

## شبیه‌سازی سیل و پیش‌بینی تغییرات آتی پهناي رودخانه با روش‌های ساده روندیابی، الگوهای هیدرولیکی صریح و ضمنی و مدل Mike11

غلامحسین اکبری<sup>۱</sup>، عارف اشکانی<sup>۲</sup>، مروین خوش‌الحان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بجنورد.

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بجنورد.

نام نویسنده مسئول:

مروین خوش‌الحان

### چکیده

سیلاب علاوه بر خسارت‌های جانی، اثرات نامطلوب اقتصادی بسیار زیادی نیز به همراه دارد؛ از این رو ضرورت شناخت، مطالعه و توانایی کنترل رواناب و سیلاب‌های به وقوع پیوسته امری ضروری است که توسط عملیات روندیابی سیلاب امکان‌پذیر است. امروزه به واسطه گسترش روش‌های مختلف، یافتن مناسب‌ترین مدل روندیابی تغییرات ارتفاع موج جریان سیل بزرگ‌ترین چالش محسوب می‌شود. در مطالعه حاضر با انتخاب یک بازه از رودخانه کر به طول ۳۹/۲ کیلومتر به بررسی چندین مدل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی روندیابی سیلاب شامل مدل‌های ماسکینگام، کانوکس، آت‌کین اصلاحی، موج سینماتیکی و مدل عددی موج دینامیکی به کمک نرم افزارهای MIKE 11 و روش‌های عددی پرداخته شده است. همچنین در برآورد پارامترهای هر روش با توجه به نوع هیدرولوژیکی یا هیدرولیکی آن، از الگوهای مختلفی نظیر الگوی حداقل مربعات، ضریب همبستگی، الگوی ترسیمی، آنالیز رگرسیون، رگرسیون چند بخشی، اداره حفاظت خاک ایالات متحده، ضریب میانگین، شمای عددی صریح و ضمنی بهره برده شده است و سپس با استفاده از معیارهای آماری، مقایسه‌ای بین نتایج روش‌های مختلف صورت گرفته است. در نهایت مدل موج دینامیکی ضمنی (با شبیه‌سازی در محیط Mike11) و مدل ماسکینگام با برآورد پارامترها به روش حداقل مربعات، به ترتیب به عنوان بهترین مدل هیدرولیکی و هیدرولوژیکی معرفی شدند.

**واژگان کلیدی:** تخمین سیلاب‌ها، تعیین حریم رودخانه، روش‌های کامل و ساده،

تغییرات ارتفاع موج جریان، مدل‌های عددی، MIKE 11.

## مقدمه

صاحب‌نظران چالش کمبود و کنترل آب را فراتر از مسئله تأمین انرژی می‌دانند به نحوی که در سال ۲۰۰۶ بالغ بر ۱/۲ میلیارد نفر از مردم جهان از دسترسی به آب شرب محروم بوده‌اند که این رقم در سال ۲۰۲۵ به ۲/۸ میلیارد نفر و در سال ۲۰۵۰ به ۴ میلیارد نفر می‌رسد [۱]. در شرایط امروز که متوسط منابع آب تجدید شونده برای هر نفر در دنیا ۷ هزار و ۶۰۰ مترمکعب است، در ایران این رقم به کمتر از هزار و ۹۰۰ متر مکعب می‌رسد؛ این در حالی است که این روند در ۵۰ سال گذشته شیب کاهشی به خود گرفته است [۲]. ورودی آب به حوضه آبریز دریای خزر ۲۵ درصد، به حوضه آبریز خلیج فارس ۱۱ درصد، به حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۱۰ درصد، به حوضه آبریز دریاچه هامون ۵۰ درصد و به حوضه آبریز سرخس ۶۶ درصد منفی بوده است. همچنین مصرف آب سالانه ایران در شرایط فعلی ۹۴ میلیارد مترمکعب می‌باشد. ضمن اینکه تقاضای آب در ۲۰ سال آتی در ایران به ۱۳۰ میلیارد مترمکعب در سال خواهد رسید؛ به این معنا که اگر تمام آب‌های سطحی را مهار کرده و پساب‌های بازگشتی را نیز استحصال کنیم سالانه ۱۰ میلیارد متر مکعب تراز منفی تأمین آب خواهیم داشت.

توسعه‌ی زیستگاه انسان‌ها در پهنه‌های سیل‌خیز، متأثر از سوابق وقوع سیل در گذشته است [۳]. نکته نگران‌کننده در این رابطه، روند افزایشی تلفات و خسارات سیلاب در جهان در دهه‌های اخیر بوده است. از طرفی تمرکز جمعیت در مناطق سیل‌خیز مثل حاشیه رودخانه‌ها موجب افزایش تلفات جانی و خسارات مالی شده است و این نشان دهنده اهمیت پهنه‌بندی سیلاب برای مدیریت صحیح و کنترل ساخت و ساز در چنین مناطقی می‌باشد [۴]. در پهنه‌بندی سیل آگاهی از تغییرات ارتفاع سیل در طول رودخانه امری ضروری است؛ بنابراین روندیابی سیل در کاهش خسارات ناشی از وقوع سیل نقش اساسی را ایفا می‌کند.

به هنگام وقوع سیل، موج سیل می‌تواند به صورت قائم (بالارونده و پایین‌رونده) و افقی جابه‌جا شود [۵]. سیلاب به عنوان مهم‌ترین جریان غیردائمی به وضعیتی اطلاق می‌گردد که در آن جریان رودخانه و سطح آب بصورت غیرمنتظره افزایش پیدا می‌کند. با اضافه شدن دبی جریان، تراز رودخانه صعود می‌کند و به موازات آن حجم آبی که به طور موقت در رودخانه انباشته شده است افزایش می‌یابد. طی فروکش طغیان، حجم معادل فوق از قسمت ذخیره آزاد می‌شود. در نتیجه به نظر می‌رسد که زمان پایه موج سیلی<sup>۱</sup> که به طرف پایین دست در حرکت می‌باشد طولانی‌تر شده و از ارتفاع آن کاسته می‌شود. تعیین حرکت این نوع موج در آبراهه‌ها و در مخازن سدها، تعیین روند سیل<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی سیل امر چالش برانگیزی محسوب می‌شود؛ زیرا خطر از نظر سطح اطمینان تعریف می‌شود، نه محدودیت‌های میزان تردید در آن [۶]. روش ماسکینگام از جمله روش‌های هیدرولوژیکی می‌باشد که کاربرد گسترده‌ای برای روندیابی سیل دارد، این روش بوسیله مک‌کارتی و همکارانش در ارتباط با مطالعه پروژه کنترل سیل ناحیه ماسکینگام توسط مهندسی ارتش آمریکا در سال ۱۹۳۴-۱۹۳۵ ارائه شده است [۷]. رابطه بین ذخیره و دبی در این روش می‌تواند به صورت خطی و یا غیرخطی مد نظر قرار بگیرد، که انتخاب نوع آن به خصوصیات منطقه مورد مطالعه بستگی دارد.

روش دیگر، روش کانوکس است. این روش از جمله روش‌های هیدرولوژیکی روندیابی سیل در رودخانه می‌باشد. در این روش  $X=0$  در نظر گرفته می‌شود و محاسبات شامل تعیین ضریب  $C$  که همان ضریب کانوکس است، می‌باشد.

از دیگر روش‌ها می‌توان به روش سازمان حفاظت خاک آمریکا<sup>۳</sup> که در آن ضریب کانوکس بر اساس سرعت متوسط آب در بازه مورد نظر تعیین می‌شود، اشاره نمود [۸]. روش آت‌کین اصلاحی نیز از دسته روندیابی هیدرولوژیکی است که بر اساس مدل‌های ذخیره‌ای و موج سینماتیکی استوار است. روش آت‌کین اصلاحی را می‌توان جایگزینی برای روش کانوکس دانست با این وجود تحت شرایط متفاوت عملکرد هر یک از این روش‌ها ممکن است از دیگری بهتر باشد.

ژیل [۹]، یک تکنیک روندیابی برای حل معادله غیرخطی ذخیره که شامل حل سعی و خطای یک سیستم معادلات غیرخطی در هر گام زمانی بود ارائه داد. این روش به ویژه زمانی که تعداد گام زمانی زیاد است، زمان‌بر می‌باشد.

تانگ [۱۰]، با استفاده از الگوی جستجوی<sup>۴</sup> (HJ) و با کمک روش‌های رگرسیون خطی<sup>۵</sup> (LM)، شیب مزدوج<sup>۶</sup> (CG) و روش<sup>۷</sup> (DFP) بهینه‌یابی پارامترهای روش غیرخطی را انجام داد. عملکرد این روش‌ها با تکنیک ژیل مقایسه شد و مشاهده گردید که

<sup>1</sup> Flood wave

<sup>2</sup> Flood Routing

<sup>3</sup> SCS

<sup>4</sup> Hooke- Jeeve

<sup>5</sup> Linear Regression

<sup>6</sup> Conjugate Gradient

<sup>7</sup> Davidson-Fletcher-Powell

روش‌های (HJ-CG) و (HJ-DFP) نتایج بهتری را ارائه می‌نمایند. این سه روش نیازمند حدس اولیه برای هر سه پارامتر می‌باشند و هیچ ضمانتی برای رسیدن به مقدار بهینه کلی وجود ندارد و اگر مقادیر حدس زده شده از مقدار بهینه کلی فاصله زیادی داشته باشند ممکن است در دام بهینه محلی قرار بگیریم.

یون و پادمانابهان [۱۱]، چندین روش برای برآورد پارامترها را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد مدل خطی ممکن است هنگامی که رابطه غیرخطی بین ذخیره و دبی وزنی وجود دارد، همانند بیشتر رودخانه‌های طبیعی، نامناسب باشد. روش پیشنهاد شده برای مدل غیرخطی مستلزم یک روند تکراری است و شامل رگرسیون حداقل مربعات می‌باشد.

پائینیچیل و جورجیو [۱۲]، اشکال مختلف رابطه دبی و ذخیره در روش ماسکینگام را برای بازه‌ای از رودخانه اوهایو مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با کمک چهار تکنیک (LLSR)، (H-J)، (ROS) و (MAR) به برآورد پارامترهای مدل‌های غیرخطی پرداختند. نتایج نشان داد کارایی این چهار تکنیک با توجه به مدل غیرخطی استفاده شده متفاوت می‌باشد.

