

مقاله علمی-پژوهشی

## روندیابی سیل به روش موج سینماتیک در بستر GIS (مطالعه موردی: رودخانه قره‌چای)

مینا رضایی انور<sup>۱</sup>، محمود ذاکری نیری<sup>۲\*</sup>، معصومه سهرابی ملایوسنی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۸

### چکیده

هدف پژوهش حاضر، روندیابی سیل رودخانه قره‌چای به روش موج سینماتیک بود که در محیط برنامه‌نویسی MATLAB انجام شد. با فراهم آوردن داده‌های موردنیاز، مدل‌سازی روندیابی سیل هر ایستگاه به روش موج سینماتیک در حوضه رودخانه قره‌چای صورت گرفت. نتایج حاصل از مشخصات فیزیکی رودخانه حاکی از آن بود که محدوده مورد مطالعه دارای شیب و ضریب زبری کم و شماره منحنی خاک بالایی است. به منظور بهبود روندیابی به روش موج سینماتیک، با داشتن هیدروگراف ورودی به عنوان شرط اولیه و در نظر گرفتن مقدار صفر برای تمامی دبی‌های با زمان صفرثانیه به عنوان شرط مرزی، مدل‌سازی انجام شد. گراف‌های به دست آمده، نشان‌دهنده تطابق مدل‌سازی انجام شده با داده‌های مشاهداتی بود. برای ارزیابی توانایی مدل، از شاخص‌های نش-ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطای استاندارد شده (NRMSE)، استفاده شد، در نتایج ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب با مقدار بالای ضریب نش و ضریب تعیین و مقدار خطای پایین NRMS، حاکی از آن است که مدل موج سینماتیک در شبیه‌سازی روندیابی سیل موفق عمل کرده و از دقت مطلوبی برخوردار است و می‌توان نتایج مدل حاضر را به حوضه‌های با این نوع شکل تعمیم داد.

**واژه‌های کلیدی:** رودخانه قره‌چای، روندیابی، ضریب زبری مانینگ، موج سینماتیک

### مقدمه

چگونگی طغیان و فروکش سیل یا صعود و نزول هیدروگراف رودخانه در نقطه مشخصی از آن است. این مساله را می‌توان با روش روندیابی سیل مورد تحلیل قرار داد. مفهوم اصلی روندیابی سیل آن است که اگر مشخصات هیدروگراف در نقطه دیگر در پایین دست تخمین زده شود، مسلماً هیدروگراف‌های این دو نقطه مشابه نخواهد بود، زیرا خصوصیات مسیری که آب از آن گذشته یا در آن جریان دارد، شکل هیدروگراف را تغییر می‌دهد (مهدوی، ۱۳۹۲). برای حل عددی و عملی معادله‌های روندیابی، روش‌های گوناگونی به کار گرفته می‌شود. روش‌های روندیابی تلاش می‌کند تا با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی به عنوان داده‌های ورودی، با استفاده از مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها، تبدیل داده‌های ورودی به خروجی‌های مناسب و فرضیات ساده‌سازی مورد نظر، فرآیندهای واقعی هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی نماید. موج سینماتیک از روش‌های هیدرولوژیکی روندیابی جریان می‌باشد که در این روش هم معادله پیوستگی جریان و هم معادله مومنتم در نظر گرفته می‌شوند. موج سینماتیک شکلی از معادله مومنتم است که عمق ارتباط ساده با دبی دارد. باید توجه داشت که موج سینماتیک زمانی رخ می‌دهد که دوره‌های دینامیکی در معادله مومنتم قابل

پدیده سیلاب به عنوان یکی از بلاای طبیعی است که سالانه در نقاط مختلف جهان رخ داده و موجب ایجاد خسارات سنگین جانی و مالی می‌گردد. بررسی و مطالعه بر روی پارامترهای موثر بر رفتار رودخانه جهت مهار و استحصال آب، بسیار حائز اهمیت است. همچنین تعیین مشخصات سیل در مکان و زمان، به منظور شناخت رفتار غیرماندگار آن در هر مقطع مورد نظر و پهنه‌بندی سیلاب از دیدگاه مدیریت سیلاب، اهمیت فراوانی دارد؛ لذا یکی از مسائل عمده در مهندسی هیدرولوژی که اغلب سر و کار با آن زیاد است، پیش بینی

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران  
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران  
۳- دانشیار گروه زمین شناسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

\* نویسنده مسئول: (Email: Zakeriiu@gmail.com)

است که مدل موج سینماتیک در روندیابی سیل موفق عمل کرده است؛ همچنین بالا بودن دقت نتایج این روش و وسعت دامنه کاربرد آن در مسائل مختلف، استفاده از این روش را منطقی جلوه می‌دهد. حوضه قره‌چای در مسیر ایستگاه‌های ازنا، بازنه، توره به علت سرشاخه بودن ۳ ایستگاه و ریزش آن به ایستگاه پل دوآب و پرآب بودن این مسیر از رودخانه، براساس آمار اداره آب شهر اراک، سیل خیز است. نظر به موقعیت این قسمت از رودخانه قره‌چای و اهمیت روندیابی سیل در این قسمت حوضه، به‌عنوان حوضه مطالعاتی انتخاب شد. لذا روندیابی سیل به روش موج سینماتیک در حوضه رودخانه قره‌چای موضوع این پژوهش است.

## مواد و روش‌ها

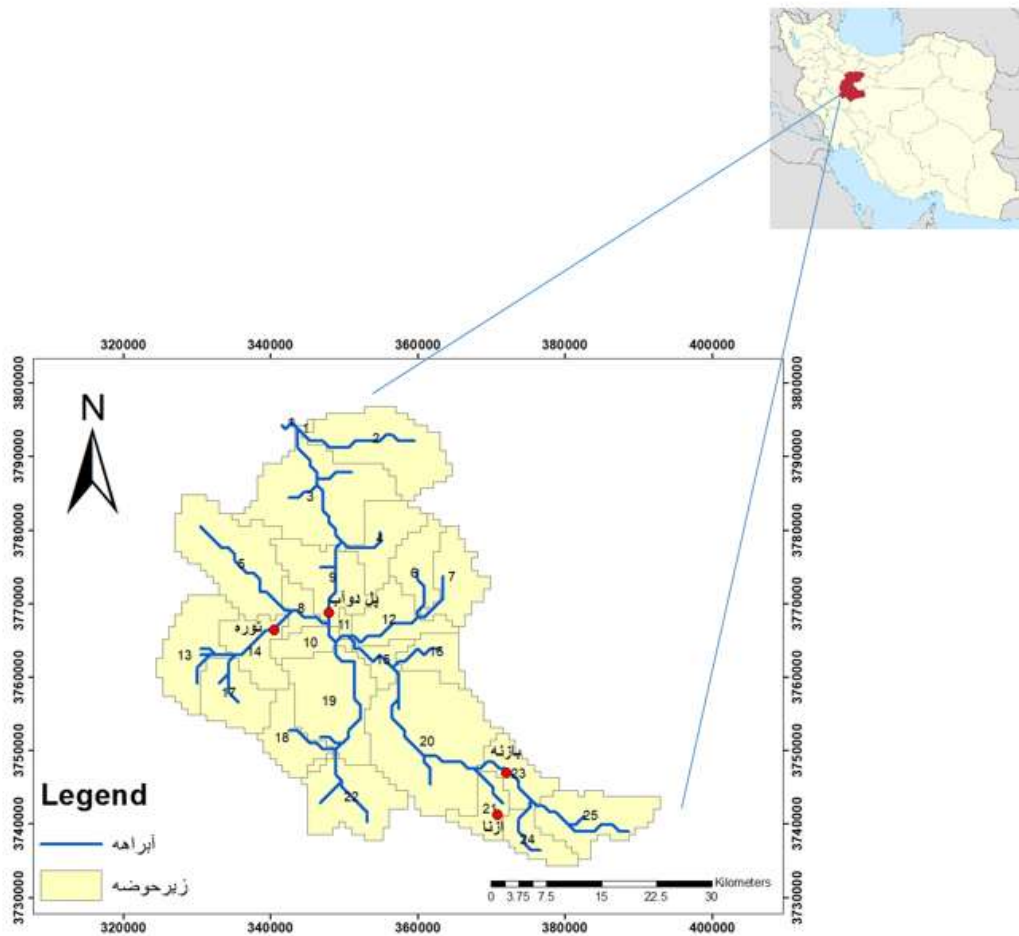
### محدوده مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه این پژوهش، رودخانه قره‌چای است؛ حوضه آبخیز قره‌چای یکی از زیرحوضه‌های دریاچه نمک می‌باشد که بین عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۱). وسعت این حوضه در محدوده استان مرکزی برابر ۲۰۱۱۷ کیلومتر مربع است. رودخانه قره‌چای اصلی‌ترین رودخانه این حوضه آبخیز می‌باشد و طول آبراهه اصلی در این حوضه برابر ۷۱ کیلومتر بوده و تغییرات ارتفاع در محدوده این حوضه از ۹۳۹ تا ۳۵۴۴ متر است. رودخانه قره‌چای با نام رودخانه شراپ پس از خروج از محدوده استان مرکزی «در پایین‌دست ایستگاه هیدرومتری جوشیروان» و به نام رودخانه قره‌چای در راستای جنوب به شمال طی مسیر نموده و در استان همدان پس از اتصال شاخه دیگر به این رودخانه در مسیر غرب به شرق حرکت می‌نماید و پس از عبور از ایستگاه هیدرومتری خماجین، در بخش شمالی استان مرکزی وارد استان می‌گردد. از حوضه مورد مطالعه، ایستگاه پل دوآب به عنوان ایستگاه پایین دست هیدرومتری انتخاب شد. بالادست این ایستگاه سرشاخه است و سه ایستگاه ازنا، بارنه و توره را شامل می‌شود. که داده‌های مورد نیاز پژوهش، از این ایستگاه‌ها دریافت شد. از داده‌های روزانه این ایستگاه‌ها استفاده شد.

