

روندبایی پویای سیل با استفاده از مدل تطبیقی ماسکینگام غیر خطی و بهینه‌سازی الهام گرفته از چرخه اکولوژیکی

آرین درویشی^۱، محمود محمد رضا پور طبری^{۲*}، رضا تقی پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران،
ariandarvishi98.cv@gmail.com

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، mrtabari@umz.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، r.taghipour@umz.ac.ir

چکیده

سیلاب از مهم‌ترین پدیده‌های هیدرولوژیکی است و پیش‌بینی دقیق آن نقش مهمی در مدیریت منابع آب و کاهش خسارات ناشی از سیلاب دارد. مدل‌های ماسکینگام غیر خطی، با وجود کاربرد گسترده در روندبایی سیلاب، همچنان در بازتولید دقیق هیدروگراف‌های پیچیده، به‌ویژه هیدروگراف‌های چندقله‌ای، با چالش مواجه‌اند. این محدودیت تا حدی به ساختار ثابت معادله پیوستگی و ناتوانی آن در انعکاس تغییرات زمانی فرآیندهای مؤثر بر ذخیره جریان مربوط می‌شود. در این پژوهش، یک مدل ماسکینگام غیر خطی تطبیقی (ANMM) ارائه شد که در آن یک ضریب اصلاحی وابسته به زمان به معادله پیوستگی افزوده شده است. این اصلاح امکان لحاظ کردن پویایی زمانی ذخیره و اثر فرآیندهای فیزیکی مؤثر بر روندبایی جریان، از جمله نفوذ، تبخیر، ذخیره موقت، جریان‌های جانبی و اینرسی هیدرولیکی را فراهم می‌کند. برای برآورد پارامترهای مدل پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه اکولوژیکی (ECO) استفاده شد. عملکرد ANMM با استفاده از سه مطالعه موردی شامل هیدروگراف‌های تک‌قله‌ای و چندقله‌ای ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل ANMM در مقایسه با مدل‌های مرجع، عملکرد بهتری در بازتولید هیدروگراف‌های روندبایی شده دارد و بهبود قابل توجهی در شاخص‌های SSQ، RMSE، MAE و NSE ایجاد می‌کند. در رودخانه لینسلی، کاهش خطای SSQ به حدود ۹۷ درصد رسید. افزون بر این، مدل پیشنهادی توانایی بیشتری در بازتولید دبی اوج و شکل کلی هیدروگراف سیلاب نشان داد. این یافته‌ها بیانگر آن است که در نظر گرفتن پویایی زمانی ذخیره در ساختار مدل ماسکینگام می‌تواند دقت روندبایی سیلاب، به‌ویژه برای هیدروگراف‌های پیچیده و چندقله‌ای، را بهبود دهد.

کلمات کلیدی: مدل تطبیقی ماسکینگام، روندبایی غیر خطی سیلاب، تحلیل هیدروگراف سیلاب، الگوریتم فراکاوشی چرخه اکولوژیکی، بهینه‌سازی پارامترهای مدل.

Dynamic Flood Routing Using an Adaptive Nonlinear Muskingum Model and Ecological Cycle-Inspired Optimization

Abstract

Floods are among the most important hydrological phenomena, and their accurate prediction plays a crucial role in water resources management and reducing flood-related damages. Despite their widespread application in flood routing, nonlinear Muskingum models still face challenges in accurately reproducing complex hydrographs, particularly multi-peaked hydrographs. This limitation is partly related to the fixed structure of the continuity equation and its inability to reflect temporal variations in the processes affecting flow storage. In this study, an Adaptive Nonlinear Muskingum Model (ANMM) was proposed, in which a time-dependent correction factor was incorporated into the continuity equation. This modification enables the temporal dynamics of storage and the effects of physical processes influencing flow routing, including

infiltration, evaporation, temporary storage, lateral flows, and hydraulic inertia, to be considered. The Ecological Cycle Optimization (ECO) algorithm was employed to estimate the parameters of the proposed model. The performance of ANMM was evaluated using three case studies involving single-peaked and multi-peaked hydrographs. The results showed that, compared with the benchmark models, ANMM provided better performance in reproducing the routed hydrographs and achieved significant improvements in the SSQ, RMSE, MAE, and NSE indices. For the Linsley River, the reduction in SSQ error reached approximately 97%. In addition, the proposed model demonstrated a greater ability to reproduce peak discharge and the overall shape of the flood hydrograph. These findings indicate that incorporating temporal storage dynamics into the Muskingum model structure can improve the accuracy of flood routing, particularly for complex and multi-peaked hydrographs.

Keywords: Adaptive Nonlinear Muskingum Model (ANMM); Nonlinear Flood Routing; Flood Hydrograph Analysis; Ecological Optimization Algorithm (ECO); Model Parameter Optimization.

۱- مقدمه

سیلاب‌ها از مهم‌ترین بلایای طبیعی با پیامدهای قابل توجه اقتصادی و انسانی هستند. در این راستا، پیش‌بینی و شبیه‌سازی رفتار سیلاب نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و کاهش خسارات ناشی از آن دارد. روندیابی سیلاب به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در پیش‌بینی تغییرات جریان در طول رودخانه، نقش مؤثری در ارزیابی خطر سیلاب، مدیریت و کنترل آن و اتخاذ تصمیمات مناسب در شرایط بحرانی دارد. روندیابی سیلاب عمدتاً با استفاده از روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام می‌شود. روش‌های هیدرولیکی به دلیل نیاز به داده‌های گسترده مکانی و حل معادلات پیچیده، از نظر محاسباتی پرهزینه هستند، در حالی که روش‌های هیدرولوژیکی به دلیل سادگی نسبی و نیاز کمتر به داده‌ها، کاربرد گسترده‌تری در مطالعات عملی دارند. در میان این روش‌ها، مدل ماسکینگام یکی از پرکاربردترین رویکردهای هیدرولوژیکی در روندیابی سیلاب محسوب می‌شود (Raeisi & Izadi, 2021; Tabari et al., 2026).

مدل ماسکینگام خطی اولین بار توسط مک‌کارتی در سال ۱۹۳۸ معرفی شد (McCarthy, 1938). این مدل بر اساس رابطه بین دبی ورودی و دبی خروجی و ذخیره آب در یک مقطع رودخانه عمل می‌کند، به‌گونه‌ای که ذخیره به صورت تابعی از دبی ورودی و خروجی تعریف می‌شود. با این حال، مدل ماسکینگام خطی در بازنمایی رفتارهای غیرخطی جریان‌های طبیعی با محدودیت‌هایی مواجه است. از این رو تحقیقات متعددی در جهت توسعه نسخه‌های غیرخطی و ترکیبی این مدل انجام شده است. در همین راستا، شکل غیرخطی ماسکینگام توسط گیل در سال ۱۹۷۸ ارائه شد تا بتواند رفتار پیچیده‌تر جریان در کانال‌های رودخانه‌ای را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند (Gill, 1978).

جهت بکارگیری مدل ماسکینگام معمولاً دو مرحله اصلی، شامل واسنجی پارامترها بر اساس داده‌های مشاهده‌ای و سپس پیش‌بینی هیدروگراف خروجی، مورد توجه قرار می‌گیرد (Das, 2004). در دهه‌های گذشته، پژوهشگران با هدف افزایش دقت مدل و بهبود توانایی آن در بازنمایی رفتارهای غیرخطی جریان، نسخه‌های متعددی از مدل ماسکینگام را توسعه داده‌اند. نخستین تلاش‌ها در راستای توسعه مدل ماسکینگام خطی و بهبود توانایی آن در بازنمایی رفتارهای غیرخطی جریان، به معرفی مدل نسخه NL1^۲ توسط چاو (۱۹۵۹) بازمی‌گردد که با افزودن یک ساختار نمایی (توان‌دار) به رابطه ذخیره، امکان لحاظ کردن غیرخطی بودن جریان را فراهم ساخت (Chow, 1959). در ادامه، مدل نسخه NL2 به عنوان تعمیمی از NL1 معرفی شد که در آن توان‌های مستقل برای دبی ورودی و خروجی در نظر گرفته شد (Gavilan & Houck, 1985). سپس گیل (۱۹۷۸) مدل نسخه NL3 را با اعمال یک توان کلی، بر

ترکیب وزنی جریان‌ها توسعه داد که این مدل نیز عموماً دارای سه پارامتر اصلی در ساختار خود می‌باشد و اصلاحی مستقیم بر شکل خطی رابطه ماسکینگام بود (Gill, 1978). با هدف افزایش دقت و ترکیب ویژگی‌های مدل‌های پیشین، مدل نسخه NL4 توسط عیسی (۲۰۱۴) ارائه شد که ساختار آن شامل دو بخش غیرخطی مجزا بوده و معمولاً با پنج پارامتر قابل برآورد، شناخته می‌شود (Easa, 2014). در نهایت، مدل NL5 به عنوان یکی از توسعه‌یافته‌ترین نسخه‌های این خانواده در سال ۲۰۱۵ توسط بزرگ‌حداد و همکاران معرفی شد که با بازپارامترسازی ساختار NL4 و افزودن ضرایب مستقل‌تر برای بخش‌های مختلف جریان، تعداد پارامترهای آن به هفت پارامتر افزایش یافته و توانایی بیشتری در شبیه‌سازی ناهمگونی‌های هیدرولیکی و هندسی رودخانه‌ها ارائه می‌دهد (Bozorg Haddad et al., 2015).

محمد رضایور طبری و امامی ده‌چشمه در سال ۲۰۱۸ مدل نسخه NL6 را به عنوان توسعه‌ای بر مدل NL5 معرفی کردند که با افزودن پارامتر بازیابی (γ) و بازتعریف ضرایب مدل، دقت روندیابی سیلاب را افزایش داد. این مدل هشت پارامتری با استفاده از الگوریتم ترکیبی PSO-DSO^۳ عملکرد نسبتاً مناسبی در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های تک‌قله‌ای و چندقله‌ای ارائه کرد و نسبت به مدل‌های پیشین، کاهش قابل توجهی در خطای روندیابی داشت (Tabari & Emami Dehcheshmeh, 2018).