موهان با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۸</sup> (GA) به برآورد پارامترهای مدل‌های غیرخطی پرداخت. نتایج او نشان داد که بهینه‌یابی از طریق این روش نسبت به روش‌های پیشین بهتر صورت می‌گیرد. این درحالی است که نیاز به پیش‌بینی حدس اولیه نزدیک به مقدار بهینه ضرورتی ندارد.

کیم و همکاران [۱۳]، با استفاده از روش جستجوی هارمونی<sup>۹</sup> (HS)، بهینه‌یابی پارامترهای X، K و m مدل غیرخطی را انجام دادند. نتایج نشان داد که HS بهتر از GA عمل نمود و همچنین نیازی به حدس اولیه نزدیک به مقادیر بهینه ندارد.

میرزا زاده و اکبری [۱۴]، با استفاده از ۷ روش مختلف شامل روش‌های حداقل مربعات ترسیمی، ضریب همبستگی، رگرسیون خطی، الگوریتم ژنتیک، رگرسیون دو قطعه‌ای و نرم‌افزار HEC-HMS به بهینه‌سازی پارامترهای مدل خطی ماسکینگام پرداختند.

رجبی و همکاران [۱۵]، با بررسی الگوریتم رقابت استعماری (ICA) و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO)، به ارزیابی کارایی آن در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام بر روی داده‌های سیلاب ویلسون و دو سیلاب رودخانه دوآب صمصامی پرداختند که در پردازش داده‌های سیلاب دوم رودخانه دوآب، الگوریتم ICA به ترتیب در دو تابع هدف مجموع مربعات انحرافات (SSQ) و قدرمطلق انحرافات (SAD) دبی مشاهداتی و محاسباتی را در مقایسه با الگوریتم GA ۹ درصد و ۰/۰۸ درصد و نسبت به PSO به ترتیب ۰/۱ و ۰/۱۶ درصد بهبود داده است.

از روش‌های هیدرولیکی که جهت روندیابی به کار گرفته می‌شوند، می‌توان روش موج سینماتیکی که خود به صورت ضمنی و صریح است، روش موج دینامیکی و روش ماسکینگام کونژ با ضرائب ثابت را نام برد.

در روش موج دینامیکی، معادلات سنت و نانت به صورت کامل مورد استفاده قرار می‌گیرند. معادلات جریان غیردائمی پیچیده هستند و در اکثر مواقع نمی‌توان آن‌ها را با استفاده از راه حل تحلیلی دقیقی حل نمود؛ بنابراین نیاز است که روش‌های عددی برای حل معادلات استفاده شوند.

در سال ۱۹۵۷، استوکر [۱۶] اولین روش عددی را برای حل معادلات جریان ناپایدار که همان روش صریح شبکه ثابت است، ارائه نمود. روش استوکر مثل هر روش صریح دیگر برای به نتیجه رسیدن وابسته به شروط و محدودیت‌هایی است که مسئله‌سازترین آن‌ها اجبار در به کار بردن گام‌های زمانی کوچک می‌باشد.

روش دیگر روش موج سینماتیکی است که در بسیاری از مدل‌های جریان غیردائمی برای روندیابی سیل مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش فرض می‌شود که اثرات ترم‌های اینرسی و گرادیان فشار در مقایسه با ترم شیب کف ناچیز است.

پونس و همکاران [۱۷]، نشان دادند که اگر شیب کف کم باشد، امواج با پیرو طولانی و برعکس اگر شیب کف زیاد باشد، امواج با پیرو کوتاه برای موج سینماتیکی مناسب‌تر می‌باشد. هر ماداکا بیان کرد که انتخاب گام‌های مکانی و زمانی اثرات قابل توجهی بر روی نتایج روش موج سینماتیکی دارد. بنابراین در هنگام استفاده از این روش می‌بایست انتخاب گام‌های مکانی و زمانی برای رسیدن به دقت مناسب به نحو شایسته‌ای صورت گیرد.

کونژ [۱۹ و ۱۸]، نشان داد معادله روش ماسکینگام به معادله انتقال پخشیدگی شباهت دارد و نتایج آن با روش موج سینماتیکی خطی مشابه است. او با منفصل کردن معادله موج سینماتیکی و تطبیق پخشیدگی عددی با پخشیدگی فیزیکی روش ماسکینگام را اصلاح نمود. به این ترتیب پارامترهای روش ماسکینگام-کونژ بر اساس مشخصات فیزیکی رودخانه محاسبه می‌گردند.

پونس و یوجویچ [۲۰]، روش ماسکینگام کونژ با پارامترهای متغیر دو، سه و چهار نقطه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش دو نقطه‌ای دقت مناسبی برای محاسبه دبی اوج و زمان رخ دادن آن از خود نشان نمی‌دهد. در مقابل، روش‌های سه و چهار

<sup>8</sup> Genetic Algorithm

<sup>9</sup> Harmony Search

نقطه‌ای مناسب می‌باشند. پونس پیشنهاد کرد برای جلوگیری از پراکندگی عددی، در روش ماسکینگام کونژ، تا حد ممکن عدد کورانت نزدیک به یک نگه داشته شود. به این ترتیب کاربرد روش ماسکینگام کونژ به روندیابی امواج دیفیوژن که علامتی از اثرات دینامیکی نظیر پس زدن آب در آن‌ها مشاهده نمی‌شود، محدود می‌گردد.

پریومال [۲۱] با استفاده از فرضیاتی، پارامترهای روش ماسکینگام را به طور مستقیم از معادلات سنت-ونانت استخراج نمود. این روش، به روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر، VPM، مشهور است و مزیت عمده آن امکان روندیابی همزمان عمق و دبی می‌باشد.

### روندیابی سیل

یکی از مهم‌ترین مسائل در تعیین روند سیل، بررسی جریان‌های موضعی<sup>۱۰</sup> است که در نقاطی بین ایستگاه‌های ورودی و خروجی به جریان اصلی می‌پیوندند. چنانچه این جریان‌های موضعی در نقاط نزدیک به بالا وارد کانال اصلی شود، معمولاً با جریان ورودی اصلی جمع شده و به عنوان جریان ورودی در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. در بیشتر اوقات در محل پیوستن جریان‌های ورودی موضعی به جریان اصلی ایستگاه اندازه‌گیری وجود ندارد در این صورت برای تعیین حجم کل جریان‌های ورودی فرعی حجم کل آب‌های خروجی و ورودی اندازه‌گیری شده در یک فاصله زمانی معین از هم کم می‌شود. این فاصله زمانی بازه‌ای است که در ابتدا و انتهای آن جریان ورودی و خروجی تقریباً ثابت و در پایین‌ترین مقدار ممکن می‌باشد؛ یعنی در فاصله زمانی که مقادیر ذخیره با مقادیر خروجی برابر است.

برخی از روابط تجربی برآورد هیدروگراف تخلیه سیل، به مشخصه‌های مورفولوژیکی حوضه آبریز وابسته هستند که در این صورت رابطه‌ای منطقی است که مستقیماً به ویژگی‌های کانال اصلی جریان و شدت بارش مربوط باشد [۲۲].

سیلاب‌ها از جمله جریان‌های غیردائمی متغیر تدریجی<sup>۱۱</sup> می‌باشند که با زمان و مکان متغیرند. در این نوع جریان‌ها انحناء پروفیل موج ملایم، تغییرات عمق با زمان تدریجی، شتاب قائم ذرات آب در مقایسه با کل شتاب ناچیز و اثر اصطکاک کناره‌ها قابل ملاحظه می‌باشد [۲۳]. تکنیک‌های مربوط به روندیابی سیل را می‌توان به دو کلاس روندیابی هیدرولوژیکی<sup>۱۲</sup> و روندیابی هیدرولیکی<sup>۱۳</sup> تقسیم کرد.

### معادلات حاکم بر روندیابی هیدرولوژیکی سیلاب

روندیابی هیدرولوژیکی جریان سیل بر اساس معادله پیوستگی جریان بنیان نهاده شده است که صورت انتگرالی آن بدین شکل است [۲۴]:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{t_1}^{t_2} I \cdot dt - \int_{t_1}^{t_2} O \cdot dt \quad (1)$$

که در آن  $I$  آهنگ جریان ورودی،  $O$  آهنگ جریان خروجی،  $t$  زمان و  $S$  به عنوان ذخیره برای یک بخش معین می‌باشد. در کارهای هیدرولوژیکی معمولاً میانگین جریان‌های لحظه‌های  $t_2, t_1$  را به عنوان متوسط در فاصله بین  $t_2, t_1$  نمایش داده و آن را پرید روندیابی<sup>۱۴</sup> می‌نامند. در جداول ۱ و ۲ رابطه و ضرایب مربوط به هر مدل آورده شده است:

جدول ۱. خلاصه‌ای از نحوه استفاده از رابطه ذخیره در هر یک از مدل‌های هیدرولوژیکی [۲۵]

| مدل              | X     | K | m | رابطه نهایی روندیابی سیلاب                      |
|------------------|-------|---|---|---|
| کانوکس           | 0     | k | 1 | $O_{j+1} = CI_j + (1 - C)O_j$ (۲)               |
| آت‌کین اصلاح شده | 0     | k | 1 | $O_{j+1} = C_m I_j + (1 - C_m)O_j$ (۳)          |
| ماسکینگام        | 0~0.5 | k | 1 | $O_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j$ (۴) |

<sup>10</sup> Treatment of local inflow

<sup>11</sup> Gradually Varied Unsteady Flow

<sup>12</sup> Hydrologic routing

<sup>13</sup> Hydraulic routing

<sup>14</sup> Routing period

جدول ۲. خلاصه‌ای از نحوه محاسبه ضرایب مربوط به هر یک از مدل‌های هیدرولوژیکی

| مدل              | ضرایب   |
|------------------|---|
| کانوکس           | $C = \frac{\sum [(O_{j+1} - O_j)(I_j - O_j)]}{\sum [(I_j - O_j)^2]} \quad (5)$  |
| آت‌کین اصلاح شده | $K = \frac{L}{mv} \quad Cm = \frac{2(\Delta T)}{2K + \Delta T} \quad (6)$   |
| ماسکینگام        | $C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{\Delta t + 2K(1-X)}, \quad C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{\Delta t + 2K(1-X)}, \quad C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{\Delta t + 2K(1-X)} \quad (7)$ |

