

شبیه سازی تغییرات رودخانه کلیبرچای با استفاده از مدل سزار (CAESAR)

سمیه خالقی^۱؛ استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محمد مهدی حسین زاده؛ دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

پیام فتح اله اتی کندی؛ دانش آموخته کارشناس ارشد دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۹

چکیده

تغییرات مجرای رودخانه، فرسایش کناره‌ای و رسوب گذاری کناره‌ای، فرآیندهای طبیعی رودخانه‌های آبرفتی هستند که باعث تخریب زمین‌های کشاورزی اطراف و خسارت به تأسیسات انسانی اطراف رودخانه می‌شود. در پژوهش حاضر از مدل CAESAR جهت ارزیابی تغییرات رودخانه کلیبرچای به منظور اندازه گیری میزان تغییرات ۳ کیلومتر از مجرای اصلی رودخانه استفاده شده است. CAESAR یک مدل اتومای سلولی از تکامل سیستم رودخانه است. برای مدلسازی، داده‌های ورودی مانند توپوگرافی (DEM)، دبی روزانه سال ۱۳۹۱ و اندازه رسوبات تهیه و سپس تغییرات مجرا شبیه سازی شد. تغییرات کانال در قبل و بعد از شبیه سازی با ترسیم نیمرخ‌های هر کدام از مقاطع و بررسی نقاط حساس به فرسایش و رسوبگذاری شناسایی شدند. ۶ مقطع از بازه مورد مطالعه انتخاب شدند. با مقایسه‌ای که بین نیمرخ‌های عرضی صورت گرفت، تغییرات در هندسه کانال قابل مشاهده بود. تغییرات در عرض کانال و شکل کانال در همه مقاطع دیده شد و تنها عمق متوسط کانال در مقاطع ۱ و ۲ و ۶ و ۴ تغییر پیدا کردند. و مقاطع ۱ و ۲ و ۳ که در قسمت اولیه کانال اصلی قرار داشتند، تحت تاثیر فرسایش قرار گرفتند. و بعد از طی کردن مسافتی، حالت رسوبگذاری در مقاطع ۴ و ۵ و ۶ مشاهده شد.

واژه های کلیدی: فرسایش و رسوبگذاری، سزار (CAESAR)، رودخانه کلیبرچای

مقدمه

رودخانه به عنوان سیستمی پویا، مکان و خصوصیات مورفولوژیکی خود را همواره برحسب زمان، عوامل ژئومورفیک، زمین‌شناختی، هیدرولوژیکی و گاه در اثر دخالت بشر تغییر می‌دهد (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۱). در واقع به طور طبیعی، تعدیل چشم انداز توسط عوامل کنترلی درونی مانند شیب، توپوگرافی و نوع رسوبات و عوامل کنترلی بیرونی مانند تغییر اقلیم، تغییر رسوب و تغییرات پوشش گیاهی است (Brierley and Fryirs, ۲۰۰۵). تغییرات رودخانه‌ای به صورت فرسایش یا رسوب‌گذاری در بستر، تخریب دیواره‌ها، تغییر بستر جریان تغییر و جابجایی مئاندرها و تغییر در فرم رودخانه نمودار می‌شود (Schumm, ۲۰۰۵). که این تغییرات باعث تحمیل تغییرات فراوان در حاشیه‌های رودخانه و ایجاد مشکلات طبیعی و خسارات انسانی می‌شود (Gregory, ۲۰۰۶). در زمینه شبیه سازی و تحول سیستم‌های رودخانه‌های مدل‌های مختلفی ارائه گردیده است که یکی از آنها مدل‌های اتومات سلولی می‌باشد. اصول پایه‌ای مدل‌سازی سلولی در ژئومورفولوژی این است که لندفرم‌ها توسط شبکه‌ای از سلول‌ها و فعل و انفعالات بین آنها با استفاده از قوانین ساده و بر اساس کنترل‌های فیزیکی نمایش داده می‌شوند (Nicholas, ۲۰۰۵). مزایای اتومات سلولی شامل سرعت، فضای گسسته، محلی بودن و موازی بودن می‌باشد (فهمی فر و همکاران، ۱۳۸۵). مدل اتومات سلولی اولین بار در دهه ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ به منظور شبیه سازی سیستم‌های پیچیده در فیزیک و زیست‌شناسی به کار گرفته شد و سپس در دهه ۱۹۷۰ در سایر حوزه‌های مطالعاتی دیگر مورد استفاده قرار گرفت (رضازاده و میراحمدی، ۱۳۸۸). مورای و پائولا^۱ (۱۹۹۴، ۱۹۹۷) از پیشگامان کاربرد مدل سلولی در سیستم‌های رودخانه‌ای بوده‌اند. بعدها مدل‌های سلولی به طور گسترده در سیستم‌های رودخانه‌ای و سیلاب (Wu et al., ۲۰۰۶; Douvinet et al., ۲۰۰۷; Van et al., ۲۰۰۷) به کار گرفته شدند و کولتارد^۲ و همکاران (۱۹۹۶، ۱۹۹۸) یک مدل اتومای سلولی از تکامل حوضه رودخانه را توسعه دادند که بعدها به نام مدل CAESAR^۳ نام گرفت که بعدها محققین دیگری این روش را بکار برده و توسعه دادند از جمله: ون^۴ و همکاران (۲۰۰۷) اتومای سلولی و مدل CAESAR را برای پیش‌بینی سیلاب در یک سیستم رودخانه گیسویی^۵ در لائوس^۶ به کار بردند و دینامیک مجرا را در رابطه با پیش‌بینی الگوی پهنه سیلاب و عمق آب محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که این مدل، مدلی مناسب برای سیستم‌های پیچیده هیدرولیکی مانند رودخانه‌های گیسویی می‌باشد. ون‌دویل^۷ و همکاران (۲۰۰۷) در مقاله‌ای به توضیح دینامیک رودخانه‌ای با استفاده از مدل CAESAR (مدل اتومای سلولی تکامل چشم انداز) در بازه‌ای از رودخانه تیفی^۸ در انگلستان پرداختند. این مدل بر پایه مفهوم اتومای سلولی بوده و به صورت تکرار یکسری از فرآیندهای محلی و قوانینی است که رفتار داخل یک سیستم را کنترل می‌کند. این مدل نسخه تغییر یافته CAESAR است که با کاربرد یک شرایط فیزیکی برای شبیه‌سازی تغییرات، حمل و رسوبگذاری ذرات است. به طوری که پاسخ ژئومورفولوژیکی غیر خطی می‌تواند در داخل مدل شبیه‌سازی شود. هنکوک^۹ و همکاران (۲۰۱۱) به