با وجود توسعه مدل‌های مختلف غیرخطی ماسکینگام، افزایش پیچیدگی ساختار مدل و تعداد پارامترها، فرآیند واسنجی را نیز پیچیده‌تر می‌کند و عملکرد مدل به تعیین دقیق پارامترهای آن وابستگی بیشتری می‌یابد. همچنین، مدل‌های موجود همچنان در بازنمایی دقیق رفتارهای پیچیده سیلاب، به‌ویژه در شرایط چندقله‌ای، با محدودیت‌هایی مواجه هستند. عدم دقت در برآورد مقادیر هیدروگراف سیلاب خروجی، ساده‌سازی رابطه تغییرات ذخیره و عدم لحاظ برخی فرآیندهای فیزیکی مانند جریان‌های جانبی و اینرسی هیدرولیکی، از جمله عواملی هستند که می‌توانند موجب کاهش دقت مدل در برخی شرایط عملی شوند. بنابراین، صرف توسعه ساختارهای غیرخطی و افزایش تعداد پارامترهای مدل لزوماً به بهبود عملکرد روندیابی در تمامی شرایط منجر نمی‌شود و توسعه ساختارهای اصلاح‌شده همراه با روش‌های واسنجی کارآمد همچنان مورد نیاز است.

از سوی دیگر، با افزایش تعداد پارامترهای مدل‌های غیرخطی ماسکینگام، فرآیند تعیین مقادیر بهینه پارامترها به یک مسئله پیچیده بهینه‌سازی تبدیل می‌شود. از این رو، مطالعات اخیر با تمرکز بر ترکیب مدل‌های غیرخطی ماسکینگام و الگوریتم‌های هوشمند و فراابتکاری، تلاش کرده‌اند عملکرد این مدل‌ها را از طریق بهبود فرآیند واسنجی افزایش دهند. در همین راستا آتشی و همکاران در سال (۲۰۲۳) یک مدل ماسکینگام غیرخطی توزیع‌شده ارائه کردند که با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی WOA^۱ بهینه‌یابی شد و نشان دادند این ترکیب می‌تواند دقت روندیابی سیلاب را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Atashi et al., 2023a). همچنین صلواتی و همکاران در سال (۲۰۲۴) در یک مطالعه مروری نظام‌مند نشان دادند که توسعه مدل‌های ماسکینگام در دهه‌های اخیر عمدتاً به سمت ساختارهای غیرخطی و استفاده گسترده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهبود فرآیند واسنجی پارامترها حرکت کرده است، هرچند چالش‌هایی نظیر عدم دقت در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های پیچیده همچنان پابرجا است (Salvati et al., 2024). در ادامه ایکرم و همکاران نیز در سال (۲۰۲۵) با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر هوش مصنوعی در پیش‌بینی سیلاب نشان دادند که این روش‌ها موجب بهبود دقت مدل‌های هیدرولوژیکی می‌شوند، هرچند همچنان چالش‌هایی مانند همگرایی زودرس و کاهش تنوع جستجو وجود دارد (Ikram et al., 2025).

با وجود نتایج مطلوب حاصل از به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری رایج در فرآیند واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی با چالش‌هایی نظیر همگرایی زودرس، گیر افتادن در بهینه‌های محلی و کاهش تنوع جمعیت در مراحل پایانی جستجو مواجه هستند. این محدودیت‌ها می‌توانند موجب تعیین نامناسب پارامترهای مدل و در نتیجه کاهش دقت روندیابی، به‌ویژه در بازنمایی هیدروگراف‌های پیچیده و چندقله‌ای، شوند. لذا استفاده از



الگوریتم‌های بهینه‌سازی با قابلیت حفظ تعادل مناسب میان اکتشاف و بهره‌برداری و جلوگیری از کاهش زود هنگام تنوع جمعیت می‌تواند در بهبود فرآیند واسنجی مدل‌های غیرخطی ماسکینگام مؤثر باشد. الگوریتم ECO⁴ با بهره‌گیری از سه سازوکار مکمل در فرآیند تجزیه شامل تجزیه مبتنی بر بهترین پاسخ فعلی، جستجوی تصادفی در همسایگی راه‌حل‌های برتر و جستجوی تصادفی در کل فضای تصمیم، امکان حفظ تنوع جمعیت و کاهش احتمال همگرایی به بهینه‌های محلی را فراهم می‌سازد (Ma et al., 2025). این ساختار چندمرحله‌ای باعث می‌شود الگوریتم هم در فاز اکتشاف و هم در فاز بهره‌برداری عملکرد متوازنی داشته باشد و دقت همگرایی افزایش یابد.

با وجود توسعه مدل‌های متعدد غیرخطی ماسکینگام و استفاده از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی، همچنان دو چالش اساسی در روندیابی سیلاب باقی مانده است. نخست، مدل‌های موجود در بازنمایی دقیق رفتارهای پیچیده جریان، به‌ویژه هیدروگراف‌های چندقله‌ای، با محدودیت‌هایی مواجه هستند و برخی ساده‌سازی‌ها در رابطه تغییرات ذخیره می‌تواند موجب کاهش دقت شبیه‌سازی شود. دوم، عملکرد مدل‌های غیرخطی به فرآیند واسنجی پارامترها وابستگی زیادی دارد و محدودیت‌هایی مانند همگرایی زودرس و گرفتار شدن در بهینه‌های محلی در برخی الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند بر کیفیت پارامترهای بهینه و در نتیجه دقت روندیابی اثر گذار باشد. بر این اساس، توسعه یک ساختار اصلاح‌شده برای مدل ماسکینگام غیرخطی، همراه با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی کارآمد، می‌تواند رویکردی مؤثر برای بهبود عملکرد روندیابی سیلاب باشد. در این تحقیق و در راستای رفع این خلأ مطالعاتی، نسخه جدید با عنوان مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM)⁴ توسعه یافته است که با معرفی یک ضریب اصلاحی (δ_f) در رابطه تغییرات ذخیره، امکان در نظر گرفتن بهتر اثرات پویای جریان فراهم شده است. این اصلاح ساختاری با هدف افزایش توان مدل در بازنمایی رفتارهای غیرخطی و بهبود دقت شبیه‌سازی در شرایط تک‌قله‌ای و چندقله‌ای انجام شده است. در ادامه، پارامترهای مدل پیشنهادی با بهره‌گیری از الگوریتم چرخه اکولوژیکی (ECO) واسنجی می‌شوند تا قابلیت آن در پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب و عملکرد آن در مقایسه با مدل‌های پیشین ارزیابی شود. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، توسعه و ارزیابی یک مدل نوین روندیابی سیلاب مبتنی بر مدل ماسکینگام غیرخطی و بهینه‌سازی پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ECO، با تأکید بر بهبود دقت روندیابی سیلاب تحت شرایط مختلف حاکم بر هیدروگراف‌های ورودی و خروجی سیلاب است.

۲- مواد و روش‌ها

مدل ماسکینگام یکی از روش‌های کلاسیک و پرکاربرد در روندیابی سیلاب است که به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های محدود، کاربرد گسترده‌ای دارد. با این حال، فرض خطی بودن رابطه ذخیره-دبی در نسخه اولیه، توانایی آن را در شبیه‌سازی رفتارهای غیرخطی و پیچیده جریان محدود می‌کند و همین موضوع منجر به توسعه مدل‌های غیرخطی متعدد شده است. در این مطالعه، مدلی با عنوان مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) به عنوان نسخه توسعه‌یافته مدل‌های پیشین، با تمرکز بر اصلاح معادله پیوستگی و معرفی ضریب اصلاحی وابسته به زمان در تغییرات ذخیره، پیشنهاد شده است که امکان در نظر گرفتن اثرات پیچیده‌تری مانند جریان‌های جانبی، اینرسی و عدم قطعیت‌های هیدرولیکی را فراهم کرده و دقت مدل را به‌ویژه در هیدروگراف‌های چندقله‌ای بهبود می‌بخشد.

۲-۱- ساختار مدل ماسکینگام غیرخطی توسعه داده شده

در این پژوهش، نسخه‌ای ANMM که ادامه منطقی مدل نسخه NL6 محسوب می‌شود (Tabari & Emami Dehcheshmeh, 2018)، با حفظ ساختار کلی آن، یک اصلاح اساسی در معادله پیوستگی جریان اعمال می‌کند. نوآوری اصلی مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) معرفی



ضریب اصلاحی وابسته به زمان δ_t در رابطه تغییرات ذخیره است. این ضریب به صورت یک پارامتر ثابت در طول زمان در نظر گرفته نمی شود، بلکه در هر گام زمانی تغییر کرده و از طریق یک فرآیند بهینه سازی فراکاوشی برآورد می شود. این ویژگی امکان مدل سازی دقیق تر رفتارهای غیرخطی و پویای جریان، به ویژه در هیدروگراف های چندقله ای، را فراهم می کند. در این بخش نحوه توسعه مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) ارائه می شود.

$$S = \left[X b_1 \left(\frac{I}{a_1} \right)^{\frac{m_1}{n_1}} + (1 - X) b_2 \left(\frac{O}{a_2} \right)^{\frac{m_2}{n_2}} \right] \beta \quad (1)$$

در این رابطه، ضرایب (a_1, n_1) و (a_2, n_2) به ترتیب نشان دهنده مشخصه منحنی عمق-دبی در بالادست و پایین دست بازه روندیابی سیلاب است. با تعریف $K = b^\beta$, $\alpha_1 = \frac{m_1}{n_1}$, $\alpha_2 = \frac{m_2}{n_2}$, $C_1 = \left(\frac{1}{a_1} \right)^{\alpha_1}$ و $C_2 = \left(\frac{1}{a_2} \right)^{\alpha_2}$ به عنوان ضرایب ثابت، که رفتار کلی مدل روندیابی غیرخطی را تنظیم می کنند، رابطه ۱ به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$S_t = \gamma K [X C_1 I_t^{\alpha_1} + (1 - X) C_2 O_t^{\alpha_2}]^\beta, \quad t = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

در این رابطه، N ، مدت زمان کل سیلاب رخ داده است. لازم به ذکر است در مدل پیشنهادی، γ نقش کلیدی در کنترل میزان غیرخطی بودن پاسخ سیستم دارد. همچنین پارامترهای نمایی α_1 و α_2 ساختار غیرخطی رابطه دبی-ذخیره را شکل می دهند. ضریب بدون بعد X نیز سهم نسبی دبی ورودی و خروجی را در فرآیند ذخیره سازی تعیین می کند. در حالی که K به عنوان ثابت ذخیره بیانگر ویژگی های زمانی سیستم است. همچنین، I و O به ترتیب دبی جریان ورودی و خروجی در بازه مورد روندیابی هستند. با توجه به اینکه جهت روندیابی سیلاب نیاز به آگاهی از روند تغییرات ذخیره در بازه مورد روندیابی است، لذا در مدل توسعه داده شده، رابطه زیر پیشنهاد گردید:

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = \delta_t \left(I_t - \left\{ \left[\frac{1}{C_2(1-X)} \right] \left(\frac{S_t}{K} \right)^{\frac{1}{\beta}} - \left[\frac{1}{C_2(1-X)} \right] [X(C_1 I_t^{\alpha_1})]^{\frac{1}{\alpha_2}} \right\} \right) \quad (ANMM) \quad (3)$$

که در آن δ_t ضریب اصلاحی وابسته به زمان است و نقش کلیدی در تنظیم دینامیک مدل و افزایش دقت روندیابی دارد.