معادلات حاکم بر روندیابی هیدرولیکی جریان سیلاب

مطالعات روندیابی هیدرولیکی سیل بر اساس روش‌هایی که به طور مستقیم یا غیر مستقیم از معادلات سنت‌ونانت<sup>۱۵</sup> حاصل شده‌اند، انجام می‌گردد. این معادلات شامل معادله پیوستگی<sup>۱۶</sup> و معادله ممتم (اندازه حرکت)<sup>۱۷</sup> می‌باشند [۲۶]. معادلات سنت و نانت مشتمل بر معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت بوده و همان معادلات حاکم بر جریان غیردائمی و غیریکنواخت یک بعدی در آبراه‌ها است. همانگونه که اشاره شد در روش‌های هیدرولیکی، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت، که همان معادلات سنت و نانت هستند، به طور همزمان به صورت تحلیلی یا عددی حل می‌شوند:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(\frac{\partial A}{\partial Q}\right) \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{\partial Q}{\partial A}\right) \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (8) \quad \text{معادله پیوستگی یک بعدی}$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A}\right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (9) \quad \text{فرم مانای معادله اندازه حرکت}$$

که در آن: Q دبی جریان، A میانگین سطح مقطع عرضی آبراهه، g شتاب گرانش، S<sub>0</sub> شیب بستر و S<sub>f</sub> شیب خط انرژی ناشی از مقاومت جریان است.

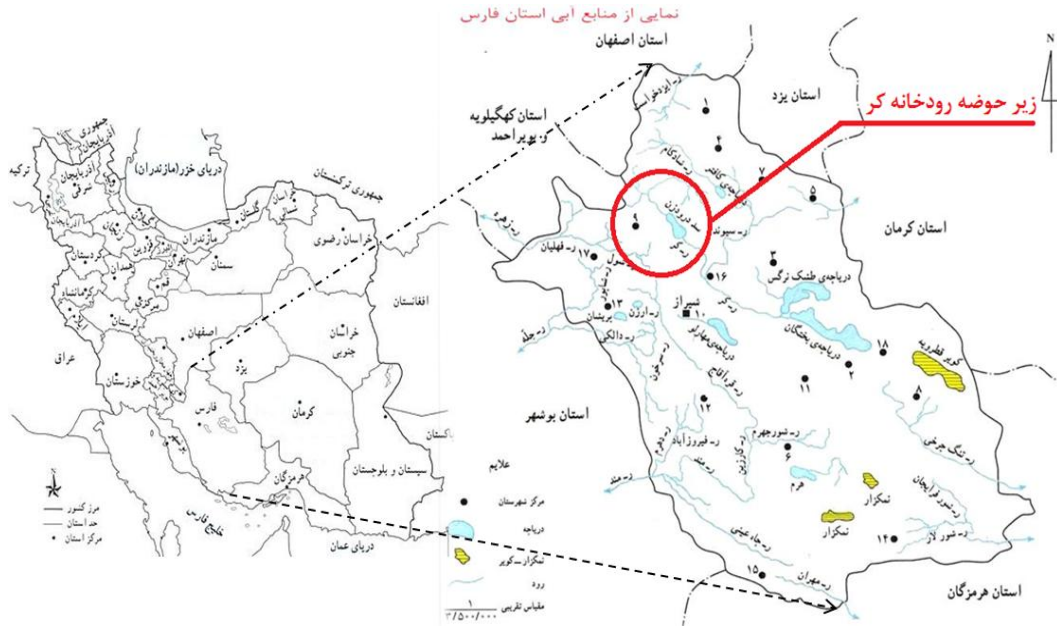
بررسی میدانی و ارزیابی مدل‌ها

حوضه آبریز دریاچه بختگان با مساحت ۲۸۲۳۴ کیلومترمربع، پرآب‌ترین حوضه آبریز استان فارس محسوب می‌شود. زیر حوضه آبریز کر به عنوان بخشی از حوضه آبریز بختگان در استان فارس و بین طول شرقی ۵۱،۴۵ تا ۵۴،۰۳ و عرض شمالی ۲۹،۲۲ تا ۳۱،۱۵ مطابق شکل ۱ قرار گرفته است. این رودخانه از الحاق سرشاخه‌های تنگ براق و شور و شیرین تشکیل شده و تا سد درودزن جریان طبیعی دارد. سپس بر اساس آب تنظیمی رها شده از سد یا سرریز شده از آن ادامه یافته و پس از پیوستن چندین شاخه دیگر از جمله شاخه‌های مهم و پرآب سیوند و مایین پس از طی ۲۰۰ کیلومتر نهایتاً به دریاچه بختگان می‌ریزد. برای مطالعه رودخانه کر، از سیلاب مشاهداتی ثبت شده در بالادست سد درودزن مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری چمریز تا خانیمن بهره برده شده است. این بازه در شمال غرب شیراز و در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری غرب شهرستان مرودشت در استان فارس واقع شده است. در این حوضه پوشش گیاهی طبیعی، مربوط به بقایای جنگل‌های پرتراکم زاگرس می‌باشد. در جداول ۳ و ۴ برخی از مشخصات فیزیکی حوضه گردآوری شده است.

<sup>15</sup> Saint-Venant Equations

<sup>16</sup> Continuity Equation

<sup>17</sup> Momentum Equation



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی زیرحوضه آبریز کر

جدول ۳. میانگین، ماکزیمم و مینیمم ارتفاع مشاهده شده در کل حوضه آبریز بختگان

| حوضه   | مساحت (کیلومتر مربع) | Min (m) | Max (m) | Mean (m) |
|--------|----------------------|---------|---------|----------|
| بختگان | ۲۸۲۳۴                | ۱۵۵۸    | ۲۷۶۷    | ۲۱۶۲     |

جدول ۴. مشخصات بازه‌ها در زیر حوضه مطالعه شده در حوضه کر

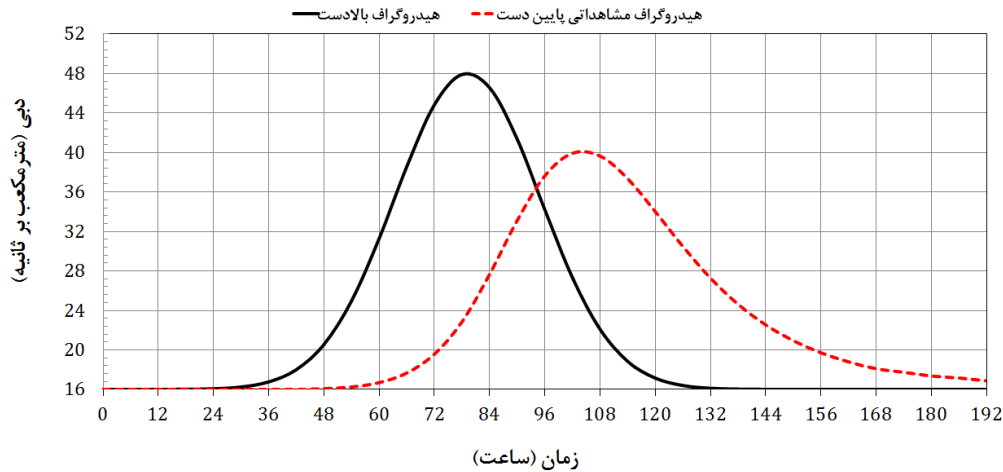
| بازه قرار گرفته شده در حوضه | شیب خالص (%) | شکل حوضه   | ضریب شکل (گراویلیوس) | ارتفاع حداقل در بازه مطالعاتی (m) | ارتفاع حداکثر در بازه مطالعاتی (m) | طول آبراهه در بازه مطالعاتی (km) |
|-----------------------------|--------------|------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| زیر حوضه کر                 | ۰/۰۳۸        | نیم گردشده | ۱/۱۸                 | ۰                                 | ۱۸۷۴                               | ۳۲/۲                             |

مهم‌ترین پارامتر هیدرولیکی جهت کالیبراسیون مدل ریاضی یک بعدی هیدرولیک رودخانه ضریب زبری رودخانه در بازه‌های مختلف می‌باشد. این ضریب تعریفی از مقاومت، زبری و هندسه جداره‌های رودخانه‌ها و مصالح آن را در مقابل مشخصات جریان و تغییرات آن بدست می‌دهد. مقدار مقاومت جریان با استفاده از روابط استریکلر، رانگاراچو و غیره به زبری بستر و دانه‌بندی مصالح مرتبط گردیده است. همچنین برای تعیین زبری رودخانه‌های با دانه‌بندی متفاوت می‌توان از جداولی که توسط محققین مختلف از جمله چاو ارائه شده است، استفاده نمود. مقدار ضریب مانینگ به تأثیر از شرایط هیدرولیک، دانه‌بندی مواد بستر، شکل مسیر و مورفولوژی رودخانه و همچنین عوارض و عوامل انسانی و طبیعی موجود در بستر رودخانه و سیلاب‌دشت در قسمت‌های مختلف رودخانه ممکن است متفاوت باشد.

