

## روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل موج سینماتیک و ماسکینگام-کانز (مطالعه موردی: رودخانه دوآب صمصامی)

روح الله کریمیان کاکلکی<sup>۱\*</sup>، افشین هنربخش<sup>۲</sup>، سید جواد ساداتی نژاد<sup>۳</sup> و خدایار عبدالهی<sup>۴</sup>

### چکیده

روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها فرایندی ریاضی است که برای پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب در نقطه‌ای پایین‌دست ایستگاه اندازه‌گیری دبی صورت می‌گیرد. حل معادلات کامل سنت-ونانت در تحلیل جریان غیرماندگار معمولاً امر پیچیده‌ای است که نیازمند استفاده از کامپیوتر و مدل‌های تجاری توسعه یافته برای این کار است. در مقابل این روش پیچیده، روش‌های ساده‌تر و تقریبی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی مختلفی توسعه یافته‌اند که با در نظر گرفتن برخی فرضیات می‌توانند سیلاب را در رودخانه‌ها روندیابی کنند. در این تحقیق، صحت و دقت دو روش موج سینماتیک و ماسکینگام-کانز که از روش‌های تقریبی روندیابی سیل محسوب می‌شدند، در یک مطالعه موردی در رودخانه دوآب صمصامی با یکدیگر مقایسه شدند. مقادیر RMSE برای روش موج سینماتیک ۰/۸۴۵ و برای روش ماسکینگام-کانز ۱/۴۰۱ بدست آمد و در مجموع نتایج تحقیق نشان دهنده توانایی بیشتر مدل موج سینماتیک و صحت بیشتر نتایج حاصل از آن است.

**واژه‌های کلیدی:** روندیابی سیلاب، معادلات سنت-ونانت، موج سینماتیک، ماسکینگام-کانز و دوآب صمصامی

**ارجاع:** کریمیان کاکلکی ر. هنربخش ا. ساداتی‌نژاد س.ج. و عبدالهی خ. ۱۳۹۰. روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل موج سینماتیک و ماسکینگام-کانز (مطالعه موردی: رودخانه دوآب صمصامی). مجله پژوهش آب ایران. ۶(۱۰): ۵۷-۶۵.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

۲- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

۴- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشگاه ویرجی بروکسل.

\* نویسنده مسئول: [karimian.roh@gmail.com](mailto:karimian.roh@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۵/۰۹

## مقدمه

روندیابی جریان در رودخانه، یک فرایند ریاضی برای پیش‌بینی تغییرات بزرگی، سرعت و شکل موج سیل به صورت تابعی از زمان در یک یا چند نقطه در طول آبراهه، کانال یا مخزن محسوب می‌شود. اگر جریان مربوطه سیلابی باشد به آن روندیابی سیل گفته می‌شود (چو، ۱۹۸۲). روش‌های زیادی برای پیش‌بینی خصوصیات شکل موج سیل برای مشخص نمودن اقدامات ضروری برای حفاظت از انسان‌ها و دارایی‌هایشان در هنگام وقوع سیل و همچنین جهت بهبود روش‌های انتقال آب از آبراهه‌های طبیعی و یا مصنوعی ارائه شده است. در قرن ۱۹ تحقیقات زیادی برای استفاده از تکنیک‌های ریاضی در روندیابی سیل انجام شده است، به طوری که در سال ۱۸۷۱، سنت ونانت برای اولین بار تئوری جریان غیرماندگار یک بعدی را فرموله کردند. سپس با توجه به پیچیدگی حل این معادلات، روش‌های ساده‌تر و تقریبی برای روندیابی جریان توسعه یافت (میدمنت، ۱۹۹۳). بررسی روند سیل به دو طریق هیدرولیکی و هیدرولوژیکی قابل مطالعه است. اگر جریان آب فقط به صورت تابعی از زمان در محلی مشخص روندیابی شود، روندیابی هیدرولوژیکی و یا متمرکز نامیده می‌شود. در این روش، از معادله پیوستگی جریان، هیدروگراف‌های طبیعی و واحد، دبی و سطح تراز حداکثر سیلاب استفاده می‌شود. از جمله روش‌های هیدرولوژیکی روندیابی سیل می‌توان مدل‌های ماسکینگام، کانوکس و آت‌کین را نام برد. اگر روندیابی جریان به صورت تابعی از زمان و مکان در طول سیستم مد نظر باشد، این روش به نام روندیابی هیدرولیکی یا توزیعی شناخته می‌شود. در این روش، از معادله پیوستگی همراه با فرم‌های مختلفی از معادله اندازه حرکت استفاده می‌شود. روش‌های روندیابی هیدرولیکی با توجه به عبارت‌های درگیر از معادله اندازه حرکت به سه دسته روندیابی موج سینماتیک، موج پخشیدگی و موج دینامیک تقسیم می‌شوند. ساده‌ترین فرم مدل روندیابی توزیعی، مدل موج سینماتیک است که در آن از عبارت‌های شتاب محلی، شتاب انتقالی و فشار در معادله اندازه حرکت صرف‌نظر شده است (چو و همکاران، ۱۹۸۸).

