

## ارزیابی کارایی روش ماسکینگام خطی در روندیابی سیل در سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه

هادی نوروزی<sup>۱</sup>، جلال بازرگان<sup>۲\*</sup>

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

۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۰، تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۰۸/۱۶)

### چکیده

یکی از کاربردهای مهم سدهای سنگریزه‌ای، کنترل سیل از طریق کاهش دبی اوج سیل ورودی است. بررسی اینکه چه مقدار از دبی ورودی به مخزن دارای سد سنگریزه‌ای در شرایط جریان غیرماندگار به پایین دست منتقل می‌شود، اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر، روندیابی سیل در سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه با استفاده از ۴ نمونه از داده‌های آزمایشگاهی موجود و روش ماسکینگام خطی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بررسی شده و تأثیر طول سد سنگریزه‌ای و فاصله بین دو سد و همچنین، تأثیر اندازه قطر سنگدانه‌ها روی ضریب K روش ماسکینگام خطی ارزیابی شده است. نتایج بیانگر آن است که مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) ۴ آزمایش استفاده شده در پژوهش حاضر، به ترتیب برابر با ۴/۹، ۳/۴، ۴/۳۵ و ۳/۵۵ درصد و مقادیر مربوط به خطای نسبی دبی اوج (DPO) آزمایش‌های یادشده نیز به ترتیب برابر با ۱/۵۸، ۰/۴۷، ۲/۸۶ و ۱/۷۸ درصد محاسبه شده که بیانگر دقت زیاد روش ماسکینگام خطی در برآورد هیدروگراف خروجی است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد هرچه فاصله بین هیدروگراف ورودی و خروجی افزایش یابد، مقدار K افزایش یافته و هرچه اندازه قطر سنگدانه‌ها افزایش یابد، سرعت جریان افزایش یافته و به تبع آن، مقدار K کاهش می‌یابد.

**کلیدواژگان:** الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، روندیابی سیل، روش ماسکینگام خطی، سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه.

## مقدمه

در حالت کلی، جریان آب در محیط‌های متخلخل، به دو صورت شکل می‌گیرد. در محیط‌های متخلخل با مصالح ریزدانه مانند خاک رس و سیلت، با توجه به سرعت کم، جریان به‌طور آرام و لایه‌ای است. برای تحلیل و محاسبات مشخصات این نوع جریان‌ها مانند سرعت، دبی، تراز انرژی و سطح آزاد آب، از رابطه داری به شکل رابطه ۱ استفاده می‌شود [۱]:

$$i = \left(\frac{1}{k}\right)V \quad (1)$$

که در آن  $V$ : سرعت جریان (m/s)،  $k$ : قابلیت هدایت

هیدرولیکی که بستگی به خصوصیات فیزیکی ذرات و مشخصات جریان دارد و  $i$ : گرادیان هیدرولیکی است.

در محیط‌های متخلخل دانه‌درشت نظیر شن و قلوه‌سنگ، سرعت جریان افزایش می‌یابد و جریان به‌طور آرام نخواهد بود. در این نوع جریان‌ها، رابطه داری کارایی خود را از دست می‌دهد [۲] و رابطه بین سرعت منفذی جریان و گرادیان هیدرولیکی در جریان‌های غیرداری به‌صورت غیر خطی است که معمولاً به دو صورت توانی و چندجمله‌ای مطابق با روابط ۲ و ۳ بیان می‌شوند [۳-۵].

$$i = mV^n \quad (2)$$

$$i = aV + bV^2 \quad (3)$$

در روابط یادشده،  $V$  نشان‌دهنده سرعت منفذی،  $m$  و  $n$  مقادیری وابسته به خصوصیات محیط متخلخل، سیال و جریان بوده و  $a$  و  $b$  ضرایبی هستند که تابعی از خصوصیات محیط متخلخل و سیال هستند.

معادله انرژی یکی از روابط حاکم بر جریان سیالات است که به همراه دو معادله پیوستگی و مومنوم (معادلات سن-ونان) اساس روابط حاکم بر جریان سیال را تشکیل می‌دهند. معمولاً با حل دو معادله از سه معادله یادشده می‌توان خصوصیات جریان مانند عمق و سرعت را به دست آورد که انتخاب دو معادله بررسی شده بستگی به شرایط جریان دارد [۶]. معمولاً برای محاسبه مشخصات جریان در بدنه سدهای پاره‌سنگی و جریان در محیط‌های متخلخل از حل معادلات سن-ونان که به‌صورت روابط ۴ و ۵ است، استفاده می‌شود که شامل یک دسته معادلات تفاضلات جزئی هذلولی هستند.