جدول ۵. نتایج ضریب زبری رودخانه کر در سه بازه تعیین شده

| بازه | کیلومتر از (m) |       | ضریب زبری |           |
|------|----------------|-------|-----------|-----------|
|      | از             | تا    | اصلی      | سیلاب‌دشت |
| ۱    | ۰              | ۱۴۰۶۸ | ۰/۰۳۳     | ۰/۰۴۵     |
| ۲    | ۱۴۰۶۸          | ۳۰۵۶۸ | ۰/۰۳۳     | ۰/۰۰۵     |
| ۳    | ۳۰۵۶۸          | ۳۹۲۰۰ | ۰/۰۳۳     | ۰/۰۷۵     |

جریان سالانه این رودخانه دائمی بوده و لذا جریان پایه در رودخانه‌های این منطقه وجود دارد. دبی پایه این رودخانه از ۳/۲ مترمکعب بر ثانیه تا ۲۰ مترمکعب بر ثانیه در فصول مختلف سال ثبت شده است، اما به طور متوسط دبی ۱۶ مترمکعب بر ثانیه را می‌توان برای آن انتخاب نمود. در شکل ۲ هیدروگراف داده‌های مشاهداتی سیلاب مورد مطالعه ترسیم شده است:



شکل ۲. هیدروگراف سیلاب بالادست و پایین‌دست در بازه مطالعاتی رودخانه کر

جهت بررسی نتایج روش‌های مختلف روندیابی سیلاب در بازه مطالعاتی رودخانه کر، پس از استخراج اطلاعات هیدرولوژیکی و نیز اطلاعات هیدرولیکی جریان و بستر رودخانه (شامل: سابقه سیلاب‌های گذشته، اطلاعات مقاطع رودخانه، ضریب زبری، شرایط مرزی شامل هیدروگراف سیلاب بالادست و پایین‌دست، دبی پایه رودخانه و...) به انجام عملیات روندیابی سیل پرداخته شد. در این راستا از روش‌های هیدرولوژیکی کانوکس (آنالیز رگرسیون)، ماسکینگام (ترسیمی، حداقل مربعات، آنالیز رگرسیون و ضریب همبستگی)، آت-کین اصلاح‌شده (SCS) و همچنین با توجه به موجود بودن اطلاعات هیدرولیکی علاوه بر روش‌های هیدرولوژیکی مذکور از روش‌های عددی موج سینماتیکی صریح و روش موج دینامیکی ضمنی توسط نرم افزار MIKE 11 استفاده گردید.

### معیارهای ارزیابی مدل‌ها

یک مدل شبیه‌سازی شده مناسب مدلی است که از داده‌های وقایع گذشته استفاده کند. در هر پروژه شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، پارامترهای آماری کمینه و پایداری طولانی مدت، به عنوان پارامترهای اصلی شباهت بین مدل شبیه‌سازی شده و داده‌های ثبت شده در نظر گرفته می‌شود؛ اما امروزه از روش‌های آماری و توزیع‌های احتمال به عنوان روشی متمایز از مدل‌سازی بهره گرفته می‌شود. به منظور ارزیابی میزان انطباق نتایج مدل‌های روندیابی سیلاب با هم و همچنین با مقادیر مشاهداتی از چند معیار آماری استفاده شده است که به شرح زیر می‌باشد [۲۷]:

۱. معیار میزان پایین افتادگی (فروکش) دبی اوج (E):

$$\varepsilon (\%) = \left(1 - \frac{Q_{po}}{Q_{pi}}\right) \times 100 \quad (10)$$

دبی اوج هیدروگراف در پایین‌دست در حالی که جریان ورودی دیگری در میانه بازه وجود نداشته باشد، کمتر از دبی اوج هیدروگراف در بالادست می‌باشد که این حالت را پایین افتادگی یا فروکش دبی اوج می‌گویند. رابطه فوق درصد این فروکش سیل، E، را نشان می‌دهد. در این حالت میزان فروکش سیل برای هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه می‌گردند. در این رابطه  $Q_{po}$  دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی یا محاسباتی و  $Q_{pi}$  دبی اوج هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهد.

۲. معیار اختلاف بین دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده (DPO):

$$DPO = \left| Q_{po} - Q_{pc} \right| \quad (11)$$

در این رابطه  $Q_{po}$  دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی و  $Q_{pc}$  دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی را نشان می‌دهند. مقدار مطلوب برای معیار اختلاف بین دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده صفر است.

۳. معیار اختلاف بین زمان دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده (DPOT):

$$DPOT = \left| T_{po} - T_{pc} \right| / \Delta t \quad (12)$$

در این رابطه  $T_{po}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی،  $T_{pc}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی و  $\Delta t$  گام زمانی را نشان می‌دهند. مقدار مطلوب برای معیار اختلاف بین زمان دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده صفر است.

۴. معیار میزان تأخیر بین هیدروگراف‌های بالادست و پایین‌دست ( $\xi$ ):

$$\xi (\%) = \left( 1 - \frac{T_{pi}}{T_{po}} \right) \times 100 \quad (13)$$

زمان رسیدن به نقطه اوج هیدروگراف پایین‌دست دیرتر از زمان رسیدن به نقطه اوج هیدروگراف بالادست می‌باشد. رابطه فوق درصد این میزان تأخیر،  $\xi$  را نشان می‌دهد. در این حالت میزان تأخیر سیل برای هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه می‌گردند. در این رابطه  $T_{po}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی و  $T_{pi}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهند.

### نتایج پیش‌بینی تغییرات اندازه موج توسط مدل‌های هیدرولوژیکی

در این تحقیق روندیابی هیدرولوژیکی سیلاب در قالب شش الگوی مدل‌های هیدرولوژیکی زیر مورد بحث و بررسی قرار گرفتند:

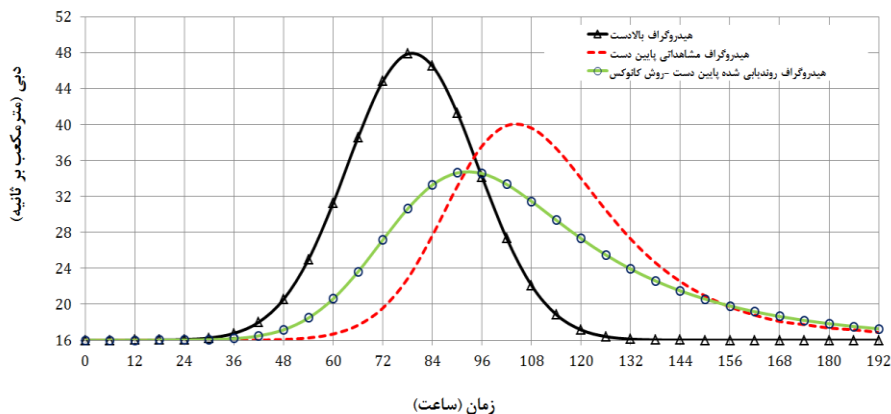
۱. کانوکس با برآورد پارامترها بر اساس تحلیل رگرسیون،
۲. ماسکینگام با برآورد پارامترها بر اساس روش ترسیمی،
۳. ماسکینگام با برآورد پارامترها بر اساس روش رگرسیون خطی،
۴. ماسکینگام با برآورد پارامترها بر اساس روش حداقل مربعات،
۵. روش ماسکینگام با برآورد پارامترها بر اساس ضریب همبستگی،
۶. آت-کین اصلاح شده بر اساس رابطه سرعت ایالات متحده (SCS).

پس از پردازش داده‌های مشاهداتی هیدروگراف بالادست، ضرایب مربوط به هر مدل با استفاده از کدنویسی در محیط Excel محاسبه گردید و رابطه نهایی مورد استفاده در هر یک از مدل‌ها با جایگذاری ضرایب مربوطه، مطابق جدول ۶ بدست آمد؛ سپس جهت پیش‌بینی هیدروگراف تغییرات موج جریان در پایین‌دست رودخانه گر، رابطه نهایی هر مدل در برنامه Excel بارگذاری گردید و خروجی این محاسبات در قالب هیدروگراف تغییرات موج جریان در نمودارهای شکل ۳ تا شکل ۸ ارائه گردیده است.

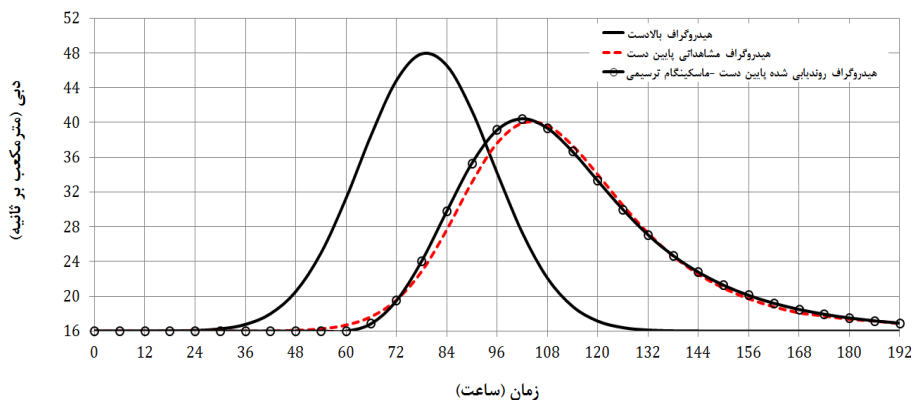
جدول ۶. مقایسه روابط بدست آمده از برخی مدل‌های هیدرولوژیکی روندیابی سیل

| ردیف | مدل هیدرولوژیکی                  | رابطه نهایی  |
|------|----------------------------------|--|
| ۱    | کانوکس بر اساس تحلیل رگرسیون خطی | $O_{j+1} = 0.16I_j + 0.832O_j$                     |
| ۲    | ماسکینگام به روش ترسیمی          | $O_{j+1} = -0.3473I_{j+1} + 0.5688I_j + 0.7785O_j$ |
| ۳    | ماسکینگام به روش رگرسیون خطی     | $O_{j+1} = -0.6881I_{j+1} + 1.0168I_j + 0.6712O_j$ |
| ۴    | ماسکینگام به روش حداقل مربعات    | $O_{j+1} = -0.3245I_{j+1} + 0.5422I_j + 0.7823O_j$ |
| ۵    | ماسکینگام بر اساس ضریب همبستگی   | $O_{j+1} = -0.3295I_{j+1} + 0.5479I_j + 0.7815O_j$ |
| ۶    | آت-کین اصلاح شده بر اساس (SCS)   | $O_{j+1} = 0.222I_j + 0.778O_j$                    |