پریسپن (۱۹۸۹) در تحقیقی به بررسی ضوابط مربوط به کاربرد روش موج سینماتیک برای جریان‌های کم عمق پرداختند.

سونترنو (۱۹۹۱) برای مقایسه بین روش‌های مختلف روندیابی سیل از پنج روش ماسکینگام-کانز، روش خصوصیات، روش موج سینماتیک، روش موج دینامیک و روش UBC استفاده کرد و دریافت که جریان محاسبه شده از همه مدل‌های فوق با جریان مشاهده شده خروجی تطابق زیادی دارد ولی مدل موج دینامیک به علت صحت بیشتر نتایج و جنبه کاربردی آن مطمئن‌ترین روش است.

ویکتور و همکاران (۲۰۰۱) مدل ماسکینگام-کانز را با یک مدل موج دینامیکی مورد مقایسه قرار دادند و نتایج نشان داد که این مدل از صحت و دقت مناسب برخوردار است.

پاتریسا و ریموندو (۲۰۰۵) در تحقیق خود روش‌های حل عددی معادلات سنت-ونانت را برای مطالعه سیل در رودخانه‌ها بررسی کردند و در نهایت نتیجه گرفتند که پارامترهای هیدرولیکی در بررسی مکانیسم انتشار موج سیل نقش عمده و مهمی ایفا می‌کنند.

مرادی و همکاران (۱۳۸۶) به روندیابی سیل با روش‌های ماسکینگام و ماسکینگام-کانز در رودخانه ليقوان پرداختند و مشاهده کردند که نتایج حاصل از جریان روندیابی شده توسط دو مدل اختلاف معنی داری با نتایج واقعی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری پایین‌دست دارد و دلیل آن را کوهستانی بودن منطقه و وجود زهکش‌های تحت الارضی در حدفاصل دو ایستگاه هیدرومتری بالادست و پایین‌دست عنوان کردند.

شالتز و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی با هدف ارزیابی کاربرد استفاده از تکنیک موج سینماتیک به توسعه مدل‌های توزیعی برای حوضه‌های مستطیلی مصنوعی و یک حوزه آبریز واقعی پرداختند.

در این تحقیق به روندیابی سیل با روش‌های ماسکینگام-کانز و موج سینماتیک پرداخته شده تا با

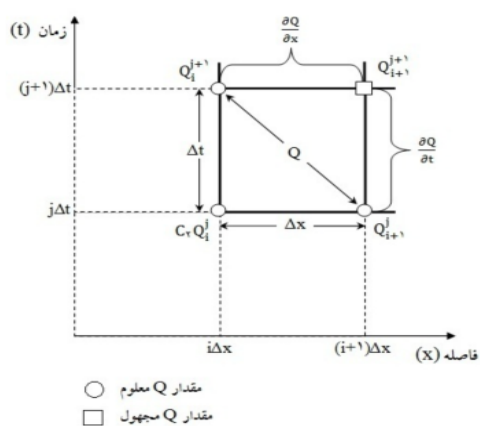
موج سینماتیکی که در اثر تغییر در دبی  $Q$  ایجاد می‌شود با سرعت مشخصی به سمت پایین دست در حال حرکت است که مقدار آن از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\frac{dx}{dt} + \frac{dQ}{dA} = C_k \quad (7)$$

که در آن  $C_k$  سرعت موج سینماتیک است و این بدان معناست که اگر ناظری با سرعت  $\frac{dx}{dt} = C_k$  همراه با جریان حرکت کند، مشاهده می‌کند که میزان دبی جریان با شدت  $\frac{dQ}{dx}$  در حال افزایش است (چو، ۱۹۸۲).

