

بررسی تأثیر خصوصیات سیل مبنا روی دقت روندیابی سیل در رودخانه کارون با استفاده از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی

هادی نوروزی^۱، وحید کریمی^۲، جلال بازرگان^{۳*}

۱. دانشجوی دکترای مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

۳. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۱/۱۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۳/۰۳

چکیده

تحلیل جریان غیر ماندگار با استفاده از روش‌های روندیابی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی صورت می‌گیرد. روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی در عین حال که دقت مناسبی دارند، نسبت به روش‌های روندیابی هیدرولیکی بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه‌ترند و برای محاسبات روندیابی سیلاب، فقط به داده‌های مربوط به هیدروگراف (تغییرات دبی نسبت به زمان) ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری بالادست و پایین‌دست محدوده مطالعه‌شده نیاز دارند. در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر سیل مبنا روی دقت روندیابی سیل در رودخانه کارون با استفاده از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی شامل روش ماسکینگام خطی، مقادیر اجرایی، کانوکس و آت - کین اصلاح‌شده، پرداخته شده است. به بیانی، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و داده‌های ۴ سیل مشاهداتی که در ایستگاه‌های هیدرومتری ملاثانی (بالادست) و اهواز (پایین‌دست) رودخانه کارون ثبت شده است، برای هر سیل، به صورت جداگانه پارامترهای روش ماسکینگام خطی ($X, K, \Delta t$) بهینه‌یابی شده و برای محاسبه هیدروگراف خروجی تمامی سیل‌ها استفاده شده است. نتایج بیانگر آن است که به دلیل تأثیر وسعت سیل‌گیری رودخانه‌ها روی پارامترهای یادشده، چنانچه دامنه تغییرات دبی ورودی سیل مبنا به دامنه تغییرات دبی ورودی سیل محاسباتی نزدیک‌تر باشد، دقت روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی در برآورد هیدروگراف خروجی افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: رودخانه کارون، روندیابی سیلاب، روندیابی هیدرولوژیکی، سیل مبنا، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO).

مقدمه

سیل یکی از بلایای طبیعی است و جلوگیری از آسیب‌های اقتصادی، اجتماعی، اقتصادی و سایر موارد ناشی از سیلاب، نگرانی انسان‌ها را به دنبال داشته است [۱]. روندیابی سیل به عملیاتی گفته می‌شود که طی آن مشخصات هیدروگراف را در نقطه‌ای از مسیر رودخانه با استفاده از اطلاعات فرضی یا حقیقی موجود در یک یا چند نقطه بالادست جریان تعیین می‌کنند [۲]. روش‌های روندیابی سیل را می‌توان به دو گروه روندیابی هیدرولیکی و روندیابی هیدرولوژیکی تقسیم کرد. اگر جریان آب فقط به صورت تابعی از زمان در محلی مشخص روندیابی شود، این نوع روش، روندیابی هیدرولوژیکی نامیده شده [۳] و در آن از اصل پیوستگی جریان و رابطه دبی ذخیره (با فرض یکنواخت بودن جریان) استفاده می‌شود. اگر روندیابی جریان طی سیستم به صورت تابعی از زمان و مکان مد نظر باشد، این روش به نام روندیابی هیدرولیکی شناخته می‌شود [۴] و در این روش از معادله پیوستگی جریان و معادله اندازه حرکت استفاده شده و اساس آن بر تئوری جریان‌های غیردائمی (معادلات سنت ونانت)، استوار است [۵]. استفاده از روش‌های روندیابی هیدرولیکی به دلیل نیاز به داده‌های بیشتر و محاسبات طولانی‌تر، دشوار است. در حالی که روندیابی سیلاب با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی به داده‌های بسیار کمتری نیاز دارد و آسان‌تر است [۶]. تسای (۲۰۰۵) با بررسی روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی در روندیابی سیل، به این نتیجه رسید که روندیابی هیدرولیکی نسبت به روندیابی هیدرولوژیکی دقت بیشتری دارد، ولی مشکل اصلی آن دشواری و پیچیدگی حل معادلات مربوطه است [۷]. به دلیل کم بودن زمان محاسبات، الگوریتم‌ها توانایی زیادی در بهینه‌یابی متغیرهای روش ماسکینگام دارند. افزایش تعداد پارامترهای روش ماسکینگام، زمان محاسبات الگوریتم‌ها را افزایش می‌دهد، در حالی که دقت محاسبات، به‌طور درخور توجهی تغییر نمی‌کند [۸]. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) نوعی الگوریتم تکاملی مبتنی بر جمعیت است و در حال حاضر در مسائل بهینه‌سازی مهندسی عمران و مهندسی منابع آب مانند عملکرد مخزن [۹]، مدیریت کنترل سیل [۱۰]، مدیریت کیفیت آب [۱۱-۱۳] و بهینه‌یابی ضرایب روش ماسکینگام [۱۴-۱۶] کاربرد دارد. عبدالشاه نژاد (۱۹۹۷) به مطالعه