### روش تحقیق

نظر به اینکه اندازه‌گیری سیل در تمام نقاط مسیر، به‌علت طولانی بودن مسیر و دیگر مشکلات از قبیل هزینه‌های مورد نیاز برای این کار میسر نمی‌باشد، لذا با استفاده از روندیابی می‌توان وضعیت سیل را در هر نقطه‌ای از مسیر و یا کانال مشخص نمود. موج سینماتیک یک مدل هیدرولیکی جهت انجام روندیابی جریان سطحی و داخل کانال می‌باشد که در این تحقیق با هدف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در نرم افزار MATLAB اجرا شده است.

اغماض باشد. تئوری روندیابی سیلاب با استفاده از روش موج سینماتیک توسط به توصیف رفتار موج سینماتیک پرداخت. از جمله کارهایی که در پیش‌برد مدل موج سینماتیکی صورت پذیرفته است، می‌توان به تلاش‌های چو اشاره نمود (Maidment, 1996; Chow, 1559). در ذیل نمونه‌هایی از مطالعات داخلی و خارجی اخیر مرتبط با موضوع پژوهش آورده شده است: آقایی دانشور و خانجانی (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای به کاربرد مدل‌های یک و دوبعدی جریان سطحی و نفوذ برای حوضه آبریز دره مارون استان فارس پرداختند؛ نتایج تحقیق حاکی از آن بود که موج سینماتیک در پیش‌بینی مقدار و زمان دبی اوج سیلاب‌های انتخابی تقریب‌سازی مناسبی را داراست؛ نتایج حاصل از مطالعه امیدوار (۱۳۹۳) در شبیه‌سازی توزیعی رواناب با استفاده از حل عددی تقریب موج سینماتیک نشان داد که مدل کدنویسی شده دارای عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی فرایندهای رواناب-فرسایش و رسوب می‌باشد؛ مطالعه‌ی قنبرآبادی (۱۳۹۱) در بررسی کارایی روندیابی حوضه آبخیز به روش موج سینماتیک مشخص کرد که مدل موج سینماتیک جهت شبیه‌سازی هیدروگراف سیل رگبارها نسبتاً مناسب دانسته‌اند؛ کریمیان کاکلکی و همکاران (۱۳۹۱)، در مطالعه‌ای به روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل موج سینماتیک و ماسکینگام - کانژ پرداختند؛ نتایج تحقیق نشان‌دهنده توانایی بیشتر مدل موج سینماتیک و صحت بیشتر نتایج حاصل از آن بود. ورگارا و همکاران در پژوهشی به برآورد پارامترهای مدل موج سینماتیک برای پیش‌بینی سیل در ایالات متحده در ۱۶۷۲ حوضه و ۴۷۵۶۳ حوادث استخراج شده از یک شبیه‌سازی ۱۰ ساله پرداختند؛ نتایج حاکی از آن بود که مهارت شبیه‌سازی مسیریابی جریان برای اوج جریان و زمان برآورد اوج جریان به‌طور قابل‌توجهی زیاد است و سازگاری آن را با تأیید نمونه بزرگ نشان می‌دهد (Vergara et al., 2016)؛ رای و همکاران به بررسی تأثیر زیری متغیر بر رواناب پرداختند. و با بیان اینکه زبری زمینی یکی از پارامترهای کلیدی در مدل سازی هیدرولیکی رواناب حوضه است و در طول تکامل یک هیدروگراف رواناب، زبری جریان ثابت نیست، باتوجه به رابطه غیرخطی بین زبری سطح و عمق جریان، به مطالعه زبری متغیر در مدل موج سینماتیک و بررسی تأثیر آن بر رواناب از چهار حوضه آبخیز با اندازه‌های متفاوت و شرایط آب‌وهوایی پرداختند. نتایج نشان داد که شکل هیدروگراف به‌طور کلی، در حالت زبری متغیر، بهتر حفظ می‌شود تا زبری ثابت (Rai, Upadhyay and Sing, 2010)؛ چووا و انگ در پژوهشی شبیه‌سازی بارش رواناب را با موج سینماتیک را مورد مطالعه قرار دادند؛ نتایج حاصل شده در بخش مدل‌سازی سینماتیک با فرض صفر در نظر گرفتن تلفات و در نظر گرفتن حوضه به عنوان یک کل برای محاسبات، شبیه‌سازی حاصل شده با هیدروگراف واقعی برابر است (Chua and Wong, 2010). مرور مطالعات حاکی از این



شکل ۱- نقشه موقعیت مکانی رودخانه قره‌چای

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_n \quad q = \alpha y^\beta \quad (1)$$

