

شبیه‌سازی تأثیر تغییر مورفولوژی محل تلاقی شبکه زهکشی بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری رودخانه سیمینه رود همدان با استفاده از مدل عددی فلوئنت

علیرضا ایلدرمی* - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر.
مهران محمدپناه مقدم - کارشناس ارشد مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۷/۱۲

چکیده

به دلیل پیچیدگی‌های هیدرولیکی رودخانه بررسی تأثیر تغییر مورفولوژی محل تلاقی شبکه زهکشی بر الگوی رسوبگذاری، فرسایش و ملاحظات زیست محیطی از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به وجود محدودیت‌های آزمایشگاهی و عدم کاربرد مدل‌های سه بعدی در سطح گسترده، امکان بررسی جامع این پدیده تاکنون میسر نشده است. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی تأثیر تغییر مورفولوژی محل تلاقی شبکه زهکشی بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری رودخانه سیمینه رود همدان با استفاده از مدل عددی فلوئنت است. نتایج شبیه‌سازی مدل عددی نشان داد که به علت انحراف جریان در ساحل سمت چپ، ابتدا میکرو گردابه‌ها (پشته‌های رسوبی) در ساحل سمت راست و در انتهای جریان به علت بهم پیوستن، با وسعت بزرگتری تشکیل می‌شوند. بعلاوه بررسی تنش رینولدز در محل تغییر مورفولوژی مقطع عرضی رودخانه، از همگرا به و اگر نشان می‌دهد که به علت تغییر و افزایش سرعت جریان، تشکیل میکرو گردابه‌ها به سرعت و شدت بیشتر در ساحل سمت راست باعث انحراف جریان و افزایش رسوبگذاری در ساحل چپ و افزایش سرعت و فرسایش در ساحل راست رودخانه می‌شود. تداوم چنین فرایندی موجب تغییر در الگوی فرسایش و رسوبگذاری در بستر و کناره‌ها، تشکیل جزایر رسوبی، تحول در مسیر و مورفولوژی مقاطع عرضی رودخانه به شکل شریانی، و در نهایت انحراف و مانداری شدن آن می‌گردد. در حالی که در محل تلاقی همگرا به و اگر، به دلیل افزایش ناگهانی سرعت جریان و ثابت ماندن فشار در قسمت معبر تنگ شدگی تشکیل میکرو گردابه‌ها بر خلاف مقاطع دیگر به صورت قرینه در دو ساحل سمت چپ و راست تشکیل می‌شود که این تغییر وضعیت‌ها باید در طرح‌های ساماندهی و حفاظت از سواحل حاشیه رودخانه‌ها با دقت بیشتری مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: مقطع عرضی، میکروگردابه، جریان همگرا و واگرا، سیمینه رود

مقدمه

از مباحث کلیدی و عمده در علم ژئومورفولوژی، و مدیریت رودخانه‌ای موضوع مورفولوژی کانال‌های رودخانه‌ای است که به کمک آن می‌توان به مجموعه اطلاعات مفیدی درباره شکل هندسی، فرم بستر، پروفیل طولی، مقاطع عرضی و تغییر شکل و مکان آن‌ها در طول زمان دست یافت (یمانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱). در محل اتصال جریان شبکه زهکشی اصلی و فرعی و یا به شکل واگرا به همگرا و بالعکس، جریان‌های گردابه‌ای تشکیل و موجب افزایش سرعت در محل تنگ شدگی جریان و تغییر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری شده و باعث کاهش راندمان انتقال آب و وارد آمدن خسارات به سازه‌های ساحلی می‌شود (بست^۱، ۱۹۸۷: ۲۷؛ هاگر^۲، ۱۹۸۹: ۲۴۳)، در محل تلاقی جریان آب دو رودخانه، الگوی جریان به گونه‌ای است که چاله فرسایش عمیق در بستر، فرسایش سواحل، رسوب‌گذاری و بالاخره گردابه‌ای قوی به وجود می‌آید که باعث ایجاد خسارت به ابنیه مجاور، تغییر مورفولوژی رودخانه در محل تلاقی و نیز مشکلاتی می‌شود (فوجیتو و همکاران، ۱۹۸۹^۳). علیرغم اهمیت و نقش این پدیده رودخانه‌ای و به دلیل تأثیر جریان‌های سه بعدی و نحوه حرکت و انباشت رسوب در تغییر مورفولوژی رودخانه، مطالعات سیستماتیک برای شناخت کامل مکانیزم این پدیده‌ها بندرت انجام شده است (مودی و همکاران، ۱۹۸۱: ۱۷۱۳). فرسایش بستر در محل تلاقی رودخانه و تشکیل بانکت‌های شنی رسوب-گذاری شده در پایین دست آن ارتباط مستقیم به پویایی جریان از جمله تغییرات عمق و سرعت جریان و همچنین ابعاد ناحیه جداسازی در این محل دارند (وی مینگ، ۲۰۰۸^۴). از طرف دیگر با توجه به اهمیت این پدیده و به دلیل اینکه استفاده از مدل‌های فیزیکی نیازمند فضای وسیع، هزینه زیاد و زمان طولانی جهت انجام آزمایشات می‌باشند و اغلب هم توصیه نمی‌شوند، به همین دلیل بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه با مدل‌های ریاضی بررسی می‌شوند (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۸۹). در این رابطه کاربرد مدل‌های ریاضی به منظور مطالعات فرسایش و رسوب رودخانه‌ها و مخازن سدها مانند مدل فلونت^۶ با بهره‌گیری از حداقل اطلاعات صحرایی و حجم محاسبات، کاربرد گسترده‌ای در مطالعات تعیین بستر و ساماندهی رودخانه‌های ایران پیدا کرده‌اند (یاسی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۲۵). بررسی و مرور منابع نشان می‌دهد که تحلیل ریاضی و عددی شبیه‌سازی تأثیر تغییر مورفولوژی محل تلاقی شبکه زهکشی بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری، به دلیل کاربرد دقیق و مطابق با واقعیت در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: اصغری سراسکانرود (۱۳۹۶) در تحلیل شکل مجرای رودخانه کلکان چای (حد فاصل سد کلکان تا الحاق به رودخانه قرقو) با استفاده از روش‌های تحلیل قدرت رودخانه نشان داد که با کاهش عرض معبر رودخانه، قدرت رودخانه افزایش و قدرت سیلابی رودخانه به ویژگی‌های مورفولوژیکی رودخانه بستگی دارد. خیری زاده آروق و همکاران (۱۳۹۶) در تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرینه رود با استفاده از روش‌های ژئومورفومتریکی و مدل هیدرولیکی HEC – RAS نشان دادند که تنگ شدگی مجرا بیانگر تمایل بیشتر رودخانه به الگوی مئاندری شدن است. خسروی (۱۳۹۷) در بررسی هیدرودینامیکی الگوی آشفته جریان و انتقال رسوب توسط مدل CCHE2D در سد میناب نشان داد که در شبیه‌سازی و پیش بینی نواحی گردابه‌ای در ناحیه قوس مقعر، مدل آشفته‌گی k-ε عملکرد بهتری دارد. صلحی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای با استفاده از شاخص‌های مورفومتریکی و تحلیل‌های آماری در محیط پایتون به ارزیابی تغییرات مورفومتری پروفیل طولی دره‌های سه‌پند پرداختند. نتایج نشان داد که دره‌های واقع بر دامنه‌های شمال و شمال

1. Best

2. Hager

3. Fujita et al

4. Modi et al

5. Weiming

6. fluent

شرقی سهند از تکامل پروفیل طولی متفاوتی نسبت به دامنه‌های جنوب و جنوب غربی برخوردارند. محجوب و همکاران (۱۳۹۷)، در بررسی مدل‌های سه‌بعدی معتبر و معیارهای مهم انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی‌های مختلف جریان رود نشان دادند که مدل Flow3D مناسب‌ترین مدل شبیه‌سازی جریان و رسوب به صورت هم‌زمان می‌باشد. حسین زاده و همکاران (۱۳۹۷) در تحلیل پایداری کرانه و مورفومتری رودخانه گلالی قروه به منظور پایدار سازی در برابر فرسایش بیان کردند که مقاطع ۱ و ۵ دارای بیشترین و مقاطع ۲، ۳ و ۴ به ترتیب دارای کمترین ضریب ناپایداری هستند. صالحی و همکاران (۱۳۹۷) به مدل‌سازی عددی امواج ناشی از شکست سد سنگی - ملاتی در زیر حوضه نوشان آذربایجان غربی با استفاده از مدل Fluent و روش VOF پرداختند. نتایج مقایسه شرایط آزمایشگاهی و مدل Fluent نشان داد که مدل Fluent از دقت بالایی در مدل‌سازی جریان سه بعدی ناشی از شکست سد برخوردار است. عزیزی و همکاران (۱۳۹۸)، در بررسی تأثیر تغییر مقاطع عرضی بر طغیان و ظرفیت انتقال رودخانه آبشینه همدان با استفاده از مدل HEC - RAS و نرم افزار SMADA نشان دادند که مقاطع عرضی و تغییر مورفولوژی بستر به دلیل فرسایش و رسوب‌گذاری موجب تغییر مقدار ظرفیت انتقال رسوب و سرعت جریان شده است. شرفی و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی تغییرات مکانی - زمانی مورفولوژی رودخانه سیلاخور استان لرستان به این نتیجه رسیدند که با توجه به ماهیت مئاندری بودن رودخانه سیلاخور، ساحل راست رودخانه فرسایشی و ساحل چپ در حال افزایش رسوبگذاری است. کلامی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی روابط هندسی-هیدرولیکی مقطع رودخانه‌ها با استفاده از حل معکوس معادلات سنت-ونانت، پرداختند. نتایج نشان داد روش‌های روندیابی هیدرولیکی-هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی سیل رودخانه از دقت بالایی برخوردار هستند. ریبیو^۱ (۲۰۱۱) به بررسی آزمایشگاهی تغییرات مورفولوژی بستر رودخانه اصلی در نتیجه تلاقی یک آبراهه فرعی با زاویه ۹۰ درجه پرداخته است. در این تحقیق با افزایش دبی و رسوب از دهانه شاخه فرعی به بررسی تغییرات مورفولوژی بستر شاخه فرعی پرداخته و نشان داد که تغییر مورفولوژی رودخانه در محل تلاقی رودخانه فرعی به اصلی در دبی‌های مختلف بسیار متفاوت است. کلون و همکاران^۲ (۲۰۱۷) در پژوهشی به ارزیابی پایداری ساحل رودخانه و فرسایش کناره‌ای پرداخته و نشان داد که پسروری ساحل رودخانه توسط جریان فرسایشی، وضعیت ژئوتکنیکی رودخانه، جنس بستر کنترل می‌شود. کین و همکاران^۳ (۲۰۱۷) در بررسی مدل‌های تکامل و تحول کانال به منظور پیش‌بینی میزان رسوب بیان نمودند که پارامترهای کمی بستر جریان جهت پیش بینی فرم پایدار کانال و تولید رسوب در مدل‌های دوو سه بعدی به شکل هم‌زمان مناسب می‌باشند. اودا^۴ (۲۰۱۹) در مدل‌سازی و بررسی چند فازی انتقال رسوب و فرسایش بستر و تغییرات مورفودینامیک ساحلی رودخانه با استفاده از مدل‌سازی عددی نشان داد که مدل عددی چند فازی عملکرد مطلوبی را در بیشتر موارد شبیه‌سازی انتقال رسوب و فرسایش نشان می‌دهد و می‌توان از این مدل محدودیت‌های داده‌های تجربی را برطرف نمود. لای و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی ظرفیت انتقال جریان و رسوب با مدل سه بعدی برای کانال‌های رو باز سطح آزاد با استفاده از معادلات حاکم بر جریان و رسوب معلق، نشان دادند که مدل تطابق خوبی بین جریان و رسوب با داده‌های تجربی ارائه داده است. ایکبال و همکاران^۵ (۲۰۱۹) برای شبیه‌سازی شستشوی رسوب مخزن سد از دومدل، 2D و نوع متوسط گودونف^۶ استفاده و با مطالعه مدل فیزیکی و یک فلوام آزمایشگاهی نشان دادند که فرسایش جانبی و تغییرات بستر بر اساس مقدار دبی و ویژگی‌های مورفولوژیکی کانال متغیر و با نتایج آزمایشگاهی نیز مطابقت خوبی دارد. علی رغم پژوهش‌های انجام شده به صورت

