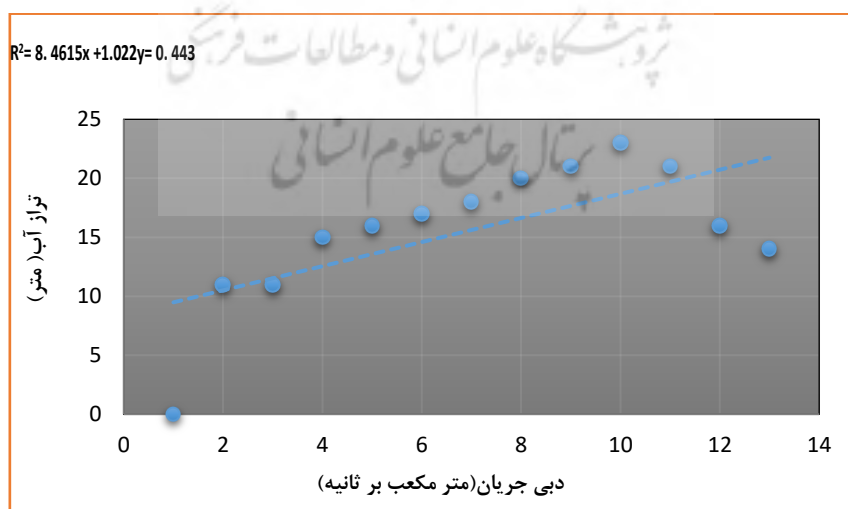
$$Q_s = 3/2876 Q_w^{8789/2} \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۵: رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب در ایستگاه یلفان

با توجه به مقدار همبستگی بین دبی جریان و تراز آب، در بررسی شبیه‌سازی جریان ماندگار، از منحنی دبی - اشل به عنوان شرط مرزی پایین دست و از عمق نرمال برای شرط مرزی بالادست نیز استفاده شده است (شکل ۶ و رابطه ۲).

$$R^2 = 8.4615x + 1.022y = 0.443 \quad \text{رابطه (۲)}$$



شکل ۶: منحنی دبی - اشل رودخانه آبشینه در پایین دست بازه مورد مطالعه (شرط مرزی پایین دست)

برای ارزیابی افت انرژی در رودخانه آبشینه، ضرایب همگرایی و واگرایی به علت وجود بازشدگی و تنگ‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت. این ضرایب در تغییرات بار سرعت از یک مقطع عرضی تا مقطع عرضی بعدی ضرب می‌شوند تا افت‌های بین

آن مقاطع، محاسبه و لحاظ شود. بررسی‌های حاصل از داده‌های دبی-رسوب و مقاطع عرضی نشان می‌دهد که افت انرژی در بازشدگی‌ها، بیشتر از تنگ‌شدگی‌ها می‌باشد که در مطالعه حاضر ضرایب همگرایی و واگرایی به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ (مستخرج از جدول ضرایب همگرایی) در نظر گرفته شده است (اداره مهندسی ارتش آمریکا، ۲۰۱۰).

معرفی مدل HEC-RAS

مدل ریاضی HEC-RAS، یک نرم‌افزار کاربردی جهت بررسی و شبیه‌سازی مقاطع عرضی و دارای هفت معادله انتقال رسوب در حالت جریان ماندگار و غیر ماندگار می‌باشد. مدل HEC-RAS از سه مؤلفه تحلیل هیدرولیکی یک بعدی برای محاسبات پروفیل سطح آب در حالت جریان ماندگار، شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار و محاسبات انتقال رسوب در مرز متحرک، تشکیل شده است. این سه مؤلفه از روند محاسبات هندسی و هیدرولیکی یکسان استفاده می‌کنند (جیلی فرد^۱، ۱۹۹۸).

اجرای اولیه مدل HEC-RAS

در این مطالعه، از روابط تجربی (۳) تا (۴) برای برآورد ضریب زبری مانینگ بهره گرفته شد.

$$n = 0.047d_{50}^{1.5}$$

$$n = \frac{d_{50}^{1.6}}{21.1}$$

$$n = 0.013d_{65}^{1.6}$$

$$n = 0.038d_{90}^{1.6}$$

رابطه (۳)

رابطه (۴)

در این روابط، d_5 قطر متوسط ذرات نمونه‌گیری شده از رودخانه برحسب متر، d_{65} عبارت است از قطری که ۶۵٪ وزنی ذرات بستر آبراهه که از آن عبور می‌کند، d_9 عبارت است از قطری که ۹۰٪ وزنی ذرات بستر از آن عبور می‌کند و برحسب متر است.

تحلیل ظرفیت انتقال رسوب با مدل HEC-RAS

جهت تحلیل ظرفیت انتقال رسوب با مدل HEC-RAS، شبیه‌سازی تغییرات پروفیل طولی بستر رودخانه آبشینه در اثر رسوب‌گذاری و فرسایش برای دوره‌های آماری (۱۳۸۶) تا (۱۳۹۵) بررسی شده است. ابتدا رودخانه آبشینه به قطعه‌های جریان ماندگار بر اساس متغیرهای دبی و زمان تقسیم شد. سپس برای هر یک از قطعه‌های جریان ماندگار، پروفیل سطح آب محاسبه و با استفاده از آن سرعت، شیب انرژی، عمق و سایر پارامترها در هر یک از مقاطع عرضی آنالیز شدند. بر این اساس نرخ انتقال رسوب در هر یک از مقاطع محاسبه و میزان رسوب انتقالی در طول زمان و همچنین میزان رسوب‌گذاری و یا فرسایش در هر یک از مقاطع برآورد شد. در ادامه با استفاده از آن، تغییرات حاصل در مقاطع هندسی برای بازه زمانی مربوطه تحلیل و در مرحله بعد، همین روند محاسباتی برای بازه زمانی بعدی تکرار شد. برای محاسبه نرخ انتقال رسوب،

¹. Jebelyfard

روابط مختلفی در مدل پیش‌بینی شده است (یانگ^۱، ایکرز-وایت^۲، انگلند-هانسن^۳، لارسن (کوپلند)^۴، میر-پیتر و مولر^۵، توفالتی^۶ و ویلکوک^۷) تا کاربر رابطه مناسب برای رودخانه مورد مطالعه را از میان آن‌ها انتخاب کند. این مدل بر اساس معادلات جریان و انتقال رسوب و معادله پیوستگی رسوب در شرایط یک بعدی و فرض جریان شبه غیر ماندگار (Quasi Unsteady Flow) توسعه یافته است (لورانگ و آگیت^۸، ۲۰۰۵). روندیابی رسوب با استفاده از معادله اکسندر (Exner) صورت می‌گیرد که در این رابطه معادله بقای جرم برای رسوب با توجه به معادله اکسندر به صورت زیر می‌باشد (اداره مهندسی ارتش آمریکا، ۲۰۱۰).

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial s}{\partial x} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن:

B: عرض رودخانه (متر)، H: ارتفاع کف بستر رودخانه (متر) و λ_p : تخلخل لایه فعال و ∂_s : دبی بار رسوبی حمل شده (متر مکعب بر ثانیه) و X: فاصله (متر) و t: زمان (ثانیه) می‌باشد.

