Gonbad Kavous University

Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment

Online ISSN: 2981-0280

Homepage: https://nawee.gonbad.ac.ir

Multi-branched river flood routing by multiple-reach Muskingum model

Abdolreza Zahiri[1] , Fahimeh Mostakhdemin[2]

[1] Associated Prof. of Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

[2] Master of Science, Civil Engineering, Water Resources Managment, Gorgan, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 28 March 2024

Received in revised form 27 June 2024

Accepted 31 july 2024

Published online 15 Aguset 2024

Keywords:
Flood routing, Multi-branched river, Multipe-reach Muskingum model, Tributary

ABSTRACT

Objective: Among the hydrological flood routing methods, Muskingum model has always been considered due to simplicity and few required data. Until now, the application of the method in multi-branched rivers has been limited because of the lack of flood data. In Muskingum method, two parameters (x and K) are calibrated throughout the river.

Methods: In this study, the Muskingum method was employed to route floods in a multi-branched river. To this end, the multi-branched river system including the main waterway, tributary, and the end of the river after the confluence was divided into several intervals and for each interval, the calculation procedure of the Muskingum model were performed separately. In this case, the multiple-reach Muskingum parameters would be obtained.

Results: The implementation of the multiple-reach Muskingum model in the branched system of Tajen River, located in Mazandaran province, showed that the triple reach model had the best accuracy. The sum of squared the errors for the single, double and triple Muskingum models were approximately 422, 262, and 222 $(m^3/s)^2$ respectively, indicating an acceptable accuracy of the flood routing results in the multiple-reach Muskingum model. The observed peak flow discharge of the outflow hydrograph from the Tajen river was about 61.7 m^3/s and in single, double and triple Muskingum models were about 55.7, 58.3 and 58.9 m^3/s, respectively.

Conclusion:The results demonstrsted that the error of proposed model in prediction of peak flow discharge of the outflow hydrograph in three cases of single, double and triple Muskingum are 9.7, 5.5 and 4.5%, respectively. Also the actual flood volume of outflow hydrograph was about 2.53 mcm while this volume in single, double and triple Muskingum was obtained as 2.50, 2.55 and 2.54 mcm respectively.

* Corresponding author,

Cite this article: Abdolreza Zahir, Fahimeh Mostakhdemin. (2024). Multi-branched river flood routing by multiple-reach Muskingum model. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(1), 65-78. http//doi.org/

© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: http//doi.org/10.22034/nawee.2024.456184.1077

رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست
شاپا الکترونیکی: ۰۲۸۰-۲۹۸۱
Homepage: https://nawee.gonbad.ac.ir

روندیابی سیلاب در رودخانه‌های چندشاخه‌ای با استفاده از روش ماسکینگام چندبازه‌ای

عبدالرضا ظهیری[1*]، فهیمه مستخدمین[2]

[1]دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
[2]دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مدیریت منابع ایران، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۱/۰۹
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۴/۰۷
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۵/۱۰
تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۰۵/۲۵
کلیدواژه‌ها:
روندیابی سیل، رودخانه چندشاخه‌ای، روش ماسکینگام چندبازه‌ای، شاخه فرعی

چکیده

هدف: تاکنون کاربرد روش ماسکینگام در رودخانه‌های چندشاخه‌ای به دلیل کمبود داده‌های مشاهداتی سیلاب محدود بوده است. در روش ماسکینگام برای کل بازه رودخانه، دو پارامتر x و K واسنجی می‌شوند. در این مطالعه از روش ماسکینگام چندبازه‌ای برای روندیابی سیل در یک رودخانه چندشاخه‌ای استفاده شد.

روش پژوهش: به‌این‌منظور، سیستم رودخانه چندشاخه‌ای شامل آبراهه اصلی، شاخه فرعی و بازه انتهایی رودخانه بعد از تلاقی به چند بازه تقسیم شد و برای هر بازه، محاسبات مدل ماسکینگام به صورت مجزا اجرا گردید. از این طریق پارامترهای ماسکینگام چندبازه‌ای به‌دست‌آمد.

یافته‌ها: اجرای مدل ماسکینگام چندبازه‌ای در سیستم چندشاخه‌ای رودخانه تجن واقع در استان مازندران نشان داد که مدل سه‌بازه‌ای دارای بهترین دقت است. مجموع مربعات خطا برای مدل‌های ماسکینگام یک بازه‌ای، دوبازه‌ای و سه‌بازه‌ای به‌ترتیب حدود ۴۲۲، ۲۶۲ و ۲۲۲ $(m^3/s)^2$ به‌دست‌آمد که بیانگر دقت قابل قبول نتایج روندیابی سیل در حالت ماسکینگام چندبازه‌ای است. دبی اوج هیدروگراف مشاهداتی سیلاب خروجی از حوضه رودخانه حدود ۶۱/۷ مترمکعب بر ثانیه و در حالت ماسکینگام یک، دو و سه‌بازه‌ای حدود ۵۵/۷، ۵۸/۳ و ۵۸/۹ مترمکعب بر ثانیه به‌دست‌آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که خطای مدل پیشنهادی در برآورد دبی اوج هیدورگراف خروجی در سه حالت یک، دو و سه‌بازه‌ای حدود ۹/۷، ۵/۵ و ۴/۵ درصد است. همچنین حجم واقعی سیلاب خروجی از حوضه مورد مطالعه حدود ۲/۵۳ میلیون مترمکعب به‌دست‌آمد در حالی‌که این حجم در حالت‌های ماسکینگام یک، دو و سه‌بازه‌ای به‌ترتیب حدود ۲/۵۰، ۲/۵۵ و ۲/۵۴ میلیون مترمکعب است.

* نویسنده مسئول:

استناد: ظهیری، عبدالرضا؛ مستخدمین، فهیمه. (۱۴۰۳). روندیابی سیلاب در رودخانه‌های چندشاخه‌ای با استفاده از روش ماسکینگام چند بازه‌ای، *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۴ (۱)، http//doi.org/10.22034/nawee.2024.456184.1077

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.

© نویسندگان

مقدمه

کشور ایران با دارا بودن بارش سالانه متوسط ۲۵۰ میلی‌متر در مقایسه با سایر کشورها مقدار بارش کمی دارد؛ اما با وجود این، به‌دلیل عوامل متعدد، همواره با پدیده سیلاب درگیر بوده و خسارات زیادی را در این خصوص متحمل شده است. طبق تعریف بسیاری از محققان، سیل پدیده‌ای است که در طی آن جریان آب، مقطع اصلی رودخانه را پر می‌کند و وارد دشت‌های سیلابی می‌شود (تالی، ۲۰۱۱). این پدیده به‌دلیل خسارات و زیان‌های فراوان، همواره مورد توجه جدی واقع شده و اعتبارات قابل‌توجهی را به خود اختصاص داده است. به‌طورکلی برای مدیریت موثر سیل و نیز واکنش مناسب در مواجهه با آن، حتماً باید مشخصات مهم سیل از قبیل دبی اوج، زمان دبی اوج و نیز عمق حداکثر سیلاب در مکان‌های مهم در مسیر رودخانه محاسبه شود. به‌این‌منظور، از روش‌های روندیابی سیلاب استفاده می‌شود. روندیابی سیلاب یکی از اولین مراحل مطالعاتی طرح‌های کنترل سیلاب در رودخانه‌ها است. هدف اصلی روندیابی سیلاب آن است که با معلوم بودن هیدروگراف دبی سیلاب در بالادست رودخانه، هیدروگراف سیلاب در پایین‌دست (انتهای رودخانه یا در هر نقطه از مسیر آن) محاسبه شود (الحمود، ۲۰۲۲؛ نوروزی و بازرگان، ۲۰۲۲)

روش‌های روندیابی سیلاب را می‌توان به دو روش کلی هیدرولیکی (توزیعی[۱]) و هیدرولوژیکی (توده‌ای[۲]) طبقه‌بندی نمود. در روندیابی هیدرولوژیکی، هیدروگراف سیلاب به صورت تابعی از زمان فقط در یک محل خاص (معمولاً خروجی حوضه) محاسبه می‌شود ولی در روندیابی هیدرولیکی، هیدروگراف سیلاب به صورت تابعی از زمان و مکان در کل مسیر آبراهه قابل محاسبه است. انتخاب نوع روش در روندیابی سیل به ماهیت مساله و داده‌های موجود از رودخانه مورد مطالعه بستگی دارد (پرومال، ۱۹۹۴).