^۱. Ribeiro

^۲. Klavon et al

^۳. Keane et al

^۴. Ouda

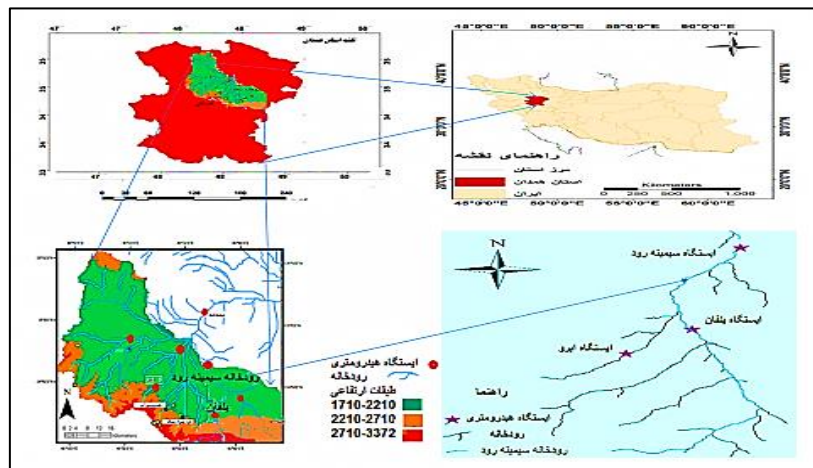
^۵. Iqbal et al

^۶. Godunov

آزمایشگاهی در زمینه الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش در محل تلاقی رودخانه‌ها، اما تحقیقات عددی در این زمینه بسیار اندک است. با توجه به رفتار هیدرودینامیکی دو و سه بعدی جریان در محل تغییر مورفولوژی رودخانه، مطمئناً استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز جریان و رسوب مانند مدل عددی فلوئنت در پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی در مقطع عرضی محل تلاقی به صورت بازشدگی و تنگ‌شدگی (همگرا و واگرا) در رودخانه سیمینه‌رود، تأثیر تغییر مورفولوژی مقاطع در محل تلاقی جریان که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته، بررسی شده است. نتایج این بررسی بایستی پاسخگوی این سوال باشد که با افزایش تغییر مورفولوژی مقاطع عرضی جریان در محل تلاقی چه تغییر هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی در رابطه با حداکثر عمق چاله فرسایش، ارتفاع تپه رسوب‌گذاری و میزان فرسایش رخ و تحول رودخانه چگونه صورت می‌پذیرد، تا بتوان از نتایج آن در طرح‌های ساماندهی و مهندسی رودخانه و عملیات حفاظتی مناسب به ویژه در سواحل، با صرف هزینه کم‌تر اقدام نمود.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سیمینه رودسر شاخه اصلی رودخانه قره‌چای و زهکش آب‌های سطحی و زیرزمینی در همدان می‌باشد. که از دامنه کوه الوند سرچشمه گرفته و به رودخانه قره‌چای ملحق می‌گردد. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب ۳۳۷۲ متر در ارتفاعات الوند و ۱۷۱۰ متر در محل خروجی حوضه می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۳۱۲/۹ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه آن ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد و از نظر زمین‌شناسی و لیتولوژی دارای سنگ‌های دگرگونی و نفوذی از نوع گرانیت، شیبست، و هورنفلس و به شکل محدود دارای تشکیلات آهکی می‌باشد. دبی متوسط رودخانه ۴/۴۶ متر مکعب در ثانیه در سال و رژیم رودخانه تحت اقلیم نیمه مرطوب سرد کوهستانی برفی-بارانی دائمی است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه رودخانه سیمینه رود در استان و حوضه آبریز قره‌چای همدان

روش تحقیق

در تحقیق حاضر از نتایج مدل شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب در محل تلاقی کانال از یک مقطع عرضی تنگ به مقطع عرضی از (۶ به ۱۳ متر) برای دبی متوسط سالیانه ۵ متر مکعب در ثانیه و سرعت ۵ متر بر ثانیه رودخانه سیمینه رود از واگرا به همگرا و بالعکس پرداخته شده و جهت ارزیابی دقت مدل فلوئنت با ضریب تعیین و متوسط خطای مطلق، اقدام به پیش‌بینی پروفیل سطح آب و شبیه‌سازی پروفیل طولی رسوب‌گذاری و فرسایش و حداکثر عمق رسوب‌گذاری و یا حداکثر عمق فرسایش در محل تلاقی در مقاطع عرضی با ارزیابی سرعت- فشار شده است. همچنین الگوهای فرسایش و انتقال رسوب در محل تلاقی دو مقطع عرضی رودخانه با استفاده از روش حجم‌های محدود، که یک روش تفکیک‌سازی کارا در حل معادلات حاکم بر جریان می‌باشد، پرداخته شده است. جفت کردن معادلات حرکت جریان یعنی معادلات پیوستگی و

اندازه حرکت در دو جهت و معادله پیوستگی رسوب به صورت کامل و همزمان انجام و فرض شده که جریان دو بعدی بوده و انتقال رسوب فقط به وسیله بار کف صورت می‌گیرد. برای این منظور از معادله پیوستگی رسوب در مدل فلونت استفاده و بر اساس تغییر اعداد رینولدز در دبی ۵ متر مکعب بر ثانیه، تغییر مقاطع عرضی و مورفولوژیکی با محاسبه بیشترین تعداد میکرو گردابه‌ها و چاله‌های فرسایشی تشکیل شده و بیشترین تغییر عرضی در ساحل چپ و راست رودخانه، شبیه‌سازی شده است. به منظور شبیه‌سازی تأثیر تغییر شکل هندسی مقاطع عرضی رودخانه سیمینه‌رود بر فرآیندهای انتقال جریان و رسوب، داده‌های مقاطع جهت شبیه‌سازی به مدل فلونت وارد و سپس با استفاده از نرم افزار VOF و گمبیت اقدام به شبیه‌سازی تغییر هندسه جریان و نحوه ایجاد میکرو گردابه‌ها شده و در نهایت به شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری و توزیع عرضی آن در مقاطع تغییر یافته رودخانه و تشکیل پشته‌های رسوبی (تپه‌های رسوبی یا بانک‌های شنی) در بستر رودخانه پرداخته شده است.

معرفی مدل فلونت^۱

نرم‌افزار فلونت از ۳ قسمت اصلی تشکیل شده است (الف: fluent/standard که یک حلگر چند منظوره مبتنی بر انتگرال‌گیری غیرصریح می‌باشد و از آن در جهت حل مسال استاتیکی جریان استفاده می‌شود ب) fluent/Explicit این حلگر وظیفه حل معادلات غیرخطی با بر همکنش‌های پیچیده را بر عهده دارد. ج) fluent/CFD این حلگر می‌تواند تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی پیشرفته (مثل شبیه‌سازی جریان‌های آب و رسوب) را انجام دهد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار فلونت، و حل معادلات ناویر-استوکس برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در حالت دو بعدی و پارامترهای فیزیکی و عددی مؤثر بر این پدیده پرداخته شده است (فلونت، ۲۰۰۶).

معادلات کامل ناویر استوکس^۲

معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی سیالات از جمله فرسایش و رسوب‌گذاری در اصل همان معادلات ناویر استوکس هستند که بر اساس قانون بقای ماده (معادله پیوستگی)، مومنتوم (قانون دوم نیوتن) و متغیرهای شناخته شده شامل تراز سطح آب از سطح مبنای فرضی و اجزای سرعت جریان، پایه‌گذاری شده‌اند. این معادلات در حالت سه بعدی و برای سیال تراکم ناپذیر مانند آب و رسوب به صورت زیر تعریف می‌شوند (صالحی و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۰).