در جایی که  $y$  نشان‌دهنده عمق جریان،  $q$  دبی واحد عرض،  $i_n$  خالص بارندگی،  $\beta = 5/3$ ،  $\alpha_p = \sqrt{S_p/n_p}$  شیب سطح صاف،  $n_p$  ضریب مانینگ زبری انحنای سطح زمین و  $x$  و  $t$  به ترتیب نشان‌دهنده فاصله و زمان هستند. معادله (۱) می‌تواند به صورت عددی با استفاده از گسسته‌سازی زیر حل شود (Alley et al. 1980):

$$y_j^t = y_j^{t-1} + \Delta t \left[ i_n - \frac{(q_j^{t-1} - q_{j-1}^{t-1})}{\Delta x} \right] \quad (2)$$

$$q_j^t = \alpha (y_j^t)^\beta \quad (3)$$

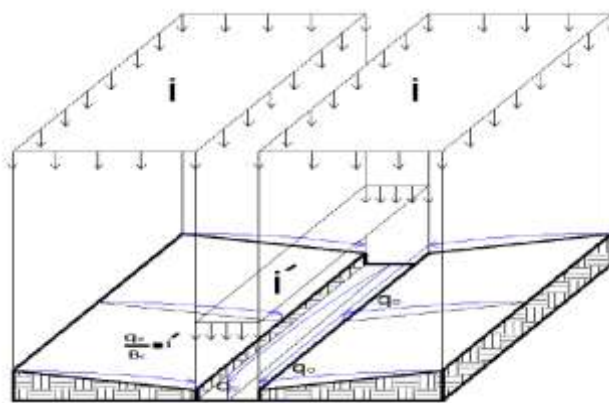
زیر شاخص یک گره شاخص است،  $\Delta x$  فاصله شبکه،  $\Delta t$  گام زمان است. با جایگزین کردن معادله (۲) در معادله (۳) حاصل می‌شود:

$$\left[ \left( \frac{q_j^{t-1}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} + \Delta t \left[ i_n - \frac{(q_j^{t-1} - q_{j-1}^{t-1})}{\Delta x} \right] \right]^\beta \quad (4)$$

همچنین به منظور محاسبه پارامترهای مهم فیزیوگرافی حوضه آبریز قره‌چای، از نرم‌افزار ArcGIS ورژن ۱۰٫۴ استفاده شد. سپس براساس داده‌های ورودی که شامل نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک، شیب، طول و عرض حوضه، ضریب زبری مانینگ و شدت بارش است، روندیابی انجام گرفته و در آخر هیدروگراف روندیابی شده با هیدروگراف شبیه‌سازی مقایسه شد. ارزیابی مدل با شاخص‌های خطاسنجی جذر میانگین مربعات خطای استاندارد شده (NRMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) صورت گرفت که در ذیل به تشریح به آن پرداخته شده است.

موج سینماتیک شکلی از رابطه مومنتم است که در آن عمق ارتباط ساده‌ای با دبی دارد. باتوجه به بازدید میدانی که از حوضه رودخانه قره‌چای به عمل آمد، حوضه مورد مطالعه V شکل و در اکثر مناطق پروفیل برداری مقطع کانال از نوع مستطیلی عریض بود؛ معادلات موج جنبشی برای این مقطع عبارتند از:

مقطع حوضه مورد مطالعه مستطیلی است که براساس آن، پارامترهای  $\alpha$  و  $m$  معادله موج سینماتیک محاسبه شد. در نهایت به منظور محاسبه زمان پیمایش سیل به خروجی حوضه، با توجه به نوع حوضه که کتاب باز بود، محاسبه صورت گرفت. در حالت کتاب باز، دو صفحه جانبی و یک کانال در نظر گرفته می شود که خود بر دو نوع است: عریض دیدن کانال و لحاظ کردن اثر بارش روی کانال میانی (که این نوع حوضه های شهری را شامل می شود) و نوع دوم، عریض دیدن کانال و نادیده گرفتن اثر بارش روی کانال میانی که این وضعیت اغلب در حوضه های طبیعی رخ می دهد و فرضی نزدیک به واقعیت است (شکل ۲). زیرا معمولا کانال ها همان آبراهه ها در یک حوضه طبیعی هستند که نسبت به مساحت کل حوضه، مساحت قابل توجهی را تشکیل نمی دهند.



شکل ۲ - حوضه ۷ شکل

که  $Q_0$  جریان در انتهای بالادست کانال قرار دارد. برای حوضه مصنوعی، در هر گام زمانی، رواناب از دو سطح زمینی در مجاورت کانال برای اولین بار محاسبه شد تا  $q_L^t$  قبل از اعمال در معادله ۷ تعیین شود تا  $Q_{out}^t$  مشخص شود. روش فوق را چووا و انگ، در مطالعه ای خود استفاده کرده بود (Chua and Wong, 2010) و مدل آزمایشگاهی آن نیز به شرح ذیل بود: داده های مورد نیاز برای محاسبه این دو حوضه از یک ایستگاه آزمایشی در دانشگاه فن آوری Nanyang به دست آمدند. ایستگاه آزمایشی شامل چهار بخش آزمایشی که ۲۵ متر طول و عرض ۱ متر است، می شود. به این ترتیب مساحت حوضه برای هر بخش آزمایشی ۲۵ متر مربع است. هر بخش آزمایش توسط یک دیوار بتنی با ارتفاع ۱ متر در امتداد دو ضلع دیگر و در انتهای بالادست احاطه شده است. سطوح زمینی دارای شیب ۲٪ است. حوضه کتاب باز شامل دو سطح زمینی است (شیب = ۱۱٪) که به سمت کانالی

راه حل تحلیلی برای جریان در خروجی با قرار دادن  $\Delta x = L_p$  که طول صفحه زمینی است به دست می آید. دبی مجرای خروجی  $Q_{out}^t$  توسط رابطه زیر داده می شود:

$$= \frac{\sqrt{S_p}}{n_p} \left[ \left( \frac{n_p \cdot Q_{out}^{t-1}}{\sqrt{S_p}} \right)^{\frac{3}{5}} + t_r \left[ i_n - \frac{(Q_{out}^{t-1} - Q_0^{t-1})}{L_p} \right] \right]^{\frac{5}{3}} \quad (5)$$

که  $Q_0$  جریان در انتهای بالادست زمین برابر با صفر است. مدل فیزیوگرافی کتاب باز توسط محققین گوناگون برای کاربرد مدل موج سینماتیک برای سیستم هیدرولوژیکی توسعه یافته است. در داخل یک حوضه آبخیز طبیعی، نوع خاک، کاربری، پیکربندی کانال، شیب، پوشش گیاهی و غیره ممکن است تغییر کند، از این رو مدل کتاب باز مشابه با تغییر شکل طبیعی و واقعی فیزیوگرافی حوضه بر روی فرآیند رواناب تاثیر می گذارد. بنابراین برای یک پوشش جامع از جنبه های توزیعی، یک مدل فیزیوگرافی توسعه یافته است.

با فرض کتاب باز بودن حوضه مورد مطالعه، معادلات موج جنبشی توسط رابطه زیر داده میشود:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad Q = \alpha_c A^{\beta_c} \quad (6)$$

که  $A$  و  $Q$  مساحت و دبی جریان در کانال هستند و  $q_L$  جریان جانبی درون کانال است. برای یک کانال مستطیلی عریض،  $\alpha = \frac{S_c}{W^{\frac{2}{3}} n_c}$  و  $\beta_c = \frac{5}{3}$  که  $n_c$  ضریب زبری مانینگ،  $S_c$  شیب کانال و  $W$  عرض کانال است (Wong, 1992 and 2009). با استفاده از روش گسسته سازی و جایگزینی  $\Delta x = L_c$  جایی که  $L_c$  طول کانال است، دبی در مجرای خروجی  $Q_{out}$  توسط معادله ی (۷) داده می شود:

$$Q_{out}^t = \sqrt{S_c} / n_c W_c^{\frac{2}{3}} \left[ \left( \frac{n_c W_c^{\frac{2}{3}} Q_{out}^{t-1}}{\sqrt{S_c}} \right)^{\frac{3}{5}} + t_r \left[ q_L^t - \frac{(Q_{out}^{t-1} - Q_0^{t-1})}{L_c} \right] \right]^{\frac{5}{3}} \quad (7)$$

تعداد داده‌هاست. اندیس sim بیانگر داده‌های شبیه‌سازی شده و اندیس obs بیانگر داده‌های مشاهده‌ای است. مقدار  $R^2$  بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بوده که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است.