۲-۲- مراحل اجرایی محاسبه هیدروگراف خروجی در مدل پیشنهادی

جهت شبیه سازی هیدروگراف سیلاب خروجی در مدل غیرخطی ماسکینگام توسعه داده شده، فرآیند محاسبات در قالب مراحل زیر انجام می شود:

گام ۱: آماده سازی داده های ورودی شامل هیدروگراف دبی ورودی (I)، دبی خروجی (O) و گام زمانی روندیابی (Δt)

گام ۲: در این مرحله، مقاردهای اولیه متغیرهای تصمیم شامل پارامترهای مدل ANMM ($K, X, \alpha_1, \alpha_2, \beta, \gamma, C_1, C_2$) و ضریب اصلاحی δ_t به عنوان متغیرهای تصمیم لازم به ذکر است δ_t برای هر گام زمانی به عنوان یک متغیر تصمیم مستقل تعریف شده و تابعی از مقادیر گام های قبلی یا حاصل یک تابع هموارسازی نیست. با این حال، این متغیرها به صورت جداگانه و مستقل بهینه سازی نمی شوند؛ بلکه کل مجموعه δ_t به صورت هم زمان و در قالب یک بردار تصمیم واحد توسط الگوریتم ECO تعیین می شود. بنابراین، مقدار هر δ_t مستقیماً در چارچوب کل هیدروگراف و تابع هدف تعیین می شود و بهینه سازی بر مبنای عملکرد کلی مدل انجام می گیرد. این ساختار امکان بازنمایی تغییرات زمانی ذخیره در طول رخداد سیلاب را فراهم می کند و از وابسته کردن مصنوعی رفتار δ_t به یک تابع هموارسازی جلوگیری می نماید.

جهت تضمین پایداری محاسبات و جلوگیری از همگرایی الگوریتم به نواحی غیرواقعی، برای هر یک از پارامترها، بازه مجاز تغییرات تعریف گردید. بر این اساس، حدود پایین و بالای پارامترها به ترتیب به صورت $K \in [0.05, 5]$, $X \in [0.05, 0.4]$, $\alpha_1 \in [0.05, 3]$, $\alpha_2 \in [0.5, 2]$ ، و پارامترهای β, γ

C_1 و C_2 در بازه $[0.5, 2]$ در نظر گرفته شدند. همچنین، ضریب اصلاحی δ_t در بازه $[0.01, 4]$ تعریف گردید تا امکان اصلاح دینامیکی مؤلفه $\frac{\Delta S_t}{\Delta t}$ در طی فرآیند بهینه‌سازی فراهم شود.

گام ۳: تولید تصادفی پارامترها در بازه مجاز تعریف شده

گام ۴: محاسبه حجم ذخیره در گام زمانی نخست، از طریق رابطه ۲

گام ۵: محاسبه نرخ تغییرات ذخیره از گام زمانی دوم به بعد مطابق رابطه ۳ (در گام اول برابر صفر در نظر گرفته می‌شود) $(\frac{\Delta S_1}{\Delta t} = 0)$.

گام ۶: به‌روزرسانی حجم ذخیره در هر گام زمانی بر اساس رابطه زیر:

$$S_t = S_{t-1} + \Delta S_{t-1} \quad (4)$$

گام ۷: محاسبه دبی خروجی در هر گام زمانی (در گام نخست، دبی خروجی برابر دبی ورودی اولیه در نظر گرفته می‌شود) $(\hat{O}_1 = I_1)$.

$$\hat{O}_t = \left\{ \left[\frac{1}{C_2(1-X)} \right] \left(\frac{S_t}{K} \right)^{\frac{1}{\beta}} - \left[\frac{1}{C_2(1-X)} \right] [X(C_1 I_{t-1}^{\alpha_1})] \right\}^{\frac{1}{\alpha_2}} \quad (5)$$

گام ۸: تکرار مراحل ۵ تا ۷ برای کل بازه زمانی هیدروگراف ورودی مورد بررسی

گام ۹: ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص SSQ به عنوان تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی ECO

لازم به ذکر است جهت ارزیابی میزان دقت هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده از سایر معیارهای خطا همانند $RMSE$ ، NSE ، DPO ، SAD ،

MAE و $Epeak$ استفاده گردید. روابط ریاضی مربوط این معیارها که برای سنجش دقت هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده مورد استفاده قرار گرفتند،

به صورت زیر است:

$$SSQ = \sum_{t=1}^N (O_t - \hat{O}_t)^2 \quad (6)$$

در این رابطه، O_t و $\hat{O}_t$ به ترتیب بیانگر هیدروگراف سیلاب خروجی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است.

$$SAD = \sum_{t=1}^N |O_t - \hat{O}_t| \quad (7)$$

$$DPO = |O_p - \hat{O}_p| \quad (8)$$

شاخص DPO ، بیانگر اختلاف بین دبی اوج مشاهده‌شده (O_p) و روندیابی‌شده ($\hat{O}_p$) است و اهمیت بالایی در مدیریت سیلاب دارد، زیرا پیش‌بینی دقیق اوج

سیلاب در تعیین خسارت پایین‌دست نقش کلیدی دارد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (O_t - \hat{O}_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O}_t)^2} \quad (9)$$

شاخص NSE کارایی کلی مدل را در مقایسه با میانگین مشاهده‌ها ارزیابی می‌کند. مقدار ۱ نشان‌دهنده یک تطابق کامل است و مقادیر کمتر از صفر بیانگر

عملکرد ضعیف مدل است. در واقع این شاخص، برای ارزیابی دقت پیش‌بینی یک مدل بکار می‌رود و بیانگر بهبودی نسبت به ضریب تعیین برای ارزیابی مدل

است. در این شاخص، پارامتر $\bar{O}_t$ بیانگر میانگین حسابی دبی‌های مشاهده‌ای در کل دوره روندیابی سیلاب می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (O_t - \hat{O}_t)^2} \quad (10)$$



$$MAE = \left| \frac{1}{n} \sum_{t=1}^N (O_t - \hat{O}_t) \right| \quad (11)$$

$$E_{peak} = 100 \times \left| \frac{O_p - \hat{O}_p}{O_p} \right| \quad (12)$$

شاخص MAE میانگین قدرمطلق اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده را اندازه گیری می کند و مقدار کمتر آن نشان دهنده تطابق بهتر نتایج شبیه سازی با داده های مشاهده ای است. بر اساس این شاخص می توان میزان نزدیکی مقادیر پیش بینی شده به مقادیر مشاهداتی را مورد اندازه گیری قرار داد. شاخص Epeak درصد اختلاف مطلق بین دبی اوج مشاهده شده و دبی اوج شبیه سازی شده را نشان می دهد و مقدار کمتر آن بیانگر دقت بیشتر مدل در برآورد دبی اوج سیلاب است. مقدار مطلوب شاخص های MAE، RMSE و Epeak برابر با صفر است، به طوری که مقادیر کمتر این شاخص ها بیانگر تطابق بهتر هیدروگراف شبیه سازی شده با مقادیر مشاهده شده هستند.

۲-۳- کلیات ساختار الگوریتم بهینه سازی چرخه اکولوژیکی

الگوریتم بهینه سازی چرخه اکولوژیکی (ECO) یک الگوریتم فراابتکاری جمعیتی نوین برای حل مسائل بهینه سازی پیوسته است که سازوکار آن بر پایه شبیه سازی تعاملات اکولوژیکی میان چهار گروه اصلی شامل تولیدکنندگان، گیاهخواران، گوشت خواران و همه چیزخواران، به همراه فرآیند تجزیه، توسعه یافته است. این الگوریتم با الهام از چرخه انتقال انرژی و روابط تغذیه ای موجود در اکوسیستم های طبیعی، تلاش می کند تعادل مناسبی میان اکتشاف و بهره برداری برقرار نماید. برخلاف بسیاری از الگوریتم های فراکاوشی متداول که عمدتاً بر یک مکانیزم جستجوی واحد متکی هستند، ECO از چندین راهبرد تکاملی هم زمان استفاده می کند که این ویژگی موجب افزایش تنوع جمعیت، کاهش احتمال گرفتار شدن در بهینه های محلی و بهبود سرعت همگرایی الگوریتم می شود. همچنین وجود سازوکار تجزیه در ECO سبب تقویت توانایی بازیابی تنوع جمعیت و حفظ قابلیت جستجوی سراسری در مراحل پایانی فرآیند بهینه سازی می گردد.

