

## روندیابی هیدرولوژیکی سیل به روش ماسکینگام خطی در سیستم رودخانه‌های چند شاخه‌ای با بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک

حسین محمد ولی سامانی<sup>1\*</sup>، علی حقیقی<sup>2</sup>، شقایق فرهادی<sup>3</sup>

1- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

2- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

3- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* اهواز، صندوق پستی 6135743337

hossein.samani@scu.ac.ir

**چکیده** - روندیابی سیل در رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین موارد در پروژه‌های مهندسی آب به حساب می‌آید. روش روندیابی هیدرولوژیکی مخصوصاً در رودخانه‌های چند شاخه‌ای و رودخانه‌های فاقد آمار حوضه میانی بسیار متداول است، ولیکن این روش‌ها نیاز به تهیه مقاطع عرضی و تعیین شیب‌ها در کلیه بازه‌های رودخانه دارد. این موضوع مستلزم صرف هزینه و وقت زیاد می‌باشد. روش ماسکینگام یکی از متداول‌ترین روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی در رودخانه‌ها است. برای روندیابی سیل در یک بازه مشخص از یک رودخانه لازم است که دو پارامتر اساسی تعیین شوند. این دو پارامتر تابع خصوصیات رودخانه می‌باشند و معمولاً با استفاده از آزمون و خطا همراه با برازش منحنی محاسبه می‌شوند. روش ماسکینگام بسیار ساده است ولیکن قابل استفاده فقط برای رودخانه یک بازه‌ای است. در این تحقیق روشی پیشنهاد شده است که در آن کالیبراسیون (تعیین پارامترها) به وسیله الگوریتم ژنتیک که قادر به حل مسایل پیچیده شامل پارامترهای بیشتر است، انجام می‌شود. روش پیشنهادی برای رودخانه‌های یک شاخه‌ای و چند شاخه‌ای و همچنین برای رودخانه فاقد آمار هیدروگراف حوضه میانی اعمال شد. در کلیه موارد بکار برده شده نتایج محاسباتی با نتایج واقعی انطباق رضایت بخشی نشان داده است.

**کلید واژگان:** روندیابی سیلاب، الگوریتم ژنتیک، روش ماسکینگام، بهینه‌یابی، رودخانه‌های چند شاخه‌ای.

### 1- مقدمه

نمی‌توان از این روش برای روندیابی استفاده کرد. برای روندیابی سیل در رودخانه تک شاخه‌ای با روش ماسکینگام خطی دو پارامتر  $K$  و  $X$  لازم است. اما در حالت چند شاخه‌ای (در این تحقیق سه شاخه‌ای) دو برابر

روش‌های هیدرولوژیکی قادر به حل مسائل روندیابی در یک شاخه از رودخانه می‌باشد. در مسائل واقعی اغلب رودخانه‌ها به شکل شاخه‌ای بوده که در این حالت

حاصل از روش GA با هیدروگراف جریان خروجی مشاهداتی نسبت به روش‌های ارائه شده از سوی سایر محققان انطباق بالاتری را دارد.

Permual & Ranga Raju (1998) بر اساس معادلات سنت ونانت روشی را برای روندیابی جریان غیرماندگار ارائه نمودند که مشابه فرمول مورد استفاده در روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر بوده و برای روندیابی از هیدروگراف اشل استفاده می‌کند. در این روش هیدروگراف دبی نیز بطور همزمان با هیدروگراف اشل روندیابی شده محاسبه می‌شود.

Ping & Xiofang (1999) مدلی را برای روندیابی در رودخانه‌های چند شاخه‌ای ارائه کردند. در مدل پیشنهادی از شیوه Double-Sweeping با در نظر گرفتن طول دلخواهی از کانال، برای حل شکل تفاضل محدود معادلات سنت ونانت استفاده می‌شود. مدل ارائه شده ابزار توانمندی را برای مدیریت مسائل روندیابی در رودخانه‌های چند شاخه‌ای و چگونگی عملکرد سرریز به هنگام وقوع سیل فراهم می‌آورد (Chen and Yang, 2007).