هرچه مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) به یک نزدیکتر باشند، دبی‌های شبیه‌سازی شده از دقت مطلوب‌تری برخوردار خواهند بود.

مقدار ضریب ناش- ساتکلیف بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود. نحوه محاسبه ضریب نش- ساتکلیف در این پژوهش در رابطه ۹ آمده است:

$$NS = 1 - \frac{\sum(Y_m - Y_s)^2}{\sum(Y_m - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

که در آن  $Y_m$  دبی مشاهده شده،  $Y_s$  دبی شبیه‌سازی شده و  $\bar{Y}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است. جذر میانگین مربعات خطا، تفاوت میان پیش‌بینی‌های انجام شده با مدل و مشاهداتی که تبدیل به مدل شده می‌باشد. به تفاوت مقدار باقی مانده نیز گفته می‌شود. RMSE به دنبال یکپارچه کردن آن‌ها در یک عدد واحد است. اعداد محاسبه شده برای خطای RMS بیانگر این است که بین دو مجموعه داده چه میزان خطا وجود دارد. به عبارت دیگر، جذر میانگین مربعات خطا عدد پیش‌بینی شده و عددی که به صورت تجربی به دست آمده را با هم مقایسه می‌کند. هر چه جذر میانگین خطای مربعات کمتر باشد، بهتر است.

نحوه محاسبه جذر میانگین مربعات خطا، در رابطه ۱۰ آورده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2} \quad (10)$$

که  $Q_{obs}$  و  $Q_{sim}$  به ترتیب مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای و  $n$  تعداد دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است. باتوجه به این که مقدار RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری متغیر است، مقایسه مقدار آن بین مدل‌های ساخته شده برای دو متغیر با واحدهای متفاوت درست نخواهد بود. لذا مقدار RMSE را به دامنه داده‌های متغیر وابسته تقسیم کرده و آن را RMSE نرمال شده (NRMSE) می‌نامند. این معیار برای مقایسه مدل‌های مختلف مناسب خواهد بود. لازم به ذکر است که NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل است.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{x_{max} - x_{min}} \quad (11)$$

بر اساس روش ذکر شده، نمودار گردشی پژوهش حاضر در شکل ۳ آورده شده است.

مستطیلی متمایل شده است (شیب = ۲٪) و جریان را به خروجی منتقل می‌کند. رواناب از بخش‌های آزمایشی به سوی مخازن وزنی کالیبره شده برای ثبت جریان خروجی بخش‌های آزمایشی خارج می‌شود. مخزن‌های وزنی قبل از استفاده از یک دستگاه جریان الکترومغناطیسی کالیبره شدند. دو ایستگاه باران‌سنجی که هر کدام ۶،۲۵ متر از هر دو طرف کانال بودند برای ثبت بارش مورد استفاده قرار گرفتند که پس از ارزیابی با ضریب خطای ۰/۰۲۹ همبستگی ۰/۹۸ صحت روش فوق در محاسبه روندبایی سیل تایید شد.

یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه داشتن اطلاعات کافی در مورد مقاومت هیدرولیکی در کانال‌های آبرفتی است. برای محاسبه دبی، سرعت و عمق جریان در کانال‌های طبیعی و نیز برآورد سیل و رسوب، ارزیابی مقاومت جریان ضروری می‌باشد. برای تعیین مقاومت جریان در مجاری روباز از روابط مانینگ، شازی و دارسی-ویسیاخ استفاده می‌شود. تخمین درست این ضرایب می‌تواند به برآورد دقیق‌تر شرایط جریان کمک کند. در این پژوهش ضریب زبری مانینگ مدنظر است (روشنگر، تقی‌اعلمی، ثاقبیان، ۱۳۹۷). عموماً از فرمول‌ها، آزمایش‌ها، برداشت‌های صحرائی، جداول، تصاویر و ویژگی‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی برای تخمین ضریب زبری مانینگ استفاده می‌شود. در این پژوهش برای به دست آوردن ضریب زبری مانینگ با تخمین براساس جدول ارائه شده توسط چو (۱۹۵۹) با پوشش گیاهی و کاربری اراضی حوضه قره‌چای و بهینه‌سازی آن، به دست آمد. در جدول ۱، مقادیر پارامتر ضریب مانینگ دامنه بر اساس کاربری اراضی آورده شده است (Liu and De Smedt, 2005)

جدول ۱- مقادیر پارامتر مانینگ (Chow, 1959)

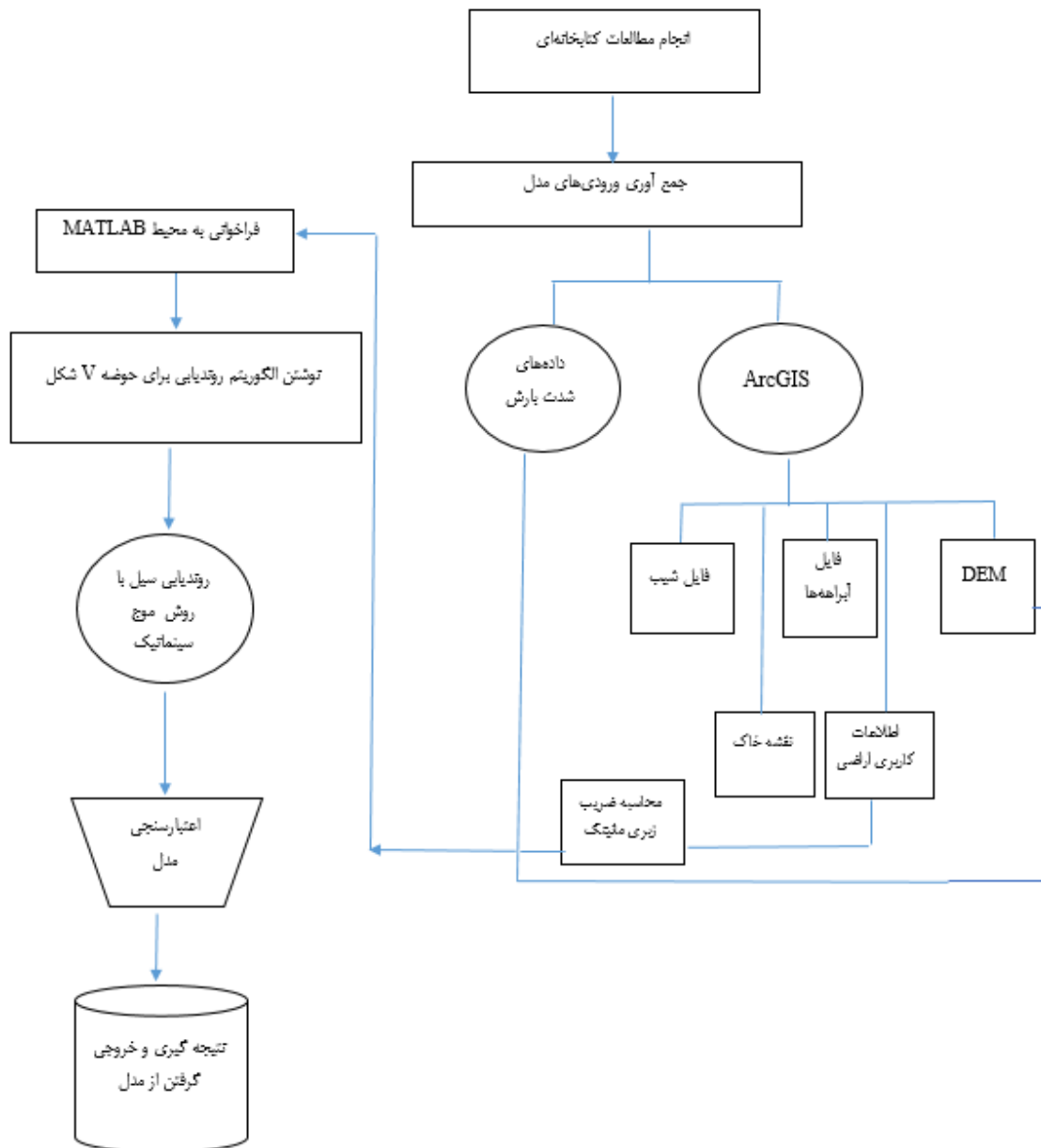
ضریب مانینگ ( $n^{1/3}$ s)	کاربری اراضی
۰/۴	اراضی مرتعی خزان کننده
۰/۸	اراضی جنگلی خزان کننده
۰/۱۵	زراعت دیم
۰/۲	زراعت آبی