در ابتدای الگوریتم، جمعیت اولیه به صورت تصادفی در فضای جستجو تولید شده و بر اساس نسبت های از پیش تعیین شده به چهار گروه اصلی تقسیم می شود. در هر تکرار، بهترین پاسخ حاصل شده به عنوان جواب بهینه جاری ذخیره شده و مبنای به روزرسانی سایر اعضای جمعیت قرار می گیرد. فرآیند تکامل جمعیت در هر نسل بر اساس پنج راهبرد اصلی زیر انجام می شود:

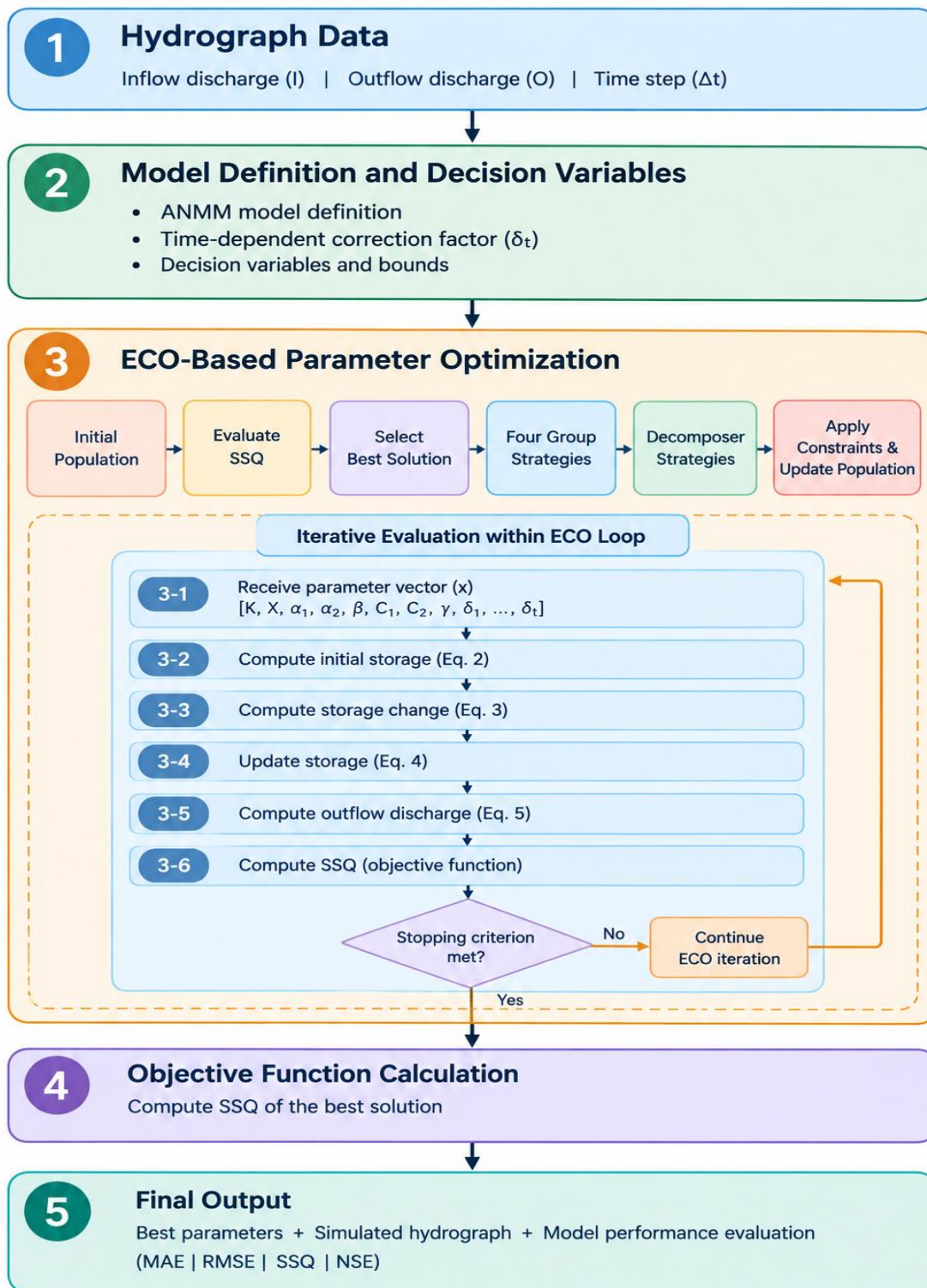
- استراتژی تولیدکننده که طی آن بهترین افراد جمعیت، پس از ترکیب با جمعیت حاصل از فرآیند تجزیه، مجدداً مرتب سازی شده و افراد برتر به عنوان تولیدکنندگان نسل بعد انتخاب می شوند.
- استراتژی گیاهخوار که در آن هر گیاهخوار موقعیت خود را بر اساس موقعیت سه تولیدکننده منتخب به روزرسانی می کند. انتخاب این تولیدکنندگان با استفاده از روش چرخ گردان^{۱۳} و متناسب با کیفیت تابع هدف انجام می شود؛ به طوری که افراد دارای برازندگی بهتر، احتمال بیشتری برای تأثیرگذاری بر حرکت گیاهخواران خواهند داشت.
- استراتژی گوشت خوار که مشابه راهبرد گیاهخوار عمل کرده، با این تفاوت که موقعیت گوشت خواران بر مبنای تعامل با گیاهخواران منتخب اصلاح می شود.
- استراتژی همه چیزخوار که در آن هر فرد به طور هم زمان از اطلاعات تولیدکنندگان، گیاهخواران و گوشت خواران استفاده کرده و بدین ترتیب تعادل مناسبی میان اکتشاف و بهره برداری برقرار می گردد.



در این الگوریتم، فرآیند تجزیه جهت جلوگیری از کاهش تنوع جمعیت و افزایش توان فرار از بهینه‌های محلی طراحی شده است. این فرآیند شامل سه سازوکار اصلی است: (۱) تجزیه مبتنی بر بهترین جواب به منظور بهبود موضعی اطراف ناحیه بهینه، (۲) جستجوی تصادفی محلی در همسایگی بهترین عضو جمعیت و (۳) جستجوی تصادفی سراسری جهت اکتشاف نواحی جدید فضای تصمیم.

در این الگوریتم، پارامتر تصادفی G به عنوان ضریب کنترل کننده دامنه و جهت حرکت افراد در فضای جستجو تعریف می‌شود. مقدار این پارامتر در هر تکرار به صورت پویا و وابسته به شماره تکرار به‌روزرسانی می‌شود؛ به گونه‌ای که در تکرارهای ابتدایی، مقادیر بزرگ‌تر G موجب تقویت جستجوی سراسری شده و با نزدیک شدن به انتهای فرآیند بهینه‌سازی، کاهش تدریجی آن سبب افزایش دقت جستجوی موضعی در اطراف جواب‌های بهینه می‌گردد. در پایان هر تکرار نیز بهترین جواب به‌روزرسانی شده و مقدار تابع هدف متناظر برای ترسیم منحنی همگرایی ذخیره می‌شود.

جزئیات مرتبط با نحوه عملکرد این الگوریتم را می‌توان در مطالعه بویا^{۱۴} و همکاران در سال (۲۰۲۵) مطالعه نمود (Ma et al., 2025). به منظور درک بهتر از فرآیندهای حاکم بر شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب بر مبنای ساختار پیشنهادی (مدل ANMM) (شکل ۱) و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ECO، شکل S۱ (در فایل‌های اضافی ضمیمه مقاله) تهیه گردید.



شکل ۱- ساختار مدل جدید ماسکینگام بهینه‌سازی شده با الگوریتم چرخه اکولوژیکی به منظور روندیابی غیرخطی سیلاب

Fig. 1. Structure of the new Muskingum model optimized using the Ecological Cycle Algorithm for nonlinear flood routing

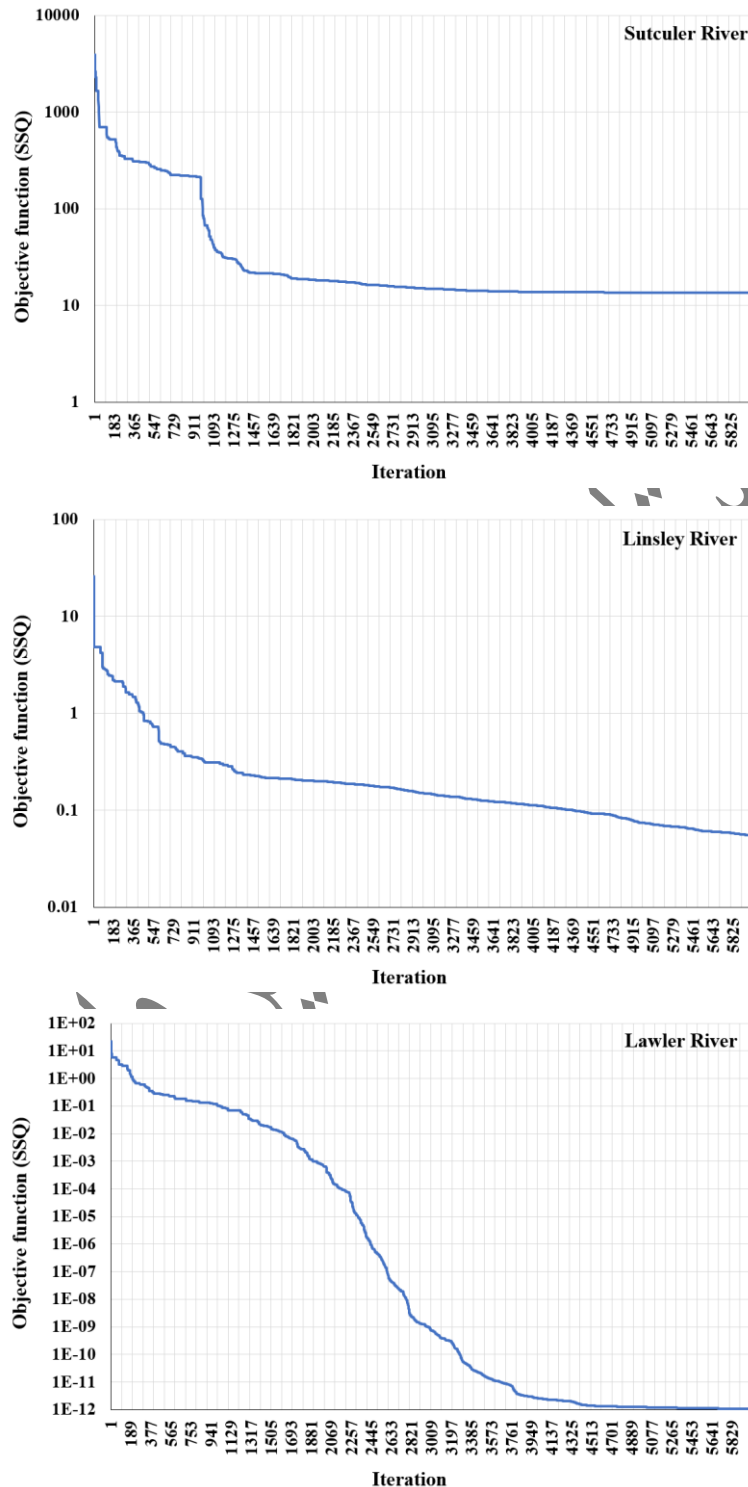
۳- ارائه نتایج

ارزیابی عملکرد مدل‌های روندیابی سیلاب مستلزم اعتبارسنجی آن‌ها تحت شرایط مختلف هیدرولوژیکی است. برای دستیابی به این مهم، در پژوهش حاضر از سه هیدروگراف با پیکره‌بندی متفاوت استفاده گردید. این سه نوع هیدروگراف (لاولر^{۱۵}، لینسلی^{۱۶} و سوتکالر^{۱۷}) به عنوان معیارهای استاندارد برای آزمون کارایی مدل انتخاب شده‌اند تا دقت روندیابی سیلاب را در شرایط هیدرولوژیکی متنوع مورد بررسی قرار دهند. برای هر مطالعه موردی، ویژگی‌های رودخانه، نتایج شبیه‌سازی، شاخص‌های ارزیابی عملکرد و همچنین نمودار هیدروگراف‌ها ارائه و تحلیل شده‌اند. لازم به ذکر است داده‌های خام هیدروگراف‌های ورودی و خروجی مورد بررسی در فایل‌های اضافی ضمیمه شده این مقاله ارائه شده است.