## رابطه پیوستگی:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

معادله اندازه حرکت:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (5)$$

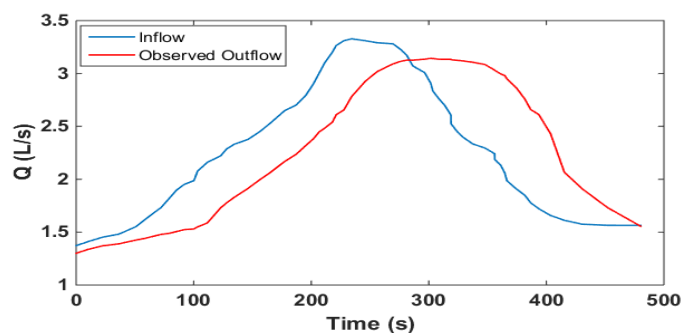
در روابط یادشده،  $Q$  = دبی جریان،  $A$  = سطح مقطع جریان عبوری،  $S_0$  = شیب کف،  $S_f$  = شیب خط تراز انرژی،  $V$  = سرعت جریان،  $h$  = عمق جریان،  $g$  = شتاب گرانش و  $t$  = زمان است.

تسای با بررسی روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی در روندیابی سیل، به این نتیجه رسید که روندیابی هیدرولیکی نسبت به روندیابی هیدرولوژیکی دقیق‌تر است، ولی مشکل اصلی آن دشواری و پیچیدگی حل معادلات مربوطه است [۷]. حسینی و جوی در پژوهشی به توسعه مدلی غیر ماندگار برای جریان از میان محیط متخلخل درشت‌دانه همگن پرداختند. این مدل بر اساس روابط اساسی سن-ونان و معادله فورسهایمر شکل گرفته و در آن از روش حل عددی چهارنقطه‌ای تفاضلات محدود استفاده شده است [۸]. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک 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 پارامترهای روش ماسکینگام خطی [۱۴-۱۷] کاربرد دارد. محققان بسیاری از جمله [۱۸-۲۴] جریان درون محیط‌های سنگریزه‌ای را بررسی کرده‌اند. همچنین، پژوهشگران بسیاری از جمله [۲۵-۲۹] از روش ماسکینگام برای روندیابی سیل در کانال‌ها و رودخانه‌ها استفاده کردند.

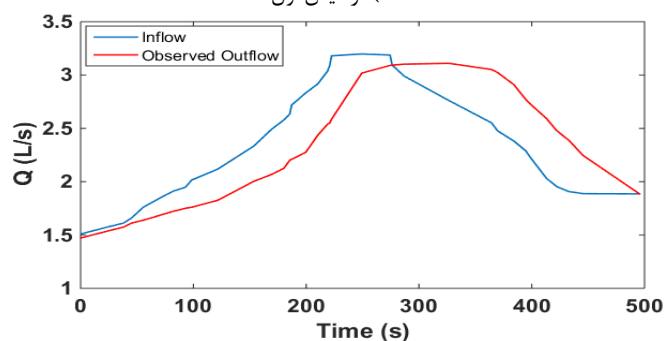
در پژوهش‌های قبلی، با استفاده از روش روندیابی هیدرولیکی (حل معادلات سن-ونان) به بررسی جریان غیر ماندگار درون مصالح سنگریزه‌ای پرداخته شده است. برای استفاده از معادلات یادشده (معادلات ۴ و ۵) باید مشخصات مقطع، شرط مرزی بالادست و پایین‌دست، شرط مرزی اولیه و سایر مشخصات محیط با دقت مناسبی در دسترس باشد که امری زمان‌بر و پرهزینه است. همچنین، استفاده از روابط یادشده نیز پیچیده و زمان‌بر است. در حالی که استفاده از

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌ها [۳۰]

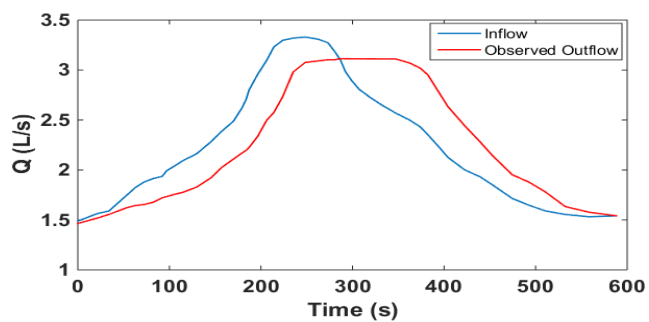
شماره آزمایش	$d_{50}$ (میلی‌متر)	طول محیط سنگریزه‌ای (متر)	ارتفاع محیط سنگریزه‌ای (متر)	فاصله بین دو سد (متر)
۱	۱۴/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۴
۲	۱۴/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۷۵
۳	۲۱	۰/۵	۰/۴	۰/۵
۴	۲۱	۰/۵	۰/۴	۱



