



تعیین مقدار بهینه پارامترهای مدل غیر خطی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم فراکاوشی

محمود محمد رضاپور طبری^۱، سید علی محمودی^۲

۱- استادیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه شهر کرد، Mrtabari@eng.sku.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه شهر کرد، alimah35@gmail.com

:

alimah35@gmail.com

خلاصه

روندیابی جریان‌های سیلابی در رودخانه‌ها یکی از موضوعات مهم در طراحی سازه‌های هیدرولیکی است. جهت روندیابی جریان و تعیین هیدروگراف جریان در پایین دست معمولاً از روش ماسکینگام استفاده می‌شود. از آنجا که این روش بر مبنای رابطه دی-ذخیره متغیر به صورت هیدرولوژیکی و بر مبنای رابطه پیوستگی عمل می‌نماید، جهت تخمین پارامترهای مدل غیر خطی نیازمند سعی و خطا و صرف زمان زیاد می‌باشد. بر این اساس در این مطالعه با استفاده از الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر جستجوی غیرمستقیم تهیه شده در محیط MATLAB، اقدام به تعیین مقدار بهینه پارامترهای مدل غیر خطی ماسکینگام گردید. جهت دستیابی به حداقل میزان انحراف بین هیدروگراف مشاهده‌ای و روندیابی شده، پنج تابع هدف SSQ، MARE، NQ، DPO و SAD تعریف گردید. نتایج حاصل از اجرای ساختار بهینه‌سازی تدوین شده نشان می‌دهد که بر مبنای تابع هدف SAD، بهترین میزان تطابق بین هیدروگراف روندیابی شده و مشاهداتی حاصل می‌شود. در واقع با استفاده از رویکرد پیشنهادی می‌توان در کوتاه‌ترین زمان و با دقت بالا به بهترین مقادیر مرتبط با مدل غیر خطی ماسکینگام دست یافت. این روش می‌تواند به عنوان مبنایی برای تخمین پارامترهای سایر مدل‌های خطی و غیر خطی ماسکینگام بکار گرفته شود.

کلمات کلیدی: روش ماسکینگام، روندیابی سیلاب، الگوریتم فراکاوشی، تخمین پارامتر

۱. مقدمه

روندیابی در رودخانه‌ها از موضوعات مهم در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مثل سدهای انحرافی و ... می‌باشد. به طور کلی روندیابی به دو روش هیدرولیکی و هیدرولوژیکی قابل انجام است. در روش هیدرولیکی معادلات حاکم بر جریان نوشته شده و با حل آن‌ها مقادیر دبی در فواصل و زمان‌های گوناگون محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است حل این معادلات با روش‌های عادی امکان‌پذیر نبوده و نیاز به روش‌های پیشرفته‌ای مثل اجزا محدود دارد. در روش‌های هیدرولوژیکی با فرض یک رابطه بین ورودی و خروجی و ذخیره، مقادیر دبی در یک فاصله مشخص در زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود. به طور کلی، روندیابی ماسکینگام در دو حالت خطی و غیر خطی قابل بررسی است. حالت خطی محدود به شرایط و حالت‌های خاصی می‌باشد. اما در روش ماسکینگام غیر خطی شرایط جریان غیریکنواخت و ناپایدار و یا جریان در پیچان رود و ... که در بیشتر رودخانه‌ها و مسیل‌ها حاکم می‌باشد، نیز در نظر گرفته می‌شود. در هر دو معادلات خطی و غیر خطی در ضمن حل معادلات نیاز به تخمین پارامترهایی می‌باشد که در روش‌های کلاسیک و سنتی با استفاده از سعی و خطا و روندی طولانی، این مقادیر محاسبه می‌شوند. لذا ضرورت استفاده از مبنای بهینه‌سازی در تخمین این پارامترها احساس می‌شود. برای این منظور اخیراً مطالعاتی در جهت تعیین پارامترهای روش ماسکینگام صورت گرفته که به برخی از مهمترین آن‌ها در این بخش اشاره می‌شود. Barati در سال ۲۰۱۳ با استفاده از ماکرو اکسل و بدون نیاز به وارد شدن به معادلات و محاسبات ریاضی بهینه‌سازی با سه روش

^۱ استادیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه شهر کرد

^۲ دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه شهر کرد



GRG Nonlinear و Simplex Lp و Evolutionary به همراه ۴ تابع هدف SSQ^1 و $MARE^2$ و DPO^3 و nq^4 پارامترهای معادله غیر خطی ماسکینگام یعنی K و X و m را محاسبه نمود و نتیجه گرفت که روش GRG با تابع هدف SSQ در بین تمامی روش‌ها کمترین خطا و دبی محاسبه شده با آن بیشترین نزدیکی را به دبی مشاهده شده خروجی دارد [۲].