۱ - Murray and Paola

۲ - Coulthard

۳- Cellular Automaton Evolution Slope and River model

۴- Van

۵- Bifurcation

۶- Laos

۷- Van De Wiel

۸ - Teifi

۹ - Hancock

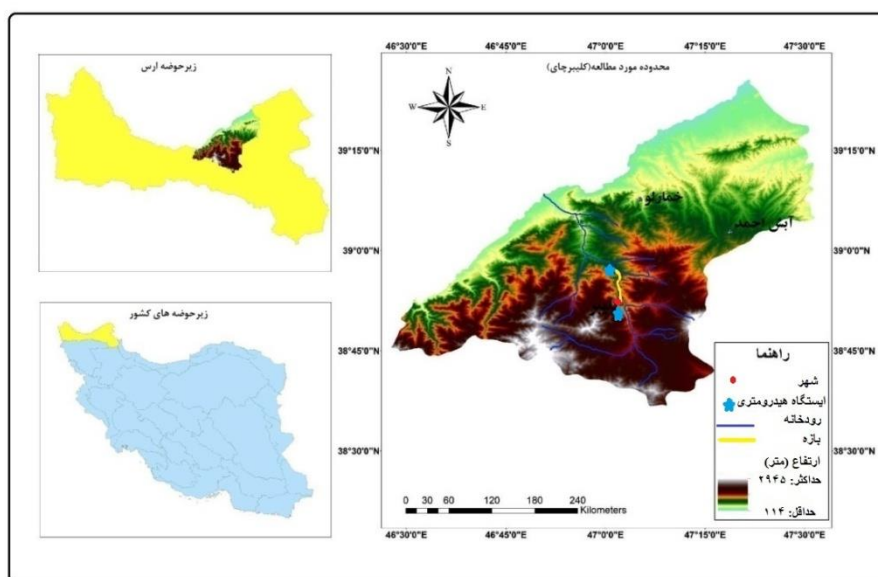
مدل‌سازی فرسایش و حرکت مجرا در پاسخ به تغییرات بارش در حوضه‌ای در جنوب شرق استرالیا پرداختند. در این تحقیق از مدل سلولی CAESAR که قادر به نشان دادن میزان فرسایش و تغییرات مجرا می‌باشد، استفاده کردند. نتایج نشان داد که حساسیت حوضه به الگوهای متفاوت بارش زیاد بوده و تغییرات کوچک بارش می‌تواند منجر به بار رسوبی زیادی شود که نشان‌دهنده تغییر اقلیم است. زیلیانی^۱ و همکاران (۲۰۱۳) جهت کاهش پیچیدگی مدل‌سازی در رودخانه‌های گیسویی، به ارزیابی مدل CAESAR از طریق آنالیز حساسیت، کالیبره کردن و اعتبارسنجی مدل پرداختند. نتایج نشان داد که این مدل قادر به تولید تغییرات مورفولوژیکی بازه و بار رسوبی سالانه می‌باشد. هنکوک و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل CAESAR-Lisflood حساسیت بارش‌های حوضه‌ای معدن کروی شده در شمال استرالیا در بر روی خروجی رسوب در یک دوره ۱۰۰ ساله پرداختند. نتایج نشان داد که هر تغییر در بارش روی حمل رسوب و شکل فرسایش و تکامل چشم انداز موثر است. از تحقیقات داخلی نیز تنها خالقی و همکاران (۱۳۹۵) به شبیه‌سازی میزان تحول و فرسایش در سیستم رودخانه‌ای حوضه آبریز ليقوان چای با استفاده از مدل CAESAR پرداختند و میزان حفر و رسوبگذاری در حوضه و مجرای رودخانه را مشخص نمودند.

در این تحقیق میزان تحول و فرسایش و رسوبگذاری بازه‌ای از رودخانه کلیبر چای با توجه به شرایط توپوگرافی، اندازه ذرات و دبی‌های روزانه سال ۱۳۹۱ با استفاده از مدل سزار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

داده و روش کار

الف) منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز کلیبر چای به مختصات جغرافیایی "۴۵/۴۰/۲۵" تا "۴۷/۲۰/۳۵" طول شرقی و "۳۸/۴۰/۲۵" تا "۳۹/۱۰/۳۵" عرض شمالی، در زون ساختاری البرز- آذربایجان قرار دارد که اصطلاحاً به کوه‌های قرا داغ موسوم است. آبراهه اصلی کلیبر چای که بازه مورد مطالعه در آن قرار دارد، از روستای پیغام در جنوب شهر کلیبر شروع می‌شود و تا روستای قشلاق ادامه دارد. رودخانه کلیبر چای بعد از پیوستن به رودخانه مرز رود که زهکشی اصلی ارتفاعات قندوان باشی و سایگرام داغی است، به رودخانه مرزی ارس می‌ریزد. میانگین بارندگی سالانه در این حوضه ۳۸۶ میلی‌متر گزارش شده است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۷). اقلیم منطقه نیمه مرطوب است. توجه به وضعیت زمین‌ساخت محدوده مورد مطالعه که بخشی از ورقه زمین‌شناسی شهرستان‌های ورزقان، کلیبر و اصلاندوز را شامل می‌گردد آشکار می‌کند که زمان تأثیر نیروهای تغییر شکل‌دهنده در محدوده مورد مطالعه همزمان با فازهای کوهزایی آلپی پسین است (نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ کلیبر). بازه مورد مطالعه مسیری به طول ۳ کیلومتر از رودخانه کلیبر چای است (شکل ۱) که با انجام عملیات صحرائی، برداشت‌ها و نمونه‌گیری‌ها مورد بررسی و سپس تغییرات آن با استفاده از مدل CAESAR شبیه‌سازی شد.