قانون بقای ماده (معادله پیوستگی)

رابطه (۱)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_{x_i} + \nu \nabla^2 u_x$$

مومنتوم (معادله ناویر-استوکس)، (قانون دوم نیوتن)

رابطه (۲)

در این معادلات :

u_i مؤلفه سرعت لحظه‌ای در جهت X_i ، ν لزجت مولکولی، ρ چگالی سیال، g_i مؤلفه شتاب ثقل در جهت i ، p مقدار فشار در هر نقطه از سیال می‌باشند (فرانسیسکو و همکاران^۳، ۲۰۰۹: ۶۷۵۹؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۰).

^۱ .Fluent

^۲ .Navier-Stokes

^۳ .Francesco et al

مدل‌سازی توسط نرم‌افزار فلوئنت

در نرم‌افزار هیدرولیکی فلوئنت از روش حجم محدود به منظور حل معادلات دینامیکی جریان سیالات و از معادلات ناویر-استوکس در تحلیل جریان و در صورتی که جریان آشفته باشد از معادلات تنش رینولدز در حل معادله ناویر-استوکس استفاده می‌شود. بعلاوه در این بررسی در قسمت پیش پردازنده از نرم‌افزار Gambit برای تولید شکل و فرم هندسی کانال آزمایشگاهی استفاده شده است (عبقری و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۳۵؛ حیدری، ۱۳۸۱: ۱۱۶).

مدل تنش رینولدز^۱ مدل ۷ معادله‌ای

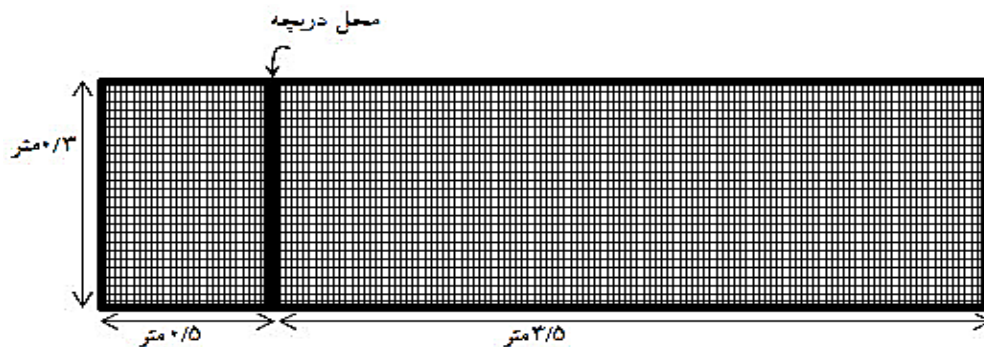
مدل RSM شش معادله انتقال برای شش مؤلفه تنش رینولدز و یک معادله انتقال برای نرخ استهلاک انرژی جنبشی را حل می‌کند. در این بررسی از مدل‌های آشفتگی مختلف شامل: مدل $k-\varepsilon$ محسوس $k-\varepsilon$ Realizable، $k-\varepsilon$ حالت RNG، مدل $k-\varepsilon$ استاندارد و RSM برای شبیه‌سازی استفاده شده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته است.

حل و دو بعدی مسئله تشکیل میکرو گردابه‌ها

در حل دو بعدی میدان حل به صورت دو بعدی و در جهات طولی (X) و قائم (Z)، پارامترهای مختلف هیدرولیکی در دو راستای X و Z در نظر گرفته شده و محاسبه شده‌اند.

شبیه‌سازی ساختار جریان و تنظیم شبکه‌بندی میدان حل

برای بررسی اثر ابعاد شبکه بر مدل‌سازی جریان و رسوب و تحلیل حساسیت شبیه‌سازی نسبت به ابعاد شبکه محاسباتی، پنج اندازه شبکه با ابعاد ۰/۹، ۱، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳ سانتی‌متری در نظر گرفته شده که شبکه با ابعاد ۱ سانتی‌متری بهترین نتایج را داشته است. در شکل (۲) نمایی از شبکه‌بندی مدل در حالت دوبعدی نشان داده شده است.



شکل ۲: نمایی از شبکه‌بندی مدل عددی برای شبیه‌سازی

تنظیم شرایط مرزی در مدل

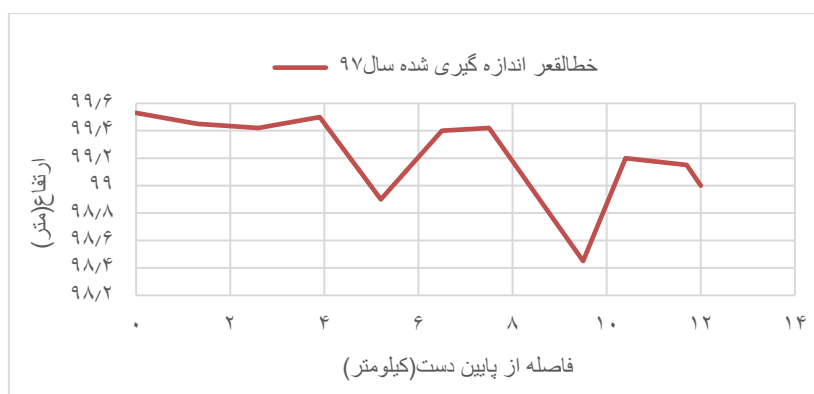
در این بررسی جهت شبیه‌سازی جریان و رسوب بستر جریان و شرط مرزی دیوارها از روش تابع استاندارد دیواره استفاده و دیوارها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در پژوهش پیش رو برای اعمال اثر زبری مربوط به دیواره‌های فلوم از ضریب زبری شیشه که معادل ۰/۰۰۹ می‌باشد، استفاده و ارتفاع زبری، صاف در نظر گرفته شده است. برای حل جریان در تلاقی آبراهه‌ها در شبیه‌سازی‌ها از مدل‌های مختلف تلاطمی $k-\varepsilon$ standard، $k-\varepsilon$ RNG، $k-\varepsilon$ Realizable، RSM و $k-\omega$ استفاده و بهترین مدل انتخاب و از طرح‌های مختلف پیشرو مرتبه اول، پیشرو مرتبه دوم، به منظور انفصال جملات جابجایی

¹ Reynolds Stress Model

معادلات استفاده و بهترین گزینه برای سایر مراحل انتخاب و بکارگرفته شده است (فرانسیسکو و همکاران^۱، ۲۰۰۹: ۶۷۵۹؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۰؛ عبقری و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۳۵؛ حیدری، ۱۳۸۱: ۱۱۶).

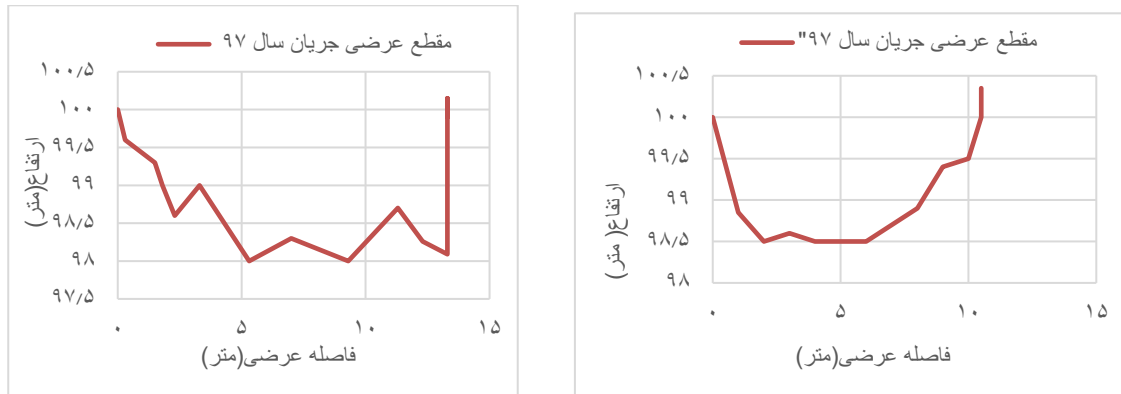
داده‌های مورد نیاز

در این بررسی بر اساس خط مرکزی جریان، خطوط کناره‌ها، مئاندر و تغییر مقاطع عرضی همراه با بازدیدهای میدانی و داده‌های مشاهداتی در مسیر اصلی رودخانه، بازه‌ای به طول ۱۴ کیلومتر از سرشاخه‌های رودخانه حوضه آبریز سیمینه‌ود از ارتفاعات پایین دست کوهستان الوند تا نزدیک به ایستگاه یلفان و با در نظر گرفتن خصوصیات یکسان از لحاظ هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به ویژه تراز سطح آب، عمق، شیب و زبری و مسیر کانال رودخانه و با لحاظ نمودن تغییر پهنای بستر و مقاطع عرضی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ در محیط ARC- GIS و ARC- Hydro انتخاب و بر اساس داده‌های هندسی موجود در امور آب استان همدان پروفیل طولی رودخانه در بازه مورد مطالعه ترسیم شد (شکل ۳). در بخش هندسی، پلان عمومی و مقاطع عرضی رودخانه در بازه‌ای به طول ۱۴ کیلومتر از ۲۰ مقطع عرضی برداشت شده توسط سازمان آب منطقه‌ای همدان در سال ۱۳۹۷، (اشکال ۴ و ۵) همراه با ۲۳ مقطع عرضی تهیه شده با تکنیک سونار در نرم‌افزار فلونت استفاده و به مدل معرفی شد. در تکنیک سونار ابتدا با استفاده از show elevation profile اقدام به برداشت طول مسیر ۱۴ کیلومتری از رودخانه سیمینه رود بر روی تصویر google earth شد. سپس پروفیل طولی و ارتفاع آن از ابتدا تا انتها مشخص و در مرحله بعد جهت استخراج هزاران نقطه ارتفاعی و طولی فایل بدست آمده از google earth در نرم افزار اتوکد فراخوانی شد. نقاط برداشت شده شامل بیش از ۶۰ هزار نقطه در فایل اکسل ذخیره و نقشه توپوگرافی با فاصله ارتفاعی ۱ متر تهیه (شکل ۶) و در مدل گمیت جهت ترسیم هندسه منطقه مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین در فن آوری سونار دقت نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ یعنی ۱ میلی‌متر برابر ۲۵ متر با برداشت بیش از ۶۰۰۰۰ نقطه ارتفاعی یعنی ۱ نقطه ارتفاعی به ازای ۰/۵ متر در سونار در مسافت ۱۴ کیلومتری به ۱:۵۰۰۰ افزایش یافت تا تغییر مقاطع عرضی با دقت قابل قبول، به روز و به شکل واقعی تر ارزیابی شود. در بخش هیدرولیکی جریان از هیدروگراف روزانه دبی جریان (از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۳۹۷)، منحنی دبی - اشل، داده‌های مربوط به دبی در طول دوره آبی ۹ ساله شامل دبی میانگین آب ۱/۲۲، دبی ماکزیمم ۵/۱۹ و دبی مینیمم آن ۰/۰۰۶۴ متر مکعب بر ثانیه مربوط به ایستگاه های بالادست (یلفان و ابرو)، و برای تحلیل رسوب دمای آب به طور میانگین ۱۲/۲ درجه سانتی‌گراد در مدل استفاده شده است.