روش‌های مختلف روندیابی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی سیلاب در بخشی از رودخانه کارون پرداخت. ایشان مدل‌های ماسکینگام، ماسکینگام کانژ، آت-کین، کانوکس و مدل هیدرودینامیک Mike11 را بررسی کرد و در پایان، مدل کانوکس را به عنوان بهترین مدل پیشنهاد داد [۱۷]. دهقانی (۲۰۰۴) به ارزیابی کارایی روش‌های روندیابی در رودخانه زهره پرداخت. نتایج تحقیقات وی نشان داد مدل‌های روندیابی ماسکینگام، ماسکینگام کانژ و آت-کین به ترتیب اولویت دارند [۱۸]. قاسمیه (۲۰۰۵) کارایی روش‌های ماسکینگام و آت-کین اصلاح‌شده را در رودخانه بابلرود ارزیابی کرد و روش ماسکینگام را مدلی با دقت بیشتر نسبت به روش آت-کین اصلاح‌شده دانست [۱۹]. براتی و اکبری (۲۰۱۲) به بررسی و مقایسه روش‌های مختلف روندیابی هیدرولوژیکی سیلاب پرداختند. نتایج پژوهش آنها بیانگر آن است که روش ماسکینگام نسبت به روش مقادیر اجرایی، کانوکس و آت-کین اصلاح‌شده کارایی بیشتری دارد [۲۰]. عباسی‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) طی تحقیقی، کارایی روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی سیل را در بخشی از رودخانه دز، بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها بیانگر آن است که روش‌های کانوکس، ماسکینگام و آت-کین اصلاح‌شده به ترتیب بیشتری دقت را دارند [۲۱]. معنوی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش‌های آت-کین اصلاح‌شده و ماسکینگام به روندیابی سیل در بخشی از حوضه آبخیز تالار استان مازندران پرداختند. نتایج پژوهش آنها بیانگر دقت بیشتر روش ماسکینگام نسبت به روش آت-کین اصلاح‌شده است [۲۲].

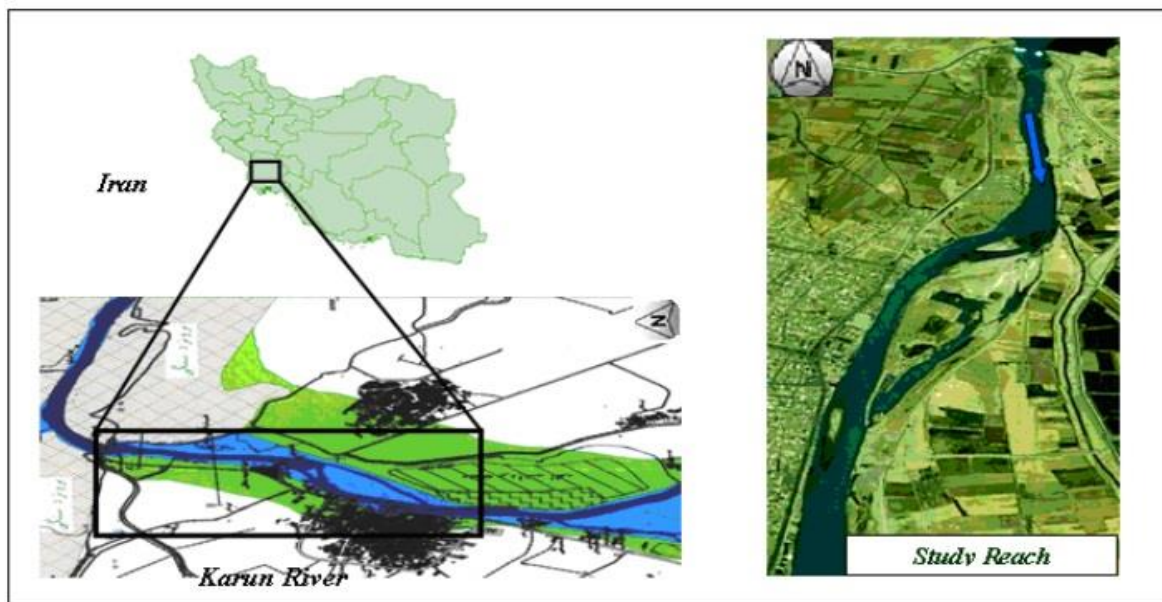
مطابق با پژوهش‌های بیان‌شده، هر یک از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی در شرایط مربوط به یک رودخانه بهترین عملکرد را داشته است و دقت زیاد آن در یک رودخانه، دلیلی بر داشتن دقت زیاد در سایر رودخانه‌ها نیست. در پژوهش حاضر، راهکاری برای افزایش دقت تمامی روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی ارائه شده است. به بیان دیگر، در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های ۴ سیل ثبت‌شده در بازه‌ای از رودخانه کارون که در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۰ در ایستگاه‌های هیدرومتری ملاثانی و اهواز ثبت شده است و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، تأثیر سیل مبنا روی دقت روش‌های روندیابی

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مطالعاتی

در پژوهش حاضر، از داده‌های ثبت‌شده توسط واحد مطالعات شرکت مدیریت منابع آب ایران که مربوط به دو ایستگاه هیدرومتری ملاثانی (Station No: 21-308, $48^{\circ}53' E$, $31^{\circ}35' N$) و اهواز (Station No: 21-309, $48^{\circ}40' E$, $31^{\circ}20' N$) که به ترتیب در بالادست و پایین‌دست محدوده مطالعه‌شده رودخانه کارون واقع در ایران هستند، استفاده شده است (شکل ۱).

