

## مقایسه مدل‌های هیدرولوژی روندیابی سیل در رودخانه‌ها

رضا براتی<sup>۱\*</sup> و غلامحسین اکبری<sup>۲</sup>

### چکیده

روندیابی سیلاب رویه‌ای است که برای بررسی تغییرات اوج، زمان تا اوج و زمان تداوم هیدروگراف سیلاب در طول کانال‌های باز استفاده می‌شود. این رویه بسته به شرایط و اطلاعات موجود از رودخانه می‌تواند با کمک رویه‌های هیدرولیکی و هیدرولوژی انجام پذیرد. در این تحقیق جنبه‌های مختلف مدل‌های هیدرولوژی شامل رویه‌های ماسکینگام خطی، ماسکینگام غیرخطی، کانوکس، آت‌کین اصلاح شده و مقادیر اجرایی از طریق چهار مثال سنگ محک و همچنین بررسی میدانی در رودخانه کارون با استفاده از هشت سیلاب مشاهداتی، بررسی شده است. همچنین حل عددی معادلات سنت‌ونانت با در نظر گرفتن تمامی ترم‌های معادله ممنتم به عنوان یک رویه هیدرولیکی برای مقایسه نتایج، مد نظر است. معیارهایی که برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شده‌اند، شامل معیارهای فروکش دبی اوج (E)، تأخیر زمانی دبی اوج (E<sub>t</sub>) و متوسط درصد خطای نسبی (E) هستند. نتایج نشان می‌دهد که عامل اصلی برای بررسی کارایی یک مدل هیدرولوژی معادله میان دبی و ذخیره است که به مشخصات هیدرولوژی و هیدرولیکی بازه رودخانه و مشخصات ذخیره موقت آن مرتبط است. همچنین می‌توان گفت که دو مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی به عنوان کاراترین مدل‌های هیدرولوژی برای استفاده در طراحی‌ها، در نبود داده‌های مورد نیاز برای مدل موج دینامیکی، پیشنهاد می‌شوند.

**واژه‌های کلیدی:** آت‌کین اصلاحی، تخمین پارامترها، کانوکس، ماسکینگام، موج دینامیکی.

ارجاع: براتی ر. و اکبری غ. ح. ۱۳۹۱. مقایسه مدل‌های هیدرولوژی روندیابی سیل در رودخانه‌ها. مجله پژوهش آب ایران. ۶(۱۱): ۱۰۵-۱۱۴.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

\* نویسنده مسئول: [r88Barati@gmail.com](mailto:r88Barati@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۷/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۱۰

## مقدمه

سیل از بلاای طبیعی است که می‌تواند باعث خسارات زیادی در مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی در مجاورت رودخانه‌ها شود. برای کاهش خسارات ناشی از سیلاب اقداماتی مثل احداث سیل بندها، تعیین حریم رودخانه‌ها و احداث انواع سرریز روی سدها قابل بررسی است. یکی از مراحل ضروری در انجام چنین اقداماتی پیش‌بینی چگونگی طغیان و فروکش سیل در مقاطع مختلف رودخانه با استفاده از روش‌های روندیابی سیلاب است.

روندیابی سیلاب با کمک رویه‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژی انجام می‌شود (آکان، ۲۰۰۶؛ براتی و همکاران، ۱۳۹۰). روندیابی هیدرولیکی بر اصول پیچیده هیدرولیکی و قوانین جریان‌های متغیر تدریجی در کانال‌های باز استوار است (چاو و همکاران، ۱۹۸۸). این روش‌ها نیازمند اطلاعات وسیع نظیر شیب، توپوگرافی، تغییرات مسیر رودخانه، زبری و مشخصات مقاطع عرضی و همچنین محاسبات طولانی هستند. در مقابل مدل‌های روندیابی هیدرولوژی از اصل پیوستگی جریان و معادله میان دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر استفاده می‌کنند. به این ترتیب چنین رویه‌های ساده بوده و در عین حال از دقت کافی در کارهای آبی برخوردار می‌باشند. با این وجود با توجه به ساده‌سازی‌های صورت گرفته نیازمند تخمین پارامترهای هیدرولوژی بر اساس آمار و اطلاعات هیدرولوژی ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری و همچنین استفاده از روش‌های مختلف تخمین پارامترها می‌باشند (براتی، a ۲۰۱۱). انتخاب رویه‌ی حل مسأله روندیابی سیلاب به طبیعت مسأله و اطلاعات موجود بستگی دارد. هنگامی که داده‌های کامل مورد نیاز روش موج دینامیکی در اختیار نیست و اطلاعات لازم برای تخمین پارامترهای هیدرولوژی در دسترس است، می‌توان از مدل‌های هیدرولوژی استفاده کرد.

در طول سه دهه گذشته محققین تحقیقات گسترده‌ای در ارتباط با کاربرد مدل‌های هیدرولوژی روندیابی سیلاب انجام داده‌اند. تانگ (۱۹۸۵) روندی کارآمد برای مدل ماسکینگام غیرخطی ارائه کرد. یون و پادمانابهان (۱۹۹۳) چندین روش مختلف برای تخمین پارامترهای مدل‌های ماسکینگام خطی و غیرخطی ارائه و با استفاده از داده‌های ویلسون (۱۹۷۴) با هم مقایسه کردند. روش‌های مختلف تخمین پارامترها و همچنین الگوریتم‌های مختلف بهینه‌یابی

برای تخمین پارامترهای هیدرولوژی به خصوص برای مدل ماسکینگام غیرخطی که پیچیده‌ترین روند را در میان مدل‌های روندیابی هیدرولوژی برای تخمین پارامترها دارد و همچنین داده‌های سیلاب‌های سنگ محک همانند سیلاب مذکور توسط موهان (۱۹۹۷)، ژلژنیس و سرانو (۲۰۰۰)، سامانی و شمسی‌پور (۲۰۰۴)، داس (۲۰۰۴) و (۲۰۰۷)، ژیم (۲۰۰۶ و ۲۰۱۱)، حسینی (۲۰۰۹)، چو و چانگ (۲۰۰۹)، کاراهان (۲۰۰۹)، چو (۲۰۱۰)، لو و زی (۲۰۱۰)، وطن‌خواه (۲۰۱۰)، براتی (b ۲۰۱۱)، سو و همکاران (۲۰۱۲) و کاراهان و همکاران (۲۰۱۲) انجام شده است. با این وجود اکثر پژوهش‌های فوق در ارتباط با رویه‌های مختلف تخمین پارامترهای مدل‌های خطی و غیرخطی ماسکینگام هستند و کمتر توجهی به سایر مدل‌های هیدرولوژی و همچنین بررسی و مقایسه این مدل‌ها در شرایط میدانی، شده است.

