

روندیابی به‌هنگام سیل در شبکه آبراهه‌ها با بهره‌گیری از مدل وفقی ماسکینگام اصلاح شده و روش جستجوگر تابو

محسن ناصری^{۱*}، کیوان اصغری^۲، محمدرضا کوهکن^۳

۱- دانشجوی دکتری آب و محیط زیست، دانشگاه شیراز

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

* شیراز، خیابان زند، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

mm_nasseri@yahoo.com

چکیده - این تحقیق بر اساس روش اصلاح شده ماسکینگام پی‌ریزی شده و به‌منظور دسترسی به مدل به‌هنگام تخمین رواناب، از روش وفقی بهره گرفته شده است. با استفاده از روش مزبور امکان پیش‌بینی دقیق دبی سیلاب در گام زمانی آتی فراهم می‌شود. این روش امکان تدقیق روش کلاسیک ماسکینگام به‌منظور پایش تأسیسات پایین دستی را به صورت به‌هنگام فراهم می‌سازد. در این تحقیق به منظور محاسبه مقدار بهینه پارامترها در مدل ماسکینگام اصلاح شده، از روش تکاملی تابو استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه بخشی از رودخانه خشک واقع در شهر شیراز است که در آن هیدروگراف‌های مرکب در سه ایستگاه (دو ایستگاه به‌عنوان ورودی در بالادست و یک ایستگاه خروجی در پایین دست) تحلیل شده است. عملکرد مدل حاضر با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. نتایج آماری حاکی از توانایی بالای مدل‌سازی وفقی همراه با روش جستجوگر تابو نسبت به الگوریتم ژنتیک است.

کلید واژگان: مدل ماسکینگام اصلاح شده، روش جستجوگر تابو، مدل‌سازی وفقی.

۱- مقدمه

با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های بالادستی فراهم می‌شود. مدل ماسکینگام، روشی مبتنی بر به‌کارگیری رابطه‌ای وزن‌دار بین ورودیها و خروجی از قطعه آبراهه‌ای مشخص در یک کانال به صورت زیر است:

$$q_{t+\Delta t} = c_1 i_t + c_2 i_{t+\Delta t} + c_3 q_t \quad (1)$$

در رابطه فوق q و i به ترتیب خروجی و ورودی در بازه مکانی معین و در دو گام زمانی متوالی t و $t + \Delta t$ است. مانند سایر مدل‌های پارامتری، یافتن مقادیر بهینه وزن‌ها اهمیت بسیاری داشته و موضوع بحث روشهای بهینه‌سازیهای خطی و غیرخطی بوده و هست. Muhan

بی‌شک روندیابی و کنترل سیلاب یکی از مهمترین فرآیندهای هیدرولوژی مهندسی و مدیریت منابع آب است. این فرایند یکی از معدود موضوعات در حیطه مهندسی آب است که با دو روش هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مطالعه می‌شود. در تحقیق حاضر، نوعی مدل روندیابی هیدرولوژیکی در شبکه ایستگاه‌های هیدرومتری با استفاده از الگوریتم جستجوی تکاملی تابو و مدل ماسکینگام اصلاح شده وفقی توسعه داده شده است. با استفاده از این روش، امکان پایش به‌هنگام حادثه‌های سیل