شدت بارش، مقدار بارندگی در واحد زمان است که معمولاً برحسب میلیمتر بر ساعت یا اینچ بر ساعت توصیف می‌شود؛ که به صورت  $i=p/t$  محاسبه می‌شود. که  $p$  مقدار بارندگی و  $t$  مدت بارندگی می‌باشد. برای اجرای مدل آمار بارش‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴، انتخاب شد. به راهنمایی آب منطقه‌ای اراک، دلیل انتخاب این سال آبی، این بود در این سال داده‌های ثبت شده‌ی هر ۴ ایستگاه مورد مطالعه، حداکثر دبی اوج سالانه بالایی داشتند.

در ادامه روابط شاخص‌های ارزیابی مدل آورده شده است: نحوه محاسبه ضریب تعیین در رابطه ۸ آورده شده است:

$$R^2 = \left[ \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{Q_{obs} \times Q_{sim}} \right] \quad (8)$$

در این رابطه،  $Q$  داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و  $n$  برابر



شکل ۳- نمودار گردش پژوهش

## نتایج و بحث

### نتایج حاصل از مشخصات فیزیکی حوضه در GIS: با

اجرای GIS پارامترهای فیزیوگرافی حوضه قره‌چای و نقشه زیر حوضه‌ها براساس وضعیت آبراهه‌های حوضه، تولید شد. براساس اطلاعات نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز قره‌چای، بیشترین مساحت آن، کشاورزی و زمین‌های حاصل‌خیز و بیابان است. همچنین باتوجه به نقشه خاک محدوده مورد مطالعه، بیشترین

مساحت حوضه به اینسپتی سول و انتی سول اختصاص دارد. این خاک‌ها جوانند و یا در ابتدای مراحل به‌وجود آمدن قرار دارند و جذب آب پایینی دارند. اقلیم منطقه نیز نیمه خشک است.

در پژوهش حاضر پس از بهینه‌سازی مقدار پارامتر ضریب زبری مانینگ براساس روش شرح داده شده، محاسبه شد که مقدار  $0/133$  برای حوضه مورد مطالعه به‌دست‌آمد. اطلاعات مساحت، شیب و طول آبراهه حوضه، به تفکیک زیر حوضه‌ها، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌های رودخانه قره‌چای

زیرحوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	شیب (متر/متر)	ارتفاع متوسط حوضه (متر)	طول آبراهه اصلی
زیرحوضه ۱	۳/۶	۰/۳	۱۷۷۱/۵	۳/۰۲
زیرحوضه ۲	۱۳۹/۱	۱	۲۱۷۶	۱۷/۹۶
زیرحوضه ۳	۱۹۴/۱	۰/۴	۲۲۱۲	۱۷/۸۸
زیرحوضه ۴	۶۸/۸	۳/۵	۲۲۵۲/۵	۷/۱۲
زیرحوضه ۵	۱۵۸/۲	۱/۳	۲۴۴۰/۵	۱۸/۶۹
زیرحوضه ۶	۵۶/۳	۱	۲۲۴۳/۵	۷/۱۲
زیرحوضه ۷	۶۶/۶	۱	۲۱۰۳/۵	۷/۴۸
زیرحوضه ۸	۲۷/۸	۰/۵	۲۱۸۴/۵	۵/۸۴
زیرحوضه ۹	۹۲/۲	۰/۳۵	۲۱۷۸	۱۱/۸۲
زیرحوضه ۱۰	۳۳/۶۹	۰/۱	۲۱۷۷/۵	۲/۹۲
زیرحوضه ۱۱	۶/۵۹	۰/۳۲	۴۰۰۵	۲/۰۶
زیرحوضه ۱۲	۶۷/۳	۰/۵	۴۰۹۴	۱۱/۱۸
زیرحوضه ۱۳	۹۹/۶	۱	۲۴۱۵/۵	۷/۹۷
زیرحوضه ۱۴	۶۳/۷	۱/۲	۲۴۲۱	۱۰/۱۸
زیرحوضه ۱۵	۲۸/۵	۰/۰۶	۱۸۶۷/۵	۸/۹۷
زیرحوضه ۱۶	۴۳/۲	۰/۲۵	۲۲۵۱	۸/۱۹
زیرحوضه ۱۷	۷۳/۹	۱/۲۵	۲۱۷۲	۷/۳
زیرحوضه ۱۸	۵۸/۵	۲	۲۴۶۵/۵	۷/۴۸
زیرحوضه ۱۹	۱۴۱/۳	۱	۲۳۹۲	۲۱/۷۲
زیرحوضه ۲۰	۲۵۱/۹	۰/۷	۲۴۸۰	۲۲
زیرحوضه ۲۱	۴۱/۷۵	۱/۵	۲۳۵۱/۵	۶/۳
زیرحوضه ۲۲	۱۱۰/۶	۱/۶	۲۵۶۷/۵	۱۱/۵۹
زیرحوضه ۲۳	۵۳/۴	۰/۵	۲۲۳۵	۱۰/۶۸
زیرحوضه ۲۴	۴۳/۹	۴	۲۲۷۰	۹/۵۴
زیرحوضه ۲۵	۹۹/۶	۱	۲۴۷۹/۵	۱۵/۷۴

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مدل‌سازی روندیابی حاصل از داده‌های بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه، موفق عمل کرده است. گاهی مدل در تخمین دبی اوج، خطا داشته است.

نتایج ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه، در جدول ۴ آورده شده است؛ مقدار بالای نش ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین (R2)، و مقدار خطای پایین NRMS در روندیابی حاصل شده حاکی از آن است که مدل موج سینماتیک در شبیه‌سازی روندیابی سیل موفق عمل کرده و از دقت مطلوبی برخوردار است.