حساسیت مدل

در این مطالعه مقادیر ضریب مانینگ و مقاطع عرضی مورد واسنجی قرار گرفت تا حساسیت مدل مشخص شود. لذا جهت این بررسی از مقادیر n مانینگ و فاصله مقاطع عرضی استفاده شده است. مقادیر n مانینگ از داده‌های محدوده آبراهه و دشت سیلابی تخمین زده می‌شوند. با توجه به تأثیر سرعت و عمق جریان در فرسایش و نیز اهمیت عرض سطح آزاد آب به عنوان پارامترهای مؤثر در تغییر مورفولوژی رودخانه، حساسیت مدل نسبت به تغییر ضریب مانینگ بررسی گردید (احمدی، ۱۹۹۲). برای بررسی آنالیز حساسیت، با در نظر گرفتن دقت ۸۰٪، تعداد مقاطعی که در آن‌ها درصد حساسیت بیش از ۲۰٪ بود، به منزله خطای کار در نظر گرفته شد. برای کمی کردن این موضوع، می‌توان درصد مقاطعی که تغییرات آن‌ها بیش از ۲۰٪ است، از دقت اولیه (۸۰٪) کسر و با عدد به دست آمده دقت نهایی را مشخص نمود. پس از واسنجی مدل برای شرایط جریان شبه غیرماندگار، اطلاعات شرایط مرزی و دانه‌بندی مواد بستر رودخانه، به مدل معرفی و با استفاده از رابطه‌های انتقال رسوب، ظرفیت انتقال رسوب محاسبه و بهترین رابطه نیز مشخص گردید.

بحث و یافته‌ها

در این مطالعه، با توجه به اهمیت نقش سرعت در پدیده فرسایش و نیز اهمیت عرض سطح آزاد آب و عمق، به عنوان پارامترهای مؤثر در مورفولوژی رودخانه، حساسیت مدل نسبت به تغییر ضریب مانینگ در سه پارامتر عرض سطح آب، سرعت و عمق جریان بررسی شد (جدول ۳).

جدول ۳: حساسیت مدل به تغییرات ضریب زبری مانینگ

تغییرات شیب	تغییرات سرعت (m/s)	تغییرات سطح جریان (m ²)	درصد تغییرات - ضریب زبری
-------------	--------------------	-------------------------------------	--------------------------

1. yang

2. Ackers & White

3 - Engelund & Hansen

4 - Laursen

5 - Meyer-Peter & Muller

6 - Toffaleti

7 - Wilcock

8. Lorang & Agget

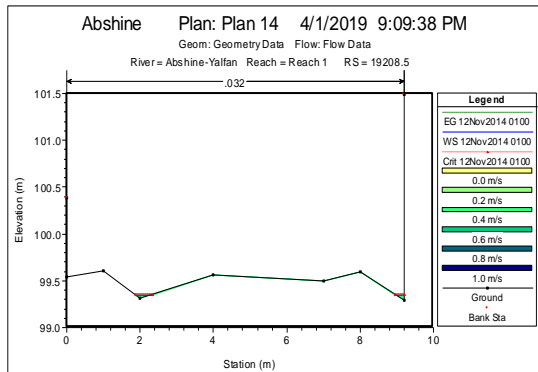
۰,۰۰۱۷۱۰	۶۳,۲۵	۲,۳۳	۰,۰۳۶	۱۵
۰,۰۰۱۶۲۳	۶۳,۱۶	۲,۳۳	۰,۰۳۵	۱۰
۰,۰۰۱۴۴۰	۶۱,۷۱	۲,۴۴	۰,۰۳۲	۰
۰,۰۰۱۰۶۹	۶۲,۴۵	۲,۴۱	۰,۰۲۸	- ۱۰
۰,۰۰۰۹۹۸	۶۲,۳۵	۲,۴۱	۰,۰۲۷	-۱۵

بررسی حساسیت سنجی مدل نشان داد که ضریب زبری مانینگ با مقدار $0/032$ تأثیر اندکی بر سطح و سرعت جریان آزاد داشته و از صحت خوبی برخوردار است. بنابراین با توجه به چنین نتیجه ای، اطلاعات رودخانه (داده‌های هندسی، هیدرولیکی و رسوب) جهت شبیه‌سازی جریان و رسوب، وارد مدل HEC-RAS و بررسی گردید، که برخی از نتایج آن به صورت نمودار، پروفیل، سری زمانی، نمودار تغییر بستر مقاطع عرضی و خروجی مفصل جدولی انتخاب و ارائه شده است (اشکال ۶ الی ۱۱). نتایج حاصل از خروجی مدل HEC-RAS برای جریان با دوره بازگشت ۵۰ ساله نشان می‌دهد که وضعیت مقاطع عرضی در فاصله ۱۲ کیلومتری از بالادست به پایین دست رودخانه آبشینه از روند ثابتی پیروی نمی‌کند. به طوریکه به دلیل یکنواخت نبودن جنس بستر و کناره‌ها و اتصال سرشاخه‌های فرعی، مقاطع عرضی به شدت تغییر کرده است. که این موضوع بیشتر به تغییرات مکانی الگوی کنش (فرسایش و رسوب گذاری) و فراوانی سیلاب‌های منفرد، بزرگ و جریان-های کوچکتر و کم آب در حوضه آبخیز آبشینه مربوط می‌باشد که با نتایج (خیری زاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۷۶؛ ایلدرمی و همکاران ۱۳۹۵: ۱۴۶؛ آشوری و همکاران، ۲۰۰۹: ۸۷) مطابقت دارد. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که تغییر جنس بستر در طول ۱۲ کیلومتری رودخانه آبشینه از سازندهای گرانیت به شیست و هورنفلس و آهک بعلاوه ویژگی‌های دانه‌بندی آن‌ها و پارامترهای دیگر مانند وضعیت پوشش گیاهی، پیچ و خم‌های رودخانه از عوامل موثر در این رابطه باشند. اما بررسی دبی و رسوب به خوبی نشان داد که رواناب (دبی متوسط) بیش‌ترین تأثیر را در تغییر مورفولوژی رودخانه دارد که با فرآیند فرسایش و رسوبگذاری به صورت توأم مقاطع عرضی را تغییر می‌دهند (اشکال ۷، ۸ و ۹). همچنین با توجه به اندازه قطر ذرات رودخانه، فرآیند فرسایش، افزایش سرعت آب و شیب، مقاطع عرضی بالا دست V شکل شده و در آنها تنگ شدگی بستر رخ داده است. در حالی که در مقاطع میانی به دلیل فرآیند فرسایش و رسوبگذاری، مقاطع عرضی رودخانه به شکل U و در انتهای مسیر به دلیل وجود سداکباتان و فرآیند انباشت به حالت طشتکی کشیده تغییر مورفولوژی داده است (شکل ۱۶).

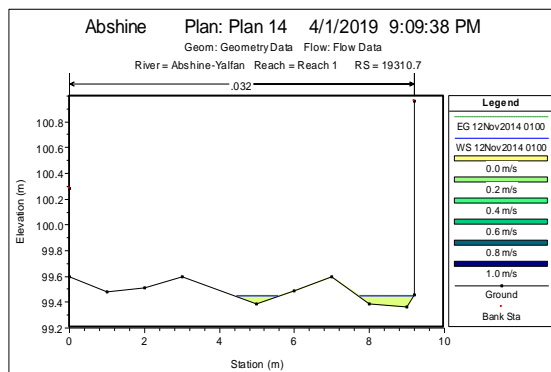
بررسی شکل (۷) نشان می‌دهد که در دو مقطع (الف و ب) عمق هیدرولیکی یکسانی دارند، بنابراین بار رسوبی در مقطعی که دارای سرعت متوسط و تنش برشی بزرگتری باشد، بیشتر است که این موضوع در (مقطع الف) به خوبی قابل مشاهده است. به طوری که با افزایش سرعت و ثابت بودن عمق هیدرولیکی عدد فرود نیز در این مقطع بزرگتر شده است.