هدف قرار داده می‌شوند و سپس مقدار شاخص برازش متناظر دسته‌ها که معرف تناسب مقادیر پیشنهادی است، به دست می‌آید. آن دسته از متغیرهایی که شاخص برازش مناسب‌تری را ارائه می‌کنند در آرایه‌ای به نام K ذخیره شده و روند همسایه‌گیری حول K شروع می‌شود. به این ترتیب که حول K تعدادی همسایگی دلخواه متقارن با شعاع‌های مختلف انتخاب کرده و نقاط داخل هر همسایگی به صورت مجزا بررسی و جواب بهینه هر یک مشخص می‌شود. بهترین جوابهای بهینه در لیست تعهدی^۱ ذخیره شده و سایر نقاط بررسی شده در همسایگی‌ها در لیست تابو نگهداری می‌شود. اکنون بهترین جواب به دست آمده جایگزین شده و عملیات تکرار می‌شود. باید در نظر داشت که نقاط داخل لیست تابو جستجو نمی‌شوند و به این ترتیب در آخرین مرحله اجرای برنامه، تمامی نقاط داخل لیست تعهدی بررسی شده و بهینه‌ترین جواب مسأله شناسایی می‌شود. این روش در نقاط بهینه موضعی متوقف نمی‌شود، زیرا در هر مرحله نقطه K با بقیه نقاط موجود در همسایگی خود مقایسه نمی‌شود (The and Rangaiah, 2003). علاوه بر ارائه نتایج یک مدل‌سازی وفقی، نتیجه دیگر این تحقیق، مقایسه عملکرد الگوریتم جستجوگر تابو و الگوریتم ژنتیک است.

۳- مدل‌سازی

بر اساس روش پیشنهادی Choudhry و همکاران (۲۰۰۲)، با اعمال ضرایبی به هیدروگراف ایستگاه‌های بالادستی (ورودیهای سیستم)، ورودی لازم برای اعمال در کانال مجازی فراهم می‌شود:

$$I_t^e = \sum_{p=1}^n \sigma^p i_t^p \quad (2)$$

در معادله فوق n تعداد ایستگاه‌ها و σ ضریب انتقال ایستگاه‌های آبنجی بالادستی و p شاخص هر یک از

(1997) با استفاده از الگوریتم ژنتیک نتایج مناسبی را ارائه کرد. در میان پژوهشهای شاخص و با استفاده از روشهای سنتی می‌توان به فعالیتهای Gill (1978)، Wu et al. (1985)، Heggen (1984) و روش متفاوت Khan (1993)، برای مدل‌سازی در کانال اشاره کرد. Xiaofang و Ping (1999) به روندیابی در شبکه با استفاده از روشهای هیدرولیکی پرداختند که حاصل تلاش آنها نتایج مناسبی را در پی نداشت. سرانجام Choudhry et al. (2002) به ارائه مدلی برای روندیابی نحوه تأثیرپذیری ایستگاهی مشخص به عنوان خروجی یک حوضه نسبت به شبکه ایستگاه‌های آبنجی بالادستی پرداختند. در این مقاله و در ادامه تحقیق Choudhry et al. (2002)، در کانالی با ورودیهای چندگانه به وسیله انتقال وزندار ورودیهای مختلف در شبکه به کانال مجازی به شناسایی چگونگی به‌کارگیری مدل ماسکینگام برای شبکه‌ای از آبراهه‌ها پرداخته می‌شود. لازم است ذکر شود که اگر در سمت راست رابطه (۱) دبی مشاهده شده جایگزین دبی محاسباتی در مرحله قبل شود، مدلی وفقی به‌وجود می‌آید که همیشه با مشاهده دبی در سرشاخه(ها) و نقطه خروجی مورد نظر، با دقت مناسبی دبی خروجی را در گام زمانی آتی تخمین می‌زند (ناصری و همکاران ۱۳۸۲). برای اطلاع بیشتر در باره این روش مدل‌سازی به Young (1984) رجوع شود.

۲- الگوریتم جستجوگر تابو

روشهای کلاسیک جستجوی همسایگی (یا موضعی) یک رسته کلی از روشهای تقریبی ابتکاری را تشکیل می‌دهند که بر مبنای ارزیابی همسایه‌های جواب فعلی عمل می‌کنند. روش تکاملی تابو و اثبات همگرا بودن این روش در سال ۱۹۸۹ توسط Glover پیشنهاد شد (Phame and Karaboga, 2000). در این روش ابتدا تابع هدف، متغیرها و محدودیت‌ها مشخص شده و چندین دسته متغیر به طور تصادفی در محدوده مجاز انتخاب و در تابع