در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از چهار سیلاب سنگ محک که در حوضه‌های آبریز با مشخصات متفاوتی رخ داده‌اند، به بررسی قابلیت کاربرد مدل‌های هیدرولوژی کانوکس، آت‌کین اصلاحی، مقادیر اجرایی، ماسکینگام خطی و ماسکینگام غیرخطی پرداخته شده است. به این ترتیب مشخص خواهد شد که هرکدام از مدل‌های مذکور متناسب با ماهیتشان در چه مناطقی مناسب‌تر خواهند بود. در ادامه با کمک سیلاب‌های مشاهداتی رودخانه کارون مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های هیدرولوژی انجام شده است. در این مرحله برای مقایسه نتایج از روش موج دینامیکی به عنوان یک رویه‌ی هیدرولیکی و مدل توسعه داده شده توسط اکبری و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

## مدل‌های روندیابی هیدرولوژی

در مدل‌های هیدرولوژی روندیابی از معادله پیوستگی به عنوان یکی از معادلات حاکم استفاده می‌شود:

$$\frac{dS_j}{dt} \approx \frac{\Delta S_j}{\Delta t} = I_j - O_j \quad (1)$$

در این معادله  $I$ ،  $O$  و  $S$  به ترتیب دبی ورودی، دبی خروجی و حجم ذخیره، ژاندیس زمانی  $(j=1, 2, \dots, M)$ ،  $\Delta t$  گام زمانی و  $M$  تعداد داده‌های هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهند. با بازنویسی معادله فوق برای دو گام زمانی

که در آن، SSQ مجموع مربع باقی‌ماندها،  $O_j$  و  $\hat{O}_j$  به ترتیب مقادیر دبی مشاهده شده و محاسباتی در مرحله زمانی زام هستند.

مدل ماسکینگام غیرخطی

در مدل ماسکینگام غیرخطی از معادله زیر به عنوان معادله ذخیره استفاده شده است:

$$S = K[XI + (1-X)O]^m \quad (7)$$

این معادله در مقایسه با معادله ذخیره خطی دارای پارامتر اضافی  $m$  است و در نتیجه روند کالیبراسیون پیچیده‌تری دارد. در این تحقیق بهینه‌سازی پارامترهای  $K$ ،  $X$  و  $m$  با استفاده از الگوریتم نلدر-مید سیمپلکس (براتی، ۲۰۱۱) و تابع هدف معادله ۶ صورت گرفته است. با مرتب کردن مجدد معادله ۷ برحسب  $O_j$  رابطه زیر به دست می‌آید:

$$O_j = \frac{1}{(1-X)} \left( \frac{S_j}{K} \right)^{1/m} - \frac{X}{(1-X)} I_j \quad (8)$$

با ترکیب معادله ۸ و معادله پیوستگی رابطه ۹ حاصل می‌شود:

$$\frac{\Delta S_j}{\Delta t} = -\frac{1}{(1-X)} \left( \frac{S_j}{K} \right)^{\frac{1}{m}} + \frac{1}{(1-X)} I_j \quad (9)$$

برای روندیابی به کمک مدل ماسکینگام غیرخطی می‌توان مطابق روند زیر عمل کرد (تانگ، ۱۹۸۵؛ ژیم، ۲۰۰۶):

گام ۱: برآورد پارامترهای  $K$ ،  $X$  و  $m$  بر اساس تابع هدف و روش جستجوی مورد نظر.

گام ۲: محاسبه مقدار ذخیره با کمک معادله ۷، در این مرحله فرض می‌شود که دبی خروجی آغازین مشابه دبی ورودی آغازین است.

گام ۳: محاسبه نرخ تغییرات ذخیره متناسب با زمان با کمک معادله ۹.

گام ۴: محاسبه ذخیره در گام زمانی بعد به صورت  $S_{j+1} = S_j + \Delta S_j$ .

گام ۵: محاسبه دبی خروجی در گام زمانی بعد با کمک معادله ۸.

گام ۶: تکرار گام‌های ۲ تا ۵ تا هنگامی که تمامی داده‌های سیلاب شبیه‌سازی شود.

مدل کانوکس

در مدل کانوکس معادله ذخیره به صورت  $S=KO$  است:

$$O_{j+1} = CI_j + (1-C)O_j \quad (10)$$

این معادله زمانی برقرار خواهد بود که گام زمانی مساوی یا کوچکتر از یک پنجم زمان تا اوج هیدروگراف ورودی

متوالی مقادیر ذخیره تجمعی طبق معادله زیر به دست می‌آیند.

$$S_{j+1} = S_j + 0.5\Delta t [(I_j + I_{j+1}) - (O_j + O_{j+1})] \quad (2)$$

معادله دیگر در مدل‌های روندیابی هیدرولوژی معادله بین دبی و ذخیره است که این معادله اساس تفاوت میان مدل‌های مختلف می‌باشد و در ادامه برای هر یک از رویه‌ها ارایه خواهد شد. همچنین معمولاً معادله خاصی بین شکل عمومی مدل و سیستم فیزیکی مورد مطالعه از طریق پارامترهای مدل وجود دارد که این معادله، دقت مقادیر پارامترها را برای هماهنگی بین خروجی مدل و خروجی ثبت شده تعیین می‌کند.