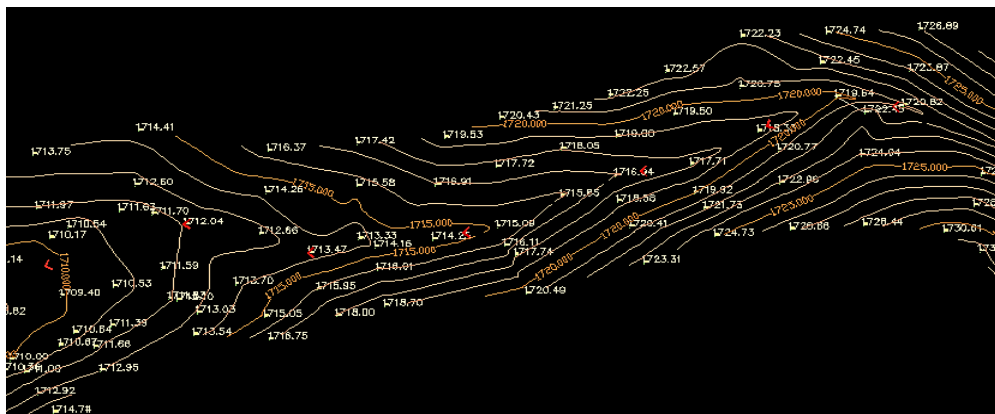


شکل ۳: نمودار پروفیل طولی رودخانه در بازه مورد مطالعه (خط القعر)

جهت بررسی مورفولوژیکی مقاطع عرضی رودخانه سیمینه رود و تأثیر تغییر پهنای مقاطع عرضی در نحوه تشکیل میکروگردابه‌ها و توزیع عرضی رسوب در ساحل رودخانه و نقش آنها در شریانی و ماندردی شدن رودخانه تعداد ۶ مقطع عرضی رودخانه، در تشکیلات گرانیت (مقطع واگرا و تنگ) و ۵ مقطع در تشکیلات شیست و هورنفلس (مقطع همگرا و باز) با توجه به تغییرات دانه‌بندی رسوبات، تغییر وضعیت شیب (توپوگرافی)، اتصال مسیل‌های مهم به رودخانه اصلی و یکنواختی مصالح، جنس بستر و لیتولوژی و کناره‌ها برداشت شد (اشکال ۴ و ۵).



شکل ۴: نمودار مقطع عرضی رودخانه در محل تنگ شدگی عرضی در (درفاصله ۴ کیلومتری) در تشکیلات گرانیتی
 شکل ۵: نمودار مقطع عرضی رودخانه در محل تغییر مقطع در عرضی در (درفاصله ۱۱ کیلومتری) در تشکیلات شیست و هورنفلس
 جهت حل سه بعدی جریان در پردازشگر گمبیت و محاسبگر مدل فلونت و مدل سازی به صورت سه بعدی و استخراج مختصات X, Y, Z از نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه ۱:۲۵۰۰۰ استفاده و سپس در حدود ۵۰ هزار نقطه برداشت و نقشه‌ی توپوگرافی با فاصله ارتفاعی ۰/۵ متر در محیط اتوکد تهیه و به عنوان پلان توپوگرافی و به مدل وارد شد (شکل ۶). در مرحله بعد هندسه آبراهه که شامل پروفیل طولی و مقاطع عرضی می‌باشد، در محیط گمبیت تهیه گردید.



شکل ۶: نقشه توپوگرافی منطقه، تولید شده در محیط اتوکد با فاصله ارتفاعی نیم متر
 برای تولید شبکه و ایجاد میدان حل در حالت دو بعدی برای هندسه ساخته شده آبراهه به ازای هر یک متر یک گره تعریف و با توجه به هندسه و فرم خاص آبراهه از المان‌های مثلثی استفاده گردید. با معرفی تعداد گره و مشخص کردن نوع المان هندسه مورد نظر مش بندی انجام و هندسه مدل و شبکه محاسباتی در نرم افزار گمبیت^۱ ایجاد شد. در شکل (۲) نمایی از شبکه بندی مدل در حالت سه بعدی برای هندسه آبراهه اصلی رودخانه سیمینه رود نشان داده شده است. پس از تولید فرم

^۱. Gambit

هندسی مدل در پیش‌پردازنده‌ی گمبیت، فایل تولید شده شبکه توسط مدل فلونت^۱ که نقش محاسبگر را داراست فرا خوانده شد. در این مدل ابتدا تنظیمات مدل عددی انجام و سپس آنالیز عددی صورت گرفته تا شبیه‌سازی جریان توسط مدل VOF^۲ انجام شود.

مشخصات مدل عددی و معادلات حاکم بر جریان

به منظور بررسی نقش تغییرات سرعت برشی و قدرت جریان (فشار جریان) در مسیر مورد مطالعه از یک مقطع به یک مقطع دیگر با مورفولوژی متفاوت پارامترهای عمق، سرعت، فشار و تنش رینولدز مقایسه و ارزیابی شده است. برای کویلینگ معادلات سرعت-فشار و ایجاد تعادل بین سرعت و فشار در این بررسی از الگوریتم simplec استفاده شده و ضریب under-relaxation مومنتم از ۰/۷ به ۰/۹ تغییر داده شد تا همگرایی مناسب‌تری ایجاد شود. هدف از این روش بررسی تأثیر اعداد رینولدز برای کویلینگ معادلات سرعت-فشار و برای از بین بردن تقارن جریان و تحریک شروع جریان گردابه‌ای، به شکل یک اغتشاش مصنوعی در یک سرعت یکنواخت یعنی ۵ متر بر ثانیه مربوط به رودخانه سیمینه رود است. لذا جهت بررسی دقیق محل و نحوه تشکیل میکروگردابه‌ها از تغییرات اعداد رینولدز جریان استفاده تا محل تشکیل میکروگردابه‌های جریان با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. بررسی اعداد رینولدز نشان می‌دهد که در رودخانه سیمینه رود در اعداد رینولدز ۱۳۰ محل تشکیل میکروگردابه‌ها در مقطع واگرا می‌باشد. از طرف دیگر به دلیل این که روابط مشخصی برای ناحیه‌گذار در دست نمی‌باشد و همچنین تشکیل میکروگردابه‌ها در طیف مری قابل مشاهده نیست، اعداد حاصل از نتایج آزمایشگاهی تغییرات سرعت در مقاطع مختلف سرعت محوری در طول کانال جریان به عنوان مرجع قرار داده شد. طبق بررسی اعداد رینولدز، این ناحیه بین ۱۲۰-۱۴۰ در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود داشته باشد. برای ارزیابی افت انرژی (سرعت-فشار) در رودخانه سیمینه رود، ضرایب همگرایی و واگرایی به علت وجود بازشدگی و تنگ‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت. تا افت‌های بین مقاطع، محاسبه و لحاظ شود. بررسی‌های حاصل از داده‌های دبی-رسوب و مقاطع عرضی نشان می‌دهد که افت انرژی در بازشدگی‌ها، بیشتر از تنگ‌شدگی‌ها 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).

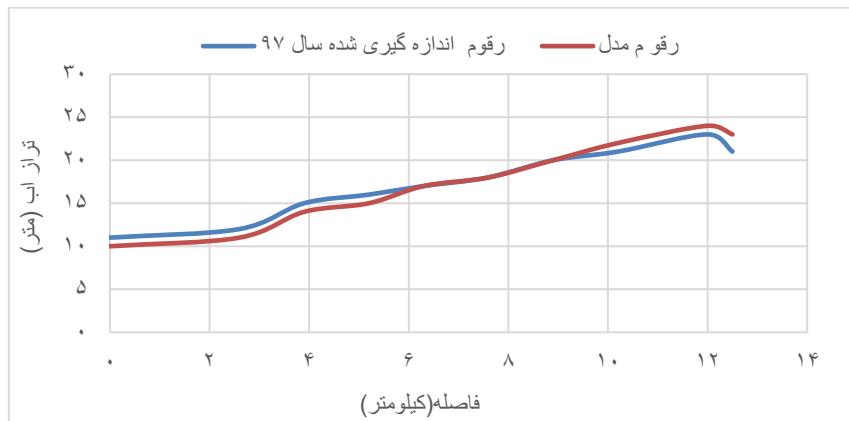
بحث و یافته‌ها

در این بررسی، محل تغییر مورفولوژی براساس باز شدگی و تنگ شدگی تحت تاثیر تغییر سازندهای زمین‌شناسی و در محل مجاورت دو لیتولوژی گرانیته به شیب و هورنفلس در درجه اول و بر اساس تغییر شیب (با توجه به کاهش شیب و تغییر جنس بستر که بیشتر از نوع تشکیلات گرانیته، هورنفلس و شیبست) و در نهایت تغییر دبی ناشی از اتصال شبکه رودهای اتصالی انتخاب شده است. بررسی پلان پروفیل طولی و مقاطع عرضی و بازدهی‌های میدانی مسیر رودخانه سیمینه‌رود نشان می‌دهد که این رودخانه عمدتاً دارای کانال مستقیم با پهنای یکسان و در مناطق پایین دست، میزان پیچش آن نزدیک ماندری است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که رودخانه سیمینه رود از سرشاخه تا پایین دست از لحاظ مورفولوژی مسیر بستر (پروفیل طولی) و پهنای بستر (توزیع مقاطع عرضی) به شدت در حال تحول از مسیر مستقیم به ماندری و شریانی است. با توجه به اینکه پارامترهای به دست آمده از هیدرودینامیک جریان مبنای محاسبات رسوبی قرار می‌گیرند، بنابراین لازم است که ابتدا از کالیبره بودن مدل هیدرولیکی اطمینان حاصل گردد. به این منظور ضریب مانینگ

^۱ . Fluent

^۲ . Volume of Fluid

در ابتدا (۰/۰۳) تعیین گردید و در بخش محاسبات هیدرولیک جریان توسط مدل با استفاده از نسبت دبی-اشل به ازای دبی ورودی تراز سطح آب توسط مدل محاسبه شد، که با ضریب مانینگ برابر ۰/۰۳ مقادیر محاسبه شده مدل با تراز مشاهداتی دارای تطابق مناسب و قابل قبولی بود (شکل ۷).