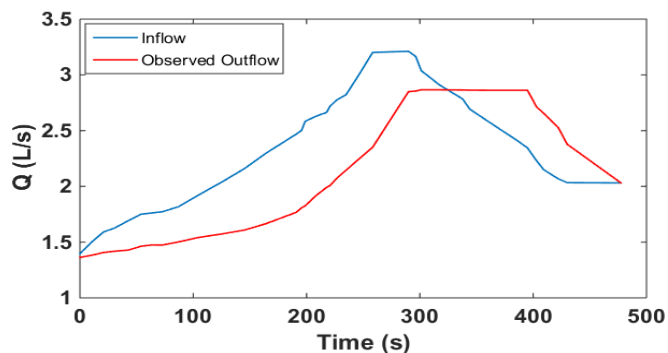
الف) آزمایش اول



ب) آزمایش دوم



ج) آزمایش سوم



د) آزمایش چهارم

شکل ۱. هیدروگراف ورودی و خروجی آزمایش‌ها [۳۰]

$$S = K[XI + (1 - X)O] \quad (۶)$$

معادله ۶ که به معادله ماسکینگام معروف است، اساس بحث در این روش را تشکیل داده و در آن  $X$  و  $K$  عباراتند 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 ۷ به دست می‌آید [۳۲]:

$$O_2 = C_1 I_2 + C_2 I_1 + C_3 O_1 \quad (۷)$$

که در معادله یادشده  $C_3, C_2, C_1$  با استفاده از روابط ۸-۱۰ به دست می‌آیند:

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (۸)$$

$$C_2 = \frac{0.5\Delta t + KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (۹)$$

$$C_3 = \frac{K - KX - 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (۱۰)$$

### الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۲</sup>

این الگوریتم برای نخستین بار در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهات و کندی معرفی شد [۳۳]. ازدحام ذرات نوعی الگوریتم جست‌وجوی مبتنی بر جمعیت است که همانند الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچه‌ها، زنبور عسل و... از طبیعت الهام گرفته شده و بر پایه هوش جمعی و رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها طرح‌ریزی شده است. از مزایای این الگوریتم می‌توان به ساختار و پیاده‌سازی ساده، تعداد کم پارامترهای قابل کنترل و سرعت همگرایی بالا و همچنین بازده محاسباتی بالا اشاره کرد. در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله  $t+1$  ام از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. اگر منظور از  $z$  مؤلفه نام بردار  $z$  باشد، آن گاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عباراتند از [۳۳]:

روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی مانند روش ماسکینگام خطی، علاوه بر اینکه دقت مناسبی در کارهای مهندسی دارد، بسیار ساده‌تر است و به داده‌های کمتری نیز نیاز دارد. از طرفی، در پژوهش‌های قبلی، از روش ماسکینگام خطی برای روندیابی سیل در رودخانه‌ها و کانال‌ها استفاده شده است، در حالی که در پژوهش حاضر از روش یادشده برای روندیابی سیل در سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه استفاده شده است. همچنین، در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر فاصله بین هیدروگراف ورودی و خروجی و تأثیر اندازه قطر سنگدانه‌ها روی ضریب  $K$  روش ماسکینگام خطی پرداخته شده است.

### مواد و روش‌ها

#### داده‌های استفاده‌شده

در پژوهش حاضر از داده‌های آزمایشگاهی کلاگر نفت‌چالی استفاده شده است [۳۰]. آزمایش‌های یادشده درون کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع دیواره‌های شیشه‌ای ۴۵ سانتی‌متر و در دانشگاه تربیت مدرس صورت گرفته است. مشخصات مربوط به قطر مصالح استفاده‌شده، طول محیط سنگریزه‌ای، ارتفاع محیط سنگریزه‌ای و فاصله بین دو سد استفاده‌شده در آزمایشگاه برای هر یک از ۴ آزمایش استفاده‌شده در پژوهش حاضر در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، هیدروگراف ورودی و خروجی مربوط به هر یک از آزمایش‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. شایان یادآوری است هیدروگراف ورودی هر ۴ آزمایش استفاده‌شده در پژوهش حاضر، تقریباً یکسان ایجاد شده است.

#### روش ماسکینگام خطی<sup>۱</sup>

روش ماسکینگام یکی از مدل‌های هیدرولوژیکی است. این روش طی مطالعات کنترل سیل توسط مک کارتی ارائه شد [۳۱]. 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 [۳۲]. حال چنانچه رابطه بین ذخیره کل، دبی ورودی و خروجی ( $O, I, S$ ) خطی فرض شود، می‌توان رابطه حجم ذخیره‌شده را به صورت رابطه ۶ بیان کرد:

۳) انتخاب بهترین ذره براساس فاصله ازدحامی؛

۴) بهروزرسانی  $c_1$ ،  $c_2$  و  $w_i$ ؛

۵) بهروزرسانی سرعت، موقعیت ذره و آرشیو الگوریتم؛

۶) تکرار مراحل قبل تا رسیدن به شرط توقف.