مدل ماسکینگام خطی

در مدل ماسکینگام خطی ذخیره کل به دو قسمت ذخیره منشوری،  $(KO)$ ، و ذخیره گوه‌ای،  $KX(I-O)$ ، تقسیم می‌شود:

$$S = K[XI + (1-X)O] \quad (3)$$

که در آن،  $X$  فاکتور وزنی و  $K$  نیز ثابت زمانی ذخیره را نشان می‌دهند. مقدار  $X$  بین صفر تا ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود و درجه اهمیت  $I$  و  $O$  را در تعیین ظرفیت ذخیره رودخانه نشان می‌دهد. مقدار  $K$  نیز تقریباً برابر فاصله زمانی است که موج سیل از بازه رودخانه عبور می‌کند. طبق توصیه چاو و همکاران (۱۹۸۸)  $\Delta t$  نباید از  $2KX$  کمتر یا از  $K$  بیشتر باشد. این شرایط برای جلوگیری از منفی شدن ضرایب و ناپایداری عددی در نظر گرفته می‌شوند. با جایگذاری معادله ۳ در معادله ۱ برای دو گام زمانی متوالی و ساده کردن رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (4)$$

در این معادله  $C_3, C_2, C_1$  ضرایب مدل ماسکینگام هستند، که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{\Delta t + 2K(1-X)}, \quad C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{\Delta t + 2K(1-X)}, \quad (5)$$

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

از جمله روش‌های تعیین پارامترهای  $K$  و  $X$  می‌توان به روش‌های ترسیمی، حداقل مربعات، تحلیل رگرسیون و استفاده از روش‌های جستجو اشاره کرد (براتی و اکبری، ۱۳۸۹). در مطالعه حاضر با کمک روش جستجوی الگوریتم ژنتیک، تابع هدف معادله ۶ برای یافتن پارامترهای  $K$  و  $X$  بهینه شده است (لوو و زی، ۲۰۱۰).

$$\text{Minimize SSQ} = \sum_{j=1}^M [O_j - \hat{O}_j]^2 \quad (6)$$

جریان اجرایی به صورت  $D=XI+O(1-X)$  قابل محاسبه است (راهنمای مهندسی، ۱۹۹۴)، بنابراین:

$$O_j = D_j - X(I_j - D_j) / (1 - X) \quad (15)$$

با جایگزین کردن معادله ۱۵ در معادله پیوستگی و در نظر گرفتن  $R=S(1-X)+0.5D\Delta t$  و انجام عملیات جبری ساده رابطه زیر به دست می‌آید (راهنمای مهندسی، ۱۹۹۴):

$$\frac{R_j}{\Delta t} = \frac{R_{j-1}}{\Delta t} + \frac{1}{2}\Delta t(I_j + I_{j-1}) - D_{j-1} \quad (16)$$

که در آن  $R$  ذخیره اجرایی و به عنوان شاخصی از ذخیره حقیقی در نظر گرفته می‌شود. دبی خروجی در انتهای گام زمانی با استفاده از منحنی‌سنجی ذخیره اجرایی در مقابل دبی اجرایی قابل محاسبه است.

#### معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی و مقایسه نتایج رویه‌های مختلف با هم و همچنین با مقادیر مشاهداتی از سه معیار آماری شامل ۱- معیار متوسط درصد خطای نسبی ( $E$ )، ۲- معیار میزان تأخیر زمانی بین هیدروگراف‌های بالادست و پایین‌دست ( $\xi$ ) و ۳- معیار میزان پایین افتادگی دبی اوج ( $\varepsilon$ )، استفاده شده است. معیار نخست برای بررسی دقت مدل‌ها و دو معیار دیگر از عوامل مؤثر در مدیریت سیلاب هستند.

$$E(\%) = \frac{1}{M} \times \sum_{j=1}^M \frac{|O_j - \hat{O}_j|}{O_j} \times 100 \quad (17)$$

$$\xi(\%) = \left(1 - \frac{T_{pi}}{T_{po}}\right) \times 100 \quad (18)$$

$$\varepsilon(\%) = \left(1 - \frac{Q_{po}}{Q_{pi}}\right) \times 100 \quad (19)$$

که در آن،  $Q_{po}$  و  $Q_{pi}$  به ترتیب دبی اوج هیدروگراف‌های خروجی و ورودی،  $T_{pi}$  و  $T_{po}$  به ترتیب زمان تا اوج هیدروگراف‌های خروجی و ورودی و  $M$  تعداد داده‌ها را نشان می‌دهند.

#### نتایج و بحث

شکل هیدروگراف سیلاب اثرات مهمی روی تخمین پارامترهای مدل‌های هیدرولوژی دارد. تغییرات تیزی و شکل هیدروگراف تحت تأثیر عواملی همچون مشخصات حوضه آبریز مثل مساحت حوضه، شکل حوضه، جنس خاک و پوشش گیاهی رودخانه قرار دارد. برای مثال زمان تداوم هیدروگراف در حوضه‌های بزرگ‌تر طولانی‌تر از حوضه‌های کوچکتر است. از طرف دیگر مشخصات سیلاب و بارش نظیر شدت بارش و زمان تداوم بارش در شکل‌گیری

باشد. در این معادله  $C$  ضریب کانوکس را نشان می‌دهد. چندین روش برای محاسبه این ضریب وجود دارد. یکی از دقیق‌ترین راه‌ها برای محاسبه ضریب کانوکس مقایسه بین هیدروگراف‌های ورودی و خروجی است (مهدوی، ۱۳۸۶). در این روش، معادله کانوکس را می‌توان مشابه معادله خطی که از مبدا مختصات می‌گذرد، در نظر گرفت. بنابراین:

$$C = \frac{\sum[(O_{j+1} - O_j)(I_j - O_j)]}{\sum[(I_j - O_j)^2]} \quad (11)$$

#### مدل آت‌کین اصلاحی

در مدل آت‌کین اصلاحی برای محاسبه دبی در گام زمانی مجهول از معادله ۱۲ استفاده می‌شود.

$$O_{j+1} = C_m I_j + (1 - C_m) O_j \quad (12)$$

که در آن،  $C_m$  ضریب آت‌کین است و به صورت معادله ۱۳ محاسبه می‌شود (مهدوی، ۱۳۸۶).

$$C_m = \frac{2\Delta t}{(2K + \Delta t)} \quad (13)$$

در محاسبه  $C_m$ ، پارامتر  $K$  را می‌توان مطابق مدل ماسکینگام و یا با استفاده از روش‌های جایگزین محاسبه کرد. هیدروگراف به دست آمده از این مدل زمانی صحیح است که زمان پیمایش جنبشی، معادله ۱۴، کوچکتر از فاصله زمانی بین زمان تا اوج هیدروگراف‌های خروجی و ورودی باشد. چنانچه این شرط برقرار نباشد، برای تصحیح هیدروگراف خروجی باید آن را به اندازه قدر مطلق اختلاف این دو زمان در جهت مثبت محور زمان انتقال داد.

$$\Delta t_p = \left(\frac{Q_{po}}{x}\right)^{\frac{1}{m}} \frac{L}{Q_{po}} \left[ \frac{(Q_{pi}/Q_{po})^{\frac{1}{m}} - 1}{(Q_{pi}/Q_{po}) - 1} \right] / 3600 \quad (14)$$

که در آن،  $\Delta t_p$  زمان پیمایش جنبشی،  $Q_{po}$  و  $Q_{pi}$  به ترتیب دبی اوج هیدروگراف خروجی و ورودی بازه مورد نظر،  $L$  طول بازه و  $x$  و  $m$  ضرایب معادله دبی و سطح مقطع را نشان می‌دهند.