شکل ۷: نمودار واسنجی هیدرولیکی مدل ریاضی فلونت به ازای دبی جریان ۵ مترمکعب بر ثانیه

شبکه‌بندی میدان حل

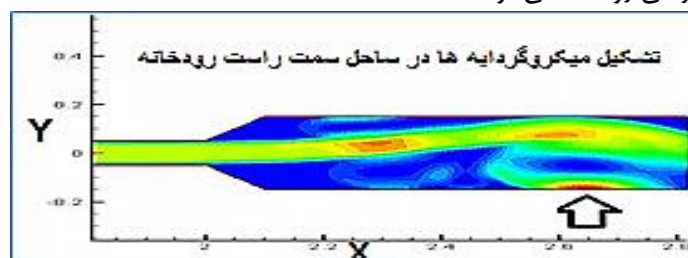
بررسی نتایج عددی و آزمایشگاهی مختلف نشان می‌دهد که شبکه با ابعاد ۱ سانتیمتر کمترین خطا را دارد و در مدلسازی از این شبکه‌بندی استفاده شده است. به طور کلی با درشت‌تر شدن شبکه محاسباتی نتایج عددی انطباق کمتری با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند و تشکیل میکرو گردابه در پایین دست مسیر جریان رخ می‌دهد و بر عکس (جدول ۱).

جدول ۱: درصد خطای موجود بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای اندازه‌های مختلف شبکه

۱/۴	۱/۲	۱	۰/۹	۰/۸	اندازه شبکه cm / RMSE
۰/۱۲۴	۰/۰۸۷	۰/۰۷۴	۰/۰۸۰	۹۷/۰	

بررسی نحوه تشکیل میکروگردابه‌ها

بررسی شکل (۸) نشان می‌دهد که تشکیل چاله‌های فرسایشی (میکروگردابه) ابتدا در ساحل سمت راست باعث انحراف جریان و افزایش رسوب‌گذاری در ساحل چپ و افزایش سرعت و فرسایش در ساحل راست می‌شود. ادامه چنین فرایندی نه تنها موجب تغییر در نحوه و الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در بستر و کناره‌ها می‌شود بلکه موجب تحول رودخانه از الگوی مستقیم به شکل شریانی و یا بره بره^۱ و در نهایت با تشکیل جزایر رسوبی باعث انحراف و ماندگاری شدن آن و تحول مورفولوژی مقاطع عرضی رودخانه می‌شود.



^۱. Braided stream

شکل ۸: شبیه‌سازی تشکیل بانکت‌های رسوبگذاری در ساحل سمت راست در تنش رینولدز ۱۳۰

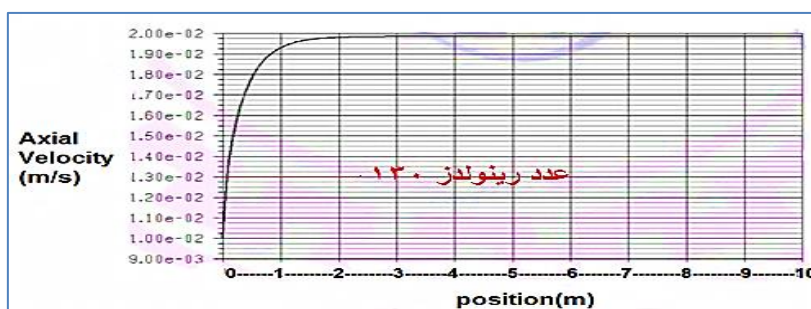


شکل ۹: الگوی رسوبگذاری در ساحل چپ رودخانه

جهت بررسی و نتیجه‌گیری دقیق‌تر نحوه تشکیل میکروگردابه‌ها، از تغییرات ۵ عدد رینولدز (از ۴۵ تا ۲۰۰) استفاده و سپس با نمودار حاصل از نتایج آزمایشگاهی (شکل ۱۱) سنجید شد. نتایج نشان می‌دهد که در تشکیل میکروگردابه‌ها، عدد رینولدز ۱۳۰ بیشترین تطابق را با سرعت محوری عبور جریان در شکل (۱۱) را دارد. (جدول ۲). که این وضعیت به دلیل تغییر مقاطع عرضی و فشار - سرعت رودخانه اتفاق افتاده و با اعداد رینولدز و نتایج کوپل کردن و تعادل سرعت - فشار با سرعت ۵ متر بر ثانیه کاملاً تطابق دارد. بررسی اعداد رینولدز نشان می‌دهد که در رودخانه سیمینه رود محل تشکیل میکروگردابه‌ها و رسوبگذاری در بستر کانال در محل تلاقی در مقطع واگرا در تنش رینولدز ۱۳۰ می‌باشد و تشکیل بانکت‌های رسوبی در ساحل سمت راست نیز نشان دهنده و تایید کننده تاثیر میکروگردابه‌ها است (شکل ۱۱).

جدول ۲: مقادیر تغییرات سرعت جریان در مقاطع مختلف کانال براساس اعداد رینولدز

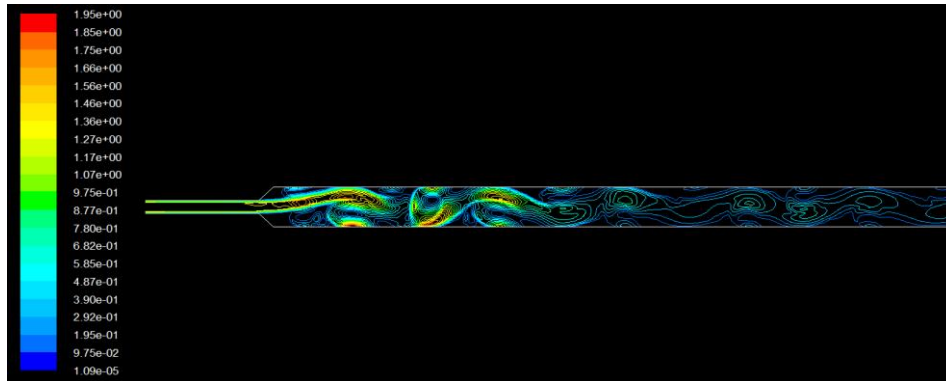
Reynolds No, Re	۴۵	۹۰	۱۳۰	۱۶۰	۲۰۰
Upper branch flow rate m/s	۹۳۴/۰	۶۵۴/۰	۰۱۳/۰	۳۳۷/۰	۶۳۴/۰
Right branch flow rate m/s	۵۴۷/۰	۴۳۶/۰	۰۲۴/۰	۰۳۴/۰	۰۶۵/۰
Total flow rate m/s	۸۹۶/۰	۰۶۷/۰	۰۱۲/۰	۴۸۷/۰	۵۳۲/۰
Flow split in upper branch	۸۴/۰	۸۷۶/۰	۲۶/۰	۷۸۶/۰	۷۶۵/۰



شکل ۱۱: رابطه سرعت محوری خطوط جریان در کانال آزمایشگاهی به شکل بی بعد در مدل فلوننت

بررسی شبیه‌سازی نحوه تشکیل میکروگردابه‌ها در امتداد جریان نشان می‌دهد که در ابتدای ورودی جریان از مقطع تنگ به مقطع باز به علت بالا بودن سرعت و فشار دبی جریان، تشکیل میکروگردابه‌ها (چاله‌های فرسایشی) با شدت بیشتر در ساحل سمت راست صورت گرفته، که این امر باعث انحراف جریان از ساحل سمت راست به سمت چپ ساحل رودخانه می‌شود. اشکال (۱۲ و ۱۳). تکرار و فراوانی وقوع چنین فرآیندی منجر به تشکیل چاله فرسایشی در ساحل راست رودخانه و رسوبگذاری بیشتر در ساحل چپ آبراهه و تشکیل بانکت‌های شنی به شکل تپه‌های رسوبگذاری می‌شود. بعلاوه اینکه

به موازات افزایش فاصله‌گیری از ورودی جریان آبراهه با تغییر مقاطع عرضی، میکروگردابه‌ها به شدت و با سرعت بیشتری بهم پیوسته و تشکیل گردابه‌های بزرگتری در ساحل سمت چپ را می‌دهند. همچنین میزان رسوب‌گذاری نیز در ساحل راست به همان مقدار افزایش می‌یابد. بنابراین در رودخانه‌های با محل تلاقی واگرا یعنی اتصال جریان از یک بستر تنگ شده به بستر باز، در ابتدای جریان به علت بالا بودن سرعت، میکروگردابه‌ها با شدت بیشتر در ساحل سمت راست که پهنای بستر کمتری نسبت به بستر ساحل سمت چپ دارند، تشکیل می‌شود.



