



Evaluating the efficiency of HEC-GeoHMS model in estimating and forecasting floods in watersheds - A case study of the Tajen river watershed

S. Bagherzadeh^۱, M. Nobakht^{۲*}

Abstract

Today, in order to plan and manage water resources in catchment basins, it is very important to know the parameters that play a role in modeling the process of converting precipitation into runoff. In this research, the effectiveness of HEC-GeoHMS model in estimating and simulating floods in the Tajen River catchment was investigated. In this regard, first, the maps and information needed for the aforementioned model were prepared and entered into the HEC-HMS model for flood simulation. The results show that there is a big difference between the observed and calculated values. On the other hand, in order to reduce the error, the CN parameter was selected as the most effective parameter. On the other hand, sensitivity analysis was done on the parameters of the model. Also, by changing the values of the CN parameter in the calibration, the difference between the calculated and observed values was reduced. The simulation results showed that the model with a relatively good approximation can be used in the rainfall-runoff simulation in the Tajen River catchment.

Keywords: Rainfall-runoff simulation, HEC-GeoHMS model, HEC-HMS model, curve number (CN), sensitivity analysis.

Received: March ۱۶, ۲۰۲۴

Accepted: April ۱۸, ۲۰۲۴

ارزیابی کارایی مدل HEC-GeoHMS در برآورد و پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های آبریز - مطالعه موردی حوضه آبریز رودخانه تاجن

سهیلا باقرزاده^۱، مسعود نوبخت^{۲*}

چکیده

امروزه برنامه‌ریزی و مدیریت جامع آب در حوضه‌های آبریز، شناخت پارامترهایی که در مدل‌سازی فرایند تبدیل بارش به رواناب نقش دارند، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در این پژوهش کارایی مدل HEC-GeoHMS در برآورد و شبیه‌سازی سیلاب حوضه آبریز رودخانه تاجن مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا ابتدا نقشه‌ها و اطلاعات مورد نیاز مدل مذکور آماده و به جهت شبیه‌سازی سیلاب، وارد مدل HEC-HMS شد. نتایج بیانگر این است که میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی اختلاف زیادی وجود دارد. از سویی به منظور کاهش خطا، پارامتر CN به‌عنوان پارامتر دارای تأثیر بیشتر انتخاب شد. از سوی دیگر بر روی پارامترهایی از مدل، تحلیل حساسیت انجام شد. همچنین با تغییر مقادیر پارامتر CN در کالیبراسیون، اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهداتی کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد در شبیه‌سازی بارش - رواناب در حوضه آبریز رودخانه تاجن می‌توان مدل را با تقریب نسبتاً خوبی را به کار برد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی بارش - رواناب، مدل HEC-GeoHMS، مدل HEC-HMS، شماره منحنی (CN)، تحلیل حساسیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱/۳۰

۱. MSc., Civil Engineering Department, Ale-Taha Institute of Higher Education, Tehran, Iran.

۲. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Ale-Taha Institute of Higher Education, Tehran, Iran.

Email: masoudnobakht@aletaha.ac.ir

* Corresponding Author

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی ال‌طه، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی ال‌طه، تهران، ایران.

ایمیل: masoudnobakht@aletaha.ac.ir

© - نویسنده مسئول



مقدمه

سیل‌خیزی را مورد بررسی قرار داد. او با استفاده از مقایسه مقادیر تغییرات در دبی، اوج خروجی حوضه به ازای تغییرات شیب متوسط زیرحوضه، شماره منحنی مساحت زیرحوضه‌ها، شیب آبراهه و زمان تأخیر هر یک از زیرحوضه‌ها را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد مؤثرترین عامل بر روی دبی اوج خروجی، عامل شماره منحنی است (جوکار، ۱۳۸۱). خداپرست در سال ۱۳۸۸ حوضه سد طرق واقع در شهرستان مشهد را با استفاده از HEC-HMS و داده‌های نرم‌افزار GIS شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان‌دهنده این است که بیشترین حساسیت در تابع هدف را شماره منحنی ایجاد می‌کند. همچنین نتایج نشان داد مقدار ضریب تلفات اولیه برای حوضه مذکور ۰/۲۲ است (خداپرست، ۱۳۸۸). عباسی و همکاران با استفاده از مدل HEC-HMS و روش SCS مدل هیدرولوژیک حوضه کن را توسعه دادند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که فعالیت‌های مکانیکی در افزایش زمان تمرکز نقش ناچیزی را ایفا می‌کند. ازسویی فعالیت‌های زیستی CN حوضه را به میزان ۳/۱ کاهش می‌دهد. ازسوی دیگر فعالیت‌های انجام شده دبی، اوج و حجم رواناب را به ترتیب به میزان ۲۱٪ و ۱۱٪ کاهش می‌دهد (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹). خسروی با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS اثر تغییرات کاربری اراضی بر روی دبی اوج سیلاب و حجم سیلاب حوضه سد شیخ بشارت را مورد بررسی قرار داد. نتایج به دست آمده نشان داد با توجه به ازبین‌رفتن مراتع و تغییرات کاربری اراضی دبی، اوج سیلاب، روند افزایشی داشته است (خسروی، ۱۳۸۹). محققین در پژوهشی دیگر با استفاده از مدل‌های HEC-HMS و HEC-RAS مدل منطقه‌ای سیل را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش

در سال‌های اخیر شبیه‌سازی سیل و پیش‌بینی آن بسیار مورد توجه محققین بوده است. در این خصوص برآورد مشخصه‌های سیلاب امری ضروری است. ثقفیان و خسروشاهی در پژوهشی از روش واکنش سیل واحد، به منظور تعیین مشارکت زیرحوضه‌ها در دبی اوج خروجی و همچنین در اولویت‌بندی سیل زیرحوضه‌ها استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده این است که مساحت زیرحوضه‌ها با دبی اوج خروجی رابطه مستقیمی ندارد. به این معنا که اگر زیرحوضه‌ای مساحت بیشتری داشته باشد الزاماً دبی اوج خروجی بیشتری ندارد. از طرفی دبی اوج خروجی نیز با شاخص سیل‌خیزی رابطه مستقیم ندارد. به این معنی که دبی اوج خروجی، بیشتر لزوماً شاخص سیل‌خیزی بیشتری ندارد. همچنین نتایج بیانگر این است که تداوم و دوره بازگشت بارش طراحی تأثیری بر اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها ندارد. (Saghafian و Khosrosha، ۲۰۰۵). طی تحقیقی دیگر ثقفیان و همکاران، حوضه آبریز رود زرد را به صورت شبکه‌ای از سلول‌ها تقسیم‌بندی کردند. سپس سیل‌خیزی را برای تمامی سلول‌ها انجام دادند. نتایج بیانگر این است که مطالعات در سطح زیرحوضه‌ها نتایج لازم را مشخص می‌کند و نیازی به مطالعات به صورت توزیعی و یا در سطح سلول نمی‌باشد (ثقفیان و همکاران، ۲۰۰۶). محققین در سال ۲۰۰۴ جهت تعیین مناطق اصلی تولید سیلاب از یک مدل HEC-HMS استفاده کردند. نتایج بیانگر این بود منطقه‌هایی که بیشترین خسارت را از سیلاب‌ها متحمل بودند، با نقاطی که بیشترین دبی اوج را دارند منطبق هستند (Foody et al., ۲۰۰۶). طی پژوهشی دیگر جوکار مهم‌ترین عوامل مؤثر بر