سیستم آبراهه‌ای درختی است. در این مقاله، با استفاده از یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB، بهینه‌سازی x و k و ضرایب انتقال ایستگاه‌های بالادستی، به‌منظور روندیابی و فقی ایستگاه هدف انجام می‌شود. در مدل فوق شاخص برازش، میانگین مربعات خطا می‌باشد. امکان مدل‌سازی و فقی و به‌کارگیری مقادیر مشاهده شده برای کاهش خطا در تخمین مقادیر آبی نیز بررسی می‌شود. جمله و فقی (q_t) دقیقاً به دبی مشاهداتی به‌ازای دبی محاسباتی در گام زمانی t برای پیش‌بینی گام زمانی بعدی است. این روش به طور قابل توجهی به کاهش خطا در مدل‌سازی‌های مبتنی بر مشاهده همزمان در حادثه می‌انجامد.

۴- حوضه مورد مطالعه

به‌منظور بررسی مدل ارائه شده، از داده‌های دو ایستگاه آبسنجی بالادستی (چنار سوخته و نهر اعظم) نسبت به ایستگاه پایین‌دستی پل باغ صفا در حوضه رودخانه خشک شیراز استفاده شده است. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. سه حادثه سیل در این ایستگاه‌ها با گام زمانی یک ساعت انتخاب شد (حادثه‌های سیل مورخ ۲۹-۱۳۸۳/۹/۲۳ و ۲۵-۱۳۸۳/۱۲/۲۴ برای واسنجی و ۱۱/۵-۱۳۸۳/۱۰/۳۰ برای ارزیابی). بیشینه دبی ثبت شده برابر $219/56 \text{ m}^3/\text{s}$ و کمینه آن برابر $1/716 \text{ m}^3/\text{s}$ بوده است.

ایستگاه‌های بالادست است. لازم است تذکر داده شود که این ایستگاه‌ها همگی سر شاخه بوده و بطور متوالی بر امتداد یک آبراهه واقع نیستند. با رجوع به معادله ماسکینگام در رابطه (۱) و جایگذاری ورودی معادل (ورودی مجازی رابطه (۲))، رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$q_{t+\Delta t} = \sum_{p=1}^n (c_1^p \cdot i_t^p + c_2^p \cdot i_{t+\Delta t}^p) + c_3 \cdot q_t \quad (3)$$

روابط زیر ضریب‌های انتقال در مدل مربوط را به صورت تابعی از x و k به‌دست می‌دهد:

$$c_1^p = (\Delta t + 2kx\sigma^p) / [\Delta t + 2k(1-x)] \quad (4)$$

$$c_2^p = (\Delta t - 2kx\sigma^p) / [\Delta t + 2k(1-x)] \quad (5)$$

$$c_3 = (-\Delta t + 2k(1-x)) / [\Delta t + 2k(1-x)] \quad (6)$$

در این روابط چنانچه σ برابر واحد در نظر گرفته شود، روابط حاصل ضرایب ماسکینگام در رابطه (۱) را تبیین می‌کند. تلفیق روابط فوق، رابطه نهایی زیر را به‌دست می‌دهد (Choudhry et al., 2002):

$$q_{t+\Delta t} = \sum_{p=1}^n \frac{(\Delta t - 2kx\sigma^p)}{\Delta t + 2k(1-x)} \{(i_{t+\Delta t}^p - i_t^p) + i_t^p\} + \frac{-\Delta t + 2k(1-x)}{\Delta t + 2k(1-x)} (q_t - \sum_{p=1}^n i_t^p) \quad (7)$$

در این معادلات k ضریبی از جنس زمان است، x و σ ضرایبی بی بعد هستند که اولی مربوط به نوع و کیفیت انتقال در هر آبراهه بوده و دومی اهمیت و تأثیر رواناب مشاهده شده و موقعیت هر ایستگاه از منظر پایش پایین دست را نشان می‌دهد. معادله فوق معرف خروجی