#### نتایج روندیابی سیل به روش موج سینماتیک: پس از

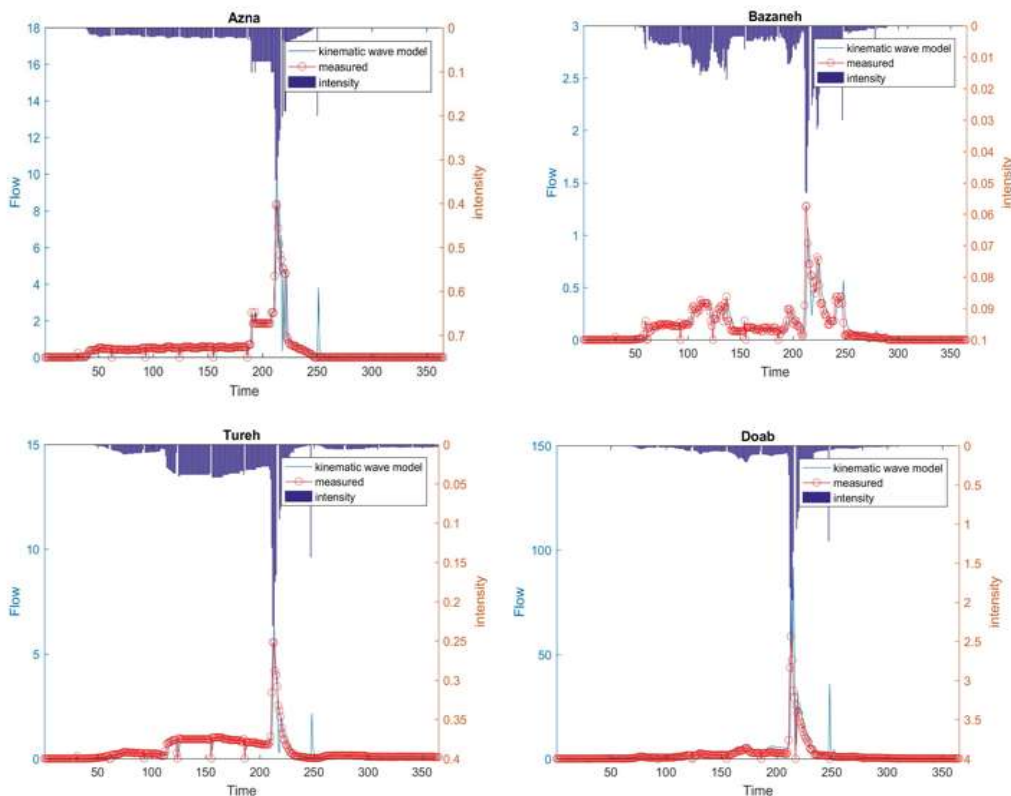
فراهم آوردن داده‌ها، مدل‌سازی روندیابی سیل برای ایستگاه‌های ازنا، بازنه، توره و پل دوآب حوضه رودخانه قره‌چای به روش موج سینماتیک (با در نظر گرفتن نرخ تلفات صفر) انجام شد؛

برای تهیه آمار سیلاب بارش متناظر، برگه‌های ثبت سیلاب و ثبت بارش‌های چهار ایستگاه ازنا، بازنه، توره و پل دوآب در دوره آماری (۱۳۹۵-۱۳۹۴) از اداره آب منطقه‌ای استان اراک تهیه شد. مشخصات وقایع انتخاب شده برای روندیابی سیل در جدول ۳ آورده شده است.

و در ادامه روندیابی در حوضه قره‌چای انجام شد که در شکل ۴ هیدروگراف خروجی حاصل شده آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات وقایع انتخاب شده برای روندیابی سیل

سال آبی	متوسط آورد سالیانه	حجم آورد سالیانه	دبی حداکثر سیلاب
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۰/۵۰۹	۱۶/۰۵۲	۸/۵۴
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۰/۱۱۶	۳/۶۵۸	۱/۴۷
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۲/۰۰	۶۳/۱۴۲	۵۹/۶۱
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۲/۱۶۰	۶۸/۱۱۸	۶۱/۰۰

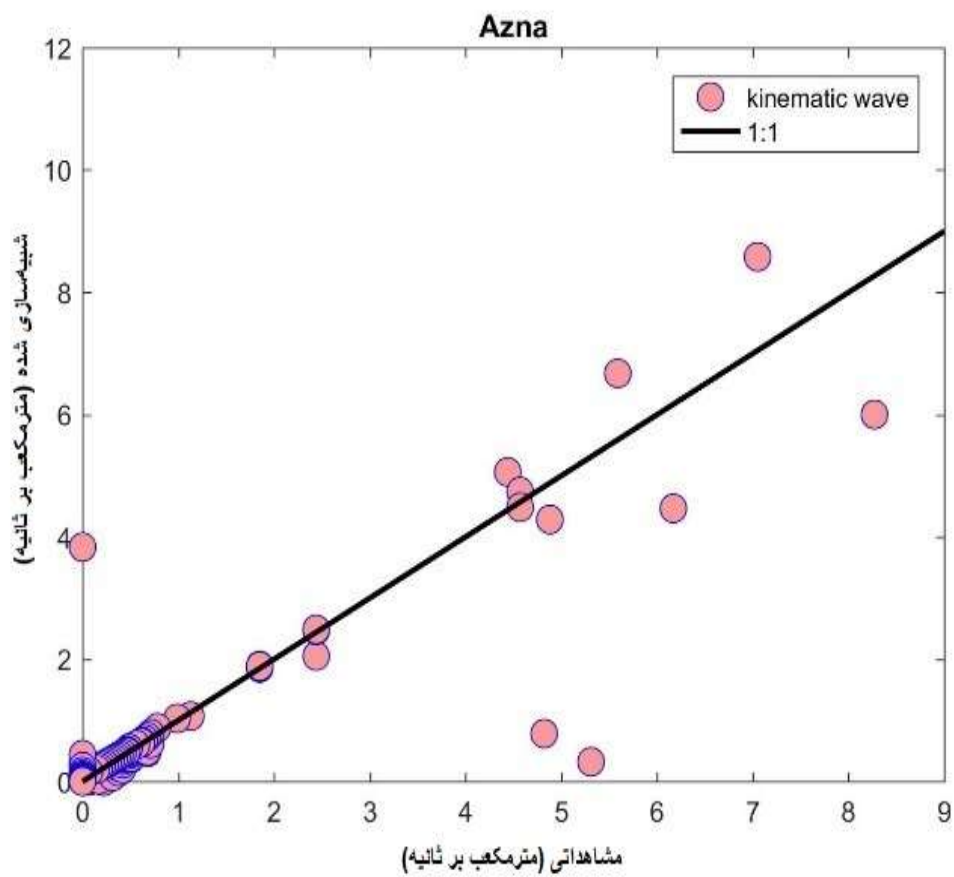
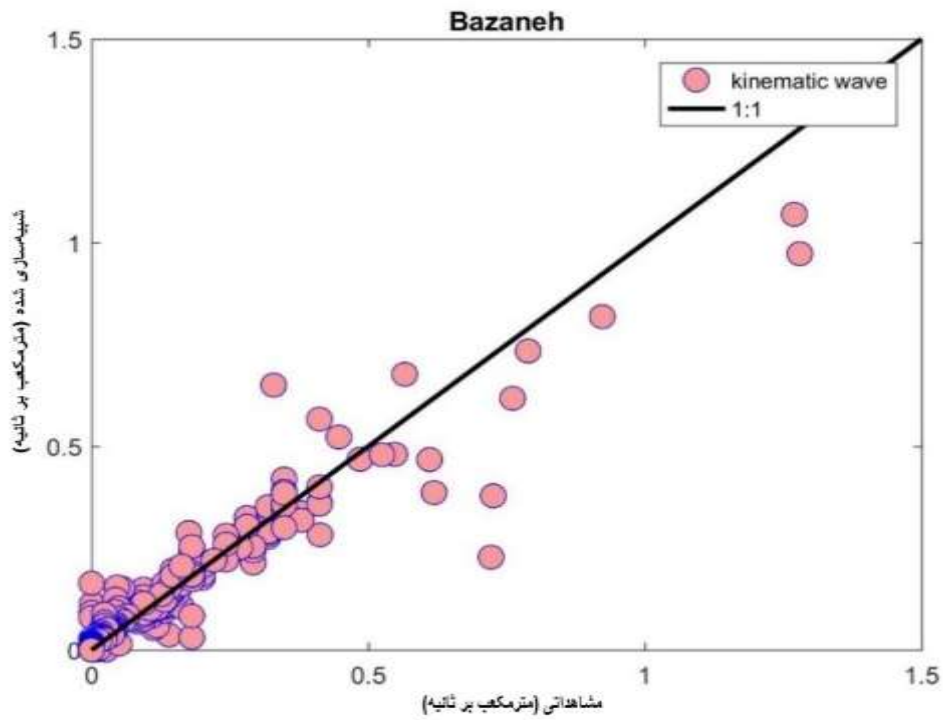