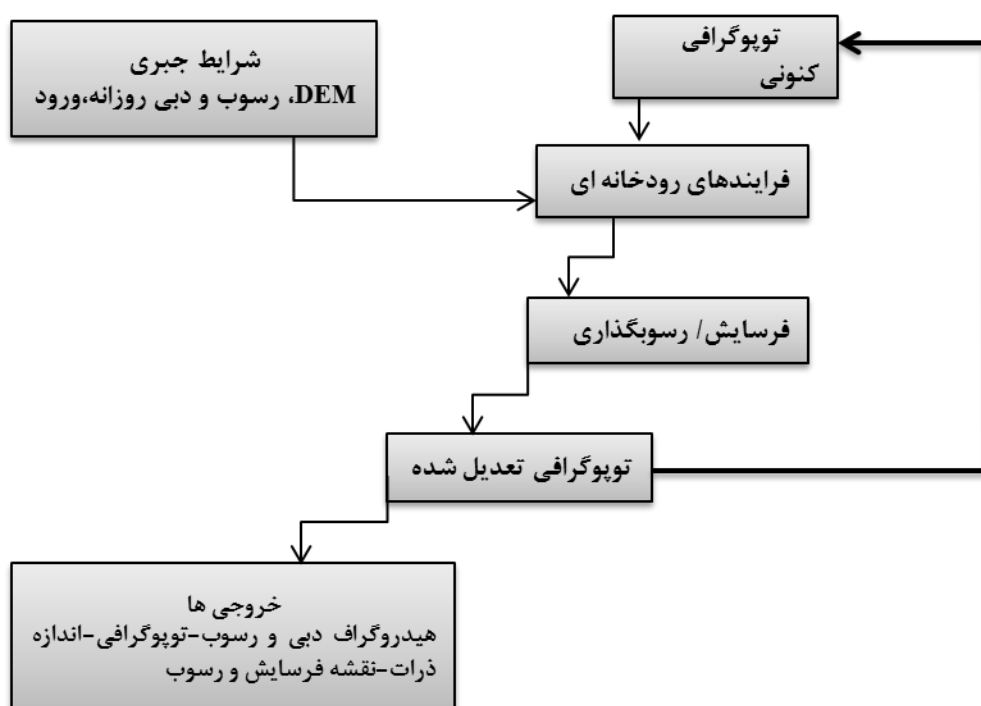
شکل ۱: حوضه کلیبر چای و بازه مورد مطالعه

ب) مواد و روش

• شبیه سازی تغییرات با مدل CAESAR

به منظور بررسی تغییرات مورفولوژیکی در بازه رودخانه کلیبرچای، مدل سزار انتخاب شد. از میان مدل‌های سلولی تکامل چشم انداز، مدل سزار یک مدل دو بعدی حمل آب و رسوب است که یکی از جدیدترین مدل‌های سلولی رودخانه‌ای می‌باشد. در این مدل، دبی روزانه به عنوان ورودی برای مدل هیدرولوژیکی (بر پایه TOPMODEL) به کار می‌رود. اندازه ذرات مورد استفاده در مدل ۱ تا ۲۵۶ میلی متر است. بعد از ورود داده‌ها شامل: دبی روزانه و اندازه رسوبات، مدل ارتفاعی سلول‌ها به طور همزمان به روز می‌شود. بنابراین با وجود پیچیدگی در عمل، مدل سزار در حالت بازه تنها نیازمند داده‌های ورودی ساده توپوگرافی (DEM)، دبی روزانه و اندازه رسوبات است (شکل ۲).

در مورد منطقه مورد مطالعه، بر اساس تئوری حاکم بر اتومای سلولی با استفاده از داده‌های ایستگاه باران‌سنجی کلیبر، مدل ارتفاعی رقمی (با اندازه سلولی ۴ متر) تهیه شده از روی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و برداشت‌های میدانی از طریق دوربین نقشه برداری، برداشت‌های زمینی از طریق دستگاه GPS و همچنین مشخص کردن نقاط بر روی تصاویر دیجیتال گلوب (محیط گوگل ارث)، داده‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات رسوبی در بازه، فرایند شبیه‌سازی انجام گرفت. بنابراین برای شبیه‌سازی تغییرات بازه رودخانه، تعریف توپوگرافی و شرایط اولیه بازه، داده‌های دبی روزانه، مدل رقمی ارتفاع و اندازه رسوبات در بازه مورد مطالعه مورد نیاز است (شکل ۲).



شکل ۲: طرح کلی اجرای مدل سزار (River Basin Dynamics and Hydrology Research Group, ۲۰۰۶)

شرح و تفسیر نتایج

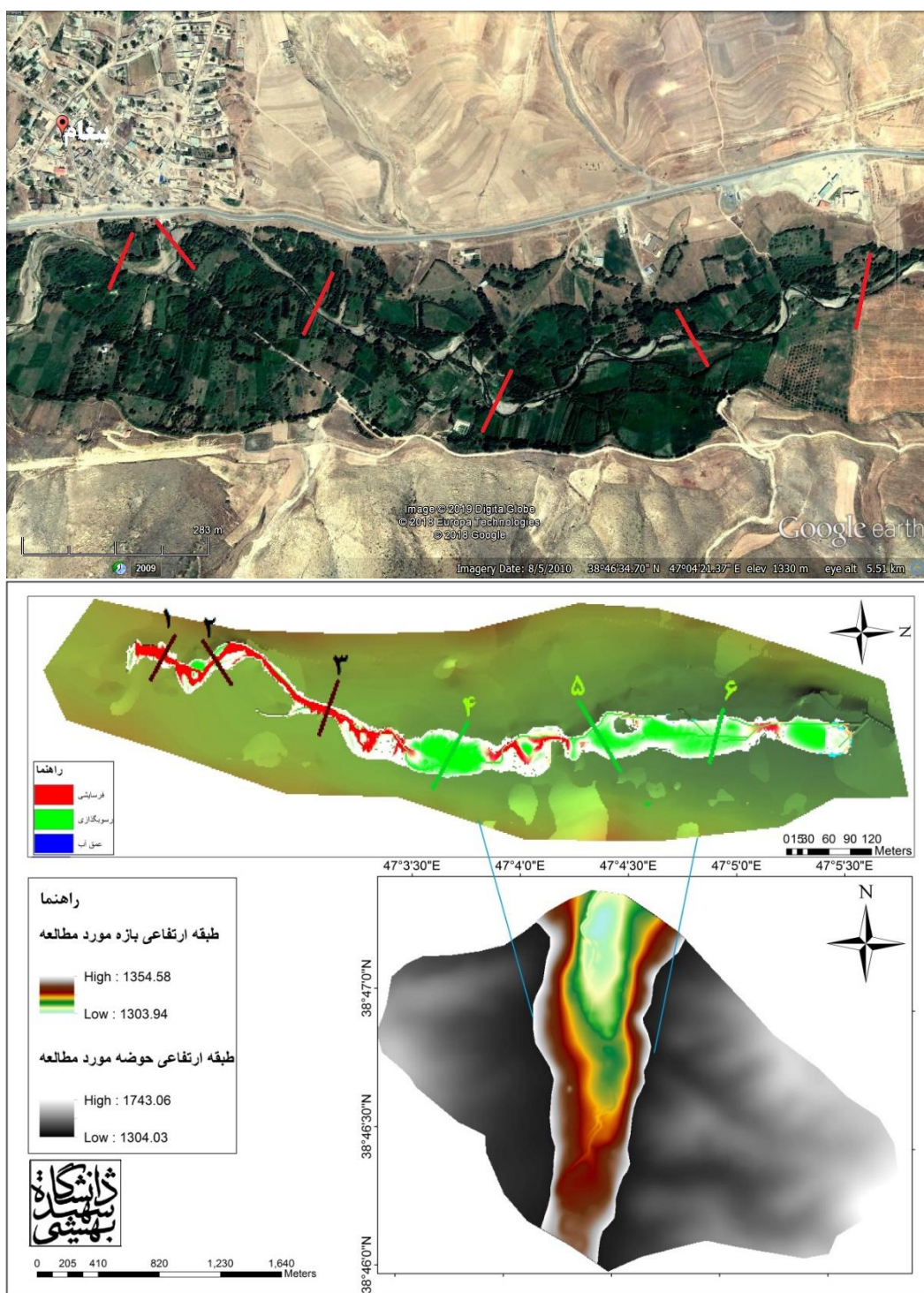
جهت بررسی شدت بارش و میزان تاثیر آن بر تغییرات مورفولوژی، از روی داده‌های رگبار مربوط به سال ۱۳۹۱ دبی روزانه مرتب گردید. سپس مدل رقومی ارتفاع ۱۰متری مربوط به آذربایجان شرقی با توجه به محدوده حوضه کلیبر برش داده شد و سپس بر اساس تطبیق و آنالیز داده‌های برداشت شده در نرم افزار ArcGis، مدل رقومی ارتفاع اصلاح و نهایی شد. از آنجایی که در مدل سزار نقطه خروجی از مدل رقومی ارتفاع باید در لبه سمت راست نقشه باشد، مدل رقومی ارتفاع با زاویه ۹۰ درجه در جهت مورد نظر چرخش یافت. همچنین مدل سزار داده‌ها را در فرمت رستر و اسکی^۱ می‌پذیرد.