فلاح-مهدی پور و همکاران در سال ۲۰۱۳ با الگوریتم ژنتیک، روندیابی در یک کانال طبیعی را بررسی نموده و مقایسه‌ای بین دبی خروجی در نرم‌افزار HEC-RAS با تابع SSQ انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که اختلاف دبی پیش‌بینی با این روش و دبی پیش‌بینی شده با نرم‌افزار که از رابطه دقیق به دست می‌آید، ناچیز بوده و این روش در کانال‌های ساده و مرکب قابل استفاده می‌باشد [۴]. در سال ۲۰۱۴ پارامترهای معادله غیر خطی ماسکینگام با روش رانگ کوتای مرتبه ۴ و با تابع SSR^5 توسط وطن خواه مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد زمانی که به دقت بالا در پیش‌بینی دبی روندیابی مورد نیاز است، می‌توان از شکل اصلاح شده رابطه غیر خطی ماسکینگام با ۵ پارامتر مجهول استفاده کرد که این پارامترهای مجهول با روش رانگ کوتای مرتبه ۴ قابل پیش‌بینی بوده و اختلاف دبی مشاهداتی و دبی محاسباتی بسیار ناچیز خواهد بود [۵].

Ouyang و همکاران در سال ۲۰۱۴ پارامترهای معادله خطی ماسکینگام را با یک روش بهینه‌سازی ترکیبی از سه روش $HPSO$ و $NMSM$ ، PSO تخمین زده و به مقایسه آن با سایر روش‌ها پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که روش $HPSO$ با توجه به اینکه نیاز به مقادیر اولیه برای تخمین پارامترها ندارد نسبت به روش‌های دیگر سرعت همگرایی بالاتری داشته و در نهایت روش ترکیبی مذکور دارای سرعت همگرایی و دقت بالا در مقایسه با سایر روش‌ها در پیش‌بینی دبی می‌باشد [۶]. بزرگ حداد و همکاران در سال ۲۰۱۵ با یک روش بهینه‌سازی ترکیبی از دوروش $SFLA$ و NMS ، پارامترهای معادلات روندیابی غیر خطی ماسکینگام با هفت پارامتر را مورد تخمین قرار دادند. نتایج حاصله حاکی از این است که این روش نسبت به روش‌های قبلی، هیدروگراف خروجی دقیق‌تری را پیش‌بینی می‌کند [۷]. Latt در سال ۲۰۱۵ جهت تخمین پارامترهای معادله غیر خطی ماسکینگام با تابع هدف SSQ ، ترکیب روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با روش بهینه‌سازی $FMLP$ را پیشنهاد نمودند. نتایج این محقق نشان داد که این مدل دبی پیک را به خوبی پیش‌بینی کرده و همچنین در پیش‌بینی هیدروگراف‌هایی با چند دبی پیک می‌تواند کارساز باشد و نیز به دلیل رابطه روندیابی مستقیمی که در این روش بر خلاف روش‌های دیگر وجود دارد، می‌تواند در پیش‌بینی سیستم‌های پیچیده بدون وارد شدن به روابط فیزیکی هم مورد استفاده قرار گیرد [۸]. Easa در سال ۲۰۱۵ پارامترهای پنج پارامتر رابطه غیر خطی ماسکینگام را با تابع هدف SSQ و با توجه به هیدروگراف خروجی بهینه‌سازی نمود. نتایج این بهینه‌سازی نشان می‌دهد که در شرایط متفاوت هیدروگراف ورودی و شرایط رودخانه از کدام تابع و کدام روش بهینه‌سازی استفاده شود تا خطا نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی کمتر گردد [۹]. در سال ۲۰۱۵ پارامترهای معادله روندیابی جریان با الگوریتم ژنتیک و با تابع هدف $MARE$ توسط Zucco و همکاران مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. نتایج این محققین نشان داد که این مدل به خصوص در انتهای کانال‌ها توانایی بسیار خوبی جهت روندیابی سیل بازگشتی را دارد [۱۰]. بررسی سوابق مطالعاتی قبلی حاکی از این است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی متفاوتی با توجه به شرایط حاکم بر هیدروگراف ورودی جهت تعیین پارامترهای خطی و غیر خطی رابطه ماسکینگام قابلیت استفاده دارد. بر این اساس و با توجه به تمامی بررسی‌های صورت گرفته، در این مطالعه سعی شده عملکرد الگوریتم خطی و غیر خطی و فراکاوشی در تعیین پارامترهای غیر خطی ماسکینگام مورد بررسی قرار گیرد و مناسب‌ترین الگوریتم و همچنین تابع هدفی که می‌تواند منجر به حداقل شدن اختلاف بین هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی می‌شود، معرفی گردد. نتایج این بررسی نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی شبیه‌سازی بازپخت (SA)^۶ منجر به ارائه جواب‌های صحیح در تعیین پارامترهای رابطه غیر خطی ماسکینگام نمی‌شود. همچنین الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر جستجوی غیرمستقیم با تابع هدف SAD و DPO کمترین میزان خطا را ارائه داده و نشان از کارایی این روش بهینه‌سازی در مقایسه با روش‌های دیگر دارد.