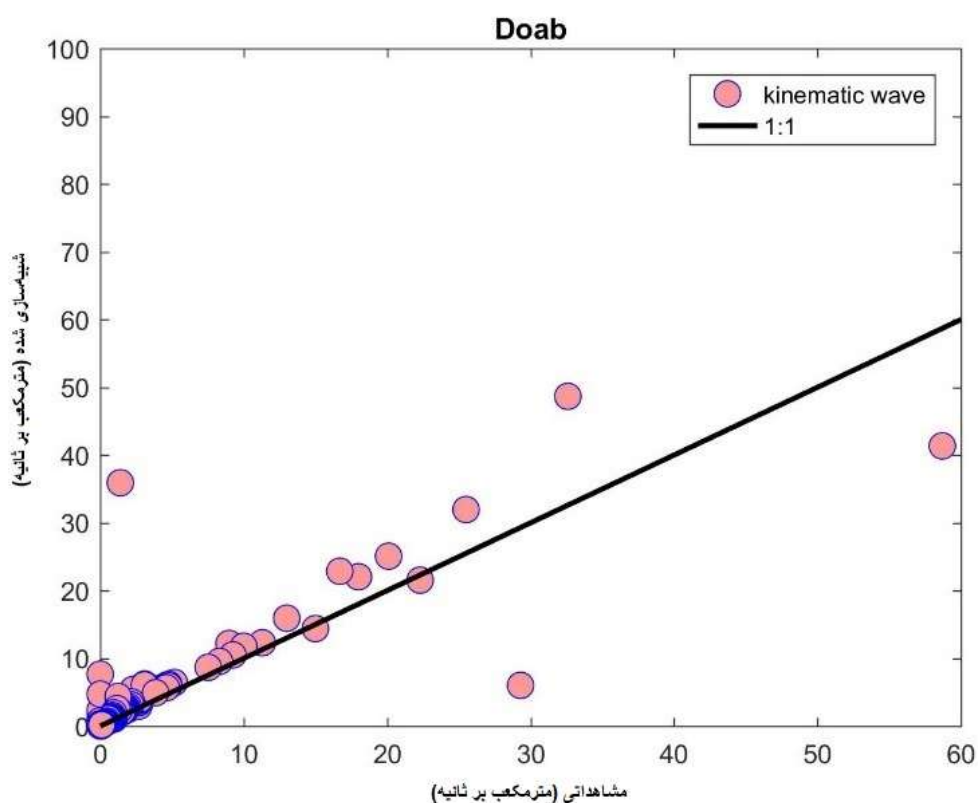
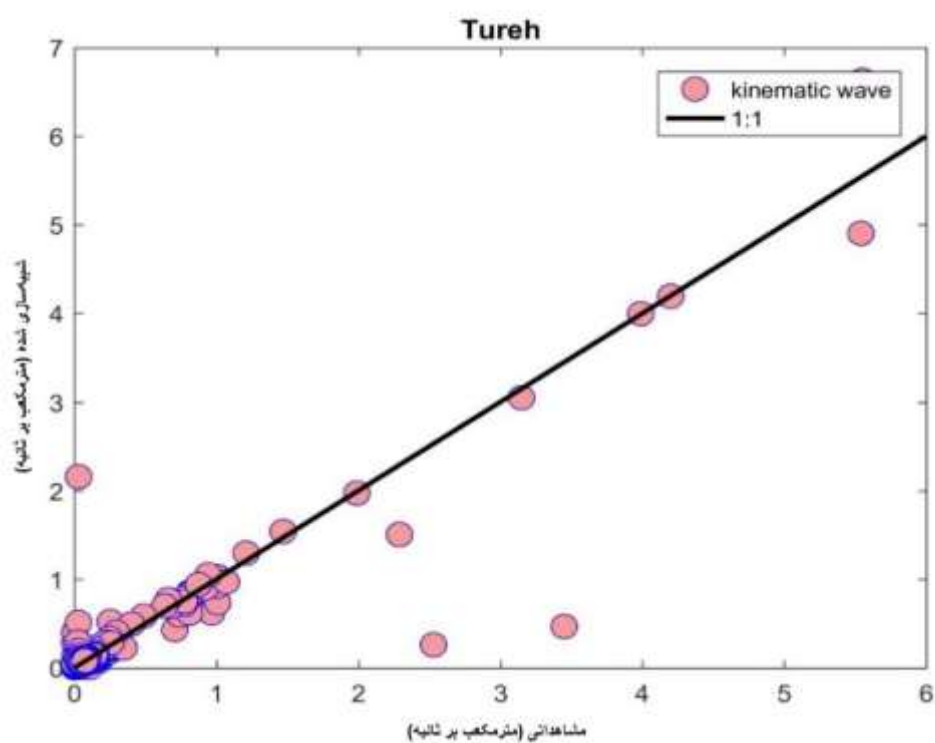
شکل ۴- هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به روش موج سینماتیک ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب

جدول ۴- ارزیابی کارایی مدل ایستگاه‌های هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب

شاخص	ایستگاه‌های مورد مطالعه	مقدار
NS	ازنا	۰/۸۲
	بازنه	۰/۹۰
	توره	۰/۸۵
	پل دوآب	۰/۳۷
R <sup>2</sup>	ازنا	۰/۹۰
	بازنه	۰/۹۴
	توره	۰/۹۲
NRMSE	پل دوآب	۰/۶۱
	ازنا	۰/۰۵
	بازنه	۰/۰۴
	توره	۰/۰۴
	پل دوآب	۰/۰۷







شکل ۵- نمودار پراکنش داده‌ها در روندیابی دبی حداکثر سیلاب به روش موج سینماتیک با مقدار مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب

شاخص NS (۰/۸۲، ۰/۹۰، ۰/۸۵، ۰/۳۷) و مقدار خطای پایین NRMS (۰/۰۵، ۰/۰۴، ۰/۰۴، ۰/۰۷) حاکی از آن است که مدل موج سینماتیک در شبیه‌سازی روندیابی سیل موفق عمل کرده است و از دقت مطلوبی برخوردار است.

بررسی شاخص‌ها و نمودارهای به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل گاهی در تخمین اوج دچار خطا شده است؛ همچنین بررسی هیدروگراف جداگانه هر ایستگاه و خطاسنجی و همبستگی مدل نشان داد که مدل در شبیه‌سازی برای ایستگاه بازنه موفق‌تر عمل کرده است. برای ایستگاه پل دوآب به‌عنوان خروجی حوضه، نسبت به ۳ ایستگاه دیگر خطای بیشتری در شبیه‌سازی داشته است که شاید بتوان این موضوع را به کیفیت داده‌ها در این ایستگاه‌ها مرتبط دانست.

به‌طورکلی نتایج نشان‌دهنده توانایی و دقت بالای مدل موج سینماتیک، در شبیه‌سازی روندیابی سیل در حوضه آبخیز قره‌چای می‌باشد. با توجه به توپوگرافی منطقه و نقشه‌های GIS، مقطع مستطیلی و شکل حوضه کتاب باز مشخص شد که می‌توان نتایج مدل حاضر را به حوضه‌های با این نوع شکل تعمیم داد.

لذا یافته‌های پژوهش، مطالعات آقایی دانشور و خانجانی (۱۳۹۵)، امیدوار (۱۳۹۳)، قنبرآبادی (۱۳۹۱)، کریمیان کاکلکی و همکاران (۱۳۹۱)، همچنین یافته‌های ورگارا و همکاران (Vergara et al., 2016)، رای و همکاران (Rai et al., 2000) و چووا و انگ (Chua and Wong, 2010) که توانایی مدل موج سینماتیک را در شبیه‌سازی روندیابی سیل با معادلات سنت و نانت و ضریب زبری مانینگ رضایت‌بخش اعلام کردند، تایید می‌کند.