#### مدل مقادیر اجرایی

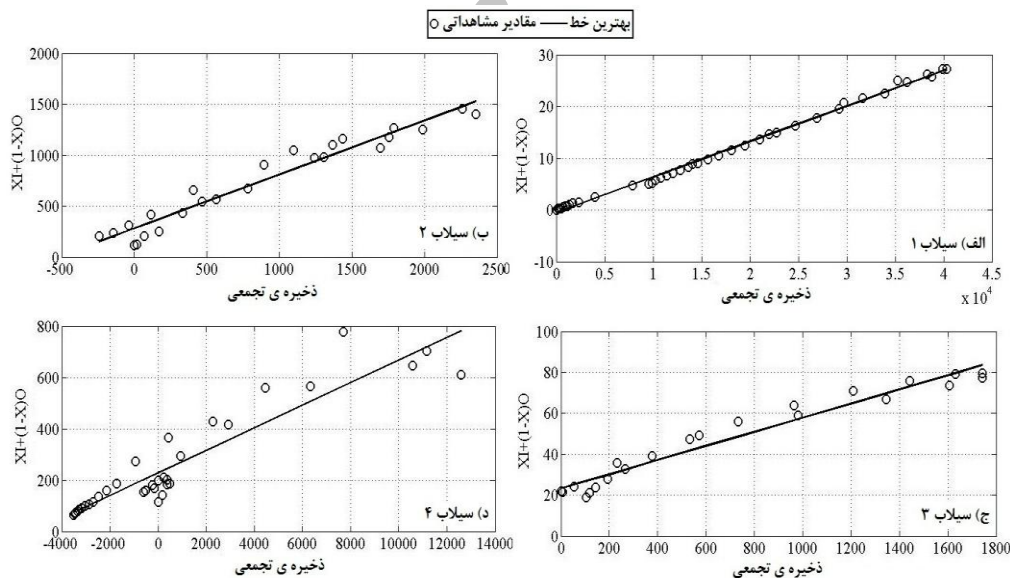
در روندیابی سیل به کمک مدل مقادیر اجرایی از شدت جریان اجرایی،  $D$ ، استفاده می‌شود و آن عبارت است از شدت جریان دائمی فرضی که می‌تواند ذخیره‌ای معادل ذخیره گوه‌ای علاوه بر ذخیره منشوری ایجاد کند. ذخیره گوه‌ای،  $WS$ ، به دو صورت قابل محاسبه است:

۱- با استفاده از مدل ماسکینگام  $WS=KX(I-O)$  و ۲- با استفاده از دبی اجرایی  $WS=K(D-O)$ ، بنابراین شدت

## مثال‌های سنگ محک

در این بخش چهار سیلاب که شرایط مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی دارند، برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژی بررسی می‌شوند. این سیلاب‌ها هر کدام پیش از این توسط محققین مختلف به عنوان یک سیلاب سنگ محک برای مقایسه مدل‌های مختلف استفاده شده‌اند (سیلاب ۱ توسط براتی و اکبری، ۱۳۸۹؛ سیلاب ۲ توسط کاراهان، ۲۰۰۹؛ سیلاب ۳ توسط ژیم، ۲۰۱۱؛ سو و همکاران، ۲۰۱۲؛ سیلاب ۴ توسط کاراهان و همکاران، ۲۰۱۲). هر یک از این سیلاب‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی از لحاظ قابلیت ذخیره بازه رودخانه دارند که این موضوع در شکل ۱ با مقایسه معادله میان ذخیره تجمعی (معادله ۱) در برابر دبی وزن‌دار،  $[XI+(1-X)O]$ ، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای سیلاب ۱ معادله مذکور تقریباً به صورت خطی است و برای بقیه سیلاب‌ها با افزایش شماره سیلاب، خطی بودن معادله دبی و ذخیره کاهش می‌یابد. در این میان سیلاب شماره ۲ به صورت چند پیکه و سایر سیلاب‌ها به صورت تک پیکه هستند.

هیدروگراف نقش اساسی ایفا می‌کنند. برای مثال در سیلاب‌های برق‌آسا که شدت بارش زیادی دارند، شکل هیدروگراف تیزتر است. به این ترتیب تغییرات شرایط محیطی اثرات قابل توجهی روی شکل هیدروگراف و در نتیجه پارامترهای هیدرولوژی منطقه دارد. در حالت کلی برای طراحی در یک رودخانه مفروض داده‌های سیلاب‌های موجود در بالادست و پایین‌دست رودخانه قابل استفاده برای تخمین پارامترهای هیدرولوژی هستند، مشروط بر آنکه مشخصات رودخانه مانند هندسه و جنبه‌های هیدرولیکی که اثرات مهمی روی مقدار حجم ذخیره موقت در کانال دارند، تغییر محسوسی در طول مدت زمان رخ دادن سیلاب‌های مورد استفاده، ایجاد نکرده باشند. این تغییرات می‌تواند در اثر تغییر شرایط محیطی یا فعالیت‌های بشر روی دهند. با این حال اگر تعداد سیلاب‌های مورد استفاده در مرحله واسنجی پارامترها افزایش پیدا کنند، نتایج حاصل شده در مرحله صحت‌سنجی تطابق بالاتری با شرایط واقعی خواهند داشت. این موضوع تحت تأثیر داده‌های در دسترس و همچنین صحت داده‌های موجود قرار دارد.