شکل ۱۲: تشکیل میکروگردابه‌ها در امتداد جریان در اثر تلاقی آبراهه با مقاطع عرضی واگرا به همگرا



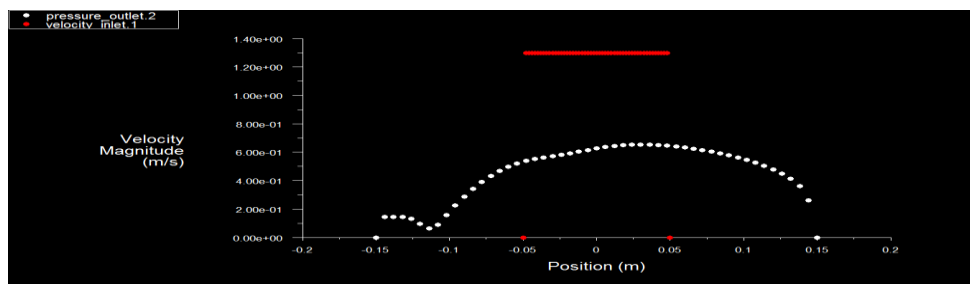
شکل ۱۳: تصویر شماتیک از نواحی تفکیک شده در محل تغییر مقطع عرضی آبراهه و تلاقی رودخانه واگرا به بسترهمگرا)

نگارندگان ۱۳۹۸، اقتباسی از (بست^۱، ۱۹۸۷؛ هاگر^۲ ۱۹۸۹)،

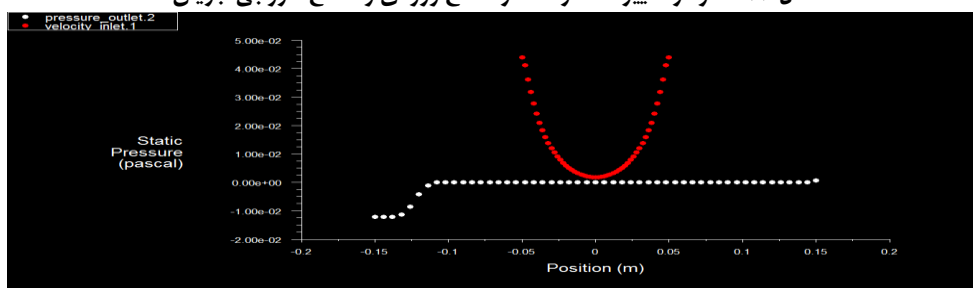
اشکال ۱۴ و ۱۵ شبیه‌سازی جریان با دو شیب طولی و عرضی به شکل تقریباً متعادل و در حال حرکت را نشان می‌دهند و بیانگر این است که در اثر ورود جریان شبکه زهکشی از مقطع تنگ به مقطع باز (واگرا به همگرا) این تعادل به هم می‌ریزد. در ادامه در اثر تغییر فشار و به تبع آن تغییر سرعت دبی در تلاقی آبراهه، فشار جریان آب در ساحل سمت راست به دلیل عبور جریان از مقطع تنگ با سرعت و فشار زیاد به مقطع باز افزایش و همزمان در ساحل سمت چپ رودخانه سرعت کاهش یافته و این شرایط موجب می‌شود که جریان به سمت ساحل سمت چپ متمایل گردد. به عبارتی شیب عرضی جریان در مقطع رودخانه به شدت تغییر یافته و باعث ایجاد خلاء در جریان سیال ساحل سمت راست می‌شود و این وضعیت شرایط را برای تشکیل هر چه بیشتر میکروگردابه‌ها و چرخش آب (چاله‌های فرسایشی) در بستر ساحل سمت راست فراهم می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که این تغییرات موجب انحراف مسیر جریان و تغییر در الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری می‌شود. بررسی اعداد رینولدز نیز بیانگر این است که در جریان‌های با رینولدز ۱۳۰ در مقاطع همگرا به واگرا بیشترین میکروگردابه‌ای رسوبی در ساحل سمت راست با شدت و سرعت بیشتر تشکیل می‌شود.

1. Best

2. Hager



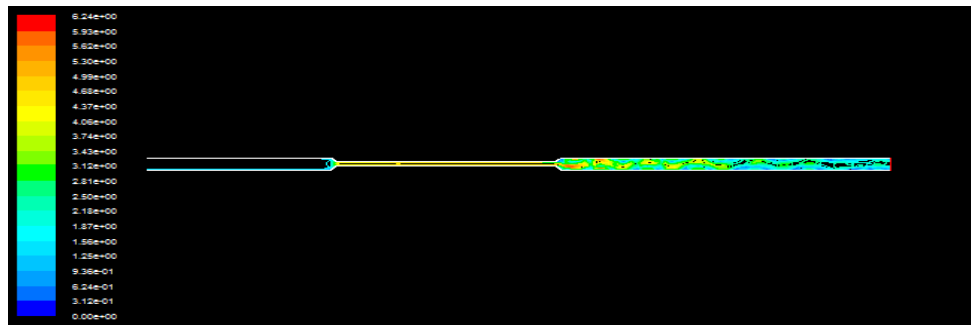
شکل ۱۴: نمودار تغییرات سرعت در مقطع ورودی و مقطع خروجی جریان



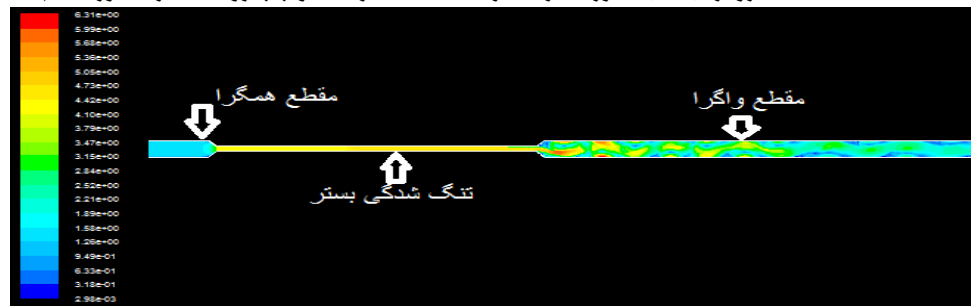
شکل ۱۵: نمودار تغییرات فشار در مقطع ورودی و مقطع خروجی جریان

شبیه‌سازی جریان میکروگردابه‌ها در مقاطع ترکیبی همگرا به واگرا

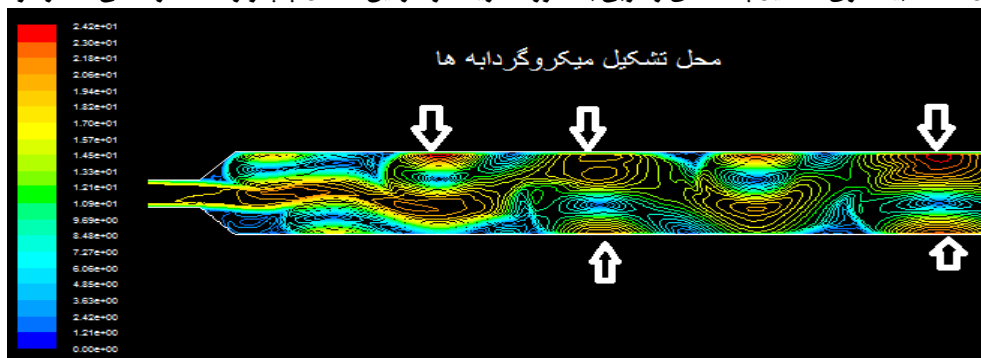
بررسی شبیه‌سازی جریان در شکل (۱۶) نشان می‌دهد که برخلاف مقاطع واگرا تشکیل میکروگردابه در ساحل سمت راست و هدایت جریان به سمت ساحل سمت چپ بوده، و در این مقطع تشکیل میکروگردابه‌ها به صورت تقریباً قرینه در مجاورت هم قرار می‌گیرند و به عبارت دیگر در مسیر رودخانه تغییر مقاطع عرضی تقریباً به شکل یکنواخت صورت می‌پذیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به دلیل عدم تغییر مقاطع عرضی، تغییری در الگوی جریان و رسوب‌گذاری و تحول رودخانه و شریانی شدن آن در این قسمت از رودخانه ایجاد نمی‌شود. بنابراین در رودخانه‌های با بسترهای تلاقی همگرا-واگرا تشکیل میکروگردابه‌ها در اثر افزایش ناگهانی سرعت و ثابت ماندن فشار در قسمت تنگ شدگی بستر رخ می‌دهد و این امر باعث می‌شود که تشکیل پشته‌های رسوبی به صورت قرینه در طرفین ساحل چپ و راست رودخانه شکل گیرد. بررسی خروجی شبیه‌سازی میکروگردابه‌ها در مدل فلوتنت نشان می‌دهد که تشکیل میکروگردابه‌ها در مقاطع واگرا باعث می‌شود که جریان به صورت گردشی ابتدا به ساحل سمت راست و سپس به ساحل سمت چپ منحرف شود. و در نهایت این امر باعث می‌شود اولین پشته رسوبی در مقاطع واگرا به همگرا اندکی پس از خروج جریان بر اثر تغییر مقطع و مورفولوژی رودخانه از قسمت تنگ شدگی مقطع در ساحل سمت چپ تشکیل گردد (اشکال ۱۷ و ۱۸). آگاهی از اینکه در چنین مقاطع حساس رودخانه تشکیل این میکروگردابه‌ها به چه نحوی تشکیل می‌شود، بسیار حائز اهمیت است چرا که تشکیل این میکروگردابه در نهایت باعث هدایت جریان و تشکیل پشته‌های رسوبی و رسوب‌گذاری می‌شود و این امکان به وجود می‌آید که در مقاطع حساس رودخانه با شناسایی مکان و نحوه تشکیل پشته‌های رسوبی در ساحل رودخانه، طرح‌های ساماندهی رودخانه را با موفقیت بیشتری طراحی و اجرا نمود. همچنین می‌توان در رودخانه‌های بزرگ مناطق حساس فرسایشی، رسوب‌گذاری و توزیع عرضی و طولی، تغییر مقاطع عرضی و سرعت تغییر مورفولوژی و درجه تحول رودخانه را به شکل شریانی (بره بره شدن) و حتی مئاندری شدن و سیل خیزی را شناسایی و پیش‌بینی نمود. بنابراین در درجه اول بایستی مکانیسم و عملکرد تشکیل میکروگردابه‌ها را با معادلات فشار و سرعت جریان در مقاطع همگرا و واگرا بررسی نمود، تا مشخص شود به چه صورت در مسیر (پروفیل طولی) و به چه شکلی در عرض (مقطع عرضی) بر تشکیل میکروگردابه‌ها و پشته‌های رسوبی تأثیر می‌گذارند.