## منابع

امیدوار، ا. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی توزیعی رواناب، فرسایش و انتقال رسوب در حوضه داراب کلا با استفاده از حل عددی تقریب موج سینماتیک جریان. رساله دکتری، دانشگاه مازندران.

آقایی دانشور، ف. و خانجانی، م. ۱۳۹۵. کاربرد مدل‌های یک و دوبعدی جریان سطحی و نفوذ برای حوضه آبریز دره مارون استان فارس. نشریه دانش آب و خاک، ۲۶ (۱/۳): ۲۴۸-۲۳۵.

روشنگر، ک، اعلمی، م. و ثاقبیان، م. ۱۳۹۷. پیش‌بینی ضریب زبری مانینگ در کانال‌های روباز با فرم بستر تلماسه با استفاده از روش الگوریتم تکاملی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲ (۲): ۴۵۷-۴۴۶.

قنبرآبادی، ح. ۱۳۹۱. بررسی کارایی روندیابی حوضه آبخیز به روش موج سینماتیک به وسیله GIS در حوضه آبخیز جعفرآباد، استان

همچنین در شکل ۵، نمودار پراکنش داده‌ها در روندیابی دبی حداکثر سیلاب به روش موج سینماتیک با مقدار مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب آورده شده است. با توجه به نمودارهای فوق و در مقایسه با خط یک‌به‌یک، انحراف حاصل از موج سینماتیک در شکل‌ها دیده نمی‌شود و همبستگی بین مقادیر مشاهده‌شده حاصل از روندیابی سیل با مقادیر مشاهده‌شده، تایید می‌گردد.

## نتیجه‌گیری

نظر به اینکه سیلاب یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی است و خسارات مالی و جانی بسیاری را ایجاد می‌کند، لذا پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی رودخانه در مقابل سیلاب‌های احتمالی به‌منظور کاهش خسارات وارده به مزارع و شهرها و یا تاسیسات در حال ساخت در اطراف رودخانه، حائز اهمیت است. به‌منظور کنترل سیلاب در رودخانه و یا دریاچه پشت سدها و بندها و همچنین جهت حفاظت کناره‌های رودخانه‌ها لازم است تا تغییرات ارتفاع و حجم آب و نیز مقدار شدت جریان ورودی و خروجی به منطقه مورد مطالعه را در طول زمان سیل معین نمود که این عمل را روندیابی سیل می‌نامند. روش‌های متفاوتی به این منظور وجود دارد؛ در این پژوهش به روش موج سینماتیک به روندیابی سیل در حوضه رودخانه قره‌چای پرداخته شده است.

نتایج حاصل از مشخصات فیزیکی رودخانه حاکی از آن بود که محدوده مورد مطالعه دارای شیب و ضریب زبری کم و شماره منحنی خاک بالایی است که با حاکم بودن این شرایط، احتمال وقوع سیل و رواناب در حوضه پیش‌بینی می‌شود.

خروجی حوضه ایستگاه هیدرومتری پل دوآب بود که ورودی این ایستگاه سرشاخه بود و داده‌های سه رود ازنا، بازنه و توره به این خروجی هدایت می‌شد؛ در این شرایط سطح آب در محل تلاقی رودخانه‌ها می‌تواند رابطه بین سطح آب و دبی را تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به نتایج مطالعات تایید شده (Chua and Wong, 2010) که به منظور بهبود روندیابی به روش موج سینماتیک، پیشنهاد شده بود، نرخ تلفات صفر و کلیت حوضه برای محاسبه در نظر گرفته شود، لذا در این پژوهش نیز بر این مبنا عمل شد و با داشتن هیدروگراف ورودی به‌عنوان شرط اولیه و در نظر گرفتن مقدار صفر برای تمامی دبی‌های با زمان صفر ثانیه به عنوان شرط مرزی، مدل‌سازی روندیابی سیل رودخانه قره‌چای به روش موج سینماتیک انجام شد.

گراف‌های به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده تطابق مدل‌سازی انجام گرفته با داده‌های مشاهداتی بود. در نتایج ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب مقدار بالای ضریب

- complex terrain using GIS and remote sensed information. *Journal of Water Resources Management*, 19(5): 605-624.
- Maidment, D.R. 1996. GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress. The Third International Conference on GIS and Environmental Modeling .January 22-26, Santa Fe, New Mexico.
- Rai, R.K., Upadhyay, A. and Sing, V.P. 2010. Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*. 382: 115-127 .
- Vergara, H., Kirstetter, P.E., J. Gourley, J., L. Flamig, Z., Hong, Y., Arthur, A. and Kolar, R. 2016. Estimating a-priori kinematic wave model parameters based on regionalization for flash flood forecasting in the Conterminous United States. *Journal of Hydrology*. 541: 421-433.
- Wong, T.S.W. 1992. *An Introduction to Kinematic Wave Method for Storm Drainage Design*. Hillview Publishers, Singapore.
- Wong, T.S.W. 2009. *Kinematic-Wave Rainfall-Runoff Formulas*. Nova Science, New York, USA.
- گلستان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- کریمیان کاکلی، ر.، هنربخش، ا.، ساداتی-نژاد، ج. و عبداللهی، خ. ۱۳۹۱. روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل موج سینماتیک و ماسکینگام-کانژ (مطالعه موردی: رودخانه دوآب صمصامی). مجله پژوهش آب ایران، ۶(۱۰): ۹-۱.
- مهدوی، م. ۱۳۹۲. هیدرولوژی کاربردی. جلد دوم. تهران: انتشارات دانشگاه تهران. ۴۴۲ ص.
- Alley, W.M., Dawdy, D.R. and Schaake, J.C. 1980. Parametric-deterministic urban watershed model. *Journal of Hydraulic Engineering*. 106, (HY5): 679-690.
- Chow, V.T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Pub. Co., USA, 680pp.
- Chua, L and Wong, T. 2010. Improving event-based rainfall-runoff modeling using a combined artificial neural network-kinematic wave approach. *Journal of Hydrology*. 390: 92-107.
- Liu, Y.B., and De Smedt, F. 2005. Flood modeling for

## Flood Routing via Kinematic Wave Theory based on GIS (Case Study: Ghareh-Chay River)

M. Rezaei Anvar<sup>1</sup>, M. Zakeri Niri<sup>2\*</sup>, M. Sohrabi MollaYousefi<sup>3</sup>

Received: Oct.28, 2020

Accepted: Dec.28, 2020

### Abstract

The purpose of the present study was to determine the flood Routing kinematics of the Ghareh-chay River that is done in the MATLAB programming environment. By providing the required data, the flood flow routing modeling of each station was performed by the kinematic wave method in the Ghareh-chay River basin. The results of physical characteristics of the river indicated that the study area had low slope and roughness coefficient and high soil curve number. In order to improve the kinematic wave routing, modeling was performed with input hydrograph as the initial condition and considering zero value for all zero-second discharges as the boundary condition. The obtained graphs show the conformity of the modeling performed with the observed data. Nash-Sutcliffe (NS), Coefficient of Determination ( $R^2$ ) and Normal Root Mean Square Error (NRMSE) indices were used to evaluate the model capability. In the results of the model performance evaluation for the Hydrometric Azna, Bazaneh, Toure and Pole Doab with the high value of Nash coefficient and Coefficient of Determination and the low error value of NRMS indicate that the model The kinematic wave has been successful in simulating flood flow and has good accuracy; and it was determined that the results of the present model can be generalized to basins with this type of shape.

**Keywords:** Ghareh-Chay river, Routingm, Manning roughness coefficient, Kinematic wave

---

1- M.Sc. Graduate, Water Resources Management and Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

3- Associate Professor, Department of Geology, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

(\*-Corresponding Author Email: Zakeriau@gmail.com )