### حل عددی موج سینماتیک

هدف از حل عددی معادله ۶، به دست آوردن  $Q(x,t)$  در هر نقطه از شبکه  $x-t$  بر حسب پارامترهای معلوم  $\alpha$  و  $\beta$  کانال، دبی جانبی  $q(t)$  و همچنین شرایط اولیه و مرزی معین است. برای حل عددی معادله دیفرانسیلی ۶، مشتقات زمانی و مکانی  $Q$  روی شبکه  $x-t$  مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- فرم تفاضلات محدود برای حل معادله موج

#### سینماتیک به روش خطی

مجهول این معادله مقدار  $Q_{i+1}^{j+1}$  است. مقادیر  $Q$  در خط زمانی  $z$  ام از گام‌های محاسباتی قبلی معلوم می‌باشد. همچنین  $Q_i^{j+1}$  نیز معلوم است.

با تعیین مقدار دبی جریان جانبی  $q$  با میانگین گیری در خط مکانی  $(j+1)$ ، جایگذاری مقدار  $Q_{i+1}^{j+1}$  در معادله ۶ به جای  $Q$  و حل معادله حاصل بر حسب مقدار مجهول  $Q_{i+1}^{j+1}$ ، فرم تفاضلات محدود معادله موج سینماتیک به شکل زیر به دست می‌آید:

بررسی میزان صحت نتایج و داده‌های ورودی مورد نیاز برای هر مدل، مناسب‌ترین روش تعیین شود. بررسی موردی این تحقیق در بازه‌ای از رودخانه دوآب صمصامی واقع در استان چهارمحال و بختیاری صورت گرفته است.

### مواد و روش‌ها

#### روش موج سینماتیک

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، در روش موج سینماتیک از عبارتهای شتاب محلی، شتاب انتقالی و عبارت فشار در معادله اندازه حرکت صرف نظر شده است و لذا مدل موج سینماتیک با معادلات زیر تعریف می‌شود (چو و همکاران، ۱۹۸۸):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت:

$$S_o = S_f \quad (2)$$

همچنین معادله اندازه حرکت را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$A = \alpha Q^\beta \quad (3)$$

با نوس معادله مانینگ بر حسب  $A$  داریم:

$$A = \left( \frac{n P \frac{2}{3}}{\sqrt{S_o}} \right)^{\frac{3}{5}} Q^{\frac{3}{5}} \quad (4)$$

و لذا  $\alpha = \left( \frac{n P \frac{2}{3}}{\sqrt{S_o}} \right)^{\frac{3}{5}}$  و  $\beta = \frac{3}{5}$  است.

معادله پیوستگی ۱ دارای دو متغیر وابسته  $A$  و  $Q$  است، که می‌توان به جای  $A$  از معادله ۳ جایگذاری کرد. با مشتق گیری از معادله ۳ و جایگذاری در معادله ۱ داریم:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha \beta Q^{\beta-1} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \quad (6)$$

بنابراین از معادله ۶ که از ترکیب معادله پیوستگی و اندازه حرکت به دست آمده برای مدل سازی موج سینماتیک در روندیابی سیل استفاده می‌شود.

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (14)$$

صیغ بوضیه آکان (۲۰۰۶) t باید کوچکتر از یک پنجم زمان اوج هیدروگراف ورودی باشد که بتواند بازوی بالارونده هیدروگراف را به خوبی نشان دهد.

یک مسئله مهم و اساسی در روش ماسکینگام این است که پارامترهای X و K مفهوم فیزیکی ندارند و فقط در صورتی می‌توان آنها را برآورد کرد که هیدروگراف‌های ورودی و خروجی از یک واقعه سیلاب در بازه کانال موجود باشد.

این مشکل در روش ماسکینگام-کانز برطرف شده است و در آن پارامترهای X و K براساس خصوصیات فیزیکی بازه کانال بیان شده‌اند (چو و همکاران، ۱۹۸۸)

$$K = \frac{\Delta x}{C_k} = \frac{\Delta x}{\frac{dQ}{dA}} \quad (15)$$

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BC_k S_0 \Delta x} \right) \quad (16)$$

که در معادلات فوق Q دبی مرجع، B عرض سطح آب مربوط به دبی مرجع،  $S_0$  شیب طولی کانال،  $\Delta x$  طول بازه کانال و  $C_k$  سرعت موج سینماتیک است که از معادله ۷ تعیین می‌شود.