جدول ۱ موقعیت و وضعیت آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه

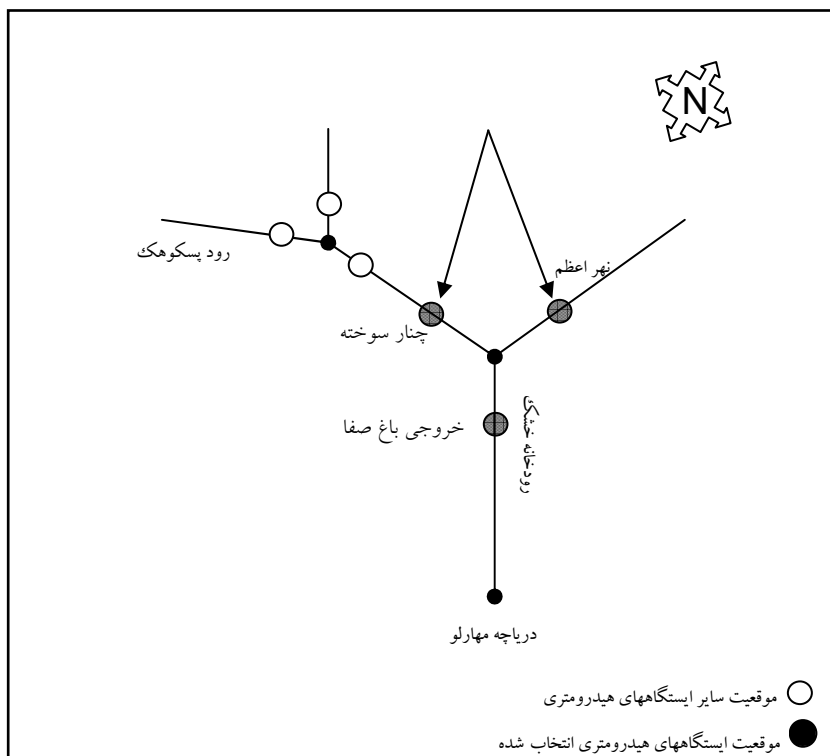
نام ایستگاه	مشخصات جغرافیایی		مساحت حوزه (km^2)	دوره آماری
	طول	عرض		
چنار سوخته	$52^\circ, 28'$	$29^\circ, 42'$	۱۴۴/۲	۱۳۵۰-۸۲
نهر اعظم	$52^\circ, 23'$	$29^\circ, 38'$	۳۲۹/۸	۱۳۴۹-۸۰
باغ صفا	$52^\circ, 26/5'$	$29^\circ, 42/5'$	-	۱۳۴۹-۷۷

k و x در بهترین مدل ایجاد شده کانال مجازی و ضرایب انتقال، در جدول ۲ آورده شده است. دامنه تغییرات x مانند مدل ماسکینگام بین صفر و نیم و k بین صفر و ۱۰۰ و دامنه ضرایب نیز ۱۰۰- تا ۱۰۰+ در نظر گرفته شده که البته مناسب بودن این دامنه با توجه به جدول ۲ قابل ارزیابی است.

هیدروگراف‌های ثبت شده ترکیبی از هیدروگراف‌های مرکب و ساده است. دو ایستگاه ورودی در بالادست (نهر اعظم و چنار سوخته) و یک ایستگاه خروجی در پایین‌دست (باغ صفا) به شکل Y قرار گرفته‌اند (شکل ۱).

۵- نتایج

ابتدا ۱۰۰۰۰ دسته چهارتایی از پارامترهای مورد نظر برای بهینه‌سازی به صورت تصادفی ایجاد و کنترل شده است.