به‌منظور بررسی رفتار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی چرخه اکولوژیکی (ECO) در فرآیند واسنجی پارامترهای مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM)، روند تغییرات مقدار تابع هدف در برابر تعداد تکرارهای الگوریتم برای هر سه مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که تابع هدف مورد استفاده در فرآیند بهینه‌سازی، کمیته‌سازی مجموع مربعات خطاها (SSQ) است، کاهش مقدار SSQ در طول تکرارهای الگوریتم به‌عنوان شاخصی از بهبود تدریجی جواب‌های کاندید و حرکت الگوریتم به سمت ناحیه بهینه در نظر گرفته شد. منحنی‌های همگرایی حاصل برای هیدروگراف‌های رودخانه لاولر، لینسلی و سوتکالر در شکل ۲ ارائه شده‌اند. بررسی این منحنی‌ها امکان ارزیابی روند کاهش تابع هدف، میزان پایداری فرآیند جستجو و نحوه رسیدن الگوریتم ECO به پاسخ نهایی را فراهم می‌کند.

مطابق شکل ۲، در هر سه مطالعه موردی، مقدار تابع هدف SSQ در مراحل ابتدایی تکرارهای الگوریتم ECO کاهش محسوسی نشان داده و با افزایش تعداد تکرارها، روند تغییرات آن به‌تدریج به سمت مقادیر پایدارتر حرکت کرده است. این رفتار نشان می‌دهد که الگوریتم در مراحل اولیه جستجو بخش عمده‌ای از بهبود تابع هدف را حاصل کرده و در ادامه با تمرکز بیشتر بر نواحی با مطلوبیت بالاتر فضای تصمیم، به پالایش پاسخ‌های بهینه پرداخته است. کاهش تدریجی شیب منحنی‌ها در تکرارهای پایانی نیز بیانگر نزدیک شدن فرآیند جستجو به یک وضعیت پایدار از نظر مقدار تابع هدف است.

مقایسه سه منحنی نشان می‌دهد که سرعت کاهش تابع هدف در مطالعات موردی مختلف یکسان نیست که می‌تواند ناشی از تفاوت در ساختار و ویژگی‌های هیدروگراف‌های مورد بررسی و همچنین پیچیدگی متفاوت فضای پارامترهای متناظر باشد. با این حال، در هر سه مورد، روند کلی همگرایی به سمت مقادیر پایین‌تر SSQ مشاهده می‌شود. بنابراین، نتایج منحنی‌های همگرایی نشان می‌دهد که الگوریتم ECO در فرآیند واسنجی مدل ANMM توانسته است روند جستجوی خود را تا رسیدن به یک پاسخ پایدار ادامه دهد.



شکل ۲- منحنی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی چرخه اکولوژیکی (ECO) در فرآیند واسنجی مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) برای سه مطالعه موردی

Fig. 2. Convergence curves of the ECO during calibration of the ANMM Model for the three case studies

۳-۱- هیدروگراف مرتبط با رودخانه لاولر

داده‌های لاولر شامل یک رویداد سیلابی با مدت زمان ۲۷ روز و گام زمانی یک روز بوده که در آن هیدروگراف ورودی و خروجی به صورت پیوسته ثبت شده است (Atashi et al., 2023b). این سیلاب دارای هیدروگرافی با پیک نسبتاً هموار است که ناشی از بارش با شدت تقریباً ثابت در طول دوره وقوع سیلاب می‌باشد. از نظر هیدرولوژیکی، این مطالعه موردی نمایانگر یک سیلاب با پویایی ملایم و تغییرات تدریجی در دبی است و برای ارزیابی توان مدل در شرایط نزدیک به رفتار شبه‌خطی نیز کاربرد دارد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها برای این هیدروگراف در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و نمودارهای تغییرات حجم ذخیره توسط مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) در شکل ۳ نشان داده شده است.

Table 1. Comparison of performance indicators between the proposed model and existing methods for the Lawler River flood routing

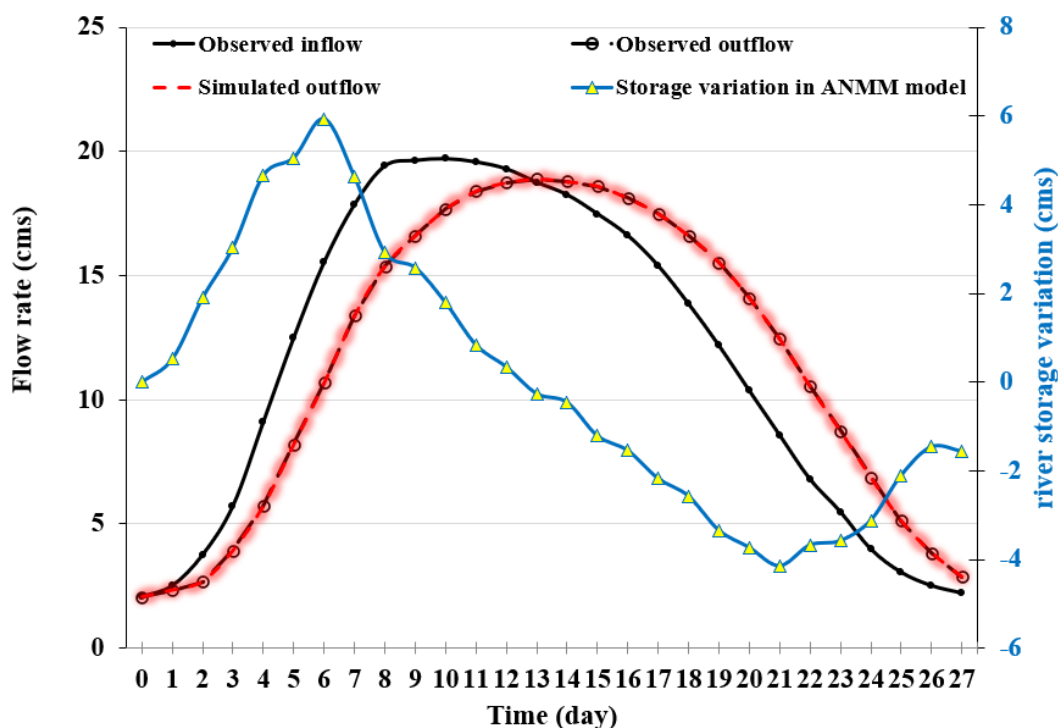
جدول ۱- نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل‌ها (هیدروگراف سیلاب رودخانه لاولر)

Model		ANMM (Proposed)	NL6	NL3 extended (distributed version)	¹ VEP- NLMM-L (NL3)
Optimization algorithm		ECO	ECO	WOA	¹ SCA
Reference		This Study	This Study	Atashi et al. (2023a)	Atashi et al. (2023b)
Optimal value of the parameters	K	0.97	0.47	0.39	0.37
	X	0.37	0.12	0.02	0.03
	α_1	0.31	0.05	-	-
	α_2	1.16	1.07	-	-
	$B = m$	1.13	1.45	1.51	1
	β	-	-	0.01	0
	C_1	1.23	2	-	-
	C_2	1.21	0.89	-	-
	γ	1.13	1.17	-	-
Error indices	DPO	~0	0.17	0.06	0.06
	SAD	~0	5.75	2.33	2.29
	SSQ	~0	1.77	0.36	0.36
	NSE	~1	0.99	0.99	0.99
	MAE	~0	0.2	0.08	0.08
	Epeak	~0	0.92	0.31	0.31
	RMSE	~0	0.25	0.11	0.11

در مطالعه موردی رودخانه لاولر، مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) با الگوریتم ECO توانسته است عملکردی بسیار دقیق در بازتولید هیدروگراف مشاهده‌شده ارائه دهد. با توجه به اینکه تابع هدف در این پژوهش کمینه‌سازی شاخص SSQ بوده است، دستیابی مدل به مقدار تقریباً صفر برای SSQ نشان‌دهنده حذف کامل اختلافات بین جریان‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده است. سایر شاخص‌های خطا نیز به مقادیر نزدیک به صفر رسیده‌اند که بیانگر دقت فوق‌العاده مدل در بازسازی جریان‌های اوج، زمان وقوع قله و روند کلی دبی است. مقدار NSE برابر با یک و مقادیر بسیار کوچک برای MAE، Epeak و RMSE حاکی از انطباق کامل هیدروگراف شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی می‌باشد. این همگرایی بسیار دقیق در فرآیند بهینه‌سازی



نتیجه‌ای از ترکیب سه عامل اصلی است: کیفیت مناسب داده‌ها، انعطاف‌پذیری مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) و کارایی بالای الگوریتم ECO.