در این مدل، توزیع اندازه ذرات رسوبی دربرگیرنده ذراتی به اندازه ۱ تا ۲۵۶ میلی متر است که شامل بار بستر و بار معلق می‌باشد. مدل با استفاده از متغیر زمانی که توسط مقدار حفر و رسوبگذاری کنترل می‌شود، عمل می‌کند. جدول (۱) اندازه ذرات نمونه برداری شده از منطقه را نشان می‌دهد که از طریق برداشت‌های میدانی صورت گرفته است و بر حسب واحد متر بوده و ریزترین ذره، ذرات رس به قطر (۰/۰۰۰۰۰۴۰۹) به عنوان رسوبات معلق در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱: نسبت اندازه ذرات بکار رفته در مدل سزار

اندازه ذرات (میلی متر)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نسبت ذرات (درصد)	۰/۰۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۲	۰/۰۸۶	۰/۱۳۶	۰/۲۱۹	۰/۲۶۰	۰/۰۸۹	۰/۱۴۷

^۱Raster and ascii



شکل ۳: بالا: موقعیت بازه و مقاطع مورد مطالعه. پایین: شبیه سازی فرسایش و رسوبگذاری در بازه مورد مطالعه

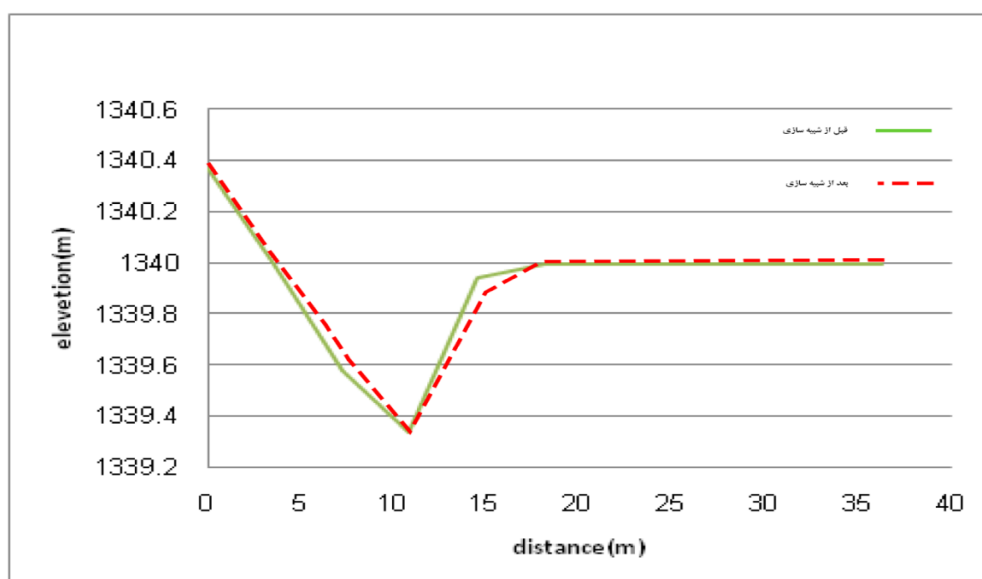
بعد از بررسی تغییرات پلان کانال که در بازه مورد مطالعه انجام گرفت، از مدل سزار حاصل شبیه سازی جریان برای تحلیل تغییرات هندسه کانال در مقاطع انتخابی در شرایط قبل و بعد از شبیه سازی استفاده شد. مقاطع به گونه ای انتخاب شدند که تحت تاثیر شبیه سازی و مدل سازی شاهد تغییراتی بوده است. این نوع تغییرات یا از نوع رسوبگذاری و یا از

نوع فرسایشی بوده اند. تمامی پارامترهای کانال اصلی در همه مقاطع مورد بررسی قرارگرفت (جدول ۲) و برای هرکدام از آنها نیمرخ عرضی قبل و بعد از شبیه‌سازی ترسیم شده است که در ادامه شرح داده می‌شود.