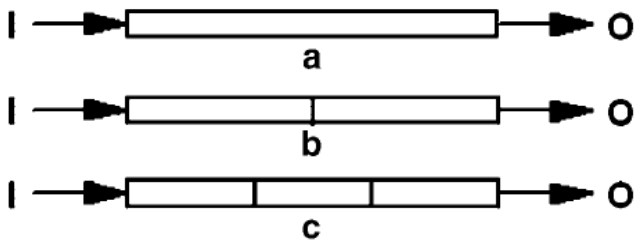
به‌طورکلی روش‌های هیدرولیکی در مقایسه با روش‌های هیدرولوژیکی، مشخصات هیدروگراف سیلاب را دقیق‌تر محاسبه می‌کنند، اما از نظر عملی و کاربردی دارای محدودیت‌هایی هستند. این روش‌ها بر پایه اصول پیچیده هیدرولیک جریان‌های غیرماندگار در آبراهه‌ها توسعه داده شده‌اند. روش‌های مذکور به دلیل حل معادلات پیوستگی و مومنتوم جریان (معادلات سنت‌ونانت) به داده‌های زیادی شامل هندسه رودخانه در طول مسیر، ضریب زبری مانینگ رودخانه، شرایط اولیه جریان و نیز شرایط مرزی نیاز دارند که تهیه این داده‌ها از اغلب رودخانه‌ها، مشکل است. علاوه بر این، روش‌های مذکور دارای محاسبات پیچیده‌ای بوده و برای انجام این محاسبات لازم است از مدل‌های ریاضی روندیابی سیل از قبیل HEC-RAS و MIKE11 استفاده شود. در این مدل‌ها باید هندسه مقاطع عرضی در طول رودخانه به تعداد کافی موجود باشد که به‌دلیل هزینه زیاد عملیات مقطع‌برداری و طول زیاد رودخانه‌ها، این مورد به‌ویژه در رودخانه‌های دارای دشت‌های سیلابی عریض یکی از محدودیت‌های جدی و مهم مدل‌های هیدرولیکی به‌شمارمی‌رود. همچنین عملیات مقطع‌برداری باید به‌صورت دوره‌ای تکرار شود تا اثر فرسایش و رسوب‌گذاری بستر رودخانه در طول زمان در مدل‌های ریاضی لحاظ شود. به‌همین‌دلیل، در بعضی از مطالعات مرتبط با سیلاب و ساماندهی رودخانه، از روش‌های ساده‌تر و ارزان‌تر، یعنی روندیابی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. روش‌های هیدرولوژیکی به داده‌های بسیار کمی نیاز دارند و برای اجرا، عموماً فقط نیازمند هیدروگراف سیلاب ورودی هستند. این روش‌ها بر اساس رابطه پیوستگی جریان و یک معادله بین دبی جریان و ذخیره موقت آب در طول مسیر رودخانه (ذخیره-خروجی) توسعه داده شده‌اند. از انواع روش‌های هیدرولوژیکی می‌توان به روش‌های پالس، ماسکینگام (خطی و غیرخطی)، ماسکینگام– کانژ، مخازن سری، کلارک، کانوکس، مقـادیر اجرائی و آت-کین اشاره نمود. از بین این روشها، روش ماسکینگام به‌دلیل سادگی و تعداد کم پارامترهای مورد نیاز، همواره مورد توجه هیدرولوژیست‌ها بوده است و در مورد رودخانه‌هایی که اطلاعات زیادی از مشخصات هیدرولیکی آنها موجود نیست، قابلیت کاربرد زیادی دارد. برای اجرای این روش کافی است فقط هیدروگراف خروجی یک واقعه سیل موجود باشد. با محاسبه ضرایب روش ماسکینگام به ازاء یک واقعه سیل، می‌توان از این روش برای روندیابی سیل‌های دیگر استفاده نمود. روش‌های کم‌هزینه مثل روش ماسکینگام به همراه روش‌های بهینه‌سازی این امکان را فراهم می‌کنند تا بتوان پیش‌بینی و مدیریت سیلاب را به‌ویژه در کشورهای کمتر توسعه‌یافته که سیلاب گاهی تلفات هنگفتی را به آنها وارد می‌کند، به‌صورت بهتر و موثرتری انجام داد (صلواتی و همکاران، ۲۰۲۴).

روش ماسکینگام برای اجرا نیازمند تخمین دو پارامتر پیمایش K و ضریب وزنی x است. این دو پارامتر باید بر اساس هیدروگراف ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده در رودخانه، محاسبه یا واسنجی شوند. مهمترین مرحله محاسبات مدل ماسکینگام، تعیین این دو پارامتر

[۱] Distributed
[۲] Lumped

است. با تعیین این دو پارامتر می‌توان سیلاب‌های ورودی به رودخانه مورد مطالعه را روندیابی نموده و هیدروگراف سیلاب خروجی را محاسبه نمود. روش‌های زیادی توسط محققان مختلف برای این منظور ارائه شده است. از اولین روش ترسیمی که به این منظور ارائه شده بود تاکنون پیشرفت‌های زیادی در این خصوص صورت گرفته است. امروزه روش‌های نوین بهینه‌سازی به‌صورت گسترده‌ای برای تعیین دقیق و سریع این دو پارامتر استفاده شده است. اگرچه این الگوریتم‌ها سبب شده است که استفاده از روش ماسکینگام در روندیابی سیلاب با اطمینان بیشتری مورد استفاده قرار گیرد، اما اجرای این الگوریتم‌ها نیازمند نرم‌افزارهای خاص و محاسبات پیچیده‌ای است (حسینی، ۲۰۰۹; بزرگ حداد و همکاران، ۲۰۲۱).

اخیراً ایده‌های ساده‌تری به‌منظور تعیین بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام معرفی شده‌اند. ساده‌ترین روش در این زمینه، بهینه‌سازی ضرایب ماسکینگام به‌کمک نرم‌افزار اکسل و ابزار SOLVER است (حسینی، ۲۰۰۹; کاراهان، ۲۰۱۲; براتی، ۲۰۱۳). انجام محاسبات مدل ماسکینگام به‌کمک اکسل از دقت و سرعت بیشتری نسبت به روش معمول گرافیکی و نیز سایر روش‌های بهینه‌سازی برخوردار است. علاوه بر این، برای افزایش دقت محاسبات روندیابی سیل به روش ماسکینگام، مدل ماسکینگام چندبازه‌ای توسط حسینی (۲۰۰۹) پیشنهاد شد. در این ایده مطابق شکل ۱ بازه رودخانه مورد بررسی به دو یا چند زیربازه کوچک‌تر تقسیم و برای هر بازه، محاسبات روندیابی ماسکینگام به صورت مجزا انجام می‌شود. به عبارت بهتر برای هر بازه، پارامترهای x و K مدل ماسکینگام به صورت مجزا محاسبه می‌شوند (آتشی و همکاران، ۲۰۲۳). انتظار می‌رود این ایده برای رودخانه‌های طولانی و با تغییرات شدید در طول مسیر (مثلاً تغییر شیب طولی، تغییرات عرض و عمق جریان، مئاندری شدن) تأثیر خوبی در افزایش دقت نتایج داشته باشد (ظهیری و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین با توجه به اینکه فرض خطی‌بودن رابطه ذخیره-دبی ممکن است در بعضی از آبراهه‌ها صحیح نباشد، برای پوشش دادن تأثیر غیرخطی بودن رابطه ذخیره-دبی می‌توان بازه مورد مطالعه را به چند بازه تقسیم نمود و آنگاه روش ماسکینگام خطی را برای هر بازه به صورت جداگانه به کار برد.



