

توسعه مدل ماسکینگام غیرخطی و مقایسه آن با مدل HEC-RAS جهت روندیابی سیل در رودخانه‌ها

محمد شایان نژاد^{۱*}، ناهید اکبری^۲، افشین هنربخش^۳

۱. دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۶ - تاریخ تصویب: ۹۳/۶/۲۶)

چکیده

روندیابی سیل در رودخانه‌ها فرایندی ریاضی است که برای تعیین هیدروگراف جریان در هر نقطه از رودخانه صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های روندیابی، حل معادلات کامل سنت‌ونانت در تحلیل جریان غیرماندگار است که به دلیل پیچیدگی زیاد، نیازمند استفاده از کامپیوتر و مدل‌های توسعه‌یافته است. در مقابل این روش پیچیده، روش‌های ساده‌تر و با دقت مناسب توسعه یافته‌اند که از دیدگاه هیدرولوژیست‌ها نتایج قابل قبولی دارند. مدل ماسکینگام یکی از این روش‌هاست که دقت در تخمین پارامترهای آن بر هیدروگراف روندیابی شده، به‌خصوص بر حداکثر مقدار سیلاب، تأثیرگذار است. از آنجا که الگوریتم ژنتیک گزینه مناسبی برای تعیین پارامترهای بهینه مدل غیرخطی ماسکینگام است، در این تحقیق ضرایب بهینه مدل غیرخطی ماسکینگام از این روش در برنامه MATLAB و برای دامنه وسیعی از هیدروگراف‌های خروجی به‌دست آمده از نرم‌افزار HEC-RAS حاصل آمد. با به‌دست آوردن مقادیر بهینه این پارامترها و داشتن خصوصیات فیزیکی و هندسی رودخانه مورد مطالعه، تغییرات این خصوصیات و همچنین تغییرات پارامترهای روابط مدل ماسکینگام-کانز بر مقادیر ضرایب غیرخطی ماسکینگام بررسی شد. از این طریق، روابطی برای ضرایب مدل ماسکینگام غیرخطی x ، k و m به‌صورت تابعی از مشخصات رودخانه و سیلاب ورودی ارائه شد. سپس روندیابی سیل از روش حل معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول به‌روش رانگ-کوتای مرتبه ۴ انجام گرفت. برای بررسی دقت روابط مدل توسعه‌یافته، هیدروگراف‌های خروجی از پنج سیلاب بازه‌ای از یک رودخانه، با هیدروگراف‌های خروجی محاسبه‌شده با روش توسعه‌یافته و نرم‌افزار HEC-RAS مقایسه و نتایج دو روش با استفاده از فاکتور RMSE و ضریب همبستگی R^2 تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد دقت مدل توسعه‌یافته مشابه نرم‌افزار HEC-RAS است، بنابراین می‌توان از مدل توسعه‌یافته در مطالعات آینده در زمینه روندیابی سیل استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، روندیابی سیل، مدل ماسکینگام غیرخطی HEC-RAS.

مقدمه

پدیده طبیعی سیل ممکن است پیامدهای زیانباری در مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی داشته باشد. برای ممانعت از آثار مخرب سیل، شناخت ویژگی‌های سیل، به‌خصوص مقدار دبی اوج سیل بسیار مهم است. یکی از مراحل ضروری چنین اقداماتی، پیش‌بینی چگونگی طغیان و فروکش کردن سیل در مقاطع مختلف رودخانه با استفاده از روش‌های روندیابی سیلاب است [۳]. در قرن نوزدهم تحقیقات زیادی برای استفاده از روش‌های ریاضی در روندیابی سیل انجام گرفت. در سال ۱۸۷۱ سنت‌ونانت برای اولین بار تئوری جریان غیرماندگار را فرموله کرد [۴]. سپس با توجه به پیچیدگی حل این معادلات، روش‌های ساده‌تر و تقریبی برای روندیابی جریان توسعه یافت [۵]. به‌طور کلی بررسی روندیابی سیلاب به‌کمک روش‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی قابل مطالعه است. روندیابی هیدرولیکی بر اصول پیچیده هیدرولیکی و قوانین جریان‌های متغیر تدریجی در کانال‌های باز استوار است [۶]. این روش‌ها نیازمند اطلاعات وسیع نظیر شیب، توپوگرافی، تغییرات مسیر رودخانه، زبری و مشخصات مقاطع عرضی و همچنین محاسبات طولانی است. به همین دلیل نرم‌افزارهای مختلفی برای محاسبات پیچیده روندیابی به‌وسیله روش‌های هیدرولیکی ارائه شده و نتایج حاصل از روندیابی به‌وسیله این نرم‌افزارها توسط محققان مختلف بررسی شده است. از جمله این محققان می‌توان به نیل و همکاران (۲۰۰۵) اشاره کرد که با تلفیق دو نرم‌افزار HEC-RAS و HEC-HMS در حوضه سن‌آنتونیو واقع در ایالت تکزاس آمریکا مدلی برای روندیابی سیلاب‌های این منطقه معرفی کردند [۷]. شولتس نیز به روندیابی پویای سیل با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS در بازه‌هایی از مناطق شهری-روستایی واقع در کارولینای شمالی پرداخت و نتیجه گرفت که کاهش شیب و افزایش زبری دشت سیلابی و نهر تأثیر بیشتری بر افت قدرت امواج سیل دارد [۸]. در ایران نیز قبادیان با استفاده از حل معادلات جریان غیرماندگار به روندیابی هیدرولیکی سیلاب در رودخانه قره‌سو پرداخت و دریافت که هیدروگراف‌ها و مقیاس محاسبه‌شده در مقاطع مختلف بازه مذکور با مقادیر محاسبه‌شده به‌وسیله نرم‌افزار HEC-RAS تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهند [۱]. در تمامی مطالعات به‌وسیله نرم‌افزارهای ارائه‌شده، اگرچه این نرم‌افزارها سرعت

محاسبات را بیشتر کردند، حجم عملیات محاسباتی و میزان داده‌های مورد نیاز برای این محاسبات از ضعف‌های روش‌های هیدرولیکی روندیابی سیل و نرم‌افزارهای توسعه‌یافته براساس این روش‌هاست. در مقابل روش‌های هیدرولیکی، روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی از اصل پیوستگی جریان و معادله میان دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر استفاده می‌کنند. به این ترتیب این روش‌ها ساده‌اند و در عین حال از دقت قابل قبولی در پروژه‌های هیدرولوژیکی برخوردارند. از جمله این روش‌ها می‌توان به مدل‌های ماسکینگام، ماسکینگام-کانز و انتگرال ترسیمی اشاره کرد [۹]. مدل ماسکینگام یکی از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است که اولین بار مک‌کارتی آن را معرفی کرد. در این مدل از معادلات پیوستگی و معادلات بین مقادیر ورودی، خروجی و ذخیره سیل استفاده می‌شود [۱۰]. اما شکل غیرخطی این مدل را اولین بار گیل و همکاران معرفی کردند [۱۱]. در سه دهه گذشته تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی روندیابی سیلاب انجام گرفته است که از آن میان می‌توان به پژوهش‌های یون و پادمانابهان اشاره کرد که چندین روش مختلف برای تخمین پارامترهای مدل‌های ماسکینگام خطی و غیرخطی ارائه و با استفاده از داده‌های ویلسون (۱۹۷۴) با هم مقایسه کردند [۱۲، ۱۳]. مرادی و همکاران نیز به روندیابی سیل با روش‌های ماسکینگام و ماسکینگام-کانز در رودخانه ليقوان پرداختند و مشاهده کردند که نتایج حاصل از جریان روندیابی‌شده توسط دو مدل اختلاف معناداری با نتایج واقعی ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری پایین‌دست دارد. آنها دلیل آن را کوهستانی بودن منطقه و وجود زهکش‌های تحت‌الارضی در حد فاصل دو ایستگاه هیدرومتری بالادست و پایین‌دست عنوان کردند [۲]. نکته مهم حل معادله غیرخطی ماسکینگام، لزوم تخمین مناسب سه پارامتر موجود در این معادله است که تأثیر زیادی در نتایج روندیابی دارند و محاسبه آنها با روش‌های عددی و سعی و خطا مشکل است. سامانی و شمسی‌پور محاسبات تعیین پارامترهای روش ماسکینگام برای روندیابی موج سیلاب در رودخانه‌های شریانی را به‌کمک روش غیرخطی پاول بهینه‌سازی کردند [۱۴]. الحمد و ایسن از روشی ساده و تقریبی برای تعیین ضرایب مدل ماسکینگام استفاده کردند. این روش براساس محاسبه شیب هیدروگراف‌های ورودی و خروجی در نقطه

مواد و روش‌ها

روندیابی سیل به روش مدل خطی ماسکینگام

روش ماسکینگام دارای مبانی ساده‌ای است و کاربرد گسترده‌ای در مطالعات کنترل سیلاب رودخانه‌ها دارد. مبنای این روش مدل پیوستگی است که تغییرات حجم ذخیره نسبت به زمان برابر است با تغییرات مقادیر جریان ورودی و خروجی است. و نیز ذخیره خطی در هر زمان، تابع مقادیر ورودی و خروجی آن زمان و ضرایب x و k است. دو معادله پیوستگی و ذخیره غیر خطی به‌طور مشترک در مدل ماسکینگام به شکل زیر استفاده می‌شوند [۶]:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (1)$$

$$S_t = k [xI_t + (1-x)O_t] \quad (2)$$

در این معادلات S_t ، I_t و O_t به ترتیب نشان‌دهنده حجم ذخیره، دبی ورودی و دبی خروجی در زمان t است. k (بر حسب ساعت) ضریب زمان-ذخیره برای رودخانه و بیان‌کننده زمان پیمایش رودخانه است. x نیز فاکتور وزنی و بدون بعد و بیانگر اثر نسبی دبی‌های ورودی و خروجی سیل بر حجم ذخیره رودخانه است که به‌طور معمول، مقدار آن برای مخازن ذخیره بین ۰ و ۰/۵ و برای رودخانه‌ها بین ۰ و ۰/۳ است. از مهم‌ترین نقایص مدل ماسکینگام این است که پارامترهای x و k را در صورتی می‌توان برآورد کرد که آبنمودهای ورودی و خروجی از یک واقعه سیلاب در بازه کانال یا رودخانه موجود باشد. این مسئله در روش ماسکینگام-کانز برطرف شده و در آن پارامترهای x و k بر اساس Q دبی پایه و خصوصیات فیزیکی بازه کانال همچون B : عرض بالایی جریان مربوط به دبی پایه؛ S_0 : شیب طولی کانال؛ Δx : طول بازه کانال؛ و C_k : سرعت انتقال امواج به‌صورت زیر بیان شده‌اند [۶].

$$k = \frac{\Delta x}{c_k} = \frac{\Delta x}{\frac{dQ}{dA}} \quad (3)$$

$$x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BC_k S \Delta x} \right) \quad (4)$$

حل عددی مدل غیر خطی ماسکینگام

در مدل غیر خطی ماسکینگام، پارامتر m به‌عنوان توان به معادله ۲ اضافه شده است که مدل را قادر می‌سازد رابطه

تلاقی آنهاست [۱۵]. کاراهان با استفاده از نرم‌افزار اکسل، محاسبات تعیین پارامترهای مدل ماسکینگام را بهینه‌سازی کرد [۱۶]. در سال‌های اخیر برای تسهیل این محاسبات، روش‌های مختلف الگوریتم‌های فراکاوشی برای حل مدل ماسکینگام و تخمین پارامترهای آن استفاده شده‌اند [۱۷]. در دو دهه اخیر نیز تکنیک‌های بهینه‌سازی مختلفی از جمله روش الگوریتم GA، BFGS و جست‌وجوی هارمونی (HS) برای مشخص کردن این سه پارامتر به کار گرفته شده است. گیل و همکاران با استفاده از روش حداقل مربعات (LSM) مقادیر سه پارامتر مدل ماسکینگام غیر خطی را تعیین کردند [۱۱]. یون و همکاران از بسته نرم‌افزاری به نام سیستم روندیابی سیل و تخمین پارامترهای ماسکینگام (MUPERS) برای تعیین پارامترهای مدل خطی و غیر خطی استفاده کردند. این نرم‌افزار براساس پارامترهای تخمینی و مدل خطی یا غیر خطی انتخاب‌شده، روندیابی سیل را انجام می‌دهد. نتایج آنها به علت اینکه داده‌های انتخابی غیر خطی بودند رضایت‌بخش بود، اگرچه روش‌های تخمینی دیگر نیز دقت قابل قبولی داشتند [۱۲]. موهان نیز در تحقیقات خود نشان داد که تمام روش‌های قبلی، رسیدن به جواب بهینه مطلق را تضمین نمی‌کنند و در دام جواب‌های بهینه موضعی قرار می‌گیرند؛ وی از GA برای تخمین پارامترهای مدل استفاده کرد و نتایج نشان داد که تخمین به‌وسیله GA بهتر از روش‌های قبلی است و به حدس اولیه نزدیک به جواب بهینه نیاز ندارد [۱۸]. با توجه به مطالب ذکر شده، از آنجا که تمام روش‌های ارائه‌شده برای روندیابی سیل پیچیدگی‌های خاص خود را دارند، از اهداف این تحقیق به‌دست آوردن ضرایب مدل غیر خطی ماسکینگام از طریق الگوریتم ژنتیک و همچنین تعیین توابع ریاضی برای این ضرایب است، تا این ضرایب بدون نیاز به اطلاعات سیلاب‌های پیشین تعیین شود. علاوه بر این، برای بررسی صحت روابط توسعه‌یافته، هیدروگراف خروجی ناشی از پنج سیلاب بازه‌ای از رودخانه دوآب صمصامی، با استفاده از روابط توسعه‌یافته و از طریق حل معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول به‌وسیله رانگ-کوتا مرتبه ۴ روندیابی شده و نتایج حاصل از این روش، با هیدروگراف‌های خروجی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار HEC-RAS نیز مقایسه شده است.

$$K_r = -\Delta t \left[\left(\frac{1}{1-x} \right) \left(\frac{S_i + \frac{K_r}{2}}{k} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) \frac{I_i + I_{i+1}}{2} \right] \quad (12)$$

$$K_r = -\Delta t \left[\left(\frac{1}{1-x} \right) \left(\frac{S_i + K_r}{k} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) I_{i+1} \right] \quad (13)$$

بنابراین برای تعیین هیدروگراف خروجی، مراحل زیر انجام می‌گیرد:

گام اول: محاسبه S_t براساس رابطه ۵ و به ازای I_t و Q_t ؛

گام دوم: محاسبه S_{t+1} از رابطه ۹؛

گام سوم: محاسبه Q_{t+1} بر اساس رابطه ۷.

بنابراین با این روش می‌توان با مشخص بودن مقادیر پارامترهای x ، k و m ، آبنمود خروجی را تعیین کرد. برای معرفی روابطی که بتوان این ضرایب را بدون نیاز به اطلاعات سیلاب‌های گذشته و تنها با استفاده از مشخصات فیزیکی رودخانه محاسبه کرد، داده‌های اولیه نیاز است که به این منظور از نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شده است.

تولید هیدروگراف‌های خروجی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS

از آنجا که نرم‌افزار HEC-RAS روندیابی سیل را با حل معادلات سنت‌ونانت انجام می‌دهد و این معادلات از نتایج دقیقی برخوردارند، از این نرم‌افزار برای تولید هیدروگراف‌های خروجی استفاده می‌شود. حل این معادلات در این نرم‌افزار بر پایه فرضیه‌های ساده‌شونده‌ای بنیان گذاشته شده و با وجود این ساده‌سازی‌ها، نتایج رضایت‌بخشی در بسیاری از موارد حاصل شده است. این فرضیات عبارتند از: ۱. جریان متغیر تدریجی است (تغییرات رقوم سطح آب به تدریج صورت می‌گیرد)؛ ۲. جریان یک‌بعدی است (از تغییرات مشخصات جریان در عرض چشم‌پوشی می‌شود)؛ ۳. مرزها صلب (فرسایش‌ناپذیر) فرض می‌شوند. همچنین این نرم‌افزار می‌تواند با وارد کردن داده‌های اولیه و مشخصات فیزیکی و هندسی از مقاطع رودخانه و اجرای آن، هیدروگراف‌های خروجی در پنج سیل رخ داده در بازه‌ای از رودخانه دوآب مصمami را محاسبه کند.

تعیین ضرایب مدل ماسکینگام غیرخطی به روش الگوریتم ژنتیک

پس از تولید هیدروگراف‌های ورودی و خروجی متفاوت

غیرخطی بین ذخیره تجمعی و جریان را بهتر مدلسازی کند [۱۹]. به این منظور روابط زیر برای حل عددی این مدل ارائه می‌شوند [۶]:

$$S_t = k [xI_t + (1-x)O_t]^m \quad (5)$$

$$S_{t+1} = k [xI_{t+1} + (1-x)O_{t+1}]^m \quad (6)$$

با توجه به رابطه ۶ دبی خروجی در گام زمانی $t+1$ که تابع ذخیره حجمی و جریان ورودی در زمان $t+1$ و ضرایب x و k است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$O_{t+1} = \left(\frac{1}{1-x} \right) \left(\frac{S_{t+1}}{k} \right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{x}{1-x} \right) I_{t+1} \quad (7)$$

با جای گذاری رابطه ۷ در معادله پیوستگی رابطه زیر ارائه می‌شود [۶]:

$$\frac{dS}{dt} = - \left(\frac{1}{1-x} \right) \left(\frac{S_t}{k} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) I_t \quad (8)$$

رابطه ۸ یک معادله دیفرانسیلی مرتبه اول است که می‌توان آن را به روش‌های مختلف حل کرد که یکی از این روش‌ها، رانگ-کوتای مرتبه ۴ است که با محاسبه ذخیره غیرخطی در زمان t از معادله ۵، ذخیره غیرخطی در زمان $t+1$ به صورت زیر محاسبه می‌شود که تابع ضرایب K_1 تا K_4 در روش رانگ-کوتای مرتبه ۴ نیز است [۶]:

$$S_{t+1} = S_t + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (9)$$

در رابطه بالا، برای محاسبه مقدار ذخیره حجمی در زمان $t+1$ ، مقادیر K_1 تا K_4 ضرایب روش رانگ-کوتای مرتبه ۴ که تابع ذخیره حجمی S ، ضرایب مدل ماسکینگام غیرخطی x ، k و m و دبی ورودی I هستند، با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند [۶]:

$$K_1 = -\Delta t \left[\left(\frac{1}{1-x} \right) \left(\frac{S_i}{k} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) I_i \right] \quad (10)$$

$$K_r = -\Delta t \left[\left(\frac{1}{1-x} \right) \left(\frac{S_i + \frac{K_r}{2}}{k} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) \frac{I_i + I_{i+1}}{2} \right] \quad (11)$$

محاسبه شده و این روال آن قدر تکرار می شود تا تمامی جواب‌ها به سمت نقطه بهینه رهنمون شوند.

تعیین توابعی برای ضرایب مدل ماسکینگام غیرخطی
از آنجا که هیدروگراف خروجی توسط نرم‌افزار HEC-RAS محاسبه شده است، مجهولات مدل غیرخطی ماسکینگام در روابط ذکر شده، ضرایب این مدل خواهند بود. برای تعیین این ضرایب ابتدا با فرض مقادیر مناسب جهت پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی، هیدروگراف خروجی روندیابی شده و مقدار خطای هیدروگراف محاسبه‌ای از هیدروگراف مشاهده‌ای به وسیله نرم‌افزار HEC-RAS، با محاسبه پارامتری به نام RMSE تعیین می شود. هرچه مقدار این پارامتر کمتر شود، ضرایب استفاده شده در مدل غیرخطی ماسکینگام صحیح ترند. بنابراین برای هر هیدروگراف ورودی که دارای مشخصات هندسی و هیدرولیکی خاصی است، ضرایب بهینه مدل ماسکینگام غیرخطی به دست می آید. در بررسی روند تغییرات خصوصیات فیزیکی و هندسی رودخانه، برای تعیین روابط بهینه جهت ضرایب مدل ماسکینگام غیرخطی، از معادلات موجود در مدل‌های ماسکینگام-کانژ نیز استفاده کردیم. به دلیل وجود ترکیبی از خصوصیات فیزیکی و هندسی رودخانه در معادلات این مدل‌ها، می توان به روند بهتر و دقیق تر این تغییرات دست یافت. در نهایت از بین تمام بررسی‌های تغییرات روابط معادلات ذکر شده با ضرایب مدل ماسکینگام غیرخطی، بهترین آنها که روند مشخص تری را نسبت به ضرایب مدل ماسکینگام غیرخطی نشان می دهند، انتخاب شد و برازش‌های مختلفی به کمک نرم‌افزار CurveExpert برای این تغییرات انجام گرفت و بهترین برازش برای ارائه روابطی مناسب به منظور تعیین بهینه ضرایب x ، k و m در مدل غیرخطی ماسکینگام تعیین شد.

تأیید مدل توسعه یافته

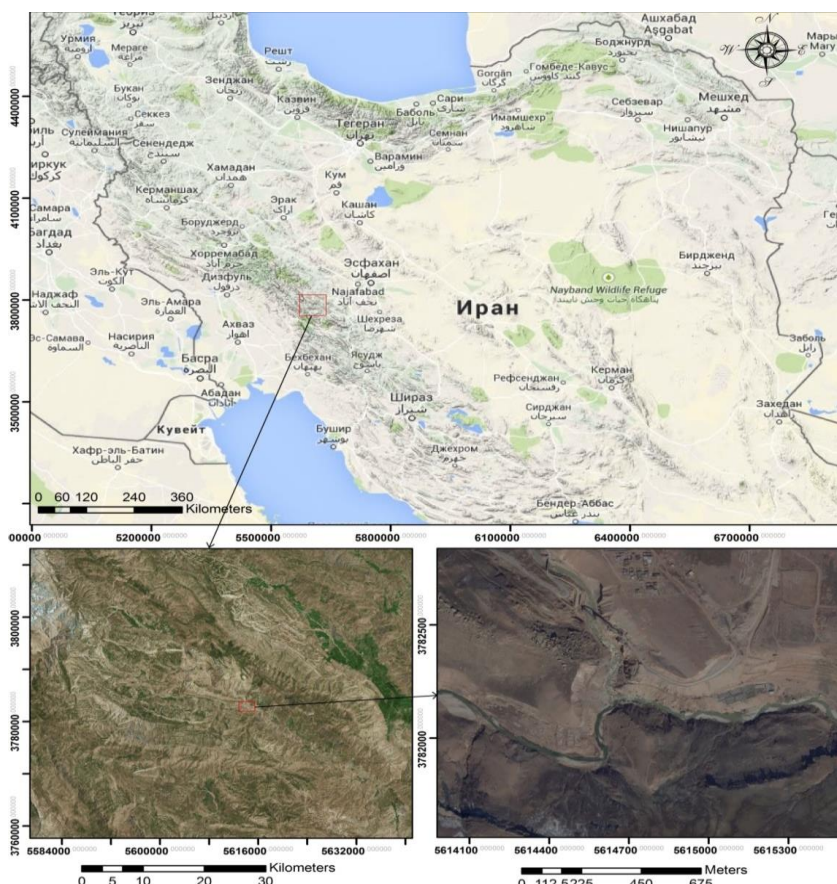
پس از تعیین روابط توسعه یافته، بازه‌ای به طول ۳/۵ کیلومتر از رودخانه دوآب صمصامی واقع در غرب استان چهارمحال و بختیاری که از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کارون بزرگ محسوب می شود، انتخاب و خصوصیات رودخانه از جمله طول، عرض، شیب طولی و مقدار ضریب زبری مانینگ اندازه گیری شد. سپس با استفاده از داده‌های پنج سیلاب در طول سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹، هیدروگراف‌های ورودی و

در شرایط مختلف رودخانه‌ها، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر ضرایب مدل غیرخطی ماسکینگام به گونه‌ای محاسبه می شود که هیدروگراف روندیابی شده به وسیله این مدل، با هیدروگراف خروجی محاسبه شده از نرم‌افزار HEC-RAS دارای کمترین اختلاف شود که این عمل بهینه‌سازی ضرایب مدل ماسکینگام نامیده می شود. دلیل استفاده از الگوریتم ژنتیک این است که بهینه‌سازی پارامترهای x ، k و m با استفاده از روش‌های معمول، نیازمند محاسبات تکراری و بسیار زمان‌بر است؛ به همین دلیل استفاده از روش‌های بهینه‌سازی از جمله الگوریتم ژنتیک سبب کاهش زمان محاسبات و افزایش دقت می شود. از میان الگوریتم‌های هوشمند، روش جست‌وجوی ژنتیکی که ایده آن از سیستم تکامل طبیعی موجودات زنده (ژن و کروموزوم) گرفته شده، به عنوان روش نوین بهینه‌سازی مدل‌های غیرخطی، بسیار مناسب است و کاربردهای فراوانی دارد [۲۰]. این الگوریتم، الگوریتم‌هایی را که بر اساس مفهوم بخش‌های طبیعی و ژنتیک‌های طبیعی اند آزمایش و بررسی می کند [۲۰]. فرایند بهینه‌سازی در جست‌وجوی ژنتیکی به این صورت است که در آغاز، یک جمعیت اولیه تولید می شود و مراحل تکثیر، جهش و تبادل ژنی روی این جمعیت صورت می گیرد. ابتدا چند پاسخ در محدوده تغییر پارامترها حدس زده می شود و با تبدیل این اعداد به زنجیره‌هایی از صفر و یک، مقادیر تابع هدف به ازای این مقدار پاسخ به دست می آید. در این تحقیق محدوده تغییر x بین ۰ و ۰/۵ است، اما برای k محدوده‌ای تعریف نشده است. پس از تعیین محدوده، زنجیره‌هایی که تابع هدف به ازای آنها کمینه می شود توسط روش چرخ گردان باقی می ماند و بقیه حذف می شوند. پس از انتخاب زنجیره‌ها و با انتخاب درصد احتمال ترکیب مناسب، مکان‌هایی از تابع زنجیره‌ها برای تبادل اطلاعات انتخاب می شود. 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 می شود. 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 برعکس تبدیل می شود. سپس مجدداً تابع هدف به ازای جمعیت جدید

نتایج و بحث

در شکل‌های زیر روند تغییرات ضرایب مدل غیرخطی ماسکینگام در برابر تغییرات پارامتر C_k نشان داده شده است. منحنی‌ها و معادلات برازش‌یافته نیز در این نمودارها مشخص است.

خروجی از بازه انتخاب‌شده رسم شد. با استفاده از مشخصات فیزیکی اندازه‌گیری‌شده در رودخانه، همچنین با استفاده از روابط توسعه‌یافته، ضرایب مدل غیرخطی ماسکینگام برای این رودخانه تعیین و هیدروگراف خروجی بر اساس این ضرایب محاسبه می‌شود. همچنین از نرم‌افزار HEC-RAS نیز برای محاسبه هیدروگراف خروجی استفاده شد که نتایج این روش‌ها در ادامه ذکر می‌شود.

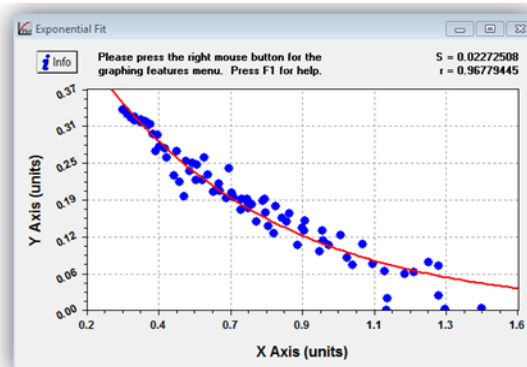


شکل ۱. موقعیت حوضه و رودخانه دوآب صمصامی در استان چهارمحال و بختیاری

معادله بهترین برازش در روند تغییرات پارامتر C_k با ضریب x به صورت زیر است.

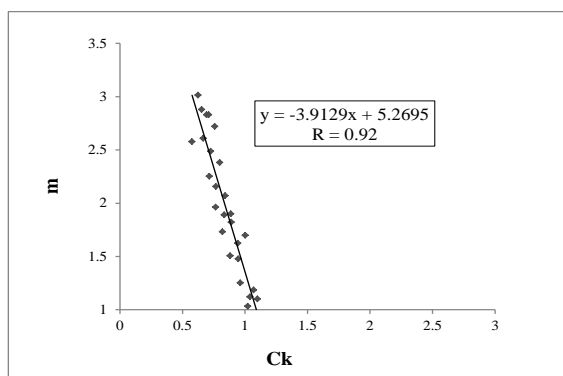
$$x = 0.628 * \text{Exp}(-1/11 * C_k) \quad (14)$$

برای بررسی بهتر تغییرات پارامتر C_k با ضریب k ، نمودار به دو قسمت جداگانه برای دبی‌های پایه کوچک‌تر و بزرگ‌تر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه تقسیم شد. شکل ۴ تغییرات پارامتر C_k با ضریب k مدل ماسکینگام غیرخطی برای دبی‌های پایه ورودی کوچک‌تر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد.



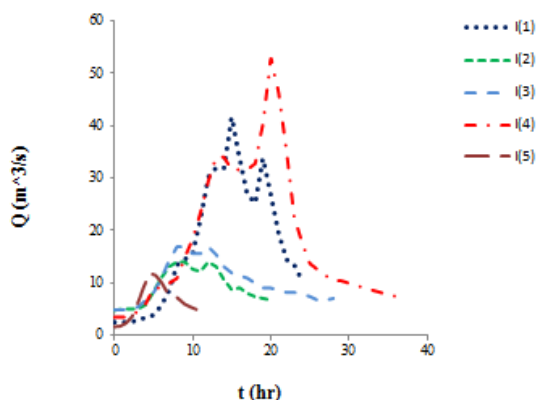
شکل ۲. بهترین برازش در روند تغییرات پارامتر C_k با ضریب x

افزایش مقدار سرعت انتقال امواج کاهش می‌یابد. در مورد توان m در مدل ماسکینگام غیرخطی نیز در جریان‌های پایه کوچک‌تر از ۱۳ متر مکعب بر ثانیه، روند پراکنده‌ای در محدوده ۱ تا ۱/۵ نسبت به پارامتر سرعت متوسط جریان C_k وجود داشت و در جریان‌های بزرگ‌تر از ۱۳ متر مکعب بر ثانیه روند مشخصی در محدوده ۱ تا ۳ با پارامتر C_k به دست آمد؛ به طوری که با افزایش سرعت متوسط جریان C_k که سبب کاهش مقدار ذخیره جریان در رودخانه می‌شود، توان m در مدل غیرخطی ماسکینگام که نشان‌دهنده مقدار ذخیره رودخانه است، کاهش یافت. شکل ۵ این تغییرات را نشان می‌دهد.

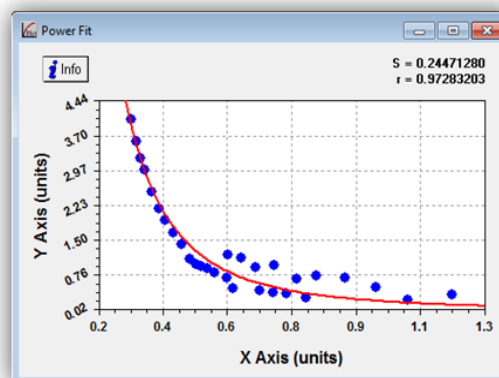


شکل ۵. بهترین برازش بر روند تغییرات پارامتر C_k با ضریب m (قسمت دوم)

پس از تعیین روابط توسعه‌یافته، هیدروگراف‌های ورودی و خروجی ثبت‌شده و همچنین هیدروگراف‌های روندیابی‌شده توسط دو مدل توسعه‌یافته و نرم‌افزار HEC-RAS محاسبه شد. شکل ۶ هیدروگراف‌های ورودی اندازه‌گیری‌شده مربوط به پنج سیلاب را نشان می‌دهد.



شکل ۶. هیدروگراف‌های ورودی در پنج سیلاب

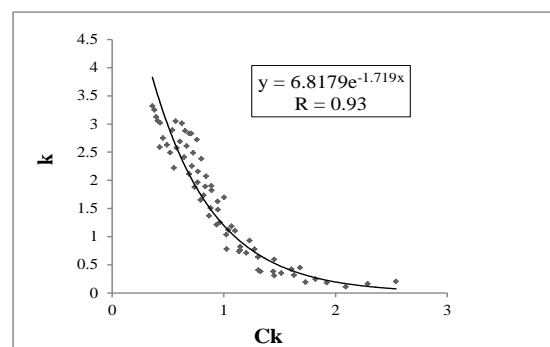


شکل ۳. بهترین برازش در روند تغییرات پارامتر C_k با ضریب k (قسمت اول)

معادله ۱۵ محاسبه ضریب k را نسبت به پارامتر C_k در جریان‌های پایه کمتر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه نشان می‌دهد.

$$k = 0.209 * C_k^{-2/57} \quad (15)$$

همچنین در قسمت ۲ این نمودار که مخصوص دبی‌های پایه بزرگ‌تر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه است، بهترین برازش توسط نرم‌افزار Excel انجام گرفت که این برازش در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. بهترین برازش بر روند تغییرات پارامتر C_k با ضریب k (قسمت دوم)

در بررسی روند تغییرات پارامتر C_k نسبت به ضرایب x و k مدل ماسکینگام غیرخطی مشاهده می‌شود که این تغییرات عکس یکدیگرند؛ به این دلیل که پارامتر C_k بیانگر سرعت انتقال امواج است، همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار سرعت انتقال امواج، مقدار ذخیره حجمی در رودخانه و پارامتر x کاهش می‌یابد و نیز ضریب k که مبین زمان طی کردن موج است هم با

دقیق‌تر، از فاکتور جذر مجموع مربع تفاضلات دبی‌های محاسبه‌شده از مشاهده‌شده RMSE نیز برای هر سیلاب استفاده می‌شود. روش محاسبه این پارامتر به شکل زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_c - O_m)^2}{n}} \quad (16)$$

که مقادیر O_c دبی محاسبه‌شده؛ O_m دبی مشاهده‌شده؛ و n تعداد زوج دبی‌های مشاهده‌شده و محاسبه‌ای از هر مدل است. مقادیر پارامتر RMSE برای نتایج هر یک از دو روش روندیابی نیز در جدول ۲ آورده شده است. به منظور کنترل نتایج حاصل از مقایسه قبل و تشخیص عوامل خطا یا اشتباه احتمالی، مقادیر مشاهده‌شده و محاسبه‌شده برای هر سیلاب، جداگانه مقایسه شده است.

جدول ۱ نیز مقادیر هیدروگراف‌های خروجی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای، همچنین درصد تفاوت مقادیر محاسبه‌شده به روش‌های مختلف را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد. بازه‌های زمانی در هر پنج سیلاب پانزده دقیقه است، اما در این جدول برای خلاصه کردن، مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در بازه‌های زمانی ۲ ساعت آورده شده است. همان‌طور که در ستون‌های پنج و شش این جدول مشاهده می‌شود، میانگین تفاوت دبی‌های محاسبه‌شده از مشاهده‌ای با استفاده از روش توسعه‌یافته و برای مجموع هر پنج سیلاب برابر ۳/۴ درصد است که این مقدار برای نرم‌افزار HEC-RAS برابر ۵/۷۶ درصد است. این اعداد بیانگر عملکرد بهتر مدل توسعه‌یافته در پیش‌بینی هیدروگراف‌های خروجی سیلاب است. اما برای بررسی

جدول ۱. مقادیر هیدروگراف‌های خروجی مشاهده‌شده و محاسبه‌شده و درصد تفاوت آنها

ساعت	مشاهده‌ای (m^3 / s)	HEC-RAS (m^3 / s)	مدل توسعه‌یافته (m^3 / s)	درصد اختلاف HEC- RAS و مشاهده‌ای	درصد اختلاف توسعه‌یافته و مشاهده‌ای
سیلاب ۱					
۰	۲/۴۴	۲/۴۴	۳/۹۳	۰	۶۱
۲	۲/۴۸	۲/۴۸	۲/۶۶	-۰/۲	۷
۴	۳/۱	۳/۱	۳/۰۲	۰/۱۱	-۲/۵
۶	۴/۶۸	۴/۶۱	۴/۸۶	-۱/۳۹	۳/۸۶
۸	۱۰/۸۴	۹/۸۸	۱۱/۷۱	-۸/۸۶	۸
۱۰	۱۵/۰۹	۱۴/۲۶	۱۵/۳۲	-۵/۴۸	۱/۵
۱۲	۲۵/۹	۲۲/۷۴	۲۸/۶۶	-۱۲/۱۷	۱۰/۶
۱۴	۳۲	۳۰/۱۲	۳۱/۹۵	-۵/۸۲	-۰/۱۴
۱۶	۳۷/۳۱	۳۶/۰۵	۳۴/۶۱	-۳/۳۸	-۷/۲۵
۱۸	۲۷/۲۴	۲۹	۲۵/۶۱	۶/۴۷	-۶
۲۰	۲۸/۹۵	۲۹/۹	۲۷/۸۵	۳/۳۲	-۳/۸
۲۲	۱۸/۱۴	۲۰/۵۵	۱۵/۴۶	۱۳/۲۹	-۱۴/۷۷
۲۴	۱۵/۰۵	۱۳/۴۳	۱۱/۴۲	-۱۰/۷۳	-۲۴/۱۲
سیلاب ۲					
۰	۴/۷۷	۴/۷	۴/۷	-۱/۵۷	-۱/۵۷
۲	۵/۰۲	۵/۱	۵/۱۲	۱/۷	۱/۹۴
۴	۵/۴۴	۵/۴۲	۵/۵۱	-۰/۳	۱/۲۷
۶	۹/۵۵	۹/۳۳	۱۰	-۲/۳	۴/۷
۸	۱۳/۴۵	۱۳/۲۳	۱۳/۶۳	-۱/۶	۱/۳۴
۱۰	۱۳/۳۶	۱۳/۲۹	۱۳/۰۳	-۰/۵	-۲/۴۹
۱۲	۱۳/۰۳	۱۳/۱۳	۱۳/۴۶	۰/۸	۳/۲۷
۱۴	۱۲	۱۱/۹۶	۱۱/۴۱	-۰/۳	-۴/۹۲
۱۶	۸/۹۳	۹/۱۴	۹/۰۳	۲/۲۹	۱
۱۸	۷/۷۸	۷/۸۱	۷/۶۴	۰/۴	-۱/۸
۲۰	۶/۹۳	۶/۹۴	۶/۹	۰/۲۱	-۰/۴۶

ادامه جدول ۱. مقادیر هیدروگرافهای خروجی مشاهده شده و محاسبه شده و درصد تفاوت آنها

ساعت	مشاهدهای (m^3 / s)	HEC-RAS (m^3 / s)	مدل توسعه یافته (m^3 / s)	درصد اختلاف HEC- RAS و مشاهدهای	درصد اختلاف توسعه یافته و مشاهدهای
سیلاب ۳					
۰	۴/۸۳	۴/۸	۴/۸	-۰/۷	-۰/۷
۲	۴/۹۶	۵/۲	۵/۱۲	۴/۷۸	۳
۴	۶	۵/۸۱	۶/۱۲	-۳/۱۸	۱/۸۷
۶	۹/۵	۸/۷۵	۹/۹۳	-۷/۷۸	۴/۵
۸	۱۵/۳۹	۱۴/۲۸	۱۶/۲۵	-۷/۱۸	۵/۵۵
۱۰	۱۶/۳۲	۱۶/۱۵	۱۵/۸۴	-۱	۲/۹۵
۱۲	۱۶/۱۹	۱۶/۱۲	۱۶/۶	-۰/۴	۲/۸۶
۱۴	۱۴/۵۱	۱۴/۸	۱۳/۸۱	۲	-۴/۸۵
۱۶	۱۱/۸۵	۱۲/۱۵	۱۱/۶۱	۲/۵	-۲/۰۸
۱۸	۱۰/۶۵	۱۰/۷۴	۱۰/۲۶	۰/۸	-۳/۶۵
۲۰	۹/۲۲	۹/۳	۹/۰۶	۰/۸	-۱/۷۶
۲۲	۸/۵۷	۸/۵۷	۸/۳۳	-۰/۰۸	-۲/۸۷
۲۴	۸/۰۹	۸/۰۸	۷/۹۲	-۰/۱۷	-۲/۱۸
۲۶	۷/۳۳	۸/۰۸	۷/۰۲	-۱/۱۳	-۴/۳۳
۲۸	۶/۸۷	۶/۸۷	۶/۹۱	۰	۰/۵۷
سیلاب ۴					
۰	۳/۳۶	۳/۴	۳/۴	۱/۱	۱/۱۶
۲	۳/۴۸	۳/۶	۳/۶۳	۳/۵	۴/۳۱
۴	۵/۰۲	۴/۹۵	۵/۳۳	-۱/۳۵	۶
۶	۸/۷۹	۸/۴۶	۸/۸۴	-۳/۷	۰/۵
۸	۱۰/۳۲	۱۰/۰۶	۱۰/۵۶	-۲/۵۶	۲/۵
۱۰	۱۶/۴	۱۵/۲۳	۱۷/۶۴	-۷/۱۲	۷/۵۶
۱۲	۲۶/۳۱	۲۳/۹۸	۲۸/۲۷	-۸/۸۸	۷/۴
۱۴	۳۳/۷۷	۳۲/۵۴	۳۳/۹۹	-۳/۶۴	۰/۶۳
۱۶	۳۱/۷۲	۳۱/۹۸	۳۱/۶	۰/۸	-۰/۴
۱۸	۳۲/۲۸	۳۱/۹۸	۳۲/۶۷	-۰/۹	۱/۲
۲۰	۴۶/۹۷	۴۲/۲۴	۵۱/۴۴	-۱۰	۹/۵
۲۲	۴۰/۹۱	۴۳/۵۸	۳۶/۴۴	۶/۵	-۱۰/۹۳
۲۴	۲۳/۱۹	۲۴/۴۷	۱۸/۶۶	۵/۵	-۱۹/۵۵
۲۶	۱۵/۴۲	۱۴/۶۱	۱۲/۹۸	-۵/۲	-۱۵/۸۲
۲۸	۱۲/۲۲	۱۱/۴۲	۱۰/۷۶	-۶/۵	-۱۱/۹۶
۳۰	۱۰/۸۳	۱۰/۳۱	۱۰/۰۸	-۴/۸	-۶/۹۷
۳۲	۹/۷۶	۹/۴۲	۹/۱۸	-۳/۵	-۵/۹۸
۳۴	۸/۹۴	۸/۵۵	۸/۳۳	-۴/۳	-۶/۸۹
۳۶	۸/۱۸	۷/۷۵	۷/۵۹	-۵/۳	-۷/۲۵
سیلاب ۵					
۰	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۰	۰
۲	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۴۶	-۰/۳	۱۲/۹۲
۴	۸/۱۷	۶/۸۷	۸/۲۵	-۱۵/۸	۰/۹۸
۶	۱۱/۰۵	۱۱	۱۰/۵۹	-۰/۵	-۴/۲۳
۸	۸	۸/۲۱	۷/۶۳	۲/۷	-۴/۶۷
۱۰	۵/۹۲	۵/۹۴	۵/۶۴	۰/۴	-۴/۷۶
۱۲	۴/۸۱	۴/۸۲	۴/۷۷	۰/۰۶	-۱

HEC-RAS همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهده شده دارد و می توان دقت این روش را بهتر از مدل توسعه یافته دانست. در شکل های ۷ و ۸ نیز مقدار ضریب همبستگی برای هر یک از دو مدل توسعه یافته و نرم افزار HEC-RAS برای مجموع پنج سیلاب نشان داده شده است. با توجه به این شکل ها نیز، برای مجموع سیلاب ها، ضریب همبستگی مدل توسعه یافته بسیار نزدیک به نرم افزار HEC-RAS بوده است و به ۱ نزدیک است که نشان دهنده همبستگی قوی هیدروگراف های محاسبه ای به دو روش مورد مطالعه و هیدروگراف های مشاهده ای هر سیلاب است.

در بررسی نتایج حاصل از پارامتر RMSE ملاحظه می شود که تفاوت معناداری بین دو روش استفاده شده در این تحقیق وجود ندارد، اما با وجود نزدیکی مقادیر این پارامتر در دو روش مورد مطالعه، مدل HEC-RAS در تخمین شکل هیدروگراف خروجی خطای کمتری دارد و در بررسی موردی هر یک از سیلاب ها هم این موضوع تصدیق می شود. علاوه بر این، همبستگی بین مقادیر اندازه گیری شده در هر روش نسبت به مقادیر مشاهده ای نیز اندازه گیری شده است. جدول ۳ این مقادیر را برای هر سیلاب نشان می دهد.

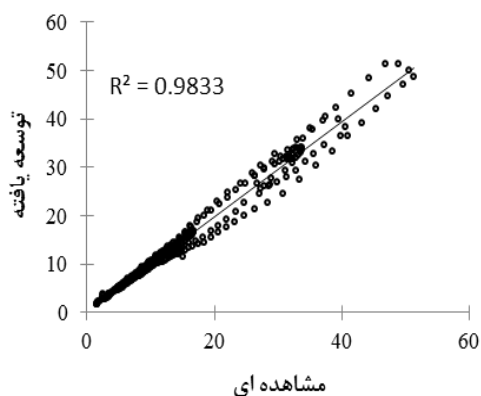
همان طور که در این جدول مشاهده می شود، نرم افزار

جدول ۲. مقادیر پارامتر RMSE برای پنج سیلاب اندازه گیری شده

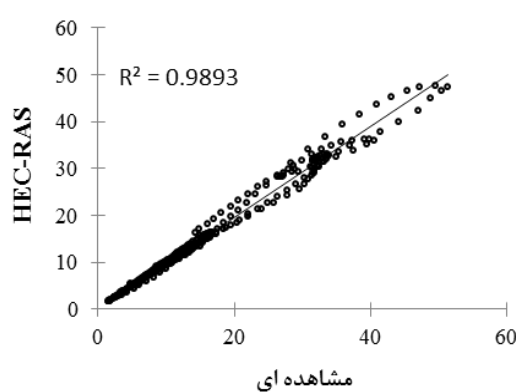
روش محاسبه	سیلاب ۱	سیلاب ۲	سیلاب ۳	سیلاب ۴	سیلاب ۵
مدل توسعه یافته	۱/۷۴	۰/۲۶	۰/۳۹	۱/۴	۰/۵۱
مدل HEC-RAS	۱/۷۱	۰/۱۵	۰/۳۴	۲	۰/۳۰۶

جدول ۳. مقادیر ضریب همبستگی برای پنج سیلاب اندازه گیری شده

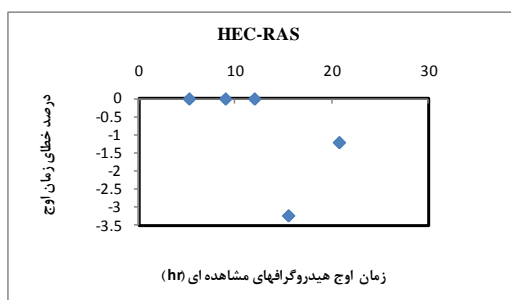
روش محاسبه	سیلاب ۱	سیلاب ۲	سیلاب ۳	سیلاب ۴	سیلاب ۵
مدل توسعه یافته	۰/۹۸۹۷	۰/۹۸۷۲	۰/۹۹۶۲	۰/۹۸۸۶	۰/۹۹۶۸
مدل HEC-RAS	۰/۹۹	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۴۹	۰/۹۸۸۲



شکل ۸. همبستگی بین مقادیر اندازه گیری شده به روش توسعه یافته و مقادیر مشاهده ای برای مجموع پنج سیلاب



شکل ۷. همبستگی بین مقادیر اندازه گیری شده به روش HEC-RAS و مقادیر مشاهده ای برای مجموع پنج سیلاب



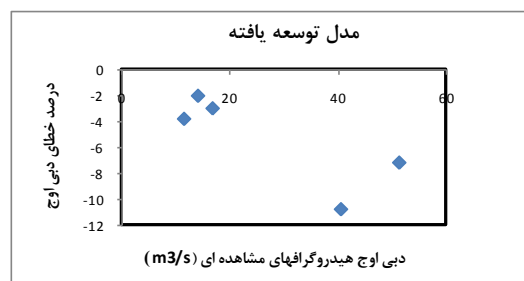
شکل ۱۲. پراکندگی حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای زمان وقوع دبی اوج در نرم افزار HEC-RAS

در بررسی نتایج مربوط به فاکتور درصد خطای برآورد دبی اوج نیز مشاهده می شود که مقدار این پارامتر در هر دو روش و برای همه سیلاب ها عدد منفی به دست آمده است. این بدان معناست که هر دو روش، همواره مقدار دبی اوج را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده اند. در مقایسه شکل های مربوط به پراکنش حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای دبی اوج، در مجموع این پراکنش برای نتایج نرم افزار HEC-RAS کمتر است؛ از این رو این روش مقدار دبی اوج را با دقت بیشتری محاسبه کرده است. در شکل های مربوط به پراکنش حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای زمان وقوع دبی اوج، ملاحظه می شود که نرم افزار HEC-RAS در سه سیلاب از پنج سیلاب رخ داده در بازه مورد مطالعه، زمان وقوع دبی اوج را به درستی به دست آورده است (با توجه به درصد خطای صفر برای سه مورد از سیلاب ها)؛ از این رو نرم افزار HEC-RAS در تخمین زمان وقوع دبی اوج دقیق تر است.

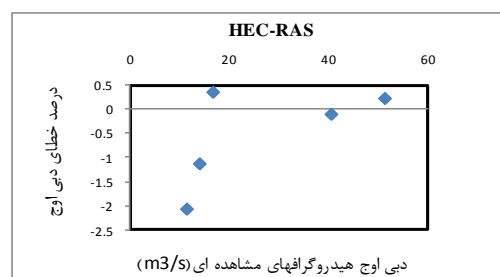
نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور برآورد ضرایب مدل غیرخطی ماسکینگام با استفاده از مشخصات فیزیکی رودخانه، روابطی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آمد. همچنین کارایی و دقت دو روش مدل توسعه یافته ماسکینگام غیرخطی با مقایسه نتایج آن با مدل HEC-RAS بررسی شد. پارامترهای مربوط به مقایسه نتایج حاصل از روندیابی پنج واقعه سیلاب علاوه بر نزدیکی مقادیر محاسبه شده به یکدیگر در هر دو روش، بیانگر دقت زیاد مدل توسعه یافته در روندیابی سیل در رودخانه مورد مطالعه است. همچنین مدل توسعه یافته توانایی زیادی در تعیین مقدار و زمان وقوع دبی اوج دارد. از آنجا که این

علاوه بر محاسبه دبی خروجی در هر لحظه، یافتن مقدار نیز در هر روش روندیابی بسیار حائز اهمیت است: زمان رسیدن به دبی اوج در هیدروگراف خروجی و مقدار این دبی اوج. برای تعیین دقت روش های مورد مطالعه در برآورد این دو مقدار، درصد خطای محاسبه هر مقدار نسبت به مقادیر مشاهده ای تعیین و نتایج آن در شکل های زیر آورده شده است. در این شکل ها، برای هر کدام از روش های روندیابی، فاکتور درصد خطای دبی اوج و زمان وقوع این دبی نسبت به هیدروگراف خروجی مشاهده ای محاسبه شده و پراکنش آن نسبت به خط صفر به دست آمده است.



شکل ۹. پراکندگی حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای دبی اوج در مدل توسعه یافته



شکل ۱۰. پراکندگی حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای دبی اوج در نرم افزار HEC-RAS



شکل ۱۱. پراکندگی حول خط صفر برای فاکتور درصد خطای زمان وقوع دبی اوج در مدل توسعه یافته

- Department of Physical Geography, University of North Carolina.
9. Ponce, V.M.; Lugo, A. (2001). "Modeling Looped Rating in Muskingum-Cunge Routing". *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)*, 6(2), 119-124.
 10. and Flood Routing". In *Proceedings of the Conference of the North Atlantic Division, U. S. Engineer Department, USA, New London, June*.
 11. Gill, M.A. (1978). "Flood Routing by Muskingum Method". *Journal of Hydrology*, 36, 353-363.
 12. Yoon, J.; Padmanabhan, G. (1993). "Parameter Estimation of Linear and Nonlinear Muskingum Models". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(5), 600-610.
 13. Wilson, Eric Montgomery (1990). *Engineering Hydrology*. Washington, Scholium Intl, pp. 348.
 14. Samani, H.M.V.; Shamsipour, G.A. (2004). "Hydrologic Flood Routing in Branched River Systems via Nonlinear Optimization". *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), 55-59.
 15. Alhumoud, J.M.; Esen, I.M. (2006). "Approximate Methods for the Estimation of Muskingum Flood Routing Parameters". *Water Resources Management*, 20(6), 979-990.
 16. Karahan, H. (2012). "Predicting Muskingum Flood Routing Parameters Using Spreadsheets". *Computational Applications in Engineering Education*, 20(2), 280-286.
 17. Tung, Y.K. (1984). "River Flood Routing by Nonlinear Muskingum Method". *Journal of Hydraulics Division*, 111(12), 1447-1460.
 18. Mohan, S. (1997). "Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models Using Genetic Algorithm". *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 123(2), 137-142.
 19. Cunge, J.A. (1969). "On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method)". *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230.
 20. Goldberg, David E. (1989). *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston, Addison Wesley, pp. 438.

مدل بسیار ساده‌تر از نرم‌افزار HEC-RAS است و نیاز به جمع‌آوری داده‌های زیادی در مورد هندسه مقاطع عرضی رودخانه ندارد، همچنین با توجه به بی‌نیازی این مدل به کالیبراسیون و جمع‌آوری داده‌های زیاد از سیلاب‌های پیشین رودخانه، استفاده از این روش در مناطق کمتر توسعه یافته به منظور روندیابی سیلاب در رودخانه‌های فاقد آمار توصیه می‌شود.

منابع

۱. قبادیان، رسول (۱۳۸۷). «مدل ریاضی روندیابی هیدرولیکی سیلاب در رودخانه قره‌سو با استفاده از حل عددی معادلات جریان غیرماندگار». هفتمین کنفرانس هیدرولیک/ایران، ایران، تهران، آبان ماه.
۲. مرادی، حمیدرضا؛ وفاخواه، مهدی؛ اکبری باویل، علی (۱۳۸۶). «مقایسه روندیابی سیل با دو روش ماسکینگام و ماسکینگام-کانژ در بخشی از رودخانه ليقوان». *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، شماره ۴۲: ۳۴۲-۳۳۵.
3. Soentoro, Edya (1991). *Comparison of Flood Routing Methods, Master of Applied Science*. Department of Civil Engineering, University of British Columbia, pp.106.
4. Patricia, C.; Raimundo, S. (2005). "Solution of Saint-Venant Equation to Study Flood in Rivers through Numerical Methods". *25th Annual American Geophysical Union Hydrology Days, USA, Colorado, March*.
5. Maidment, David R. (1992). *Hand Book of Hydrology*. New York, McGraw-Hill, pp. 1424.
6. Chow, Ven Te; Maidment, David R.; Mays, Larry W. (1998). *Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill, pp. 572.
7. Knebl, M.R.; Yang, Z.L.; Hutchison, K.; Maidment, D.R. (2005). "Regional Scale Flood Modeling Using NEXRAD Rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A Case Study for the San Antonio River Basin Summer 2002 Storm Event". *Journal of Environmental Management*, 75, 325-336.
8. Sholtes, Joel (2009). *Hydraulic Analysis of Stream Restoration on Flood Wave Propagation*. Master of Applied Science,