دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

بهینه‌سازی روش ماسکینگام در روندیابی سیل در رودخانه‌های سیلابی

ع. ظهیری[۱]، ح. شریفان[۲] و س. تمدنی کناری[۳]

۱- استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، نویسنده مسوول: zahiri_reza@yahoo.com
۲- استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۰/۹/۱ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۲۲

چکیده

روندیابی سیل در رودخانه‌هایی که دارای دشت‌های سیلابی می‌باشند (کانال‌های با مقطع مرکب) دارای پیچیدگی زیادی است. در این حالت، استفاده از معادلات سن‌ونان که اساس کلیه‌ی نرم‌افزارهای روندیابی سیلاب را تشکیل می‌دهند، توأم با خطا است. برای اصلاح این معادلات، روش‌های ریاضی متعددی پیشنهاد شده است. این روش‌ها، غالباً پیچیده بوده و زمان اجرای طولانی دارند. در این مقاله راه‌حل ساده و بهینه‌ای مبتنی بر روش ماسکینگام برای روندیابی سیل در رودخانه‌های سیلابی ارائه شده است. برای افزایش سرعت محاسبات، ضرایب این روش به کمک الگوریتم ژنتیک، به صورت بهینه محاسبه شده‌اند. برای ارزیابی نتایج این روش، از داده‌های آزمایشگاهی روندیابی سیل در دو کانال مرکب همگن و غیرهمگن استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش ماسکینگام به خوبی تغییرات دبی جریان را در طول کانال شبیه‌سازی نموده است. با اجرای مدل ریاضی یک‌بعدی HEC-RAS4، مشخص شد که نتایج این مدل نسبت به نتایج روش پیشنهادی این تحقیق دارای خطای بیشتری است.

واژهای کلیدی: روندیابی سیل، رودخانه‌های سیلابی، ماسکینگام، الگوریتم ژنتیک، HEC-RAS

مقدمه

روندیابی سیلاب در کانال‌ها و رودخانه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. تقریباً در کلیه مطالعات ساماندهی و کنترل سیل رودخانه‌ها، از محاسبات جریان غیردائمی استفاده می‌شود.

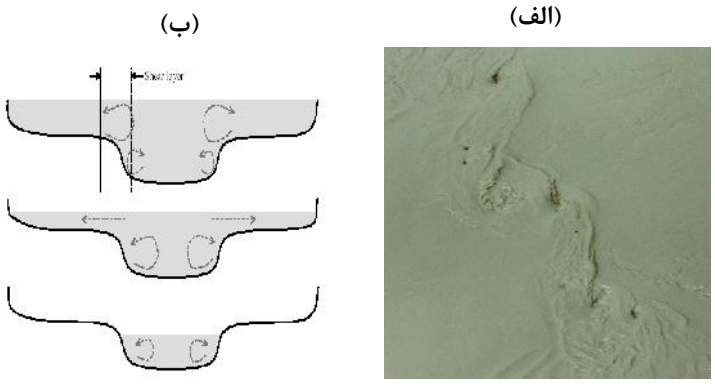
معمولاً در هنگام سیل، مجرای اصلی رودخانه‌ها پر شده و جریان سیل وارد دشت‌های سیلابی می‌شود. در این شرایط، به دلیل گرادیان سرعت جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه، هیدرولیک جریان دارای پیچیدگی زیادی است (۲۲). در این حالت، استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتوم سن‌ونان که پایه و اساس مدل‌های ریاضی جریان غیرماندگار را تشکیل می‌دهند، با محدودیت مواجه است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

با توجه به اهمیت مطالعات سیلاب و روش‌های کاهش خسارات سیل در طرح‌های مهندسی رودخانه، لازم است رفتار جریان سیل در رودخانه و دشت‌های سیلابی آن مورد بررسی قرار گیرد. اگرچه هیدرولیک جریان در کانال‌ها و رودخانه‌های با مقطع مرکب مدت‌ها است مورد توجه محققین قرار گرفته است، اما این مطالعات اغلب در زمینه‌ی جریان دائمی و یکنواخت متمرکز شده و مطالعات اندکی در شرایط جریان غیردائمی در مقاطع مرکب انجام شده است. پیش‌بینی دبی و عمق جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه در زمان و مکان‌های مختلف، یکی از نیازهای مهم مهندسین در طرح‌های ساماندهی و کنترل سیل رودخانه‌ها است که با انجام محاسبات روندیابی سیل قابل انجام است. علاوه بر این، محاسبه دبی و عمق جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی در محاسبات انتقال رسوب و پخش مواد آلاینده در رودخانه‌ها لازم و ضروری است. برای این‌کار، معمولاً از مدل‌های ریاضی از قبیل HEC-RAS و MIKE11 استفاده می‌شود. این مدل‌ها برای محاسبات روندیابی سیلاب در کانال‌ها و رودخانه‌های ساده و بدون دشت سیلابی، کارایی خوبی داشته و برای کاربردهای مهندسی قابل قبول است. در حالت وجود دشت‌های سیلابی عریض و با ضریب زبری زیاد، رفتار جریان تفاوت زیادی با مقاطع ساده داشته و از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه دارای اختلاف زیادی بوده و گرادیان عرضی قوی را ایجاد می‌کند. این گرادیان سرعت، باعث ایجاد تنش برشی شده و دبی جریان رودخانه را تا حدود زیادی کاهش می‌دهد. نمونه‌ای از گردابه‌های ایجاد شده در مرز اتصال مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی در یک رودخانه طبیعی در شکل ۱-الف نشان داده شده است (۱۳). این شرایط، رفتار جریان در رودخانه را به ویژه در حالت وقوع سیلاب به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این حالت، سرعت جریان در مقطع اصلی بسیار بیشتر از سرعت در دشت‌های سیلابی بوده و در نتیجه، مومنتوم جریان از مقطع اصلی به دشت‌های سیلابی منتقل می‌شود. تاکنون این تئوری در مدل‌های ریاضی جریان غیردائمی اعمال نشده است.