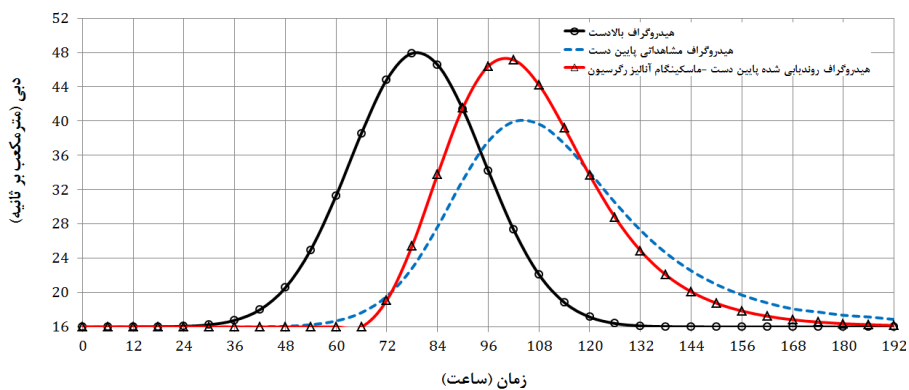




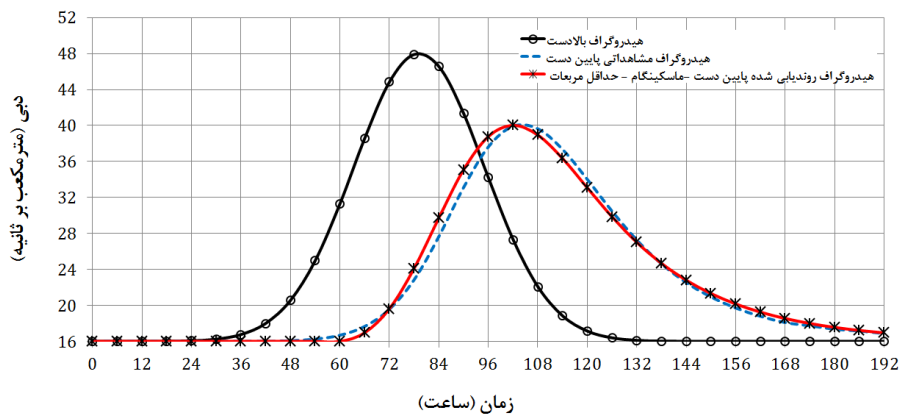
شکل ۳. هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش کانوکس در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین دست



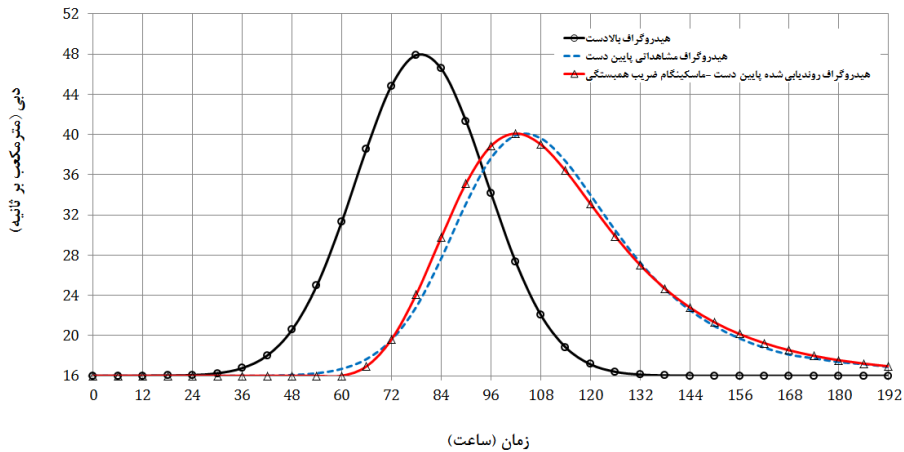
شکل ۴. هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش ماسکینگام ترسیمی در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین دست



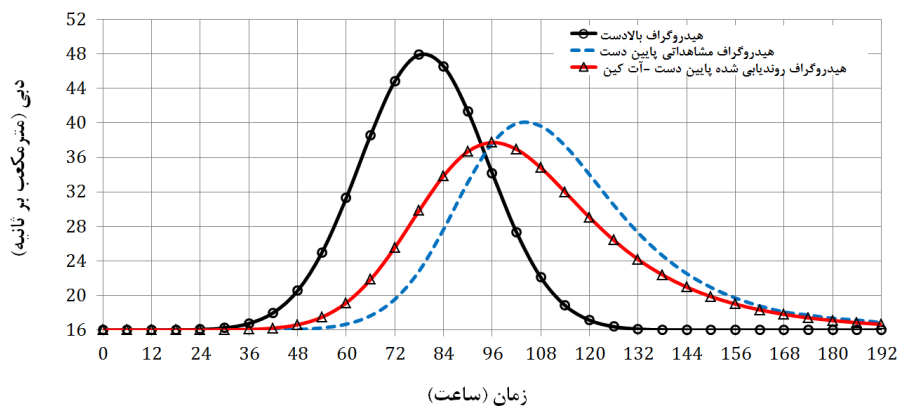
شکل ۵. هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش ماسکینگام رگرسیون خطی در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین دست



شکل ۶. هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش ماسکینگام - حداقل مربعات در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین دست



شکل ۷. هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش ماسکینگام ضریب همبستگی در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین دست



شکل ۸. هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش آت-کین در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین دست

### پیش بینی برآورد تغییرات مقادیر موج جریان به وسیله مدل های هیدرولیکی صریح و ضمنی

در ادامه مطالعات تغییرات سطح آب در حالت نرمال و جریان غیردائمی و غیر یکنواخت سیل، از مدل موج سینماتیکی صریح و مدل موج دینامیکی استفاده شد. مدل موج سینماتیکی با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده ای به حل معادله اندازه حرکت (مومنوم) می پردازد و با تلفیق معادله پیوستگی به مدلسازی جریان غیردائمی توسط حل معادله سنت-ونانت اقدام می نماید. در این راستا با استحصال اطلاعات فیزیکی و هیدرولیکی رودخانه کر و با تعریف اطلاعات پایه ای از جمله ضریب زبری و شیب متوسط بستر، دبی پایه، هیدروگراف سیل بالادست (شرایط مرزی بالادست)، متوسط عرض بستر، حداکثر دبی اوج بالادست، ضریب  $\beta$ ، تعریف گام مکانی و زمانی مناسب و با بهره گیری از کد نویسی در نرم افزار Excel، به حل عددی معادلات سنت-ونانت پرداخته شد.

جدول ۷-۱. نتایج برآورد پارامترها و ضرائب مدل موج سینماتیکی صریح در رودخانه کر

| مدل           | الگو | $\Delta x$ (m) | $\Delta t$ (sec) | $B_{ave}(m)$ | $S_0$   | $Q_{max}(m^3/sec)$ | $n$   |
|---------------|------|----------------|------------------|--------------|---------|--------------------|-------|
| موج سینماتیکی | صریح | 1500           | 1800             | 95           | 0.00038 | 47.906             | 0.040 |

جدول ۷-۲. نتایج برآورد پارامترها و ضرائب مدل موج سینماتیکی صریح در رودخانه کر

| مدل           | الگو | $\beta$ | $C_K$  | $\Delta t / \Delta x$ | A      | $\alpha \cdot \beta$ |
|---------------|------|---------|--------|-----------------------|--------|----------------------|
| موج سینماتیکی | صریح | 0.6     | 0.8234 | 0.8333                | 9.5145 | 5.7087               |

الگوی صریح مدل موج سینماتیکی به شکل زیر بیان می‌شود:

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[ \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha \beta Q_{i+1}^j \left( \frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]}{\left[ \frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \beta \left( \frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]} \quad (14)$$

باید توجه نمود که نکته لازم ولی نه کافی در مدل‌سازی مدل موج سینماتیکی ارضای عدد کورانت جهت پایداری و همگرایی جواب نهایی است، چرا که معادله سنت-ونانت از زمره معادلات هذلولوی است. در اینجا رابطه کورانت به صورت زیر محاسبه و شرط کورانت ارضا گردید:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta X_i}{C_K} \Rightarrow 1800 \leq \frac{1500}{0.8234} \Rightarrow 1800 \leq 1821 \quad O.K \quad \checkmark \quad (15)$$

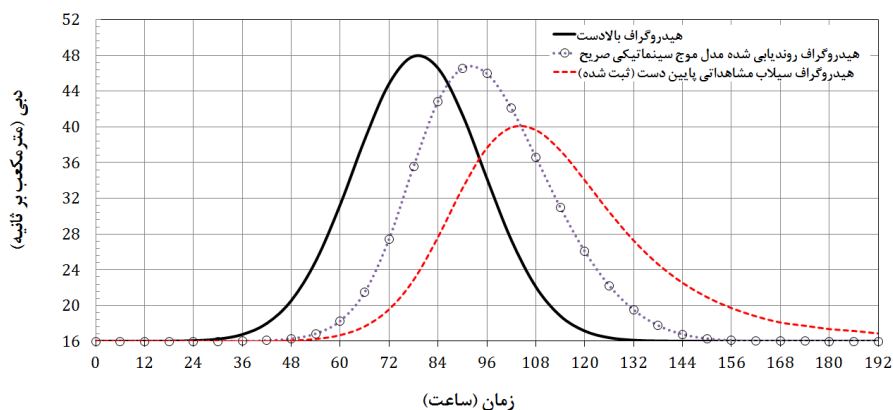
همچنین در روش‌های عددی صریح توصیه شده است که این نسبت تا حد امکان به ۱ نزدیک باشد که در اینجا این نسبت، به مقدار 0.9885 بدست آمد که نشان از نسبت مطلوب گام‌های مکانی و زمانی انتخابی در شبیه‌سازی عددی موج سینماتیکی است. در مدل موج دینامیکی تمام ترم‌های معادله سنت-ونانت شامل گرادیان فشار، شتاب انتقالی و محلی، ترم نیروی ثقل و ترم نیروی اصطکاکی لحاظ گردید. در مدل موج دینامیکی ابتدا معادلات حاکم بر جریان به روش اختلاف‌های محدود و به فرم منقطع نوشته شده و سپس معادلات گسسته شده بر روی یک شبکه نقاط در بازه‌های طولی و زمانی مختلف حل شدند.