روند کار به این ترتیب است که در ابتدا دبی متوسط هر سیلاب به عنوان دبی مرجع انتخاب می‌شود (انتخاب دبی متوسط به‌عنوان دبی مرجع از طریق روش سعی و خطا تعیین شد). در گام بعد با استفاده از رابطه مانینگ مقدار عمق نرمال محاسبه می‌شود. پس از تعیین عمق نرمال می‌توان پارامترهای هیدرولیکی جریان نظیر عمق هیدرولیکی، محیط خیس شده، سطح خیس شده و عرض بالایی جریان را در محل هر مقطع تعیین کرد. با این داده‌ها می‌توان پارامترهای X و K را بر اساس معادلات ۱۵ و ۱۶ محاسبه کرد. ضرایب  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  نیز از روابط ۱۲ الی ۱۴ تعیین شده و در گام آخر مقدار دبی خروجی با استفاده از معادله ۱۱ به دست می‌آید.

برای اجرای عملیات روندیابی سیلاب به روش ماسکینگام-کانز بر اساس مراحل فوق نیز برنامه‌ای کامپیوتری مشابه روش موج سینماتیک تهیه شد.

$$Q_{i+1}^{j+1} = \left[ \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha \beta Q_{i+1}^j \left( \frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left( \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \right] \left/ \left[ \frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \beta \left( \frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right) \right] \right. \quad (8)$$

برای حل عددی معادله موج سینماتیک، برنامه‌ای کامپیوتری با استفاده از تکنیک ماکرونویسی در محیط Visual Basic تحت نرم‌افزار Excel تهیه شد و با استفاده از روش خطی معادله فوق را برای محاسبه دبی در مقاطع و زمان‌های مختلف بر اساس هیدروگراف‌های مشاهده‌ای در مقطع ورودی و سایر خصوصیات بازه رودخانه حل نموده و هیدروگراف خروجی را به دست می‌دهد.

#### روش ماسکینگام و ماسکینگام-کانز

روش ماسکینگام اولین بار در سال ۱۹۳۵ میلادی توسط مک کارتی برای کنترل جریان سیلاب روی رودخانه ماسکینگام در اوهاو مورد مطالعه قرار گرفت (چو و همکاران، ۱۹۸۸). اصول این روش بر پایه ترکیب دو معادله است که یکی رابطه پیوستگی را ارضا می‌کند و دیگری رابطه حجم ذخیره شده را در بازه بیان می‌کند. رابطه پیوستگی و رابطه به‌کار رفته برای تعیین حجم ذخیره شده در بازه به صورت معادلات ۹ و ۱۰ تعریف می‌شوند:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (9)$$

$$S = KQ + KX(I - Q) \quad (10)$$

که در روابط فوق S حجم ذخیره شده در بازه مورد مطالعه در زمان t، I دبی ورودی به بازه و Q دبی خروجی از بازه است. همچنین X و K پارامترهای روش ماسکینگام هستند که به صورت تابعی از مشخصات مسیر جریان و موج سیل در نظر گرفته می‌شوند.

با نوشتن فرم تفاضل محدود معادلات ۹ و ۱۰ و ترکیب آنها و در نهایت ساده‌سازی به معادله زیر می‌رسیم که براساس آنها می‌توان روندیابی را انجام داد.

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (11)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (12)$$

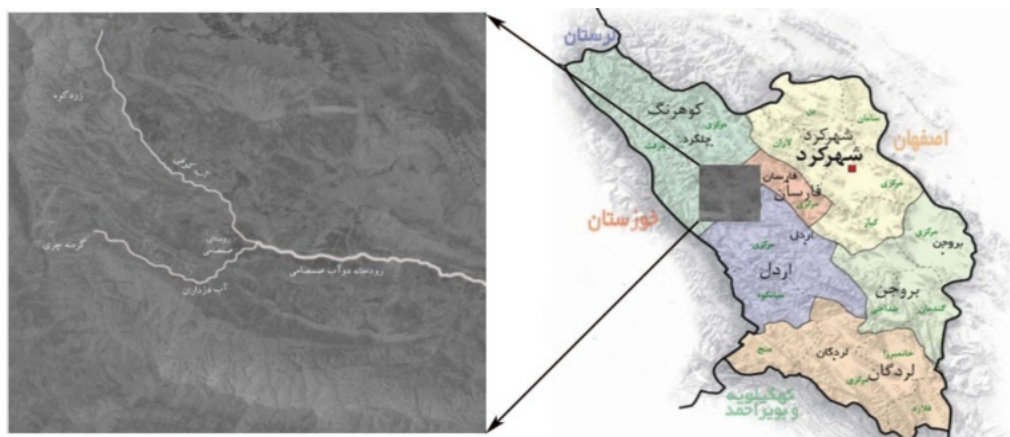
$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (13)$$