در شکل ۱-ب، رفتار جریان در یک رودخانه سیلابی به صورت شماتیک نشان داده شده است. در شرایط عادی که آب فقط در مجرای اصلی جریان دارد، دو محدوده جریان چرخشی (سلول) در کناره‌های رودخانه تشکیل می‌شود. با افزایش عمق جریان و سرریز شدن به دشت‌های سیلابی، قدرت چرخشی این سلول‌ها تشدید شده و با افزایش بیشتر عمق، جریان چرخشی به سمت دشت‌های سیلابی توسعه پیدا می‌کند. در ناحیه اتصال مقطع اصلی به دشت‌های سیلابی، یک گرادیان سریع و پله‌ای سرعت بین لایه سریع مقطع اصلی و لایه‌ی کُند دشت‌های سیلابی ایجاد می‌شود. این گرادیان باعث اتلاف انرژی در این محل شده و لایه برشی را تشکیل می‌دهد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]



شکل ۱- رفتار جریان سیل در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی.

روندیابی سیلاب به عنوان یک فرآیند ریاضی برای پیش‌بینی تغییرات عمق و دبی جریان در طول رودخانه‌ها و کانال‌ها می‌باشد. برای انجام روندیابی سیل از دو روش هیدرولیکی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. در روش‌های هیدرولوژیکی، از اصل پیوستگی جریان و رابطه‌ای بین دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر و در روش‌های هیدرولیکی، از اصول هیدرولیک و قوانین جریان‌های غیردائمی استفاده می‌شود.

اگرچه دقت روش‌های هیدرولوژیکی در حد روش‌های هیدرولیکی نیست، اما دارای محاسبات بسیار ساده و سریعی بوده و در کاربردهای مهندسی با اطمینان قابل قبولی به کار می‌روند (۴).

روندیابی سیلاب در رودخانه‌های سیلابی به صورت محدود مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۶). برای انجام این محاسبات، فرضیات مختلفی توسط محققین در شرایط وجود دشت‌های سیلابی استفاده شده است. لیگت و کانج (۱۴)، فرض نموده‌اند که دشت‌های سیلابی، غیرفعال بوده و فقط مقطع اصلی در انتقال موج سیلاب مؤثر است. از طرف دیگر، میلر و کانج (۱۵) کل رودخانه شامل مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی را درنظرگرفته‌اند. فرید (۷) نشان داد که هر دو روش فوق، تنها تخمینی از شرایط واقعی سیلاب را شبیه‌سازی می‌کنند. گاربرخت و برونر (۸) با استفاده از روش ماسکینگام-کانج، رفتار سیلاب را برای مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به صورت مجزا شبیه‌سازی کرده‌اند. در این مطالعه، از تأثیر تنش برشی عرضی صرف نظر شده است. مایزانو و چادری (۱۶) با بررسی آزمایشگاهی روندیابی سیل در مقاطع مرکب نشان دادند که نتایج محاسبات روندیابی سیلاب با فرض غیرفعال بودن دشت‌های سیلابی، مطابقت نسبتاً خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. تانگ و همکاران (۲۰)، اثر تنش برشی عرضی را به کمک روش کوهیرنس در محاسبات روش ماسکینگام-کانج وارد نموده‌اند. تویتوک و هیکس (۲۱)، از ترکیب روندیابی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی در مقطع اصلی و دشت‌های

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

سیلابی انجام دادند. آبریل (۱) برای شبیه‌سازی روندیابی سیلاب در مقاطع مرکب همگن، از روش هیدرولوژیکی استفاده نموده و آن را به کمک روش اجزاء محدود حل کرده است. ایوب‌زاده و ظهیری (۳) برای روندیابی سیلاب در مقاطع مرکب از تلفیق روندیابی هیدرولیکی با یک مدل شبه دوبعدی استفاده نمودند. ظهیری و همکاران (۲۳) روندیابی هیدرولوژیکی را در یک رودخانه سیلابی غیرهمگن با دشت‌های سیلابی عریض مورد استفاده قرار داده و با حل بدست آمده از مدل ریاضی DAMBREAK مقایسه نمودند. قاسمیه (۹) به بررسی میزان کارآیی مدل ماسکینگام در رودخانه‌ی بابل‌رود پرداخت. ضرایب این مدل با استفاده از روش حلقه‌ی لوپ محاسبه شد. نیک‌پوی و همکاران (۱۸) روندیابی سیل به کمک مدل ماسکینگام را با برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB کاربردی نموده‌اند.

دارابی و همکاران (۵)، ضرایب مدل ماسکینگام در ایستگاه حرمله از رودخانه‌ی کارون را با استفاده از بهینه‌سازی در نرم‌افزار LINGO محاسبه نمودند. سامانی و شمسی‌پور (۱۹) محاسبات تعیین پارامترهای روش ماسکینگام برای روندیابی موج سیلاب در رودخانه‌های شریانی را به کمک روش غیرخطی پاول، بهینه‌سازی نمودند. الحمود و ایسن (۲) از یک روش ساده و تقریبی برای تعیین ضرایب مدل ماسکینگام استفاده نمودند. این روش براساس محاسبه‌ی شیب هیدروگراف‌های ورودی و خروجی در نقطه‌ی تلاقی آن‌ها است. کاراهان (۱۲) با استفاده از نرم‌افزار اکسل، محاسبات تعیین پارامترهای مدل ماسکینگام را بهینه‌سازی نمود.

بررسی مطالعات فوق نشان می‌دهد که انجام محاسبات روندیابی هیدرولیکی سیل در رودخانه‌های سیلابی غیرهمگن با دشت‌های سیلابی عریض نیازمند زمان زیادی بوده و از این نظر دارای محدودیت می‌باشد. این در حالی است که روش‌های هیدرولوژیکی، زمان اجرای بسیار کمتری داشته و به داده‌های کمتری نیز نیاز دارند (۱۷). زمان اجرای محاسبات مدل‌های ریاضی به ویژه در حالت وجود دشت‌های سیلابی، طولانی بوده و حدود ۱۰ برابر روش‌های هیدرولوژیکی است (۷). همچنین در مدل‌های ریاضی مبتنی بر روندیابی هیدرولیکی، باید هندسه‌ی مقاطع عرضی در طول رودخانه به تعداد کافی موجود باشد که به دلیل هزینه بالای عملیات مقطع‌برداری و طول زیاد رودخانه‌ها، این مورد به‌ویژه برای رودخانه‌های دارای دشت‌های سیلابی عریض یکی از محدودیت‌های جدی و مهم مدل‌های هیدرولیکی به‌شمار می‌رود. علاوه بر این، عملیات مقطع‌برداری باید به صورت دوره تکرار شود تا اثرات فرسایش و رسوبگذاری بستر رودخانه در مدل‌های ریاضی لحاظ شود.

در این مقاله به منظور رفع مشکل فوق و افزایش قابل توجه سرعت اجرای محاسبات مدل روندیابی سیل در رودخانه‌های سیلابی، از ایده بهینه‌سازی ضرایب روش هیدرولوژیکی ماسکینگام به کمک الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. با توجه به اینکه تعیین ضرایب x_0 و K_0 در روش ماسکینگام به کمک روش‌های معمول نیازمند محاسبات تکراری بوده و بسیار

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

زمان‌بر است، استفاده از ایده بهینه‌سازی این ضرایب مطمئناً باعث کاهش زمان اجرای محاسبات خواهد شد. برای ارزیابی روش پیشنهادی این تحقیق، دو سیل بدست آمده از روش پیشنهادی با نتایج روش‌های معمول و نیز داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

معادلات هیدرولیکی جریان غیردائمی در مقاطع مرکب

برای تحلیل هیدرولیک جریانات غیرماندگار از معادلات سن‌ونان استفاده می‌شود. این معادلات شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم می‌باشند:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)+gA\frac{\partial H}{\partial x}+gA\left(S_f-S_0\right)=0 \qquad (۲)$$

که Q دبی جریان، A سطح مقطع، H تراز سطح آب، S_0 شیب طولی، S_f شیب انرژی، g شتاب ثقل، x فاصله‌ی مکانی، t فاصله‌ی زمانی و ضریب تصحیح مومنتوم می‌باشد. این ضریب از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{K_i^{\,2}}{A_i}\right)\sum_{i=1}^{N}A_i}{\left(\sum_{i=1}^{N}K_i\right)^2} \qquad (۳)$$

که K فاکتور انتقال و N تعداد مقاطع جزئی است. در مدل‌های ریاضی معمول از قبیل HEC-RAS، ضریب تصحیح از تقسیم مقطع مرکب به ۳ بخش (شامل مجرای اصلی و ۲ دشت سیلاب) محاسبه می‌شود، در حالی‌که بین این مقاطع، تنش برشی قابل ملاحظه‌ای اتفاق می‌افتد که تأثیر قابل توجهی بر مقدار این ضریب دارد. مقادیر واقعی این ضریب در کانال‌های آزمایشگاهی دارای دشت‌های سیلابی، تا ۲ نیز گزارش شده است. اصلاح این ضریب بر مبنای هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب، فرآیندی طولانی و پیچیده بوده و زمان اجرای محاسبات روندیابی را تا ۵ برابر افزایش می‌دهد (۲۱). بنابراین، برای افزایش دقت شبیه‌سازی روندیابی سیل و نیز کاهش زمان محاسبات، باید راه‌حل مناسب‌تری ارائه شود.

روندیابی سیل به روش ماسکینگام

روندیابی هیدرولوژیکی سیل در رودخانه‌ها به روش‌های مختلفی قابل انجام است که روش‌های ماسکینگام، ماسکینگام-کانج و انتگرال‌گیری ترسیمی قابل ذکر می‌باشند. روش ماسکینگام دارای مبانی ساده‌ای بوده و کاربرد گسترده‌ای در مطالعات کنترل سیلاب رودخانه‌ها داشته است. این روش، اولین بار برای مطالعه کنترل سیل رودخانه ماسکینگام حوزه آبریز اوهایو در آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای این روش بر پایه معادله پیوستگی استوار است:

$$\frac{dS}{dt}=I-O \qquad (۴)$$

که S حجم ذخیره آب در رودخانه، I دبی سیل ورودی و O دبی سیل خروجی است. با این فرض که حجم ذخیره، تابع خطی از سیلاب ورودی و خروجی است، رابطه زیر قابل استفاده است:

$$S=K_0\left[x_0I+\left(1-x_0\right)O\right] \qquad (۵)$$

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

که K_0 (برحسب ساعت) و x_0 ضرایب ثابتی هستند که باید براساس هیدروگراف ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده در رودخانه، محاسبه شوند. پارامتر K_0 ثابت ذخیره بوده و بیان‌کننده زمان پیمایش رودخانه است. x_0 نیز پارامتر بدون‌بعد بوده و بیانگر اثر نسبی دبی‌های ورودی و خروجی سیل بر حجم ذخیره رودخانه می‌باشند. روابط فوق برای دوره‌های زمانی مختلف (یک‌ساعته یا چندساعته) هیدروگراف سیل ورودی و خروجی صادق است. با تعیین این دو پارامتر، می‌توان هیدروگراف دبی خروجی سیلاب را برای هر سیلی که در رودخانه اتفاق می‌افتد، محاسبه نمود. برای انجام این کار از روابط زیر استفاده می‌شود (۴):

$$O_{t+1} = C_1 I_{t+1} + C_2 I_t + C_3 O_t \qquad (۶)$$

که I_t و I_{t+1} به ترتیب دبی‌های ورودی سیل در زمان t و $t+1$، O_t و O_{t+1} به ترتیب دبی‌های خروجی سیل در زمان t و $t+1$ و ضرایب C_1 و C_2 ضرایب روندیابی می‌باشند. این ضرایب از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$C_1 = \frac{\Delta t + 2K_0 x_0}{\Delta t + 2K_0 - 2K_0 x_0}$$
$$C_2 = \frac{\Delta t - 2K_0 x_0}{\Delta t + 2K_0 - 2K_0 x_0} \qquad (۷)$$
$$C_3 = 1 - C_1 - C_2$$

که Δt گام زمانی محاسبات است. با تعیین ضرایب روندیابی، رابطه فوق به صورت تکرار مورد استفاده قرار می‌گیرد تا هیدروگراف سیل خروجی محاسبه شود. مهم‌ترین مرحله محاسبات، تعیین پارامترهای K_0 و x_0 است که با استفاده از روش‌های معمول، زمان‌بر می‌باشد. راه‌حل بهینه، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی از جمله الگوریتم ژنتیک است.

الگوریتم ژنتیک

امروزه استفاده از روش‌های نوین هوشمند به منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی مورد توجه محققان قرار گرفته است. از میان الگوریتم‌های هوشمند، روش جستجوی ژنتیکی که ایده آن از سیستم تکامل طبیعی موجودات زنده (ژن و کروموزوم) گرفته شده، به عنوان روش نوین بهینه‌سازی مدل‌های غیرخطی، بسیار مناسب بوده و کاربردهای فراوانی دارد (۱۰). روش جستجوی ژنتیک، تلاشی برای شبیه‌سازی و بکارگیری برخی خصوصیات وتوانایی‌های تکامل در بهینه‌سازی است. در این روش، عملیات جستجو به صورت موازی و چندجانبه از نقاط مختلفی از فضای حل آغاز می‌شود. این روش کاربردهای وسیعی در مسائل مهندسی از قبیل بهینه‌سازی شبکه جریان در لوله‌ها، سازه‌های ساختمانی، تعیین الگوی بهینه‌ی کشت، تعیین دبی جریان در مقاطع مرکب، حل توزیع عرضی سرعت در دشت‌های سیلابی، واسنجی مدل‌های بارش- رواناب و آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرارگرفته است (۵، ۱۰ و ۲۳).

فرآیند بهینه‌سازی در جستجوی ژنتیکی به این صورت می‌باشد که در آغاز، یک جمعیت اولیه تولید شده و مراحل تکثیر، جهش و تبادل ژنی روی این جمعیت صورت می‌گیرد. ابتدا تعدادی پاسخ در محدودهٔ تغییر پارامترها حدس زده می‌شود و با تبدیل این اعداد به زنجیره‌ای از صفر و یک، مقادیر تابع هدف به ازاء این مقدار پاسخ به دست می‌آید.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

پارامترهایی که در این تحقیق بهینه می‌شوند، x_0 و K_0 هستند. محدوده تغییر x_0 بین ۰ و ۰/۵ است اما برای K_0 محدوده‌ای تعریف نشده است. سپس توسط روش دیسک‌گردان، زنجیره‌هایی که تابع هدف به ازای آن‌ها کمینه می‌شود، باقی‌مانده و بقیه حذف می‌شوند. پس از انتخاب زنجیره‌ها و با برگزیدن درصد احتمال ترکیب مناسب، مکان‌هایی از تابع زنجیره‌ها برای تبادل اطلاعات انتخاب می‌شود. در این تحقیق، از ترکیب نقطه‌ای برای ترکیب زنجیره‌های صفر و یک استفاده شده است، بدین صورت که یک نقطه از زنجیره اطلاعات انتخاب شده و کلیه صفر و یک‌های بعد از این نقطه در دو زنجیره در حال ترکیب با هم تعویض می‌شود. همچنین با انتخاب درصد مناسب برای احتمال جهش، مکان یا مکان‌هایی از زنجیره جواب، انتخاب شده و اعداد درون این مکان‌ها از صفر به یک و بالعکس تبدیل می‌شود. سپس مجدداً تابع هدف به ازای جمعیت جدید محاسبه و این روال آنقدر تکرار می‌شود تا تمامی جواب‌ها به سمت نقطه بهینه رهنمون گردند. این جواب (کروموزوم) به عنوان بهترین تخمین برای پارامتر دبی جریان در هر زمان معرفی می‌گردد. عامل تعیین کننده در برازش و ارزیابی کروموزوم‌ها، تابع برازش می‌باشد. در این فرایند، تابع برازش براساس میزان تطابق هیدروگراف با دبی محاسباتی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده است. برای هر هیدروگراف خروجی، ۷۰ درصد نقاط هیدروگراف برای مرحله واسنجی و ۳۰ درصد بقیه برای مرحله آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر حداقل و حداکثر داده‌ها در بخش واسنجی قرار گرفته و مقادیر نزدیک به حداکثر و حداقل داده‌ها نیز در بخش آزمون مدل گنجانده شده است. رابطه (۷) به عنوان رابطه اصلی بهینه‌سازی درنظر گرفته می‌شود. مراحل مهم روش جستجوی ژنتیکی به صورت زیر است (۱۱):