جدول ۲: تغییرات پارامترهای مورفومتری کانال قبل و بعد از شبیه‌سازی

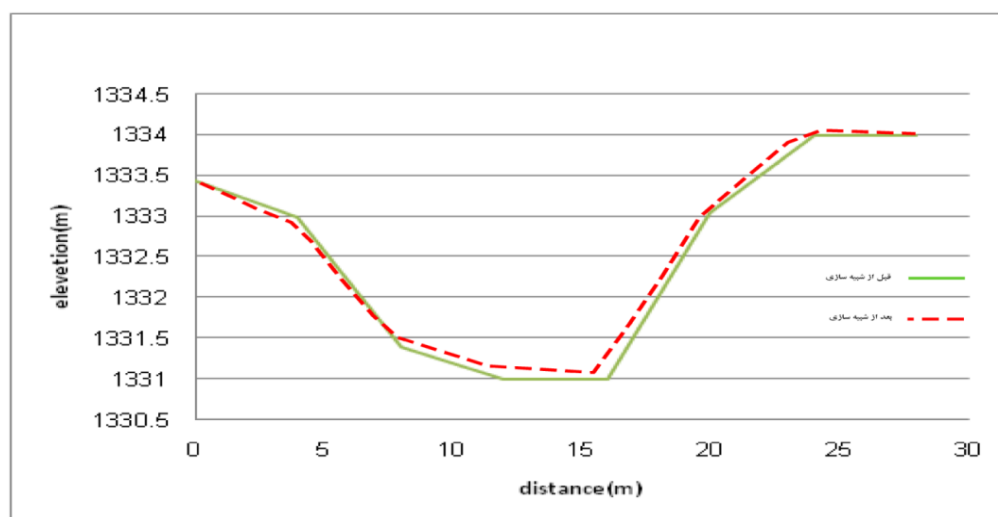
مقطع	قبل و بعد از شبیه‌سازی			قبل و بعد از شبیه‌سازی		
	عرض (متر)	ارتفاع (از سطح اساس به متر)	شکل نیمرخ عرضی	عرض (متر)	عمق (از سطح اساس به متر)	شکل نیمرخ عرضی
۱	۷	۱۳۳۹/۶۳	شکل (V)	۱۱	۱۳۳۹/۵۶	شکل (V)
۲	۱۵	۱۳۳۲	شکل (U)	۱۸	۱۳۳۲/۳	شکل (U)
۳	۲۰	۱۳۲۸/۶۶	شکل (U)	۱۹	۱۳۲۸/۶۶	شکل (V)
۴	۱۱/۵	۱۳۱۸/۶۶	شکل (U)	۸	۱۳۱۸/۴۳	شکل (V)
۵	۸	۱۳۱۳/۳	شکل (U)	۱۲	۱۳۱۳/۳	شکل (U)
۶	۱۰	۱۳۱۸/۶۶	شکل (V)	۶	۱۳۱۸/۴۴	شکل (V)

مقطع ۱: با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی که در مقطع ۱ انجام گرفت، و با ترسیم این تغییرات هم در عرض کانال و هم در ارتفاع متوسط و هم در شکل هندسی رودخانه می‌باشد. با توجه به نیمرخ‌های عرضی، تغییرات کانال از نظر عمق متوسط و عرض کانال قبل از شبیه‌سازی به ترتیب ۱۳۳۹/۶۳ و ۷ متر و بعد از شبیه‌سازی، به ترتیب ۱۳۳۹/۵۶ و ۱۱ متر است (شکل ۴). مقایسه شکل حاصل از نیمرخ عرضی قبل و بعد از شبیه‌سازی در مقطع ۱، نشان می‌دهد که مقطع فوق در شرایط فرسایشی است. اما با وجود تغییرات در هندسه کانال، در شکل کانال تغییر مشهودی مشاهده نشده است و شکل کلی کانال به صورت وی شکل (V) حفظ شده است. اما عرض کانال از ۷ متر به ۱۱ متر تغییر کرده است. لازم به ذکر است که این مقطع در ساحل سمت راست دارای دشت سیلابی، اما سمت چپ دارای یک دیواره است که به پادگانه مجاور متصل است. به نوعی می‌توان گفت که این نوع مقطع از نوع کانال‌های نسبتاً محدود است که فقط در یک سمت رودخانه دشت سیلابی وجود دارد.



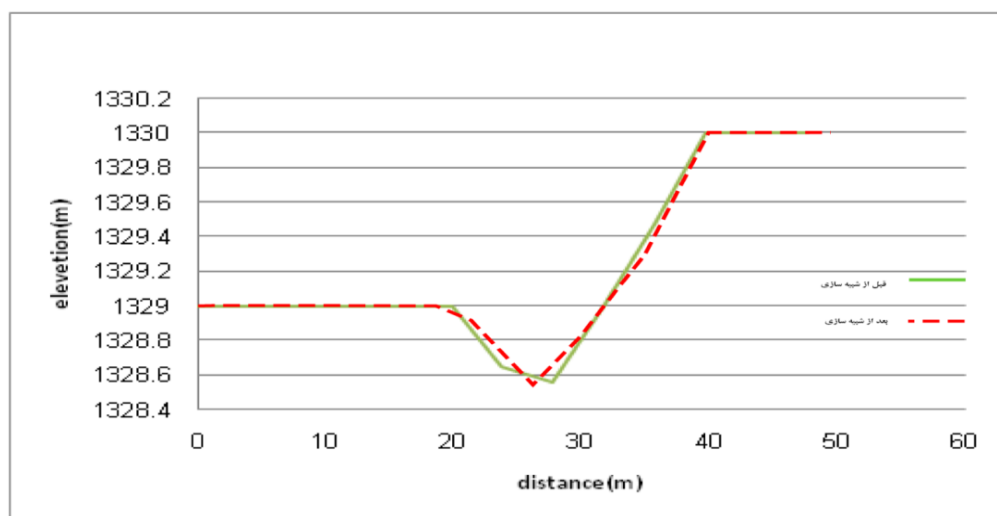
شکل ۴: مقطع عرضی ۱ قبل و از شبیه‌سازی

مقطع ۲: مقطع بعدی در فاصله ۶۰۰ متری از مقطع اول انتخاب شد. این مقطع به گونه‌ای انتخاب شد که رودخانه از نظر هندسی در حالت پیچانرودی است و قوس کانال مد نظر قرار گرفت. با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی ضریب خمیدگی در این بازه ۱/۰۱، شیب ۰/۰۲۳ درصد و جنس مواد بستر از نوع شنی می باشد. اطلاعات هندسه کانال و تغییرات در بستر کانال (عرض کانال، عمق متوسط کانال، شکل هندسی) قبل و بعد از شبیه سازی نشان می دهد که عمق متوسط کانال قبل از شبیه سازی ۱۳۳۲ متر و عرض کانال ۱۵ متر در حالی که عمق متوسط کانال بعد از شبیه سازی ۱۳۳۲/۳ و عرض کانال ۱۸ متر می باشد. بعد از احتساب ارتفاع متوسط و عرض کانال قبل و بعد از شبیه سازی و مقایسه آنها نشان داده شد که مقطع ۲ همانند مقطع ۱ در شرایط فرسایشی است. با وجود تغییرات در هندسه کانال، تغییر در عرض از ۱۵ متر به ۱۸ متر افزایش یافته است. اما تغییراتی در شکل کانال مشاهده نمی‌شود و شکل کلی کانال هم قبل و هم بعد به صورت U شکل باقی مانده است (شکل ۵).