شکل ۱. تقسیم سیستم رودخانه به یک (a)، دو (b) و سه بازه (c) در مدل ماسکینگام کلاسیک و چندبازه‌ای (حسینی، ۲۰۰۹)

روخانه‌ها و به‌ویژه در مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای به‌ندرت به صورت تک‌شاخه هستند و عمدتاً چندین شاخه فرعی به رودخانه اصلی می‌پیوندند. اتصال شاخه‌های فرعی به رودخانه اصلی از نظر هیدرولیکی و هیدرولوژیکی دارای اهمیت است. مثلاً از جنبه هیدرولیک جریان، مباحثی از قبیل الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در ناحیه تلاقی و نیز افت انرژی مورد توجه قرار گرفته است. از نظر هیدرولوژیکی نیز مبحث مهم در این زمینه، نحوه تاثیر هیدروگراف سیلاب شاخه‌های فرعی بر سیلاب رودخانه اصلی و نیز هیدروگراف سیلاب در خروجی رودخانه است. تاکنون مطالعات روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها متمرکز بر آبراهه‌های منفرد (یا شاخه‌های اصلی) بوده و مطالعات مرتبط با رودخانه‌های چندشاخه‌ای بسیار محدود است. دلیل این مساله، محدودیت در ثبت هیدروگراف‌های دبی سیل در شاخه‌های فرعی است و بنابراین اغلب مطالعات بر اساس هیدروگراف‌های شبیه‌سازی متمرکز شده است (سامانی و شمسی‌پور، ۲۰۰۴; حسینی، ۲۰۰۹).

موهان (۱۹۹۷) مدلی را بر مبنای الگوریتم ژنتیک (GA) برای تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی ارائه نمود. نتایج نشان داد که هیدروگراف سیلاب خروجی به‌دست‌آمده از روش GA با هیدروگراف سیلاب مشاهداتی انطباق مناسبی دارد. سامانی و جبلی‌فرد (۲۰۰۳) روش جدیدی را برای طراحی قطر لوله‌های فاضلابرو مناطق شهری به کمک روندیابی ماسکینگام ارائه نمودند. دس (۲۰۰۴) به منظور تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی از یک الگوریتم تکرار شونده بر مبنای حداقل‌سازی خطای هیدروگراف محاسباتی نسبت به هیدروگراف مشاهداتی بهره برد. سامانی و شمسی‌پور (۲۰۰۴) روندیابی هیدرولوژیکی بـه روش ماسکینگام را در

سیستم رودخانه‌های شاخه‌ای با استفاده از روش بهینه‌سازی غیرخطی پاول مورد بررسی قرار دادند. ظهیری و همکاران (۱۳۹۱) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام خطی در کانال‌های مرکب استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش ماسکینگام به خوبی تغییرات دبی جریان را در طول کانال شبیه‌سازی نموده است. سامانی و همکاران (۲۰۱۲) روندیابی هیدرولوژیکی سیل به روش ماسکینگام خطی را در سیستم رودخانه‌های تک‌شاخه‌ای و سه‌شاخه‌ای و نیز رودخانه‌های با حوضه میانی فاقد آمار مورد بررسی قرار داده و پارامترهای مدل را به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه نمودند. ظهیری و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از روش ماسکینگام چند بازه‌ای به روندیابی سیلاب در رودخانه کارون پرداختند. آنها نشان‌دادند که اجرای مدل ماسکینگام چندبازه‌ای برای رودخانه کارون در حد فاصل ایستگاه‌های هیدرومتری کارون-گتوند با تقسیم آبراهه به سه بازه نتایج بسیار بهتری نسبت به یک بازه دارد. فرزین و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل ماسکینگام سه پارامتری همراه با الگوریتم بهبود یافته خفاش به مطالعه و بررسی روندیابی سیلاب پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مدل پیشنهادی مقدار خطای محاسباتی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. بزرگ حداد و همکاران (۲۰۲۱) با ارائه یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر فرآیند آموزش-یادگیری (مشابه فرآیند تدریس معلم برای دانش‌آموزان)، پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی را برای دو رودخانه فرضی شاهد با دقت مناسبی بهینه نمودند. آتشی و همکاران (۲۰۲۳) مدل ماسکینگام غیرخطی چندبازه‌ای را برای روندیابی سیلاب ناشی از تاثیر توام بارش و ذوب برف مورد استفاده قرار داده و پارامترهای مدل را به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ[1] بهینه نمودند.

بررسی مطالعات فوق نشان می‌دهد که تحقیقات زیادی برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام به کمک روش‌های نوین صورت گرفته است. با این‌حال استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی عموماً زمان‌بر بوده و دارای محاسبات پیچیده‌ای هستند. به همین دلیل نیاز است ایده‌های ساده‌تری به این منظور معرفی شوند (بزرگ حداد و همکاران، ۲۰۲۱) ساده‌ترین روش در این زمینه بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام به‌کمک نرم‌افزار اکسل و ابزار SOLVER است (حسینی، ۲۰۰۹; کاراهان، ۲۰۱۲; براتی، ۲۰۱۳). این ابزار دارای قابلیت بالایی در بهینه‌سازی معادلات غیرخطی و پیچیده بوده و پیچیدگی محاسبات روندیابی و بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای مدل ماسکینگام را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در این تحقیق با بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام چندبازه‌ای به کمک نرم‌افزار اکسل، سیلاب یک رودخانه شاخه‌ای روندیابی شده است. به‌این‌منظور از از هیدروگراف‌های واقعی دبی سیلاب ورودی و خروجی از رودخانه اصلی تجن (ایستگاه پروریج‌آباد) و شاخه فرعی آن (ایستگاه علی‌آباد) واقع در استان مازندران استفاده شده است. با انجام محاسبات بهینه‌سازی، تعداد بهینه بازه‌ها در روش ماسکینگام برای رودخانه اصلی و شاخه فرعی آن تعیین شده است.

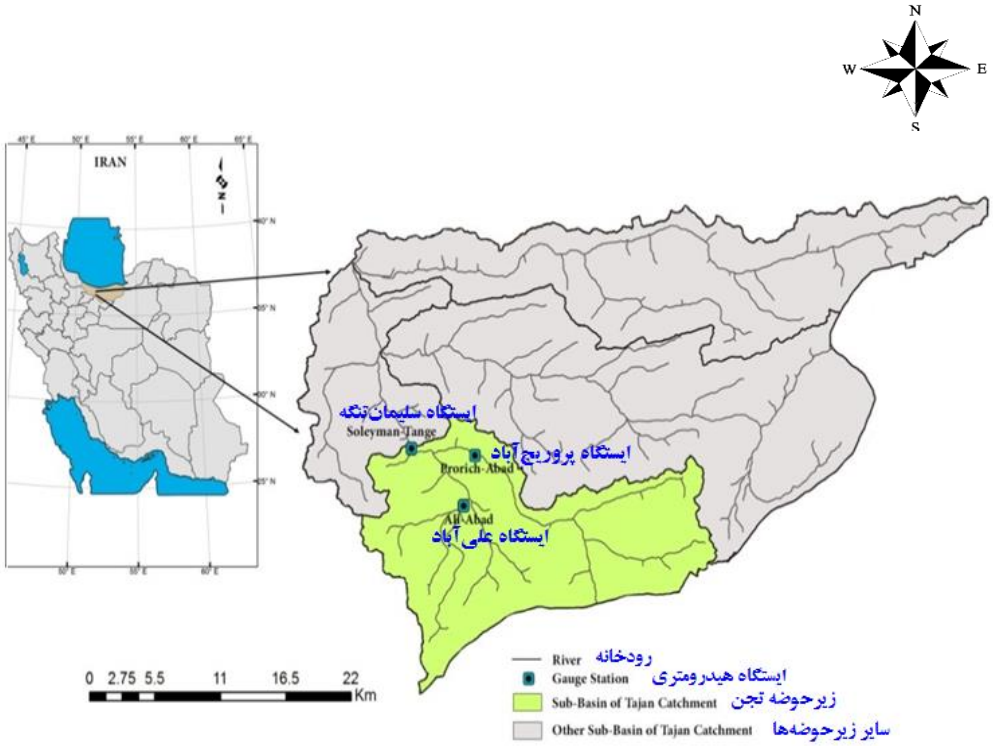
مواد و روش‌ها

رودخانه مورد مطالعه (حوضه رودخانه تجن)