شکل ۳- مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده همراه با تغییرات حجم ذخیره در مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) (رودخانه لاولر)

Fig. 3. Comparison of observed and simulated hydrographs along with storage volume variations for the Adaptive Nonlinear Muskingum Model (ANMM) (Lawler River)

مطابق شکل ۳، مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) در مواجهه با داده‌های رودخانه لاولر، عملکردی بسیار نزدیک و با کیفیت بالا را به نمایش می‌گذارد. تطابق بین جریان خروجی شبیه‌سازی شده توسط مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) و جریان خروجی مشاهده شده در طول کل توالی داده‌ها، از دقت قابل توجهی برخوردار است و مدل توانسته است روند کلی و مقیاس تغییرات هیدروگراف را با موفقیت بازتولید کند. این هم‌راستایی قوی، بیانگر توانایی مدل در بازنمایی صحیح رفتار دینامیکی رودخانه و تبدیل مناسب ورودی به خروجی است، حتی در بازه‌هایی که جریان ورودی دستخوش تغییرات محسوس می‌شود. علاوه بر این، تحلیل مقادیر تغییرات ذخیره در مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) نشان می‌دهد که این مدل قادر است پویایی‌های پیچیده انباشت و آزادسازی آب را به خوبی شبیه‌سازی کند. گذار از مقادیر مثبت $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ در ابتدای توالی، که حاکی از انباشت آب در اثر افزایش جریان ورودی است، به مقادیر منفی قابل توجه در ادامه، نشان‌دهنده آزادسازی ذخایر و پاسخ تدریجی سامانه به کاهش ورودی می‌باشد. این رفتار، توانایی مدل در بازنمایی چرخه کامل ذخیره‌سازی و تخلیه را در طول توالی داده‌ها تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) صرفاً یک برازش‌کننده هیدروگراف نیست، بلکه ساختار دینامیکی حاکم بر سیستم را نیز به درستی منعکس می‌سازد.



در بخش پایانی توالی، مشاهده می‌شود که علی‌رغم فروکش کردن سیلاب، مقدار ذخیره، مقدار اندکی مثبت باقی می‌ماند. این پدیده لزوماً به معنای نقص مدل نیست، بلکه می‌تواند ناشی از شرایط فیزیکی و مکانی بازه مطالعه باشد. یکی از دلایل محتمل، فاصله قابل توجه میان نقطه قرائت جریان ورودی و نقطه خروجی است؛ به‌طوری‌که بخشی از حجم سیلاب در این فاصله مکانی انباشت شده و به دلیل زمان ماند بالا، خروج آن با تأخیر رخ می‌دهد. افزون بر این، ویژگی‌های بستر رودخانه نیز در تداوم ذخیره مؤثرند؛ برای مثال، ریزدانه بودن رسوبات، عرض زیاد بستر، یا وجود پوشش گیاهی و ناهمواری‌های موضعی می‌توانند ظرفیت نگهداشت آب را افزایش داده و مانع از کاهش محسوس ذخیره در کوتاه‌مدت شوند. از این رو، مشاهده ذخیره مثبت در روزهای انتهایی، می‌تواند بازتابی از پاسخ واقعی سامانه هیدرولوژیکی در مقیاس مکانی و زمانی مورد بررسی باشد.

۳-۲- هیدروگراف مرتبط با رودخانه لینسلی

داده‌های لینسلی شامل یک رویداد سیلابی کوتاه‌مدت با مدت زمان ۱۰ ساعت و با تفکیک زمانی ۳۰ دقیقه است (Atashi et al., 2023a). این سیلاب دارای رفتار غیرخطی و نسبتاً تند بوده و برای کاربردهای مرتبط با مدیریت سیلاب شهری بسیار مناسب است. مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها برای رودخانه لینسلی در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده و نمودارهای تغییرات حجم ذخیره توسط مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) در شکل ۵ ارائه شده است.

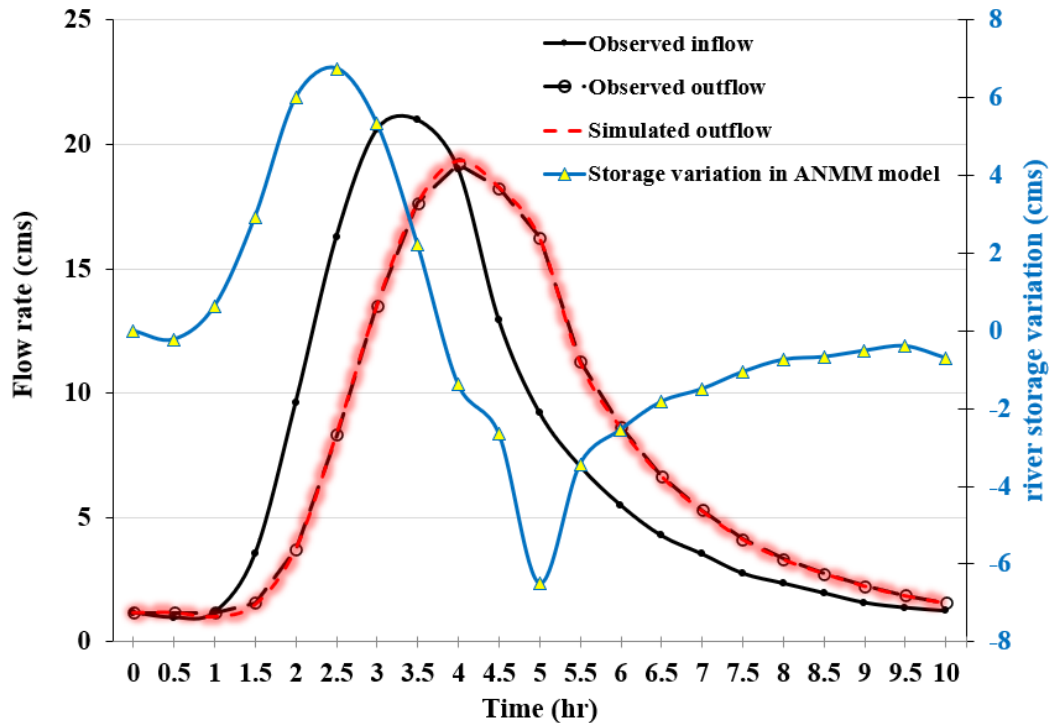
در ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی برای رودخانه لینسلی، مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) با بهره‌گیری از الگوریتم ECO عملکردی برتر نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان داده است. دستیابی تابع هدف (SSQ) به مقدار ۰/۰۵ (بهبود ۹۷ درصدی) توسط مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) نشان‌دهنده توانمندی بالای مدل و همچنین الگوریتم ECO در جستجوی فضای پارامترها و یافتن ترکیب بهینه ضرایب غیرخطی است. سایر شاخص‌های ارزیابی عملکرد نیز مؤید این برتری هستند؛ به گونه‌ای که مقدار NSE به ۱ افزایش یافته و شاخص‌های خطا شامل MAE, RMSE و DPO به مقادیر بسیار ناچیزی رسیده‌اند. همچنین، رسیدن شاخص Epeak به ۰/۷۳ درصد، بیانگر توانایی ویژه مدل در بازتولید مناسب دبی‌های اوج است.

Table 2. Comparison of performance indicators between the proposed model and existing methods for the linsley River flood routing

جدول ۲- نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل‌ها (هیدروگراف سیلاب رودخانه لینسلی)

Model		ANMM (Proposed)	NL6	NL3 extended (distributed version)	VEP-NLMM- L (NL3)
Optimization algorithm		ECO	ECO	WOA	SCA
Reference		This Study	This Study	Atashi et al. (2023a)	Atashi et al. (2023b)
Optimal value of the parameters	K	1.33	0.55	0.34	0.34
	X	0.09	0.05	0.14	0.15
	α_1	0.18	0.05	-	-
	α_2	1.09	1.17	-	-
	$B = m$	0.9	1.07	1.02	1.02
	β	-	-	0.01	0.02
	C_1	0.95	0.5	-	-
	C_2	1.08	1.25	-	-
	γ	1	0.97	-	-
Error indices	DPO	0.14	0.19	0.25	0.26
	SAD	0.5	6.56	3.34	3.34
	SSQ	0.05	2.94	1.5	1.51
	NSE	~ 1	0.99	0.99	0.99
	MAE	0.02	0.31	0.15	0.15
	Epeak	0.73	1.02	1.3	1.35
	RMSE	0.05	0.37	0.26	0.26

مطابق شکل ۴، مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) توانسته است شکل کلی هیدروگراف و مقدار دبی اوج را با دقت بالایی بازسازی کند. انطباق مناسب هیدروگراف در بخش‌های صعودی و نزولی موج سیلاب، نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی فرایند انتقال و تخلیه موج در این رخداد می‌باشد. همچنین تغییرات حجم ذخیره، نوسان بالایی رو نشان می‌دهد که نشان از توانایی بالای مدل پیشنهادی در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی ذخیره است. در ابتدا با افزایش جریان ورودی حجم ذخیره هم افزایش یافته که بیانگر ذخیره‌سازی سیستم دارد. در اوج و پس از افزایش جریان خروجی، تغییرات ذخیره نیز روند کاهشی شدید دارد که مرحله تخلیه را به خوبی معین می‌سازد. در مطالعه رودخانه لینسلی نیز، مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) توانست تداوم اثرات ذخیره‌سازی در بازه رودخانه را به خوبی بازنمایی کند؛ به گونه‌ای که علی‌رغم کاهش جریان ورودی، بخشی از حجم ذخیره شده در سازه‌ها با تأخیر آزاد شده و در قالب رواناب تأخیری در هیدروگراف خروجی ظاهر می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که اثرات مثبت ذخیره‌سازی نقش مهمی در روندیابی هیدروگراف سیلاب خروجی ایفا می‌کنند و پاسخ هیدرولوژیکی سامانه صرفاً تابع شرایط لحظه‌ای جریان ورودی نیست. بحث تفصیلی درباره تفسیر فیزیکی این پدیده در بخش نتایج مربوط به رودخانه لاولر ارائه شده است.