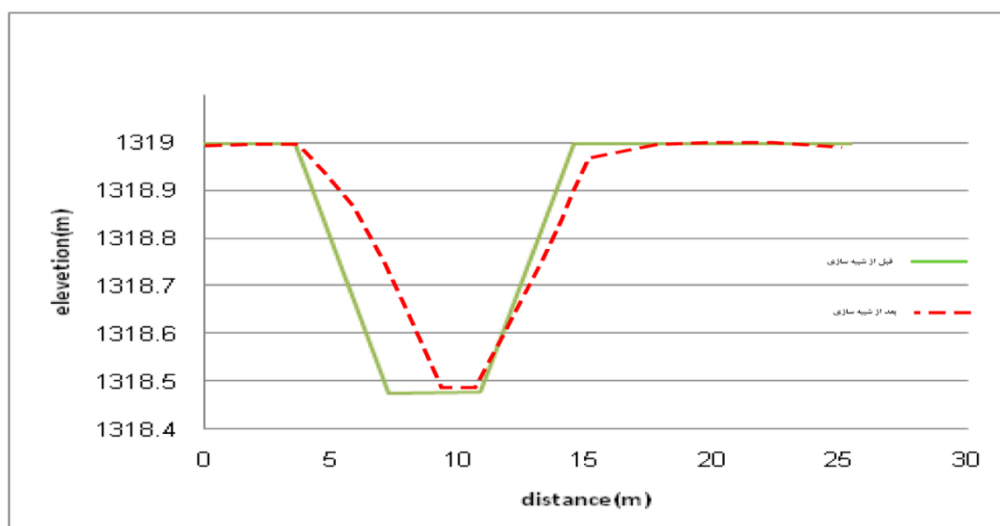
شکل ۵: مقطع عرضی ۲ قبل و از شبیه سازی

مقطع ۳: با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی که در مقطع ۳ انجام گرفت، ضریب خمیدگی در این بازه ۱/۰۲، شیب ۰/۰۲۶ درصد و جنس مواد بستر از نوع شنی می باشد. در مقطع سه نیمرخ‌های عرضی، اطلاعات عرض و ارتفاع متوسط کانال هم قبل و هم بعد شبیه‌سازی نشان داد که قبل از شبیه سازی، ۲۰ متر و ۱۳۲۸/۶۶ متر و بعد از شبیه سازی عمق ۱۹ متر و عرض کانال ۱۳۲۸/۶۶ متر است. شکل (۶). با مقایسه بین این دو نیمرخ می‌توان گفت که در هندسه کانال تغییرات مشهودی دیده نمی‌شود و شکل کانال تقریباً از یو شکل (U) به وی شکل (V) در آمده است. نکته قابل توجه در این مقطع بر خلاف مقاطع قبلی در این است که ساحل سمت چپ دارای دشت سیلابی است و ساحل سمت راست مرتفع‌تر از ساحل سمت راست و منتهی به یک پادگانه می شود. مقایسه نیمرخ عرضی دو مقطع، نشان می دهد که کانال در حال فرسایش است.



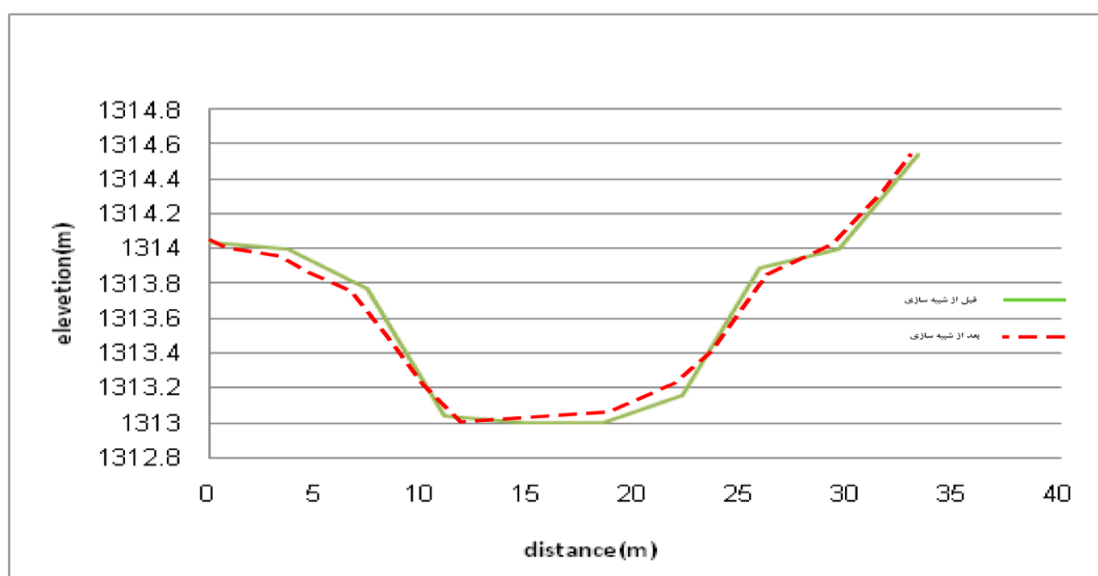
شکل ۶: مقطع عرضی ۳ قبل و از شبیه سازی

مقطع ۴: با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی، ضریب خمیدگی در این بازه $1/17$ ، شیب 0.25% درصد و جنس مواد بستر از نوع شنی می‌باشد. در مقطع ۴ عرض کانال و ارتفاع متوسط کانال قبل از شبیه سازی به ترتیب، $11/5$ متر و $1318/66$ متر است و بعد از شبیه سازی عرض کانال ۸ متر و ارتفاع متوسط $1318/43$ متر می‌باشد (شکل ۶). با توجه به محاسبات به دست آمده از نیمرخ عرضی قبل و بعد از شبیه سازی در این مقطع، عرض کانال قبلی از $11/5$ به ۸ متر تقلیل پیدا کرده است، و همچنین ارتفاع از $1318/66$ به $1318/43$ کاهش یافته است. شکل کلی کانال از یو شکل (U) به حالت وی شکل (V) درآمده است. مقایسه شکل حاصل از نیمرخ عرضی قبل و بعد از شبیه سازی در مقطع ۴، نشان می‌دهد که مقطع فوق در شرایط رسوبگذاری است. در این مقطع در هر دو سمت کانال، دشت سیلابی مشاهده می‌شود (شکل ۷).