برای ارزیابی مقادیر بهینه پارامترهای  $X$ ،  $K$ ،  $\Delta t$  در مدل ماسکینگام خطی، از کمینه کردن مقدار مجموع انحراف مطلق (SAD) که به صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌شود، به‌عنوان تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است:

$$SAD = \sum_{i=1}^n |O_i - Q_i| \quad (13)$$

که در آن  $O_i$ ،  $Q_i$  به ترتیب دبی خروجی مشاهداتی و دبی خروجی روندیابی شده (محاسباتی) هستند.

روندنمای استفاده‌شده در پژوهش حاضر برای بهینه‌یابی پارامترهای روش ماسکینگام خطی با استفاده از الگوریتم PSO و تابع هدف SAD در شکل ۲ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، برای روندیابی سیل در سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه، از روش ماسکینگام خطی استفاده شده است. همچنین، تأثیر اندازه قطر، طول و فاصله محیط سنگریزه‌ای روی ضریب  $K$  روش ماسکینگام خطی بررسی شده است. شایان یادآوری است در روندیابی سیل با استفاده از روش ماسکینگام خطی، برای بهینه‌یابی پارامترهای روش یادشده، تنها به هیدروگراف ورودی و خروجی ثبت‌شده نیاز است. در حالی که برای استفاده از معادلات سن-ونان، باید مشخصات مقطع، شرط مرزی بالادست و پایین‌دست، شرط مرزی اولیه و سایر مشخصات محیط با دقت مناسبی در دسترس بوده و محاسبات آن نسبت به روش ماسکینگام خطی بسیار پیچیده‌تر است. در این پژوهش، برای بهینه‌یابی پارامترهای  $X$ ،  $K$ ،  $\Delta t$  از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است.

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{iBest}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{gBest}[t] - x_j^i[t]) \quad (11)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (12)$$

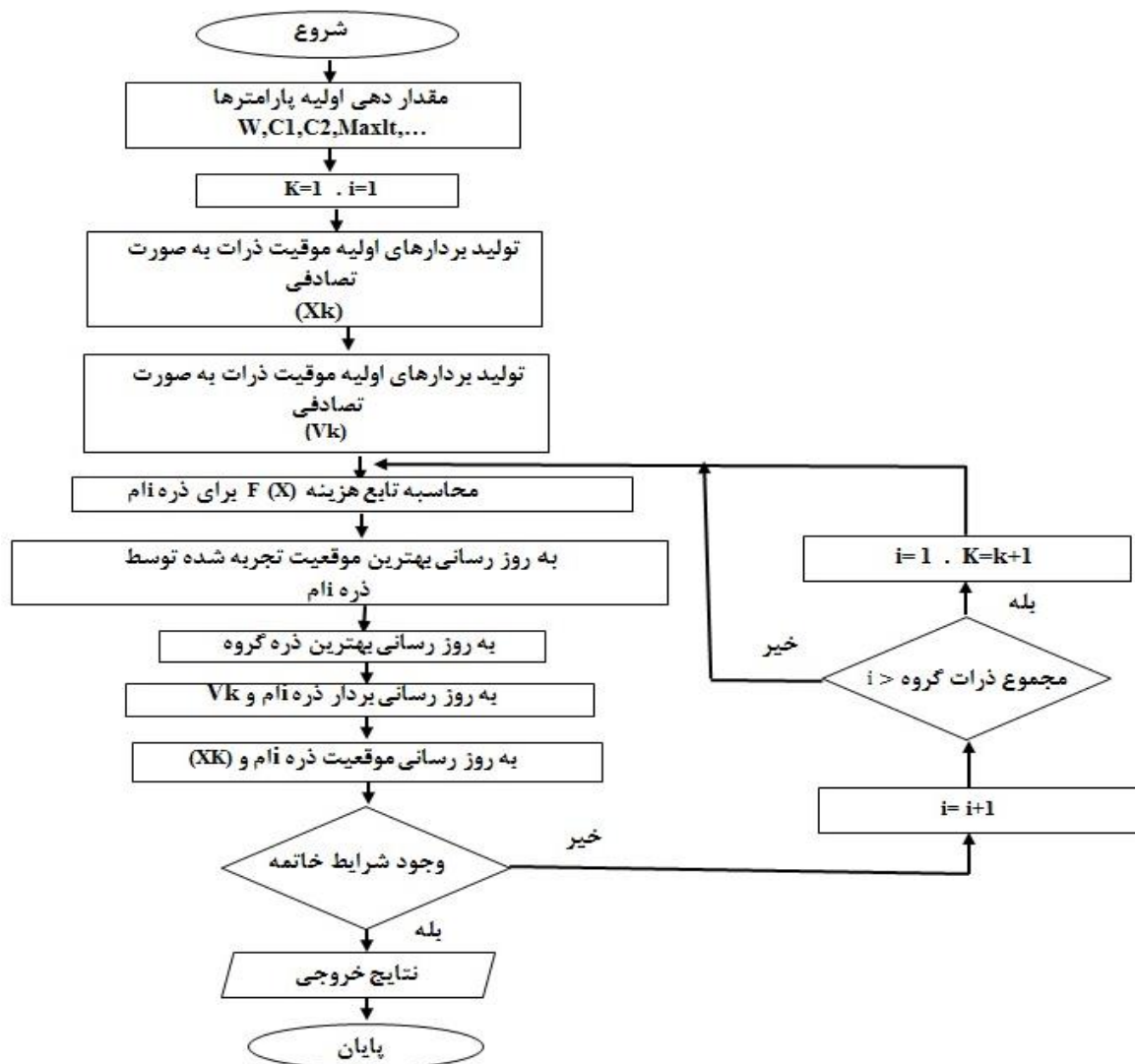
که  $w$  ضریب اینرسی،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی در بازه صفر و یک با توزیع یکنواخت و همچنین،  $c_1$  و  $c_2$  پارامترهای یادگیری هستند که سبب می‌شوند نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و در این صورت، جست‌وجوی کامل‌تری روی فضای مربوطه انجام پذیرد، مقدار این پارامترها در بازه صفر و ۲ انتخاب می‌شوند.  $c_1$  (پارامتر شناختی) ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل  $c_2$  (پارامتر اجتماعی) ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع است. در معادله یادشده با گذشت زمان اگر ذره‌ای دارای تابع هزینه‌ای کمتر (یا تابع سودی بیشتر) از  $x_j^{gBest}$  باشد، جایگزین این ذره می‌شود و مقدار هزینه و موقعیت این ذره بهروزرسانی خواهد شد. معادله بهروزرسانی سرعت سه مؤلفه دارد. مؤلفه اول این معادله هم‌راستا با سرعت ذره در مرحله قبلی است و به همین دلیل، به مؤلفه اینرسی موسوم است. مؤلفه یادشده نمایانگر تمایل ذرات گروه برای حفظ جهت حرکت خود در فضای جست‌وجو است. همان‌طور که در معادله ۸ مشاهده می‌شود، عملکرد الگوریتم تحت تأثیر بهترین موقعیت هر ذره (بهترین تجربه انفرادی ذره) و همچنین، موقعیت بهترین ذره در همسایگی (بهترین تجربه جمعی) همان ذره است. به‌بیانی، هر ذره با نسبت خاصی، به‌سمت بهترین مقدار خود و به سمت بهترین ذره همسایگی خود جذب می‌شود. به همین دلیل، مؤلفه‌های این معادله به مؤلفه شناختی و مؤلفه اجتماعی موسوم هستند [۳۴] و [۳۵].