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده همراه با تغییرات حجم ذخیره در مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (رودخانه لینسلی) (ANMM)

Fig. 4. Comparison of observed and simulated hydrographs along with storage volume variations for the Adaptive Nonlinear Muskingum Model (ANMM) (linsley River)

۳-۳- هیدروگراف مرتبط با رودخانه سوتکالر

داده‌های سوتکالر شامل یک سیلاب چندقله‌ای ناشی از بارش شدید چهار ساعته در تاریخ ۴ نوامبر ۱۹۹۵ در مرکز شهر سوتکالر در کشور ترکیه است. این سیلاب دارای مدت زمان کل ۳۰ گام زمانی با $\Delta t = 1$ ساعت می‌باشد (Karahane et al., 2015). هیدروگراف خروجی دارای دو پیک مشخص در ساعات چهار و شانزدهم است که نشان‌دهنده رفتار پیچیده و چندمرحله‌ای جریان می‌باشد. این مطالعه موردی به دلیل چندقله‌ای بودن هیدروگراف، تغییرات شدید در دبی ورودی و رفتار کاملاً غیرخطی سیستم رودخانه‌ای، یکی از مهم‌ترین مجموعه‌داده‌ها برای ارزیابی مدل‌های غیرخطی پیشرفته محسوب می‌شود. مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها برای رودخانه سوتکالر در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و نمودارهای تغییرات حجم ذخیره توسط مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) در شکل ۵ ارائه شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌های مورد بررسی در بازتولید هیدروگراف سیلاب رودخانه سوتکالر تفاوت قابل توجهی دارد. این اختلاف عملکرد را می‌توان تا حد زیادی به ماهیت پیچیده و دوقله‌ای هیدروگراف این مطالعه موردی و توانایی متفاوت ساختار مدل‌ها در نمایش تغییرات زمانی جریان و فرآیند ذخیره نسبت داد. وجود دو قله مشخص، تغییرات نسبتاً سریع دبی و ضرورت بازتولید صحیح زمان و مقدار قله‌ها، شرایطی را ایجاد می‌کند که در آن انعطاف‌پذیری ساختار مدل نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت روندیابی دارد.

Table 3. Comparison of performance indicators between the proposed model and existing methods for the Sutculer River flood routing

جدول ۳- نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل‌ها (هیدروگراف سیلاب رودخانه سوتکالر)

Model		ANMM (Proposed)	NL6	^{۱۱} (NL5- AL)	NL3(Modified ANLMM-L)	NL3 ^{۲۰} (ANLMM- L)	NL3 (NLMM- L)
Optimization		ECO	ECO	^{۲۵} GTO	^{۲۶} SAVCA	^{۲۳} VCA	^{۲۲} HS
Reference		This Study	This Study	Moradi et al. (2023)	Lee (2021)	Lee et al. (2018)	Karahan et al. (2015)
Error indices	DPO	0.02	7.36	0.38	0.58	1.89	1.89
	SAD	12.09	94.67	24.4	54.04	50.44	50.48
	SSQ	13.51	486.88	35.5	217.73	280.95	281.28
	NSE	0.9998	0.9921	0.9995	0.9965	0.9955	0.9955
	MAE	0.4	3.15	0.81	1.8	1.68	1.68
	Epeak	0.01	3.57	0.18	0.28	0.91	0.91
	RMSE	0.67	4.02	1.05	2.69	3.06	3.06

در میان مدل‌های ارزیابی‌شده، مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) بهینه‌سازی‌شده با الگوریتم ECO، در تمامی شاخص‌های اصلی ارزیابی، عملکرد بسیار مطلوبی نشان داده است. این مدل با مقدار SSQ برابر ۱۳/۵۱، کمترین خطای کلی را در بازتولید هیدروگراف به خود اختصاص داده است که بیانگر بهبود حدود ۶۲ درصدی نسبت به بهترین مدل رقیب است. علاوه بر این، مقدار MAE برابر ۰/۴ و RMSE برابر ۰/۶۷ نشان می‌دهد که کاهش خطا در ANMM محدود به بخش خاصی از هیدروگراف نبوده، بلکه در کل سری زمانی توزیع شده است. مقدار NSE برابر ۰/۹۹۹۸ نیز تأییدکننده تطابق بسیار بالای هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده است. بنابراین، برتری ANMM در شاخص SSQ را نمی‌توان صرفاً به بهبود بازتولید یک یا هر دو قله نسبت داد، بلکه این مدل توانسته است خطای شبیه‌سازی را در مقیاس کل هیدروگراف نیز به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد.

برتری مدل ANMM در شاخص DPO اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا این شاخص مستقیماً توانایی مدل در بازتولید رفتار هیدروگراف در ناحیه اوج را منعکس می‌کند. مقدار DPO مدل ANMM برابر ۰/۰۲ است، در حالی که این مقدار برای مدل NL6 برابر ۷/۳۶ گزارش شده است. همچنین، مقایسه با بهترین مدل رقیب در این شاخص نشان‌دهنده بهبود حدود ۹۵ درصدی ANMM است. از آنجا که هیدروگراف سوتکالر دارای دو قله مشخص است، دقت در شبیه‌سازی رفتار جریان در اطراف نقاط اوج، علاوه بر خطای کلی، معیار مهمی برای ارزیابی قابلیت مدل محسوب می‌شود. مقدار بسیار پایین DPO در ANMM نشان می‌دهد که این مدل توانسته است نه تنها شکل کلی هیدروگراف، بلکه ویژگی‌های مرتبط با اوج جریان را نیز با دقت بالاتری بازتولید کند.

در مقابل، مقدار نسبتاً بالای DPO در مدل NL6 بیانگر محدودیت این ساختار در بازتولید دقیق رفتار هیدروگراف‌های پیچیده و چندقله‌ای است. اگرچه NL6 از یک ساختار غیرخطی بهره می‌گیرد، ساختار آن انعطاف‌پذیری کافی برای انطباق با تغییرات زمانی پیچیده فرآیند ذخیره و تبدیل آن به جریان خروجی را در این مطالعه موردی فراهم نمی‌کند. این محدودیت به‌ویژه در نواحی نزدیک به قله‌های هیدروگراف آشکار می‌شود؛ جایی که تغییرات سریع جریان، حساسیت مدل به زمان‌بندی و مقدار ذخیره را افزایش می‌دهد.

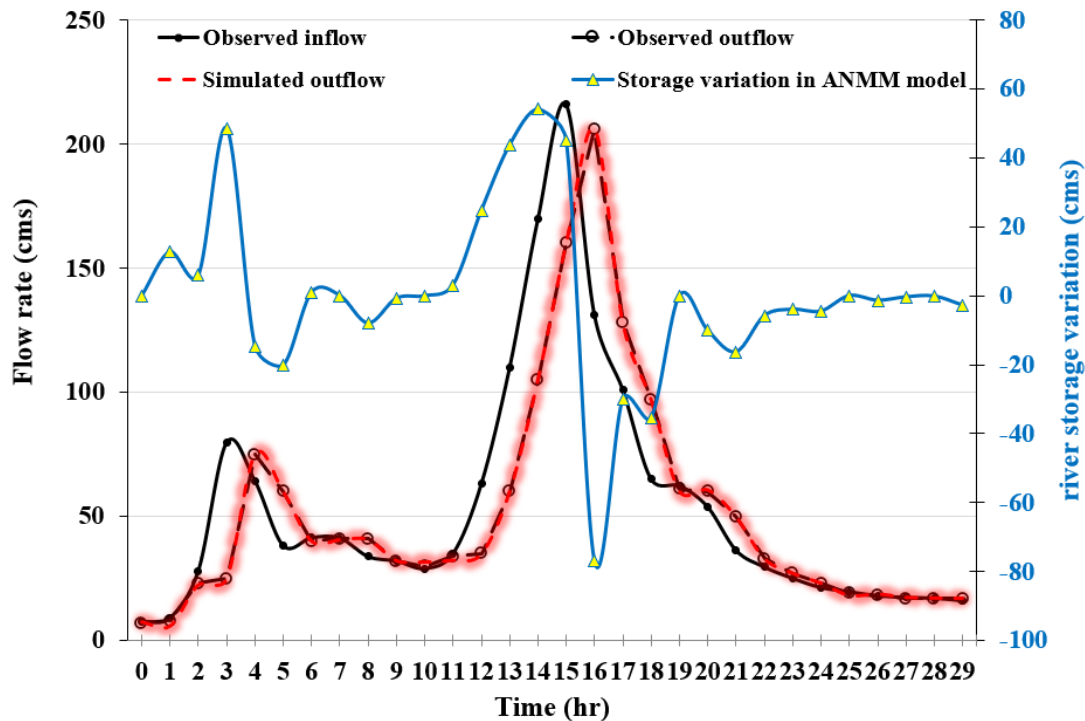


یکی از عوامل اصلی بهبود عملکرد ANMM را می‌توان به معرفی ضریب اصلاحی وابسته به زمان نسبت داد. این ویژگی به مدل اجازه می‌دهد که رابطه بین ذخیره و جریان خروجی را در طول زمان به صورت انعطاف‌پذیرتری تنظیم کند و در نتیجه، تغییرات سریع جریان و رفتار متفاوت هیدروگراف در مراحل مختلف سیلاب را بهتر نمایش دهد. از این منظر، برتری ANMM در DPO را می‌توان ناشی از قابلیت بیشتر آن در تطبیق با رفتار غیرایستا و چندقله‌ای هیدروگراف دانست. به بیان دیگر، در حالی که ساختارهای غیرخطی ثابت مانند NL6 در مواجهه با تغییرات پیچیده زمانی با محدودیت مواجه می‌شوند، ساختار تطبیقی ANMM امکان تعدیل پاسخ مدل متناسب با شرایط زمانی هیدروگراف را فراهم می‌کند.

مقایسه نتایج با سایر مدل‌ها نیز نشان می‌دهد که عملکرد مدل پیشنهادی را نمی‌توان صرفاً به استفاده از الگوریتم ECO نسبت داد. بسیاری از مدل‌های مقایسه‌ای موجود نیز نسخه‌های توسعه‌یافته‌ای از ساختارهای پایه خود هستند و با افزودن پارامترها یا مؤلفه‌های اصلاحی، تلاش کرده‌اند محدودیت‌های مدل‌های اولیه را کاهش دهند. بنابراین، مقایسه ANMM با این مدل‌ها، مقایسه‌ای میان ساختارهای توسعه‌یافته و بهینه‌شده است، نه صرفاً میان فرم پایه مدل‌های NL3 یا NL5 و مدل پیشنهادی. در این چارچوب، عملکرد بهتر ANMM نشان می‌دهد که ترکیب ساختار غیرخطی با یک ضریب اصلاحی وابسته به زمان می‌تواند برای هیدروگراف‌های پیچیده و چندقله‌ای مفید باشد.