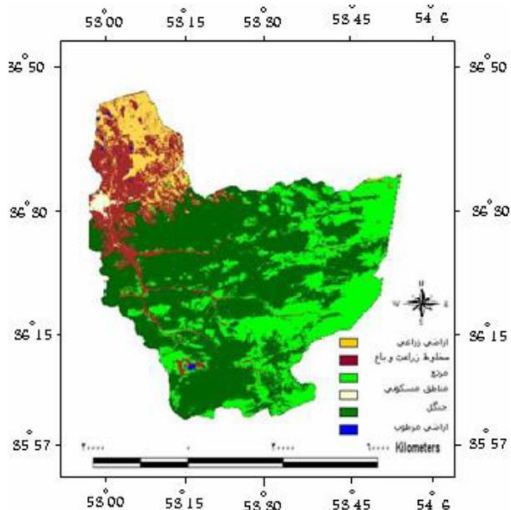


ثابت، روش توانی و شمارش رطوبت خاک را با استفاده از مدل HEC-HMS مورد مقایسه قرار داد. نتایج نشان داد روش شمارش رطوبت خاک نسبت به سایر روش‌ها دقیق‌تر است. سپس روش SCS و روش توانی با مقادیر ضریب Nash-Sutcliffe مشابه، در رتبه بعد قرار می‌گیرند. همچنین در تخمین حجم رواناب به ترتیب روش شروع ثابت، روش SCS و گرین آمپت قرار می‌گیرند (Razemkhan, ۲۰۱۶). محققین در کشور چین به منظور ارزیابی کاربردهای مدل هیدرولوژیکی به ترکیب مدل‌های هیدرولوژیکی HEC-HMS با مدل HEC-GeoHMS پرداختند. نتایج نشان داد میزان نسبت خطا در دبی‌های پیک سیلاب در رنج مناسبی قرار دارد. از طرفی توافق بالای ۹۰ درصدی نتایج شبیه‌سازی سیلاب توسط مدل با داده‌های هیدرومتری سیلاب‌های ثبت شده در منطقه را نشان داده است (Li و OLEYIBLO, ۲۰۱۰). بررسی‌هایی که در خصوص کاربرد مدل‌های بارش رواناب در پیش‌بینی و برآورد سیلاب انجام شد، حاکی از آن است که تمرکز مطالعات بیشتر بر روی اطلاعات اولیه حوضه آبریز است. به همین دلیل به کارگیری مدلی که بتواند اطلاعات دقیق‌تری مانند رقوم ارتفاعی، کاربری اراضی و غیره را در نظر بگیرد، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ بنابراین در این تحقیق به ارزیابی کارایی مدل HEC-GeoHMS در برآورد و شبیه‌سازی سیلاب در شمال کشور پرداخته شده است.

مود کلارک اصلاح شده در تبدیل بارش رواناب استفاده کردند. همچنین به صورت دستی پارامترهای حوضه را کالیبره کردند. نتایج مبنی بر دستیابی به ابزاری مناسب جهت پیشگویی هیدرولوژیکی منطقه‌ای در حوضه است (Kenble et al., ۲۰۰۵). در پژوهشی دیگر، محققین سیلاب ناشی از بارندگی بر روی حوضه آبریز رودخانه آمپانگ را واقع در پایتخت کشور مالزی بررسی کردند. آن‌ها از مدل HEC-GeoHMS جهت انجام اقدامات پیشگیرانه در این تحقیق استفاده کردند. نتایج موافقت بالای شبیه‌سازی را با موارد واقعی نشان می‌دهد. به طوری که ضریب ناش - ساتکلیف، $0/86$ محاسبه شده است. مقادیر این ضریب عددی بین 00 - الی 1 می‌باشد. هر چه مقدار این ضریب به 1 نزدیک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه می‌دهد (Ramly و Tahir, ۲۰۱۶). در تحقیقی دیگر، محققین به منظور تولید مدل مفهومی بارش - رواناب در رودخانه هورمان (Hurman) از چندین روش شبیه‌سازی هیدرولوژیکی استفاده کردند. هدف این تحقیق ارزیابی توان تولیدی نیروی برق آبی در رودخانه مذکور بوده است. به علت تعیین میزان رواناب مورد نیاز در نقاط مختلف مدل‌های HEC-HMS، WMS و FDC به کار گرفته شده است. نتایج بیانگر موافقت بالایی میان موارد مشاهداتی و شبیه‌سازی است. دقت در این مدل با استفاده از پارامترهای Nash-Sutcliffe، R^2 ، ME و RMSE سنجیده شده است. (AL-Juboori و Guven, ۲۰۱۶). مطالعه‌ای شبیه‌سازی در حوضه رود زرد برای وقوع سیلاب ۲ ساعته در سال ۲۰۱۶ صورت گرفت. محققین تمام روش‌های موجود تخمین سیلاب شامل روش‌های SCS، گرین آمپت، شروع ثابت، کمبود ثابت، کسر

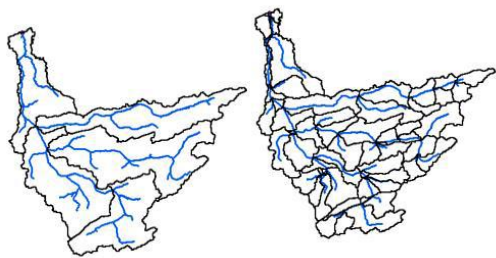
مواد و روش‌ها

این تحقیق در حوضه آبریز تجن استان مازندران صورت گرفته است. آب‌وهوای این منطقه به روش دومارتن نیمه‌مرطوب تا مرطوب سرد است. مساحت این حوضه ۴۵۰۰ کیلومتر مربع بوده است (شکل ۱).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