شکل (۸) بیانگر این است که در مقاطعی با سرعت‌های یکسان، هر یک از مقاطعی که دارای دبی در واحد عرض، عمق و عدد فرود بزرگتری باشند، نرخ انتقال رسوب در آن‌ها بیشتر شده است که این موضوع ثابت می‌کند که در این مقاطع تأثیر شیب بستر از دبی بسیار کمتر است و نشان می‌دهد که در تخمین میزان دبی رسوب حوضه رودخانه آبشینه بر پایه بارش و دبی، دبی متوسط نقش اصلی را در انتقال رسوب دارد.

بررسی شکل (۹) در مقطع (ر) که در پایین دست حوضه قرار دارد، نشان می‌دهد که ذرات رسوبی حمل شده تقریباً قطر برابری دارند و در وضعیت قرارگیری با سرعت‌های متوسط یکسان هستند که این موضع به دلیل نزدیکی به دهانه ورودی جریان به مخزن سداکباتان می‌باشد و باعث می‌شود که بار رسوبی عبوری از مقطع (ز) بیشتر از مقطع (ر) باشد. این مساله را می‌توان به کمک پارامترهای رینولدز برشی ذره توجیه کرد. بطوری که بزرگتر بودن سرعت برشی و به تبع آن اعداد رینولدز برشی نیز در مقطع (ز) بیشتر شده و در نتیجه بار رسوبی عبوری بیشتری را موجب شده است (جدول ۴).



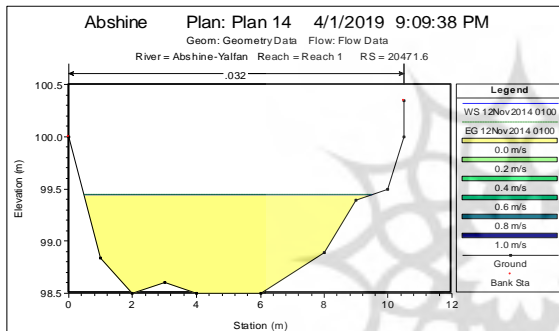
(ب)



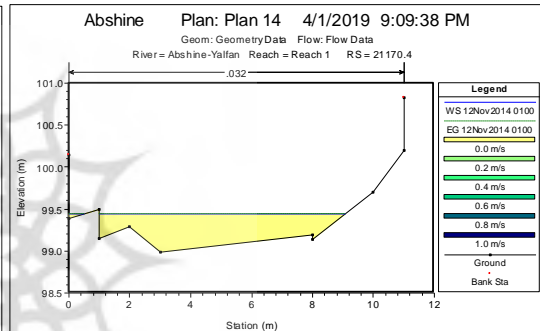
(الف)

ب- مقطع شماره دو در ده کیلومتری (مقاطع V شکل و فرسایش)

شکل ۷: الف- مقطع شماره یک در دوازده کیلومتری

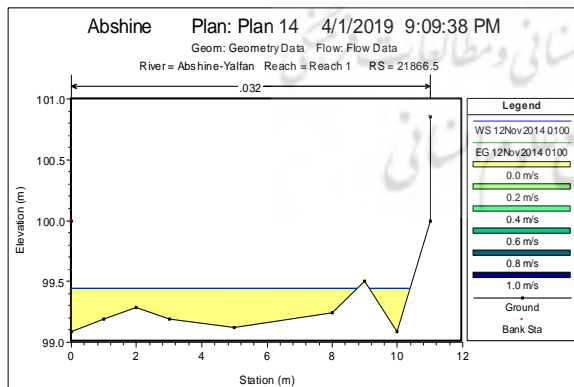


(د)

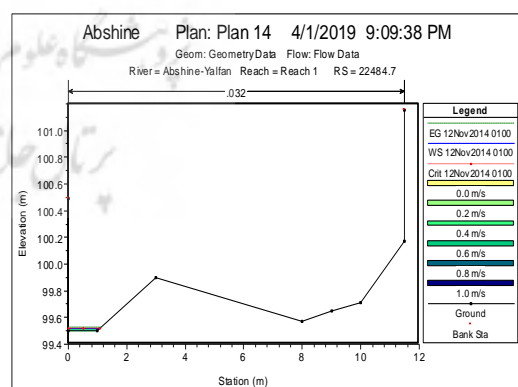


(ج)

شکل ۸: ج- مقطع شماره سه در هشت کیلومتری د- مقطع شماره چهار در شش کیلومتری (مقاطع U شکل، فرسایش و رسوبگذاری)



(ز)



(ر)

شکل ۹: ر- مقطع شماره پنج در چهار کیلومتری ز- مقطع شماره شش در نزدیکی سد (مقاطع باز و انباشت رسوب)

جدول ۴: مشخصات هیدرولیکی مقاطع عرضی در بازه مورد مطالعه (رودخانه آبشینه)

τ	Re	Q_s	q	D	d_{50}	S	U _{eq}	مقطع
(اعداد شیلدز، آستانه)	(رینولدز برشی)	(دبی عبوری بار رسوبی)	(دبی عبوری در واحد عرض)	(عمق هیدرولیکی)	(قطر ذرات کمتراز ۵۰ درصد)	(شیب بستر)	(دبی)	

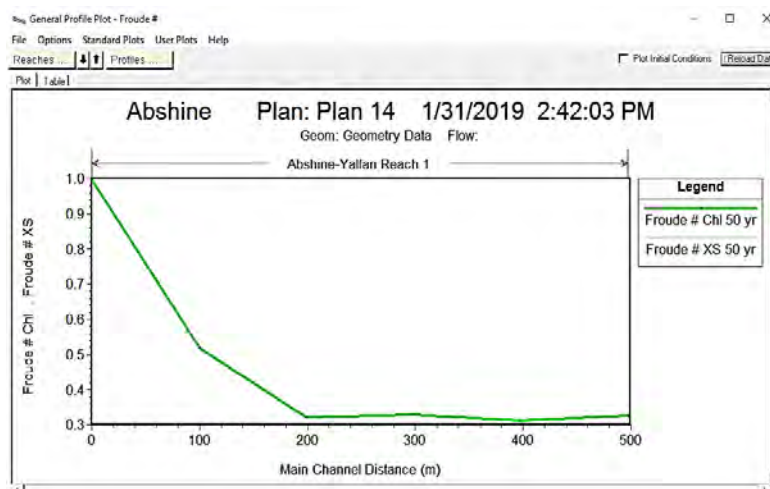
حرکات (ذرات)								
۴/۹	۱۹۸/۲۵	۲۰	۵	۰/۶۳	۰/۰۵	۳/۵	۵/۴	۱
۸/۵	۳۵۲/۱۲	۳۵	۱۰	۰/۷۸	۰/۱	۵/۵	۴/۱	۲
۶/۹	۱۶۸/۱۷	۵۵	۲۰	۰/۸۶	۰/۱۵	۳/۲	۳/۸۵	۳
۵/۸	۲۹۸/۳۲	۸۰	۳۰	۰/۵۷	۰/۲	۵/۱	۳/۱	۴
۲/۱	۱۸۵/۲۶	۱۲۰	۴۰	۰/۴۶	۰/۱۷	۴/۲	۲/۳	۵
۱/۳	۲۴۸/۲۳	۱۴۰	۵۰	۰/۳۱	۰/۱۹	۳/۳	۲/۱	۶

از ویژگی‌های مهم هندسی مدل HEC-RAS وارد کردن اطلاعات مربوط به مقاطع عرضی می‌باشد که در خروجی از آن تأثیر دبی‌های مختلف در زمان‌های مختلف بر روی شکل مقاطع عرضی نمایان است. برای نمونه اثر دبی در شکل‌های (۹، ۸، ۷) برای تاریخ ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت حمل رسوب در بازه مورد بررسی بر اساس توابع مختلف، متغیر می‌باشد. بر اساس رابطه رویی ظرفیت انتقال رسوب در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی رودخانه آبشینه از بالا دست به سمت پایین دست کاهش می‌یابد که علت آن کاهش شیب بستر و در نتیجه کاهش قدرت جریان برای فرسایش رسوبات بستر رودخانه می‌باشد. بررسی پروفیل طولی بستر رودخانه نشان می‌دهد، مقدار شیب رودخانه در بازه میانی و انتهایی رودخانه به میزان ۱/۵۶ و ۰/۸۹ درصد کاهش می‌یابد. مقادیر عددی فرود و بررسی نمودار تغییرات آن از بالادست نشان می‌دهد (شکل ۱۰) که مقدار آن از ۰/۹۸۹ در بازه بالا دست به مقدار ۰/۵ یعنی نصف در بازه میانی و در پایین دست (۸ کیلومتری) به ۰/۳۵ کاهش یافته است. بنابراین با توجه به پارامترهای موثر در محاسبه عدد فرود که شامل سرعت (V)، نیروی ثقل (g)، و فاصله (L) می‌باشد، محاسبه آن نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از بالا دست در طول مسیر رودخانه، شدت تأثیر این پارامتر به دلیل کاهش شیب، کم شده است (رابطه ۶). نتایج حاصل از بررسی نشان می‌دهد که عدد فرود نسبت عکس با فاصله داشته، در حالی که با سرعت رابطه مستقیم دارد (جدول ۵). این موضوع ثابت می‌کند که در مقاطع عرضی بالادست فرآیند فرسایش، در مقاطع میانی فرسایش و رسوبگذاری و در پایین دست انباشت رخ می‌دهد که سیر نزولی عدد فرود نیز این موضوع را ثابت می‌نماید (شکل ۱۰).

$$F = V / \sqrt{g.L} \quad \text{رابطه (۶)}$$

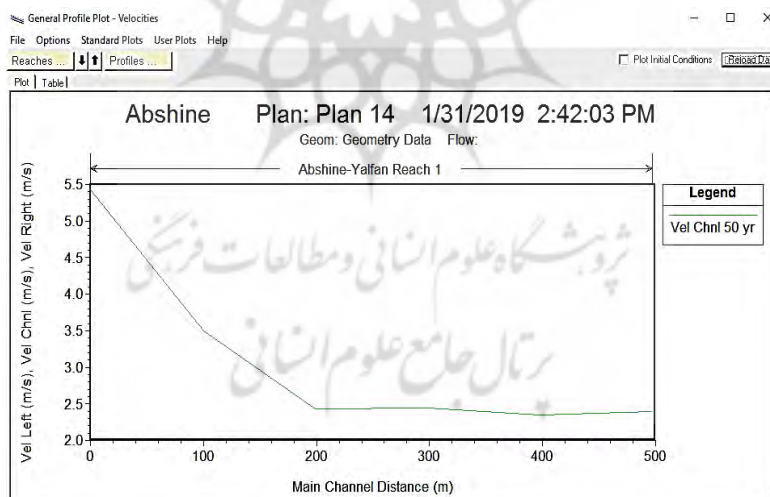
جدول ۵: رابطه عدد فرود، سرعت و مقاطع عرضی رودخانه آبشینه

مقاطع	F عدد فرود /	سرعت V /	شکل مقطع و فرآیند
بالایی	۰/۹۸۹	زیاد	V شکل و فرسایشی
میانی	(۰/۳۵ - ۰/۵)	متوسط	U شکل و فرسایش و انباشت
پایینی	۰/۳	کم	انباشت



شکل ۱۰: نمودار تغییرات عدد فرود در طول رودخانه آبشینه

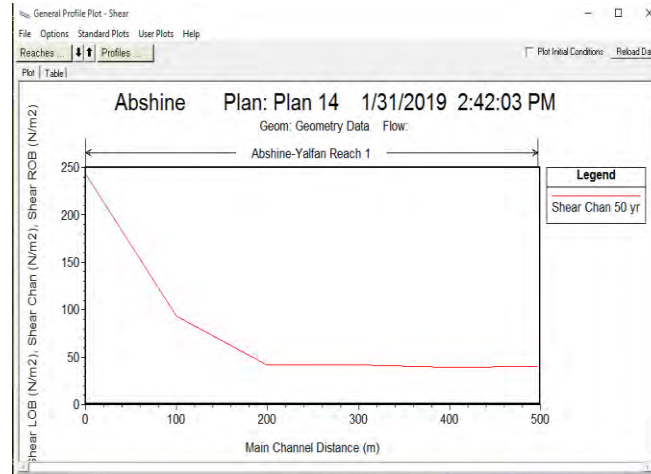
مقدار حداقل و حداکثر سرعت جریان در مقاطع رودخانه بیانگر این است که سرعت جریان بین $\frac{2}{3}$ تا $\frac{5}{4}$ متر بر ثانیه بوده و نشان می‌دهد که تقریباً در بیشتر مقاطع رودخانه جریان از نوع زیر بحرانی بوده و به طور متوسط دارای سرعتی معادل $\frac{3}{85}$ متر بر ثانیه است (شکل ۱۱) که به طور قابل ملاحظه‌ای به دلیل شیب زیاد ناشی از کوهستانی بودن حوضه آبخیز سد اکباتان به همراه دبی و رواناب حاصل از بارندگی است، که نقش موثری در فرسایش و رسوبگذاری دارند. همانطور که از نمودارهای شکل‌های (۱۰ و ۱۱) استنباط می‌شود، در تنش برشی بار بستر عبوری از مقطعی بیشتر است که دارای سرعت متوسط و عدد فرود بزرگتری باشند که در شکل ۸ (ج، د) به خوبی مشخص می‌باشد.



شکل ۱۱: نمودار سرعت متوسط جریان

بررسی مقدار تنش برشی در بازه‌های مذکور نیز نشان می‌دهد که مقدار تنش برشی به ترتیب $\frac{25}{67}$ ، $\frac{20}{67}$ و $\frac{18}{67}$ نیوتن بر متر مربع در بازه‌ها می‌باشد که متناسب با آن مقدار متوسط قدرت جریان نیز کاهش می‌یابد. مقدار متوسط قدرت جریان در بازه ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر با ۷۶۵، ۵۸۶ و ۳۵۹ نیوتن بر متر مربع می‌باشد که از بالا دست به پایین دست در حال کاهش است و نشان می‌دهد که انرژی جریان برای حفر بستر و تغییر مقاطع عرضی کاهش یافته است. همچنین مقدار حداقل و حداکثر تنش برشی دبی در رودخانه آبشینه (شکل ۱۲) به ترتیب $\frac{49}{42}$ و $\frac{248}{11}$ نیوتن بر مترمربع برای بادوره بازگشت ۵۰ ساله، بیانگر این است که رودخانه قابلیت حفر بستر را در طول ۱۲ کیلومتری به شکل قابل توجهی داراست. بررسی شکل (۱۲) نشان می‌دهد که در دوتنش برشی با سرعت برشی یکسان، بار رسوبی

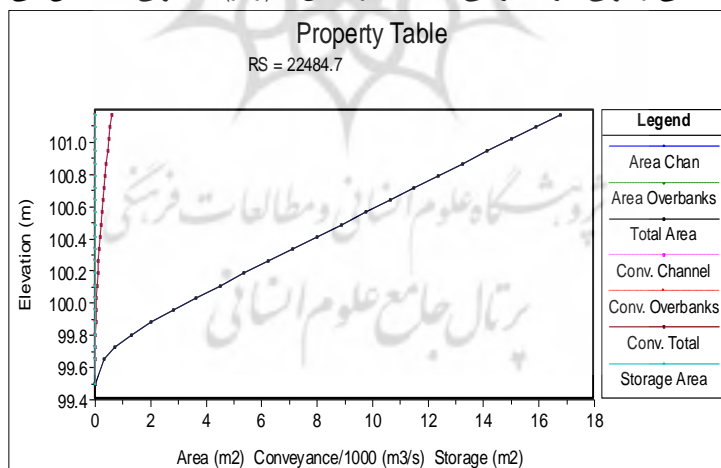
عبوری از مقطعی بیشتر است که دارای سرعت متوسط، عدد فرود و شیب بزرگتری باشد که در شکل ۸ (ج، د) به خوبی مشخص می باشد.



ع

شکل ۱۲: نمودار تغییرات سرعت برشی (خط انرژی) جریان در طول رودخانه آبشینه همدان

در این مدل جداول خروجی به صورت مفصل و مختصر می باشد که در شکل (۱۳ و ۱۴) نمونه ای از جدول خروجی مفصل نشان داده شده که حاوی تمامی پارامترهای هیدرولیکی جریان مرتبط با دبی پیک به مقدار ۱۵ / ۹ مترمکعب بر ثانیه و برای مقطع عرضی شماره (۶) می باشد. همانطور که در شکل (۱۳) مشخص است عمق هیدرولیکی از پارامترهای چندان موثر در نرخ انتقال دبی رسوبی نمی باشد. زیرا در مقطعی که عمق هیدرولیکی بیشتری نسبت به مقطعی که عمق هیدرولیکی کمتری دارند، دبی رسوبی نیز کمتر می باشد که در شکل ۹ (ر، ز) به خوبی مشخص می باشد.



شکل ۱۳: نمونه ای از نمودار ویژگی های هیدرولیکی برای مقطع شماره شش در نزدیکی سد

Cross Section Output

File Type Options Help

River: Abshine-Yalfan Profile: 12Nov2014 0100

Reach: Reach 1 RS: 20471.6 Plan: Plan 14

Plan: Plan 14 Abshine-Yalfan Reach 1 RS: 20471.6 Profile: 12Nov2014 0100

		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	99.45	Wt. n-Val.		0.032	
Vel Head (m)	0.00	Reach Len. (m)	100.00	98.80	100.50
W.S. Elev (m)	99.45	Flow Area (m ²)		6.44	
Crit W.S. (m)		Area (m ²)		6.44	
E.G. Slope (m/m)	0.000000	Flow (m ³ /s)		0.01	
Q Total (m ³ /s)	0.01	Top Width (m)		9.03	
Top Width (m)	9.03	Avg. Vel. (m/s)		0.00	
Vel Total (m/s)	0.00	Hydr. Depth (m)		0.71	
Max Chl Dpth (m)	0.95	Conv. (m ³ /s)		154.9	
Conv. Total (m ³ /s)	154.9	Wetted Per. (m)		9.53	
Length Wtd. (m)	98.80	Shear (N/m ²)		0.00	
Min Ch El (m)	98.50	Stream Power (N/m s)	502.72	0.00	0.00
Alpha	1.00	Cum Volume (1000 m ³)		0.33	
Frctn Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m ²)		0.73	
C & E Loss (m)	0.00				

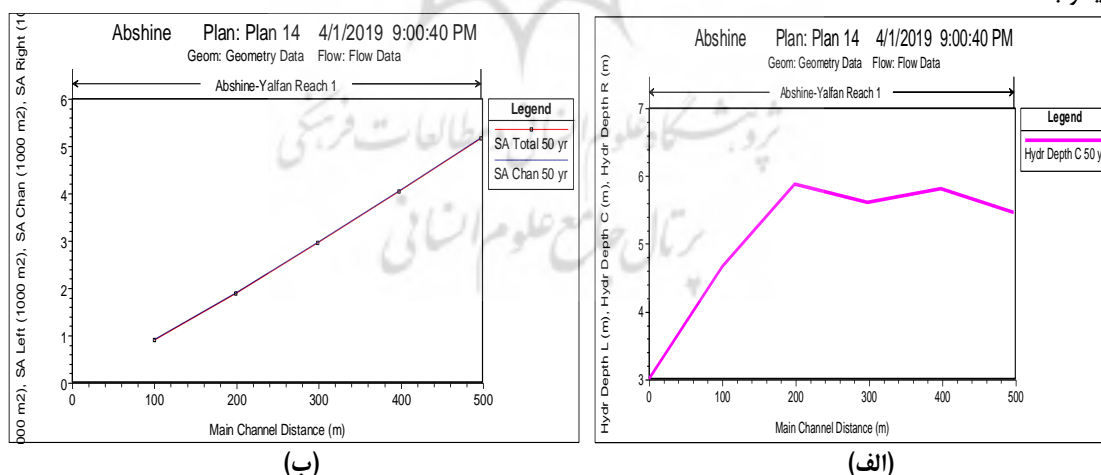
Errors, Warnings and Notes

Warning: The conveyance ratio (upstream conveyance divided by downstream conveyance) is less than 0.7 or greater than 1.4. This may indicate the need for additional cross sections.

Select River Station

شکل ۱۴: نمونه‌ای از خروجی جدول مفصل مقطع عرضی در محیط HEC-RAS

با توجه به اینکه یکی از خروجی‌های مهم و امکانات کاربردی مدل HEC-RAS نمایش خصوصیات هیدرولیکی در بازه اصلی رودخانه از جمله تراز سطح آب، عمق هیدرولیکی، تنش برشی و متوسط سرعت می‌باشد. در شکل (۱۵) نمونه‌ای از پارامترهای جریان (عمق هیدرولیکی و منحنی تراز سطح آب) در راستای طولی رودخانه برای دوره بازگشت ۵۰ سال نشان داده شده است. بررسی شکل (۱۵) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت و ثابت بودن عمق هیدرولیکی، عدد رینولدز و عدد فرود بزرگتر شده و در نتیجه نرخ انتقال بیشتر خواهد بود و باعث شده که در مقاطع میانی نرخ انتقال رسوب بیشتر از مقاطع دیگر باشد.



شکل ۱۵: الف- منحنی عمق هیدرولیکی و ب- منحنی تراز سطح آب برای دوره بازگشت ۵۰ سال



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱۶: (الف) سد اکباتان و انباشت رسوبات، مقطع شماره ۶ در نزدیکی سد (مقطع باز) در ۲ کیلومتری (ب) مواد سیلابی (فرسایش و رسوگذاری) در بستر رودخانه آبشینه، مقطع شماره ۴ به شکل U در ۶ کیلومتری (ج) مقطع شماره ۲ در ۱۰ کیلومتری (مقاطع ۷ شکل و فرسایش)

در این بررسی پس از اجرای مدل رسوبی و تعریف یک پلان و وارد نمودن فایل‌های مذکور و پایان شبیه‌سازی، جزئیات مربوط به خروجی‌های هیدرولیکی و رسوبی، بصورت نمودار مکانی رسوب، طرح شماتیک از عمق رسوب‌گذاری و مقطع عرضی از یک ایستگاه مربوط به پایین دست، بعد از سه بار شبیه‌سازی مختلف استخراج و ارائه شد (اشکال ۱۸، ۱۹ و ۲۰). نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که ظرفیت حمل رسوب در بازه مورد مطالعه رودخانه آبشینه با انتخاب روابط مختلف، متغیر می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که، مقادیر رسوبات محاسبه شده به وسیله رابطه تابع ینگ و روش سرعت سقوط روبی (Ruby) به عنوان مناسب‌ترین رابطه انتخاب شده‌اند. بررسی نتایج حاصل از رابطه روبی در تعیین سرعت سقوط و انتقال رسوبات و رابطه رگرسیونی بین دبی (Q) و عرض (W)، عمق (D)، سطح مقطع (A) و سرعت (V) و نتایج حاصل از مدل HEC-RAS برای دوره بازگشت ۵۰ ساله نشان می‌دهد که وضعیت عرضی مقاطع رودخانه از بالادست به پایین دست به دلیل جنس بستر و کناره‌ها و اتصال سرشاخه‌های فرعی در طول مسیر، تغییرات مکانی الگوی فرسایش و رسوبگذاری از روند ثابتی پیروی نمی‌کند. این بدان معنی است که رواناب بیشترین تأثیر را در انتقال رسوب و تغییر مورفولوژی رودخانه داشته و مقدار ظرفیت انتقال رسوب با سرعت جریان رابطه مستقیم دارد که با افزایش سرعت جریان، ظرفیت انتقال رسوب نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. نتایج حاصل از روابط رگرسیونی خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی و از بین روابط تعیین شده بین دو متغیر (وابسته و مستقل) و بر اساس بیش‌ترین ضریب تعیین، کمترین خطای استاندارد و کمترین سطح معنی‌داری، نشان داد که مدل نمایی رابطه مناسب جهت تحلیل هیدرولیک جریان می‌باشد. با توجه به تابع نمایی به دست آمده، از بین متغیرهای مستقل، ظرفیت انتقال رسوب بیش‌تر به دبی جریان وابسته است که با افزایش دبی جریان، انتقال ظرفیت رسوب نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. رابطه (۷) رابطه بین دبی و عوامل دیگر را در مدل نمایی نشان می‌دهد:

رابطه (۷)

$$Q = 154.619 V^{7.423} W^{133.125} A^{2.289} D^{-589.187}$$

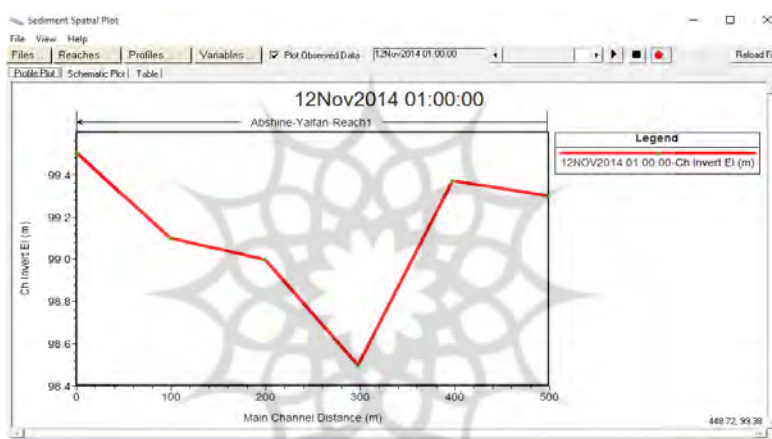
همان‌گونه که معادله (۶) نشان می‌دهد، تأثیر معکوس دبی جریان و عمق جریان را می‌توان مشاهده کرد و از طرفی دبی، سرعت و سطح مقطع جریان دارای بیشترین سطح معنی‌داری را بیان می‌نمایند. رابطه رگرسیونی بین متغیر وابسته ظرفیت رسوب (SC) و متغیرهای مستقل تنش برشی (SH)، دبی (Q) و سرعت جریان (V) بر اساس مقادیر سطح معنی‌داری، میزان ضریب تعیین و خطای استاندارد بررسی شد. میزان ضریب تعیین به دست آمده در تابع نمایی برای V، Q، SH از مقادیر توابع رگرسیونی درجه ۲ و درجه ۳ کمتر و از تابع رگرسیونی خطی ساده بیشتر بود. همچنین، در این تابع متغیرها دارای کمترین خطای استاندارد و سطح معنی‌داری نسبت به خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ را نشان دادند، بنابراین مدل‌های

مناسی برای رودخانه مورد بررسی به حساب و به شمار می‌آیند. رابطه (۸) رابطه بین ظریت رسوب و عوامل دیگر را در مدل نمایی نشان می‌دهد:

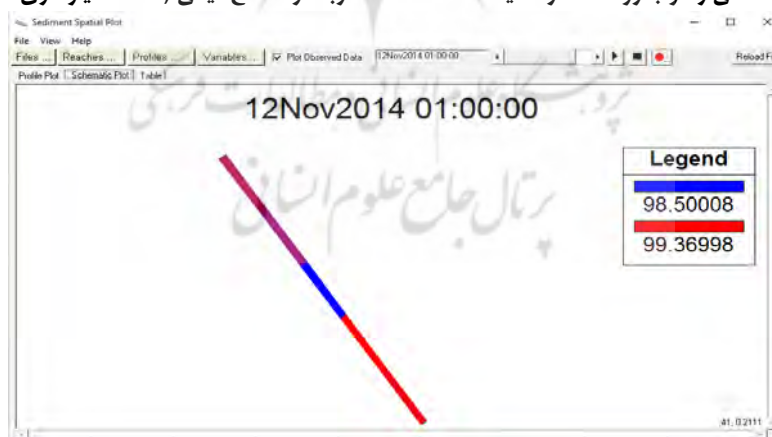
رابطه (۸)

$$SC = 1.128 V^{4.567} Q^{1.043} SH^{-28.125}$$

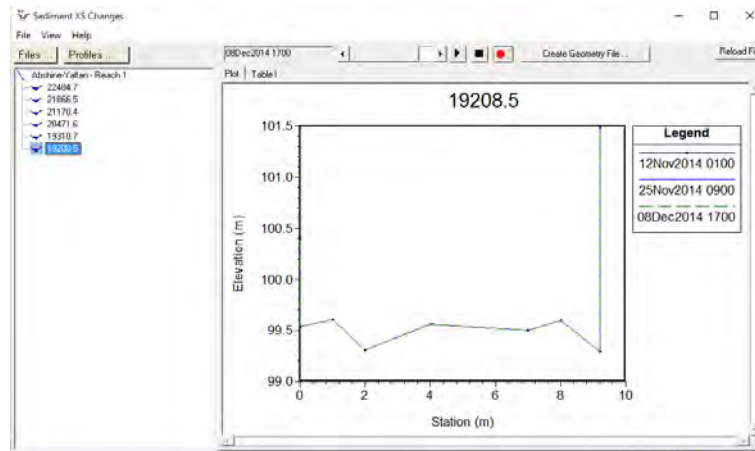
نتایج جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره بازگشت ۵۰ ساله نشان می‌دهد که مقاطع عرضی در رابطه با دبی عبوری و رسوب به ویژه در فرآیند انباشت رسوبات و طغیان رودخانه عکس العمل‌های متفاوتی را نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد که انباشت رسوبات در بستر مقاطع میانی (۶ تا ۸ کیلومتری مسیر رودخانه) باعث بالا آمدن بستر و به تبع آن بالا رفتن دبی عبوری و بروز طغیان شود (اشکال ۱۹، ۲۰ و ۲۱). که یافته‌های این پژوهش با نتایج حاصل از تحقیقات (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۹؛ اکبرزاده و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۰ و ۲۱). که یافته‌های این پژوهش با نتایج حاصل از تحقیقات (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۹؛ اکبرزاده و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۰ و ۲۱؛ ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۵) مطابقت و همخوانی داشته و دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با آن‌ها می‌باشد.



شکل ۱۹: نمودار مکانی رسوب رودخانه در محیط HEC-RAS در بستر مقاطع میانی (۶ تا ۸ کیلومتری مسیر رودخانه)



شکل ۲۰: طرح شماتیک از عمق رسوب‌گذاری رودخانه در محیط HEC-RAS مقاطع میانی (۶ تا ۸ کیلومتری مسیر رودخانه)



شکل ۲۱: مقطع عرضی پایین دست بعد از سه شبیه سازی مختلف مقاطع میانی (۶ تا ۸ کیلومتری مسیر رودخانه)

نتیجه گیری

امروزه مطالعه تأثیر تغییرات مقاطع عرضی رودخانه بر فرآیندهای حاکم بر ظرفیت انتقال رسوب و تعیین مقاطع طغیانی با استفاده از مدل HEC-RAS مورد توجه مدیران و برنامه ریزان منابع آب قرار گرفته است. در این پژوهش سعی شد تا با شناخت مقاطع عرضی مستعد سیل در منطقه و بررسی مخاطرات و پیامدهای ناشی از وقوع آن، مسیری از رودخانه آبشینه را که نیازمند مهندسی رودخانه می باشد مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که تغییرات عرضی رودخانه آبشینه به تغییرات مکانی الگوی کنش (فرسایش و رسوب گذاری) بستگی دارد و به تکرار و فراوانی وقوع سیلاب های منفرد و بزرگ نسبت داده می شود. بطور کلی نتایج بررسی ها و مشاهدات میدانی نشان می دهد که مهمترین دلایل تغییر مورفولوژی مقاطع عرضی رودخانه آبشینه شامل پارامترهای ژئو مورفولوژی مانند شیب، توپوگرافی، لیتولوژی، تفاوت در جنس بستر رودخانه و پارامترهای هیدرولیکی جریان همچون، تغییر سطح، عمق و سرعت جریان آب میباشند. که فرآیند فرسایش و رسوبگذاری را در طول مسیر رودخانه آبشینه کنترل می کنند. بررسی ها بیانگر این است که مقدار ظرفیت رسوب با رواناب و سرعت جریان رابطه مستقیم دارد و از بین متغیرهای مستقل، ظرفیت انتقال رسوب بیش تر به دبی جریان وابسته است که با افزایش دبی جریان، انتقال ظرفیت رسوب نیز افزایش می یابد و بالعکس. مقادیر سرعت جریان نشان دهنده وضعیت رودخانه آبشینه در حد زیر بحرانی است. به طوری که با افزایش و کاهش سرعت جریان و تغییر مورفولوژی، ظرفیت انتقال رسوب نیز تغییر می یابد که این امر موجب تغییر مورفولوژی رودخانه و تقسیم آن به مقاطع فرسایشی، تراکمی و انتقالی شده است. بر اساس رابطه رویی ظرفیت انتقال رسوب در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی رودخانه آبشینه از بالا دست به سمت پایین دست کاهش می یابد. علت کاهش ظرفیت انتقال و حمل رسوب رودخانه در نتیجه کاهش شیب بستر، در نتیجه کاهش قدرت جریان برای فرسایش بستر رودخانه است. بررسی پروفیل طولی بستر رودخانه نشان می دهد، مقدار شیب رودخانه در بازه میانی و انتهایی رودخانه به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و مقدار تنش برشی در بازه های مذکور بسیار متغیر بوده و متناسب با آن مقدار متوسط قدرت جریان نیز کاهش می یابد. به طوری که در بازه ابتدایی، میانی و انتهایی سیر نزولی داشته و نشان می دهد که سرعت جریان کاهش می یابد و رودخانه نه تنها قادر به حفر بستر نبوده، بلکه ظرفیت انتقال کاهش یافته و رسوبگذاری می نماید که این موضوع به دلیل وجود سد اکباتان در پایین دست رودخانه آبشینه است. بررسی میزان دبی حداکثر لحظه ای برای دوره بازگشت ۵۰ ساله بیانگر این است که در مقطع عرضی از دوازده کیلومتری پایین دست تا مقطع عرضی موجود در نزدیکی سد، رودخانه قادر به ایجاد طغیان از بستر رودخانه و کناره ها در این بازه نبوده و لذا خطری برای مناطق حاشیه رودخانه و اراضی آن در پی نخواهد داشت. اما در مقطع عرضی واقع در هشت کیلومتری پایین دست، میزان دبی عبوری از این مقطع بالا بوده و با انباشت رسوبات در این بازه، بستر بالا آمده و

طغیان رودخانه اتفاق خواهد افتاد. بنابراین لازم است که در این مقطع مدیریت لازم و ساماندهی مسیل و مهندسی رودخانه انجام گیرد. با توجه به اینکه در پایین دست بازه مورد مطالعه، سد اکباتان قرار دارد و با عنایت به اینکه تابع یانگ نسبت به سایر توابع انتقال رسوب بر آورد بهتری دارد می‌توان از آن در در سایر مسیرهای رودخانه حوضه استفاده و میزان رسوب ورودی مخزن سد اکباتان را محاسبه نمود.

منابع

- ابوالفتحی، داریوش؛ مددی، عقیل؛ اصغری، صیاد، ۱۳۹۷، مدلسازی میزان رسوب رودخانه به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی (نمونه موردی: رودخانه گلرود)، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۷، شماره ۲، صص ۲۰۸-۱۹۶.
- اسدی، فاطمه؛ فضل اولی، رامین؛ عمادی، علیرضا، ۱۳۹۶، بررسی تغییرات بستر رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه تالار)، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال ۸، شماره ۱۵، صص ۲۵-۳۵.
- اجدادی، مهران؛ محمودیان، محمد، ۱۳۸۷، برآورد بار معلق رسوب با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی و مقایسه با نتایج روش اینشتین (مطالعه موردی: رودخانه بالخی چای، ایستگاه سامیان اردبیل)، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز، ۹ص.
- احمدی، حسن، ۱۳۹۲، سیستم تحلیل رودخانه HEC-RAS، تهران، جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر.
- اکبری، غلامحسین؛ مغربی، محمود؛ تارم، صابر، ۱۳۹۰، بررسی ترکیب معادلات انتقال رسوب و روش‌های محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل‌سازی تغییر فرم بستر رودخانه، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- اکبرزاده، نیره؛ مجدزاده، محمد رضا؛ قریشی، حسین، ۱۳۹۰، صحت سنجی توابع انتقال رسوب و تاثیر پارامترهای هیدرولیکی بر چگونگی شبیه‌سازی رسوبگذاری مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از مدل عددی HEC-RAS. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- امامقلی‌زاده، صمد؛ شیردل، سولماز؛ گنجویان، محمدعلی؛ فتحی مقدم، منوچهر، ۱۳۸۹، بررسی وضعیت فرسایش و رسوبگذاری رودخانه شیرین دره با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS، مجله مهندسی آب، سال ۱، شماره ۱، صص ۱۹-۳۴.
- ایلدرمی، علیرضا؛ شیخی پور، آزاده، ۱۳۹۵، بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه و نقش آن در فرسایش و رسوبگذاری با استفاده از مدل HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه خرم آباد-دوآب ویسان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، جلد ۵، شماره ۳، صص ۱۴۶-۱۶۳.
- بیاتی‌خطیبی، مریم، ۱۳۹۱، بررسی و تحلیل نوع و مدت جابه‌جایی‌ها در مسیر رودخانه‌های مئاندری و نقش جابه‌جایی‌ها در فرسایش کناری در نواحی نیمه‌خشک مطالعه موردی: رودخانه قره‌آغاج، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۷.
- حاجی بیگلر، محبوبه؛ دستورانی، محمد تقی؛ قزل سوفلو، عباسعلی؛ اختصاصی، محمد رضا، ۱۳۹۲، تغییرات مورفولوژیکی رودخانه و ارتباط آن با فرآیندهای حاکم (مطالعه موردی: رودخانه فیروزه - شاه‌جوب)، نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۶، شماره ۱.
- خیری زاده آروق، منصور؛ رضایی مقدم، محمد حسین؛ رجبی، معصومه؛ دانشفر، رسول، ۱۳۹۶، تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرينه رود با استفاده از روش‌های ژئومورفومتریکی، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، جلد ۵، شماره ۴، صص ۱۰۲-۷۶.
- ره نورد، مجتبی؛ ره نورد، محمد؛ محمودیان شوشتری، محمد؛ طالب بیدختی، ناصر، ۱۳۹۱، شبیه‌سازی انتقال رسوب رودخانه دز (بازه بین ایستگاه حرمله تا بامدژ)، مجله مهندسی منابع آب، سال ۵، صص ۹۹-۱۰۹.
- روستایی، شهرام؛ خورشید دوست، علی محمد؛ خالقی، سمیه، ۱۳۹۲، ارزیابی مورفولوژی مجرای رودخانه ليقوان با روش طبقه بندی راسکن، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۴، صص ۱۶-۱.

- شیخ علیشاهی، نجمه؛ جمالی، علی اکبر؛ حسن زاده نفوتی، محمد، ۱۳۹۵، پهنه بندی سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی تحلیل رودخانه (مطالعه موردی: حوضه آبریز منشاد استان یزد)، فصلنامه علمی- پژوهشی فضای جغرافیایی، جلد ۱۶، شماره ۵۳، صص ۷۷-۹۶.
- صف شکن، فرشید؛ پیر مرادیان، نادر؛ افشین شریفان، رضا، ۱۳۹۶، ارزیابی و مقایسه روش شبکه عصبی و مدل HEC RAS - در شبیه سازی آینمود بارش-رواناب در حوضه آبخیز کسلیان، مجله مهندسی منابع آب، سال ۱۰.
- لشکری، حسن؛ رشیدی، علی؛ رضایی، علی، ۱۳۹۲، پهنه بندی سیلاب رودخانه زربنه رود با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC - RAS در محیط GIS، مجله پژوهش‌های دانش زمین، جلد ۳، شماره ۱۳، صص ۵۱-۶۸.
- یاسی، مهدی؛ نصیری، لعیا؛ احمدی، سلطان، ۱۳۹۶، شبیه سازی و ارزیابی جریان رودخانه‌های با جران دائمی با دو مدل HEC - RAS و RubarBE، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۷، شماره ۲، صص ۲۲۵ تا ۲۳۶.
- یمانی، مجتبی؛ مقصودی، مهران؛ محمد خان، شیرین؛ مرادی، انور، ۱۳۹۴، طبقه بندی مورفولوژیکی آبراهه رودخانه تلوار براساس روش رزگن و کارایی آن (حد فاصل روستای کچی گرد تا حسن خان)، پژوهش‌های دانش زمین، سال ۶ شماره ۲۳، صص ۱-۱۸.
- یمانی، مجتبی؛ رحیمی، مسعود؛ ویسی، عبدالکریم، ۱۳۹۴، مورفومتری و مقایسه تغییرات عرضی رودخانه ارس طی سه دهه اخیر مطالعه موردی: پایین دست سد میغان، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۳، شماره ۴، صص ۷۴-۸۹.

- Ashouri, M., Rezaei Moghaddam, and M.H., Piry, Z., 2009. Morphologic Change Assessment of Riverbed Before and after Dam Construction Using HEC RAS Model and GIS (Case Study: Downstream of Satarkhan Dam), *Physical Geography Research Quarterly*, 45(1), pp.87-100
- Azizian, A., Noormohammadi, S., and Behroozian, M., 2010. Calibration of the results of HEC-HMS numerical model in ungauged catchments (Case study: Zawarian river), 6th national conference on watershed management sciences and engineering, Noor, Iran.
- Cook, A. C., 2008. Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping, MSc thesis, Purdue university, USA
- Gibson, S., Brunner, G., and Jensen, M., 2006. Sediment transport computations with HEC-RAS. *Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC)*, April 2-6, Reno, NV, USA.
- Hazarika, M.H., Bormudoi, A., Phosalath, S., Sengtianthr, V. and Samarakoon, L., 2005. Flood hazard in savanakheth province, Lao PDR mapping user HEC RAS, remote sensing and GIS, *Journal of hydrology*, 302(2-3), pp.1-7.
- Jebeli Fard, S., Omidvar, A., and Najafi jilani, A., 1998. *The Analizing of River System by HEC-RAS Model*, Jahade Daneshgahi Amir Kabir Publications, third edition.
- Lorang, M.S., and Aggett. G., 2005. *Potential sedimentation impacts related to dam removal: Icycle Creek*, Washington, U.S.A.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M. and Blazkova, S., 2005. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of hydrology*, 302 (1-4), pp.46-69.
- Shi, Z.H., Fang, N.F., Wu, F.Z., Wang, L., Yue, B.J., and Wu, G. L., 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 123(130), pp. 2747-2760.
- Stevenson, D., 2009. 1D HEC- RAS model and sensivity analysis for River Clair from 1971-2007. report prepared for international joint commission, international upper Great Lakes study, Ottawa.
- USACE., 2010. *HEC-RAS River Analysis System, Reference Manual for Version 4.1.0 Report CPD-69*, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.