هیدرولوژیکی (ماسکینگام خطی، مقادیر اجرایی، کانوکس و آت-کین اصلاح شده) بررسی شده است. به بیان دیگر، چنانچه دامنه تغییرات دبی ورودی سیل مبنا که برای محاسبه پارامترهای روش ماسکینگام خطی ($X, K, \Delta t$) استفاده می‌شود، به دامنه تغییرات دبی ورودی سیل محاسباتی که هیدروگراف خروجی آن با استفاده از پارامترهای یادشده و هیدروگراف ورودی محاسبه می‌شود، نزدیک‌تر باشد، دقت روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی در برآورد هیدروگراف خروجی افزایش می‌یابد.

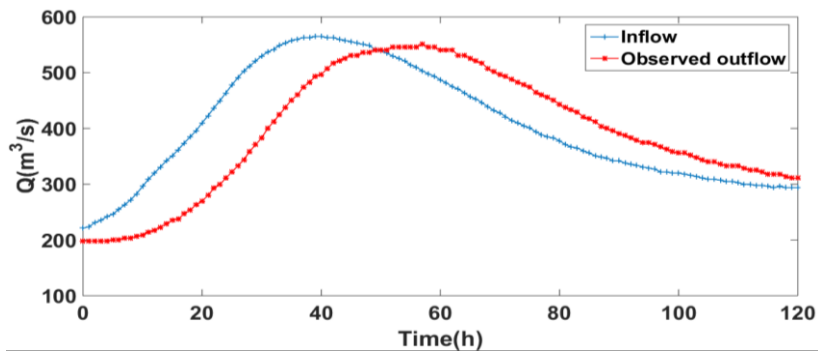


شکل ۱. محدوده مطالعاتی

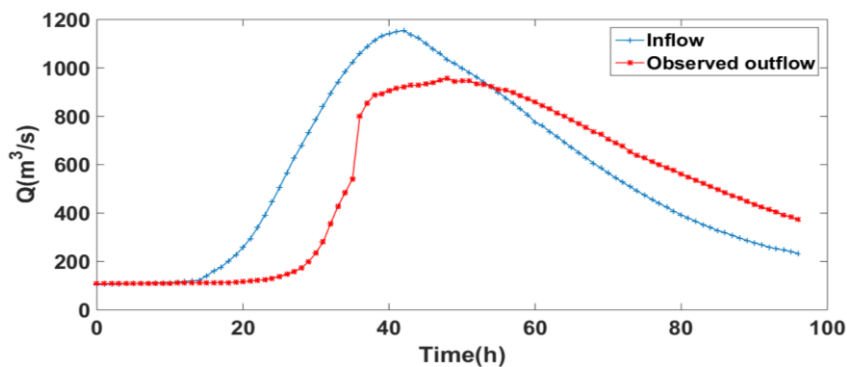
سیل چهارم استفاده شده است. مزیت اصلی روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی این است که بتوان با استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده از سیل مبنا (سیلی که مقادیر ورودی و خروجی آن ثبت شده باشد) هر سیل دیگری که در بازه مطالعه‌شده رخ داده است را مشروط بر اینکه مورفولوژی رودخانه تغییری نکرده باشد، روندیابی کرد (مشخصات سیل در پایین‌دست را به دست آورد). به همین دلیل در پژوهش حاضر، از پارامترهای به‌دست‌آمده از سیل مبنای اول تا چهارم برای محاسبه مقادیر تغییرات دبی نسبت به زمان هر چهار سیل استفاده شده است. شایان یادآوری است که هر چهار سیل مربوط به محدوده یادشده (ایستگاه هیدرومتری ملاثانی در بالادست و اهواز در پایین‌دست) رودخانه کارون است.

داده‌های محدوده بررسی‌شده رود کارون

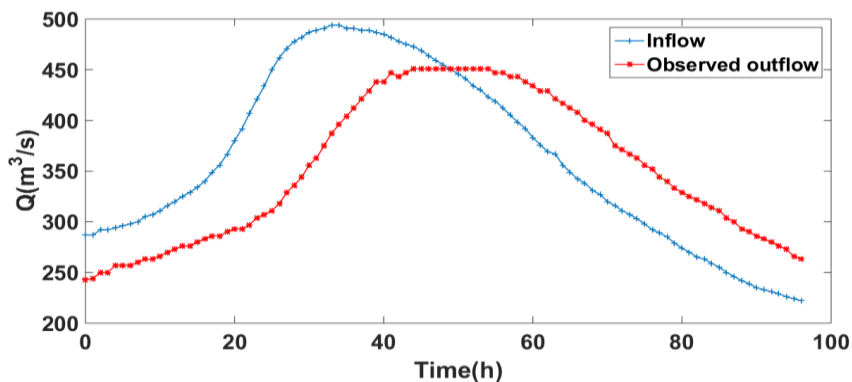
از داده‌های سیل (شکل ۲) با دامنه تغییرات دبی ورودی ۲۲۱ تا ۵۶۵ مترمکعب بر ثانیه که در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۰۷ تا ۱۳۹۰/۱۲/۱۱ رخ داده است، به عنوان سیل اول، داده‌های سیل (شکل ۳) با دامنه تغییرات دبی ورودی ۱۰۵ تا ۱۱۵۴ مترمکعب بر ثانیه که در تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۱۰ تا ۱۳۸۷/۱۲/۱۳ رخ داده است، به عنوان سیل دوم، داده‌های سیل (شکل ۴) با دامنه تغییرات دبی ورودی ۲۲۲ تا ۴۹۴ مترمکعب بر ثانیه که در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۳ تا ۱۳۹۰/۱۱/۱۶ رخ داده است، به عنوان سیل سوم و از داده‌های سیل (شکل ۵) با دامنه تغییرات دبی ورودی ۳۴۹ تا ۶۵۱ مترمکعب بر ثانیه که در تاریخ ۱۳۹۰/۰۸/۳۰ تا ۱۳۹۰/۰۹/۰۴ رخ داده است، به عنوان