کدبندی: روش جستجوی ژنتیک به‌کار رفته در این تحقیق براساس یک سیستم دودویی شامل (۱ و ۰) می‌باشد. در این حالت پارامترهای مدل به مبنای۰ و ۱ انتقال یافته و به عبارت دیگر رمزدار می‌شوند. چنانچه محدوده تغییرات هر پارامتر(a,b) باشد و میزان دقت اعداد (Δn_i) برابر با ۰/۰۰۰۱ باشد، می‌توان از رابطه زیر تعداد ژن‌ها (n_i) را محاسبه نمود (۶):

$$2^{ni} \geq \left(\frac{b_i - a_i}{\Delta n_i} + 1 \right), \quad a_i \leq x_i \leq b_i \qquad (۸)$$

تشکیل جامعه: به منظور تشکیل جامعه، پس از تعیین طول رشته یا ژن‌های مربوط به هر پارامتر، لازم است طول کروموزوم جامعه بصورت $n_t = \sum_{i=1}^{m} ni$ تعیین شود.

تابع ارزش: معیار انتخاب کروموزوم‌ها برای جامعه جدید، توابع ارزش می‌باشند. بدین منظور در این مطالعه از تابع مجموع مربعات خطا بصورت رابطه زیر استفاده شده است:

$$SSQ = \sum_{i=1}^{n} \left(Q_i^{computed} - Q_i^{observed} \right)^2 \qquad (۹)$$

که SSQ مجموع مربعات خطا بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی (تابع هدف) و n تعداد دبی‌های هیدروگراف خروجی سیل است. دبی‌های محاسباتی از رابطه (۶) و براساس تغییر پارامترهای x_0 و K_0 بدست می‌آیند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

مرحله‌ی ترکیب: به‌منظور جستجو و بررسی در فضای تعریفی پارامترها جهت تعیین مقادیر بهینه، دو کروموزوم از مجموعه‌ی قبل انتخاب شده و کروموزوم‌های جدید را تشکیل می‌دهند. بدین ترتیب که ابتدا محلی برای برش مشخص شده و سپس بخش‌های سمت راست محل برش با هم جابجا می‌شود. انتخاب محل برش به‌صورت تصادفی بوده و می‌تواند شامل یک و یا چند موقعیت باشند. در این تحقیق، عمل دورگه شدن با یک موقعیت برش در نظر گرفته شده است.

مرحله جهش: این روش جهت افزایش تنوع در جامعه و گسترش فضای جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه امکان دست‌یابی به نقاط بهینه‌ی مطلق افزایش می‌یابد. نحوه تغییر ژن‌ها بستگی به فضای تعریف شده الگوریتم دارد. از آنجایی که در این تحقیق، از سیستم دودویی استفاده شده است، لذا در صورتی که ژن، حاوی مقدار صفر باشد، به یک تبدیل می‌شود و بالعکس. انتخاب ژن‌ها در مجموعه براساس میزان جهش انجام می‌شود و مقدار بهینه‌ی آن بستگی به نوع تابع و اندازه جامعه دارد. به منظور توزیع یکنواخت در انتخاب ژن‌ها، ابتدا کروموزوم مربوطه و سپس ژن مورد نظر به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود.

کانال‌های مرکب مورد مطالعه

تاکنون چند مطالعه آزمایشگاهی در زمینه روندیابی سیلاب در مقاطع مرکب انجام شده است، اما به دلیل عدم ارائه کلیه نتایج و داده‌های مورد نیاز و مهم‌تر از آن، عدم تطابق شرایط مرزی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی با شرایط مدل ریاضی، استفاده از این داده‌ها توأم با مشکلات زیادی است (۱۵). در این تحقیق از ۲ کانال با مقطع مرکب برای ارزیابی روش پیشنهادی ماسکینگام در روندیابی سیلاب استفاده شده است. مناسبترین داده‌های آزمایشگاهی موجود در این زمینه، داده‌های تویتوک و هیکس (۲۱) می‌باشند که به عنوان مورد اول در این تحقیق استفاده شده است. در این مطالعه آزمایشگاهی از یک مقطع مرکب مستطیلی همگن با مسیر مستقیم و به طول ۲۱۰ متر استفاده شده است. عمق مقطع اصلی برابر ۰/۳۹ متر و عرض آن ۱/۲۵ متر می‌باشد. عرض دشت‌های سیلابی سمت چپ و راست به ترتیب برابر ۳ و ۱/۵ متر، ضریب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی برابر ۰/۰۱۲ و شیب طولی این کانال برابر ۰/۰۰۰۱۹ می‌باشد. هیدروگراف سیل ورودی به شکل مثلثی با دبی اوج ۰/۴۱۲ مترمکعب بر ثانیه است. مورد دوم، کانال مرکب غیرهمگنی است که به طور مصنوعی توسط گاربرخت و برونر (۸) ارائه شده است. این کانال به شکل مستطیلی متقارن در نظر گرفته شده است. عمق و عرض مقطع اصلی به ترتیب ۳ و ۱۰۰ متر و عرض دشت‌های سیلابی ۲۰۰ متر می‌باشد. ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۶ و شیب طولی ۰/۰۰۴۵ فرض شده است. طول بازه معادل ۲۹ کیلومتر و هیدروگراف ورودی سیلاب از معادله‌ی زیر تبعیت می‌کند:

(۱۰)

$$Q(t) = Q_{base} + \left(Q_{peak} - Q_{base}\right)\left(\frac{t}{t_p}\right)^{M} \exp\left(\frac{t_p - t}{t_c - t_p}\right)$$