روندیابی جریان به روش ماسکینگام متداول تنها بر اساس رابطه بین ذخیره کانال و تراز آب رودخانه صورت می‌گیرد و ذخیره ساحلی را شامل نمی‌شود. Birkhead & James (2002) طی تحقیقی بر حوضه رودخانه Sabie در جنوب آفریقا روندیابی جریان را به روش ماسکینگام با در نظر گرفتن ذخیره ساحلی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این بررسی با استفاده از شکل غیر خطی معادلات ذخیره در روش ماسکینگام و لحاظ کردن نفوذپذیری ساحل، ضرایب مورد نیاز برای روندیابی را محاسبه کردند. نتایج نشان می‌دهد در مواردی که ساحل رودخانه نفوذپذیر باشد، ولی از آن صرف نظر شود، پارامترهای تخمینی، بویژه پارامتر X غیرواقعی می‌شود. Chaudhry et al. (2002) مدلی را به منظور روندیابی در رودخانه‌های چند شاخه‌ای به روش ماسکینگام ارائه نمودند. در مدل

تعداد شاخه‌ها (در این تحقیق به شش پارامتر) افزایش خواهد یافت. همچنین در مسائلی که حوضه میانی نیز وجود داشته باشد روش ماسکینگام معمول کاربردی نخواهد داشت، زیرا هیدروگراف حوضه میانی به طور کلی مجهول است که در این صورت تعداد پارامترهای مجهول برابر است با مجموع نقاط هیدروگراف حوضه میانی و پارامترهای روش ماسکینگام.

روندیابی سیل به روش ماسکینگام در سال 1983 توسط Mc Carthy ارائه گردید (Wang, 1992) و اولین بار توسط گروه مهندسان ارتش آمریکا در ارتباط با طرح‌های کنترل سیل در حوزه رودخانه ماسکینگام در ایالت Ohio به کار گرفته شد.

در مدل ماسکینگام غیر خطی معادلات ذخیره به یکی از دو شکل زیر می‌باشد (Tung, 1985).

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

$$S = K [XI^m + (1-X)O^m] \quad (2)$$

تخمین پارامترهای ماسکینگام غیرخطی پیچیده‌تر از فرم خطی آن است.

Permual (1994) با فرض ثابت بودن شیب سطح آب در طول یک بازه کوچک از کانال و برقراری جریان ماندگار بین عمق در وسط بازه و دبی در مقطعی در پایین دست آن، روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر را برای روندیابی موج سیل در کانال‌های منشوری با مقطع ثابت و جریان‌هایی که معادلات مقاومت بر آن‌ها حاکم است، بطور مستقیم از معادلات سنت ونانت بدست آورد. این روش در عمل از کارایی مناسبی برخوردار بوده و با حداقل اطلاعات نقشه‌برداری و بدون نیاز به واسنجی برای محاسبه زبری یا تعیین پارامترهای روندیابی، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد (Premual et al., 2001).

Mohan (1997) مدلی را بر مبنای الگوریتم ژنتیک (GA) به منظور تخمین پارامترهای ماسکینگام غیرخطی ارائه نمود. نتایج نشان می‌دهد هیدروگراف جریان خروجی

شونده، بر مبنای حداقل کردن خطای هیدروگراف محاسباتی نسبت به هیدروگراف مشاهداتی بهره برد. Samani & Shamsipour (2004) برای روندیابی سیل در رودخانه‌های چند شاخه‌ای با بکارگیری روش ماسکینگام خطی مدلی را ارائه کردند که در آن برای تخمین پارامترهای موردنیاز روندیابی از روش بهینه‌یابی غیرخطی (پاول) استفاده کردند.

Chen & Yang (2005) بهینه‌یابی پارامترهای ماسکینگام خطی را با استفاده از الگوریتمی بر مبنای روش Gray- Encode Accelerating Genetic Algorithm انجام دادند. کارایی این روش نسبت به سایر روش‌های روندیابی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج دقت بالای این روش را نشان داده است.

در این تحقیق برای محاسبه پارامترهای مجهول در سیستم رودخانه‌های شاخه‌ای و سیستم‌های دارای حوضه میانی از یک روش بهینه‌یابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که با استفاده از ابزار نرم‌افزاری متلب و جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک آن، و برنامه‌نویسی در این محیط پارامترهای مجهول تخمین زده می‌شود. بدین ترتیب با استفاده از پارامترهای کالیبره شده، پیش‌بینی روندیابی سیل در سیستم رودخانه برای سایر دوره‌های سیلابی امکان‌پذیر خواهد شد. این روش بر روی رودخانه‌های واقعی دارای اطلاعات آماری اعمال گردیده و با نتایج واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است

## 2- روش پیشنهادی

در این مطالعه معادله ماسکینگام مورد استفاده برای محاسبات روندیابی بصورت زیر ارائه شده است (Viessman, 1989).

$$O_2 = C_1 I_1 + C_2 I_2 + C_3 O_1 \quad (3)$$

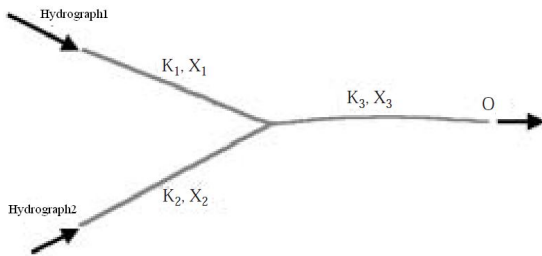
که در آن:

$$C_1 = \frac{KX + 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t}$$

پیشنهادی برای هر شاخه فرعی ضریبی تخمین زده می‌شود که مجموع حاصل ضرب این ضرایب در هیدروگراف ورودی هر شاخه به عنوان ورودی معادل در کانال اصلی در نظر گرفته می‌شود. این بررسی بر مبنای داده‌های آماری حوضه رودخانه Narmada در هند انجام شده است. پارامترهای  $X$ ،  $K$  و ضریب هر شاخه با به کارگیری شیوه رگرسیون غیرخطی بر مبنای شکل تفاضل محدود معادلات پیوستگی و ذخیره تخمین زده می‌شوند. عملکرد مدل پیشنهادی با سایر روش‌های ارائه شده توسط Stephenson و همکاران مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد خطای هیدروگراف خروجی محاسبه شده نسبت به هیدروگراف مشاهداتی در مدل ارائه شده توسط Chaudhry et al. (2002) نسبت به سایر روش‌ها کمتر است.

Jebelifard and Samani (2003) برای طراحی سیستم فاضلاب سطحی مناطق شهری با مجرای دایره‌ای از روندیابی هیدرولوژیکی جریان به روش ماسکینگام چند خطی استفاده کردند. در این روش دبی مرجع تابع غیرخطی از مشخصات قطر مجرا، ضریب مانینگ، شیب بستر و دبی اوج هیدروگراف ورودی می‌باشد که به شیوه رگرسیون غیر خطی معین می‌شود. پروفیل سطح آب نیز با حل گام به گام شکل تفاضل محدود معادله پیوستگی در هر بازه زمانی معین می‌شود، زیرا ضرایب ماسکینگام در هر بازه متفاوت از یکدیگر است. مدل پیشنهادی برای مجاری مختلفی بکار گرفته شد و با نتایج حاصل از روشی که در آن شیوه روندیابی هیدرولیکی برای حل معادلات سنت و نانت به کار گرفته شد، مورد مقایسه قرار گرفت. انطباق مناسبی بین پروفیل سطح آب و هیدروگراف روندیابی شده در دو روش وجود داشت که بیانگر عملکرد مطلوب مدل پیشنهادی در این تحقیق می‌باشد. Das (2004) به منظور تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی از یک الگوریتم تکرار

در یک سیستم سه شاخه‌ای مطابق شکل 2 بر هر بازه یک دسته  $K$  و  $X$  حاکم بوده که لازم است برای تعیین آنها در ابتدا و انتهای هر بازه یک ایستگاه آب‌سنجی موجود باشد که در نهایت بتوان هیدروگراف  $O$  را در انتها روندیابی کرد. تعیین  $K$  و  $X$  مختص به هر شاخه در ادامه شرح داده می‌شود.



شکل 2 شمای کلی سیستم سه شاخه‌ای

برای بهینه‌یابی مجهولات در سیستم سه شاخه‌ای با معلوم بودن هیدروگراف‌های ورودی در شاخه‌های 1 و 2 در هر مرحله الگوریتم ژنتیک مقادیری را به عنوان  $X_1$  و  $K_1$  و  $X_2$  و  $K_2$  انتخاب کرده و دبی خروجی از هر شاخه بطور مستقل روندیابی می‌شود. بدین ترتیب هیدروگراف خروجی در شاخه‌های 1 و 2 به دست می‌آید. مجموع دو هیدروگراف خروجی از شاخه‌های فرعی به عنوان هیدروگراف ورودی به شاخه سوم در نظر گرفته می‌شود. با هیدروگراف ورودی به دست آمده در شاخه 3 و انتخاب مقادیری برای  $K_3$  و  $X_3$  توسط برنامه، هیدروگراف خروجی از شاخه 3 نیز روندیابی می‌شود. هیدروگراف خروجی  $O$  به کمک 6 پارامتر انتخابی  $K$  و  $X$ ، در هر شاخه توسط برنامه محاسبه می‌شود. در نهایت پارامترهای مجهول ذکر شده باید به طریقی تعیین شوند که مجموع مربعات تفاضلات هیدروگراف خروجی محاسباتی و واقعی از شاخه 3 از رابطه (4) یا رابطه (5) حداقل شود. در طبیعت اغلب رودخانه‌ها دارای حوضه میانی می‌باشند که بصورت یک جریان جانبی وارد بازه اصلی می‌شود و

$$C_2 = \frac{-KX + 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t}$$

$$C_3 = \frac{K - KX + 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t}$$

$O_2$  دبی جریان خروجی در انتهای هر گام زمانی روندیابی،  $O_1$  دبی جریان خروجی در ابتدای هر گام زمانی روندیابی،  $C_1$  و  $C_2$ ،  $C_3$  ضرایب روندیابی - اعداد بی بعد،  $I_1$  دبی جریان ورودی در ابتدای هر گام زمانی روندیابی،  $I_2$  دبی جریان ورودی در انتهای هر گام زمانی روندیابی،  $\Delta t$  گام زمانی روندیابی،  $K$  ضریب تناسب یا ثابت ذخیره می‌باشد که دارای بعد زمان بوده و معادل زمان عبور سیل در بازه آبراهه است.  $X$  ضریب بدون بعدی است که درجه اهمیت  $I$  و  $O$  را در تعیین ظرفیت رودخانه نشان می‌دهد. ضرایب ماسکینگام ( $X$  و  $K$ ) از طریق کالیبراسیون تعیین می‌شوند.

### 3- تخمین پارامترها

در سیستم یک شاخه‌ای، در مرحله کالیبراسیون مقادیر دبی ورودی  $I$  و دبی خروجی واقعی  $O$  معلوم هستند و هدف تعیین بهینه‌ترین مقدار  $K$  و  $X$  می‌باشد. روند کار الگوریتم ژنتیک برای تعیین پاسخ بهینه ضرایب مذکور به شرح زیر است:

$K$  و  $X$  باید به طریقی تعیین شوند که اختلاف هیدروگراف خروجی محاسبه‌ای با هیدروگراف خروجی مشاهده‌ای حداقل باشد، یا با بیان ریاضی پارامترهای بهینه آن‌هایی هستند که مقدار تابع زیر را حداقل کنند:

$$F_1 = \sum_{i=1}^N (O_i^{computed} - O_i^{observed})^2 \quad (4)$$

که در آن  $O_i^{observed}$  و  $O_i^{computed}$  به ترتیب عبارتند از دبی‌های خروجی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گام زمانی  $i$ ام. حداقل کردن توابع فوق به وسیله روش الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد. در سیستم چند شاخه‌ای در هر بازه هیدروگراف ورودی، هیدروگراف خروجی و  $K$  و  $X$  خاص آن بازه مطرح می‌باشند.

مربعات تفاضلات هیدروگراف خروجی محاسباتی و هیدروگراف خروجی واقعی از بازه 2 از رابطه (4) تعیین می‌شود. این روند به ازای مقادیر متفاوت برای پارامترهای مجهول  $K$  و  $X$  در شاخه‌های 1 و 2 و نقاط هیدروگراف حوضه میانی توسط برنامه تکرار می‌شود. در نهایت مقادیری به عنوان پاسخ بهینه اعلام می‌شود که مقدار تابع هدف  $F$  به ازای آن دسته حداقل شود.

ضریب همبستگی که با  $R^2$  نشان داده می‌شود، ملاکی برای نشان دادن میزان انطباق بین نقاط هیدروگراف خروجی محاسبه شده و هیدروگراف خروجی واقعی با استفاده از نتایج حاصله از بهینه‌یابی می‌باشد. مقادیر این ضرایب در جداولی برای هر سه حالت فوق در دوره‌های سیلابی مورد بررسی محاسبه شده است که در ادامه بیان می‌شود.

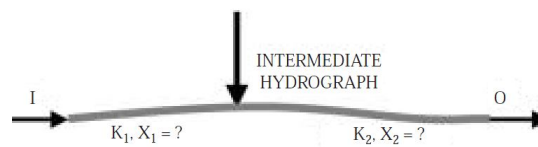
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (o_i^{computed} - o_i^{observed})^2}{\sum_{i=1}^N (o_i^{computed} - o^{Mean})^2} \quad (5)$$

که در آن  $O^{Mean}$  میانگین نقاط هیدروگراف واقعی خروجی است.

لازم به ذکر است که بهینه‌یابی در شرایطی که هیدروگراف حوضه میانی بدون وجود آمار شبیه‌سازی می‌شود یکی از برجسته‌ترین خصوصیات این مدل بوده، نه تنها برای هیدروگراف حوضه میانی فاقد آمار، بلکه برای شاخه‌های فاقد آمار نیز قابل استفاده است، در حالی که هیچ یک از روش‌های هیدرولوژیکی متداول این قابلیت را ندارد.

در این تحقیق برای محاسبه پارامترهای مجهول در سیستم رودخانه‌های شاخه‌ای و سیستم‌های دارای حوضه میانی از یک روش بهینه‌یابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است. پس از کالیبراسیون مدل‌ها، پیش‌بینی روندیابی سیل در سیستم رودخانه برای سایر دوره‌های سیلابی امکان‌پذیر خواهد شد. این روش بر روی رودخانه‌های واقعی دارای

یا بصورت شاخه‌های فرعی مستعد عمل می‌کنند که در هر دو صورت مشخصات بازه را از نظر دبی جریان متفاوت خواهد کرد. در عمل تأثیر حوضه میانی را با در نظرگرفتن سطح حوضه، برآورد رواناب سطحی و یا سایر روش‌های هیدرولوژیکی بصورت یک جریان با مقدار ثابت و یا بصورت هیدروگراف مثلثی و تنها با اطلاعات غیر مرتبط با بازه رودخانه تعیین می‌کنند. این روش تقریبی بوده و نمی‌تواند میزان واقعی تأثیرات حجمی و زمانی را بر هیدروگراف جریان بازه اصلی مشخص سازد. در شکل 3 شمای کلی یک سیستم شاخه‌ای با حوضه میانی فاقد آمار نشان داده شده است.



شکل 3 شمای کلی سیستم شاخه‌ای با حوضه میانی فاقد آمار

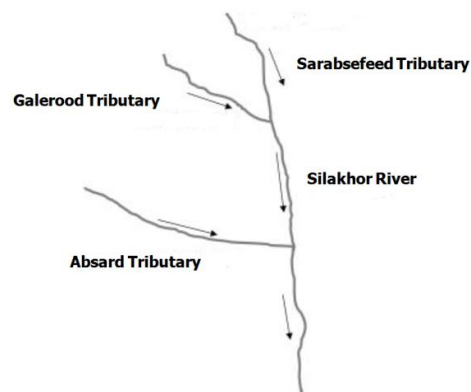
به منظور تعیین پارامترهای  $K$  و  $X$  در دو بازه نشان داده شده و همچنین تخمین هیدروگراف مؤثر حوضه میانی بصورت یک جریان متغیر با زمان، بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد. در این سیستم برنامه با انتخاب مقادیری برای  $K_1$  و  $X_1$  نقاط هیدروگراف خروجی  $O$  روندیابی شده بازه 1 را محاسبه می‌نماید. سپس با انتخاب مقادیری برای نقاط هیدروگراف حوضه میانی و پارامترهای  $K_2$  و  $X_2$  ابتدا مجموع دو هیدروگراف خروجی بازه 1 و حوضه میانی محاسبه شده و هیدروگراف حاصل به عنوان هیدروگراف ورودی بازه 2 در نظر گرفته می‌شود. این هیدروگراف بر اساس  $K_2$  و  $X_2$  انتخاب شده توسط برنامه الگوریتم ژنتیک روندیابی با روش ماسکینگام در بازه 2 را انجام می‌دهد و هیدروگراف خروجی انتهای بازه 2 را تعیین می‌کند. در نهایت مجموع

اطلاعات آماری اعمال شده و با نتایج واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### 4- ارایه نتایج مطالعه موردی

در این تحقیق اطلاعات آماری رودخانه سیلاخور واقع در استان لرستان برای ارزیابی مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. شاخه‌های گله رود و سراب سفید به یکدیگر متصل می‌شوند تا رودخانه سیلاخور را تشکیل دهند و شاخه آبرسد در پایین‌دست به رودخانه سیلاخور ملحق می‌شود که در شکل 4 نشان داده شده است.

در کلیه حالات از 5 دوره آماری سیلاب با دوره‌های برگشت 5، 10، 20، 50 و 100 ساله مربوط به رودخانه‌های سراب سفید، گله رود، تیره و سیلاخور استفاده شده است.



شکل 4 شمای کلی از رودخانه سیلاخور

در سیستم‌های رودخانه‌ای واقعی تنها مشخصات هیدروگراف یک یا چند دوره سیلابی در دسترس است. هدف از این بررسی آن است که آیا با داشتن مشخصات هیدروگراف ورودی و خروجی مشاهداتی برای یک دوره سیلابی اتفاق افتاده و بهینه‌یابی پارامترهای مجهول در این دوره می‌توان هیدروگراف جریان خروجی در هر دوره سیلابی دیگری را پیش‌بینی کرد؟

در این تحقیق اطلاعات آماری رودخانه سیلاخور در دوره‌های سیلابی 5، 10، 20، 50 و 100 ساله موجود می‌باشد (در حالی که در سیستم‌های واقعی تنها برای یک یا چند دوره آماری اطلاعات موجود می‌باشد). بمنظور بررسی قابلیت مدل پیشنهادی در تخمین پارامترهای مجهول و روندیابی در سایر دوره‌ها برای هر دوره سیلابی پارامترهای مجهول تخمین زده می‌شوند و از آن‌ها برای پیش‌بینی سیلاب در سایر دوره‌ها استفاده می‌شود. برای هر حالت نیز مقدار ضریب همبستگی محاسبه می‌شود.