۲. تئوری و روش انجام کار

¹ Sum of the Square

² Mean Absolutely Relative Error

³ Deviations of Peak of routed and observed Outflows

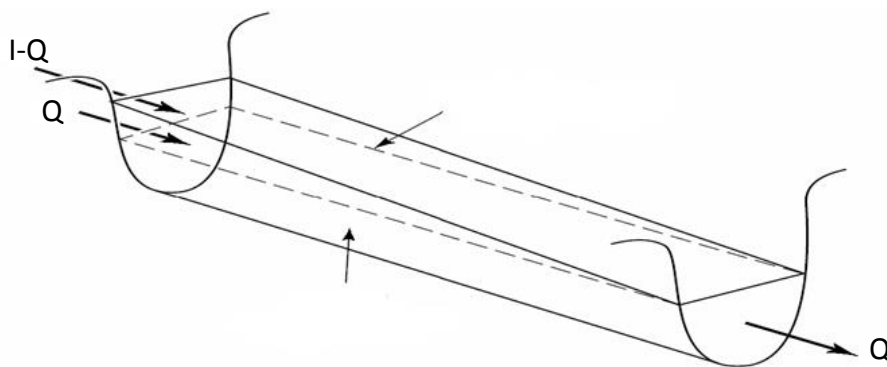
⁴ Nash-Sutcliffe criterion of the variance explained

⁵ The sum of the square of the deviations between the observed and computed storage rates

⁶ Simulated Annealing



روندیابی به دو صورت هیدرولوژیکی و هیدرولیکی انجام پذیر است که روش ماسکینگام بر اساس روش هیدرولوژیکی است. روندیابی هیدرولوژیکی در رودخانه‌ها عمدتاً به صورت رابطه دبی-ذخیره متغیر می باشد. در این روش حجم سیلاب از دو قسمت منشوری و گوه‌ای تشکیل شده است (شکل ۱). با فرض اینکه دبی عبوری از مقطع رودخانه متناسب با سطح مقطع عبوری سیلاب باشد، حجم ذخیره منشوری برابر KQ است که در آن K ضریب تناسب بوده و حجم ذخیره گوه‌ای برابر با $KX(I-Q)$ می باشد که در آن X ضریب وزنی است و مقدار آن بین ۰/۵ و ۰ است. لذا حجم کلی ذخیره برابر مجموع حجم این دو ذخیره خواهد بود. به طور کلی روابط حاکم بر معادله خطی ماسکینگام را می توان در قالب روابط زیر بیان نمود [۱]:



شکل ۱- ذخیره‌های منشوری و گوه‌ای در طول آبراهه

$$S = K(XI + (1 - X)Q) \quad (1)$$

در این رابطه متغیرها عبارتند از: S ، تابع ذخیره، I مقادیر دبی ورودی، K و X پارامترهای روندیابی جریان

$$Q_2 = C_1 I + C_2 I + C_3 Q_1 \quad (2)$$

متغیرها عبارتند از: Q_2 مقادیر دبی خروجی، Q_1 مقادیر دبی ورودی و پارامترهای C_1 ، C_2 و C_3 مطابق روابط ۳ تا ۶ محاسبه می شوند:

$$C_1 = \frac{\Delta T + 2KX}{\Delta T + 2K - 2KX} \quad (3)$$

در این رابطه، ΔT بازه زمانی مورد بررسی است.

$$C_2 = \frac{\Delta T - 2KX}{\Delta T + 2K - 2KX} \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{-\Delta T + 2K - 2KX}{\Delta T + 2K - 2KX} \quad (5)$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (6)$$

معادلات و مفاهیم ذکر شده مربوط به حالت خطی می باشد. حالت غیرخطی با مفهومی مشابه اما معادلات متفاوت می باشد که بسیاری از

محدودیت‌های روش خطی را ندارد. روابط حاکم بر معادله غیرخطی ماسکینگام را می توان در قالب روابط زیر بیان نمود [۲]:

$$S_t = K(XI_t + (1 - X)Q_t)^m \quad (7)$$

متغیرها عبارتند از: K ، X ، m پارامترهای روندیابی جریان، Q_t دبی واقعی مشاهداتی، I_t مقادیر دبی ورودی در زمان t

$$Q_t = \left(\frac{1}{1-X}\right)\left(\frac{S_t}{K}\right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{X}{1-X}\right)I_t \quad (8)$$

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta T} = -\left(\frac{I}{1-X}\right)\left(\frac{S_t}{K}\right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{I}{1-X}\right)I_t \quad (9)$$

متغیرها عبارتند از: S_t تابع ذخیره در زمان t ، $\frac{\Delta S_t}{\Delta T}$ تغییرات تابع ذخیره در مقابل زمان در زمان t

$$S_{t+1} = S_t + \Delta S_t \quad (10)$$



متغیرها عبارتند از: S_t : تابع ذخیره در زمان t ، S_{t+1} : تابع ذخیره در زمان $t+1$ ، ΔS_t : تغییرات تابع ذخیره در زمان t

$$0 \leq X \leq 0.5 \quad (11)$$

$$0.1 \leq K \leq 10 \quad (12)$$

$$0.1 \leq m \leq 10 \quad (13)$$

در مسایل واقعی مقادیر K و X (روند یابی خطی) و یا مقادیر K ، X و m (روند یابی غیر خطی) مشخص نمی‌باشد. لذا به ناچار باید ابتدا مقادیر این پارامترها تخمین زده شده و سپس صحت مقادیر آن‌ها در چرخه‌های محاسباتی متوالی مورد ارزیابی قرار گیرد تا در نهایت کمترین انحراف دبی محاسباتی را از دبی واقعی به دست آید. روش‌های مختلفی جهت نحوه تخمین این پارامترها در حالت خطی وجود دارد [۱] اما در مورد حالت غیر خطی به دلیل زمان‌بر بودن و نوع معادلات حاکم، نسبت به حالت خطی توسعه روشی مشابه حالت خطی را عملاً غیر ممکن می‌سازد. بنابراین از روش‌های بهینه‌سازی در این خصوص می‌توان بهره جست. در این بخش دو رویکرد برخورد با مسأله وجود دارد: بر اساس هیدروگراف ورودی و K و X معلوم، هیدروگراف خروجی تعیین می‌شود یا در حالت دوم از روی هیدروگراف ورودی و خروجی معلوم، مقادیر K و X مشخص می‌گردد.

جهت تعیین K و X سه روش وجود دارد در اولین و مهمترین روش حجم آب ذخیره شده در طول بازه رودخانه در هر زمان از انتگرال گیری معادله پیوستگی به دست می‌آید. حال با حدس مقادیر مختلف X ، مقدار عبارت $[XI+(1-X)Q]$ برای زمان‌های مختلف در مقابل مقدار ذخیره ترسیم می‌گردد که عمدتاً به صورت حلقه خواهد بود. از بین نمودارهای ترسیمی هر کدام که به حالت خطی نزدیک تر بود، انتخاب و X آن خط را به عنوان X نهایی در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار K ، شیب این خط را به دست می‌دهد [۱]. روند فوق، روندی طاقت فرسا و طولانی و بعضاً دارای سعی و خطای زیادی می‌باشد. با توجه به این موضوع استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند بسیار مفید و کارا باشد. جهت توسعه ساختار مدل بهینه‌سازی لازم است ابتدا تابع هدف مورد نظر تعریف گردد. در این مطالعه ۵ تابع هدف SSQ ، $MARE$ ، DPO ، nq و SAD که در مطالعات قبلی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه در این مطالعه رابطه غیر خطی ماسکینگام بررسی می‌شود، لذا ۳ متغیر تصمیم K و X و m به عنوان مجهولات مسأله تعیین می‌گردد. بر این اساس توابع هدف مورد بررسی را می‌توان در قالب روابط زیر بیان نمود. لازم به ذکر است به جز تابع هدف رابطه ۱۸، بقیه توابع هدف (روابط ۱۴ تا ۱۷) می‌بایست در طی فرآیند بهینه‌سازی، حداقل شوند.

$$SSQ = \sum_{t=1}^N (Q_t - Q'_t)^2 \quad (14)$$

متغیرها عبارتند از: Q'_t : دبی محاسباتی، Q_t : دبی واقعی مشاهداتی و N : تعداد زمان‌های اندازه گیری دبی

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|Q_t - Q'_t|}{Q_t} \quad (15)$$

$$DPO = |PEAK_{rounded} - PEAK_{observed}| \quad (16)$$

متغیرها عبارتند از: $PEAK_{rounded}$: بیشترین مقدار دبی محاسبه شده (روند یابی شده)، $PEAK_{observed}$: بیشترین مقدار دبی مشاهداتی

$$SAD = |Q_t - Q'_t| \quad (17)$$

$$nq = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t - Q'_t)^2}{\sum_{t=1}^N (Q_t - \bar{Q}_{obs})^2}\right) \times 100 \quad (18)$$

در این رابطه \bar{Q}_{obs} ، متوسط مقدار دبی مشاهداتی

جهت تعیین مقدار دبی روند یابی شده لازم است مراحل زیر مورد توجه قرار گیرد [۲]:

- تعیین مقادیر m ، X ، K با استفاده از روش بهینه‌سازی (در این مرحله با استفاده از مقادیر اولیه تخمینی m ، X ، K و وارد کردن آن در کد تهیه شده در محیط نرم افزاری متلب یا اکسل و پس از چند بار طی کردن تمامی مراحل پایین با توجه به الگوریتم بهینه‌سازی و تابع هدف انتخابی، مقادیر بهینه m ، X ، K تعیین می‌شود)
- محاسبه حجم ذخیره اولیه با استفاده از رابطه ۱۲ که در آن دبی خروجی اولیه با ورودی اولیه با هم برابر می‌باشد.
- محاسبات تغییرات ذخیره در گام‌های زمانی مشخص شده با استفاده از رابطه ۹
- تخمین میزان ذخیره تجمیع یافته با استفاده از رابطه ۱۰
- محاسبه دبی خروجی در گام زمانی بعدی بر اساس رابطه ۸



با توجه به زمان بر بودن روش سعی و خطای در فرآیند یافتن K, X, m ، لازم است از روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی در این زمینه استفاده گردد. با توجه به مزیت‌های الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر جستجوی غیرمستقیم در بهینه‌نمودن سریع متغیرهای تصمیم، در این مطالعه این الگوریتم مورد استفاده قرار گرفت که جزئیات این روش را می‌توان در در مطالعه محمد رضا پور طبری و ایل‌بیگی (۱۳۹۳) یافت [۱۱]. لازم به ذکر است جهت سنجش کارایی الگوریتم فراکاوشی مورد استفاده، سه روش بهینه‌سازی GRG -nonlinear, Evolutionary و $simplexp$ نیز که در solver اکسل موجود می‌باشد، مورد توجه قرار گرفت.

۳. بررسی و آنالیز نتایج

بر مبنای ساختار مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده و اجرای آن با توابع هدف مختلف، می‌توان مقدار بهینه پارامترهای غیرخطی معادله ماسکینگهام را تعیین نمود. بر این اساس در این مطالعه ابتدا با لحاظ نمودن توابع هدف $SSQ, MARE, nq, DPO, SAD$ اجرای آن در محیط متلب و ماکروی اکسل، مقادیر بهینه K, X, m با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف محاسبه گردید. لازم به ذکر است که مطابق مرجع شماره ۱۱، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی غیرمستقیم از کارایی بالایی در دستیابی به جواب‌های بهینه برخوردار بوده و لذا با توجه به مزیت این الگوریتم نسبت به روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، در این مطالعه به عنوان ابزار بهینه‌ساز انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته است. در این بخش نتایج برخی از محاسبات صورت گرفته توسط توابع هدف و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- مقدار بهینه تابع هدف SAD در روش GRG برابر $۲۲/۸۷۶۱۲$ و مقدار همین تابع در روش $Evolutionary$ برابر $۲۲/۸۷۳۷۹$ گردید که مقادیر بهتری را نسبت به مقادیر متناظر در مطالعات قبلی نشان می‌دهد.
- طبق نتایج بدست آمده: در مقدار جمعیت ۲۰۰، مقدار بهینه تابع هدف SSQ در روش GRG کمترین مقدار است. یعنی با افزایش جمعیت، مقدار تابع هدف تا حدودی بهبود پیدا کرده سپس از آن مقدار به بعد (تعداد جمعیت برابر با ۲۰۰)، دوباره مقدار تابع هدف زیاد می‌شود.
- کمترین مقدار تابع خطای $MARE$ در روش GRG در جمعیت ۲۰۰ اتفاق می‌افتد یعنی ابتدا با افزایش جمعیت، تابع خطا افزایش یافته و از یک جا به بعد کاهش می‌یابد تا به یک مقدار بهینه رسیده و دوباره با افزایش جمعیت خطا افزایش یافته و بعد از یک مقداری دوباره خطا کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر روند تغییرات تابع هدف به صورت سینوسی می‌باشد و نتیجه خاصی را دربر ندارد.
- کمترین مقدار تابع خطای SSQ در روش $Evolutionary$ در جمعیت ۱۰۰ تا ۲۵۰ اتفاق می‌افتد. یعنی ابتدا با افزایش جمعیت خطا کاهش یافته و از یک مقدار به بعد (جمعیت ۳۰۰) دوباره خطا افزایش می‌یابد.
- کمترین مقدار تابع خطای $MARE$ در روش $Evolutionary$ در همان جمعیت اولیه یعنی ۱۵۰ اتفاق می‌افتد و از آن به بعد افزایش یافته و پس از آن دوباره کاهش سپس افزایش می‌یابد.
- تابع هدف nq نیز منجر به ارائه مقادیر مناسب از پارامترهای غیرخطی ماسکینگهام نگردید.

طبق بررسی‌های صورت گرفته تابع DPO با سه روش بهینه‌سازی GRG -nonlinear, Evolutionary و $simplexp$ دارای خطای نسبتاً بیشتری (مقدار $۰/۸۹$ برای تابع DPO و مقدار ۲۳ برای تابع SAD) نسبت به سایر تابع‌ها می‌باشد اما استفاده از الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم منجر به بهبود این تابع هدف و کاهش قابل توجه تابع خطای DPO شده است. این روند برای سایر توابع هدف انجام گردید و نتایج نشان داد که توابع SAD (با مقدار $۲۲/۸۷$) و DPO (با مقدار $۰/۰۰۰۱۳$) منجر به ارائه مقادیر مناسب تری از پارامترهای غیرخطی ماسکینگهام در جهت تخمین هیدروگراف خروجی شده است. لازم به ذکر است که مناسب‌ترین پارامتر مرتبط با الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم در جهت دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای غیرخطی ماسکینگهام، $GSS, 2N$ بوده که منجر به ارائه مقادیر بهینه در طی ۳۰۰ تکرار می‌شود.

بررسی‌های صورت گرفته بر مبنای هیدروگراف خروجی بدست آمده از ساختار پیشنهادی نشان می‌دهد که تابع هدف SAD در مجموع عملکرد بهتری به دلیل اختلاف اندک بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در طی دوره زمانی مورد بررسی، دارا بوده و می‌توان با استفاده از این تابع هدف و الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم مقادیر بهینه‌ای را از پارامترهای K, X, m در جهت افزایش دقت هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده ارائه نمود. جهت مقایسه میزان خطای روش پیشنهادی با آخرین مطالعه صورت گرفته در این زمینه، در جدول ۱ اقدام به ارائه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده دبی گردید. بررسی نقطه‌ای مقادیر شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در ۴۱ درصد موارد، نتایج روش پیشنهادی نسبت به آخرین مطالعه صورت گرفته بهبود یافته و مقادیر



نزدیک تری را به دبی مشاهده ایی ارائه می دهد (شکل ۲). همچنین جهت ارائه کارایی روش پیشنهادی، نتایج مطالعه حاضر به صورت حجمی نیز مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۲). با بررسی جدول ۲ می توان دریافت که روش پیشنهادی توانسته به میزان ۱۲۵۲۸ متر مکعب حجمی، میزان دبی سیلاب را دقیق تر پیش بینی نماید که این خود گواه دیگری را قابلیت رویکرد مورد بررسی در تخمین بهتر پارامترهای غیر خطی ماسکینگهام می باشد. جهت مقایسه مقادیر بهینه پارامترهای بدست آمده توسط روش های مختلف، جدول ۳ تهیه و ارائه گردید. لازم به ذکر است دبی حجمی ارائه شده در جدول ۲، از جمع اختلاف بین مقادیر دبی ضرب در فاصله زمانی بین این مقادیر محاسبه شده است.

جدول ۱- مقایسه مقادیر دبی واقعی و پیش بینی شده با استفاده از نتایج روش پیشنهادی و مطالعه قبلی (مقادیر دبی بر حسب متر مکعب در ثانیه)

زمان (ساعت)	مقادیر دبی مقاله Barati, 2013	مقادیر دبی با تابع SAD	مقادیر دبی واقعی	مقادیر دبی ورودی
۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲	۲۲
۶	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۱	۲۳
۱۲	۲۲/۴۲	۲۲/۴۲	۲۱	۳۵
۱۸	۲۶/۶۱	۲۶/۶۳	۲۶	۷۱
۲۴	۳۴/۴۶	۳۴/۴۶	۳۴	۱۰۳
۳۰	۴۴/۱۷	۴۴/۰۳	۴۴	۱۱۱
۳۶	۵۶/۸۵	۵۶/۴۳	۵۵	۱۰۹
۴۰	۶۸/۰۶	۶۷/۴۰	۶۶	۱۰۰
۴۶	۷۷/۰۷	۷۶/۲۶	۷۵	۸۶
۵۲	۸۳/۳۲	۸۲/۴۷	۸۲	۷۱
۵۸	۸۵/۹۰	۸۵/۱۵	۸۵	۵۹
۶۴	۸۴/۵۴	۸۴/۰۰	۸۴	۴۷
۷۰	۸۰/۵۸	۸۰/۳۳	۸۰	۳۹
۷۶	۷۳/۷۱	۷۳/۷۹	۷۳	۳۲
۸۲	۶۵/۴۱	۶۵/۸۰	۶۴	۲۸
۸۸	۵۶/۰۰	۵۶/۶۵	۵۴	۲۴
۹۴	۴۶/۶۷	۴۷/۴۸	۴۴	۲۲
۱۰۰	۳۷/۷۵	۳۸/۵۹	۳۶	۲۱
۱۰۶	۳۰/۴۷	۳۱/۱۸	۳۰	۲۰
۱۱۲	۲۵/۲۳	۲۵/۷۱	۲۵	۱۹
۱۱۸	۲۱/۷۴	۲۲/۰۰	۲۲	۱۹
۱۲۴	۱۹/۹۹	۲۰/۱۱	۱۹	۱۸

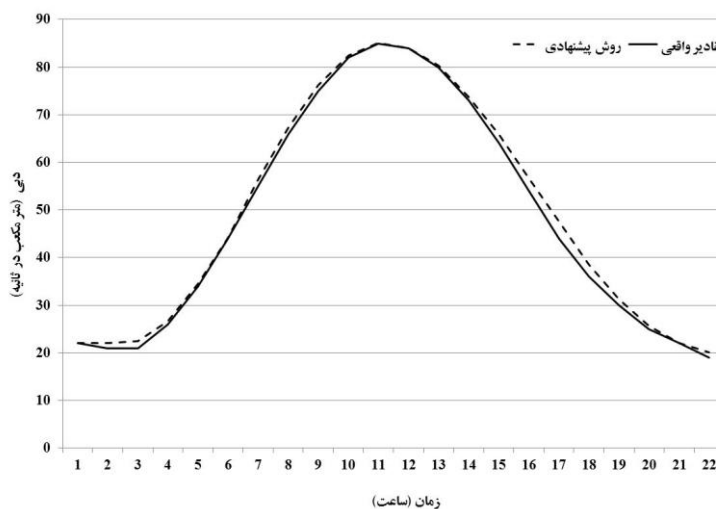
جدول ۲- اختلاف مقادیر حجمی هیدروگراف مشاهده ایی و شبیه سازی شده (متر مکعب)

نام مطالعه	اختلاف حجم مقادیر واقعی و شبیه سازی
مطالعه حاضر	۴۷۲۸۲۴
آخرین مطالعه قبلی (Barati, 2013)	۴۸۵۳۵۲
میزان اختلاف	۱۲۵۲۸

جدول ۳- مقادیر بهینه K , X , m بدست آمده توسط روش های مختلف



K	X	m	تابع هدف	نام مطالعه
۰/۰۸۶۲۴۹	۰/۲۸۶۹۱۷	۱/۸۶۸۰۸۷	SSQ	آخرین مطالعه قبلی (Barati, 2013)
۰/۰۸۶	۰/۳۱۹	۱/۸۹۵	DPO	مطالعه حاضر
۰/۰۷۷۸۳۸	۰/۲۷۹۵۶۵	۱/۸۹۴۸۲۴	SAD	



شکل ۲- اختلاف بین مقادیر هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی

۴. جمع‌بندی و پیشنهادات

با توجه به اینکه ساختار مدل‌های غیرخطی ماسکینگهام در روندیابی سیلاب نسبت به مدل‌های خطی ماسکینگهام از مزایا و اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد لذا در این مطالعه پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگهام بر مبنای الگوریتم فراکاوشی به گونه‌ای تعیین گردید که منجر به کمترین میزان خطای بین هیدروگراف واقعی و مشاهداتی شود. در این راستا الگوریتم‌های بهینه‌سازی متنوعی توسط محققین مختلف مورد توجه قرار گرفت که در هر کدام از آن‌ها تا حدودی مقدار خطای شبیه‌سازی را کاهش می‌یابد. از آنجا که شکل تابع هدف (تابع خطا) در تعیین مقادیر بهینه پارامترهای غیرخطی ماسکینگهام تأثیر بسزایی دارد لذا توابع هدف مختلفی همچون SSQ، MARE، m ، DPO و SAD که در مطالعات قبلی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، تحت الگوریتم‌های خطی، غیرخطی و فراکاوشی مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. بررسی‌های نشان می‌دهد که تابع هدف SAD در نزدیک نمودن مقادیر هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی می‌تواند بسیار مفید و کارا باشد. همچنین الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر جستجوی مستقیم نیز از بین مدل‌های بهینه‌سازی مختلف از عملکرد مطلوب‌تری در دستیابی به مقادیر بهینه K ، X ، m برخوردار است. مقایسه نتایج حاصل از رویکرد مورد بررسی در این تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی با استفاده از تابع هدف SAD و الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر جستجوی مستقیم توانسته کاهش قابل توجهی در تابع هدف ایجاد نماید به گونه‌ای که منجر به بهبود ۴۱ درصدی در مقادیر دبی محاسباتی نسبت به آخرین مطالعه صورت گرفته شده است. در واقع بر مبنای رویکرد ارائه شده، از نظر حجمی به میزان ۱۲۵۲۸ مترمکعب افزایش دقت در پیش‌بینی میزان رواناب ناشی از سیلاب مشاهده گردید. از آنجا که روش ماسکینگهام یک روش معمول و متداول در روندیابی سیلاب در حوضه‌های مدیریت نشده است، تخمین دقیق پارامترهای آن می‌توان منجر به افزایش دقت هیدروگراف روندیابی شده گردد. لذا پیشنهاد می‌شود جهت کاستن بیشتر مقدار خطای ارائه شده در این تحقیق شکل تابع هدف به صورت تلفیقی از توابع خطای مختلف ارائه و با استفاده از سایر الگوریتم‌های فراکاوشی رایج مورد بررسی و تدقیق بیشتر قرار گیرد.

۵. منابع و مراجع

۱. صفوی، ح. م. (۱۳۸۵)، "هیدرولوژی مهندسی"، انتشارات ارکان دانش، چاپ اول.
2. Barati, R., (2013), "Application of Excel Solver for Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Models" KSCE Journal of Civil Engineering, 17(5):1-10



کنگره ملی مهندسی عمران، ۲۱ و ۲۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۵
فردوسی مشهد، مشهد، ایران



نهمین
دانشگاه فردوسی مشهد
دانشگاه

۳. علیزاده، ا. (۱۳۸۸)، "اصول هیدرولوژی کاربردی"، انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ بیست و هفتم.

4. Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddadm, O., Orouji, H., and Mariño, M.A. (2013), "Application of Genetic Programming in Stage Hydrograph Routing of Open Channels", *Water Resour Manage*, 27:3261–3272.
5. Vatankhah, A.R. (2015), "Discussion of Application of Excel Solver for Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Models" by Reza Barati, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1): 332-336.
6. Ouyang, A., Li, K., Truong, T.K., Sallam, A., and Sha, E.H.M. (2014), "Hybrid particle swarm optimization for parameter estimation of Muskingum model", *Neural Comput & Applic*, 25:1785–1799.
7. Bozorg Haddad, O., Hamedi, F., Orouji, H., Pazoki, M., and Hugo, A.L. (2015), "A Re-Parameterized and Improved Nonlinear Muskingum Model for Flood Routing", *Water Resour Manage*, 29:3419-3440.
8. Latt, Z.Z. (2015), "Application of Feedforward Artificial Neural Network in Muskingum Flood Routing: a Black-Box Forecasting Approach for a Natural River System", *Water Resour Manage*, 29:4995-5014.
9. Easa, S.M. (2015), "Evaluation of Nonlinear Muskingum Model with Continuous and Discontinuous Exponent Parameters", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19:2281-2290.
10. Zucco, G., Tayfur, G., and Moramarco, T. (2015), "Reverse Flood Routing in Natural Channels using Genetic Algorithm", *Water Resour Manage*, 29:4241-4267.

۱۱. محمد رضاپور طبری م. ایل بیگی م. (۱۳۹۳)، "کالیبراسیون خودکار پارامترهای آبخوان با استفاده از مدل ریاضی گسترده آبخوان و الگوریتم مبتنی

بر جستجوی مستقیم"، مجله علمی و پژوهشی آب و فاضلاب، (۳) ۲۵: ۹۸-۱۰۹.