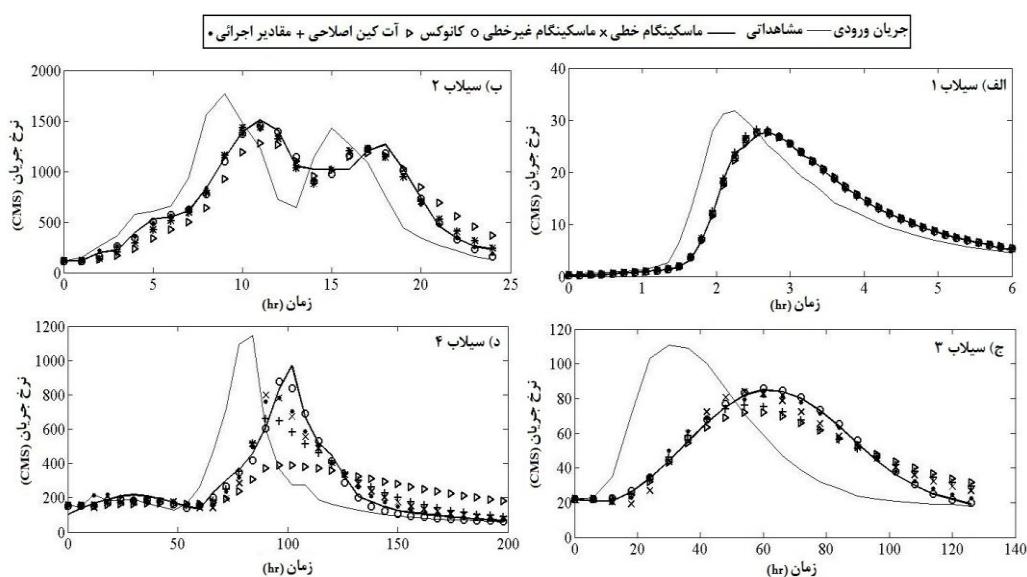
شکل ۱- مقایسه معادله دبی وزن‌دار،  $[XI+(1-X)O]$ ، و ذخیره تجمعی برای چهار سیلاب سنگ محک

(مثلاً مدل کانوکس) در مرحله کالیبراسیون نیز قابل قبول نیست. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش حالت غیرخطی بودن معادله مذکور قابلیت کاربرد مدل‌های کانوکس، آتکین و ماسکینگام خطی نسبت به مدل ماسکینگام غیرخطی به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به آماره‌های جدول ۱ مشاهده می‌شود که در همه موارد

نتایج شبیه‌سازی مدل‌های مختلف هیدرولوژی برای چهار سیلاب در شکل ۲ و مقادیر آماره‌های ارزیابی در جدول ۱ ارایه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود با افزایش حالت غیرخطی معادله دبی و ذخیره اختلاف میان مدل‌های مختلف با مقادیر مشاهداتی افزایش می‌یابد به نحوی که برای سیلاب شماره ۴ نتایج برخی مدل‌ها

به صورت خطی یا تقریباً خطی باشد، مدل‌های ماسکینگام خطی، آت‌کین و کانوکس و در صورت غیرخطی بودن آن (مثلاً شکل ۱-د) مدل‌های ماسکینگام غیرخطی و مقادیر اجرایی قابلیت کاربرد مؤثرتری خواهند داشت. شایان ذکر است با توجه به نتایج سیلاب شماره ۲، که یک سیلاب چند پیکه است، مشاهده می‌شود که تک یا چند پیکه بودن سیلاب عامل اصلی در کارایی یک مدل هیدرولوژی نیست بلکه آنچه اهمیت اساسی دارد معادله میان دبی و ذخیره است که به مشخصات هیدرولوژی و هیدرولیکی بازه رودخانه و مشخصات ذخیره موقت آن بر می‌گردد.

درصد خطا برای مدل ماسکینگام غیرخطی کمتر از بقیه مدل‌ها است. همچنین از لحاظ معیار زمان تأخیر در اکثر موارد تطابق با مقادیر مشاهداتی، مشاهده می‌شود هر چند در ارتباط با مدل ماسکینگام غیرخطی و مقادیر اجرایی تطابق برای همه سیلاب‌ها ملموس‌تر است. در ارتباط با معیار فروکش به جز سیلاب ۱ که معادله تقریباً خطی دارد و مدل ماسکینگام خطی بهترین تطابق را با مقادیر مشاهداتی از خود نشان می‌دهد، در بقیه موارد مدل غیرخطی ماسکینگام بالاترین هماهنگی را با مقادیر مشاهداتی دارد. در نتیجه اگر معادله میان دبی و ذخیره (مثلاً شکل ۱-الف) برای سیلاب‌های منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی برای چهار سیلاب سنگ محک

جدول ۱- معیارهای ارزیابی برای چهار سیلاب سنگ محک

سیلاب	معیار ارزیابی	ماسکینگام خطی	ماسکینگام غیرخطی	کانوکس	آت‌کین	مقادیر اجرایی	مشاهداتی
سیلاب ۱	E (%)	۷/۳۲	۷/۰۱	۷/۱۸	۷/۵۷	۷/۶۰	-
	ξ (%)	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷
	ε (%)	۱۳/۰۷	۱۲/۶۶	۱۳/۶۹	۱۱/۲۸	۱۲/۱۹	۱۳/۰۱
سیلاب ۲	E (%)	۹/۵۵	۶/۸۹	۲۲/۵۸	۹/۵۵	۱۱/۳۲	-
	ξ (%)	۱۸/۱۸	۱۸/۱۸	۱۸/۱۸	۱۸/۱۸	۱۸/۱۸	۱۸/۱۸
	ε (%)	۱۸/۴۸	۱۷/۷۸	۲۷/۸۳	۱۸/۴۸	۱۹/۹۶	۱۴/۶۵
سیلاب ۳	E (%)	۱۱/۹۵	۲/۵۳	۱۶/۳۷	۱۳/۴۴	۶/۱۶	-
	ξ (%)	۴۴/۴۴	۵۰/۰۰	۴۴/۴۴	۴۴/۴۴	۵۰/۰۰	۵۰/۰۰
	ε (%)	۲۴/۴۰	۲۲/۶۱	۳۵/۳۷	۳۱/۴۷	۲۶/۶۲	۲۳/۴۲
سیلاب ۴	E (%)	۲۰/۲۱	۱۱/۰۰	۶۳/۴۱	۲۶/۱۳	۱۴/۴۵	-
	ξ (%)	۶/۶۷	۱۲/۵۰	۱۲/۵۰	۶/۶۷	۱۲/۵۰	۱۷/۶۵
	ε (%)	۳۰/۳۵	۲۳/۲۲	۶۶/۰۱	۴۲/۳۹	۳۱/۷۳	۱۵/۳۷