از اطلاعات آماری بازه‌ای از رودخانه سیلاخور برای مطالعه در سیستم رودخانه‌ای تک شاخه‌ای استفاده شده است. ضرایب ماسکینگام بهینه‌یابی شده در دوره آماری انتخابی 20 و 100 ساله در جدول 1 ارایه شده است.

همچنین مقایسه ترسیمی هیدروگراف خروجی مشاهداتی و روندیابی شده برای دوره بازگشت 100 ساله در شکل 5 آورده شده است ضرایب همبستگی نیز برای هر دو دوره آماری انتخابی برابر با 0/99 می‌باشد.

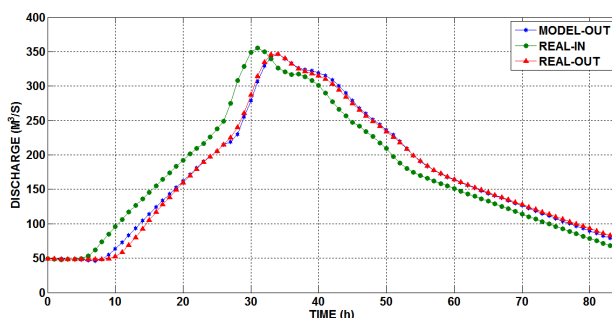
همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد انطباق مناسبی بین هیدروگراف خروجی مشاهداتی و روندیابی شده وجود دارد. جدول 2 میزان انطباق هیدروگراف‌های روندیابی شده و واقعی هر 5 دوره آماری تحت پارامترهای  $K$  و  $X$  بهینه‌یابی شده از سایر دوره‌های آماری را در سیستم تک شاخه‌ای نشان می‌دهد. اعداد پررنگ در کلیه جداول نماینده ضرایب همبستگی بدست آمده از کالیبراسیون با استفاده از بهینه‌یابی و بقیه اعداد جداول نشان دهنده ضرایب همبستگی بدست آمده از پیش‌بینی هیدروگراف‌ها است.

جدول 1 ضرایب ماسکینگام بدست آمده توسط بهینه‌سازی

پارامترهای کالیبره شده		دوره سیلاب / بهینه‌یابی شده (سال)
$X$	$K$ (ساعت)	
0/427	4/002	20
0/434	3/259	100

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد انطباق مناسبی بین هیدروگراف مشاهداتی و روندیابی شده در دوره آماری 10 و 100 ساله وجود دارد. نتایج روندیابی هر 5 دوره آماری تحت پارامترهای بهینه‌یابی شده از سایر دوره‌های آماری در سیستم رودخانه‌ای سه شاخه‌ای مطابق جدول 4 می‌باشد.

ضرایب ماسکینگام بهینه‌یابی شده برای سه شاخه متشکل از رودخانه‌های گله‌رود، سراب‌سفید و سیلاخور در دوره آماری انتخابی 10 و 100 ساله در جدول 3 نمایش داده شده‌اند. همچنین مقایسه ترسیمی هیدروگراف خروجی مشاهداتی و روندیابی شده در شکل 6 آورده شده است. ضرایب همبستگی نیز بطور تقریبی برابر با 0/98 می‌باشد.



شکل 5 مقایسه هیدروگراف واقعی و روندیابی شده مدل پیشنهادی در بهینه‌یابی هیدروگراف 100 ساله سیستم رودخانه تک شاخه‌ای

جدول 2 میزان قابلیت کاربری  $K$  و  $X$  بهینه‌یابی شده هر دوره آماری برای روندیابی سیلاب سایر دوره‌ها (سیستم یک شاخه‌ای)

مقادیر $R^2$ هیدروگراف روندیابی شده و واقعی هر دوره تحت پارامترهای کالیبره شده از دوره‌های زیر (سال)					دوره سیلاب روندیابی شده (سال)
100	50	20	10	5	
0/9914	0/9956	0/9974	0/9984	<b>0/9989</b>	5
0/9968	0/9978	0/9988	<b>0/9998</b>	0/9985	10
0/9982	0/9987	<b>0/9999</b>	0/999	0/9919	20
0/9941	<b>0/9999</b>	0/9946	0/9941	0/9926	50
<b>0/9999</b>	0/999	0/9986	0/9976	0/9953	100

جدول 3 پارامترهای مجهول بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک برای سیستم سه شاخه‌ای