رودخانه‌های حوضه دریای خزر با مساحت حدود ۱۷۳۳۰۰ کیلومتر مربع به سمت دریای خزر جریان دارند. این حوضه دارای شیب زیادی بوده و با حدود ۵۵۰۰ متر، دارای بیشترین اختلاف ارتفاع در میان حوضه‌های رودخانه‌ای کشور هستند. رودخانه‌های این حوضه از طول کم و شیب زیاد برخوردارند و غالباً از جنگل پوشیده شده‌اند. از آنجاکه ریزش‌های جوی سالانه این حوضه غالباً به صورت باران است، از این رو آب شدن برف‌های زمستانی تأثیر چندانی در تأمین آب رودخانه‌های آن ندارد و پوشش گیاهی متراکم که در غالب اراضی این حوضه به چشم می‌خورد، موجب تعدیل جریان آب آنها می‌گردد. به‌طورکلی تغییرات روزانه آبدهی رودخانه‌های این حوضه زیاد است. رود تجن از کوه‌های چهاردانگه، دودانگه و هزارجریب سرچشمه می‌گیرد و پس عبور از شهر ساری وارد دریای خزر می‌شود. رودخانه تجن از رودخانه‌های مهم حوضه دریای مازندران است که از ارتفاع ۳۲۵۱ متری کوه‌های هزارجریب در دامنه شمالی سلسله جبال البرز در جنوب شهرستان ساری از چشمه‌های متعددی در دهستان پشتکوه سرچشمه می‌گیرد. طول شاخه اصلی رودخانه ۱۷۲ کیلومتر و سه شاخه اصلی آن دودانگه، چهاردانگه و ظالمرود (زارم‌رود) نام دارند. رژیم جریان این رودخانه برفی- بارانی است که دارای جریان پایه دائم است. دبی سالانه رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری کردخیل حدود ۱۴/۶ مترمکعب بر ثانیه و آورد سالانه آن ۵۶۰ میلیون متر مکعب است. متوسط بارندگی سالانه حوضه در حدود ۸۹۳ میلی‌متر است (نودهی، ۱۳۸۶; عمادی، ۱۳۹۸).

[1] Salp Swarm Algorithm

به‌منظور تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام می‌بایست از داده‌های مربوط به هیدروگراف‌های دبی سیلاب ورودی و خروجی ثبت‌شده در یک واقعه سیلابی استفاده نمود. از سال ۱۳۳۰ تاکنون سیل‌های زیادی در منطقه ساری گزارش شده است که در این پژوهش از داده‌های ثبت‌شده یکی از سیلاب‌های عبوری از ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه تجن استفاده شد. در رودخانه تجن ۹ ایستگاه هیدرومتری فعال و یک ایستگاه هیدرومتری غیرفعال وجود دارد. از مهمترین‌های آنها می‌توان به ایستگاه‌های هیدرومتری کردخیل، ریگ‌چشمه، سلیمان‌تنگه، پروریچ‌آباد، کرچا و علی‌آباد اشاره نمود. در این تحقیق از ایستگاه پروریچ‌آباد به عنوان ایستگاهی که رواناب ورودی به حوضه را ثبت می‌کند، ایستگاه هیدرومتری علی‌آباد به عنوان ایستگاهی که هیدروگراف سیلاب ورودی از شاخه فرعی را ثبت می‌کند و ایستگاه هیدرومتری سلیمان‌تنگه به عنوان ایستگاه ثبت هیدروگراف سیلاب خروجی از حوضه استفاده شد. ارتفاع میانگین منطقه برای هر یک از ایستگاه‌های پروریچ‌آباد، علی‌آباد و سلیمان‌تنگه به‌ترتیب ۱۳۴۴، ۱۱۵۰ و ۹۵۹ متر است. همچنین میانگین شیب و فاصله طولی میان ایستگاه‌های علی‌آباد- سلیمان‌تنگه به‌ترتیب برابر ۱۸/۶درصد و ۸/۵۸ کیلومتر و میان ایستگاه‌های پروریچ‌آباد-سلیمان‌تنگه برابر ۱۶/۲درصد و ۵/۵ کیلومتر است. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در ورودی رودخانه‌های اصلی و فرعی و خروجی حوضه رودخانه تجن

مبانی مدل ماسکینگام

مدل ماسکینگام بر پایه معادله پیوستگی استوار است (رابطه ۱):

$$\frac{dS}{dt} = I - O \qquad (۱)$$

که S حجم ذخیره آب در رودخانه، I دبی سیل ورودی، O دبی سیل خروجی و t زمان است. در روش ماسکینگام خطی فرض می‌شود که حجم ذخیره، تابعی خطی از سیلاب ورودی و خروجی است (رابطه ۲):

$$S = K\left[xI + (1-x)O\right] \qquad (۲)$$

که K (بر حسب ساعت) و x ضرایب ثابتی هستند که باید بر اساس هیدروگراف ورودی و خروجی اندازه‌گیری‌شده در رودخانه محاسبه شوند. پارامتر K بیان‌کننده زمان پیمایش رودخانه بوده و به طول رودخانه و تندی موج سیلاب بستگی دارد در حالی‌که x اثر دبی‌های ورودی و خروجی سیل بر حجم ذخیره رودخانه را بیان نموده و معمولاً در محدوده ۰/۵-۰ تغییر می‌کند. 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 (رابطه ۳):

$$O_{t+1} = C_1 I_t + C_2 I_{t+1} + C_3 O_t \quad (۳)$$

که I_t و I_{t+1} به‌ترتیب دبی‌های ورودی سیل در زمان‌های t و $t+1$ از هیدروگراف ورودی سیلاب ، O_t و O_{t+1} به‌ترتیب دبی‌های خروجی سیل در زمان‌های t و $t+1$ (از هیدروگراف خروجی سیلاب) و ضرایب C_1، C_2 و C_3 ضرایب روندیابی هستند. این ضرایب از روابط (۴) تعیین می‌شوند:

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K(1-x) + 0.5\Delta t}$$
$$C_2 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{K(1-x) + 0.5\Delta t} \quad (۴)$$
$$C_3 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K(1-x) + 0.5\Delta t}$$

که Δt گام زمانی محاسبات است. با تعیین ضرایب روندیابی، رابطه (۳) به صورت تکراری مورد استفاده قرار می‌گیرد تا هیدروگراف سیل خروجی را محاسبه نماید.

بهینه‌سازی ضرایب مدل ماسکینگام چندبازه‌ای

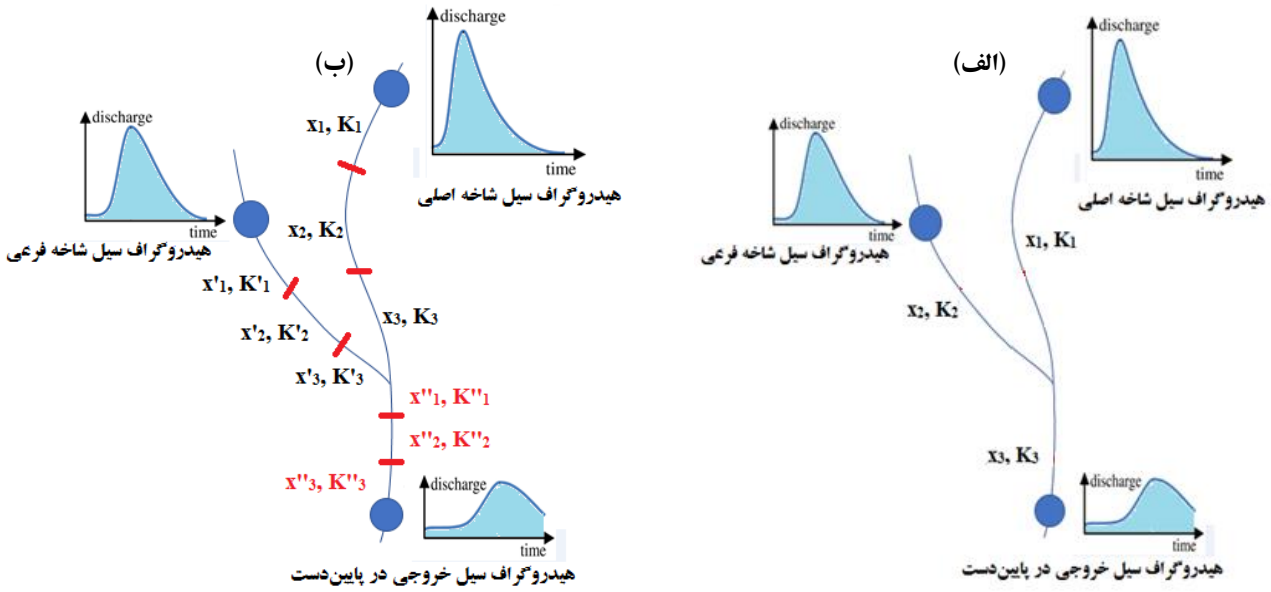
از میان الگوریتم‌های زیادی که محققان مختلف برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام (K و x) در آبراهه‌ها معرفی نموده‌اند، استفاده از نرم‌افزار اکسل از سادگی بیشتری برخوردار است. در این نرم‌افزار، متغیرهای تصمیم‌گیری (در این پژوهش، ضرایب ماسکینگام) با استفاده از چندین روش بهینه‌سازی قابل تعیین هستند که در این تحقیق از روش بهینه‌سازی گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته غیرخطی[۱] استفاده شد.