شکل ۱۶: تشکیل میکروگردابه‌ها به صورت قرینه در ساحل سمت راست و چپ رودخانه در مجاورت هم



شکل ۱۷: شبیه‌سازی تشکیل پشته‌های رسوبی به صورت قرینه در طرفین ساحل چپ و راست در تلاقی همگرا-واگرا

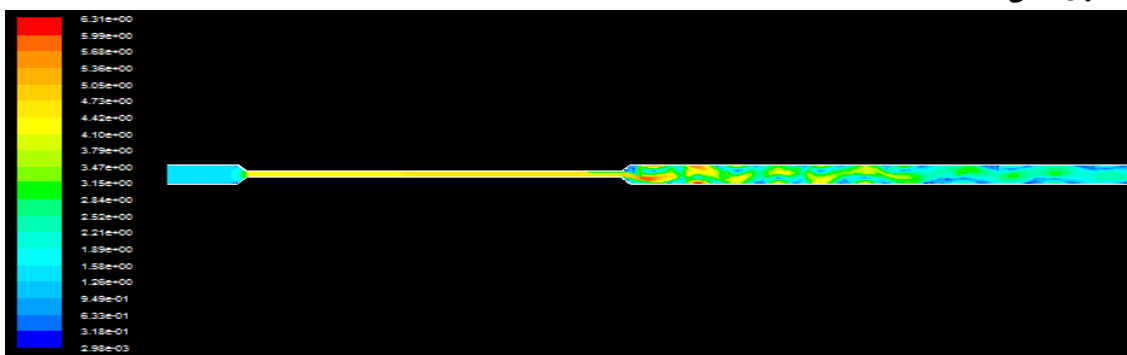


شکل ۱۸: نحوه تشکیل میکرو گردابه‌ها در ساحل سمت چپ و راست رودخانه و توزیع یکنواخت آن

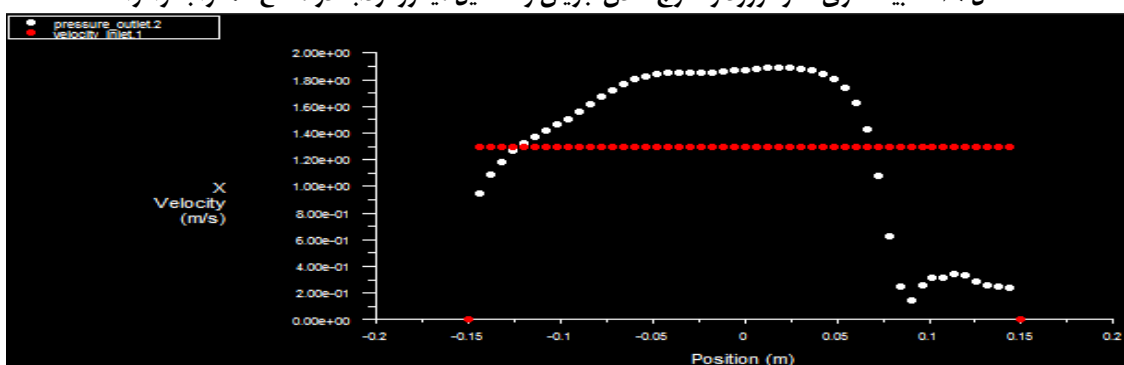
بررسی معادلات فشار و سرعت در مقاطع ترکیبی همگرا-واگرا

به منظور بررسی تأثیر مقدار سرعت در مدل فلونتت بر تشکیل میکروگردابه‌ها، ابتدا سرعت در مقطع ورودی جریان که با رنگ قرمز مشخص شده، کاملاً ثابت در نظر گرفته شد، تا بتوان میزان تغییرات را با دقت بیشتر در خروجی مقطع واگرا بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که در مقاطع ترکیبی همگرا-واگرا بر خلاف مقطع واگرا تغییرات سرعت خروجی ابتدا پایین‌تر از سرعت ورودی بوده و سپس سریعاً تغییرات سرعت صعودی شده و بالاتر از سرعت ورودی جریان قرار می‌گیرد. این افزایش ناگهانی سرعت جریان در این مقطع مورفولوژی رودخانه حاصل انرژی نهفته شده در قسمت بستر در قسمت تنگی شدگی مسیر رودخانه می‌باشد. به عبارت دیگر عبور جریان با سرعت و فشار ثابت از یک مقطع باز به یک مقطع تنگ ابتدا موجب افزایش سرعت و فشار جریان شده، و با ورود جریان به مقطع واگرا این انرژی به سرعت آزاد و در نهایت در انتهای کانال این سرعت کاملاً کاهش پیدا می‌کند. و باعث می‌شود که تشکیل میکروگردابه در مقاطع میانی واگرا با شدت بیشتری صورت پذیرد و زمینه را برای تشکیل پشته‌های رسوبی به شکل بانکت‌های شنی در بستر رودخانه فراهم نماید. ادامه چنین فرایندی از الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری منجر به تحول رودخانه می‌شود. اشکال (۱۹، ۲۰ و ۲۱) نحوه شبیه‌سازی تغییرات فشار در مقاطع عرض رودخانه از مورفولوژی ترکیبی همگرا به واگرا را در مدل فلونتت نشان می‌دهند.

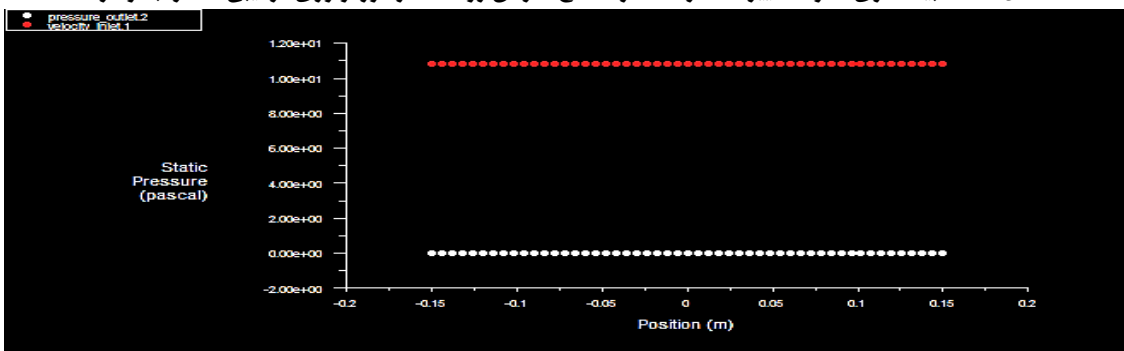
بررسی‌ها بیانگر این است که تغییرات سرعت منجر به تغییرات فشار می‌شود. به طوری که در ابتدا و انتها از مقاطع همگرا به واگرا و از واگرا به همگرا، کاهش سرعت و در قسمت میانی بستر با مقطع واگرا افزایش سرعت جریان مشاهده می‌شود. بررسی شکل ۲۱ و تغییرات فشار در مقاطع همگرا- واگرا نشان می‌دهد که بر خلاف مقاطع واگرا که تغییرات فشار در ورودی و خروجی جریان کاملاً محسوس است، در این مقطع کاملاً ثابت بوده و باعث می‌شود که الگوی تشکیل میکروگردابه در این مقطع به صورت قرینه در روبه روی هم در ساحل سمت چپ و راست توزیع شود. اما در مقطع واگرا به دلیل الگوی توزیع فشار کاملاً غیر یکنواخت، میکروگردابه با شدت بیشتر در ساحل سمت راست رودخانه تشکیل شده و موجب تغییر در الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری شده است. به طور کلی نتایج شبیه‌سازی نحوه رسوب‌گذاری و فرسایش و تطابق آن با پیمایش و مشاهدات صحرائی به ویژه در بررسی میدانی سواحل راست و چپ مسیر اصلی رودخانه، گویای این واقعیت است که مدل به خوبی توانسته تأثیر تغییر مورفولوژی محل تلاقی شبکه زهکشی بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری را شبیه‌سازی نماید و ثابت می‌کند رودخانه سیمینه‌رود با تغییر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در طول زمان به علت تغییر دبی، سرعت جریان و فشار ناشی از تغییر مقاطع مورفولوژی و با تشکیل میکروگردابه‌ها در حال تحول به مثانداری شدن است.



شکل ۱۹: شبیه‌سازی نحوه ورود و خارج شدن جریان و تشکیل میکروگردابه در مقطع همگرا به واگرا



شکل ۲۰: شبیه‌سازی نحوه تغییرات سرعت در مقاطع عرض رودخانه از مورفولوژی ترکیبی همگرا به واگرا



شکل ۲۱: شبیه‌سازی نحوه تغییرات فشار در مقاطع عرضی رودخانه از مورفولوژی ترکیبی همگرا به واگرا