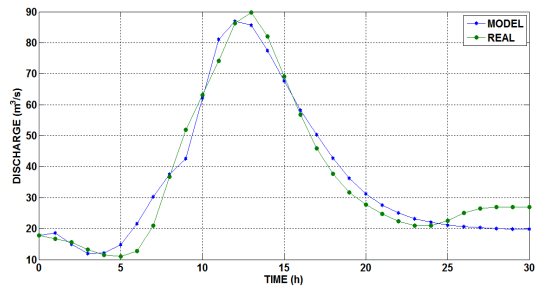
پارامترهای کالیبره شده						دوره سیلاب بهینه‌شده (سال)
$X_3$	$K_3$	$X_2$	$K_2$	$X_1$	$K_1$	
0/497	4/44	0/033	2/024	0/48	3/811	10
0/496	4/557	0/248	2/275	0/354	2/538	100

جدول 4 ضرایب همبستگی بدست آمده بر اساس پارامترهای  $K$  و  $X$  بهینه یابی شده هر دوره آماری برای روند یابی سیلاب سایر دوره ها (سیستم چند شاخه ای)

مقادیر $R^2$ هیدروگراف روند یابی شده و واقعی هر دوره تحت پارامترهای کالیبره شده از دوره های زیر (سال)					دوره سیلاب روند یابی شده (سال)
100	50	20	10	5	
0/9751	0/9624	0/9878	0/9864	<b>0/9928</b>	5
0/9851	0/9787	0/9872	<b>0/9882</b>	0/9810	10
0/9174	0/9675	<b>0/988</b>	0/9803	0/9757	20
0/98	<b>0/9861</b>	0/9862	0/9731	0/9496	50
<b>0/9882</b>	0/9856	0/9816	0/9850	0/9691	100

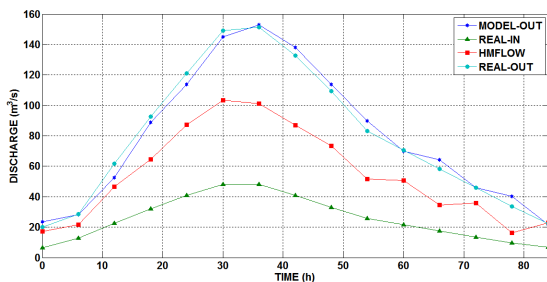
جدول 5 پارامترهای مجهول بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک برای رودخانه با حوضه میانی

پارامترهای کالیبره شده				دوره سیلاب بهینه شده (سال)
$X_2$	$K_2$	$X_1$	$K_1$	
0/382	0/744	0/488	1/117	50
0/5	2/932	0/487	0/006	100



شکل 6 مقایسه هیدروگراف واقعی و روند یابی شده مدل

پیشنهادی در بهینه یابی هیدروگراف 100 ساله سیستم رودخانه سه شاخه ای همراه با حوضه میانی



شکل 7 مقایسه هیدروگراف واقعی و روند یابی شده مدل

پیشنهادی در بهینه یابی هیدروگراف 100 ساله سیستم رودخانه شاخه ای همراه با حوضه میانی

همان طور که نتایج نشان می دهد انطباق مناسبی بین هیدروگراف خروجی مشاهداتی و روند یابی شده در دوره های آماری 50 و 100 ساله وجود دارد. جدول 6 میزان توانایی مدل در بهینه یابی  $K$  و  $X$  برای بکارگیری در روند یابی سیلاب سایر دوره های سیستم شاخه ای همراه با حوضه میانی را نشان می دهد.

نتایج جدول 4 قابلیت و دقت مدل بهینه یابی پیشنهادی سیستم رودخانه ای سه شاخه ای بمنظور تعیین ضرایب مجهول  $K$  و  $X$  در هر دوره را نشان می دهد.

از اطلاعات آماری بازه ای از شاخه فرعی آبرسد برای مطالعه در سیستم رودخانه ای شاخه ای با حوضه میانی استفاده شده است. ضرایب ماسکینگام بهینه یابی شده در دوره آماری انتخابی 50 و 100 ساله در جدول 5 نمایش داده شده است.

همچنین مقایسه ترسیمی هیدروگراف خروجی مشاهداتی و روند یابی شده در شکل 7 آورده شده است، ضرایب همبستگی نیز برای هر دو دوره آماری انتخابی برابر با 0/99 می باشد.



جدول 6 میزان قابلیت کاربری  $K$  و  $X$  بهینه‌یابی شده هر دوره آماری برای روندیابی سایر دوره‌ها (سیستم شاخه‌ای با حوضه میانی فاقد آمار)

مقادیر $R^2$ هیدروگراف روندیابی شده و واقعی هر دوره تحت پارامترهای کالیبره شده از دوره‌های زیر (سال)					دوره سیلاب روندیابی شده (سال)
100	50	20	10	5	
0/9965	0/9966	0/9986	0/9986	<b>0/9989</b>	5
0/9804	0/9961	0/9922	<b>0/9999</b>	0/9879	10
0/9974	0/9993	0/9999	0/9993	0/9992	20
0/9945	0/9999	0/9999	0/9998	0/9978	50
0/9998	0/9941	0/9971	0/9838	0/9989	100

خواهد بود.