## کاربرد میدانی

در این بخش نتایج حاصل شده در بخش مثال‌های سنگ محک در شرایط میدانی و با استفاده از داده‌های سیلاب‌های رودخانه کارون حد فاصل ایستگاه‌های ملاتانی تا اهواز به طول تقریبی ۶۴ کیلومتر به عنوان یک مطالعه موردی و در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، بررسی شده‌اند. تحقیق در بازه ملاتانی تا اهواز رودخانه کارون برای تعیین دبی ایمن در جهت تعیین حریم ایمن برای ساخت و ساز و جاده‌سازی در حاشیه رودخانه و همچنین بررسی بالا آمدن بستر در اثر انباشت رسوبات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ایستگاه‌های اهواز و ملاتانی به ترتیب در سال‌های ۱۲۷۴ و ۱۳۴۵ به منظور تعیین دبی رودخانه کارون احداث شده‌اند. در این محدوده حد فاصل ایستگاه ملاتانی تا ویس به فاصله تقریبی ۱۵ کیلومتر رودخانه به صورت مستقیم است ولی از ایستگاه ویس تا اهواز بازه رودخانه مئاندرهای متعددی دارد. شایان ذکر است که عوامل متعددی نظیر اتصالات و انشعابات، تغییرات سطح مقطع عرضی، تغییر عوامل مقاوم در برابر جریان به صورت تابعی از عمق و موقعیت مکانی در طول رودخانه، وجود دشتهای سیلابی و مئاندرها اثرات قابل توجهی در انتشار موج سیلاب در طول رودخانه‌های طبیعی دارند. در بازه مورد مطالعه عامل آخر یعنی وجود مئاندرهای متعدد یکی از مهمترین عوامل مؤثر می‌باشد. شایان ذکر است که انتخاب سیلاب‌ها به نحوی صورت گرفته است که مطابق نکات ارائه شده در ابتدای بخش نتایج و بحث، سیلاب‌ها تقریباً مشخصات هیدرولوژی مشابهی داشته باشند. پنج سیلاب در مرحله واسنجی و سه سیلاب در مرحله صحت‌سنجی استفاده

شده‌اند (جدول‌های ۲ و ۳).

با توجه به نتایج جدول ۲ برای پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی و بررسی معادله دبی وزن‌دار،  $[XI+(1-X)O]$ ، و ذخیره تجمعی که به دلیل محدودیت صفحات مقاله برای این سیلاب‌ها نمایش داده نشده است، مشاهده می‌شود که معادله مذکور برای سیلاب‌های مورد مطالعه تقریباً به صورت خطی است بنابراین انتظار می‌رود حداقل در مرحله واسنجی نتایج کلیه مدل‌های هیدرولوژی در سطح قابل قبولی باشد (تقریباً مشابه سیلاب ۲ در بخش سیلاب‌های سنگ محک). این موضوع با توجه به نتایج جدول ۳ در بخش واسنجی قابل مشاهده است. همچنین با توجه به بخش بررسی آماری در جدول ۲ مشاهده می‌شود که سیلاب‌های مورد استفاده به شکلی صحیح انتخاب شده‌اند چرا که میزان تغییرات پارامترها اندک است. با توجه به نتایج جدول ۳ در بخش صحت‌سنجی و همچنین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود که سه مدل ماسکینگام خطی، ماسکینگام غیرخطی و مقادیر اجرایی از لحاظ پیش‌بینی نتایج در سطح تقریباً برابری قرار دارند، در حالی که دو مدل دیگر در سطح دقت پایین‌تر و تقریباً برابری قرار دارند. این موضوع نشان دهنده این است که در صورت انتخاب صحیح سیلاب‌ها در مرحله کالیبراسیون مدل‌های خطی و غیرخطی ماسکینگام به همراه مدل مقادیر اجرایی نتایج مناسب‌تری در مرحله صحت‌سنجی از خود نشان می‌دهند. با این حال با توجه به کم بودن حالت غیرخطی معادله دبی و ذخیره در ارتباط با سیلاب‌های مورد مطالعه، در اینجا استفاده از مدل ماسکینگام غیرخطی ضرورتی ندارد.

جدول ۲- نتایج کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژی سیلاب‌های بازه مورد مطالعه

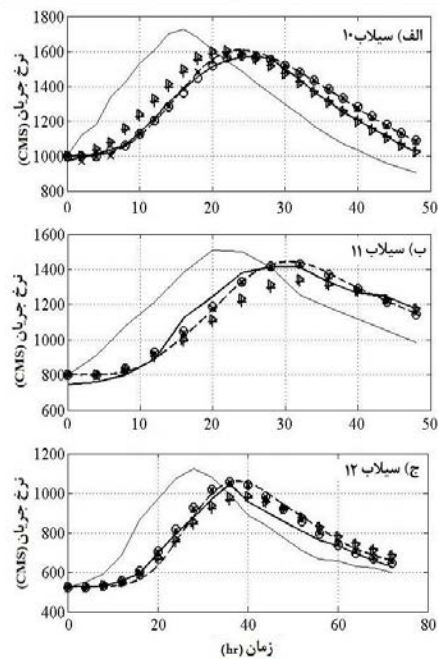
سیلاب	ماسکینگام خطی		ماسکینگام غیرخطی		کانوکس	آت‌کین
	X	K	m	X	C	$C_m$
سیلاب ۵	۰/۴۰	۱۱/۳۱	۱/۰۲	۰/۳۷	۰/۲۸	۰/۳۳
سیلاب ۶	۰/۲۰	۹/۰۴	۱/۰۳	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۲۰
سیلاب ۷	۰/۲۹	۸/۸۳	۱/۰۲	۰/۲۸	۰/۳۸	۰/۳۷
سیلاب ۸	۰/۳۶	۱۰/۴۶	۱/۰۳	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۲
سیلاب ۹	۰/۲۵	۹/۴۴	۱/۰۱	۰/۱۸	۰/۳۰	۰/۳۵
بررسی آماری						
کمینه	۰/۲۰	۸/۸۳	۱/۰۱	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۲۰
بیشینه	۰/۴۰	۱۱/۳۱	۱/۰۳	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۳۷
میانگین	۰/۳۰	۹/۸۲	۱/۰۲	۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۳۱
انحراف معیار	۰/۰۷۲	۰/۹۳۴	۰/۰۰۷	۰/۰۷۶	۰/۰۵۴	۰/۰۶۰
ضریب تغییرات	۰/۲۴۱	۰/۰۹۵	۰/۰۰۷	۰/۲۸۴	۰/۱۷۸	۰/۱۹۰