روستای صمصامی تشکیل می‌شود. در فاز عملیات میدانی پس از شناسایی مسیر بازه مورد مطالعه، اقدام به برداشت ۱۴ مقطع عرضی در طول بازه انتخابی با انجام عملیات نقشه‌برداری شد. سپس اقدام به ثبت خصوصیات فیزیکی مسیر رودخانه از جمله شیب طولی و مقدار ضریب زبری مانینگ هر زیر بازه شد. شیب متوسط بازه ۱/۱ درصد و مقدار متوسط ضریب زبری مانینگ برای کل بازه مورد مطالعه ۰/۰۲۶ برآورد شد که جهت تعیین مقادیر ضریب زبری مانینگ برای هر زیر بازه، از تصاویر تهیه شده و همچنین نظرات کارشناسی استفاده شد. موقعیت منطقه مورد مطالعه و مقاطع برداشتی از رودخانه دوآب صمصامی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

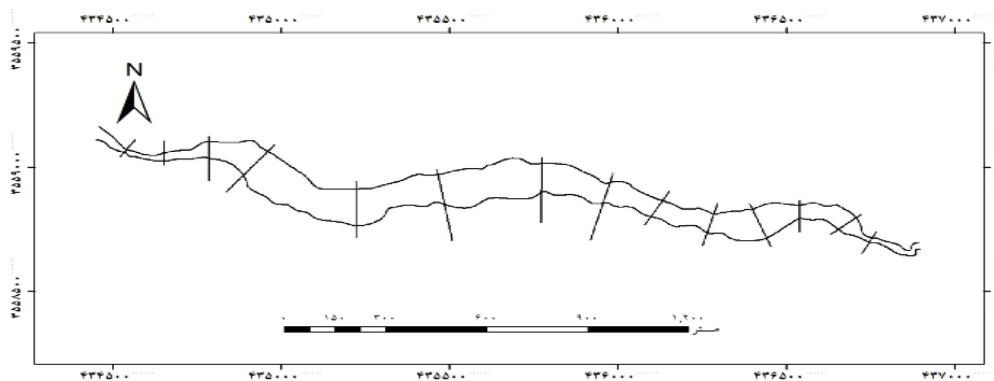
این برنامه می‌تواند با معرفی اطلاعات معرفی شده مورد نیاز و اجرای آن، سیل را در بازه‌ای از رودخانه روندیابی کند و در نهایت هیدروگراف خروجی از بازه را به دست آورد.

### مطالعه موردی

برای بررسی موردی مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق برای روندیابی سیلاب به روش موج سینماتیک و ماسکینگام-کانز، بازه‌ای به طول ۳/۵ کیلومتر از رودخانه دوآب صمصامی که از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کارون بزرگ محسوب می‌شود، انتخاب شد. حوزه مربوط به رودخانه دوآب صمصامی با مساحتی حدود ۱۷۷ کیلومتر مربع در غرب استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است. رودخانه دوآب صمصامی از به هم پیوستن دو رودخانه به نام‌های آب کوفی و آب دزداران در مجاورت



شکل ۲- موقعیت حوضه و رودخانه دوآب صمصامی در استان چهارمحال و بختیاری



شکل ۳- پلان بازه مورد مطالعه به همراه موقعیت مقاطع عرضی برداشت شده از رودخانه دوآب صمصامی

کانز نیز با معرفی پارامترهای فوق اجرا شد و هیدروگراف خروجی مربوط به هر سیلاب ثبت شده محاسبه شد. لازم به ذکر است در هر دو مدل مورد استفاده از جریان-های جانبی (q) صرف نظر شد.