جدول ۸. داده‌های پایه مدل‌سازی دینامیکی موج جریان\*

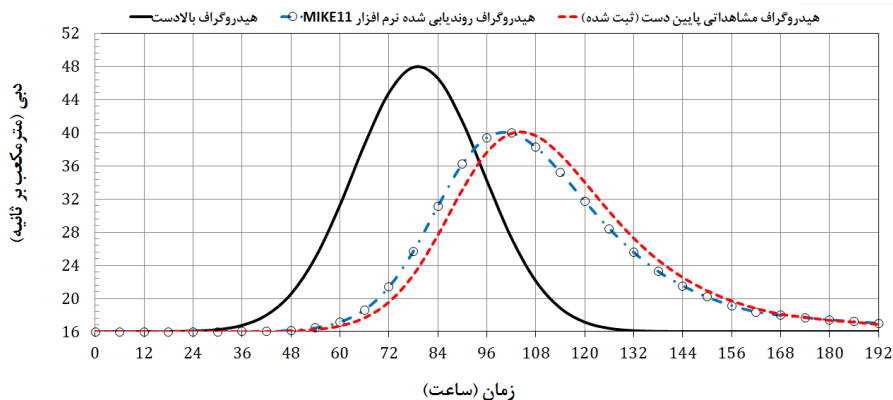
|                              |   |
|------------------------------|---|
| شرط مرزی بالادست             | هیدروگراف مشاهداتی سیل در بالادست رودخانه |
| شرط مرزی پایین‌دست           | منحنی دبی اشل                             |
| دبی پایه                     | ۱۶ مترمکعب بر ثانیه                       |
| طول بازه کانال اصلی جریان آب | ۳۹/۲ کیلومتر                              |
| شیب متوسط                    | ۰/۰۰۰۳۸                                   |
| ضریب وزنی $\theta$           | ۱   |

\* لازم به ذکر است که ضریب زبری بستر رودخانه در بازه مطالعاتی مطابق مشخصات جدول ۵ در روند مدل‌سازی موج دینامیکی تعریف گردید.

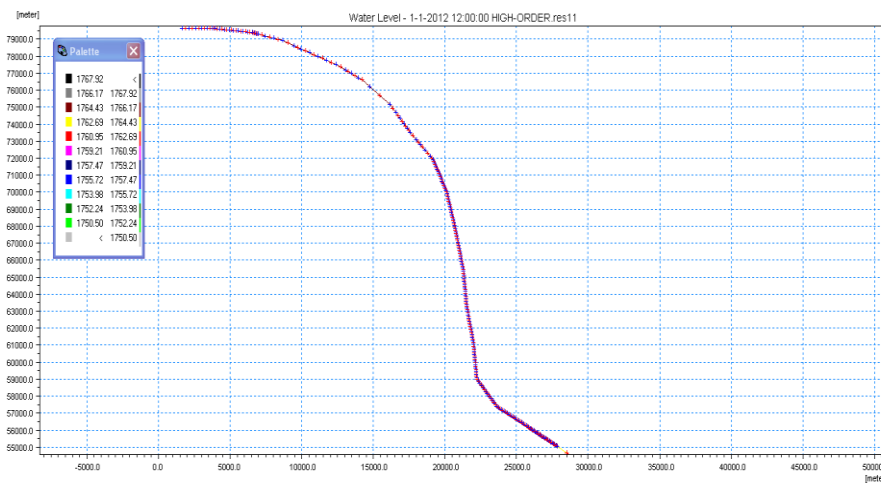
با حل عددی مدل موج سینماتیکی صریح و شبیه‌سازی اطلاعات فیزیکی و هیدرولیکی رودخانه کر در نرم‌افزار Mike11 [۲۸]، داده‌های خروجی مدل‌ها مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰ بدست آمد:



شکل ۹. هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش موج سینماتیکی صریح در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین‌دست



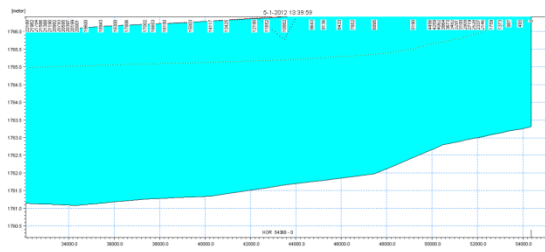
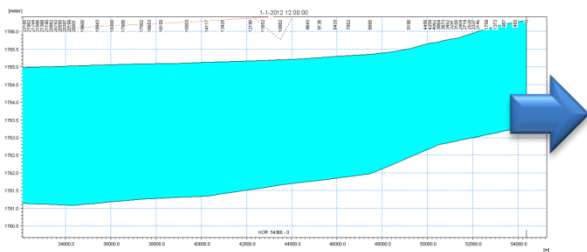
شکل ۱۰. هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش موج دینامیکی ضمنی در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین دست



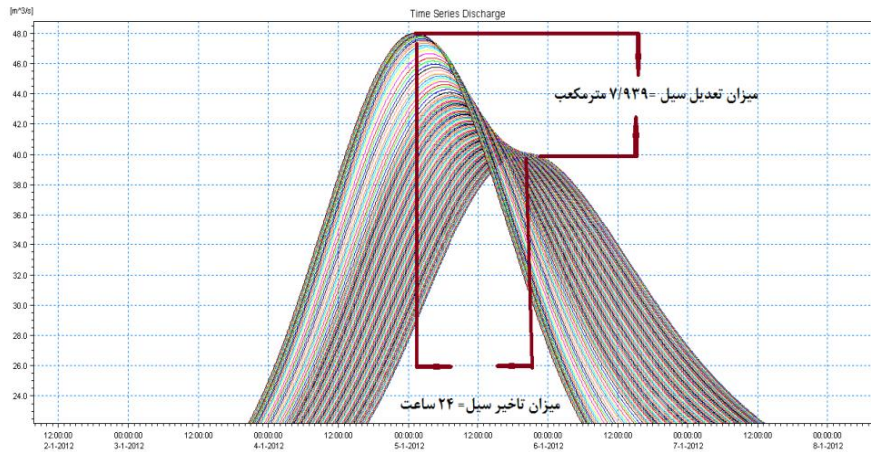
شکل ۱۱. پلان رودخانه کر در بازه مطالعاتی (نرم افزار Mike11)

قبل از عبور سیل

حین عبور سیل



شکل ۱۲. شبیه سازی تراز سطح آب در بازه مطالعاتی رودخانه کر (کیلومتر ۳۹/۲)



شکل ۱۳. شبیه سازی تغییرات دبی اوج سیلاب در طی عبور از بازه مطالعاتی رودخانه کر

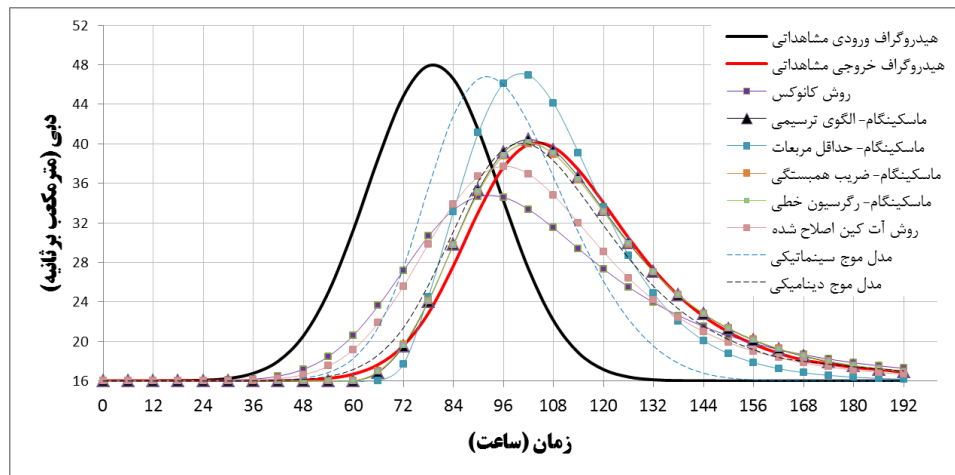
### بررسی و مقایسه داده های خروجی

در جدول ۹، اختلاف دبی اوج در هیدروگراف های بالادست و پایین دست برای مدل های ذکر شده محاسبه گردیده و با مقدار استهلاك دبی اوج در پایین دست در هیدروگراف مشاهده شده مورد قیاس واقع شد. بررسی نتایج حاکی از برتری مدل موج دینامیکی ضمنی، نسبت به سایر مدل ها است.

جدول ۹. مقایسه مقدار استهلاك دبی اوج هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی داده های پایین دست رودخانه کر (متر مکعب بر ثانیه)

| مدل       | ردیف | روش                        | استهلاك دبی اوج (تعدیل یافته) - هیدروگراف مشاهداتی پایین دست | استهلاك دبی اوج هیدروگراف محاسباتی پایین دست | مقدار اختلاف |
|-----------|------|----------------------------|--|--|--------------|
| هیدروژنیک | ۱    | کانوکس - تحلیل رگرسیون خطی | ۷/۹۸۳  | ۱۳/۲۶۴                                       | -۵/۲۸۱       |
|           | ۲    | ماسکینگام - الگوی ترسیمی   | ۷/۹۸۳  | ۷/۴۷۴۵                                       | ۰/۵۰۵۸       |
|           | ۳    | ماسکینگام - رگرسیون خطی    | ۷/۹۸۳  | ۰/۹۷۰۶                                       | ۷/۰۱۲۴       |
|           | ۴    | ماسکینگام - حداقل مربعات   | ۷/۹۷۹  | ۷/۸۹۲۱                                       | ۰/۰۸۶۹       |
|           | ۵    | ماسکینگام - ضریب همبستگی   | ۷/۹۷۹  | ۷/۸۰۱۳                                       | ۰/۱۷۷۷       |
|           | ۶    | آت-کین اصلاح شده (SCS)     | ۷/۹۷۹  | ۱۰/۱۷۷۲                                      | -۲/۱۹۸۲      |
| هیدرولیک  | ۱    | موج سینماتیکی صریح         | ۷/۹۸۳  | ۱/۳۴۹  | ۶/۶۳۴        |
|           | ۲    | موج دینامیکی ضمنی          | ۷/۹۸۳  | ۷/۹۳۹  | ۰/۰۴۴        |

در شکل ۱۴، هیدروگراف مدل های مورد استفاده و هیدروگراف های مشاهداتی بالادست و پایین دست ترسیم گشته اند. مدل موج دینامیکی با الگوی ضمنی در پیش بینی هیدروگراف تخلیه جریان سیل از حوضه آبریز رودخانه کر با مقدار اختلاف ۰/۰۴۴ متر مکعب بر ثانیه و پس از آن مدل ماسکینگام با برآورد پارامترها به روش حداقل مربعات با اختلاف دبی اوج ۰/۰۸۶۹ متر مکعب بر ثانیه نسبت به سایر مدل های استفاده شده برتر هستند.



شکل ۱۴. مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده تخلیه سیلاب

در روند مطالعات بر روی جریان غیر یکنواخت و غیر دائمی در بازه معینی از رودخانه کر، معیارهای ارزیابی  $DPO$ ،  $DPOT$  و  $\xi$  مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج آن به شرح جدول ۱۰ بدست آمد. خروجی معیارهای آماری ارزیابی حکایت از برتری مدل ماسکینگام نسبت به سایر مدل‌ها دارد. شایان ذکر است که تخمین پارامترهای ماسکینگام به روش‌های الگوی ترسیم، ضریب همبستگی و ... انجام شده، تأثیری بر برآورد زمان دبی اوج هیدروگراف پایین دست اعمال نکرده است چنانچه معیار ارزیابی آماری  $\xi$  بیانگر همین امر است.

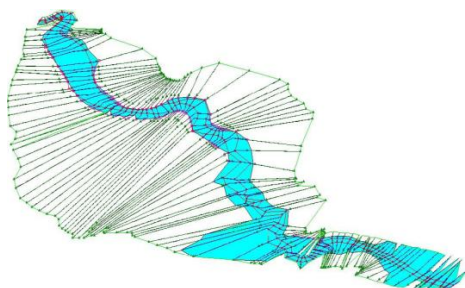
جدول ۱۰. نتایج معیارهای آماری ارزیابی در مدل‌ها و مقایسه با داده‌های مشاهداتی

| مدل         |                                | $\xi$ (%) | $\xi$ (%) | DPO    | DPOT  |
|-------------|--------------------------------|-----------|-----------|--------|-------|
| مشاهداتی    |                                | 16.662    | 23.529    | -----  | ----- |
| هیدرولوژیکی | روش کانوکس (رگرسیون خطی)       | 27.684    | 13.333    | 5.208  | 2     |
|             | روش ماسکینگام (ترسیم)          | 15.601    | 23.529    | 0.508  | 0     |
|             | روش ماسکینگام (رگرسیون خطی)    | 02.026    | 23.529    | 7.012  | 0     |
|             | روش ماسکینگام (حداقل مربعات)   | 16.474    | 23.529    | 0.087  | 0     |
|             | روش ماسکینگام (رگرسیون خطی)    | 16.285    | 23.529    | 0.178  | 0     |
|             | روش آت-کین (SCS)               | 21.244    | 18.750    | 2.198  | 1     |
| هیدرولیکی   | روش موج سینماتیکی صریح         | 02.816    | 13.333    | 06.634 | 2     |
|             | روش موج دینامیکی ضمنی (MIKE11) | 16.571    | 23.529    | 0.044  | 0     |

جدول ۱۱. نتایج دبی و زمان اوج مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی - رودخانه کر

| هیدروگراف سیلاب                  | $t_p$ (hr) | $Q_p$ (Cms) |
|----------------------------------|------------|-------------|
| هیدروگراف بالادست                | ۷۸         | ۴۷/۹۱       |
| هیدروگراف مشاهداتی پایین دست     | ۱۰۲        | ۳۹/۹۳       |
| کانوکس                           | ۹۰         | ۳۴/۶۴۷      |
| آت-کین اصلاح شده (تحلیل رگرسیون) | ۹۶         | ۳۷/۷۲۸      |
| ماسکینگام (ترسیم)                | ۱۰۲        | ۴۰/۴۳۵      |
| ماسکینگام (ضریب همبستگی)         | ۱۰۲        | ۴۰/۱۰۴      |
| ماسکینگام (حداقل مربعات)         | ۱۰۲        | ۴۰/۰۱۳      |
| ماسکینگام (رگرسیون خطی)          | ۱۰۲        | ۴۶/۹۳۹      |

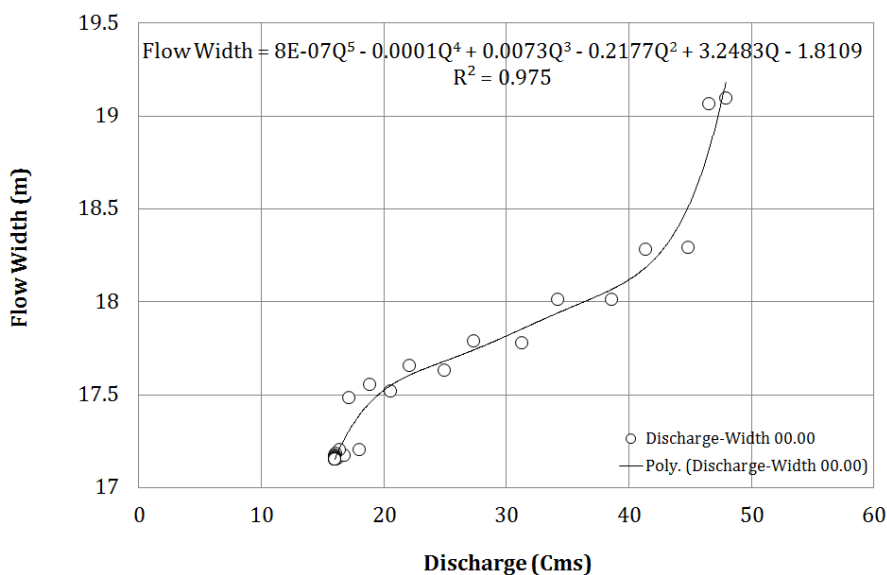
|                            |     |        |
|----------------------------|-----|--------|
| سینماتیکی (صریح)           | ۹۰  | ۴۶/۵۶  |
| موج دینامیکی ضمنی (Mike11) | ۱۰۲ | ۳۹/۹۷۱ |



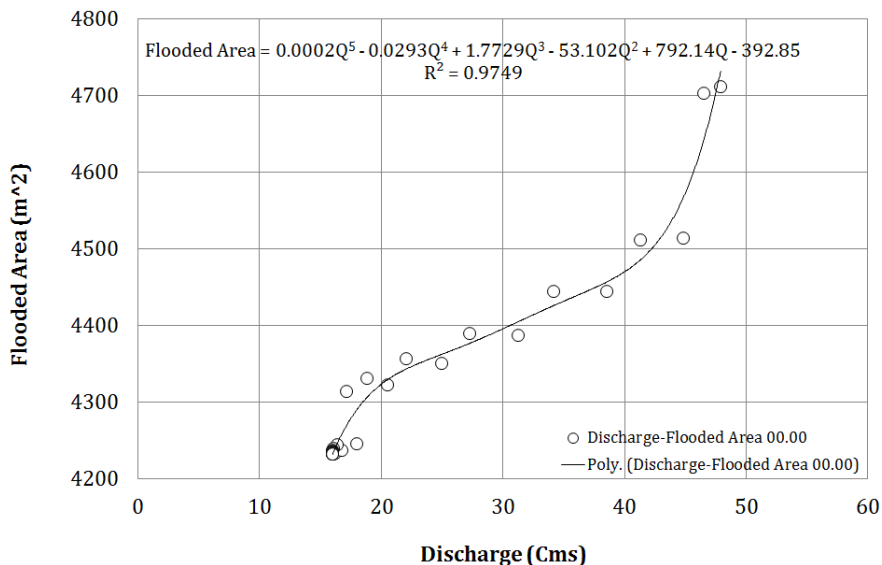
شکل ۱۵. عرض سطح آزاد شماتیک جریان سیل از ابتدا تا انتهای بازه مطالعاتی با توجه به مشخصات مقاطع عرضی در بازه مطالعاتی رودخانه کر.

در مطالعات، روابط رگرسیونی زیر به شرح اشکال ۱۶ تا ۱۹ استخراج گردید:

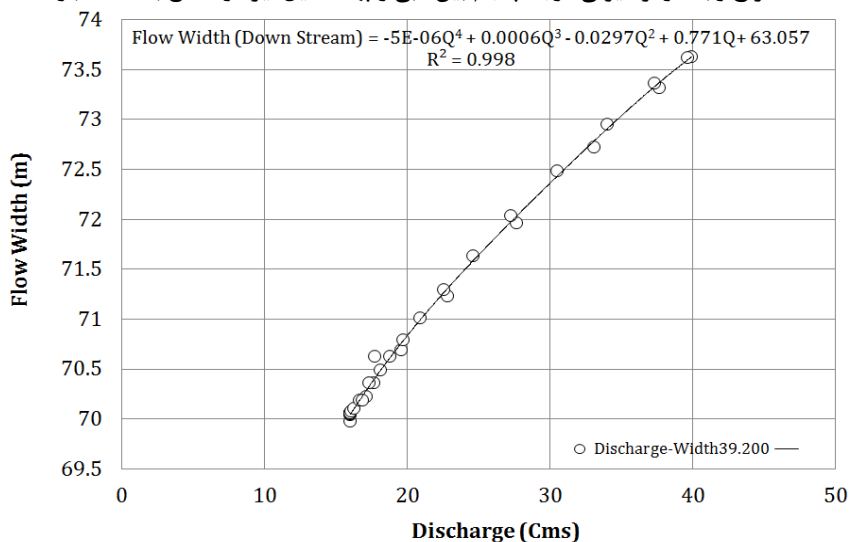
- ✚ استخراج رابطه رگرسیونی درجه پنجم بین دبی و عرض جریان سیل در مقطع بالادست بازه مطالعاتی
- ✚ استخراج رابطه رگرسیونی درجه پنجم بین دبی و پهنا سیل گیر در مقطع بالادست بازه مطالعاتی
- ✚ استخراج رابطه رگرسیونی درجه چهارم بین دبی و عرض جریان سیل در مقطع پایین دست بازه مطالعاتی
- ✚ استخراج رابطه رگرسیونی درجه سوم بین دبی و پهنا سیل گیر در مقطع پایین دست بازه مطالعاتی



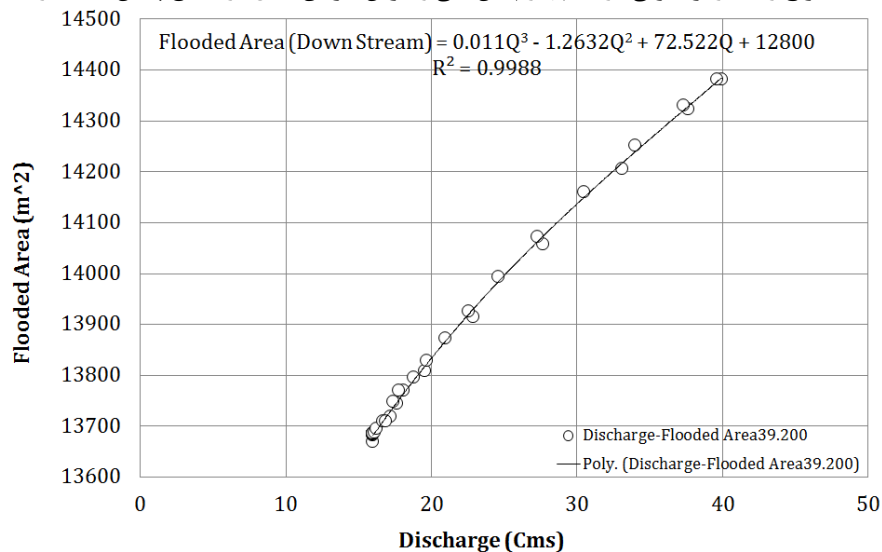
شکل ۱۶. استخراج رابطه رگرسیونی درجه پنجم بین دبی و عرض جریان سیل در مقطع بالادست بازه مطالعاتی



شکل ۱۷. استخراج رابطه رگرسیونی درجه پنجم بین دبی و پهنا سیل گیر در مقطع بالادست بازه مطالعاتی



شکل ۱۸. استخراج رابطه رگرسیونی درجه چهارم بین دبی و عرض جریان سیل در مقطع پایین دست بازه مطالعاتی



شکل ۱۹. استخراج رابطه رگرسیونی درجه سوم بین دبی و پهنا سیل گیر در مقطع پایین دست بازه مطالعاتی



## نتیجه گیری

نتایج روش‌های هیدرولوژیکی ماسکینگام در مقایسه با سایر روش‌های هیدرولوژیکی (تجربی) از دقت بالاتری برخوردار است. روش موج سینماتیکی، هیدروگراف تیزتر و همچنین دبی اوج بیشتری را نسبت به بقیه روش‌های هیدرولیکی از خود نشان می‌دهد. این موضوع نیز به علت نادیده گرفتن ترم‌های اینرسی و گرادیان فشاری در معادلات سنت‌وانانت قابل پیش‌بینی است. در مقایسه کلی میان روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی می‌توان گفت یکی از معایب روش‌های هیدرولیکی در مقایسه با روش‌های هیدرولوژیکی پیچیده‌تر بودن روند مدل کردن آن‌ها است. نتایج روش‌های مختلف در برآورد حداکثر عرض جریان سیل و حداکثر مساحت تحت پوشش سیل (منطقه سیل‌گیر) حاکی از آن است که مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام به کمک الگوی حداقل مربعات با دقت ۹۸/۹۱۱ درصد، در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی نرم‌افزار MIKE11 در بین روش‌های هیدرولوژیکی (تجربی) بهترین عملکرد را داشته و بیشترین نزدیکی را با نتایج عددی نرم‌افزار MIKE11 دارد؛ به عبارت دیگر این روش کمترین خطا را در مقایسه با مقادیر عددی خروجی نرم‌افزار داشته است. همچنین نتایج حاکی از برتری مشهود مدل موج دینامیکی نرم‌افزار MIKE 11 با دقت بالای ۹۹/۴۴۹ درصد است. این مدل عددی دقیق‌ترین شبیه‌سازی جریان سیلاب و پهنه‌بندی آن را انجام داده و دارای کمترین خطا در مقایسه با سایر روش‌های رندیبایی سیلاب است. با توجه به نتایج این پژوهش توصیه می‌شود چنانچه اطلاعات هیدرولیکی رودخانه موجود باشد از مدل موج دینامیکی نرم‌افزار MIKE11 بهره برده شود. از طرف دیگر می‌توان به این نتیجه مهم رسید که چنانچه اطلاعات هندسی، فیزیکی و هیدرولیکی مقطع در دسترس نبوده و تنها اطلاعات موجود، سابقه تاریخی سیلاب‌های گذشته باشد توصیه می‌شود از روش ماسکینگام با برآورد پارامترهای به ترتیب اولویت: ۱. حداقل مربعات یا ۲. ضریب همبستگی (با دقت ۹۷/۷۷۳ درصد) استفاده گردد تا بهترین نتیجه در مقایسه با مقادیر مشاهداتی و عددی حاصل شود.

## منابع و مراجع

- [۱] صفوی، ح.، ۱۳۹۰، هیدرولوژی مهندسی (چاپ سوم)، دانشگاه اصفهان، ۷۲۴ص.
- [۲] کوشکی، م.ص.، ۱۳۹۰، آب و سیاست ایران، هیئت علمی دانشگاه تهران و عضو پژوهشکده مطالعات راهبردی، تهران، ایران، <http://koushki.com>.
- [3] Masoero, A., Claps, P., Asselman, N. E. M., Mosselman, E. and Di Baldassarre, G., (2013), Reconstruction and analysis of the Po River inundation of 1951, *Hydrological Processes*, 27(9), 1341-1348.
- [۴] علیزاده، ا.، ۱۳۸۶، اصول هیدرولوژی کاربردی (چاپ بیست و سوم)، دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.
- [5] Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., Sherstyukov, B., (2014), Flood risk and climate change: global and regional perspectives, *Hydrological Sciences Journal*, 59.
- [6] Beven, K., Lamb, R., Leedal, D., Hunter, N., (2014), Communicating uncertainty in flood inundation mapping: a case study. *International Journal of River Basin Management*, 1-11.
- [7] McCarthy (1936) Methods of Flood-routing, Report on Survey For Flood Control, Connecticut River Valley, Vol. Ser. J, Appendix U. S. Ar. corps of Engrs.
- [8] Chow, V. T., (1988), Maidment, D. R., Mays, L. W., Applied Hydrology, McGraw-Hill International Editions: Singapore, p 572.
- [9] Gill, M. A., (1978), Flood routing by Muskingum method, *J. Hydrol.*, 36(3-4), pp. 353-363.
- [10] Tung, Y. K., (1985), River flood routing by nonlinear Muskingum method, *J. Hydraul. Eng.*, 111(12), pp.1447-1460.
- [11] Yoon, J. W., Padmanabhan, G., (1993), Parameter-estimation of linear and nonlinear Muskingum models, *J. Water Resour. Plann. Management*, 119(5), pp. 600-610.
- [12] Papamichail, D., Georgiou, P., (1994), Parameter Estimation of Linear and Nonlinear Muskingum Models for river flood routing, *Transactions on Ecology and the Environment*, vol 7, 1994 WIT Press, [www.Witpress.com](http://www.Witpress.com), ISSN, pp. 1743-3541.
- [13] Kim, J. H., Geem, Z. W., Kim, E. S., (2001), Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using harmony search, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 37(5), pp.1131-1138.
- [۱۴] میرزازاده، پ.، اکبری، غ.ح.، ۱۳۹۱، بهینه‌یابی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام، نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران.
- [۱۵] رجبی، د.، کرمی، ح.، حسینی، خ.، ۱۳۹۴، تخمین پارامترهای بهینه مدل روندیابی ماسکینگام غیر خطی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA)، نشریه علوم آب و خاک، سال نوزدهم، شماره هفتاد و سوم، پاییز ۱۳۹۴.
- [16] Stocker, J. J., (1957), *Water waves*, Inter science publishers , N.Y.
- [17] Ponce, V. M., (1989), *Engineering Hydrology, Principles and Practices*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [18] Cunge, J. A., (1969), on the subject of a flood propagation computational method (Muskingum method), *J. Hydraul. Resour*, pp. 205-230.
- [19] Cunge, J., Holly, F. M., Verwey, A., (1980), *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman, London.
- [20] Ponce, V. M., Yevjevich, V., (1978), Muskingum Cunge method with variable parameters, *J. Hydr. Div., ASCE*, 104(12), pp. 1663-1667.
- [21] Perumal, M., Ranga Raju, K. G., (1998), Variable-parameter stage hydrograph routing method, I: Theory, *J. Hydrol. Eng., ASCE*, 3(2), pp. 109-114.
- [22] Şen. Z, (2018), *Drought modeling, prediction and mitigation* (p. 281), Amsterdam, Netherlands: Elsevier, Springer Pub.
- [۲۳] عظیمیان، ا.، ۱۳۹۰، دینامیک سیالات محاسباتی (چاپ چهارم)، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۵۸۴ص.
- [۲۴] قدسیان، م.، ۱۳۷۷، مهار سیلاب و مهندسی زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۳۴۶ص.

- [۲۵] میرزازاده، پ.، ۱۳۹۲، بررسی روش‌های روندیابی سیلاب در مخازن و رودخانه‌ها، پایان نامه ارشد مهندسی عمران، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۲۸۲ص.
- [26] McCuen, R.H., (2009), Hydrologic Analysis and Design, Prentic-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p814.
- [27] Chaudhry, M. H., (2005), Open-Channel Flow, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, p523.
- [28] MIKE 11 a modeling system for Rivers and Channels, User's Manual, 11 4.10, 2004.