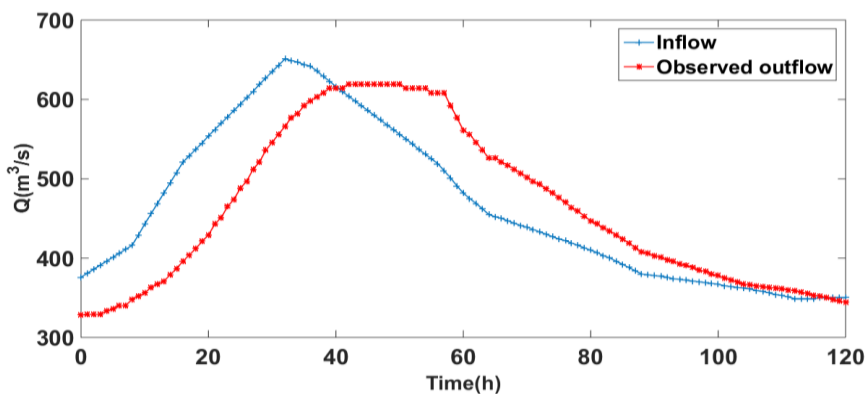
شکل ۲. هیدروگراف ورودی و خروجی سیل اول (۱۳۹۰/۱۲/۱۱ تا ۱۳۹۰/۱۲/۰۷)



شکل ۳. هیدروگراف ورودی و خروجی سیل دوم (۱۳۸۷/۱۲/۱۳ تا ۱۳۸۷/۱۲/۱۰)



شکل ۴. هیدروگراف ورودی و خروجی سیل سوم (۱۳۹۰/۱۱/۱۶ تا ۱۳۹۰/۱۱/۱۳)



شکل ۵. هیدروگراف ورودی و خروجی سیل چهارم (۱۳۹۰/۰۹/۰۴ تا ۱۳۹۰/۰۸/۳۰)

اگر ذخیره گوه‌ای را برابر با $K(W-O)$ فرض کنیم، رابطه ۶ را خواهیم داشت [۲۴]:

$$W = X(I-O) + O = XI + O(1-X) \quad (6)$$

بنابراین، در هر فاصله زمانی Δt ، می‌توان مقدار دبی خروجی را از رابطه ۷ به‌دست آورد [۲۴]:

$$O_{j+1} = \frac{W_{j+1} - I_{j+1}X}{1-X} \quad (7)$$

با قرار دادن روابط یادشده در معادله پیوستگی و چنانچه مقدار $S_j(1-X) + 0.5\Delta t W_j$ را برابر با R_j و مقدار $S_{j+1}(1-X) + 0.5\Delta t W_{j+1}$ را برابر با R_{j+1} در نظر بگیریم، رابطه ۸ را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۲۴]:

$$R_{j+1} = R_j + 0.5\Delta t(I_j + I_{j+1}) - \Delta t W \quad (8)$$

مقادیر R_j و R_{j+1} مقادیر اجرایی نامیده می‌شوند. حجم ذخیره نیز به صورت رابطه ۹ است:

$$S_{j+1} = K_{j+1} W_{j+1} \quad (9)$$

برای روندیابی سیل با روش مقادیر اجرایی، ابتدا مقدار W_j برای مقادیر معلوم I_j ، O_j و X محاسبه می‌شود و سپس، S_j ، R_j و R_{j+1} و مقدار W و درنهایت، مقدار O_{j+1} تعیین شده و با مقدار فرضی مقایسه می‌شود. چنانچه دو مقدار فرضی و محاسباتی با یکدیگر مساوی و یا نزدیک به یکدیگر باشند، مقدار دبی خروجی در این گام زمانی به‌دست می‌آید و در غیر این صورت، باید مقداری جدید فرض کرد و روند یادشده را برای به‌دست آوردن بهترین جواب ادامه داد [۲۴].

با توجه به خصوصیات بیان‌شده، هنگامی که رابطه دبی-ذخیره، خطی است، روش مقادیر اجرایی مشابه روش ماسکینگام خطی است.

روش کانوکس^۴

روش کانوکس از جمله روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی سیل در رودخانه است. در این روش $X=0$ در نظر گرفته می‌شود. در روش کانوکس، حجم ذخیره را می‌توان به‌صورت رابطه ۱۰ بیان کرد [۲۵]:

$$S = KO \quad (10)$$

روش ماسکینگام خطی^۱

روش ماسکینگام یکی از مدل‌های هیدرولوژیکی است. این روش طی مطالعات کنترل سیل توسط مک کارتی ارائه شد [۲۳]. ذخیره کل از دو قسمت ذخیره منشوری که تابع دبی خروجی است و ذخیره گوه‌ای یا تیغه‌ای که به تفاضل دبی‌های ورودی و خروجی بستگی دارد، تشکیل می‌شود [۴]. حال چنانچه رابطه بین ذخیره کل، دبی ورودی و خروجی (O,I,S) خطی فرض شود، می‌توان رابطه حجم ذخیره‌شده را به صورت رابطه ۱ بیان کرد:

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

معادله ۱ که به معادله ماسکینگام معروف است، اساس بحث در این روش را تشکیل داده و در آن X و K عبارت‌اند از: دو ضریب به گونه‌ای که با توجه به مجموعه داده‌ها، روابط یادشده را تا جای ممکن خطی کنند. X فاکتور وزنی است که بین صفر تا نیم در نظر گرفته می‌شود، K ثابت زمانی ذخیره، I دبی ورودی، O دبی خروجی و S حجم ذخیره است. با توجه به پیوستگی جریان و حذف حجم ذخیره‌شده از دو معادله یادشده، رابطه ۲ به‌دست می‌آید [۴]:

$$O_2 = C_1 I_2 + C_2 I_1 + C_3 O_1 \quad (2)$$

که در معادله یادشده C_3, C_2, C_1 به شرح روابط ۳-۵ به دست می‌آیند:

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{0.5\Delta t + KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{K - KX - 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (5)$$

روش مقادیر اجرایی^۲

روش مقادیر اجرایی از روش‌های هیدرولوژیکی است که در روندیابی سیل به کمک این روش از شدت جریان اجرایی (W) استفاده می‌شود و عبارت است از: شدت جریان دائمی فرضی که می‌تواند ذخیره‌های معادل ذخیره گوه‌ای علاوه بر ذخیره منشوری ایجاد کند [۲۴].

1. Linear Muskingum Method
2. Working Values
3. Working Discharge

پایه‌سازی ساده، تعداد کم پارامترهای قابل کنترل و سرعت همگرایی زیاد و همچنین بازده محاسباتی زیاد اشاره کرد. در اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله $t+1$ ام از الگوریتم از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. اگر منظور از z مؤلفه n ام بردار z باشد، آن‌گاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارت‌اند از: روابط ۱۳ و ۱۴:

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{iBest}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{gBest}[t] - x_j^i[t]) \quad (13)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (14)$$

که w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعداد تصادفی در بازه $(0,1)$ با توزیع یکنواخت و همچنین c_1 و c_2 پارامترهای یادگیری هستند که سبب می‌شوند نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و در این صورت، جست‌وجوی کامل‌تری روی فضای مربوطه انجام پذیرد، مقدار این پارامترها در بازه صفر و ۲ انتخاب می‌شوند. در معادله یادشده با گذشت زمان اگر ذره‌ای دارای تابع هزینه‌ای کمتر (یا تابع سودی بیشتر) از x_j^{gBest} باشد، جایگزین این ذره خواهد شد و مقدار هزینه و موقعیت این ذره به‌روزرسانی خواهد شد [۲۷ و ۲۸].

برای ارزیابی مقادیر بهینه پارامترهای X , K , Δt مدل ماسکینگام خطی، از کمینه کردن مقدار مجموع انحراف مطلق (SAD) که به صورت رابطه ۱۵ تعریف می‌شود، به عنوان تابع هدف در الگوریتم PSO استفاده شده است:

$$SAD = \sum_{i=1}^n |O_i - Q_i| \quad (15)$$

که در آن O_i , Q_i به ترتیب دبی خروجی مشاهده‌ای و دبی خروجی روندیابی شده (محاسباتی) هستند. فلوجارت استفاده‌شده در پژوهش حاضر برای بهینه‌یابی پارامترهای روش ماسکینگام خطی با استفاده از الگوریتم PSO و تابع هدف SAD در شکل ۶ ارائه شده است.

با قرار دادن رابطه ۱۰ در معادله پیوستگی، می‌توان رابطه ۱۱ را بیان کرد [۲۵]:

$$Q_{t+\Delta t} = cI_t + (1-c)Q_t \quad (11)$$

در رابطه ۱۸؛ I_t : دبی هیدروگراف ورودی در لحظه t ، Q_t : دبی هیدروگراف خروجی در لحظه t و $Q_{t+\Delta t}$: دبی هیدروگراف خروجی در لحظه $t + \Delta t$ است. همچنین ضریب C : ضریب کانوکس است و برای محاسبه آن، روابط متعددی به صورت جدول ۱ بیان شده است. در پژوهش حاضر، از روش تراول تایم برای محاسبه ضریب کانوکس استفاده شده است.

جدول ۱. روابط مربوط به ضریب کانوکس

عنوان روش	رابطه ضریب کانوکس
تراول تایم	$c = \frac{\Delta t}{k}$
سینگ	$c = \frac{\bar{V}}{1.7 + \bar{V}}$
سازمان حفاظت خاک آمریکا	$C = \frac{\bar{V}}{0.518 + \bar{V}}$
گرافیکی	$C = \frac{\sum(O_2 - O_1)(I_1 - O_1)}{\sum(I_1 - O_1)^2}$

روش آت-کین اصلاح‌شده^۱

در این روش چنانچه معادله پیوستگی به ازای Q_2 حل شود، رابطه ۱۲ را خواهیم داشت [۲۵]:

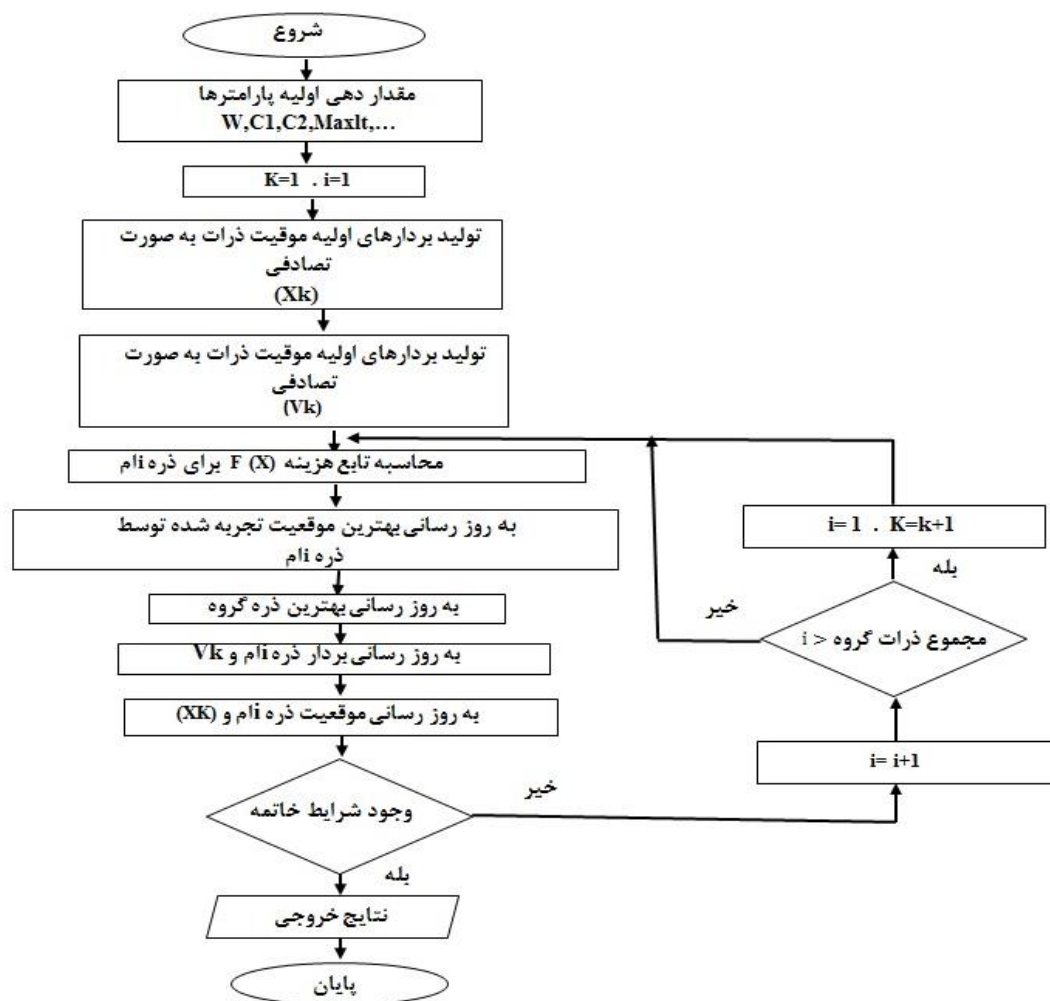
$$Q_{j+1} = C_m I_j + (1 - C_m) Q_j \quad (12)$$

در این رابطه I و Q به ترتیب دبی ورودی و دبی خروجی در زمان‌های z و $z+1$ هستند، Δt گام زمانی و K ثابت زمانی ذخیره است. مقدار $\frac{2\Delta t}{2K + \Delta t}$ برابر C_m فرض شده و به آن ضریب آت-کین گفته می‌شود.

شایان یادآوری است، پارامترهای X , K , Δt بیان‌شده در هر سه روش؛ مقادیر اجرایی، کانوکس و آت-کین اصلاح‌شده، همان پارامترهای به‌دست‌آمده از روش ماسکینگام خطی هستند.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲

این الگوریتم برای نخستین بار در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهات و کندی معرفی و ارائه شده است [۲۶]. از مزایای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌توان به ساختار و



شکل ۶. فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

پارامترهای یادشده، هیدروگراف خروجی هر ۴ سیل با استفاده از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی (ماسکینگام خطی، مقادیر اجرایی، کانوکس و آت-کین اصلاح‌شده) محاسبه شده است.

پارامترهای $X, K, \Delta t$ بهینه‌یابی شده برای هر ۴ سیل که داده‌های آنها در شکل‌های ۲-۵ ارائه شده، مطابق جدول ۲ هستند.

مقادیر مربوط به متوسط میانگین خطای نسبی (MRE) مربوط به هر یک از ۴ سیل به صورت جدول ۳ است. به طور مثال، ابتدا با استفاده از هیدروگراف ورودی و خروجی سیل اول، مقادیر مربوط به پارامترهای $X, K, \Delta t$ بهینه‌یابی شده و سپس با استفاده از پارامترهای یادشده، هیدروگراف خروجی مربوط به هر ۴ سیل با استفاده از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام خطی، مقادیر

به طور کلی، پژوهش حاضر از مراحل زیر تشکیل شده است:

- ۱) بهینه‌یابی پارامترهای روش ماسکینگام خطی با استفاده از الگوریتم PSO و داده‌های سیل اول
- ۲) استفاده از روابط روش‌های ماسکینگام خطی، مقادیر اجرایی، کانوکس و آت-کین اصلاح‌شده و پارامترهای مرحله ۱ برای محاسبه هیدروگراف خروجی هر ۴ سیل
- ۳) تکرار مراحل ۱ و ۲ برای هر یک از سیل‌های دوم، سوم و چهارم

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از الگوریتم PSO و داده‌های هر یک از ۴ سیل، پارامترهای روش ماسکینگام خطی $(X, K, \Delta t)$ بهینه‌یابی شده و سپس با استفاده از

اجرای، کانوکس و آت-کین اصلاح شده محاسبه شده و همین روند با استفاده از پارامترهای به دست آمده از سیل های دوم، سوم و چهارم نیز صورت گرفته است. به بیانی، با استفاده از هر یک از روش های روندیابی

هیدرولوژیکی برای هر یک از سیل های یاد شده، ۴ مقدار برای میانگین خطای نسبی محاسبه شده و سپس متوسط مقادیر یاد شده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای روش ماسکینگام خطی

سیل اول	سیل دوم	سیل سوم	سیل چهارم	پارامترها
۰/۴۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۳۴	۰/۴۱۹	X (nondimensional)
۱۲/۹۵۹	۱۱/۵۳۳	۱۳/۹۸۰	۱۴/۵۵۶	K (hour)
۰/۹۷۱	۱/۰۹۲	۱/۰۱۲	۱/۱۹۸	Δt (hour)

جدول ۳. مقادیر متوسط میانگین خطای نسبی و دامنه تغییرات دبی ورودی سیلاب ها برای روش های روندیابی هیدرولوژیکی

سیلاب	کمترین مقدار دبی ورودی (m^3/s)	بیشترین مقدار دبی ورودی (m^3/s)	درصد میانگین خطای نسبی % (MRE)		
			ماسکینگام خطی	مقادیر اجرایی	کانوکس
اول	۲۲۱	۵۶۵	۳/۴۷	۳/۴۷	۴/۵۸
دوم	۱۰۵	۱۱۵۴	۱۲/۴۲	۱۲/۴۲	۱۱/۷۸
سوم	۲۲۲	۴۹۴	۴/۹۳	۴/۹۳	۴/۷۰
چهارم	۳۴۹	۶۵۱	۳/۶۲	۳/۶۲	۴/۵۹

استفاده از روش های روندیابی هیدرولوژیکی (حل معادلات سنت ونانت) از آنجا که به مشخصات مقاطع عرضی رودخانه (هندسه مقاطع عرضی و ضریب زبری مانینگ) در فواصل مناسب، شرط مرزی بالادست و پایین دست نیاز دارد، امری پرهزینه و زمان بر است. از طرف دیگر، به دلیل تغییرات مشخصات مقاطع عرضی رودخانه در گذر زمان، باید داده های یاد شده در فواصل زمانی مناسبی نیز برداشت شود که خود دلیلی بر پیچیدگی و پرهزینه بودن روش های روندیابی هیدرولوژیکی است. در حالی که روندیابی سیل با استفاده از روش های روندیابی هیدرولوژیکی (روش ماسکینگام، روش مقادیر اجرایی، کانوکس و آت-کین اصلاح شده) علاوه بر اینکه دقت مناسبی در کارهای مهندسی دارد، فقط به هیدروگراف ورودی و خروجی محدود بررسی شده نیاز دارد و بدون نیاز به هیچ داده دیگری در محدوده مورد نظر صورت می گیرد. همچنین، با توجه به تحقیقات پیشین صورت گرفته توسط سایر محققان، هر یک از روش های روندیابی هیدرولوژیکی در شرایط مربوط به رودخانه مطالعه شده پژوهشگر، بهترین عملکرد را داشته است و

نمی توان بیان کرد که در رودخانه دیگر نیز همین عملکرد را داشته باشد. به همین دلیل در پژوهش حاضر، راهکاری ارائه شده که سبب افزایش دقت تمامی روش های روندیابی هیدرولوژیکی شده است.

به بیانی، بررسی های انجام شده بیانگر آن است که مقادیر پارامترهای X , K , Δt هر بازه ای از رودخانه، به مقادیر عددی هیدروگراف سیل ورودی و خروجی و یا به وسعت مساحت سیل گیری مقاطع مختلف رودخانه طی بازه بررسی شده بستگی دارد. به بیان دیگر، با افزایش مقادیر پیک هیدروگراف ورودی و افزایش وسعت سیل گیری رودخانه، مقادیر پارامترهای X , K , Δt تغییر می یابد. مطابق جدول ۳، از آنجا که دامنه تغییرات دبی ورودی سیل دوم نسبت به سه سیل دیگر مقادیر متفاوتی دارد، مقادیر مربوط به متوسط میانگین خطای نسبی آن نیز بیشتر از سه سیل دیگر محاسبه شده است. بنابراین، چنانچه مقادیر دبی ورودی سیل محاسباتی به مقادیر دبی ورودی سیل مشاهداتی نزدیک تر باشد، دقت روش های روندیابی هیدرولوژیکی در برآورد هیدروگراف سیل خروجی بیشتر خواهد شد.

method considering lateral flow. Journal of Hydrology. 2015. 489-499.

- [7]. Tsai CW. Flood routing in mild-sloped rivers—wave characteristics and downstream backwater effect. Journal of Hydrology. 2005; 308(1-4):151-167.
- [8]. Farahani NN, Farzin S, Karami H. Flood routing by Kidney algorithm and Muskingum model. Natural Hazards. 2018:1-19.
- [9]. Nagesh Kumar D, Janga Reddy M. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. Journal of Water Resources Planning and Management. 2007; 133(3):192-201.
- [10]. Meraji, S. H. Optimum design of flood control systems by particle swarm optimization algorithm (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Iran University of Science and Technology). 2004.
- [11]. Afshar A, Kazemi H, Saadatpour M. Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh Reservoir, Iran. Water resources management. 2011; 25(10):2613-2632.
- [12]. Lu WZ, Fan HY, Leung AY, Wong JC. Analysis of pollutant levels in central Hong Kong applying neural network method with particle swarm optimization. Environmental monitoring and assessment. 2002;79(3):217-230.
- [13]. Chau K. A split-step PSO algorithm in prediction of water quality pollution. International Symposium on Neural Networks. 2005; 1034-1039.
- [14]. Chu HJ, Chang LC. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. Journal of Hydrologic Engineering. 2009; 14(9):1024-1027.
- [15]. Moghaddam A, Behmanesh J, Farsijani A. Parameters estimation for the new four-parameter nonlinear Muskingum model using the particle swarm optimization. Water resources management. 2016; 30(7):2143-2160.
- [16]. Bazargan J, Norouzi H. Investigation the effect of using variable values for the parameters of the linear Muskingum method using the particle swarm algorithm (PSO). Water Resources Management. 2018; 32(14):4763-4777.
- [17]. Abdolshahnejad, A. Comparison of different methods hydraulic and hydrologic in flood routing (Case Study: Part of Karoun river), M.Sc. Thesis, University of Tehran. 1997. 230 pp. [Persian].

نتیجه‌گیری

روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی سیلاب به دلیل سادگی و دقت قابل قبول، در کارهای مهندسی و مدیریت سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولوژیکی مقابله با سیلاب، کاربرد فراوانی دارند. راهکار ارائه‌شده در پژوهش حاضر، سبب افزایش دقت تمامی روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی شده است. به‌بیانی، نتایج ارائه‌شده در پژوهش حاضر به شرح زیر است:

از آنجا که، دامنه تغییرات دبی ورودی سیل دوم (۱۰۵ تا ۱۱۵۴ مترمکعب بر ثانیه) نسبت به دامنه تغییرات دبی ورودی سه سیل دیگر مقادیر متفاوتی دارد، مقادیر متوسط میانگین خطای نسبی سیل دوم در تمامی روش‌ها بیش از ۱۱ درصد بوده، در حالی که مقادیر یادشده برای سه سیل دیگر، کمتر از ۵ درصد محاسبه شده است. به‌بیان دیگر، برای محاسبه هیدروگراف خروجی سیلاب محاسباتی، استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده از سیلاب مبنا با دامنه تغییرات دبی ورودی نزدیک به دامنه تغییرات دبی ورودی سیلاب محاسباتی، به‌دلیل تأثیر وسعت سیل‌گیری رودخانه‌ها روی مقادیر پارامترهای X , K , Δt ، سبب افزایش دقت روش‌های یادشده شده است.

قدردانی

از واحد مطالعات شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌دلیل کمک‌های زیادی که در جمع‌آوری و در اختیار گذاشتن داده‌های مورد نیاز در انجام پژوهش حاضر داشتند، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- [1]. Vafaei F, Harati AN. Strategic management in decision support system for coastal flood management. 2010; 4(1): 169-176.
- [2]. Raghunath HM. Hydrology: principles, analysis and design. New Age International; 1997.
- [3]. Weinmann PE, Laurenson EM. Approximate flood routing methods: A review. Journal of the Hydraulics Division. 1979;105(12):1521-1536.
- [4]. Chow, Vente. Open channel hydraulics, Newyork;Macgraw-Hill book company. 1959.
- [5]. SHAW, EM. Hydrology in Practice. T.J. Press (Pads tow) LTD , Cornwall, UK. 1994.
- [6]. Yadav B, Perumal M, Bardossy A. Variable parameter McCarthy–Muskingum routing

- [18]. Dehghani, M. The Efficiency Assessment of Flood Routing Methods in Tidal Zohre River, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modarres University. 2004. 104 pp. [Persian].
- [19]. Ghasemieh, H. Investigation of Muskingum and Modified Att-Kin Method Efficiency in river Flood Routing (Case Study, Babolroud River), M.Sc. Thesis, University of Mazandaran. 2005. 136 pp. [Persian].
- [20]. Barati, R. & Akbari, GM. Comparison of Flood Routing Hydrology Models in Rivers. Iranian Water Researches Journal, 2012. 105-114. [Persian].
- [21]. Abbasizadeh, M. & Mahdavi. M. & Salajeghe. A. Evaluation of Flood Routing Methods Efficiency (Case Study: Dez River). 2010. 63-76. [Persian].
- [22]. Manavi Amiri. S.M, & Malekian. A, & Shahedi. K, & Motamed Vaziri. B. Evaluation of Muskingum and Modified Att-Kin Methods Efficiency in Flood Routing (Case Study: Talar Watershed, Mazandaran Province). 2013. 106-119. [Persian].
- [23]. McCarthy GT. The unit hydrograph and flood routing, Conference of North Atlantic Division. US Army Corps of Engineers, New London, CT. US Engineering. 1938.
- [24]. Hamed, MH. Open Channel Hydraulics, Khaje Nasir University. Second edition. 2011. (In Persian).
- [25]. Mahdavi, M. Applied hydrology. Tehran University. Second edition. 2013. [Persian].
- [26]. Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory.. In MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. 1995.39-43
- [27]. Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer. In 1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360) 1998. 69-73.
- [28]. Di Cesare N, Chamoret D, Domaszewski M. A new hybrid PSO algorithm based on a stochastic Markov chain model. Advances in engineering software. 2015. 127-137.