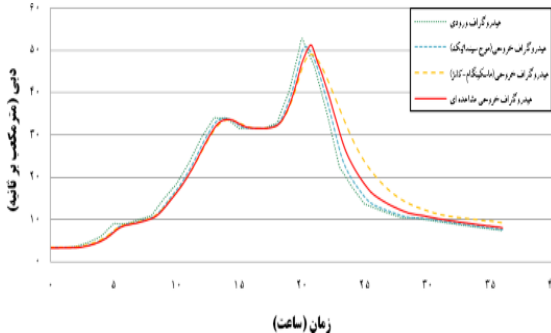
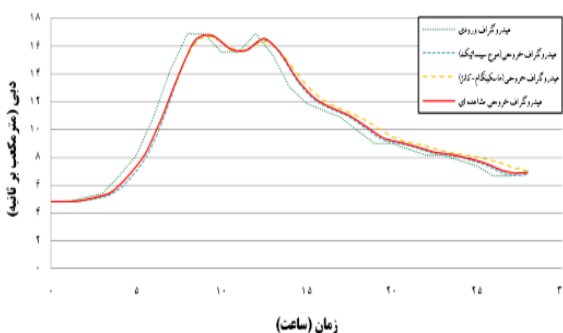
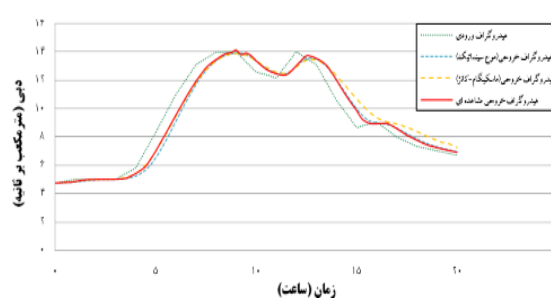
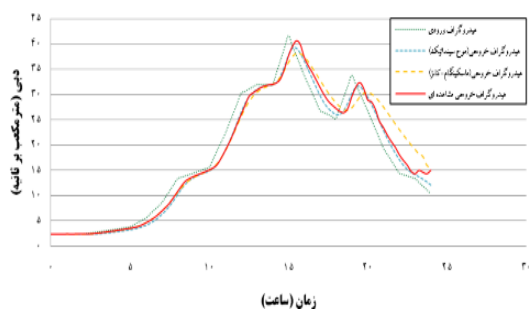
برای بررسی آماری هیدروگراف‌های محاسبه شده از فاکتور جذر مجموع مربع تفاضلات دبی‌های محاسبه شده از مشاهده شده (RMSE) برای زمان اتفاق استفاده می‌شود. روش محاسبه به شکل زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_c)^2} \quad (17)$$

که  $Q_c$  مقادیر دبی محاسبه شده،  $Q_o$  مقادیر مشاهده‌ای دبی و  $n$  تعداد زوج دبی‌های مشاهده‌ای و محاسبه شده از هر مدل است.

### نتایج و بحث

هیدروگراف‌های مشاهده شده از هر ۵ سیلاب ثبت شده در محل مقاطع ورودی و خروجی به همراه هیدروگراف‌های خروجی محاسبه شده از هر دو روش موج سینماتیک و ماسکینگ-کانز در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴- هیدروگراف‌های ورودی و خروجی مشاهده شده به همراه هیدروگراف‌های خروجی محاسبه شده از دو روش روندیابی برای هر کدام از پنج سیلاب ثبت شده

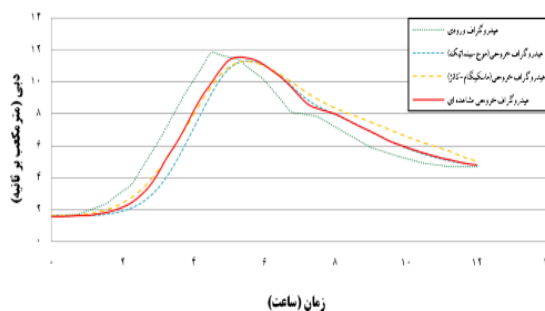
### ثبت هیدروگراف‌های سیلاب

برای تأمین داده‌های لحظه‌ای جریان برای استفاده در روش‌های مورد مطالعه و مقایسه صحت نتایج محاسبه شده از هر روش، هیدروگراف‌های مربوط به پنج سیلاب رخ داده در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ در محل ورودی و خروجی بازه مورد نظر به طور هم‌زمان و با فواصل زمانی ۱۵ دقیقه، مشاهده و ثبت شد. بدین منظور تغییرات تراز آب در محل مقاطع ورودی و خروجی به صورت لحظه‌ای ثبت شد و با استفاده از منحنی دبی-اشل مربوط به هر مقطع، هیدروگراف دبی هر سیلاب تهیه شد.

### اجرای روش‌های حل مورد مطالعه

پس از جمع‌آوری و تنظیم آمار و داده‌های لازم برای استفاده در مدل‌های مورد نظر، ابتدا روش موج سینماتیک با معرفی مقادیر لحظه‌ای جریان مربوط به هیدروگراف ورودی، ضریب زبری مانینگ و شیب طولی هر زیر بازه، خصوصیات هندسی و هیدرولیکی هر مقطع و فواصل بین مقاطع عرضی برداشت شده به برنامه کامپیوتری تهیه شده برای محاسبه هیدروگراف خروجی، مورد استفاده قرار گرفت. برنامه‌ی کامپیوتری تهیه شده برای روندیابی سیلاب به روش ماسکینگ-کانز

مقادیر پارامتر RMSE برای نتایج هر یک از دو روش رندبایی در جدول ۱ آورده شده است. به منظور کنترل نتایج حاصل از مقایسه قبل و تشخیص عوامل خطا یا اشتباه احتمالی، در مرحله بعد مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای هر سیلاب به طور جداگانه مقایسه شد.



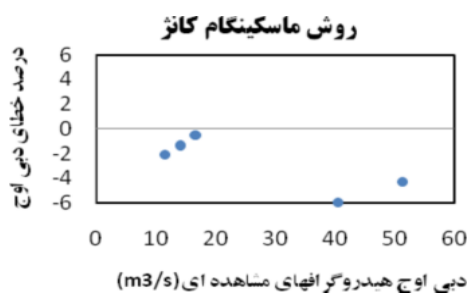
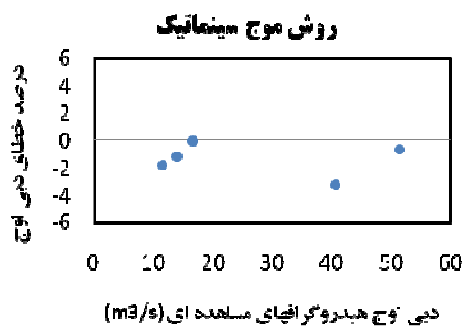
ادامه شکل ۴

جدول ۱- مقادیر پارامتر RMSE برای هر یک از پنج سیلاب و کل سیلاب‌ها

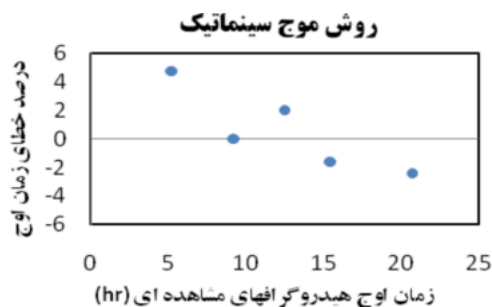
روش محاسبه سیلاب‌ها	شماره ۱	شماره ۲	شماره ۳	شماره ۴	شماره ۵	کل
روش موج سینماتیک	۰/۶۹۶	۰/۱۷۳	۰/۱۴۸	۱/۴۰۲	۰/۴۳۱	۰/۸۴۵
روش ماسکینگام-کانژ	۱/۷۹۸	۰/۳۳۱	۰/۲۳۸	۲/۰۶۰	۰/۳۹۹	۱/۴۰۱

خطای دبی یا زمان اوج محاسبه شده از هر روش در مقابل مقدار واقعی در هیدروگراف مشاهده شده آن واقعه قرار گرفته و پراکنش آن نسبت به خط صفر بدست آمده است.

برای تعیین دقت دو روش موج سینماتیک و ماسکینگام-کانژ در برآورد مقادیر دبی اوج و زمان وقوع دبی اوج، درصد خطای محاسبه هر پارامتر نسبت به مقادیر مشاهده‌ای تعیین شد و نتایج آن در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. در این شکل‌ها فاکتور درصد



شکل ۵- پراکندگی حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای دبی اوج



شکل ۶- پراکندگی حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای زمان وقوع دبی اوج

کردند و نتیجه گرفتند که بیشترین اختلاف دو روش در شیب‌های کم اتفاق می‌افتد و بنابراین در کاربرد روش ماسکینگام-کانژ در شیب‌های کم باید احتیاط نمود. بازه مورد مطالعه از رودخانه دوآب صمصامی در این تحقیق نیز شیب بسیار کمی دارد و نتایج حاصل از مقایسه دو روش مؤید کارایی بیشتر روش موج سینماتیک نسبت به روش ماسکینگام-کانژ است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق کارایی و دقت دو روش موج سینماتیک و ماسکینگام-کانژ با حل معادلات مربوطه در یک مطالعه موردی بررسی شد. پارامترهای مربوط به مقایسه نتایج حاصل از روندیابی پنج واقعه سیلاب نشانگر دقت و کارایی بیشتر مدل موج سینماتیک در بررسی روند سیل در رودخانه دوآب صمصامی است. همچنین با توجه به نزدیکی میزان و نوع اطلاعات و داده‌های مورد نیاز دو روش مورد استفاده در این تحقیق و افزایش کارایی روش موج سینماتیک در شیب‌های تندتر، این مدل به عنوان مدل برتر در بررسی روند سیل در رودخانه دوآب صمصامی معرفی می‌شود.