### 5- نتیجه گیری

تعیین ضرایب  $K$  و  $X$  در روش ماسکینگام با شیوه آزمون و خطا به مسائل رودخانه‌ای تک شاخه‌ای محدود می‌شود. در مسائل واقعی اغلب رودخانه‌ها به شکل شاخه‌ای می‌باشند که در اینصورت تعداد پارامترها افزایش می‌یابد. در چنین حالتی تخمین ضرایب به شیوه آزمون و خطا بسیار دشوار است. این تحقیق بر اساس روش ماسکینگام خطی پیشنهاد شده است. برای تخمین پارامترهای مجهول از روش بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود که موجب تسریع در زمان محاسبات می‌گردد. این مدل برای حالت‌های سه گانه: (1) رودخانه تک شاخه‌ای (2) رودخانه سه شاخه‌ای (3) رودخانه با حوضه میانی فاقد آمار مورد بررسی قرار گرفته است.

هیدروگراف‌های خروجی روندیابی شده با استفاده از پارامترهای کالیبره شده از مدل پیشنهادی با هیدروگراف‌های خروجی واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده انطباق رضایت بخشی را نشان می‌دهد.

مدل پیشنهادی بر روش ماسکینگام غیرخطی که به شیوه آزمون و خطا غیر قابل حل می‌باشد، نیز قابل اعمال

### 6- فهرست علائم

$C_1, C_2, C_3$	ضرایب معادله ماسکینگام
$I_1$	دبی ورودی در ابتدای گام زمانی محاسبات
$I_2$	دبی ورودی در انتهای گام زمانی محاسبات
$X$ و $K$	ضرایب ماسکینگام
$X_1$ و $K_1$	ضرایب ماسکینگام شاخه اول
$O_1$	دبی خروجی در ابتدای گام زمانی محاسبات
$O_2$	دبی خروجی در انتهای گام زمانی محاسبات
$O_i^{observed}$	دبی خروجی مشاهده‌ای در گام زمانی $i$ ام
$O_i^{computed}$	دبی خروجی محاسبه‌ای در گام زمانی $i$ ام
$R^2$	ضریب همبستگی

### 7- منابع

- Birkhead, A.L. and James, C.S. (2002). "Muskingum river routing with dynamic bank storage", Journal of Hydrology, Vol. 264, pp. 113-132.
- Chaudhry, p., Shrivastava, R.K., and Narulkar, S.M. (2002). "Flood routing in river networks using equivalent Muskingum inflow", Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 7, No. 6, pp. 413-419.
- Chen, J., and Yang, X. (2007). "Optimal parameter

- Premual, M., and Ranga Raju, K.G. (1998). "Variable – parameter stage – hydrograph routing method: I Theory", *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 3, No. 2, pp. 109-114.
- Premual, M., and Ranga Raju, K.G. (1998). "Variable-parameter stage-hydrograph routing method: II" Evaluation, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 3, No. 2, pp. 115-121.
- Samani, H.M.V., and Jebelifard, S. (2003). "Design of circular urban storm sewer systems using multilinear Muskingum flow routing method", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 11, pp. 832-838.
- Samani, H.M.V., and Shamsipour, G.A. (2004). "Hydrologic flood routing in branched river systems via nonlinear optimization", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 1, pp. 55-59.
- Tung, Y.K. (1985). "River flood routing by nonlinear Muskingum method", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1447-1460.
- Viessman, W.R., Lewis, G.L., and Knapp, J.W. (1989). "Introduction to Hydrology", Third Edition, Harper and Row, New York.
- Wang, G.-T., and Singh, V.P. (1992). "Muskingum method with variable parameters for flood routing in channels", *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 134, pp. 57-76.
- estimation for Muskingum model based on gray-encoded accelerating genetic algorithm", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 12, pp. 849-858.
- Das, A. (2004). "Parameter estimation for Muskingum models", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 140-147.
- MATLAB 7.8.0 (R2009a) software.
- Mohan, S. (1997). "Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 137-142.
- Ping, F., and Xiafang, R. (1999). "Method of flood routing for multibranch rivers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp. 271-276.
- Premual, M. (1994). "Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 1. theory and solution procedure", *Hydrological Sciences Journal Oxford, U.K.*, Vol. 39, No. 5, pp. 431-441.
- Perumal, M. (1994). "Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 2. verification", *Hydrological Sciences Journal* Vol. 39, No. 5, pp. 431-441.
- Premual, M., O'Donnell, P.E., and Ranga Raju, K.G. (2001). "Field application of a variable parameter Muskingum-Cunge method", *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 3, pp. 196-207.