شده است. به منظور تهیه نقشه‌های پایه ابتدا اطلاعات مورد نیاز برای ساختار فیزیکی مدل HEC-HMS توسط HEC-GeoHMS فراهم شده است. در HEC-GeoHMS مراحل به صورت زیر تعریف می‌شود. الف) اصلاح خطوط شبکه آبراهه؛ ب) تصحیح چالاب‌ها و گودال‌های مصنوعی؛ ج) تعیین جهت جریان در هر شبکه از مدل رقومی زمین؛ د) تعیین جهت جریان جمعی؛ ه) ایجاد شبکه آبراهه‌ها؛ و) تقسیم شبکه آبراهه‌ها؛ ز) ساختن زیرحوضه‌ها؛ ح) ترسیم پلی‌گون؛ ط) خطوط اتصال؛ ی) یکپارچه‌سازی زیرحوضه‌ها. نقشه جهت جریان با استفاده از نقشه رقومی ارتفاعی به دست آمده است. همچنین نقشه تجمعی جریان پایه اصلی را برای ساخت شبکه آبراهه، زیرحوضه‌ها و حوضه‌ها نشان داده است. پس از ورود داده‌ها به مدل تعریف پروژه جدید که معنی شکل‌گیری محیط حوضه آبریز است انجام گرفته است. پس از تعریف محیط حوضه، اقدام به بستن حوضه با تعیین نقطه خروجی صورت گرفته است. زمان در حل معادلات حوضه، نقش بسیار مهمی دارد؛ بنابراین با در نظر گرفتن اینکه تعداد زیرحوضه در زمان پردازش تأثیر زیادی دارد، زیرحوضه‌ها به جهت کمتر شدن حجم محاسبات ادغام می‌شود (شکل ۲).

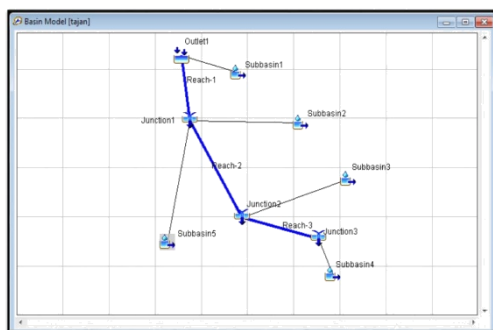


شکل ۲: ادغام زیرحوضه‌ها

مهم‌ترین شاخه‌های اصلی تجن شامل شاخه چهاردانگه، شاخه دودانگه، شاخه لاجیم و شاخه زارم رود است. در این تحقیق از داده‌های ایستگاه هواشناسی و ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه آبریز تجن استفاده شده است. همچنین داده‌های هیدرومتری مورد استفاده قرار گرفته است. برای این اطلاعات از آمار دبی روزانه رودخانه تجن و رودخانه‌های نزدیک به آن استفاده شده است. از طرف دیگر از بانک‌های اطلاعاتی جهت اخذ اطلاعات مورد نیاز مانند نقشه رقومی ارتفاعی منطقه و لایه طبقه‌بندی خاک منطقه جهت تنظیم مدل استفاده

پس از تنظیم مدل در نرم‌افزار GIS مدل HEC-HMS جهت اجرا و اسنجی شد.

هفت گام اساسی جهت ایجاد یک مدل هیدرولوژیکی در نرم‌افزار HEC-HMS وجود دارد. این هفت گام شامل شروع یک پروژه جدید، معرفی ایستگاه‌های بارندگی و آب‌سنجی، ایجاد مدل حوضه، ایجاد مدل هواشناسی، ایجاد مشخصه‌های کنترل، اجرا و در نهایت مشاهده و چاپ نتایج می‌باشد. به جهت آماده‌سازی مدل، ابتدا نقشه‌های پایه، ساخته شده و از آن در نرم‌افزار مذکور استفاده می‌شود. سپس فایل پروژه ایجاد شده و در محیط نرم‌افزار قرار می‌گیرد. شماتیک حوضه مدل‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: شماتیک حوضه مدل‌سازی شده

سپس داده‌های فیزیوگرافی و هواشناسی به مدل معرفی می‌شود. ابتدا مقدار CN که در هر زیرحوضه مشخص شده است، به مدل وارد می‌گردد. بعد مقدار متوسط بارش در هر زیرحوضه به نرم‌افزار داده می‌شود. در این قسمت داده‌های روزانه بارش ۵ ایستگاه فریم صحرا، قوشه، ریگ چشمه، تلمادره و کردخیل مورد استفاده واقع شده است. همچنین از ایستگاه کردخیل برای داده‌های دبی مشاهداتی استفاده شده است. هیتوگراف بارش در هر ۵ ایستگاه باران‌سنجی مشخص

سپس مشخصات فیزیوگرافی حوضه همانند طول رودخانه، شیب رودخانه، شیب حوضه و غیره که تأثیر مستقیم بر روی تشکیل رواناب خروجی ناشی از بارش بر روی سطح حوضه دارند، مشخص شده است. همچنین پارامترهای هیدرولوژیکی مانند پارامترهای مربوط به نحوه روندیابی و روش محاسبات جابه‌جایی مشخص شده است. در این بخش شماره منحنی حوضه بر اساس نقشه پوشش اراضی و خاک (Arc and Landuse) گروه هیدرولوژیکی و پوشش گیاهی منطقه تعیین و با مراجعه به جدول گروه‌های هیدرولوژیکی خاک استخراج شده است. سپس شماره منحنی مربوط به هر زیرحوضه در محیط نرم‌افزار آرکمپ (Arc Map) تخمین زده شده است. در جداول ۱ و ۲ مشخصات فیزیکی حوضه و همچنین محاسبه زمان تمرکز و زمان تأخیر هر زیرحوضه نشان داده شده است.

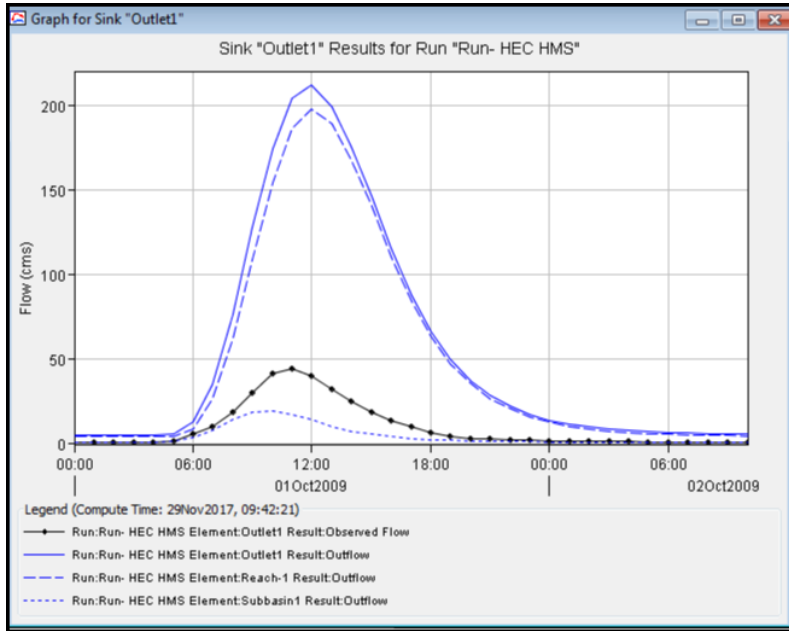
جدول ۱: مشخصات فیزیکی حوضه

نام ایستگاه	زیرحوضه	مساحت (km ²)	طول آبراهه (km)	شیب حوضه %	شماره منحنی
کردخیل	Subbasin ^۱	۵۱۶.۹۴	۴۵.۶۷	۳۹.۵۹	۸۰.۷۳
تلمادره	Subbasin ^۲	۹۱۵.۶۶	۱۰۶.۱۳	۵۰.۰۰	۷۸.۶۴
ریگ چشمه	Subbasin ^۳	۱۲۲۴.۶۵	۸۷.۵۶	۴۹.۳۵	۷۹.۲۱
قوشه	Subbasin ^۴	۷۱۳.۲۳	۳۸.۱۴	۵۵.۵۵	۸۰.۴۹
فریم صحرا	Subbasin ^۵	۸۹۹.۲۲	۶۱.۷۱	۴۹.۳۵	۷۹.۹۱

جدول ۲: محاسبه زمان تمرکز و زمان تأخیر هر زیرحوضه

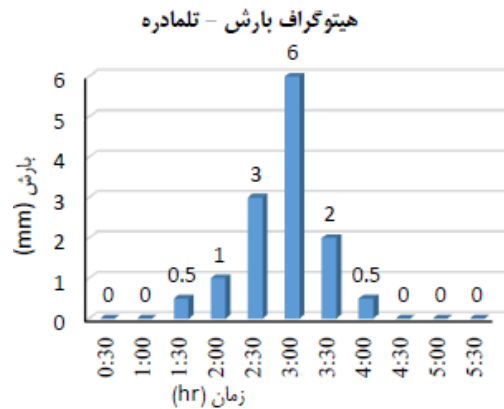
زیرحوضه	زمان تمرکز (min)	زمان تأخیر (min)
Subbasin ^۱	۴۳۸	۲۶۳
Subbasin ^۲	۵۷۰	۳۴۲
Subbasin ^۳	۴۸۸	۲۹۳
Subbasin ^۴	۲۳۷	۱۴۲.۲
Subbasin ^۵	۳۳۵	۲۰۱

شده است. (برای نمونه تنها یک ایستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است).



شکل ۵: هیدروگراف اولیه از خروجی مدل

برای رویداد ۰۱، ۲۰۰۹/۱۰/۰۲ بدون ایجاد تغییر در پارامترها در شکل ۴ مشخص شده است. شکل ۵ خروجی نرم‌افزار HEC-HMS می‌باشد که نمودار آبی‌رنگ جریان شبیه‌سازی شده و نمودار مشکی‌رنگ جریان مشاهداتی را نشان داده است. این هیدروگراف تغییرات رواناب خروجی حوضه را در ایستگاه کردخیل نشان داده است و همراه با آن هیدروگراف رواناب ثبت شده در همان تاریخ مشخص شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، میان هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اختلاف زیادی وجود دارد. این اختلاف مقادیر در جریان پایه و مقادیر حدی بیانگر این است که در برآورد متوسط رواناب خروجی، مدل شبیه‌سازی مناسبی داشته است. از طرفی شروع بازوی



شکل ۴- نمودار هیتوگراف بارش

آنالیز حساسیت پس از اجرای مدل برای وقایع مختلف صورت گرفت. کالیبراسون نیز بعد از مشخص شدن پارامترهای حساس انجام شد. نتایج شبیه‌سازی مدل

بالارونده هیدروگراف با هیدروگراف مشاهداتی تقریباً
منطبق است.

جدول ۳: خلاصه نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییر در پارامتر CN

درصد تغییرات پارامتر	زیرحوضه‌ها (CN)					دبی اوج	درصد تغییرات دبی اوج	حساسیت
	Sub ^۱	Sub ^۲	Sub ^۳	Sub ^۴	Sub ^۵			
-۱۰	۷۲.۶۵	۷۰.۷۷	۷۱.۲۹	۷۲.۴۴	۷۱.۹۲	۲۶.۵	-۴۰.۸۴	-۴۰.۸
-۵	۷۶.۷	۷۴.۷	۷۵.۲۵	۷۶.۴۶	۷۵.۹۱	۸۹.۴	۹۹.۵۴	۱۹.۹۱
۰	۸۰.۷۳	۷۸.۶۴	۷۹.۲۱	۸۰.۴۹	۷۹.۹۱	۴۴.۸	۰	-
+۵	۸۴.۷۶	۸۲.۵۷	۸۳.۱۷	۸۴.۵۱	۸۳.۹	۴۰۹.۷	۸۱۴.۵	۱۶۲.۹۰
+۱۰	۸۸.۸	۸۶.۵	۸۷.۱۳	۸۸.۵۳	۸۷.۹	۷۱۳.۵	۱۴۹۲.۶۳	۱۴۹.۲۶

جدول ۴: خلاصه نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییر در پارامتر زمان تأخیر

درصد تغییرات پارامتر	زیرحوضه‌ها (CN)					دبی اوج	درصد تغییرات دبی اوج	حساسیت
	Sub ^۱	Sub ^۲	Sub ^۳	Sub ^۴	Sub ^۵			
-۱۰	۲۳۶.۷	۳۰۷	۲۶۳.۷	۱۲۷.۹۸	۱۸۰.۹	۲۱۹.۶	۳۹۰.۱۷	۳۹۰.۱
-۵	۲۴۹.۸۵	۳۲۴.۹	۲۷۸.۳۲	۱۳۵.۰۹	۱۹۰.۹۵	۲۱۵	۳۷۹.۹۱	۷۵.۹۸
۰	۲۶۳	۳۴۲	۲۹۳	۱۴۲.۲	۲۰۱	۴۴.۸	۰	-
+۵	۲۷۶.۱۵	۳۵۹.۱	۳۰۷.۶۵	۱۴۹.۳۱	۲۱۱.۰۵	۲۰۷.۵	۳۶۳.۱۶	۷۲.۶۳
+۱۰	۲۸۹.۳	۳۷۶.۲	۳۲۲.۳	۱۵۶.۴۲	۲۲۱.۱	۲۰۲.۴	۳۵۱.۷۸	۳۵.۱۷

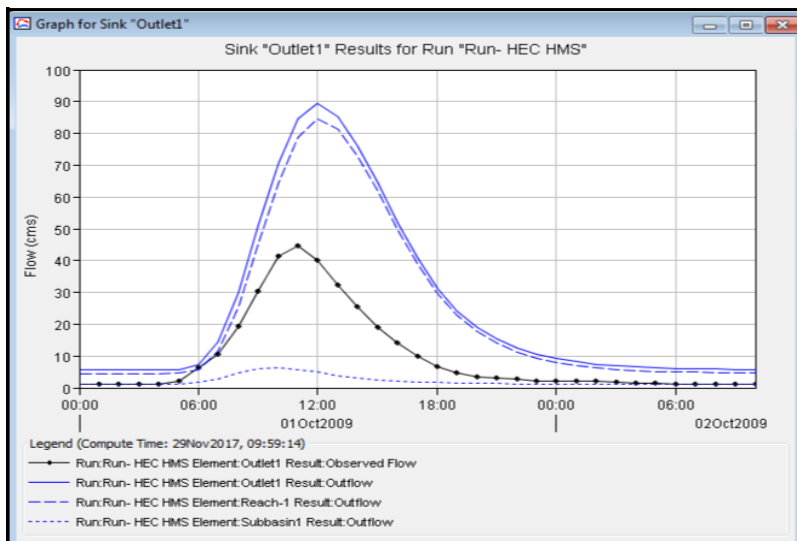
$$SEN = 100 \cdot \frac{New - Old}{Old |pc|} \quad (1)$$

که در آن SEN اندازه تابع هدف حاصل از تغییر در اندازه پارامتر، New اندازه جدید خروجی مدل حاصل از پارامتر جدید، Old خروجی مدل اولیه و $|pc|$ قدر مطلق درصد تغییرات در پارامتر است.

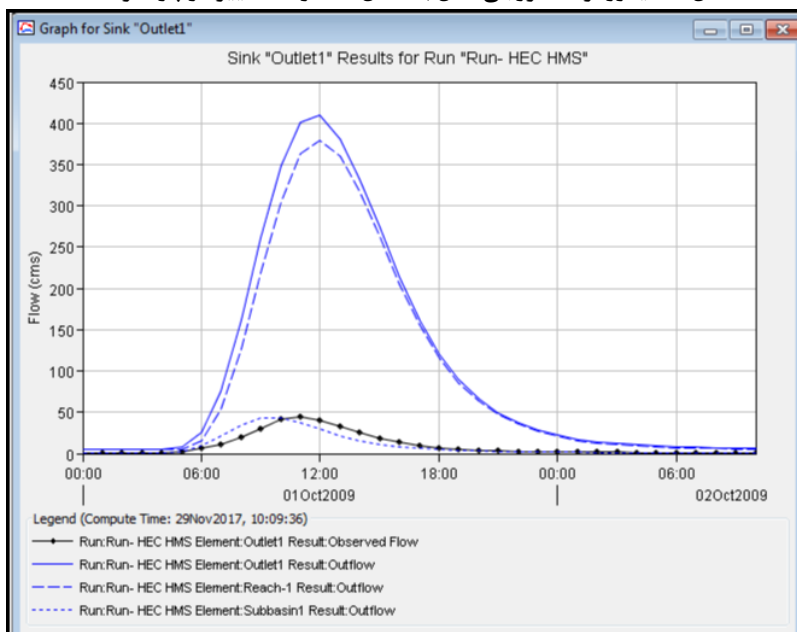
به منظور آنالیز حساسیت مدل SCS مقدار شماره منحنی و زمان تأخیر در هر یک از زیرحوضه‌ها تغییر یافت و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش این ۲ پارامتر از ۱۰٪ تا ۱۰٪+ با فواصل ۵٪ تغییر

در خصوص بازوی پایین‌رونده به این ترتیب است که نمودار مشاهداتی، افت کمتری نسبت به افت شبیه‌سازی شده دارد. این مسئله نشان از تخلیه ناگهانی حوضه دارد. در این مطالعه از آنالیز حساسیت به منظور تعیین پارامترهای مناسب برای کالیبراسیون استفاده شد. همچنین برای برآورد تلفات از روش شماره منحنی SCS و برای تعیین حساسیت پارامترها از روش شماره منحنی و زمان تأخیر استفاده شده است. از رابطه ۱ برای تعیین میران حساسیت پارامترها استفاده می‌شود:

داده شد و اثر آن بر دبی پیک سیل مشخص شد. مقادیر اولیه شماره متحنی و زمان تاخیر برای زیرحوضه‌های مختلف در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۶: هیدروگراف خروجی مدل با اعمال ۵- درصد تغییر در پارامتر CN