در رودخانه‌های چندشاخه‌ای باید برای رودخانه‌های اصلی و فرعی، ابتدا پارامترهای K و x به صورت مجزا بهینه شده و سپس برای بازه پایین‌دست (از محل تلاقی شاخه فرعی با رودخانه اصلی تا انتهای رودخانه) نیز این پارامترها بهینه شوند. به این ترتیب، در این سیستم رودخانه، ۳ مقدار بهینه K و ۳ مقدار x به‌دست می‌آیند (شکل ۳-الف). برای بهینه‌سازی این مقادیر، ابتدا هیدروگراف سیلاب ورودی به شاخه اصلی (I_1) وارد محاسبات شده و با انتخاب مقادیری فرضی برای K_1 و x_1، هیدروگراف سیلاب خروجی در محل تلاقی شاخه‌های اصلی و فرعی محاسبه می‌شود (O_1). هیدروگراف سیلاب ورودی به شاخه فرعی (I_2) نیز به همین صورت محاسبه شده و با فرض مقادیری برای K_2 و x_2، هیدروگراف خروجی در محل تلاقی به‌دست می‌آید (O_2). بعد از روندیابی سیلاب در شاخه‌های اصلی و فرعی، در این مرحله باید مجموع دو هیدروگراف سیلاب خروجی در محل تلاقی ($O_1 + O_2$) را به عنوان هیدروگراف سیلاب ورودی به بازه پایین‌دست تلاقی درنظر گرفت. با فرض مقادیری برای K_3 و x_3، محاسبات روندیابی سیلاب تا انتهای رودخانه انجام شده و هیدروگراف سیلاب خروجی تعیین خواهد شد (O). این هیدروگراف باید با هیدروگراف واقعی سیلاب خروجی از رودخانه مطابقت داشته باشد. به این منظور باید فرایند بهینه‌سازی مقادیر K_1 و x_1، K_2 و x_2، و نیز K_3 و x_3 در محیط اکسل به گونه‌ای دنبال شود که بین هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی سیلاب خروجی از انتهای رودخانه، حداقل اختلاف مشاهده شود.

محاسبات روش ماسکینگام چندبازه‌ای برای رودخانه‌های چندشاخه‌ای تا حدود زیادی مشابه رودخانه‌های تک‌شاخه‌ای است. به طور مثال مطابق شکل ۳-ب برای مدل ماسکینگام سه‌بازه‌ای، ابتدا شاخه اصلی به ۳ بازه تقسیم شده و برای هر بازه، محاسبات روندیابی ماسکینگام به صورت مجزا انجام می‌شود. به عبارت بهتر برای اولین بازه، پارامترهای K_1 و x_1 به صورت فرضی انتخاب شده و مدل ماسکینگام با توجه به هیدروگراف سیلاب ورودی (I_1) اجرا می‌شود. حال هیدروگراف خروجی از اولین بازه به عنوان هیدروگراف ورودی بازه دوم درنظر گرفته می‌شود. مجدداً به کمک این هیدروگراف ورودی و مقادیر فرضی K_2 و x_2 برای بازه دوم، هیدروگراف خروجی از این بازه محاسبه می‌شود. این فرآیند برای بازه سوم نیز تکرار می‌شود تا هیدروگراف سیلاب خروجی از بازه سوم به‌دست‌آید (O_1). این هیدروگراف به

[۱] Nonlinear Generalized Reduced Gradient (GRG)

عنوان هیدروگراف ورودی از شاخه اصلی به محل تلاقی نیز محسوب می‌شود. همین محاسبات برای شاخه فرعی نیز تکرار می‌شود تا هیدروگراف ورودی از شاخه فرعی به محل تلاقی نیز به‌دست‌آید (O_2). مجموع این هیدروگراف‌ها (O_1+O_2) به عنوان هیدرگراف ورودی به اولین بازه از رودخانه اصلی در پایین‌دست تلاقی محسوب می‌شود. محاسبات فوق برای این بخش از رودخانه نیز تکرار خواهد شد تا در نهایت هیدروگراف سیلاب خروجی از انتهای رودخانه محاسبه شود (O). با مقایسه این هیدروگراف خروجی با هیدروگراف خروجی واقعی، خطای محاسباتی مدل (SSE) محاسبه شده و برای رسیدن به حداقل خطا، ضرایب مدل ماسکینگام در تمامی بازه‌های رودخانه‌های اصلی و فرعی بهینه می‌شوند.



شکل ۳. فرآیند محاسبات روندیابی سیلاب رودخانه‌های چندشاخه‌ای در روش ماسکینگام یک‌بازه‌ای (الف) و سه‌بازه‌ای (ب)

در این پژوهش برای ارزیابی دقت محاسبات مدل‌سازی هیدروگراف سیلاب خروجی، از معیار مجموع مربعات خطا[1] (SSE) استفاده شده است (رابطه ۵):

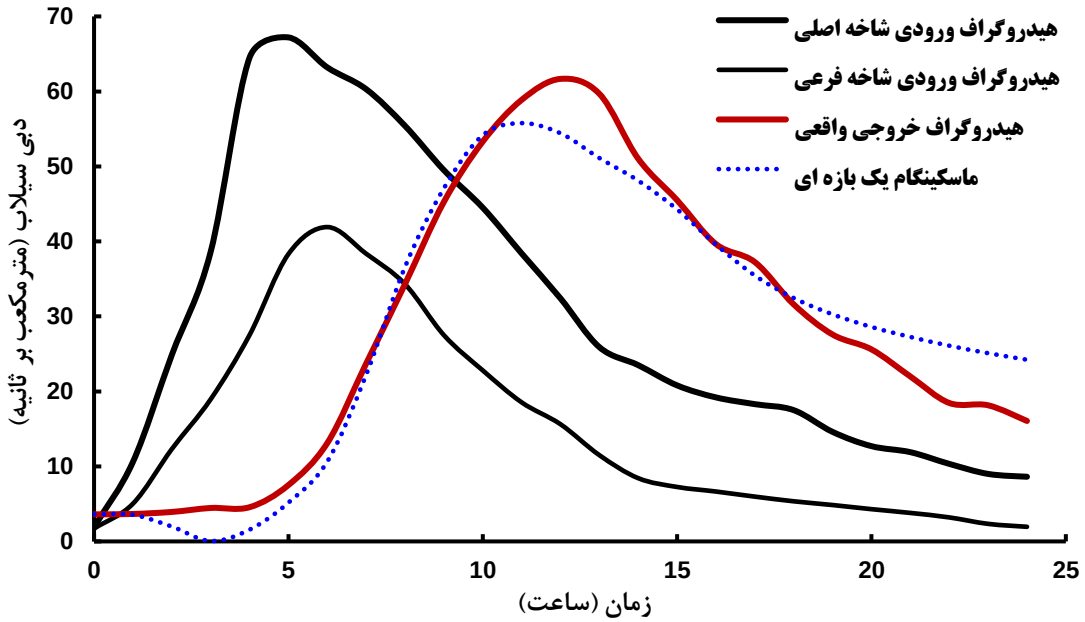
$$SSE = \sum_{i=1}^{N} \left(Q_i^{calc} - Q_i^{obs} \right)^2 \qquad (۵)$$

که Q_{calc} دبی سیلاب محاسباتی، Q_{obs} دبی سیلاب مشاهده‌ای و N تعداد داده‌های هیدروگراف سیلاب است. همچنین از خطای برآورد دبی اوج سیلاب خروجی و نیز حجم هیدروگراف خروجی سیلاب در انتهای رودخانه برای ارزیابی دقت مدل ماسکینگام چندبازه‌ای استفاده شده است.