جدول ۳- نتایج آماره‌های ارزیابی سیلاب‌های بازه مورد مطالعه در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

مرحله	سیلاب	معیار ارزیابی	ماسکینگام خطی	ماسکینگام غیرخطی	کانوکس	آت‌کین	مقادیر اجرایی	موج دینامیکی	مشاهداتی
واسنجی	سیلاب ۵	E (%)	۳/۵۹	۳/۲۰	۵/۲۴	۴/۶۹	۳/۵۶	-	-
		ξ (%)	۴۳/۳۳	۴۳/۳۳	۴۳/۳۳	۴۳/۳۳	۴۵/۲۷	-	۴۱/۴۶
	سیلاب ۶	E (%)	۲/۴۳	۲/۴۱	۲/۷۹	۲/۸۳	۲/۵۶	-	-
		ξ (%)	۳۳/۳۳	۳۳/۳۳	۳۳/۳۳	۳۳/۳۳	۲۷/۲۷	-	۳۶/۴۶
	سیلاب ۷	E (%)	۳/۲۶	۳/۱۱	۳/۹۰	۳/۷۸	۳/۱۵	-	-
		ξ (%)	۳۴/۱۱	۳۴/۱۱	۳۴/۱۱	۳۴/۱۱	۳۴/۱۱	-	۳۴/۸۳
	سیلاب ۸	E (%)	۳/۵۵	۳/۳۱	۳/۵۲	۳/۸۷	۳/۳۶	-	-
		ξ (%)	۲۴/۴۴	۲۴/۴۴	۲۴/۴۴	۳۰/۰۰	۲۴/۴۴	-	۲۴/۴۴
	سیلاب ۹	E (%)	۳/۴۷	۳/۵۳	۴/۰۵	۴/۱۲	۳/۶۴	-	-
		ξ (%)	۳۸/۵۰	۲۸/۵۷	۳۸/۵۰	۳۸/۵۰	۲۸/۵۷	-	۳۸/۵۰
سیلاب ۱۰	E (%)	۲/۹۰	۲/۷۳	۳/۳۵	۲/۹۶	۲/۷۴	۲/۸۵	-	-
	ξ (%)	۳۳/۳۳	۳۳/۳۳	۲۷/۲۷	۲۷/۲۷	۳۳/۳۳	۳۲/۶۳	۳۸/۴۶	
صحت‌سنجی	سیلاب ۱۱	E (%)	۳/۴۷	۳/۷۶	۵/۰۷	۵/۴۸	۳/۵۰	۳/۶۱	-
		ξ (%)	۳۷/۵۰	۳۷/۵۰	۳۷/۵۰	۳۷/۵۰	۳۷/۵۰	۳۴/۴۳	۳۷/۵۰
سیلاب ۱۲	E (%)	۳/۳۴	۳/۳۱	۴/۴۲	۵/۰۰	۳/۳۳	۳/۹۸	-	-
	ξ (%)	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	۳۰/۰۰	۳۰/۰۰	۲۲/۲۲	۲۵/۸۳	۲۲/۲۲	
		ε (%)	۶/۳۱	۵/۹۶	۱۲/۵۰	۱۳/۴۵	۶/۷۲	۵/۷۹	۷/۱۱

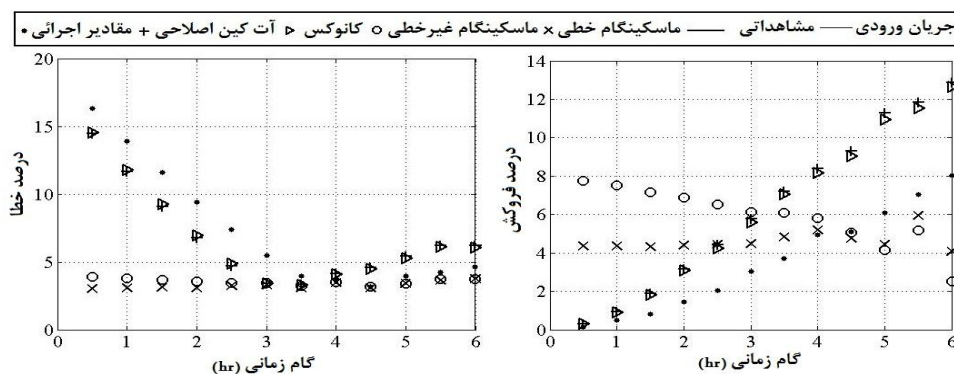
در شکل ۴ اثرات تغییر گام زمانی روی معیارهای درصد خطا و فروکش سیلاب برای سیلاب ۱۱ نشان داده شده است. تحلیل حساسیت گام زمانی به این صورت انجام شده است که مدل‌های مختلف هیدرولوژی برای مقادیر مختلف گام زمانی اجرا شده‌اند، چرا که در مرحله صحت‌سنجی لزومی ندارد که سیلاب مورد نظر دارای گام زمانی مشابه گام زمانی سیلاب نخستین (سیلاب مرحله واسنجی) باشد. بنابراین هر چه مدل‌ها حساسیت کمتری نسبت به تغییر گام زمانی داشته باشند از لحاظ کاربردی مناسبتر خواهند بود. با توجه به اینکه سیلاب‌های ورودی در گام‌های زمانی خاصی برداشت شده‌اند، برای محاسبه سیلاب ورودی برای یک گام زمانی به خصوص از درون‌یابی درجه دوم استفاده شده است. بر این اساس نتایج مدل‌های کانوکس، آت‌کین اصلاحی و مقادیر اجرایی به طور مستقیم به گام زمانی وابسته هستند. این موضوع می‌تواند یک عامل مؤثر در برتری مدل‌های خطی و غیرخطی ماسکینگام نسبت به دیگر مدل‌ها باشد.