به طور کلی، مراحل شبیه‌سازی الگوریتم مورد نظر به شرح زیر است:

۱) ایجاد جمعیت اولیه به طور تصادفی؛

۲) تخصیص شایستگی بر مبنای رتبه جبهه

مغلوب‌نشده و فاصله ازدحامی آنها؛



شکل ۲. روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

## نتایج و بحث

که برابر با مجموع طول هر دو سد و فاصله بین آنها که در جدول ۱ بیان شده است)، پارامترهای روش ماسکینگام خطی که با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌یابی شده و همچنین، مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) و خطای نسبی دبی اوج (DPO) هر یک از آزمایش‌ها در جدول ۲ بیان شده است. شایان یادآوری است، مقادیر یادشده برای مقایسه هیدروگراف خروجی مشاهداتی که در آزمایشگاه ثبت شده با مقادیر هیدروگراف خروجی محاسباتی که با استفاده از روش ماسکینگام خطی به دست آمده است، محاسبه شده و در جدول ۲ بیان شده است.

در پژوهش حاضر به بررسی روش ماسکینگام خطی در برآورد هیدروگراف خروجی در سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه پرداخته شده است. داده‌های آزمایشگاهی استفاده‌شده در این پژوهش، هیدروگراف ورودی تقریباً یکسانی دارند و تفاوت در قطر سنگدانه‌ها و طول کل بین دو بازه ورودی و خروجی (مجموع طول محیط سنگریزه‌ای و فاصله بین دو سد) است. به همین دلیل، دو عامل یادشده که روی ضریب  $K$  تأثیر دارند، بررسی شده است. فاصله بین هیدروگراف ورودی و خروجی (فاصله کل

جدول ۲. مقادیر پارامترهای روش ماسکینگام خطی (X, K, Δt) و مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) و خطای نسبی دبی اوج (DPO) هر یک از آزمایش‌ها

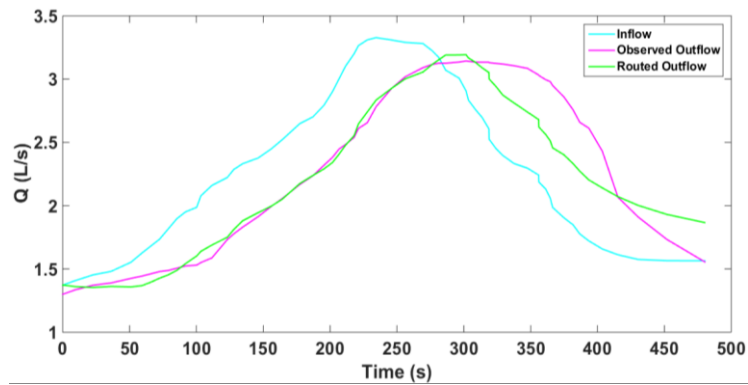
DPO %	MRE %	(hr) Δt	K (hr)	X	فاصله کل (متر)	شماره آزمایش
۱/۵۸	۴/۹	۰/۰۱۰	۰/۰۷۶	۰/۳۲۱	۱/۲	۱
۰/۴۷	۳/۴	۰/۰۲۵	۰/۱۱۷	۰/۲۷۷	۱/۵۵	۲
۲/۸۶	۴/۳۵	۰/۰۱۹	۰/۰۹۱	۰/۲۳۸	۱/۵	۳
۱/۷۸	۳/۵۵	۰/۰۲۸	۰/۲۵۲	۰/۲۰۷	۲	۴

یکدیگر برابر بوده ولی فاصله بین دو سد در آزمایش ۲ بزرگ‌تر از آزمایش ۱ است (در آزمایش ۲، ۰/۷۵ و در آزمایش ۱، ۰/۴ متر است). به همین دلیل، مطابق جدول ۱، مقدار بهینه ضریب K آزمایش ۲ بزرگ‌تر از آزمایش ۱ است. به همین ترتیب، در آزمایش ۴ و ۳ که تنها تفاوت آنها در فاصله بین دو سد است، مقدار ضریب K آزمایش ۴ بزرگ‌تر از آزمایش ۳ بهینه‌یابی شده است. در آزمایش ۲ و ۳، فاصله کل تقریباً برابر بوده و قطر سنگدانه‌های آزمایش ۳ بزرگ‌تر از آزمایش ۲ است. به همین دلیل، مقدار ضریب K در آزمایش ۳ به دلیل سرعت بیشتر جریان، بزرگ‌تر از مقدار ضریب K آزمایش ۲ بهینه‌یابی شده است.

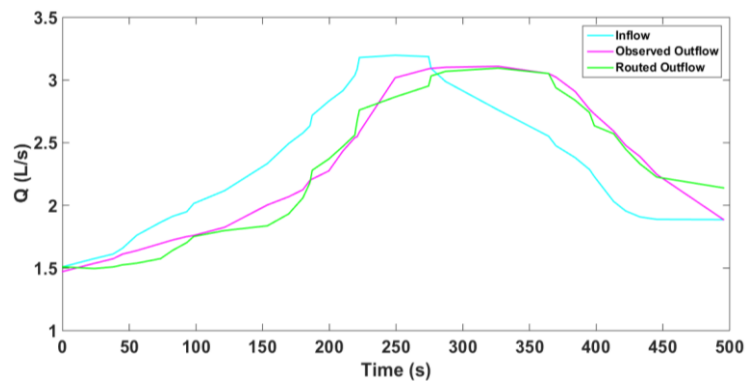
همچنین مطابق جدول ۲، مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) و خطای نسبی دبی اوج (DPO) که در کارهای مهندسی سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی اهمیت زیادی دارد، برای هر ۴ سیل از دقت مناسبی برخوردار است. به بیان دیگر، برای محاسبات هیدروگراف خروجی از سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه، استفاده از روش ماسکینگام خطی دقت زیادی دارد. هیدروگراف ورودی، هیدروگراف خروجی ثبت‌شده در آزمایشگاه و هیدروگراف خروجی محاسبه‌شده با استفاده از روش ماسکینگام خطی، برای هر ۴ آزمایش در شکل ۳ آورده شده است.

پارامتر K تقریباً برابر فاصله زمانی است که موج سیل از بین دو بازه عبور می‌کند و دارای واحد زمان بوده و به طول بازه و سرعت موج سیل وابسته است [۶]. به بیان دیگر، هر چه فاصله بین هیدروگراف ورودی و خروجی بیشتر باشد، سیل زمان بیشتری برای رسیدن از بالادست به پایین‌دست نیاز دارد و به تبع آن، مقدار K نیز باید افزایش یابد که مقادیر بهینه‌یابی شده برای مقدار K که در جدول ۲ بیان شده نیز بیانگر همین موضوع است. از طرفی، هر چه مقدار سرعت موج بیشتر باشد، سیلاب زمان کمتری برای عبور از بالادست به پایین‌دست نیاز دارد و به تبع آن، باید مقدار K نیز کاهش یابد. همان‌طور که در جدول ۲ نیز بیان شده است، فاصله کل در آزمایش‌های ۲ و ۳ تقریباً با یکدیگر برابر است. مطابق جدول ۱، اندازه قطر سنگدانه‌های آزمایش ۲ برابر با ۱۴/۵ میلی‌متر و اندازه قطر سنگدانه‌های آزمایش ۳ برابر با ۲۱ میلی‌متر است. همچنین، از آنجا که هر چه اندازه سنگدانه‌ها درشت‌تر باشد، مقدار سرعت جریان نیز بیشتر می‌شود و سیلاب در زمان کمتری از بازه مورد نظر عبور می‌کند و به تبع آن، مقدار K نیز باید کمتر شود که این موضوع نیز در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

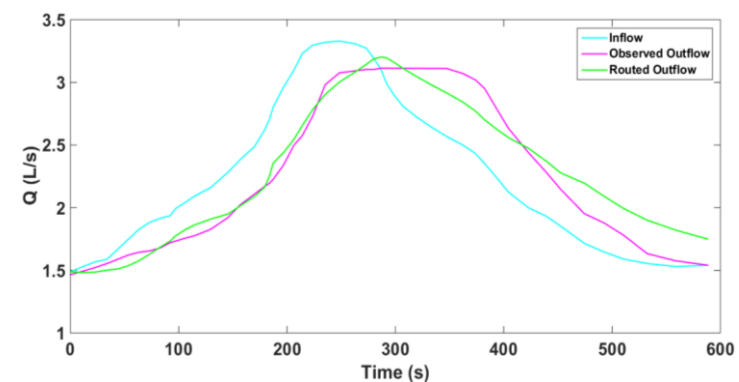
به بیان دیگر، مطابق جدول ۱، در آزمایش‌های ۱ و ۲، قطر سنگدانه‌ها، طول و ارتفاع محیط سنگریزه‌ای با



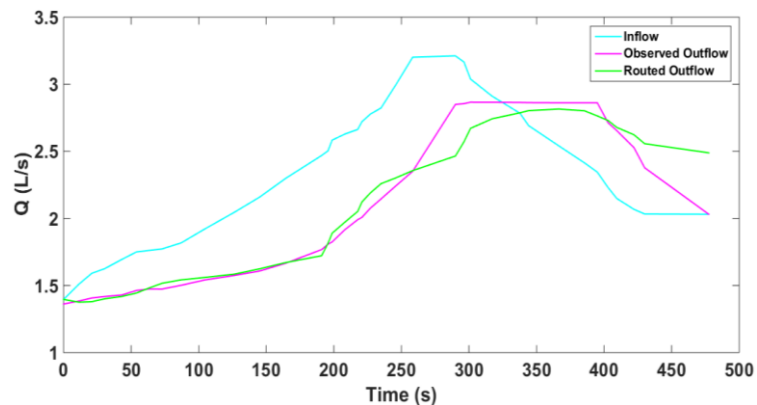
الف) آزمایش اول



ب) آزمایش دوم



ج) آزمایش سوم



د) آزمایش چهارم

شکل ۳. هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسباتی



## نتیجه‌گیری

محاسبه اینکه چه مقدار از هیدروگراف ورودی به سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه به پایین دست منتقل می‌شود، در کارهای مهندسی و مدیریت سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی اهمیت زیادی دارد. همچنین، استفاده از روش روندیابی هیدرولیکی (حل معادلات سن-ونان) به داده‌های زیادی نیاز دارد و حل آن نیز بسیار زمان‌بر و پیچیده‌تر است. به همین دلیل در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، به بررسی کارایی روش ماسکینگام خطی در برآورد هیدروگراف خروجی از سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه پرداخته شده است. همچنین، تأثیر فاصله هیدروگراف ورودی و خروجی و اندازه قطر سنگدانه‌های تشکیل‌دهنده سدهای سنگریزه‌ای روی مقدار ضریب K روش ماسکینگام خطی نیز ارزیابی شده است. به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر شامل موارد زیر می‌شود:

۱) مقدار ضریب K روش ماسکینگام خطی با فاصله بین دو بازه (فاصله بین هیدروگراف ورودی و خروجی) رابطه مستقیم و با قطر سنگدانه‌ها رابطه معکوس دارد. به بیان دیگر، با افزایش فاصله بین دو بازه، مقدار K افزایش و با افزایش قطر سنگدانه‌ها نیز مقدار K کاهش یافته است.

۲) مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) مربوط به آزمایش‌های اول تا چهارم به ترتیب برابر با ۴/۳۵، ۳/۴، ۴/۹ و ۳/۵۵ درصد و مقادیر مربوط به خطای نسبی دبی اوج (DPO) نیز برای آزمایش‌های یادشده به ترتیب برابر با ۱/۵۸، ۰/۴۷، ۲/۸۶ و ۱/۷۸ درصد محاسبه شده است. به بیان دیگر، نتایج بیانگر آن است که روش ماسکینگام خطی کارایی مناسبی برای محاسبه هیدروگراف خروجی از سدهای سنگریزه‌ای تأخیری دوگانه دارد.