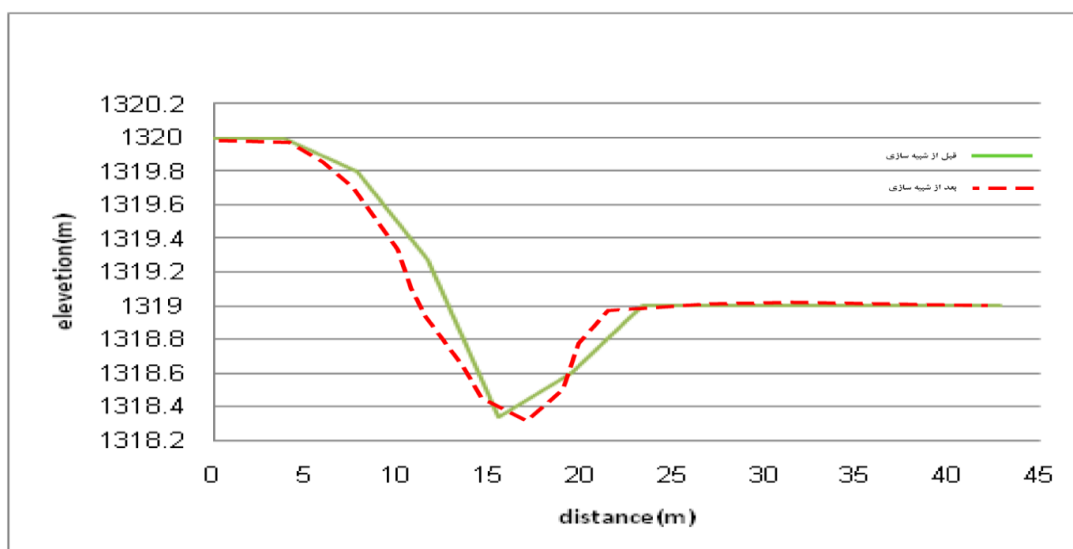
شکل ۷: مقطع عرضی ۴ قبل و از شبیه سازی

مقطع ۵: با توجه به اندازه گیری های میدانی که در مقطع ۵ انجام گرفت، ضریب خمیدگی در این بازه ۱/۱۶، شیب ۰/۰۲۵ درصد و جنس مواد بستر از نوع شنی بود. مقطع ۵ از بازه پنج با فاصله ۴۰۰ متری از مقطع ۴ انتخاب گردید. در این مقطع با توجه به عرض و ارتفاع متوسط کانال نیمرخ های مربوط ترسیم گردید. عرض کانال در قبل از شبیه سازی ۸ متر و ارتفاع متوسط ۱۳۱۳/۳ متر است. بعد از اعمال شبیه سازی هم عرض کانال ۱۲ متر و ارتفاع متوسط تغییری پیدا نکرد و همان ۱۳۱۳/۳ متر باقی مانده است (شکل ۸). مقایسه شکل حاصل از نیمرخ عرضی قبل و بعد از شبیه سازی در مقطع ۵، نشان می دهد که مقطع فوق همانند مقطع سه در شرایط رسوبگذاری است و کانال در سمت چپ دارای دشت سیلابی می باشد.



شکل ۸: مقطع عرضی ۵ قبل و از شبیه سازی

مقطع ۶: ضریب خمیدگی در این بازه ۱/۰۲، شیب ۰/۰۲۷ درصد و جنس مواد بستر از نوع شنی می باشد. با توجه به نیمرخ های عرضی، ارتفاع متوسط و عرض کانال قبل از شبیه سازی به ترتیب ۱۳۱۸/۶۶ و ۱۰ متر و بعد از شبیه سازی، به ترتیب ۱۳۱۸/۴۴ و ۶ متر است (شکل ۹). مقایسه شکل حاصل از نیمرخ عرضی قبل و بعد از شبیه سازی در مقطع یک از بازه یک، نشان می دهد که مقطع فوق در شرایط رسوبگذاری است. اما با وجود تغییرات در هندسه کانال، در شکل کانال تغییر مشهودی مشاهده نشده است و شکل کلی کانال به صورت وی شکل (V) حفظ شده است. اما عرض کانال از ۱۰ متر به ۶ متر تغییر کرده است. لازم به ذکر است که این مقطع در ساحل سمت راست دارای دشت سیلابی، اما سمت چپ دارای یک دیواره است. به نوعی می توان گفت که این نوع مقطع از نوع کانال های نسبتاً محدود است که فقط در یک سمت رودخانه دشت سیلابی وجود دارد.



شکل ۹: مقطع عرضی ۶ قبل و از شبیه سازی

نقشه‌ی خروجی از مدل سزار در شکل (۳) نشان داده شده است. بر روی نقشه شبیه سازی شده ۶ مقطع در طول رودخانه انتخاب و وضعیت تغییرات هندسه کانال مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نقشه خروجی و در وضعیت پلان رودخانه، قسمت ورودی کانال به طول ۹۰۰ متر در شرایط فرسایش قرار گرفته است. فرسایشی بودن در مقاطع ۱ و ۲ و ۳ تحت تاثیر عرض کانال و ذرات بستر و کمبود و یا نبود پوشش گیاهی می‌باشد. حد فاصل بین مقطع ۴ و ۵ که فرسایش وجود داشت به دلیل شیب تند کانال در این محدوده است. فرسایشی بودن بین مقطع ۴ و ۵ شکل کانال را از حالت مستقیم به حالت پیچانوردی تبدیل کرده است. قسمت میانی کانال بیشتر به صورت رسوبگذاری است. رسوبگذاری در این مقاطع به دلیل کم بودن شیب و عرض بیشتر و وجود پوشش گیاهی نسبتاً زیاد می‌باشد (شکل ۳). نتایج بدست آمده گویای فرسایش بیشتر در ابتدای بازه مورد مطالعه است که دارای الگوی پیچانوردی می‌باشد. همچنین نتایج این مطالعه با نتایج فتح اله اتی کندی (۱۳۹۶) مشابهت دارد که وی با مطالعه ناپایداری رودخانه کلیبر چای بر اساس روش راسگن به این نتیجه رسید که این بازه از رودخانه کلیبر چای در نزدیکی روستای پیغام ناپایدار می‌باشد.