نتایج و بحث

[1] Sum of Square Error (SSE)

در شکل ۴ نتایج محاسبات روندیابی سیلاب رودخانه تجن به کمک روش ماسکینگام یک‌بازه‌ای نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، اگرچه به‌طور کلی روش محاسباتی ماسکینگام یک‌بازه‌ای توانسته است خروجی مناسبی از سیلاب اتفاق افتاده را شبیه‌سازی نماید، اما خطای این مدل‌سازی در ابتدای دوره، دبی پیک و انتهای دوره تقریباً زیاد است. مقدار مجموع مربعات خطا در حالت حدود ۴۲۲ $(m^3/s)^2$ بدست آمده است. مقادیر بهینه پارامترهای x و K به‌ترتیب برابر ۰ و ۲/۸۹ ساعت برای شاخه اصلی، ۰/۵۷۴ و ۳/۸۷ ساعت برای شاخه فرعی و ۰/۲۹۷ و ۱/۵۶ ساعت برای بازه انتهایی رودخانه بعد از تلاقی به‌دست آمده است (جدول ۱).

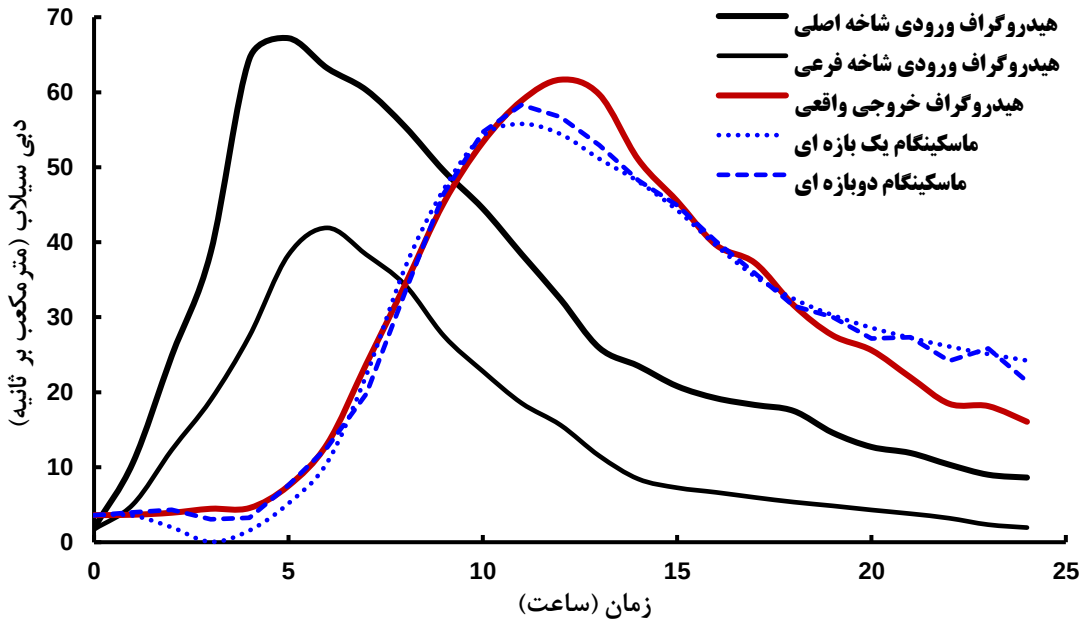


شکل ۴. مقایسه هیدروگراف‌های خروجی واقعی و محاسباتی از مدل ماسکینگام یک بازه‌ای

جدول ۱. نتایج مقادیر بهینه پارامترهای روندیابی و خطای مدل ماسکینگام در حالت یک بازه‌ای

	بازه		
پارامترهای روندیابی	شاخه اصلی	شاخه فرعی	بازه انتهایی
x	۰	۰/۵۷۴	۰/۲۹۷
K(hr)	۲/۸۹	۳/۸۷	۱/۵۶
SSQ$(m^3/s)^2$		۴۲۲	

در شکل ۵ نتایج محاسبات به‌دست‌آمده از مدل ماسکینگام دوبازه‌ای نشان داده شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود با افزایش تعداد بازه‌ها، دقت نتایج خروجی بهبود یافته است. مجموع مربعات خطا در این حالت حدود ۲۶۲ $(m^3/s)^2$ به‌دست آمده است که بیانگر افزایش دقت نتایج در حالت دوبازه‌ای است. با افزایش تعداد بازه‌ها از یک به دو، کاهش خطای محاسبات چشم‌گیر است (از ۴۲۲ به ۲۶۲ $(m^3/s)^2$). در شکل ۵ مشاهده می‌شود که خطای نتایج مدل دوبازه‌ای در ابتدای شبیه‌سازی و در تخمین دبی اوج سیلاب خروجی کاهش یافته است. مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام در این حالت در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر بهینه پارامترهای x و K برای شاخه‌های اصلی و فرعی و نیز بازه انتهایی رودخانه بعد از تلاقی در این جدول ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مقدار یکی از ضرایب x برای بازه انتهایی حدود ۱/۶۹ به‌دست آمده است که خارج از محدوده (۰/۵-۰) است. هیدرولوژیست‌ها اعتقاد دارند که چون ضریب x دارای مفهوم حجم ذخیره گوه‌ای سیلاب در رودخانه است، باید مقدار آن در محدوده فوق صادق باشد. از طرف دیگر، محققان دیگری مثل دوج (۱۹۷۳) معتقد هستند که بر اساس مفاهیم مدل‌سازی ریاضی، مقدار این ضریب دارای هیچ محدوده‌ای نبوده و از مقادیر بسیار کوچک منفی $(-\infty)$ تا مقادیر بسیار بزرگ مثبت $(+\infty)$ را شامل می‌شود.



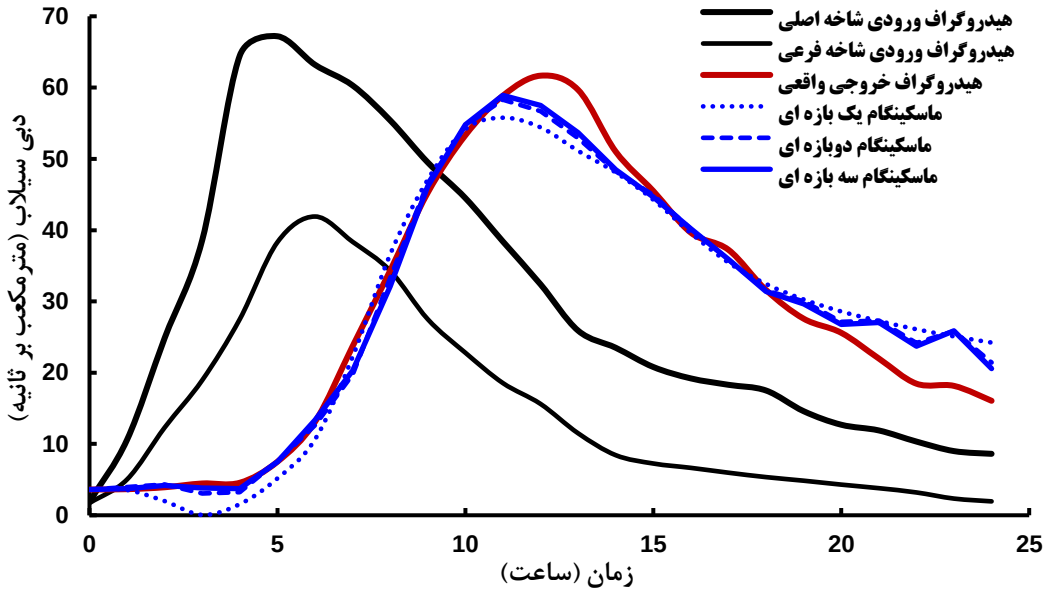
شکل ۵. مقایسه هیدروگراف‌های خروجی واقعی و محاسباتی از مدل‌های ماسکینگام یک‌بازه‌ای و دوبازه‌ای

جدول ۲. نتایج مقادیر بهینه پارامترهای روندیابی و خطای مدل ماسکینگام در حالت دوبازه‌ای

	بازه		
پارامترهای روندیابی	شاخه اصلی	شاخه فرعی	بازه انتهایی
x	۰ ،۰/۴۳۲	۰/۵۶۶ ،۰/۴۹۳	۰ ،۱/۶۹
K(hr)	۲۳/۶۴ ،۰	۲/۵۹ ،۲/۲۲	۰/۴۹ ،۰/۱
SSQ$(m^3/s)^2$	۲۶۲		

در شکل ۶ نتایج محاسبات به‌دست‌آمده از مدل ماسکینگام سه‌بازه‌ای نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در حالت سه‌بازه‌ای، دقت نتایج هیدروگراف خروجی در محدوده دبی اوج به میزان اندکی بهبود یافته است. مجموع مربعات خطا در این حالت حدود ۲۲۲ $(m^3/s)^2$ به‌دست آمده است که نسبت به خطای حالت دوبازه‌ای کمتر است. مقایسه خطاها در سه حالت یک‌بازه‌ای، دوبازه‌ای و سه‌بازه‌ای نشان می‌دهد که با افزایش تعداد بازه‌ها، به تدریج از نرخ کاهش خطا کاسته شده است. بنابراین احتمالاً با افزایش تعداد بازه‌ها به ۴ بازه، خطای محاسبات کاهش چندانی نخواهد یافت.

مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام در حالت سه‌بازه‌ای در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر بهینه پارامترهای x و K برای شاخه‌های اصلی و فرعی و نیز بازه انتهایی رودخانه بعد از تلاقی در این جدول ارائه شده است.



شکل ۶. مقایسه هیدروگراف‌های خروجی واقعی و محاسباتی از مدل‌های ماسکینگام یک‌بازه‌ای، دوبازه‌ای و سه‌بازه‌ای

جدول ۳. نتایج مقادیر بهینه پارامترهای روندیابی و خطای مدل ماسکینگام در حالت سه‌بازه‌ای

	بازه		
پارامترهای روندیابی	شاخه اصلی	شاخه فرعی	بازه انتهایی
x	۰،۰/۳۸۲ ،۰/۵۱۱	۰/۳۱۸، ۰/۶۳۸ ،۰/۱۱۴	۰، ۰/۴ ،۰/۸۷۳
K(hr)	۲۴/۱۳ ،۰،۰	۱/۴۷ ،۲/۷۶ ، ۳/۴۶	۰،۰/۰۲ ،۰/۱۶
SSQ $(m^3/s)^2$		۲۲۲	

در این پژوهش نشان داده شد که می‌توان برای سادگی و کاهش زمان محاسبات بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای مدل ماسکینگام (x و K) در رودخانه‌های چندشاخه‌ای از نرم‌افزار اکسل استفاده نمود. همچنین مشخص شد که برای افزایش دقت نتایج روندیابی سیلاب، می‌توان سیستم رودخانه چندشاخه‌ای شامل آبراهه اصلی، شاخه فرعی و بازه انتهایی رودخانه بعد از تلاقی را به چند بازه تقسیم نمود و برای هر بازه، محاسبات مدل ماسکینگام را به صورت مجزا اجرا نمود. در این صورت پارامترهای مدل ماسکینگام چندبازه‌ای به‌دست خواهند آمد. اجرای مدل ماسکینگام چندبازه‌ای در سیستم چندشاخه‌ای رودخانه تجن واقع در استان مازندران نشان داد که با افزایش تعداد بازه‌ها، دقت مدل‌سازی نیز افزایش می‌یابد، اما نرخ این افزایش به صورت خطی نیست. در مدل ماسکینگام دوبازه‌ای خطای مدل‌سازی (مجموع مربعات خطا) نسبت به مدل ماسکینگام یک‌بازه‌ای از ۴۲۲ به ۲۶۲ $(m^3/s)^2$ کاهش یافت (حدود ۳۸ درصد) در حالی‌که در مدل ماسکینگام سه‌بازه‌ای (با خطای ۲۲۲ $(m^3/s)^2$) این کاهش خطا حدود ۱۵درصد به‌دست آمد. در مطالعه حسینی (۲۰۰۹) نیز تقریباً همین روند اتفاق افتاده است. در تحقیق موردنظر، شاخص مجموع مربعات خطا برای رودخانه ویلسون در روش ماسکینگام یک‌بازه‌ای (کلاسیک) حدود ۶۰۶ $(m^3/s)^2$ و در حالت‌های دوبازه‌ای، سه‌بازه‌ای، چهاربازه‌ای و پنج‌بازه‌ای به‌ترتیب حدود ۲۴۰، ۱۸۲، ۱۶۴ و ۱۵۵ $(m^3/s)^2$ به‌دست آمده است. مقایسه دبی‌های پیک مشاهداتی و محاسباتی سیلاب نشان می‌دهد که مدل ماسکینگام چندبازه‌ای دقت بهتری داشته است. دبی اوج هیدروگراف مشاهداتی سیلاب خروجی از حوضه رودخانه حدود ۶۱/۷ مترمکعب بر ثانیه و در حالت ماسکینگام یک، دو و سه‌بازه‌ای حدود ۵۵/۷، ۵۸/۳ و ۵۸/۹ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد که نشان می‌دهد خطای مدل ماسکینگام در برآورد دبی اوج هیدروگراف خروجی در سه حالت یک، دو و سه‌بازه‌ای حدود ۹/۷، ۵/۵ و ۴/۵ درصد است. علاوه بر این دقت محاسبه حجم سیلاب نیز مورد بررسی قرار گرفت. محاسبه حجم سیلاب خروجی از رودخانه‌ها برای تعیین ظرفیت سرریزهای تخلیه سدهای مخزنی، تخمین حجم مخزن سدهای کنترل سیلاب و نیز ظرفیت سازه‌های نگهداشت دارای اهمیت است. حجم واقعی سیلاب خروجی از حوضه رودخانه‌ای مورد مطالعه حدود ۲/۵۴ میلیون مترمکعب و این حجم برای مدل‌های ماسکینگام یک، دو و سه‌بازه‌ای به ترتیب حدود ۲/۵۰، ۲/۵۳ و ۲/۵۵