## منابع

- [4]. Leps, T. M. Flow through rockfill, Embankment-dam engineering casagrande volume edited by Hirschfeld, RC and Poulos, SJ. 1973.
- [5]. Stephenson, D. J. Rockfill in hydraulic engineering. Elsevier scientific publishing company. Distributors for the United States and Canada. 1979.
- [6]. Subramanya. K, Engineering hydrology. 1994; 2nd Ed.
- [7]. Tsai CW. Flood routing in mild-sloped rivers—wave characteristics and downstream backwater effect. Journal of Hydrology. 2005; 308 (1-4):151-67.
- [8]. Hosseini, S. M. Joy, D. M. Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porous media applicable to valley fills. International Journal of River Basin Management. 2007; 5(4): 253-265.
- [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, W. Z., Fan, H. Y., Leung, A. Y. T., & Wong, J. C. K. 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. In International Symposium on Neural Networks, 2005; (pp. 1034-1039). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [14]. Chu, H. J., & Chang, L. C. 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.
- [1]. McWhorter, D. B. Sunada, D. K. and Sunada, D. K. Ground-water hydrology and hydraulics. Water Resources Publication. LLC. U.S. Library. 1977
- [2]. Hansen, D. Garga, V. K. and Townsend, D. R. Selection and application of a one-dimensional non-Darcy flow equation for two-dimensional flow through rockfill embankments. Canadian Geotechnical Journal. 1995; 32(2): 223-232.
- [3]. Forchheimer, P. Wasserbewegung Drunch Boden, Z. Ver, Deutsh. Ing. 1901; 45: 1782-1788.

- [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]. Norouzi, H. & Bazargan, J. Flood routing by linear Muskingum method using two basic floods data using particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Water Science and Technology: Water Supply*. 2020; 20(5): 1897-1908.
- [18]. Ergun, S. Fluid Flow through Packed Columns. *Chemical Engineering Progress*. 1952; 48: 89-94.
- [19]. Ward, J. C. Turbulent flow in porous media. *Journal of the hydraulics division*. 1964; 90(5): 1-12.
- [20]. Ahmed, N. and Sunada, D. K. Nonlinear flow in porous media. *Journal of the Hydraulics Division*, 1969; 95(6): 1847-1858.
- [21]. Sidiropoulou, M. G., Moutsopoulos, K. N., & Tsihrintzis, V. A. Determination of Forchheimer equation coefficients a and b. *Hydrological Processes*. 2007; 21(4), 534-554. <https://doi.org/10.1002/hyp.6264>.
- [22]. Sadeghian, J. Khayat Kholghi, M. Horfar, A. and Bazargan, J. Comparison of binomial and power equations in radial non-darcy flows in coarse porous media. *Journal of Water Sciences Research*. 2013; 5(1): 65-75.
- [23]. Sedghi-Asl, M. Ansari, I. Adoption of extended dupuit–Forchheimer assumptions to non-darcy flow problems. *Transport in Porous Media*. 2016; 113(3): 457-469.
- [24]. Di Nucci, C. Unsteady free surface flow in porous media: One-dimensional model equations including vertical effects and seepage face. *Comptes Rendus Mécanique*. 2018; 346(5): 366-383.
- [25]. Mohan, S. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *Journal of hydraulic engineering*, 1997; 123(2), 137-142.
- [26]. Barati, R. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using Nelder-Mead simplex algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011; 16(11), 946-954.
- [27]. Hirpurkar, P., & Ghare, A. D. Parameter estimation for the nonlinear forms of the Muskingum model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014; 20(8), 04014085.
- [28]. Niazkar, M., & Afzali, S. H. Parameter estimation of an improved nonlinear Muskingum model using a new hybrid method. *Hydrology Research*, 2016; DOI: 10.2166/nh.2016.089.
- [29]. Zhang, S., Kang, L., Zhou, L., & Guo, X. A new modified nonlinear Muskingum model and its parameter estimation using the adaptive genetic algorithm. *Hydrology Research*, 2017; 48(1), 17-27. DOI: 10.2166/nh.2016.185.
- [30]. Kalagar Naftchali, B. Comparison between mathematical model and experimental data for flood routing in reservoirs of multiple detention rockfill dams. M. Sc. Thesis, Iran University of Tarbiat Modarres. 2003.
- [31]. McCarthy G. T. The unit hydrograph and flood routing. New London. Conference North Atlantic Division. US Army Corps of Engineers. New London. Conn. USA. 1938.
- [32]. Chow, Vente. open channel hydraulics, Newyork;Macgraw-Hill book company. 1959.
- [33]. Eberhart, R. and Kennedy, J. A new optimizer using particle swarm theory. In *Micro Machine and Human Science*, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on. 1995; 39-43.
- [34]. Shi, Y. and Eberhart, R. A modified particle swarm optimizer. In *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*. 1998; 69-73.
- [35]. Di Cesare, N. Chamoret, D. and Domaszewski, M. A new hybrid PSO algorithm based on a stochastic Markov chain model. *Advances in Engineering Software*. 2015; 90: 127-137.