جریان ورودی - مشاهداتی - ماسکینگام خطی x ماسکینگام غیرخطی o کانوکس Δ آت‌کین اصلاحی + مقادیر اجرایی • موج دینامیکی



شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی سیلاب‌ها در مرحله صحت‌سنجی





شکل ۴- نتایج تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولوژی نسبت به تغییر گام زمانی، برای سیلاب ۱۱

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از پنج مدل هیدرولوژی، مسأله روندیابی سیل بررسی شده است. در ابتدا از چهار سیلاب سنگ محک برای ارزیابی مدل‌های مختلف تحت شرایط مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی و در مرحله بعدی از هشت سیلاب رودخانه کارون برای بررسی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شده است. برای ارزیابی و مقایسه نتایج روش‌های مختلف با هم و با مقادیر مشاهداتی، از سه معیار آماری معتبر استفاده شده است. به علاوه نتایج با روش موج دینامیکی که از حل کامل معادله‌های سنت‌ونانت حاصل شده است، مقایسه شده‌اند. نتایج بخش اول نشان می‌دهد که معیار مناسب برای بررسی کارایی مدل‌های هیدرولوژی معادله میان ذخیره تجمعی در برابر دبی وزن‌دار است، به طوری که اگر این معادله به صورت خطی یا تقریباً خطی باشد کلیه مدل‌ها به نحو مناسبی عمل می‌کنند، در حالی که برای سیلاب‌های که این معادله به صورت غیرخطی، خصوصاً با درجه بالا می‌باشد، مدل‌هایی همچون کانوکس و آت‌کین اصلاحی نتایج تقریباً نامناسبی حتی در مرحله کالیبراسیون از خود نشان می‌دهند. اگرچه در اکثر موارد مدل ماسکینگام غیرخطی بالاترین کارایی را دارد ولی استفاده از این روش با توجه به هزینه محاسباتی بالا برای کالیبراسیون فقط در مواردی که معادله دبی و ذخیره غیرخطی است قابل توصیه می‌باشد. از طرف دیگر بررسی میدانی مدل‌های هیدرولوژی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی و با در نظر گرفتن بقای جرم و همچنین حساسیت مدل‌های به تغییرات گام زمانی و پارامترهای هیدرولوژی نشان می‌دهد که مدل‌های ماسکینگام خطی و غیرخطی از کارایی بالاتری برای استفاده در مرحله صحت‌سنجی برخوردار هستند. همچنین نتایج مدل‌های هیدرولوژی به خصوص

دو مدل مذکور با مدل موج دینامیکی تطابق بالایی دارد. بنابراین استفاده از دو مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی در شرایط نبود داده‌های مورد نیاز برای مدل موج دینامیکی راهکار مناسبی خواهد بود.

### منابع

- براتی ر. و اکبری غ. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی جریان سیلاب در رودخانه با مدل ماسکینگام. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه فردوسی مشهد. ۸-۱.
- براتی ر. اکبری غ. حسین‌نژاد ع. ر. و آرامی فدافن م. ۱۳۹۰. تحلیل حساسیت پارامترهای روندیابی سیلاب با مدل موج دینامیکی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰۳(۸):۲۰۸-۲۰۳.
- مهدوی م. ۱۳۸۶. هیدرولوژی کاربردی. جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران، ۲۶۴ ص.
- Akan A.O. 2006. Open Channel Hydraulics. Chapter 8: Introduction to Unsteady Open-Channel Flow. Elsevier. 364 pp.
- Akbari G. H. and Barati R. 2012. Comprehensive analysis of flooding in unmanaged catchments, Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Water Management. 165 (4):229-238.
- Akbari G. H. Nezhad A. H. and Barati R. 2012. Developing a model for analysis of uncertainties in prediction of floods. Journal of Advanced Research. 3:73-79.
- Barati R. 2011 a. Discussion of 'parameter estimation for nonlinear Muskingum model based on Immune Clonal algorithm. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE. 16(4):391-393.
- Barati R. 2011 b. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using Nelder-Mead Simplex algorithm. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE. 16 (11):946-954.
- Chow V. T. Maidment D. R. and Mays L. W. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill. 572 pp.
- Chu H. J. and Chang L. C. 2009. Applying

20. Karahan H. 2009. Predicting Muskingum flood routing parameters using spreadsheets. *Journal 238 of Computer Applications in Engineering Education*. 28:1-7.
21. Karahan H. Gurarslan G. and Geem Z. W. 2012. Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Flood Routing Model Using a Hybrid Harmony Search Algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, posted ahead of print.
22. Luo J. and Xie J. 2010. Parameter estimation for nonlinear Muskingum model based on immune clonal selection algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*. 15(10):844-851.
23. Mohan S. 1997. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 123(2):137-142.
24. Samani H. M. V. and Shamsipour G. A. 2004. Hydrologic flood routing in branched river systems via nonlinear optimization. *Journal of Hydraulic Research*. 42(1):55-59.
25. Tung Y. K. 1985. River flood routing by nonlinear Muskingum method. *Journal of Hydraulic Engineering*. 111(12):1447-1460.
26. Vatankhah A. 2010. Discussion of Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model by H. J. Chu and L. C. Chang. *Journal of Hydrologic Engineering*. 15(11):949-952.
27. Wilson E. M. 1974. *Engineering hydrology*. MacMillan, Hampshire, U.K. 182 pp.
28. Xu D. Qiu L. and Chen S. 2012. Estimation of nonlinear Muskingum model parameters using differential evolution. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*. 17(2):348-353.
29. Yoon J. W. and Padmanabhan G. 1993. Parameter-estimation of linear and nonlinear Muskingum models. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*: 119(5):600-610.
11. Chu H. J. 2010. Closure to Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model by H. J. Chu and L. C. Chang. *Journal of Hydrologic Engineering*. 15(11):952-954.
12. Das A. 2004. Parameter estimation for Muskingum models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130(2):140-147.
13. Das A. 2007. Chance-constrained optimization-based parameter estimation for Muskingum models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133(5):487-494.
14. Das A. 2010. Discussion of Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model by H. J. Chu and L. C. Chang. *Journal of Hydrologic Engineering*. 15(11):946-948.
15. Engineer Manual. 1994. *Flood-Runoff Analysis*. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Washington. DC 20314-1000.
16. Geem Z. W. 2006. Parameter estimation for the nonlinear Muskingum model using the BFGS technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*. 132(5):474-478.
17. Geem Z. W. 2011. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using parameter-setting-free harmony search. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*. 16(8):684-688.
18. Gelegenis J. and Serrano S. 2000. Analysis of Muskingum equation based flood routing schemes. *Journal of hydrologic Engineering, ASCE*. 5(1):102-105.
19. Hosseini S. M. 2009. Application of spreadsheets in developing flexible multiple-reach and multiple-branch methods of Muskingum flood routing. *Computer Applications in Engineering Education*. 17(4):448-454.