### منابع

- ۱- حقیقی ع. و اشرفی م. ۱۳۸۵. بررسی مقایسه‌ای موج دینامیک و سینماتیک در روندیابی سیل در مطالعات مهندسی رودخانه. هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲- فتوحی م. و فغور مغربی م. ۱۳۸۷. مقایسه روش روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام-کانژ. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.
- ۳- مرادی ح. وفاخواه م. و باویل ع. ۱۳۸۶. مقایسه روندیابی سیل با دو روش ماسکینگام و ماسکینگام-کانژ در بخشی از رودخانه ليقوان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۴۲(ب): ۳۳۵-۳۴۲.

در بررسی نتایج حاصل از پارامتر RMSE برای هر دو روش مورد استفاده ملاحظه می‌شود که روش موج سینماتیک در تخمین شکل هیدروگراف خروجی خطای کمتری دارد و در بررسی موردی هر یک از سیلاب‌ها هم این موضوع تصدیق می‌شود. در بررسی نتایج مربوط به فاکتور درصد خطای برآورد دبی اوج، مقدار این پارامتر در هر دو روش و برای تک تک سیلاب‌ها عدد منفی بدست آمده است. این بدان معناست که هر دو روش همواره مقدار دبی اوج را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده‌اند. در مقایسه شکل‌های مربوط به پراکنش حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای دبی اوج، در مجموع این پراکنش برای نتایج مدل موج سینماتیک کمتر است، و لذا این روش مقدار دبی اوج را با دقت بیشتری محاسبه کرده است. در شکل‌های مربوط به پراکنش حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای زمان وقوع دبی اوج، ملاحظه می‌شود که روش ماسکینگام-کانژ در سه سیلاب از ۵ واقعه سیلاب رخ داده در بازه مورد مطالعه، زمان وقوع دبی اوج را به درستی به دست آورده است (با توجه به درصد خطای صفر برای سه مورد از سیلاب‌ها). لذا روش ماسکینگام-کانژ در تخمین زمان وقوع دبی اوج دقیق‌تر است. حقیقی و اشرفی در سال ۱۳۸۵ در تحقیقی مشابه مقایسه‌ای بین نتایج روندیابی دو روش موج سینماتیک و دینامیک انجام دادند و در نهایت مدل موج سینماتیک را با توجه به سادگی محاسبات و نتایج بسیار نزدیک به تحلیل دینامیکی رودخانه به‌عنوان روشی مناسب در شیب‌های بالاتر از ۰/۰۰۱ پیشنهاد کردند. همچنین پاتریسا و ریموندو (۲۰۰۵) برای بررسی روش‌های حل عددی معادلات سنت-ونانت برای مطالعه سیل در رودخانه‌ها نتیجه گرفتند که پارامترهای هیدرولیکی در بررسی مکانیسم انتشار موج سیل نقش عمده و مهمی ایفا می‌کند و نتایج تحقیق با توجه به دخالت پارامترهای هیدرولیکی و نتایج مطلوب در هر دو روش مؤید این مطلب است. فتوحی و فغور مغربی در سال ۱۳۸۷ در تحقیقی روش روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام-کانژ را با پارامترهای ثابت و متغیر به کار برده و باهم مقایسه



- 10-Shultz M. J. Crosby E. C. McEnery J. A. 2008. Kinematic wave technique applied to hydrologic distributed modeling using stationary storm events: an application to synthetic rectangular basins and an actual watershed. 28<sup>nd</sup> Annual American Geophysical Union Hydrology Days, Colorado State University.
- 11-Soentoro E.A. 1991. Comparison of Flood Routing Methods. Master of Applied Science, Department of Civil Engineering The University of British Columbia. 106 pp.
- 12-Victor M. Ponce T. Alolph L. 2001. Modelling Looped Rating in Muskingum-Cunge Routing. Journal of Hydrologic Engineering 6(2): 119-124.
- 4- Akan A.O. 2006. Open Channel Hydraulics. Butterworth-Heinemann. 364 pp.
- 5- Chow V.T. 1982. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Pub. Co., USA.
- 6- Chow V.T. Maidment D.R. and Mays L.W. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill International Editions.
- 7- Maidment D.R. 1993. Hand Book of Hydrology. McGraw-Hill Pub. Co. USA.
- 8- Patricia C. Raimundo S. 2005. Solution of Saint-Venant Equation to Study Flood in Rivers through Numerical Methods. 25<sup>nd</sup> Annual American Geophysical Union Hydrology Days, March 7–March 9, Colorado State University.
- 9- Pearsprn C. P. 1989. One-dimensional flow over a plane: criteria for kinematic wave modeling. Journal of Hydrology 111:39-48.