نتیجه‌گیری

در محل تغییر مورفولوژی مقاطع عرضی رودخانه‌ها، تشکیل جریان‌های گردابه‌ای و افزایش سرعت در محل تنگ شدگی جریان باعث تغییر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری می‌شود. فرسایش بستر در محل تلاقی رودخانه و تشکیل بانکت‌های رسوب‌گذاری در پایین دست آن ارتباط مستقیم با پویایی جریان از جمله تغییرات عمق و سرعت جریان و همچنین ابعاد ناحیه جداسازی در این محل دارد. تأثیر متغیرهای مختلف از قبیل نسبت دبی رتبه رود پایین‌تر به بالاتر در شبکه زهکشی رودخانه حوضه آبریز باعث تغییر نسبت سرعت جریان به سرعت آستانه حرکت و نسبت مقاطع عرضی شبکه زهکشی فرعی به اصلی شده و بر آستانه حرکت و شکل و عمق چاله‌های فرسایشی در اتصال‌های مختلف تأثیر می‌گذارد. در محل تلاقی شبکه زهکشی، الگوی جریان به گونه‌ای است که چاله فرسایش عمیق در بستر، فرسایش سواحل، رسوب‌گذاری و بالاخره گردابه‌ای قوی به وجود می‌آید که باعث ایجاد خسارت به ابنیه مجاور، و تغییر مورفولوژی رودخانه می‌شود. در این تحقیق ویژگی‌ها و کارایی مدل عددی فلونت به عنوان یک مدل دو بعدی، برای شبیه‌سازی الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در مسیر رودخانه اصلی سیمینه رود همدان با در نظر گرفتن تغییر مقاطع و مورفولوژی رودخانه از همگرا به واگرا و برعکس مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در محل تلاقی جریان واگرا به همگرا به علت تغییر و افزایش سرعت جریان، میکروگردابه‌ها به سرعت و شدت بیشتر در ساحل سمت راست با پهنای بستر کمتر نسبت به بستر ساحل سمت چپ تشکیل می‌شود. بنابراین در رودخانه‌های با محل تلاقی واگرا ابتدا میکروگردابه‌ها در ساحل سمتی از رودخانه که پهنای بستر آن اندکی کوچکتر از ساحل سمت مقابل باشد، تشکیل می‌شود. لذا تشکیل میکروگردابه‌ها (پشته‌های رسوبی) ابتدا در ساحل سمت راست و در انتهای جریان با وسعت بزرگتر به علت انحراف جریان در ساحل سمت چپ تشکیل می‌شوند. بررسی و مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که تداوم تشکیل پشته‌های رسوب‌گذاری در مسیر رودخانه ضمن تغییر مورفولوژی مقاطع عرضی، زمینه را برای تشکیل بانکت‌های شنی در بستر رودخانه فراهم آورده و ادامه چنین فرایندی از الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری ناشی از تشکیل میکروگردابه‌ها منجر به تحول رودخانه به شکل شریانی می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در تنش رینولدز 130 تشکیل چاله‌های فرسایشی (میکروگردابه) در ساحل سمت راست باعث انحراف جریان به سمت ساحل چپ شده و این امر موجب افزایش رسوب‌گذاری در ساحل چپ و افزایش سرعت در ساحل راست و فرسایش در این قسمت می‌شود. از طرف دیگر در رودخانه‌های با محل تلاقی ترکیبی همگرا به واگرا تشکیل میکروبه گردابه‌ها بر خلاف مقاطع دیگر به صورت قرینه در دو ساحل سمت چپ و راست توزیع شده‌اند، که این امر به دلیل افزایش ناگهانی سرعت جریان و ثابت ماندن فشار در قسمت معبر تنگ شدگی است. بنابراین می‌توان گفت تشکیل پشته‌های رسوبی در این مقاطع در دو طرف ساحل رودخانه به صورت قرینه رخ می‌دهد. که با نتایج حسین زاده و همکاران (۱۳۹۷)، اصغری سراسکانرود، (۱۳۹۶)، کلامی و همکاران (۱۳۹۸)، محجوب و همکاران (۱۳۹۷)، لای و همکاران^۱ (۲۰۱۹)، کلون و همکاران^۲ (۲۰۱۷) از لحاظ دقت، روش و نتایج مطابقت دارد. آگاهی از این که در چنین مقاطع حساس رودخانه تشکیل این میکروگردابه‌ها به چه نحوی تشکیل می‌شود، بسیار حائز اهمیت است و این امکان به وجود می‌آید که در مقاطع حساس رودخانه با شناسایی مکان و نحوه تشکیل پشته‌های رسوبی و رسوب‌گذاری در ساحل رودخانه، طرح‌های ساماندهی رودخانه را با موفقیت بیشتری طراحی و اجرا نمود. پیشنهاد می‌شود از مدل‌های شبیه‌سازی دو و سه بعدی مانند CCHE2D و SPIV و FLOW-3D استفاده و نتایج حاصله مقایسه و بهترین مدل به کار گرفته شود.

¹.Lai et al

².Klone et al

منابع

- اصغری سراسکانرود، ص.، ۱۳۹۶. تحلیل شکل مجرای رودخانه کلکان چای (حد فاصل سد کلکان تا الحاق به رودخانه قرتقو)، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۶، شماره ۲، صص ۱۱۶-۱۳۳.
- حسین زاده، م، خالقی، س، رستمی، م، ۱۳۹۷. تحلیل پایداری کرانه و مورفومتری رودخانه گللالی قروه به منظور پایدار سازی در برابر فرسایش، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۶، شماره ۴ - شماره پیاپی ۲۴، صص ۱۶۰-۱۷۱.
- حیدری، م، ۱۳۸۱. شبیه‌سازی جریان روی سرریز اوجی با استفاده از نرم افزار FLUENT، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، صص ۱۱۶.
- خسروی غ.، ۱۳۹۷. بررسی هیدرودینامیکی الگوی آشفته جریان و انتقال رسوب توسط مدل *CCHE2D* (مطالعه موردی: پیچانرود پایین دست سد میناب) نشریه مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران: بهار ۱۳۹۷، دوره ۱۲، شماره ۴۰، صص ۲۳-۳۹.
- خیری‌زاده آروق، م، رضایی مقدم، م، رجبی، م، دانشفر، ر، ۱۳۹۶. تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرینه رود با استفاده از روش‌های ژئومورفومتریکی، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۴، صص ۷۶-۱۰۲.
- شرفی، س، سکوند، ح، کمالی، ز، ۱۳۹۸. بررسی تغییرات مکانی- زمانی مورفولوژی رودخانه سیلاخور در استان لرستان، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۳، پیاپی ۳۱، صص ۱۱۵-۱۳۱.
- صالحی، م، فرهادی، ع. ر، تملیه، ذ، احمدپور، ظ، ۱۳۹۷. مدل‌سازی عددی امواج ناشی از شکست سد سنگی - ملاتی در زیر حوضه نوشان آذربایجان غربی، مجله محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۴، شماره ۲، صص ۹۰-۱۰۰.
- صالحی، س، سیف، ع، ۱۳۹۷. مورفومتری پروفیل طولی دره‌های سهند، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۶، شماره ۴، صص ۶۹-۵۳.
- عبقری، ه، فرهادی ع. ر.، ۱۳۹۱. بررسی مشخصات موج ناشی از شکست سد و مدل‌سازی عددی دو بعدی آن در محیط فلونت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، صص ۱۳۵.
- عزیززی، ش، ایلدرمی، ع، نوری، ح، ۱۳۹۸. تأثیر تغییر مقاطع عرضی بر طغیان و ظرفیت انتقال رودخانه آبشینه همدان، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۸، شماره ۲، صص ۲۰۹-۱۸۹.
- کلامی، س، مظاهری، م، محمدولی سامانی، ج، ۱۳۹۸. تشخیص روابط هندسی- هیدرولیکی سطح مقطع رودخانه‌ها با استفاده از حل معکوس معادلات سنت-ونانت و کاربرد آن، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲، شماره ۲۲، صص ۳۳-۴۲.
- محجوب، ا، کیلانه‌ئی، ف، منصورزاده، م، ۱۳۹۷. مقایسه مدل‌های سه‌بعدی شبیه‌سازی جریان و رسوب. فصلنامه علمی ترویجی جاده، دوره ۲۶، شماره ۹۵، صص ۳۵ تا ۴۶.
- یاسی، م، نصیری سلطان احمدی، ل، ۱۳۹۶. شبیه‌سازی و ارزیابی جریان در رودخانه‌های با جریان دائمی با دو مدل *HEC-RAS* و *Ruber BE*، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۷، شماره ۲، صص ۲۲۵ تا ۲۳۶.
- یمانی، م، مقصودی، م، محمدخان، ش، مرادی، ا، ۱۳۹۴. طبقه‌بندی مورفولوژیکی آبراهه رودخانه تلوار بر اساس روش رزگن و کارایی آن (حد فاصل روستای کچی‌گرد تا حسن‌خان)، نشریه پژوهش‌های دانش زمین، دوره ۶، شماره ۲۳، صص ۱-۱۸.

- Best, J. L. (1987). *Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology*, *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*. "Spec. Publ. SEPM Soc. Sediment. Geol, 39, 27-35.
- FLUENT Inc. (2006). *FLUENT 6.3. User's and Tutorial Guide Manual*, Lebanon, USA.
- Francesco, S., & Manciola, P. (2009). *CFD Modelling Approach for Dam Break Flow Studies*", *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*. 6, 6759-6793 .
- Fujita, I., & S. Komura. (1989). *Visualization of the flow at a confluence*, in *Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*. "edited by I. Universal Academy Press, International Association of Hydraulic Research, Tokyo, Japan.
- Hager, W. H. (1989). *Transitional flow in channel junctions*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, 243-259.
- Iqbal, M., Ghumman, A. R., Haider, S., Hashmi, H. N., & Khan, M. A. (2019). *Application of Godunov type 2D model for simulating sediment flushing in a reservoir*. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(5), 4289-4307.
- Keane, T. D., & Sass, C. K. (2017). *Channel Evolution Models as Predictors of Sediment Yield*, *Journal of the American Water Resources Association*, 53(6), 1513-1529.
- Klavon, K.; Fox, G., Guertault, L., Langendoen, E., Enlow, H., Miller, R., & Khanal, A. (2017). *Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM)*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 191-213.
- Lai, Y. G., & Wu, K. (2019). *A Three-Dimensional Flow and Sediment Transport Model for Free-Surface Open Channel Flows on Unstructured Flexible Meshes*. *Fluids*, 4(1), 18.
- Modi, P. N., P. D. Ariel, & M. M. Dandekar. (1981). *Conformal mapping for channel junction flow*. "Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107, 1713-1733.
- Ouda, M. (2019). *Multiphase Modelling of Sediment Transport and Bed Erosion for the Study of Coastal Morphodynamics*. (KU Leuven, Technology Campus Brugge, Belgium) October 2019.
- Ribeiro, M. (2011). *Influence of tributary widening on confluence morphodynamics*. Ph.D. thises Qing-Yuan, Y., W. Xian-Ye, L. Wei-Zhen, and W. Xie-Kang. 2009. "Experimental study on characteristics of separation zone in confluence zones in rivers." *Journal of Hydrologic Engineering*, 14, 166-171.
- Weiming, Wu. (2008). *Computational River Dynamics*, NCCHE. University of Mississippi, USA.