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

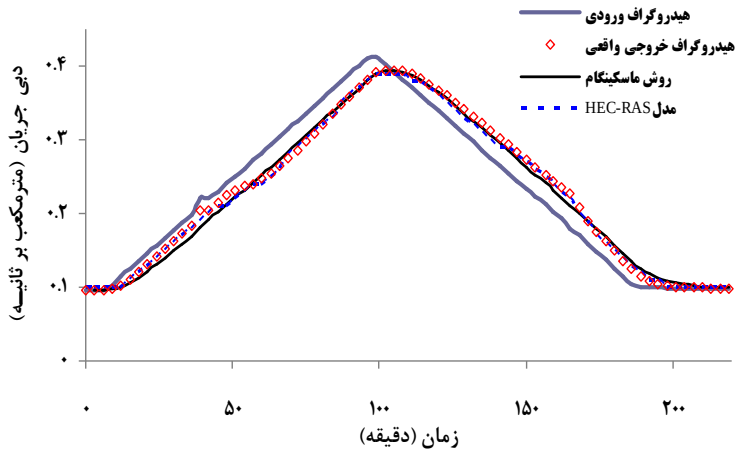
که Q_{base} دبی جریان پایه، Q_{peak} دبی اوج سیل، t_p زمان رسیدن به دبی اوج، t_c زمان شروع رواناب سطحی تا مرکز ثقل هیدروگراف (۳/۳ ساعت) و M ضریبی است که در اینجا برابر ۹/۱ در نظرگرفته شده است. دبی پایه و اوج این هیدروگراف به ترتیب ۳۰۰ و ۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و زمان دبی اوج نیز ۳ ساعت فرض شده است. نتایج روندیابی سیل به کمک مدل ریاضی دوبعدی هیدرولوژیکی به عنوان هیدروگراف خروجی واقعی سیل عبوری از انتهای این کانال در نظر گرفته شده است.

این محدودیت به دلیل عدم وجود مطالعه آزمایشگاهی روندیابی سیل در مقاطع مرکب غیرهمگن تا حدودی قابل پذیرش است.

نتایج و بحث

مثال اول: نتایج اجرای محاسبات روندیابی سیل به کمک مدل ریاضی HEC-RAS و بهینه‌سازی از روش ماسکینگام برای کانال آزمایشگاهی مثال اول در شکل ۲ نشان داده شده است. مقایسه این نتایج با هیدروگراف خروجی اندازه‌گیری شده، بیانگر کارایی مناسب و دقیق هر دو روش محاسباتی است. زمان اجرای محاسبات در هر دو روش کمتر از ۱ ثانیه است. مقادیر بهینه ضرایب روش ماسکینگام x_0 و K_0 به ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۱۹۲۶ ساعت بدست آمده‌اند. مجموع مربعات خطا نیز حدود ۰/۰۰۴۸۱ محاسبه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که به دلیل ضریب زبری کم و نیز طول کم کانال، حجم ناچیزی از هیدروگراف دبی جریان ورودی در این کانال ذخیره شده و بخش اعظم آن خارج می‌شود. این واقعیت با توجه به نزدیکی قابل توجه هیدروگراف‌های ورودی و خروجی آشکارتر می‌شود. یکی از دلایل مهم مطابقت خوب نتایج مدل ریاضی HEC-RAS با مقادیر واقعی هیدروگراف خروجی سیل در این کانال این است که ضریب زبری مانینگ در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی یکسان بوده و عرض دشت‌های سیلابی نسبت به مجرای اصلی نیز کم است، حالتی که در رودخانه‌های طبیعی آبرفتی کمتر اتفاق می‌افتد. این دو مورد باعث کم‌اهمیتی اثر تبادل مومنتوم بین مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی شده به طوری‌که رفتار جریان در این کانال مرکب همانند یک کانال ساده شده است. دلیل مهم دیگر، طول کم کانال است. هرچه طول کانال بیشتر باشد، اثر هیدرولیک خاص جریان در مقاطع مرکب تشدید شده و باعث پیچیدگی بیشتر محاسبات روندیابی خواهد شد. بنابراین در رودخانه‌های سیلابی که معمولاً دارای طول زیاد و نیز دشت‌های عریض سیلابی زبرتر از مقطع اصلی می‌باشند، مدل‌های ریاضی روندیابی سیل از نظر دقت محاسبات و نیز زمان اجرا دچار محدودیت جدی خواهند شد. شرایط کانال آزمایشگاهی این مثال، با شرایط رودخانه‌های طبیعی بسیار متفاوت است، بنابراین در مثال دوم سعی شده است تقریباً شرایط واقعی رودخانه‌ها لحاظ شود.

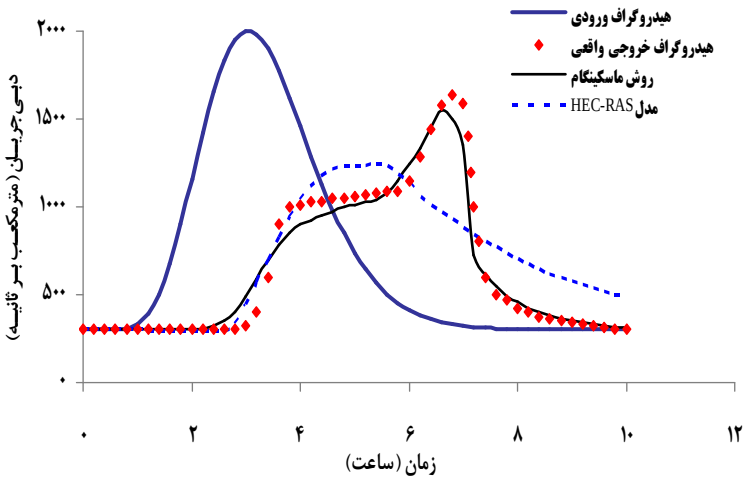
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]



شکل ۲- مقایسه نتایج روندیابی مدل ریاضی HEC-RAS و روش ماسکینگام با مقادیر واقعی هیدروگراف خروجی مثال ۱.

مثال دوم: در این کانال که تقریباً شرایطی مشابه یک رودخانه طبیعی دارد، محاسبات روندیابی سیلاب با استفاده از روش‌های هیدرولیکی دارای پیچیدگی بیشتری است. نتایج محاسبات مدل ریاضی HEC-RAS و روش بهینه‌سازی ماسکینگام در این کانال در شکل ۳ ارائه شده است. مطابقت نسبتاً مناسب نتایج روش پیشنهادی و عدم دقت نتایج مدل HEC-RAS در این شکل کاملاً مشخص است. زمان اجرای مدل ریاضی HEC-RAS حدود ۱۰ برابر مثال اول است. این در حالی است که برای روش ماسکینگام، زمان اجرای محاسبات تغییری نکرده است. دلیل این مسئله این است که در محاسبات روش ماسکینگام، طول بازه حل و شرایط هندسی و هیدرولیکی مقاطع عرضی رودخانه نقشی ندارند. هیدروگراف خروجی واقعی عبوری از انتهای این کانال می‌یابد. به گونه‌ای است که با کاهش قابل توجهی همراه بوده است. دشت‌های عریض سیلابی در این مقطع به عنوان یک مخزن عمل کرده و سبب شده‌اند دبی سیلاب در طول مدت زمان زیادی در یک حد مشخصی (تقریباً برابر دبی لبریز ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه) ثابت بماند. با پر شدن دشت‌های سیلابی و افزایش قابل توجه حجم جریان ذخیره شده، دبی سیلاب مجدداً افزایش یافته و تا رسیدن به دبی اوج ادامه می‌یابد. دبی اوج سیلاب در انتهای پایین‌دست کانال حدود ۱۶۴۰ مترمکعب بر ثانیه و زمان دبی اوج حدود ۶/۸ ساعت می‌باشد. مقایسه‌ی نتایج روش‌های محاسباتی با هیدروگراف خروجی واقعی نشان می‌دهد که خطای مدل ریاضی HEC-RAS نسبت به روش ماسکینگام بسیار زیادتر است. مقادیر بهینه x_0 و K_0 در روش‌ماسکینگام به ترتیب ۰/۱۵۸ و ۲۸/۲۹ ساعت به دست آمده‌اند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]



شکل ۳- مقایسه نتایج روندیابی مدل ریاضی HEC-RAS و روش ماسکینگام با مقادیر واقعی هیدروگراف خروجی مثال ۲.

دبی اوج سیلاب بدست آمده از مدل HEC-RAS و زمان وقوع آن به ترتیب ۱۲۴۱ مترمکعب بر ثانیه و ۵/۴ ساعت می‌باشند، در حالی‌که این مقادیر برای روش ماسکینگام به ترتیب ۱۵۵۰ مترمکعب بر ثانیه و ۶/۶ ساعت می‌باشند. بنابراین، خطای مدل HEC-RAS و روش ماسکینگام در برآورد دبی اوج سیلاب خروجی به ترتیب ۲۴/۳ و ۵/۵ درصد می‌باشد. قابلیت مناسب روش ماسکینگام در شبیه‌سازی هیدروگراف خروجی سیل در کانالی مشابه رودخانه‌های طبیعی، بیانگر این نکته مهم است که روش مذکور می‌تواند در طرح‌های مهندسی رودخانه و کنترل سیلاب با دقت مناسبی مورد استفاده قرار گیرد.

۱- کارایی روش ماسکینگام در برآورد هیدروگراف خروجی از کانال‌های با مقطع مرکب همگن و غیرهمگن قابل قبول بوده و نسبت به مدل‌های ریاضی HEC-RAS از دقت بهتری برخوردار است. خطای این روش در برآورد دبی اوج سیل خروجی نسبت به مقدار واقعی در کانال با مقطع مرکب غیرهمگن حدود ۵/۵ درصد است در حالی‌که خطای مدل ریاضی HEC-RAS حدود ۲۴/۳ درصد می‌باشد.

۲- زمان اجرای محاسبات روش ماسکینگام بسیار کمتر از مدل ریاضی HEC-RAS است به طوری‌که زمان اجرای مدل ریاضی HEC-RAS در کانال با مقطع مرکب غیرهمگن حدود ۱۰ برابر زمان محاسبات روش ماسکینگام می‌باشد.

۳- با توجه به شرایط رودخانه‌های طبیعی که دارای طول زیادی بوده و دشت‌های عریض سیلابی آنها ضریب زبری بیشتری نسبت به مجرای اصلی دارند، زمان اجرای مدل‌های ریاضی (مثل HEC-RAS و MIKE11) بسیار طولانی بوده و استفاده از روش‌های سریعتر (مثل روش ماسکینگام) توصیه می‌شود.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