بررسی روند تغییرات ذخیره نیز این تفسیر را تقویت می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تغییرات ذخیره در طول زمان یکنواخت نیست و در بخش‌هایی از هیدروگراف، حتی در شرایط کاهش دبی ورودی، اثر تباطؤ فرآیند ذخیره‌سازی در پاسخ مدل مشاهده می‌شود. افزایش مجدد نرخ تغییرات ذخیره در حوالی گام زمانی ۱۰ نیز با شکل دوقله‌ای هیدروگراف سازگار است و می‌تواند بیانگر واکنش مدل به موج دوم جریان باشد. این رفتار نشان می‌دهد که پاسخ خروجی صرفاً تابع مقدار لحظه‌ای دبی ورودی نیست و اثرات ذخیره‌سازی و آزادسازی آب در طول بازه روندیابی نیز در شکل‌گیری هیدروگراف خروجی نقش دارند.

در مجموع، نتایج مطالعه سوتکالر نشان می‌دهد که مزیت اصلی ANMM در این مطالعه، توانایی آن در کاهش هم‌زمان خطای کلی، خطای متوسط و خطای مربوط به دبی اوج است. این موضوع به‌ویژه برای هیدروگراف‌های چندقله‌ای اهمیت دارد، زیرا عملکرد مناسب مدل در این شرایط مستلزم بازتولید هم‌زمان روند کلی هیدروگراف و تغییرات موضعی و نقاط اوج آن است. با این حال، نتایج این مطالعه به معنای برتری مطلق مدل پیشنهادی در تمام شرایط هیدرولوژیکی نیست و ارزیابی عملکرد ANMM در مجموعه گسترده‌تری از رودخانه‌ها و هیدروگراف‌ها می‌تواند در مطالعات آینده انجام شود.



شکل ۵- مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده همراه با تغییرات حجم ذخیره در مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) (رودخانه سوتکالپ)

Fig. 5. Comparison of observed and simulated hydrographs along with storage volume variations for the Adaptive Nonlinear Muskingum Model (ANMM) (Sutculer River)

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش، یک مدل تطبیقی ماسکینگام غیرخطی (ANMM) با هدف بهبود دقت روندیابی سیلاب و افزایش توانایی مدل در بازنمایی تغییرات زمانی و غیرخطی هیدروگراف توسعه داده شد. در ساختار پیشنهادی، با معرفی یک ضریب اصلاحی وابسته به زمان در معادله تغییرات ذخیره، انعطاف‌پذیری مدل در توصیف پویایی ذخیره افزایش یافت. پارامترهای مدل پیشنهادی نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه اکولوژیکی (ECO) واسنجی شدند و عملکرد آن در مجموعه‌ای از مطالعات موردی شامل هیدروگراف‌های تک‌قله‌ای و چندقله‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج حاصل از مقایسه ANMM با مدل‌های مرجع نشان داد که مدل پیشنهادی در تمامی مطالعات موردی عملکرد بهتری از نظر شاخص‌های SSQ، RMSE، MAE و NSE دارد. در مطالعه موردی رودخانه لینسلی، بهبود عملکرد مدل پیشنهادی از نظر شاخص SSQ نسبت به مدل مرجع به حدود ۹۷ درصد رسید. همچنین، بررسی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده نشان داد که ANMM توانایی مناسبی در بازتولید دبی اوج، روند کلی هیدروگراف و رفتار هیدروگراف‌های چندقله‌ای دارد. این نتایج نشان می‌دهد که اصلاح معادله تغییرات ذخیره و در نظر گرفتن ضریب وابسته به زمان می‌تواند انعطاف‌پذیری ساختار مدل را در مواجهه با تغییرات زمانی و رفتارهای پیچیده جریان افزایش دهد.



از دیدگاه روش‌شناختی، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که ترکیب یک ساختار غیرخطی تطبیقی با یک روش فراابتکاری برای واسنجی پارامترها می‌تواند چارچوب مناسبی برای بهبود عملکرد مدل‌های مفهومی روندیابی سیلاب فراهم کند. در این چارچوب، امکان تخمین پارامترهای مدل پیشنهادی را در یک فضای جستجوی چندبعدی فراهم کرده و استفاده همزمان از ANMM و ECO موجب دستیابی به نتایج رقابتی در نمونه‌های مورد بررسی شده است. با این حال، عملکرد مدل در این پژوهش بر اساس مجموعه محدودی از مطالعات موردی ارزیابی شده است؛ بنابراین، بررسی ANMM در رودخانه‌ها و حوضه‌های بیشتر، با ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی متنوع‌تر، می‌تواند در مطالعات آینده برای ارزیابی جامع‌تر قابلیت کاربرد و تعمیم مدل مورد توجه قرار گیرد. همچنین، بررسی روش‌های مختلف تعیین ضریب اصلاحی و مقایسه آن با سایر راهبردهای بهینه‌سازی می‌تواند زمینه‌ای برای توسعه بیشتر مدل پیشنهادی فراهم کند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Whale Optimization Algorithm
- 2- Nonlinear Muskingum Model – Version 1
- 3- Hybrid Particle Swarm Optimization and Direct Search Optimization
- 4- Adaptive Nonlinear Muskingum Model
- 5- Ecological Optimization Algorithm
- 6- Sum of Squared Errors
- 7- Sum of Absolute Deviations
- 8- Deviation of Peak Outflow
- 9- Nash–Sutcliffe Efficiency
- 10- Root Mean Square Error
- 11- Mean Absolute Error
- 12- Peak Error
- 13- Roulette Wheel
- 14- Boya
- 15- Lawler
- 16- Linsley
- 17- Sutculer
- 18- Variable Exponent Parameter Nonlinear Muskingum Model with Lateral Flow
- 19- Sine Cosine Algorithm
- 20- Advanced Nonlinear Muskingum Model considering Continuous Flow with Lateral Flow
- 21- Nonlinear Muskingum Fifth-type with Advanced Lateral Flow
- 22- Harmony Search Algorithm
- 23- Vision Correction Algorithm
- 24- Self-Adaptive Vision Correction Algorithm
- 25- Artificial Gorilla Troops Optimizer

- Atashi, V., Barati, R., & Lim, Y. H. (2023a). Distributed Muskingum model with a Whale Optimization Algorithm for river flood routing. *Journal of Hydroinformatics*, 25(6), 2210–2222. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/hydro.2023.029>
- Atashi, V., Barati, R., & Lim, Y. H. (2023b). Improved River Flood Routing with Spatially Variable Exponent Muskingum Model and Sine Cosine Optimization Algorithm. *Environmental Processes*, 10(3), 42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40710-023-00658-3>
- Bozorg Haddad, O., Hamed, F., Orouji, H., Pazoki, M., & Loáiciga, H. A. (2015). A re-parameterized and improved nonlinear Muskingum model for flood routing. *Water resources management*, 29(9), 3419–3440. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1008-9>
- Chow, V. T. (1959). Open channel hydraulics. McGraw-Hill. Inc., New York, NY, 206.
- Das, A. (2004). Parameter estimation for Muskingum models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(2), 140–147. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:2\(140\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:2(140))
- Easa, S. M. (2014). New and improved four-parameter non-linear Muskingum model. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management,
- Gavilan, G., & Houck, M. H. (1985). Optimal Muskingum river routing. Computer Applications in Water Resources,
- Gill, M. A. (1978). Flood routing by the Muskingum method. *Journal of hydrology*, 36((3–4)), 353–363. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90153-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90153-1)
- Ikram, R. M. A., Wang, M., Moayedi, H., & Dehrashid, A. A. (2025). Management and prediction of river flood utilizing optimization approach of artificial intelligence evolutionary algorithms. *Scientific Reports*, 15(1), 22787. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-025-04290-z>
- Karahan, H., Gurarslan, G., & Geem, Z. W. (2015). A new nonlinear Muskingum flood routing model incorporating lateral flow. *Engineering Optimization*, 47(6), 737-749. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/0305215X.2014.918115>
- Lee, E. (2021). Development of a New 8-Parameter Muskingum Flood Routing Model with Modified Inflows. *journal Water*, 13 (22), 3170. In.
- Lee, E. H., Lee, H. M., & Kim, J. H. (2018). Development and Application of Advanced Muskingum Flood Routing Model Considering Continuous Flow. *Water*, 10(6), 760. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w10060760>
- Ma, B., Shi, J., Ji, Y., & Wang, Z. (2025). Ecological Cycle Optimizer: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization. *arXiv preprint arXiv:2508.20458*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.20458>
- McCarthy, G. (1938). The unit hydrograph and flood routing, Conference of North Atlantic Division. U.S. Army Corps of Engineers, New London, CT. *US Engineering*.
- Moradi, E., Yaghoubi, B., & Shabanlou, S. (2023). A new technique for flood routing by nonlinear Muskingum model and artificial gorilla troops algorithm. *Applied Water Science*, 13(2), 49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13201-022-01844-8>
- Raeisi, A., & Izadi, S. (2021). River Flood Routing Using the Multi-Reach Linear Muskingum Approach and Marin Predators Algorithm. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(10), 2693–2707. <https://doi.org/https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.329243.669051>
- Salvati, A., Moghaddam Nia, A., Salajegheh, A., Shirzadi, A., Shahabi, H., Ahmadisharaf, E., Han, D., & Clague, J. J. (2024). A systematic review of Muskingum flood routing techniques. *Hydrological Sciences Journal*, 69(6), 810-831. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2324132>
- Tabari, M. M. R., & Emami Dehcheshmeh, S. A. (2018). Development of Nonlinear Muskingum Model Using Evolutionary Algorithms Hybrid. *Iran-Water Resources Research*, 14(1), 160-167 (In Persian).



Tabari, M. M. R., Rahshabdiz, M., & Khudhair Tuama, M. (2026). Flood Hazard Assessment and Mitigation in the Tigris River: An HEC-RAS Approach (Al-Kut dam to Al-Musandaq). *Civil Engineering and Applied Solutions*, 98-116. <https://doi.org/10.22080/ceas.2026.31452.1085>

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد