

روندیابی هیدروگراف سیل با استفاده از مدل عددی Mike11 و ماشین بردار

پشتیبان (مطالعه موردی: رودخانه سیمره)

سعیده ملک‌زاده^۱، علی آرمان^{۲*} و آرش آذری^۲

۱، ۲ و ۳- به ترتیب کارشناس ارشد؛ و استادیاران گروه مهندسی آب، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۷

چکیده

روندیابی سیل در مقاطع مختلف رودخانه و کاربرد آن در طراحی سیستم‌های هشدار سیل و همچنین پیش‌بینی حجم سیلاب در مقاطع پایین‌دست رودخانه با اهمیت است؛ هدف از این تحقیق، بررسی و مقایسه مدل‌های MIKE11 و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در روندیابی سیل در مقاطع پایین‌دست رودخانه است. در مطالعه حاضر ابتدا بر اساس اطلاعات فیزیکی و هیدرولیکی مسیر به روندیابی هیدرولیکی هیدروگراف سیل بین دو ایستگاه هیدرومتری هلیان و تنگ سازین در بازه‌ای به طول ۶۷ کیلومتر از رودخانه سیمره واقع در استان ایلام پرداخته شد. برای این منظور، در این محدوده ۳۶۵ مقطع برای روندیابی در مدل Mike11 در نظر گرفته شد. پس از آن از مدل SVM برای پیش‌بینی هیدروگراف سیل در خروجی بازه بر اساس اطلاعات هیدروگراف سیل ورودی به بازه استفاده شد. این دو مدل هریک با یک هیدروگراف سیل واسنجی و با دو هیدروگراف سیل صحت-سنجی شدند. هیدروگراف سیل در بالادست با دوره بازگشت‌های مختلف به این دو مدل داده شد و مدل سیل را در مقاطع خروجی بازه با دوره بازگشت‌های مختلف پیش‌بینی کرد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از دو مدل نشان داد که به‌طور کلی دقت روش Mike11 نسبت به روش ماشین بردار پشتیبان بیشتر است. اگر معیار فقط پیش‌بینی دبی اوج در محدوده دبی‌های تاریخی باشد، مدل SVM تا حدودی نتیجه بهتری نسبت به مدل Mike11 دارد. اما برای پیش‌بینی وقایع حدی با دوره بازگشت‌های بیشتر از ده سال، دقت لازم را ندارد. در نظر گرفتن شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE و NASH که برای ارزیابی نتایج، به‌جای استفاده از دبی اوج، از تمام دبی‌های هیدروگراف استفاده می‌کند، مدل Mike11 نتایج قابل قبول تری نسبت به مدل SVM به‌دست می‌دهد. در پیش‌بینی هیدروگراف وقایع حدی با دوره بازگشت‌های مختلف، مدل Mike11 عملکرد بهتری نسبت به مدل SVM دارد.

واژه‌های کلیدی

رودخانه‌های سیلابی، روش‌های عددی، روندیابی سیلاب، مقاطع رودخانه‌ای، هوش مصنوعی

مقدمه

مسیر رودخانه برای روندیابی به‌هنگام سیل، تأثیر بسزایی در پیش‌بینی زمان وقوع و دبی اوج سیل و اجرای موفقیت‌آمیز سامانه‌های هشدار سیل دارد. دستورانی (Dastoorani, 2007) عنوان نمود که پیش‌بینی وضعیت در پایین‌دست بر اساس داده‌های

پیش‌بینی سیلاب در اغلب حوضه‌ها، به خصوص پیش‌بینی به‌هنگام آن از لحاظ کاهش خسارت سیلاب با اهمیت است. استفاده از اطلاعات هیدرولوژیکی و خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی

رودخانه و در مطالعات بسیاری از محققان، به‌خصوص در زمینه روندیابی هیدرولیکی سیل، استفاده شده است. کامل (Kamel, 2008) مدل هیدرودینامیکی یک‌بعدی Mike11 را در پیش‌بینی سیلاب رودخانه فرات در عراق به‌کار برد. نتایج این تحقیق حاکی از عملکرد مطلوب این مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل بود. دلفی (Delphi, 2012) با مقایسه عملکرد روش خطوط مشخصه و مدل Mike11 در روندیابی سیلاب در ۶۱ کیلومتر از رودخانه کارون نشان داد که مدل Mike11 بر روش خطوط مشخصه برتری دارد. تیمبادیا و همکاران (Timbadiya et al., 2014) با استفاده از نرم‌افزار Mike11 و به کمک موج دینامیکی، جریان سیلاب را در رودخانه تاپی واقع در هند شبیه‌سازی کردند و نشان دادند این مدل عملکرد خوبی در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی سیل در این رودخانه دارد. رحیمی شوشتری و محمودیان شوشتری (Rahimi-Shooshtari & Mahmoodian-Shooshtari, 2011) با استفاده از مدل Mike11 سیل را در بازه‌ای از رودخانه کارون روندیابی کردند و نشان دادند که نتایج به‌دست آمده از این مدل تطابق خوبی با آمار مشاهداتی دارد. درخشان علمدارلو و همکاران (Derakhshan-Alamdarloo et al., 2016) به روندیابی سیل در بازه‌ای از رودخانه قره‌آغاج فارس با نرم‌افزار MIKE11 پرداختند. در این نرم‌افزار، از سه روش High Order Fully Dynamic, Diffusive Wave، Fully Dynamic استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد در روندیابی سیل، روش Diffusive Wave تحلیل دقیق‌تری نسبت به دو روش دیگر دارد. حسین‌زاده و همکاران (Hoseinzadeh et al., 2015) با انتخاب بازه‌ای از رودخانه بازفت به طول تقریبی

ثبت شده در بالادست کمک شایانی به تصمیم‌گیری در زمینه کاهش خسارت‌ها و احیاناً امکان طراحی و اجرای مخازن ذخیره و تنظیم جریان مازاد در مقاطع پایین‌دست خواهد کرد. سیل در رودخانه‌ها فرایندی است که برای تعیین هیدروگراف جریان در هر نقطه از رودخانه صورت می‌گیرد. در واقع هدف از روندیابی سیلاب آن است که با داشتن هیدروگراف سیل در مقطع بالادست بتوان شکل هیدروگراف و مقدار و زمان رسیدن دبی بیشینه سیل را در هر نقطه از پایین‌دست رودخانه تخمین زد. در این‌صورت، طغیان و فروکش کردن سیل در مقاطع مختلف با استفاده از روندیابی سیلاب پیش‌بینی می‌شود. یکی از روش‌های پرکاربرد در این زمینه، استفاده از روش‌های مبتنی بر روندیابی هیدرولیکی است. روش‌های هیدرولیکی بر پایه اصول تئوری جریان‌های غیردائمی در آبراهه‌های روباز و حل عددی معادلات سنت و نانت استوار است. در این روش‌ها، معادله پیوستگی و معادله حرکت یک‌بعدی که همان معادلات سنت و نانت هستند، همزمان حل می‌شوند. جواب‌های به‌دست آمده از این روش‌ها دقیق هستند و جریان به‌صورت تابعی از زمان و مکان در طول سیستم مد نظر است. از آنجا که حل تحلیلی معادلات سنت و نانت امکان پذیر نیست، با گسترش توانایی نرم‌افزارهای عددی شبیه‌ساز از قبیل MIKE11 که قادر به مدلسازی عددی جریان‌های غیردائمی هستند، تلاش گسترده‌ای برای حل کامل این دسته معادلات به‌صورت غیرخطی شده است. در این میان، یافتن مناسب‌ترین الگوی روش‌های عددی، بزرگترین چالش در مدلسازی جریان‌های غیردائمی محسوب می‌شود روحی و همکاران (Rouhi et al., 2015). مدل عددی MIKE11 مدلی است جامع در زمینه هیدرولیک

در مقایسه با عملکرد مدل SVR بهتر است. آداموفسکی و همکاران (Adamowski *et al.*, 2012) برای پیش‌بینی جریان روزانه در منطقه هیمالایای هندوستان از دو روش رگرسیون (SVR) و شبکه‌های موجک استفاده کردند و با مقایسه نتایج به‌دست آمده نشان دادند هر دو روش دقت خوبی در پیش‌بینی جریان روزانه دارند، اما دقت روش شبکه‌های موجک اندکی بیشتر است. کاکائی لفادانی و همکاران (Kakaei-Lafadani *et al.*, 2013) سه مدل ماشین بردار پشتیبان، فازی عصبی (ANFIS) و مدل هیدرولوژیکی مفهومی MIKE11/NA را در شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه اسکندری ایران به‌کار گرفتند و به این نتیجه رسیدند که مدل SVM نسبت به دو مدل دیگر برتری نسبی دارد. کاراهان و همکاران (Karahani *et al.*, 2014) با استفاده از مدل SVM برای روندیابی سیل نشان دادند که کاربرد کل اطلاعات برای آموزش ممکن است باعث ایجاد مشکل در برآورد نتایج شود. بنابراین، ۹۰-۶۰ درصد از داده‌ها به‌صورت تصادفی برای آموزش انتخاب و داده‌های باقیمانده برای اعتبارسنجی استفاده گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داد حتی اگر تنها ۶۰ درصد از داده‌ها برای آموزش استفاده شود، SVM عملکرد پیش‌بینی خود را تا حد قابل قبول حفظ می‌کند. احمدی و همکاران (Ahmadi *et al.*, 2015)، به‌منظور پیش‌بینی جریان رودخانه باراندوز چای ارومیه از دو روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه‌های بی‌زین (BNs) استفاده کردند و نشان دادند عملکرد آنها از نظر تحلیل‌های آماری نزدیک به هم است. اما در پیش‌بینی دبی متوسط و کمینه، عملکرد مدل SVM به مراتب بهتر از عملکرد مدل BNs است. عیسی‌زاده و همکاران (Isazadeh *et al.*, 2015) عملکرد مدل‌های سری زمانی AR، ARMA

۴۷ کیلومتر، سیلاب را با مدل‌های کامپیوتری HEC-RAS و Mike11 روندیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل MIKE11 نسبت به مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی جریان سیلاب در آبراهه‌های طبیعی این منطقه دقت بالاتری دارد. نکته مهم این است که با وجود دقت بالای مدل Mike11، این روش نیاز به حجم اطلاعات و داده‌های زیادی از جمله مقاطع رودخانه‌ای با فاصله‌های استاندارد، اطلاعات و منحنی‌های دانه‌بندی بستر در هر مقطع، وضعیت پوشش گیاهی مسیر، خصوصیات فیزیوگرافی مسیر و ... دارد که جمع‌آوری بسیاری از آنها هزینه‌بر است و نیاز به وقت زیاد دارد. از طرفی، ممکن است در بسیاری از مسیرهای رودخانه‌ای، این اطلاعات در اختیار نباشد. از این رو، برخی از محققان از روش‌های ساده دیگری استفاده کرده‌اند که مبتنی بر سیستم‌های هوش مصنوعی مانند ماشین بردار پشتیبان است که نیاز به داده‌ها و اطلاعات کمتری دارد. داوسون و همکاران (Dawson *et al.*, 2006) با برآورد دبی سیلاب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و خصوصیات ژئومورفولوژیک در یکی از حوزه‌های آبخیز ایرلند نشان دادند که مدل شبکه عصبی مصنوعی بر مدل‌های رگرسیون چند متغیره برتری دارد.

ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2009) با ارزیابی و مقایسه شبکه عصبی مصنوعی ANN و ماشین بردار پشتیبان SVM با مدل SWAT نشان دادند که مدل SVM توانایی تعمیم بهتری نشان می‌دهد تا ANN و پیشنهاد دادند که مدل SVM برای مدل تقریبی SWAT استفاده شود. کیسی و سیمن (Kisi & Cimen, 2011) با استفاده از مدل ترکیبی موجک و SVR برای پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه نشان دادند که عملکرد مدل ترکیبی

یافته است. شیب عمومی این منطقه از شمال به جنوب است. رودخانه سیمره به دلیل وقوع سیلاب‌های تاریخی بزرگ و اهمیت روندیابی و پیش‌بینی سیل در آن انتخاب شد؛ وجود زمین‌های کشاورزی و شهری در پایین دست آن از دلایل دیگر در انتخاب این منطقه برای موضوع این تحقیق است. رودخانه سیمره که بخشی از حوزه آبخیز کرخه محسوب می‌شود، از اتصال رودخانه‌های گاماسیاب و قره‌سو تشکیل می‌شود و در حدود ۱۱ کیلومتری پایین دست محل اتصال، رود بادآور از سمت چپ به آن می‌پیوندد. علاوه بر آن، تعدادی از چشمه‌های کارستی نیز به آن اضافه می‌شود. در این تحقیق، برحسب داده‌های هیدرومتری موجود، بخشی از بازه فوق در حد فاصل ایستگاه‌های هیدرومتری هلیلان و سازین به طول حدود ۶۷ کیلومتر به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شد که در شکل ۱ نشان داده شده است.

معادلات حاکم در مدل Mike11

این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی یک بعدی جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب در شرایط جریان ناپایدار در رودخانه‌ها، مصب‌ها و شبکه‌های آبیاری است. این برنامه از روش تفاضل محدود برای حل یک‌بعدی معادله‌های حاکم بر جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب استفاده می‌کند. مدل هیدرودینامیکی در واقع زیر بنای تمام سیستم مذکور و پایه‌ای است برای سایر زیر مدل‌های موجود در برنامه مانند پخش و انتشار، کیفیت آب و حمل رسوبات. معادلات سنت و نانت (معادلات پیوستگی و مومنوم) در حالت یک‌بعدی غیرماندگار به شرح زیرند.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{RC^2 A^2} = 0 \quad (2)$$

و ARIMA و ماشین بردار پشتیبان (SVM) را در پیش‌بینی جریان ماهانه حوضه خرخره جای در ایستگاه سننه بررسی کردند. مقایسه عملکرد مدل‌های نشان داد که مدل SVM با تابع کرنل چند جمله‌ای به‌ازای ۱۴ ورودی دقت و کارایی بیشتری در پیش‌بینی جریان ماهانه دارد تا مدل‌های سری زمانی. اصغری و رستمی (Asghari & Rostami, 2017) به‌منظور پیش‌بینی جریان رودخانه سیمینه‌رود از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند؛ نتایج تحقیق آنها نشان داد که ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی دبی ماهانه این رودخانه دقت بالایی دارد.

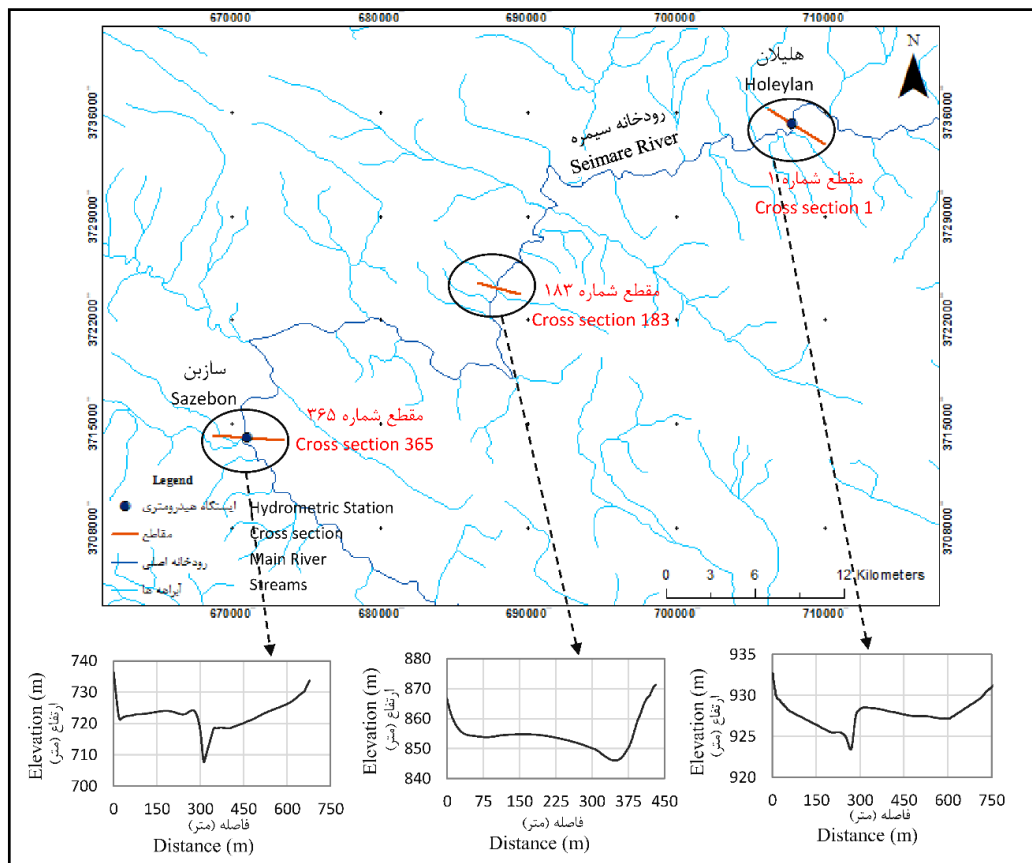
در تمامی این تحقیقات، روش هوش مصنوعی برای پیش‌بینی دبی ساعتی، روزانه و ماهیانه جریان در محل یک ایستگاه استفاده شده است و مطالعه‌ای جامع در خصوص پیش‌بینی هیدروگراف ساعتی سیل بر اساس اطلاعات هیدروگراف بالادست با این روش صورت نگرفته است. با توجه به اهمیت پیش‌بینی هیدروگراف سیل، به‌خصوص در رودخانه‌های سیلابی، و نبود اطلاعات و آمار کافی در برخی از بازه‌های رودخانه‌ای، که باعث می‌شود روش‌های هیدرولیکی در چنین رودخانه‌هایی نتایج مطلوب به‌همراه نداشته باشد، این تحقیق با هدف مقایسه نتایج حاصل از روندیابی سیل با استفاده از مدل عددی MIKE11 و روش ماشین بردار پشتیبان اجرا شده است. این مقایسه در سه بخش دبی اوج، حجم سیل و زمان پایه هیدروگراف خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق رودخانه سیمره است که حوزه آبخیز آن در استان‌های لرستان، کرمانشاه، ایلام، کردستان و همدان گسترش

a = ضریب انرژی جنبشی؛ q = دبی جریان در واحد طول تغذیه یا برداشت (مترمربع بر ثانیه)؛ R = شعاع مقاومتی یا شعاع هیدرولیکی (متر)؛ x و t = به ترتیب مؤلفه‌های مکانی و زمانی بر حسب متر و ساعت.

که در آنها،
 Q = دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)؛ A = سطح مقطع جریان (مترمربع)؛ h = تراز سطح آب نسبت به یک سطح مبنا (متر)؛ C = ضریب شزی $(\frac{m^2}{s})^{\frac{1}{2}}$



شکل ۱- محدوده مطالعاتی واقع بر رودخانه سیمره (بازه هلیلان تا سازبن) و موقعیت برخی مقاطع رودخانه ای مورد استفاده

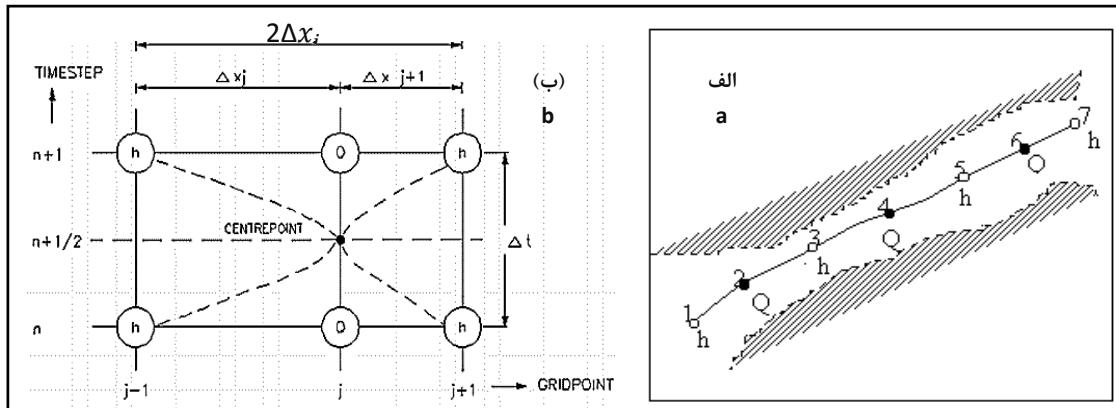
Fig. 1- Study range on the Seymareh River (Holeylan to Sazebn range) and the position of some cross sections that used

این نقاط تراز سطح آب را محاسبه می‌کند. نقاط Q را خود برنامه و در وسط دو h مجاور انتخاب می‌کند (شکل ۲- الف). با توجه به روش فوق، معادلات منقطع شده روی هر نقطه جدا نوشته می‌شود و در زمان‌های مختلف با الگوریتم شش نقطه‌ای ابوت حل می‌گردد. در شکل ۲- ب، محاسبات الگوریتم فوق برای دو معادله پیوستگی و اندازه حرکت نشان داده شده است. در حالت منقطع کردن معادله پیوستگی، گره‌های

روش حل معادلات Mike11

در مدل هیدرودینامیک، ابتدا معادلات سنت‌ونانت به روش تفاضل محدود و به فرم منقطع نوشته می‌شود و پس از آن، معادلات گسسته شده روی شبکه‌ای از نقاط در مکان و زمان‌های مختلف به صورت ضمنی حل خواهد شد. به این منظور، مطابق شکل گره‌های Q و h انتخاب می‌شوند. به طوری که نقاط h گره‌های عمق هستند و برنامه در گام‌های زمانی مختلف بر اساس گام مکانی کاربر، در

معادله اندازه حرکت حول نقطه Q منقطع می‌شود. از آنجا که در هر دو حالت جملات منقطع شده مربوط به زمان‌های n و $n+1$ است، در هر دو حالت برآیند جملات حول $n+1/2$ (مرکزیت زمانی) خواهد بود.



شکل ۲- الف) روش حل معادلات در نرم‌افزار MIKE11 و ب) شبکه شش نقطه‌ای ابوت مربوط به معادلات پیوستگی و مومنتوم
 Fig. 2- a) Method of solving equations in MIKE11 software, b) Abbott's six-point network for the continuity and momentum equations

که در آنها،
 A_{0j} = مساحت سطح آب در پلان بین دو مقطع j و $j-1$
 A_{0j+1} = مساحت سطح آب در پلان بین دو مقطع j و $j+1$ ؛ $(2\Delta X_j)$ = فاصله بین دو مقطع $j-1$ و $j+1$ ؛ Q_j^n = دبی در مقطع j و سطح زمانی n ؛ α و β و γ = توابعی بر حسب b و σ هستند و بستگی دارند به h در سطح زمانی n و Q در سطوح زمانی n و $n+1$

به این ترتیب فرم تفاضلی معادله مومنتوم نیز نوشته و این معادله با استفاده از روش شش نقطه‌ای ابوت منفصل می‌شود.

تهیه ساختار مدل

برای تهیه ساختار مدل در بازه مورد مطالعه، ابتدا مدل رقومی ارتفاعی با اندازه شبکه یک متری و نقشه TIN منطقه بر اساس نقشه های توپوگرافی مسیر رودخانه با مقیاس ۱:۵۰۰ تهیه و پس از آن،

روش مورد استفاده برای حل عددی معادلات، روش شش نقطه‌ای ابوت است. جزئیات حل معادلات سنت و نانت (شامل معادله پیوستگی و معادله مومنتوم) به شرح زیر است.
فرم تفاضلی معادلات حاکم
 به منظور تعیین فرم تفاضلی معادله پیوستگی، از فرم دیفرانسیلی آن به صورت رابطه‌های ۳ تا ۷ استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \frac{\partial h}{\partial t} = q \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n) - (Q_{j-1}^{n+1} - Q_{j-1}^n)}{2 \Delta X_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{(h_j^{n+1} - h_j^n)}{\Delta t} \quad (5)$$

$$b_s = \frac{A_{0j} + A_{0j+1}}{2 \Delta X_j} \quad (6)$$

$$\alpha_j Q_{j-1}^{n+1} + \beta_j h_j^{n+1} + \gamma_j Q_{j+1}^{n+1} = \delta_j \quad (7)$$

قادر به شبیه‌سازی درست مسئله نیست. مرزهای بیرونی جریان رودخانه، شامل مرزهای بالادست و پایین‌دست است. برای شرایط مرزی بالادست، اطلاعات هیدروگراف ساعتی ایستگاه هلیلان و برای شرایط مرزی پایین‌دست، اطلاعات هیدروگراف سیل و مقادیر دبی اشل ایستگاه سازبن واقع در آخرین مقطع رودخانه وارد شد.

با بررسی شبکه آبراهه‌ای متصل به رودخانه اصلی، دو حوضه میانی با وسعت قابل توجه مشاهده شد. با توجه به نقش زیرشاخه‌های میانی در تولید سیل که در بین دو ایستگاه هلیلان و سازبن به رودخانه می‌ریزند، هیدروگراف تولیدی این زیرشاخه‌ها به‌عنوان مرزهای داخلی در مدل وارد شد. به‌دلیل فقدان ایستگاه هیدرومتری در این دو شاخه فرعی، هیدروگراف سیل این زیرشاخه‌ها با استفاده از روش هیدروگراف شاخص و بر اساس ایستگاه معرف هلیلان شبیه‌سازی و در مدل وارد شد. برای ورود اطلاعات این دو شاخه در بدنه مدل، دو منبع نقطه‌ای^۱ روی رودخانه اصلی با فاصله ۱۹۱۹۳/۱۲ و ۶۱۳۴۴/۸۸ متر از ایستگاه هلیلان در بالادست بازه مطالعاتی تعریف شد.

ماشین بردار پشتیبان^۲

روش ماشین بردار رگرسیون که خود مشتق از روش ماشین بردار پشتیبان است، یکی از روش‌های پرکاربرد در زمین شبیه‌سازی رفتار جریان در رودخانه است. در فرآیند یادگیری در این روش سیستم ابتدا تعلیم می‌یابد و پس از آن به‌ازای مقادیر ورودی جدید آزمایش می‌شود. به شکل ریاضی مسئله یادگیری ماشین بردار رگرسیون را می‌توان به شکل یک نگاشت در فضای پیوسته در نظر گرفت که طی آن بردار η بعدی x به‌عنوان ورودی منجر به ایجاد یک بردار y به‌عنوان خروجی یا هدف

در محیط ArcGis بر اساس نقشه TIN حدود ۳۶۵ مقطع رودخانه‌ای با فواصل تقریبی ۲۰۰ متر در حد فاصل ایستگاه هلیلان تا سازبن استخراج شد. اطلاعات هندسی این مقاطع و مشخصات فیزیکی آنها بر حسب فاصله آنها (بر حسب کیلومتر) از بالادست بازه در مدل MIKE11 وارد شد. برای تخمین اولیه مقادیر ضریب زبری در هر یک از مقاطع مورد نظر، از منحنی‌های دانه‌بندی بستر رودخانه استفاده شد که شرکت آب منطقه‌ای ایلام بر اساس نمونه‌های رسوب بستر تهیه کرده بود. این ضریب‌ها در خلال واسنجی و صحت‌سنجی مدل بهینه شدند. علاوه بر رودخانه اصلی، دبی دو شاخه فرعی مهم که در مسیر رودخانه قرار داشت در مدل Mike11 وارد شد. دبی جریان این شاخه‌ها به‌صورت جریان فرعی به مدل داده شد. برای این کار، نام هر رودخانه، فاصله (بر حسب کیلومتر) از ابتدا و انتها و مشخصات رودخانه‌ای که از آن شروع می‌شود و مشخصات رودخانه‌ای که به آن می‌ریزد، وارد شد. به‌دلیل نبود ایستگاه هیدرومتری روی شاخه‌های فرعی، برای برآورد هیدروگراف سیل ناشی از این زیرشاخه‌ها، ابتدا هیدروگراف شاخص ایستگاه بالادست (هلیلان) بر اساس هیدروگراف‌های تاریخی ثبت شده آن به‌دست آمد. پس از آن با استفاده از روش حجمی (روش مساحت-بارندگی) دبی اوج هیدروگراف شاخه فرعی بر اساس دبی اوج سیل در ایستگاه هلیلان محاسبه شد. سپس بر اساس ضریب حاصل از تقسیم این دبی به دبی اوج هیدروگراف شاخص، هیدروگراف سیل مربوط به شاخه فرعی تولید گردید. این روش برای تولید هیدروگراف در مناطق فاقد آمار بر اساس یک ایستگاه معرف به‌کار می‌رود و روش هیدروگراف شاخص نام دارد. مدل MIKE11 بدون تعریف دقیق و صحیح شرایط مرزی

1- Point Source

2- Support Vector Machine

اطمینان را جستجو و داده‌ها را بر اساس آن دسته‌بندی و جدا می‌کند. در پیش‌بینی سری زمانی در ماشین بردار پشتیبان، رابطه ۱۲ باید کمینه شود.

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{m} \sum_{i=1}^m l(y_i, f(z)) \quad (12)$$

که در آن،

$l(y_i, f(z)) =$ تابع هزینه بر اساس مقدار تخطی از خطای مجاز ε است که از رابطه ۱۳ به دست می‌آید؛ $y_i =$ مقادیر مشاهداتی لایه خروجی؛ و $f(z) =$ مقادیر شبیه سازی شده لایه خروجی تعریف شده در مدل است.

$$l(y_i, f(z)) = |y - f(z)|_\varepsilon = \max\{0, |y - f(z)| - \varepsilon\} \quad (13)$$

جمله $\frac{1}{2} \|w\|^2$ در اصل با کمینه کردن وزن‌های لایه‌ها، که اعداد حقیقی هستند، سعی می‌کند مدل را تا حد امکان ساده‌سازی کند. رابطه ۱۲ می‌تواند به شکل رابطه ۱۴ بیان شود که باید با توجه به محدودیت‌های رابطه ۱۵ بهینه گردد:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*) \quad (14)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} y_i - wx_i - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ wx_i + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

که در آنها،

ξ_i و ξ_i^* = متغیرهای کمبود؛ $y_i =$ مقدار سری زمانی مشاهداتی؛ $w x_i + b =$ مقدار سری زمانی پیش‌بینی شده؛ $M =$ تعداد داده‌های مورد استفاده در مرحله آموزش؛ و $C =$ پارامتری تنظیمی است با عنوان ضریب تابع هزینه. پس از تعیین ضرایب و تابع کرنل مناسب، پیش‌بینی سری زمانی با رابطه ۱۶ صورت می‌گیرد.

می‌شود که هر دو عضو مجموعه اعداد حقیقی هستند، در حالی که در مدل SVM، بردار خروجی عضو مجموعه باینری است. ابتدا، طبق رابطه ۸ تابع Φ تعریف می‌شود.

$$\Phi: X \rightarrow H \quad x \rightarrow z = \Phi(x) \quad (8)$$

که در آن،

$X =$ مجموعه ورودی‌هاست که شامل بردارهای ورودی x_i ؛ $H =$ فضای مشخصه و شامل مجموعه بردارهای z . در فضای مشخصه، یک تابع خطی به صورت رابطه ۹ بر داده‌ها برآزش داده می‌شود. $f(z)$ در این رابطه مقدار پیش‌بینی مدل بر اساس ورودی‌های مختلف است.

$$f(z) = w \cdot z + b \quad (9)$$

اگر داده‌ها در فضای ورودی اولیه به شکل خطی جداپذیر نباشند، ماشین بردار پشتیبان فضای اولیه را به فضای مشخصه با ابعاد بالاتر تبدیل می‌کند. این تبدیل به واسطه تابع تصویرکننده (کرنل) غیرخطی k عملی می‌شود. تابع غیرخطی k به صورت رابطه ۱۰ می‌شود و حاصل ضرب داخلی توابع Φ مربوط به هر یک از ورودی‌های x_i و x_j است.

$$K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j) = z_i \cdot z_j \quad (10)$$

یکی از توابع کرنل پرکاربرد استفاده شده در این تحقیق، با عنوان تابع گوسی، به صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌شود.

$$K(x_i, x_j) = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

ماشین‌های بردار پشتیبان پس از مرحله تبدیل غیر خطی داده‌ها بر اساس تابع کرنل، در این فضای جدید یک ابر صفحه جداساز بهینه با حداکثر حاشیه

فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های مورد استفاده، حدود ۲۲۰ هیدروگراف سیل ثبت شده از سال ۱۳۴۴ تا ۱۳۹۴ به‌طور دقیق بررسی شد. بسیاری از این هیدروگراف‌ها ناقص و برای بهره‌برداری فاقد اطلاعات کافی بودند. با توجه به اهداف تحقیق، از بین آنها هیدروگراف‌هایی انتخاب شدند که دبی اوج آنها بیشتر از میانگین دبی اوج‌های ثبت شده، شکل آنها حتی‌الامکان زنگوله‌ای فاقد دو نقطه اوج بود، شاخه صعودی و شاخه نزولی آنها کامل بود و زمان پایه مناسب داشتند. سیلاب‌هایی انتخاب شدند که با در نظر گرفتن مدت زمان تاخیر رودخانه به‌طور هم‌زمان در بالادست و پایین‌دست بازه اطلاعات آنها ثبت شده باشد. همچنین برای افزایش دقت پیش‌بینی مدل، باید اطلاعات دبی اشل این هیدروگراف‌ها با زمان در بالادست و پایین‌دست ثبت شده باشد. با بررسی همه هیدروگراف‌ها مشخص شد که تنها سه سیلاب ثبت شده در بالادست و پایین‌دست وجود دارد که همه این شرایط را دارند. اطلاعات این سیلاب‌ها شامل مدت زمان سیل، زمان شروع و پایان و دبی اوج آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$y = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) K(x_i, x) + b \quad (16)$$

که در آن،

b = مقدار عرض از مبدا یا مقدار اریب مدل؛
 α_i = ضرایب لاگرانژ؛ و $\alpha_i^+ - \alpha_i^-$ = وزن تابع کرنل در هر لایه i در کل فضای مشخصه.
 برای پیش‌بینی هیدروگراف سیل در پایین‌دست بازه مطالعاتی، از مدل ماشین بردار پشتیبان استفاده و این ماشین در محیط متلب کدنویسی شد. برای این منظور، اطلاعات ثبت شده هیدروگراف دو ساعته سیل در ایستگاه‌های هیدرومتری هلیلان و تنگ سازبن به‌کار گرفته شدند. برای پیش‌بینی هیدروگراف سیل در پایین‌دست بازه مطالعاتی، مدل ماشین بردار پشتیبان در محیط MATLAB کدنویسی شد. بر پایه مدت زمان تاخیر عبور سیل بین ایستگاه هلیلان و سازبن، داده‌های دبی هیدروگراف سیل در ایستگاه هلیلان واقع در بالادست بازه با تاخیرهای ۰، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ ساعت به‌عنوان لایه‌های ورودی و مقادیر دبی هیدروگراف در محل ایستگاه سازبن به‌عنوان لایه خروجی در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مشخصات سیلاب‌های مورد استفاده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

Table 1 - Characteristics of floods used in the calibration and validation steps

مرحله step	نام ایستگاه station's name	تاریخ شروع start date	تاریخ پایان end date	مدت زمان سیل (ساعت)	دبی اوج (متر مکعب بر ثانه)
واسنجی (واقعه اول) Calibration (first event)	هلیلان Holeilan	1371/10/17	1371/10/23	168	418.5
صحت‌سنجی (واقعه دوم) Verification (second event)	سازبن Sazebon	1363/09/03	1363/09/08	144	409
صحت‌سنجی (واقعه سوم) verification (third event)	هلیلان Holeilan	1379/01/05	1379/01/10	144	325
	سازبن Sazebon	1379/01/05	1379/01/10	144	441.2

۱۷ تا ۱۹ نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_m - Y_p)^2} \quad (17)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (18)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_m - Y_p)^2}{\sum_{t=1}^n (Y_m - \bar{Y}_p)^2} \quad (19)$$

که در آنها،

Y_m = مقدار مشاهداتی؛ \bar{Y}_m = میانگین مقادیر مشاهداتی؛ Y_p = مقدار پیش‌بینی شده؛ \bar{Y}_p = میانگین مقادیر پیش‌بینی شده؛ و X_{max} و X_{min} = به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مشاهداتی. هرچه مقدار آماره نش به یک و مجذور میانگین مربعات خطا و مقدار نرمال شده آن به صفر نزدیک‌تر باشد، نتایج مدل اطمینان بیشتری به دست می‌دهد.

نتایج و بحث

ابتدا بر اساس اطلاعات هیدروگراف سیل ورودی و خروجی در بازه مورد مطالعه، مدل MIKE11 واسنجی شد. برای واسنجی مدل، از تغییر ضریب زبری بستر (n مانینگ) استفاده شد. با معلوم بودن مشخصات هیدروگراف ورودی و خروجی در بازه مورد نظر و با اجرای برنامه به‌ازای n های مختلف، هیدروگراف خروجی محاسبه شد. با اجرای مکرر مدل، n به‌گونه‌ای انتخاب شد که هیدروگراف خروجی محاسبه شده در مدل و هیدروگراف خروجی اندازه‌گیری شده تقریباً با هم برابر باشند. برای واسنجی مدل ماشین بردار پشتیبان نیز از اطلاعات هیدروگراف سیل ورودی و خروجی در بازه مورد مطالعه استفاده شد. متغیرهای مورد واسنجی در این مدل شامل پارامترهای epsilon و c و sigma بودند که پس از اجراهای

در مدل MIKE11، دو روش کلی کنترل دبی و روش کنترل تراز سطح آب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرودینامیک وجود دارد که در این تحقیق برای افزایش دقت مدل، هر دو روش به‌کار گرفته شده است، یعنی علاوه بر کنترل و مقایسه دبی شبیه‌سازی شده با هیدروگراف مشاهداتی، تراز شبیه‌سازی شده با مدل نیز با مقادیر دبی اشل ثبت شده آن سیل در زمان‌های مختلف مقایسه و تدقیق شد. پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی شامل مقادیر ضریب زبری در کف و سواحل چپ و راست در پنج زیربازه در نظر گرفته شده است. این زیربازه‌ها بر اساس خصوصیات فیزیوگرافی مسیر مانند شیب و پوشش گیاهی انتخاب شدند. ابتدا مقادیر اولیه ضریب زبری در هر یک از مقاطع نقشه‌برداری شده با استفاده از منحنی دانه‌بندی موجود در مقاطع و همچنین اطلاعات پوشش گیاهی تخمین زده شد. پس از آن، با واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر بهینه این پارامترها به دست آمد. در فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی باید ضریب زبری در کف و دیواره‌ها در هر یک از پنج بازه به‌گونه‌ای انتخاب شود که هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی در محل ایستگاه سازین تقریباً با هم برابر باشند. مقادیر تراز و عمق آب شبیه‌سازی شده در این محل و تراز و عمق آب ثبت شده نیز بسیار به هم نزدیک باشند. در تمامی اجراها، برای کنترل پایداری مدل و افزایش دقت آن در حالت غیرماندگار، عدد فرود^۱ و عدد کورانت^۲ در تمامی مقاطع کنترل و بررسی شد. برای حفظ پایداری مدل در شرایط غیرماندگار، عدد کورانت نباید از محدوده ۱۰ تا ۱۵ تجاوز کند.

برای ارزیابی هر یک از مدل‌های مورد استفاده، از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار نرمال شده آن (NRMSE) و پارامتر نش (NASH) استفاده شد که در رابطه‌های

1- Froude Number

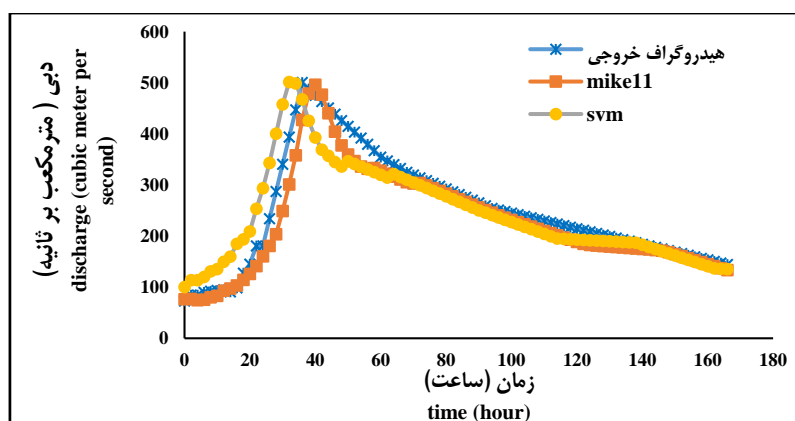
2- Courant Number

مکرر مدل و آزمون مقادیر مختلف، مقدار بهینه این پارامترها به ترتیب برابر با ۰/۰۰۸۵ و ۱۰۰۰ و ۶۰۰ به دست آمد. مقادیر بهینه n در دو زیر بازه مطالعاتی مستخرج از بازه اصلی پس از تایید مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۲ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از واسنجی دو مدل Mike11 و SVM برای سیلاب ۱۳۷۱/۱۰/۱۷ در محل ایستگاه سازبن در شکل ۳ و نتایج مقایسه پارامترهای آماری در این دو مدل برای سیلاب ۱۳۷۱/۱۰/۱۷ در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر بهینه ضریب زبری در زیر بازه‌های مختلف رودخانه پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل Mike11
Table 2- Optimum values of coefficient of roughness under different river intervals after calibration and validation of Mike11 model

ضریب زبری کناره چپ n (Left Bank) left bank roughness	ضریب زبری بستر اصلی n (Main chanal) main channel roughness	ضریب زبری کناره راست n (Right Bank) right bank roughness	فاصله از ایستگاه هلیلان (m) distance from Holeilan station (m)
0.048	0.037	0.048	781-0.66
0.05	0.039	0.05	781.14721-66.49
0.046	0.034	0.046	14721.30333-49.552
0.04	0.03	0.04	30333.62132-552.748
0.042	0.025	0.042	62132.71593-748.802



شکل ۳- هیدروگراف خروجی مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل‌های Mike11 و SVM برای مرحله واسنجی (تاریخ ۱۳۷۱/۱۰/۱۷)
Fig. 3- Observational and Computational Output Hydrograph by Mike11 and SVM Models for Calibration (date 1993/01/06)

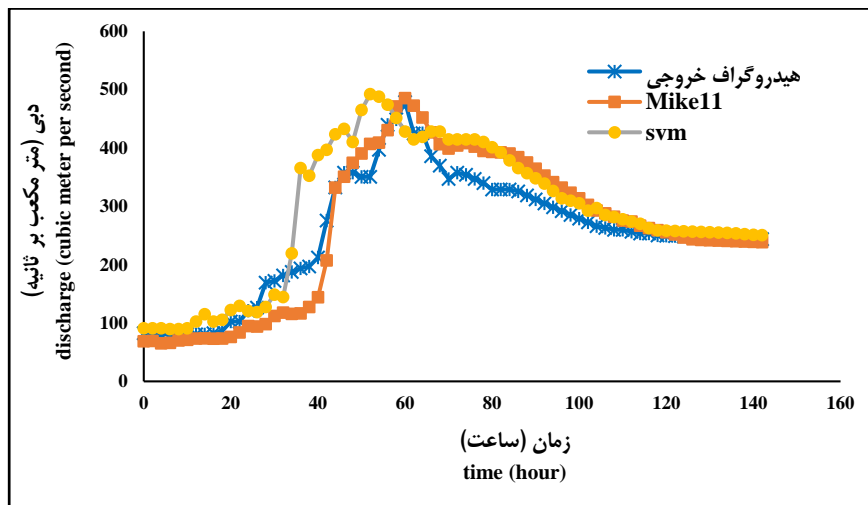
جدول ۳- مقایسه نتایج مدل‌های Mike11 و SVM برای هیدروگراف واسنجی (تاریخ ۱۳۷۱/۱۰/۱۷)

Table 3. Comparison of the results of Mike11 and SVM models for calibrated hydrographs (date 1993/01/06)

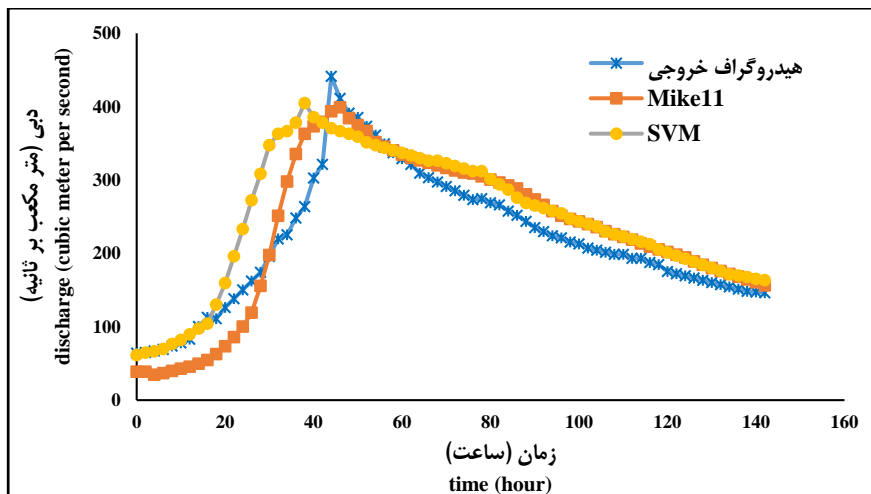
تفاوت خروجی با SVM SVM output difference with observational hydrograph	تفاوت خروجی با Mike11 Mike11 output difference with observational hydrograph	خروجی SVM Output of SVM	خروجی Mike11 Output of Mike 11	هیدروگراف مشاهداتی observational hydrograph	پارامتر parameter	نام ایستگاه station's name
1.03	4.38	501.43	496.02	500.4	دبی اوج peak discharge (m ³ /s)	
2.8	12.11	147.47	138.17	150.27	حجم سیلاب volume of flood (MCM)	تنگ سازبن Tange Sazebon
-	-	45.99	29.55	-	RMSE	
-	-	0.11	0.069	-	NRMSE	
-	-	0.82	0.92	-	NASH	

شکل‌های ۴ و ۵، اختلاف مدت زمان رسیدن به اوج در دو سیلاب منتخب در مرحله صحت‌سنجی در مدل Mike11 به ترتیب برابر با صفر و ۲ ساعت است که این مقدار به ترتیب برابر با صفر و ۱/۳۸ درصد از مدت زمان کل هیدروگراف و صفر و ۴/۵ درصد از مدت زمان اوج هیدروگراف مشاهداتی است.

نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل برای سیلاب‌های تاریخ ۱۳۶۳/۰۹/۰۳ و ۱۳۷۹/۰۱/۰۵ در محل ایستگاه سازبن در شکل‌های ۴ و ۵ و مقایسه آماره‌های آزمون نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل‌های Mike11 و SVM برای این دو سیلاب نیز در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. بر اساس



شکل ۴- هیدروگراف خروجی مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل‌های Mike11 و SVM برای مرحله صحت‌سنجی (تاریخ ۱۳۶۳/۰۹/۰۳)
 Fig. 4- Observational and computational output hydrographs by Mike11 and svm models for validation (date 1984/11/23)



شکل ۵- هیدروگراف خروجی مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل‌های Mike11 و SVM برای مرحله صحت‌سنجی (تاریخ ۱۳۷۹/۰۱/۰۵)
 Fig. 5- Observational and computational output hydrographs by Mike11 and SVM models for validation (date 2000/03/24)

اختلاف مدت زمان رسیدن به اوج در این دو سیلاب در مدل SVM به ترتیب برابر با ۸ و ۶ ساعت است که این مقدار به ترتیب برابر با ۵/۵ و ۴/۱۶ درصد از مدت زمان کل هیدروگراف و ۱۳/۳ و ۱۳/۶ درصد از مدت زمان اوج هیدروگراف مشاهداتی است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل Mike11 در پیش‌بینی مدت زمان اوج هیدروگراف موفق‌تر عمل کرده است تا مدل SVM.

جدول ۴- مقایسه نتایج مدل‌های Mike11 و SVM برای هیدروگراف صحت‌سنجی (تاریخ ۱۳۶۳/۰۹/۰۳)
Table 4- Comparison of the results of Mike11 and SVM models for hydrograph validation (date 1984/11/23)

نام ایستگاه station's name	پارامتر parameter	هیدروگراف مشاهداتی observational hydrograph	خروجی Mike11 Output of Mike 11	خروجی SVM Output of SVM	تفاوت خروجی Mike11 با هیدروگراف مشاهداتی Mike11 output difference with observational hydrograph	تفاوت خروجی SVM با هیدروگراف مشاهداتی SVM output difference with observational hydrograph
	دبی اوج discharge peak (m ³ /s)	478.8	485.62	492.37	6.82	13.57
تنگ سازین Tange Sazebon	حجم سیلاب flood volume (MCM)	132.67	136.14	149.98	3.47	17.3
	RMSE	-	37.59	55.33	-	-
	NRMSE	-	0.094	0.14	-	-
	NASH	-	0.87	0.71	-	-

جدول ۵- مقایسه نتایج مدل‌های Mike11 و SVM برای هیدروگراف صحت‌سنجی (تاریخ ۱۳۷۹/۰۱/۰۵)
Table 5- Comparison of the results of Mike11 and SVM models for hydrograph validation (date 2000/03/24)

نام ایستگاه station's name	پارامتر parameter	هیدروگراف مشاهداتی observational hydrograph	خروجی Mike11 Output of Mike 11	خروجی SVM Output of SVM	تفاوت خروجی Mike11 با هیدروگراف مشاهداتی Mike11 output difference with observational hydrograph	تفاوت خروجی SVM با هیدروگراف مشاهداتی SVM output difference with observational hydrograph
	دبی اوج discharge peak (m ³ /s)	441.2	399.17	404.77	42.03	36.43
تنگ سازین Tange Sazebon	حجم سیلاب flood volume (MCM)	112.85	118.57	128.43	5.72	15.58
	RMSE	-	35.36	51.59	-	-
	NRMSE	-	0.094	0.14	-	-
	NASH	-	0.84	0.67	-	-

با توجه به جدول ۴، در هیدروگراف تاریخ ۱۳۶۳/۰۹/۰۳ تفاوت دبی اوج خروجی مدل Mike11 با هیدروگراف خروجی مشاهداتی برابر ۶/۸۲ مترمکعب بر ثانیه (حدود ۱/۴ درصد) و این مقدار برای مدل ماشین بردار پشتیبان برابر با ۱۳/۵۷ مترمکعب بر ثانیه (حدود ۲/۸ درصد) به‌دست آمده است که نشان می‌دهد مدل Mike11 پیش‌بینی بهتری داشته است. از مقایسه نتایج

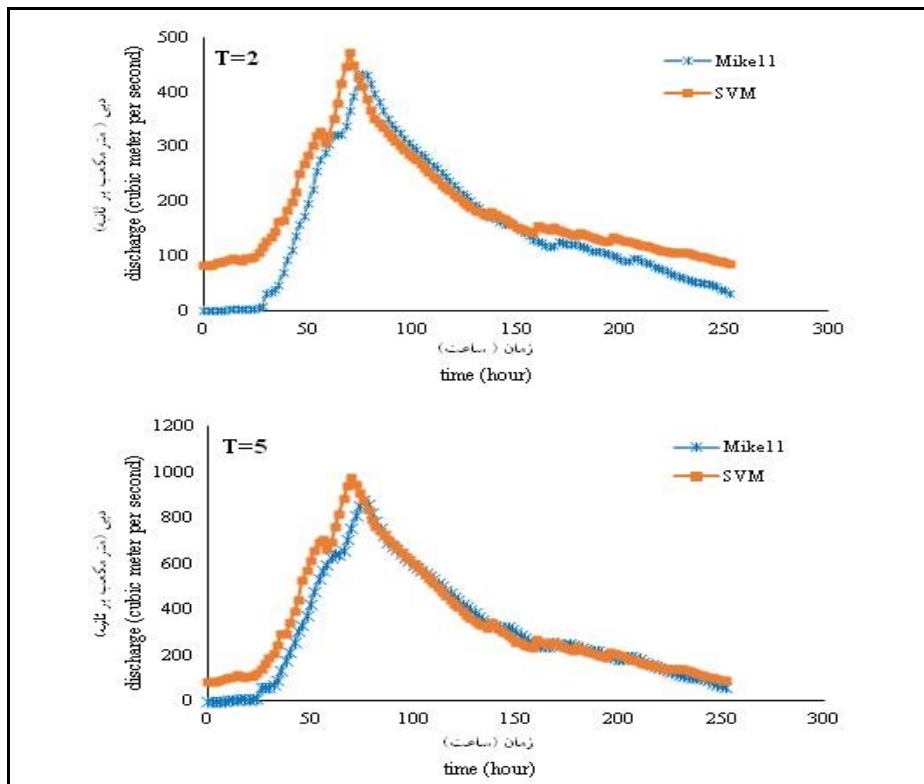
حدود ۰/۰۰۸۵ و ۱۰۰۰ و ۶۰۰ تخمین زده شد. اما روندیابی هیدروگراف با دوره بازگشت‌های مختلف در مدل SVM با این مقادیر نتایج رضایت بخشی ارائه نداد و قادر به پیش‌بینی درست هیدروگراف در پایین‌دست نبود. به همین دلیل با تغییر مقدار epsilon به روش سعی و خطا، مدل بار دیگر واسنجی و صحت‌سنجی شد و در نتیجه پارامترهای بهینه برای هیدروگراف با دوره بازگشت مختلف یعنی epsilon و c و sigma، به ترتیب برابر با ۰/۰۸۵ و ۱۰۰۰ و ۶۰۰ به دست آمد که با این مقادیر بهینه، مدل SVM چه در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی و چه در مرحله پیش‌بینی هیدروگراف با دوره بازگشت‌های کمتر از ۲۵ سال نتایج قابل قبولی ارائه داد.

نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد داده‌ها در مرحله آموزش در محدوده مقدار دبی با دوره بازگشت ۲۵ سال نبودند و از این رو نمی‌توان از SVM برای پیش‌بینی هیدروگراف با دوره بازگشت‌های ۲۵ سال و بیشتر از آن برای رودخانه سیمره استفاده کرد. اما مدل Mike11 توانست هیدروگراف سیل با دوره بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال را به خوبی پیش‌بینی کند. هیدروگراف‌های محاسبه شده با دوره بازگشت‌های ۲ و ۵ سال در شکل ۶ و هیدروگراف‌های محاسبه شده با دوره بازگشت‌های ۱۰ و ۲۵ سال در شکل ۷ با استفاده از مدل Mike11 و SVM نشان داده شده است.

شاخص‌های آماری حاصل از دو نرم‌افزار نیز مشاهده می‌شود که مدل Mike11 توانایی بالایی در پیش‌بینی شاخص‌های آماری در این هیدروگراف دارد. با توجه به جدول ۵، در سیلاب تاریخ ۱۳۷۹/۰۱/۰۵ تفاوت دبی اوج خروجی مدل Mike11 با هیدروگراف خروجی مشاهداتی برابر ۴۲/۰۳ مترمکعب بر ثانیه (حدود ۹/۵ درصد) و این مقدار برای مدل ماشین بردار پشتیبان برابر با ۳۶/۴۳ مترمکعب بر ثانیه (حدود ۸/۲ درصد) به دست آمد که نشان می‌دهد مدل SVM (مدل ماشین بردار پشتیبان) پیش‌بینی بهتری داشته است. همچنین مشاهده می‌گردد مدل Mike11 توانایی بالایی در پیش‌بینی شاخص‌های آماری دارد. به طور کلی نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که مدل SVM، با در نظر گرفتن تمامی معیارها، توانسته است نتایج رضایت‌بخشی در روندیابی سیل بر اساس اطلاعات بالادست داشته باشد. کاراهان و همکاران (Karahan *et al.*, 2014) نیز عملکرد این مدل را در روندیابی سیل در چند رودخانه در ترکیه مثبت ارزیابی کرده‌اند. بدین ترتیب این مدل می‌تواند، در صورت کمبود اطلاعات و فقدان داده‌های مقاطع رودخانه‌ای، به جای مدل پیچیده‌ای مانند Mike11 به کار گرفته شود.

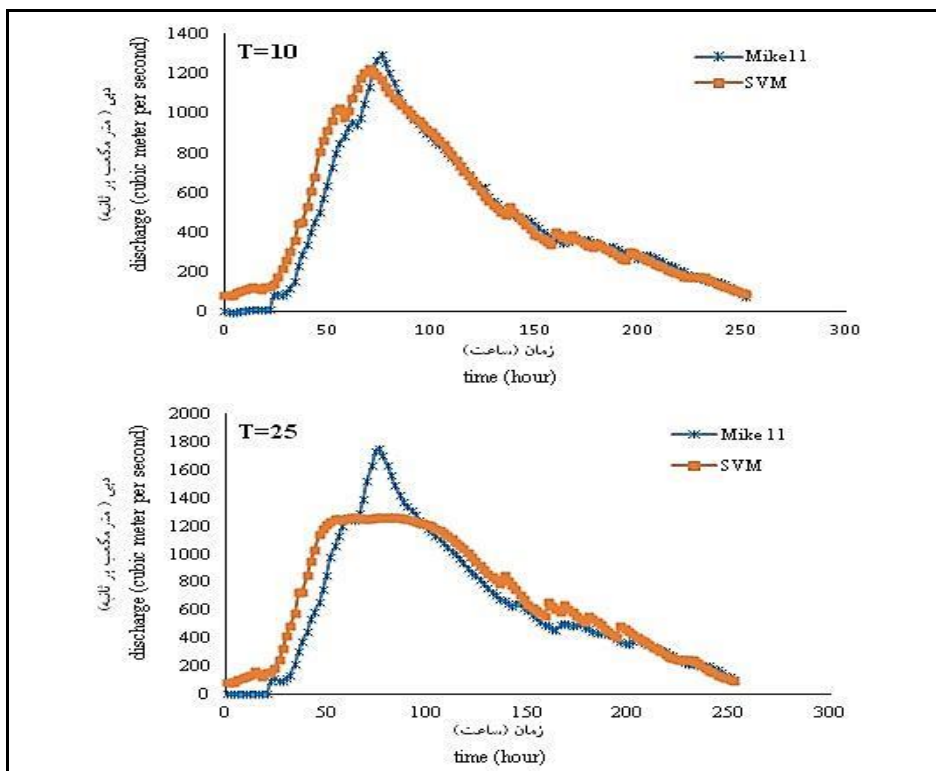
پیش‌بینی هیدروگراف با دوره بازگشت‌های مختلف

در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی اولیه مدل SVM، مقادیر epsilon و c و sigma به ترتیب در



شکل ۶- هیدروگراف سیل محاسباتی با مدل Mike11 و SVM با دوره بازگشت های ۲ و ۵ سال

Fig. 6- Computational flood hydrograph with Mike11 and SVM models with 2 and 5 year return periods



شکل ۷- هیدروگراف سیل محاسباتی با مدل Mike11 و SVM با دوره بازگشت های ۱۰ و ۲۵ سال

Fig. 7- Computational flood hydrograph with Mike11 and SVM models with 10 and 25 year return periods

نتیجه‌گیری

(تاریخ ۱۳۶۳/۰۹/۰۳) برابر با ۵۱/۵۹ و ۰/۱۴ و ۰/۶۷ به‌دست آمد. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، مشخص شد که روش ماشین بردار پشتیبان به‌طور نسبی دبی اوج را بهتر از روش MIKE11 پیش‌بینی می‌کند. اما با در نظر گرفتن شاخص‌های آماری مانند RMSE که برای محاسبه از همه دبی‌های هیدروگراف استفاده می‌کند، نتایج حاصل از پیش‌بینی هیدروگراف سیل در مدل MIKE11، نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان، دارای برتری نسبی است. این مدل، حجم سیل را نیز بهتر شبیه‌سازی می‌کند. با این حال برای مقایسه الگوی رفتاری هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده سیل با دوره برگشت‌های مختلف به‌خصوص سیلاب‌های با دبی اوج بیش از دبی اوج هیدروگراف‌های مورد استفاده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، مقادیر هیدروگراف سیل با دوره برگشت‌های مختلف به‌عنوان ورودی بازه مطالعاتی در محل ایستگاه هلیلان به هریک از مدل‌ها وارد شد و هیدروگراف سیل در خروجی بازه و در محل ایستگاه سازین با دوره برگشت متناظر پیش‌بینی گردید.

به‌دلیل اینکه دسته‌بندی داده‌ها در مرحله آموزش با دبی‌های کمتر از دبی هیدروگراف ۲۵ ساله تنظیم شده‌اند، مدل SVM توانست فقط هیدروگراف با دوره بازگشت ۲ و ۵ و ۱۰ سال را به‌خوبی پیش‌بینی کند. اما مدل MIKE11 پس از واسنجی و صحت‌سنجی توانست به‌خوبی هیدروگراف با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال را پیش‌بینی کند. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد اگر معیار فقط پیش‌بینی دبی اوج در محدوده دبی‌های تاریخی باشد، مدل SVM تا حدودی نتیجه بهتری نسبت به مدل MIKE11 دارد.

در مطالعه حاضر روندیابی هیدروگراف سیل در رودخانه سیمره و در حد فاصل بین دو ایستگاه هیدرومتری هلیلان و سازین بررسی شد. برای این منظور، از مدل عددی Mike11 و مدل ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. پس از آزمون ضرایب و پارامترهای مختلف، نتایج پیش‌بینی هریک از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و مدل Mike11 با هیدروگراف‌های ثبت شده تاریخی مقایسه و این مدل‌ها واسنجی و صحت‌سنجی شدند. هیدروگراف سیل با دوره بازگشت‌های مختلف توسط هریک از این دو مدل به‌دست آمد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد اختلاف اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی نسبت به مقدار محاسباتی توسط مدل‌های Mike11 و ماشین بردار پشتیبان در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی کمتر از ۱۰ درصد دبی اوج مشاهداتی این هیدروگراف‌هاست. در این مدل‌ها، اختلاف حجم سیلاب کمتر از ۲۰ درصد حجم سیلاب مشاهداتی این هیدروگراف‌هاست. مقدار RMSE و NRMSE و همچنین شاخص Nash در مدل Mike11 در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۲۹/۵۵، ۰/۰۶۹ و ۰/۹۲ و مقدار این شاخص‌ها در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ ۱۳۷۱/۱۰/۱۷) برابر با ۳۷/۵۹ و ۰/۰۹۴ و ۰/۸۷ و همچنین مقدار این شاخص‌های آماری در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ ۱۳۶۳/۰۹/۰۳) برابر با ۳۵/۳۶، ۰/۰۹۴ و ۰/۸۴ به‌دست آمد که کارایی مدل را تایید می‌کند. مقدار RMSE و NRMSE و شاخص Nash در مدل ماشین بردار پشتیبان در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۴۵/۹۹، ۰/۱۱ و ۰/۸۲ و مقدار این شاخص‌ها در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ ۱۳۷۱/۱۰/۱۷) برابر با ۵۵/۳۳، ۰/۱۴ و ۰/۷۱، مقدار این شاخص‌های آماری در مرحله صحت‌سنجی

اما این مدل برای پیش‌بینی وقایع حدی با دوره برگشت‌های بیشتر از ۱۰ سال، دقت لازم را ندارد. با در نظر گرفتن شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE و NASH که برای ارزیابی نتایج به‌جای استفاده از دبی اوج از تمام دبی‌های هیدروگراف استفاده می‌کند، مدل Mike11 نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مدل SVM دارد. مدل Mike11 در پیش‌بینی هیدروگراف وقایع حدی با دوره برگشت‌های مختلف عملکرد بهتری نسبت به مدل SVM دارد.

مراجع

- Adamowski, J., & Prasher, Sh. O. (2012). Comparison of machine learning methods for run off forecasting in mountainous watersheds with limited data. *Journal of Water and Land Developmen*, 17(VII-XII): pp. 89-97
- Ahmadi, F., Radmanesh, F., & Mirabbasi N. R. (2015). Comparison between genetic programming and support vector machine methods for daily river flow forecasting (Case study: Barandoozchay river). *Journal of Water and Soil*, 28(6): pp. 1162-1171. (in Persian)
- Asghari, J., & Rostami, R. (2017). *Monthly forecast of the Simine Rood river using a Support Vector Machine*. 4th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management. Jan. 26-27, Tehran, Iran. (in Persian)
- Dastoorani, M. T. (2007). Investigating the application of computational intelligence models in simulation and prediction during flood flows. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 11(40): pp. 27-36.(in Persian)
- Dawson, C. W., Abrahart, R. J., Shamseldin, A. Y., & Wilby, R. L. (2006). Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 319, pp. 391-409.
- Delphi, M. (2012). Application of characteristics method for flood routing (Case study: Karun river). *Journal of Geology and Mining Research*, 4(1): pp. 8-12.
- Derakhshan-Alamdarloo, P., Molazadeh, S. A., Azhdari, M. M., & Azizian, A. (2016). *Comparison of the results of MIKE11 and HEC-RAS models in non-steady flow simulation (case study: Gareh Aghaj river)*. 15th National Hydraulic Conference of Iran, Dec. 14. Qazvin, Iran. (in Persian)
- Hoseinazdeh, M., Emamgholizadeh, S., Ganji, Z., & Samadi, H. (2015). *Comparison of flood routing by MIKE11 and HEC-RAS models in Bazoft river*. 15th National Hydraulic Conference of Iran, Dec. 14. Qazvin, Iran. (in Persian)
- Isazadeh, M., Ahmadzadeh, H., Ghorbani, M.A. (2015). Assessment of kernel functions performance in river flow estimation using support vector machine. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3): pp. 69-89. (in Persian)
- Kakaei-Lafadani, E., Moghaddam-Nia., A., Ahmadi, A., Jajarmizadeh, M., & Ghafari, M. (2013). Stream flow simulation using SVM, ANFIS and NAM models (A case study). *Journal of Applied Science*, 2(4): pp. 86-93.
- Kamel, A. H. (2008). Application of a hydrodynamic Mike11 model for the Euphrates river in Iraq. *Journal of Slovak of Civil Engineering*. 2, pp. 1-7.

- Karahan, H., Iplikci, S., Yaser, M., & Gurarslan, G. (2014). River flow estimation from upstream flow records using Support Vector Machines. *Journal of Applied Mathematics*, Article ID 714213.
- Kisi, O., & Cimen, M . (2011). A wavelet-support vector machine conjunction model for monthly streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*, 399(1): pp. 132-140.
- Rahimi-Shooshtari, M., & Mahmoodian-Shooshtari, M. (2011). *Investigation of flood routing using Mike 11 software (case study: Ahwaz-Farsiat river Karun river)*. 6th National Congress on Civil Engineering. Apr. 26. Semnan, Iran. (in Persian)
- Rouhi, M., Heidari, M., Ebrahim Sani., M., & Abedini, A. A. (2015). *Evaluation of computer models MIKE11 and HEC-RAS in numerical simulation of flood flow*. Water Engineering Conference & Exhibition. Oct. 17. Tehran, Iran. (in Persian)
- Timbadiya, P. V., Patel, P. L., & Porey, P. D. (2014). One-dimensional hydrodynamic modeling of flooding and stage hydrographs in the lower Tapi River in India. *Current Science*, 106(5): pp. 708-716.
- Zhang, X., Srinivasan, R., & Van Liew, M. (2009). Approximating SWAT model using artificial neural network and support vector machine. *Journal of American Water Resources Association*, 45(2): pp. 460-474.

Flood Hydrograph Routing using Mike11 Numerical Model and Artificial Intelligence System (Case Study: Seymareh River)

S. Malekzadeh, A. Arman* and A. Azari

* Corresponding Author: Assistant Professor, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah. Email: a.arman@razi.ac.ir

Received: 6 February 2019, Accepted: 28 May 2019

Extended Abstract

Introduction

Using hydrological information and physical and hydraulic characteristics of the river route for flood routing in different cross sections of the river, impact of forecasting on the occurrence and flow peak flow and successful implementation of flood alarm systems and forecasting flood volume downstream of the river. Given the importance of predicting flood hydrographs, especially in floodplain rivers, and the lack of sufficient information and statistics at some river basins, this may result in hydraulic methods in such rivers. This study aimed to compare the results of flood routing using the numerical model MIKE11 and the support vector machine method. This comparison is based on three parts: peak discharge, flood volume and baseline hydrograph time.

Methodology

In this study, based on physical and hydraulic information of the route, hydraulic routing of flood hydrographs between two hydrometric stations of Holeilan and Sazebon was conducted in a distance of 67 km from Semareh river in Ilam province. For this purpose, 365 cross-sections with an approximate distance of 200 m were considered for flow routing. The geometrical data of these sections and their physical characteristics in terms of their distance (in kilometers) were entered in the MIKE11 upstream interval. River bed gradation curves were used to estimate the roughness coefficient in each section. These coefficients were optimized during model calibration and validation. In addition to the main river, discharge included two major sub-branches located along the river. The flow rate of these branches was defined as sub-flow as internal boundaries in the model. For upstream boundary conditions, hourly hydrograph data of Holeilan station and for downstream boundary conditions, flood hydrograph data and discharge values of rating-curve station at the last river crossing were entered. The SVM model was then used to predict the flood hydrograph at the output of the interval based on the input flood hydrograph data. Based on the delay time of flood passage between Holeilan and Sazebon stations, flood hydrograph data at Holeilan station located upstream of 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 and 14 hours delays as input layers and hydrograph discharge values at the location of the Sazebon station was considered as the output layer and the model was calibrated and validated using recorded hydrographs. Finally, the results of these two models were compared. Flood hydrographs were also

upstream with different return periods and flood hydrographs were predicted at interval outflows with different return periods.

Results and Discussion

The results showed that considering the results of both calibration and validation steps, it was found that the support vector machine method predicts the peak discharge relatively better than the MIKE11 method, but with considering statistical indices such as RMSE which calculate all hydrograph discharges, the results of the flood hydrograph prediction in MIKE11 model have relative advantage over the support vector machine model. This model also simulates the volume of floods better. However, in order to compare the behavioral pattern of predicted flood hydrographs with different return periods, especially floods with peak discharge more than peak discharge hydrographs used in the calibration and validation phase, flood hydrograph values with period various returns as inputs to the study area were entered into each model at Holeilan station and flood hydrographs were predicted at the output of the interval and at the corresponding station location with the corresponding return period. Because the classification of data in the training phase is adjusted to discharges less than 25 years, the SVM model was able to predict only hydrographs with 2, 5 and 10 year return periods. But after the calibration and validation, the Mike11 model was able to predict the hydrograph well with the return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years.

Conclusions

The results show that the SVM model is somewhat better than the Mike11 model if the only criterion is to predict peak flow within the range of historical discharges. But this model is not accurate for predicting partial events with a return period of more than ten years. Given the statistical indices of RMSE, NRMSE, and NASH, which use all hydrograph discharges to evaluate results instead of using peak discharge, the Mike11 model has better results than the SVM model. The Mike11 model performs better than the SVM model in predicting partial event hydrographs with different return periods.

Keywords

Artificial Intelligence, Flood Rivers, Flood Routing, Numerical Methods, River Cross Sections.

Acknowledgment

The authors of the article thank to the reviewers for reviewing and improving the structure of the article. We also thank the National Surveying Agency for providing the maps of the Seymareh river.