منابع

1. Abril, J.B. 2002. Overbank flood routing analysis applying jointly variable parameter diffusion and depth-averaged flow finite element models. International Conference on Fluvial Hydraulics, Belgium, pp: 161-167.
2. Al-humoud, J.M. and I.M. Esen. 2006. Approximate methods for the estimation of muskingum flood routing parameters, Water Resources Management, 20: 979-990.
3. Ayyoubzadeh, S.A. and A. Zahiri. 2004. Numerical study of flood routing in compound channels. Int. Conference on Hydraulics of Dams and River Structures, F. Yazdandoost and J. Attary (Ed.), Tehran, Iran. pp: 353-359.
4. Cunge, J.A. 1969. On the subject of the flood propagation computation method (Muskingum method). Journal of Hydraulic Research, IAHR, 7(2): 205-230.
5. Darabi, B., M. Moradi and M. Darabi. 2009. Calculation of Muskingum parameters for outflow routing of Harmale and Gotvand in Molasani region. Second Conference of Dam Construction, Tehran.8 pp (In Persian).
6. Dehghani, A.A., Gh. Montazer, F. Nasiri Saleh and M. Ghodsian. 2006. Optimization of concrete gravity dams sections using Genetic Algorithm and Artificial Neural Networks. Modares Engineering Journal, 25: 99-112. (In Persian).
7. Fread, D.L. 1976. Flood routing in meandering rivers with floodplains. Proceedings, Rivers ’76, Third Annual Symposium of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 1: 16-35.
8. Garbrecht, J. and G. Brunner. 1991. Hydrologic channel-flow routing for compound sections. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(5): 629-642.
9. Ghasemieh, H. 2006. Performance Evaluation of Muskingum and modified Atkane models in flood routing (Case Study: Babolrood River). M.Sc. Thesis in Watershed Management, Mazandaran University. 160 pp (In Persian).
10. Goldberg, D.E. 1989. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning. Addison Wesley Publishing Company.
11. Harrouni, K., D. Ouazar and A.H.D. Walters. 1996. Groundwater optimization and parameter estimation by genetic algorithm and dual reciprocity boundary element method. Engineering Analysis with Boundary Elements. 18: 287-296.
12. Karahan, H. 2009. Predicting muskingum flood routing parameters using spreadsheets. Computational Applications in Engineering Education, pp: 1-7.
13. Kordi, E., S.A. Ayyoubzadeh, M.Z. Ahmadi and A. Zahiri. 2009. Prediction of the lateral flow regime and critical depth in compound open channels. Canadian Journal of Civil Engineering, 36: 1-13.
14. Liggett, J.A. and J.A. Cunge. 1975. Numerical methods of solution of the unsteady flow equations. In: K. Mahmood and Y. Yevjevich (Ed.), Unsteady flow in open channels, Vol. I, Water Resources Publications, Fort Collins. pp: 159-179.
15. Miller, W.A. and J.A. Cunge. 1975. Simplified equations of unsteady flow equations. In: K. Mahmood and Y. Yevjevich (Ed.), unsteady flow in open channels, Vol. I, Water Resources Publications, Fort Collins. pp: 183-257.
16. Mizanur, R. and M.H. Chaudhry. 1995. Flood routing in channels with flood plains. Journal of Hydrology, 171: 75-91.
17. Moussa, R. and C. Bocquillon. 2000. Approximation zones of the Saint-Venant equations for flood routing with overbank flow. Journal of Hydrology and Earth Sciences, 4(2): 251-261.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

18. Nikpoi, M., P. Khosravi and A. Malekpor. 2007. Simulation Flood flows in rivers Muskingum model. Ninth Seminar on Irrigation and reduce evaporation. 13 pp (In Persian).
19. Samani, H.M.V. and G.A. Shamsipour, 2004. Hydrologic flood routing in branched river systems via nonlinear optimization, Journal of Hydraulic Research, IAHR. 42(1): 55-59.
20. Tang, X., D.W. Knight and P.G. Samuels. 1999. Variable parameter Muskingum-Cunge method for flood routing in a compound channel. J. Hydraulic Research, IAHR, 37(5): 591-614.
21. Tuitoek, D.K. and F.E. Hicks. 2001. Modeling of unsteady flow in compound channels. African Journal of Civil Engineering, 6: 45-54.
22. Zahiri, A. 2005. Numerical study of water surface profiles and hydraulic flood routing in compound channels using finite difference method. PhD Thesis in Water engineering, Tarbiat Modares University, 165 pp. (In Persian).
23. Zahiri, A., S.A. Ayoubzadeh, H.M.V. Samani and S. Kouchakzadeh. 2005. Flood routing in compound channels using diffusion model. Journal of Hydraulics, Iranian Hydraulic Association, 1(1): 69-82. (In Persian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]

Optimization of Muskingum Method for Flood Routing in Flooded Rivers

A. Zahiri[1], S. Sharifan[2] and S. Tamadoni Kenari[3]

1 - Assistant Professor, Gorgan University of Agricultures Sciences and Natural Resources (Corresponding author: zahiri_reza@yahoo.com)
2- Assistant Professor, Gorgan University of Agricultures Sciences and Natural Resources
3- M.Sc. Student, Gorgan University of Agricultures Sciences and Natural Resources
Received: November 22, 2011 Accepted: October 13, 2012

Abstract

Flood routing computations in flooded rivers with floodplains (compound channels) are more complicated. In these conditions, using the Saint-Venant equations, that form the base of flood routing mathematical models, lead to some errors. For modifying these equations, many mathematical approaches have been presented. These methods, are often complicated and have long run-times. In this paper, based on Muskingum method, a simple and optimum idea has been presented for flood routing computations in flooded rivers. For increasing the speed of computations, the Muskingum coefficients have been calculated in an optimized manner, using Genetic Algorithm. For evaluating this method, some experimental flood routing data in homogenous and heterogonous compound channels have been used. The results show that the outflow discharge hydrographs have been simulated well throughout the channels, using Muskingum method. With run of HEC-RAS4, it was found that the results of this mathematical model have higher errors than Muskingum method.

Keywords: Flood routing, Flooded rivers, Muskingum, method, Genetic algorithm, HEC-RAS Model

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-22]