نتیجه گیری

بعد از بررسی تغییرات کانال، قبل و بعد از شبیه سازی در مدل سزار و سپس ترسیم نیمرخ‌های هر کدام از مقاطع، مناطق حساس به فرسایش و رسوبگذاری شناسایی شدند. برای انجام این کار ۶ مقطع از بازه مورد مطالعه انتخاب شدند. مقاطع به گونه‌ای انتخاب شدند که تحت تاثیر شبیه‌سازی و مدل سازی تغییراتی را نشان داده است. با مقایسه‌ای که بین نیمرخ‌ها صورت گرفت، تغییرات در هندسه کانال قابل مشاهده بودند. تغییرات در عرض کانال و شکل کانال در همه مقاطع صورت پذیرفت و تنها عمق متوسط کانال در مقاطع ۱ و ۲ و ۶ و ۴ تغییر پیدا کردند. با توجه به پلان هوایی و نقشه خروجی از مدل سزار می‌توان گفت که قسمت اولیه کانال اصلی در بازه مورد مطالعه تحت تاثیر فرسایش قرار گرفت و بعد از ۹۰۰ متر وضعیت کانال از فرسایشی به حالت رسوبگذاری تبدیل شده است. هر چند در ادامه مسیر بخشی از آن در حدفاصل مقطع ۴ و ۵ به دلیل محدود شدن کانال، وضعیت فرسایش دپده می‌شود. در ادامه مسیر با

توجه به تعریض کانال و به دنبال آن کاهش سرعت و تنش اعمال شده بر کانال فرآیند رسوبگذاری غالب بوده است. در نهایت لازم به ذکر است که با وجود نقص داده ها و کوتاه بودن مقیاس زمانی مورد مطالعه در این تحقیق، در صورت وجود داده های مناسب و طولانی مدت، این مدل می تواند به شبیه سازی تکامل چشم انداز رودخانه ای و الگوی کلی فرسایش و رسوب و تغییرات رودخانه در دوره های زمانی متوالی بپردازد.

منابع

- خالقی، سمیه؛ شهرام روستایی؛ علی محمد خورشید دوست؛ محمد حسین رضایی مقدم و محمد علی قربانی. ۱۳۹۵. قابلیت اتومای سلولی در شبیه سازی میزان تحول و فرسایش در سیستم رودخانه ای (مطالعه موردی: حوضه آبریز لبقوان). *نشریه جغرافیا و برنامه ریزی*، شماره ۵۸: ۱۳۸-۱۱۹.
- رضازاده، رضیه؛ مهرداد میراحمدی. ۱۳۸۸. مدل اتوماسیون سلولی، روشی نوین در شبیه سازی رشد شهری. *نشریه علمی پژوهشی فناوری آموزش*، سال چهارم، ۴(۱): ۴۸.
- رضایی مقدم، محمد حسین؛ محمدرضا ثروتی و صیاد اصغری سراسکانرود. ۱۳۹۱. تحلیل وضعیت پایداری مجرای رودخانه قزل اوزن با استفاده از روش های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرایی. *پژوهش های ژئومورفولوژی کمی*، ۱(۱): ۴۶-۳۳.
- فتح اله اتی کندی، پیام. ۱۳۹۶. مکانیسم وقوع فرسایش کناره ای در کلیبرچای، آذربایجان شرقی، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید بهشتی. تهران.
- فهیمی فر، احمد؛ میرعباس بحری؛ نسرین بخشایش اقبالی. ۱۳۸۵. تحلیل فرآیند حرکت و لغزش زمین لغزه ها بر پایه مدل اتومات سلولی، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین شناسی سازمان زمین شناسی کشور.
- Brierley, G. J., Fryirs, K. ۲۰۰۵. *Geomorphology and River Management, Applications of the River Styles Framework*. Wiley-Blackwell Publishing, Hoboken, New Jersey, US.
- Coulthard, T.J.; M.G. Macklin, and M.J. Kirkby. ۱۹۹۶. A cellular automaton fluvial and slope model of landscape evolution. In: R.J. Abrahart (Editor), *Proceedings of the 1st International Conference on Geocomputation*, University of Leeds, ۱۷-۱۹ September ۱۹۹۶, Leeds, UK, ۱۶۸-۱۸۵.
- Coulthard, T. J.; M. J. Kirkby and M. G. Macklin. ۱۹۹۸. Non-linearity and spatial resolution in a cellular automaton model of a small upland basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, ۲: ۲۵۷-۲۶۴.
- Douvinet, J.; D. Delahaye; P. Langlois. ۲۰۰۷. Use of cellular automata in physical geography. ۱۵th European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography, Montreux : Switzerland.
- Hancock, G.R; T.J. Coulthard and G.R. Willgoose. ۲۰۱۱. Modelling erosion and channel movement-respose to rainfall variability in South East Australia, ۱۹th international congress on modelling and simulation, ۱۲-۱۶ December, Perth, Australia, ۱۸۷۴-۱۸۸۰.
- Hancock, G.R; D. Verdon-Kidd and J.B.C. Lowry. ۲۰۱۷. Sediment output from a post-mining catchment – Centennial impacts using stochastically generated rainfall. *Journal of Hydrology*, ۵۴۴: ۱۸۰-۱۹۴.
- Gregory, k.j (۲۰۰۶), the Human role in changing River Channels *Geomorphology* ۸۴, pp۲۷۷-۲۹۶.
- Murray, A.B. and C. A. Paola. ۱۹۹۴. *Cellular model of braided rivers*. *Nature*. ۳۷۱: ۵۴-۵۷.
- Murray, A.B. and C. Paola. ۱۹۹۷. Properties of a cellular braided stream model. *Earth Surface Processes and Landforms*, ۲۲: ۱۰۰۱-۱۰۲۵.
- Nicholas, A.P. ۲۰۰۵. Cellular modelling in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, ۳۰: ۶۴۵-۶۴۹.
- Richards, K.S. ۱۹۸۲. *Rivers, form and process in alluvial channels*. Methuen. New York.
- River Basin Dynamics and Hydrology Research Group (RBDHRG)., Predictive and investigative modelling of flood hazard in Welsh river catchments, Volume ۱, University of Wales, Aberystwyth. ۲۰۰۶.
- Schumm, S. A., ۲۰۰۵, *River Variability and Complexity*, First Published, Cambridge University Press, Published in the United States of America.
- Van De Wiel, M.J.; T.J. Coulthrd, M.G. Macklin and J. Lewin. ۲۰۰۷. Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. *Geomorphology*, ۹۰: ۲۸۳-۳۰۱.

Van, Tri P.D.; P.A. Carling, T.J., Coulthard and P. M. Atkinson. ۲۰۰۷. Cellular Automata Approach for Flood Forecasting in a Bifurcation River System. *PUBLS. INST. GEOPHYS. POL. ACAD. SC.*, E-۷ (۴۰۱): ۲۵۵-۲۶۰.

Wu, Huan, Yi, Yonghong, Chen, Xiuwan..۲۰۰۵. HydroCA: a watershed routing model based on GIS and cellular automata. Proceedings- Spie The International Society for Optical Engineering, VOL ۶۱۹۹, pages ۶۱۹۹۰Q.

Ziliani, L.; N. Surian, T.J. Coulthard and S. Tarantola. ۲۰۱۳. Reduced-complexity modeling of braided rivers: Assessing model performance by sensitivity analysis, calibration, and validation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, ۱۱۸: ۱-۲۰.