میلیون مترمکعب بدست آمد. علاوه بر دقت کمتر مدل ماسکینگام یک‌بازه‌ای، نتایج نشان داد که اختلاف حجم سیلاب محاسباتی در این مدل به‌ویژه در محدوده زمانی وقوع دبی اوج هیدروگراف قابل توجه‌تر است. به طور کلی نتایج مدل‌سازی این پژوهش نشان داد که برای بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای مدل ماسکینگام در هر دو حالت یک‌بازه‌ای و چندبازه‌ای در رودخانه‌های چندشاخه‌ای، استفاده از نرم‌افزار اکسل دقتی در حد الگوریتم‌های پیچیده و زمانبر ارائه می‌کند. علاوه بر این، نرم‌افزار مذکور سرعت انجام محاسبات مدل ماسکینگام چندبازه‌ای را به نحو موثری کاهش می‌دهد که برای کاربردهای عملی در رودخانه‌های طبیعی بسیار حائز اهمیت است. همچنین این مطالعه به دلیل استفاده از داده‌های واقعی سیلاب رودخانه‌های چندشاخه‌ای (هیدروگراف‌های ورودی و خروجی سیل) می‌تواند از اهمیت مناسبی برخوردار باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه کارایی مدل ماسکینگام چندبازه‌ای برای روندیابی سیلاب یک رودخانه چندشاخه‌ای از جنبه‌های مختلف بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که مدل ماسکینگام سه‌بازه‌ای از نظر مجموع مربعات خطا، برآورد دبی اوج هیدروگراف خروجی سیل و نیز حجم سیلاب در مقایسه با مدل ماسکینگام معمول (یک‌بازه‌ای) دقت بیشتری دارد. همچنین مشخص شد که با افزایش تعداد بازه‌ها از ۲ به ۳ بازه، کاهش خطای محاسبات تقریباً قابل صرفنظر کردن است. دو نکته مهم و اساسی در کاربرد روش ماسکینگام چندبازه‌ای قابل مطالعه و بررسی بیشتر است. نکته اول این است که به دلیل کمبود داده‌های واقعی، تاکنون معیار یا ضابطه‌ای علمی که مشخص کند کدام رودخانه‌ها برای کاربرد این روش اولویت دارند، ارائه نشده است و فقط باید این موضوع به کمک آزمون و خطا انجام شود. البته بدیهی است که هر چه تغییرات ظرفیت ذخیره یک رودخانه آبرفتی در طول مسیر بیشتر باشد (مثل تغییر قابل ملاحظه در شیب طولی آبراهه، عرض و عمق آبراهه، ضریب زبری آبراهه، اضافه شدن دشت‌های سیلابی و غیره)، به احتمال بیشتر این رودخانه دارای اولویت بیشتری برای کاربرد روش ماسکینگام چندبازه‌ای است. نکته دوم این است که تعداد بازه‌های بهینه در این روش برای رودخانه اصلی و شاخه‌های فرعی آن معلوم نیست و تاکنون ضابطه‌ای برای این موضوع پیشنهاد نشده است. بنابراین برای تعیین تعداد بازه‌های بهینه یک رودخانه، باید محاسبات به صورت آزمون و خطا و به کمک معیارهای آماری خطاها انجام شود. در این زمینه، احتمالاً استفاده از عکس‌های هوایی و نیز تصاویر ماهواره‌ای رودخانه موردنظر تا حدودی می‌تواند به تشخیص اولیه تعداد بازه‌های بهینه رودخانه کمک نماید. پیشنهاد می‌شود در خصوص این دو نکته که از محدودیت‌های کاربرد روش ماسکینگام چندبازه‌ای است مطالعات بیشتری صورت گیرد. علاوه بر موارد و ایده‌های فوق، ذکر این نکته هم مهم است که موضوع مورد اشاره در این تحقیق قابلیت بسط و گسترش زیادی دارد. اگرچه در این مقاله، نتایج بهبود محاسبات به کمک روش ماسکینگام دو و سه بازه‌ای در مقایسه با مدل ماسکینگام کلاسیک یک‌بازه‌ای چندان قابل ملاحظه نبوده است (که می‌تواند به دلیل کوهستانی بودن حوضه رودخانه‌ای مورد مطالعه و کم بودن ظرفیت ذخیره رودخانه باشد) ولی احتمالاً چندبازه‌ای نمودن رودخانه برای آبراهه‌های واقع در دشت و با ظرفیت ذخیره هیدرولیکی قابل توجه، دارای نتایج کارآمدتری باشد.

References

عمادی، م.، مسعودیان، م.، و راتچر، ک. (۱۳۹۸). عملکرد سد لاستیکی تجن واقع در پارک ملل ساری در سیلاب اسفند ۱۳۹۷. *نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۴).

ظهیری، ع.، اصغری، س.، و دهقانی، ا.ا. (۱۳۹۶). روندیابی سیلاب رودخانه‌ها به روش ماسکینگام چندبازه‌ای. *مجله آب و توسعه پایدار*، ۴(۸)، ۸۸-۸۱.

ظهیری، ع.، شریفان، ح.، و تمدنی کناری، س. (۱۳۹۱). بهینه‌سازی روش ماسکینگام در روندیابی سیل در رودخانه‌های سیلابی. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۳ (۶)، ۱۴-۱.

نودهی، س. (۱۳۸۶). بررسی اثرات زیست محیطی سد شهید رجائی ساری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد علوم زمین گرایش زیست‌محیطی، *دانشگاه صنعتی شاهرود*.

Alhumoud, J. 2022. Analysis and evaluation of flood routing using Muskingum method. J. *Applied Engineering Science*, 20(4), 1366-1377.

Atashi, V., Barati, R. Lim, Y.H. 2023. Development of a distributed nonlinear Muskingum model by considering snowmelt effects for flood routing in the Red River. *Scientific Report*, 13, 21356, https://doi.org/10.1038/s41598-023-48895-8

Barati, R. 2013. Application of excel solver for parameter estimation of the nonlinear Muskingum models. *J. Civil Engineering*, *KSCE*, 17(5), 1139-1148.

Bozorg-Haddad, O., Sarzaeim, P. Loáiciga, H.A. 2021. Developing a novel parameter-free optimization framework for flood routing. *Scientific Report*, 11, 16183, https://doi.org/10.1038/s41598-021-95721-0

Das, A. 2004. Parameter estimation for Muskingum models. *J. Irrigation and Drainage Engineering*, *ASCE*, 130(2), 140-147.

Dooge, J.C.I. 1973. Linear theory of hydrologic systems. USDA, *Agric. Res. Serv.*, *Tech, Bull*., No. 1468.

Emadi, M.M., Masoudian, M., Rottcher, K. 2019. The Performance of Tajan rubber dam in Mellal park in city of Sari during March 2019 flood. *J. Water and Wastewater Science and Engineering*, 4(4), 60-68. (In Farsi)

Farzin, S., Singh, V.P., Karami, H., Farahani, N., Ehteram, M., Kisi, O., Falah Allawi, M., Syuhadaa Mohd, N., El-Shafie, A. 2018. Flood routing in river reaches using a three-parameter muskingum model coupled with an improved Bat Algorithm. *Water*, 10, 1-24.

Hosseini, S.M. 2009. Application of spreadsheets in developing flexible multiple-reach and multiple-branch methods of Muskingum flood routing. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(4), 448–454.

Karahan, H. 2012. Predicting Muskingum flood routing parameters using spreadsheets. *Computer Applications in Engineering Education*, 20(2), 280–286.

Mohan, S. 1997. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *J. Hydraulic Engineering*, *ASCE*, 123(3), 137-142.

Norouzi, H., Bazargan, J. 2022. Flood routing using the Muskingum-Cunge method and application of different routing parameters. *Sādhanā* 47, 282.

Nodehi, S. 2007. Studying the environmental impacts of Shahid Rajaei dam in Sari. MSc Thesis in Geology, *Sharoud University of Technology*. (In Farsi)

Perumal, M. 1994. Hydrodynamic derivation of a variable parameter muskingum method: 2. Verification. *Hydrological Sciences Journal*, Oxford, U.K., 39(5), 431-441.

Samani, H.M.V., Jebelifard, S. 2003. Design of circular urban storm sewer systems using multilinear Muskingum flow routing method. *J. Hydraulic Engineering*, *ASCE*, 129(11), 832-838.

Samani, H.M.V., Shamsipour, G.A. 2004. Hydrologic flood routing in branched river systems via nonlinear optimization. *J. Hydraulic Research., IAHR*, 42(1), 55-59.

Salvati, A., Moghaddam Nia, A., Salajegheh, A., Shirzadi, A., Shahabi, H., Ahmadisharaf, E., Han, D., and Clague, J.J. 2024. A systematic review of Muskingum flood routing techniques. *Hydrological Sciences Journal*, 69(6), 810-831.

Tali, P.A. 2011. Land use/land cover change and its impact on flood occurrence: A case study of upper Jhelum floodplain. *Master of Philosophy in Geography, University of Kashmir*.

Zahiri, A., Asghari, S., Dehghani, A.A. 2017. Flood routing in rivers using multiple-reach Muskingum model. *Water and Sustaniable Development Journal*, 4(1):51-58. (In Farsi)

Zahiri, A., Sharifan, H., Tamodoni Kenari, S. 2012. Optimization of Muskingum flood routing in flooded rivers. *J. Watershed Management Research*, 3(6): 1-14. (In Farsi)