شکل ۱ موقعیت نمایشی ایستگاه‌های آبسنجی موجود در منطقه

جدول ۲ ضرایب کانال مجازی و انتقال در بهترین مدل‌های وفقی ایجاد شده

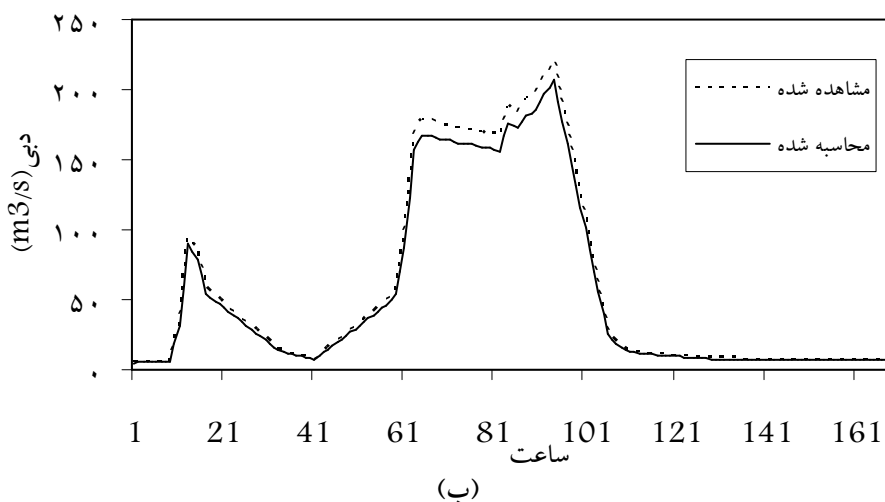
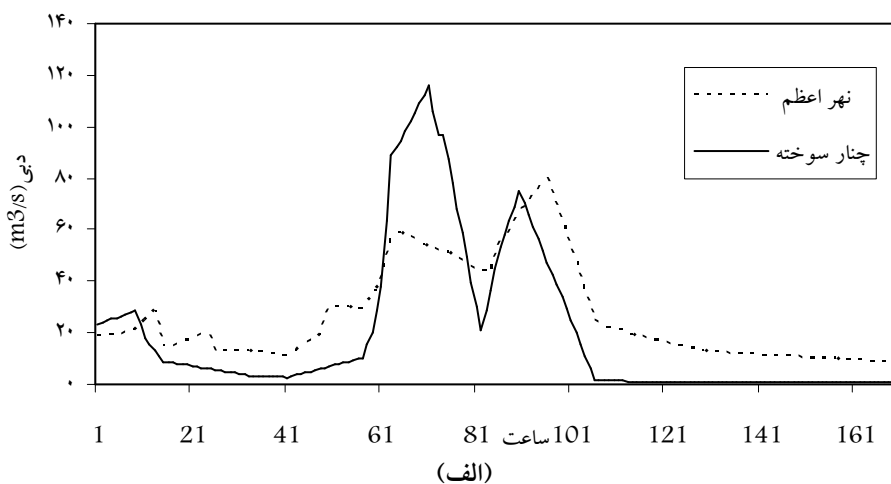
تکرار	ضریب انتقال (نهر اعظم)	ضریب انتقال (چنار سوخته)	x	$k(h)$	عناوین
۳۰۰	-۲۹/۹	-۵/۵۶۲۴	.۳۰۲۵	۴۳/۳۱۳۱	مدل وفقی تابو
۵۰۰	۰/۱۴۳۶	-۴/۶۵۵	۰/۳۲۵۷	۱۹/۶۸۷	مدل وفقی الگوریتم ژنتیک

۳ معرف پارامترهای خط راست نمودار مقادیر مشاهده‌ای در مقابل مقادیر محاسبه‌ای است. در عین حال در شکل‌های ۲ و ۳ نتایج واسنجی و تصدیق در بهترین مدل آماده شده را می‌توان مشاهده کرد.

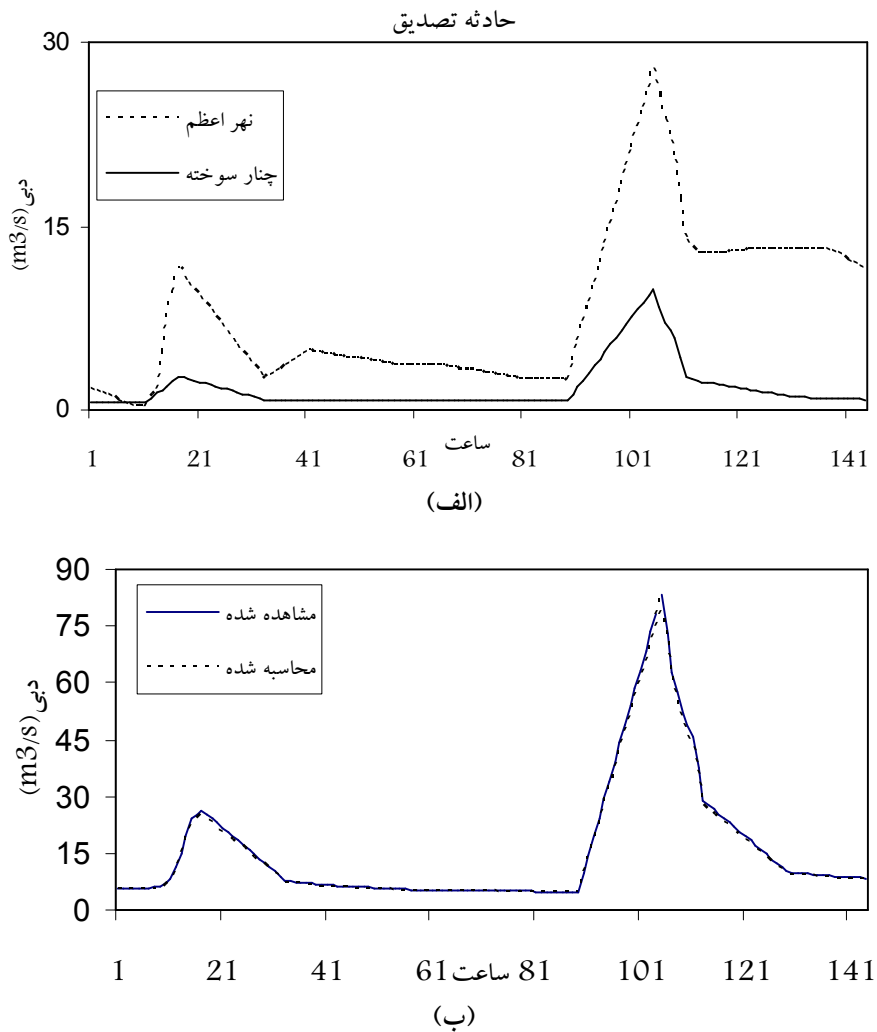
آن‌گونه که از نتایج مدل‌سازی‌های فوق بر می‌آید، مدل‌سازی‌های افقی همراهِ با الگوریتم تکاملی تابو عملکرد قابل قبولی را در مقایسه با الگوریتم ژنتیک ایجاد می‌کند (جدول ۳). دقت و قدرت بهینه‌یابی تابو قابل توجه است (جدول‌های ۲ و ۳). ضرایب A و B در جدول

جدول ۳ شاخص‌های آماری برازش نتایج مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در آزمون الگوریتم ژنتیک و روش تابو در حادثه‌های ارزیابی $(Y=AX+B)$

نوع مدل‌سازی	شاخص‌های برازش نتایج			
	A	B	R ²	NMSE
حادثه آزمون با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مدل افقی	۰/۹۶۰۳	۰/۳۲۴	۰/۹۸۷	۰/۰۰۹
حادثه آزمون با استفاده از روش تابو در مدل افقی	۰/۹۵	۰/۰	۱	۰/۰۰۴



شکل ۲ (الف) هیدروگرافهای ورودی از ایستگاههای بالادستی، (ب) مقایسه مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده هیدروگراف ایستگاه پایین‌دست در حادثه مورخ ۱۳۸۳/۹/۲۳-۲۹، در مرحله واسنجی



شکل ۳ (الف) ورودی از ایستگاههای بالادستی، (ب) مقایسه مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده هیدروگراف مورخ ۱۱/۵-۱۳۸۳/۱۰/۳۰، در مرحله تصدیق

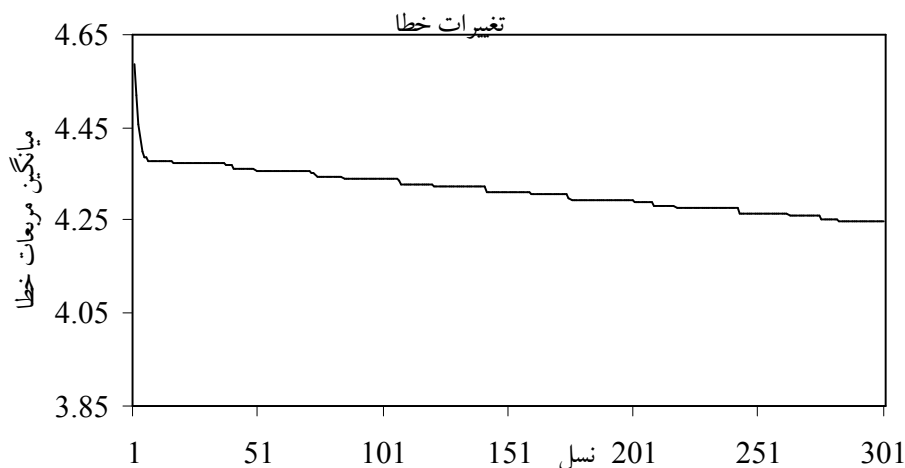
در ساختار وفقی مدل ماسکینگام در کنار بهینه‌سازی تکاملی تابو نسبت به مقادیر مشاهده‌ای است.

۶- نتیجه‌گیری

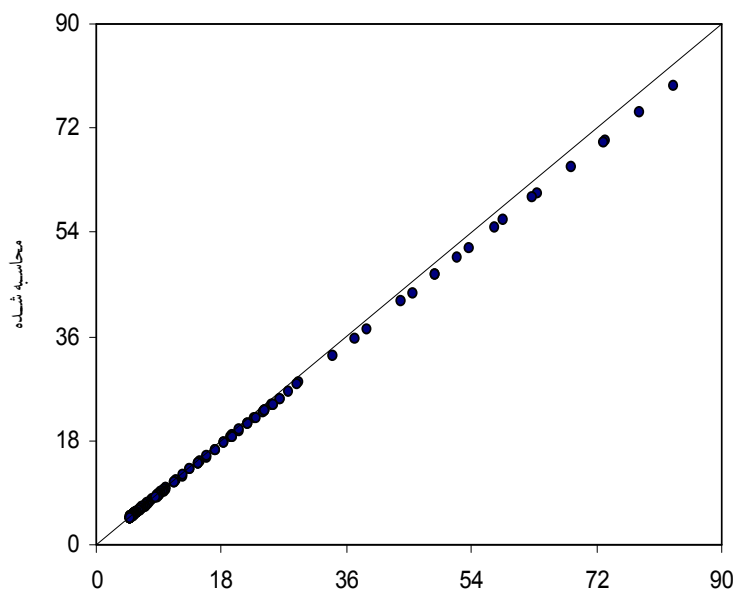
مدل‌سازی وفقی مورد استفاده در مقاله حاضر می‌تواند به‌عنوان گامی قوی به سمت ارتقای مدل‌های کلاسیک موجود برای رسیدن به ابزاری مناسب جهت تبیین سیستم‌های روندیابی سیل تلقی شود. این‌گونه مدل‌سازی توانایی ارائه پیش‌بینی کننده‌ای مناسب به منظور کنترل بهنگام درجه سدها و سایر ابزار کنترلی با گام‌های زمانی متفاوت را نیز دارد.

شکل ۴ معرف روند کمینه‌سازی تابع هدف در هر نسل از مقادیر در هنگام مدل‌سازی است که در کمتر از ۳۰۰ تکرار به همگرایی رسیده است. مقایسه‌ها در مراحل مختلف واسنجی و ارزیابی حاکی از توانایی مدل‌سازی وفقی و روش تکاملی تابو در تبیین رفتار پدیده رواناب با توانایی کاهش اغتشاش و عدم قطعیت در مدل است.

نتایج حاصل از فرایندهای واسنجی و ارزیابی گویای آن است که روش بهینه‌سازی تکاملی تابو ابزار توانمندی به‌منظور تعیین پارامترهای نزدیکتر به نقطه بهینه مطلق محسوب می‌شود. مقایسه مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده در شکل ۵ گویای نحوه پراکندگی نتایج محاسبه شده



شکل ۴ نحوه تغییرات مقدار میانگین مربعات خطا



مشاهده شده

شکل ۵ مقایسه مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای هیدروگراف مورخ ۱۱/۵-۱۳۸۳/۱۰/۳۰ در مرحله ارزیابی

i_t دبی جریان ورودی در زمان t
 c_1, c_2, c_3 ضرایب انتقال در مدل ماسکینگام معمولی
 σ ضریب انتقال در ایستگاه آبنجی بالادست
 n تعداد ایستگاههای آب سنجی بالادستی
 p مبین هر ایستگاه آب سنجی بالادست
 k, x ضرایب پخش و انتقال در مدل ماسکینگام
 c_1^p, c_2^p, c_3^p ضرایب انتقال در مدل ماسکینگام توسعه یافته
 c_3^p یافته

با استفاده از ایده مدل‌سازی وفقی می‌توان سایر مدل‌های مناسب هیدرولوژیکی را نیز با این رویکرد به خدمت گرفت. همچنین، به منظور کاهش و کنترل خطا می‌توان از یکی از روشهای فیلتر اطلاعات، همچون فیلتر کالمن، داده‌ها را در مرحله قبل از مدل‌سازی پردازش کرد.

۷- فهرست علائم

q_t دبی جریان خروجی در زمان t

- [7] Khan H. M., (1993), "Muskingum flood routing model for multiple tributaries", *Water Resour. Res.*, 29(4), pp. 1057-1062.
- [8] Phame D. T. and Karaboga D., (2000), *Intelligent Optimization Techniques*, Springer-Verlay, Berlin.
- [9] Michalewicz Z., (1992), *Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs*, Springer-Verlay, Berlin, Heidelberg.
- [10] Mohan S., (1997), "Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm.", *J. Hydrol. Eng.*, 123(2), pp. 137-142.
- [11] Ping F. and Xiaofang R. (1999), "Method of flood routing for multibranch rivers" *J. Hydraul. Eng.*, 125(3), pp. 271-276.
- [12] The Y. S. and Rangaiah G. P., (2003), "Tabu search for global optimization of continuous functions with application to phase equilibrium calculations", *Computers and Chemical Engineering*, 27, pp. 1665-1679.
- [13] Young P., (1984), *Recursive Estimation and Time-Series Analysis*, Springer-Verlay, Berlin,
- [14] Youssef H., Sait S. M. and Adiche H., (2001), "Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14, pp. 167-181.
- [15] Wu J. S., King E. L. and Wang M. (1985), "Optimal identification of Muskingum routing coefficients", *Water Resour. Bull.*, 21(3), pp. 417-421.

۷- منابع

- [1] ناصری، م.، عابدینی، م. ج.، صحرائی، س. (۱۳۸۲)، روندیابی هیدرولوژیکی رواناب جاری در شبکه رودخانه‌های خشک، نهرا عظم و چنار سوخته با بهره‌گیری از مدل ماسکینگام اصلاح شده، پنجمین کنفرانس هیدرولیک شیراز، جلد اول، ص. ۴۴۹-۴۵۶.
- [2] Choudhry P., Shrivastava R. K. and Narulkar, S. M., (2002). "Flood routing in river networks using equivalent Muskingum inflow", *J. Hydrol. Eng.*, 7(6), pp. 413- 419.
- [3] Gill M. A., (1978), "Flood routing by the Muskingum method." *J. Hydrol.*, 36, pp. 353-363.
- [4] Hassan M., Alkhamis T. and Ali J., (2000), "A comparison between simulated annealing, genetic algorithm and tabu search methods for unconstrained quadratic Pseudo-Boolean function", *Computers & Industrial Engineering*, 38, pp. 323-340.
- [5] Heggen R. J., (1984), "Univariant least squares Muskingum flood routing", *Water Resour. Bull.*, 20(1), pp. 103-107.
- [6] Imrie C. E., Durucan S. and A. Korre, (2000), "River flow prediction using Artificial Neural Network: Generalization beyond the calibration range", *J. Hydrol.*, 233, pp. 138-153.