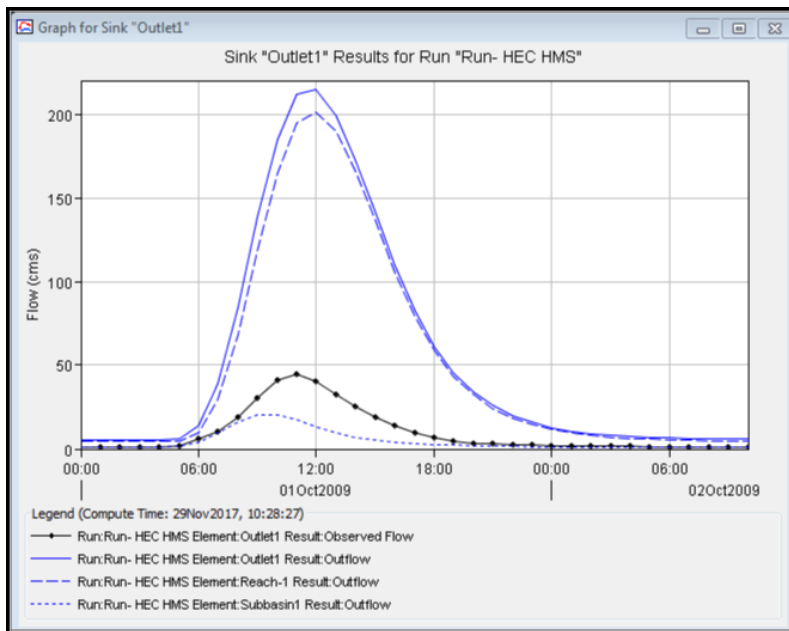


شکل ۷: هیدروگراف خروجی مدل با اعمال ۵+ درصد تغییر در پارامتر CN

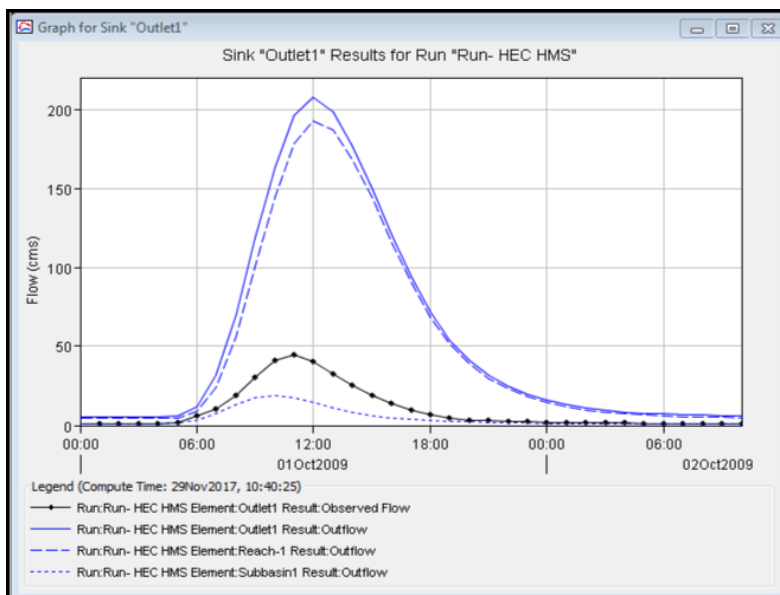
بایستی به سمت درصد منفی کالیبره کرد (برای نمونه تنها خروجی مدل با اعمال $+5$ درصد تغییر در پارامتر نشان داده شده است).

همچنین شکل‌های ۸ و ۹ آنالیز حساسیت پارامتر زمان تأخیر را در بازه‌های -5 ، -10 ، $+5$ و $+10$ درصد نشان داده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است می‌توان این‌چنین نتیجه گرفت که نسبت به تغییرات پارامتر زمان تأخیر مدل از حساسیت کمتری برخوردار است (تنها خروجی مدل با اعمال $+5$ و -5 درصد تغییر در پارامتر زمان تأخیر نشان داده شده است).

همان‌طور که در جداول مشخص است، مدل حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات CN از خود نشان داده است و کالیبراسیون براساس این پارامتر صورت گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، تغییر پارامتر CN با درصد تغییرات -5 و -10 نتایج بهتری داشته است. همچنین اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نسبت به خروجی هیدروگراف اولیه کمتر شده است. (به‌عنوان نمونه تنها خروجی مدل با اعمال -5 درصد تغییر در پارامتر نشان داده شده است). با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت درصد تغییرات $+10$ و -5 پارامتر CN در مقایسه با درصد تغییرات $+5$ و $+10$ نتایج بهتری را فراهم می‌کند؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که در مرحله کالیبراسیون پارامتر CN را



شکل ۸: هیدروگراف خروجی مدل با اعمال -5 درصد تغییر در پارامتر زمان تأخیر



شکل ۹: هیدروگراف خروجی مدل با اعمال ۵+ درصد تغییر در پارامتر زمان تأخیر

جدول ۵: نتایج مربوط به پارامتر CN قبل و بعد از کالیبراسیون

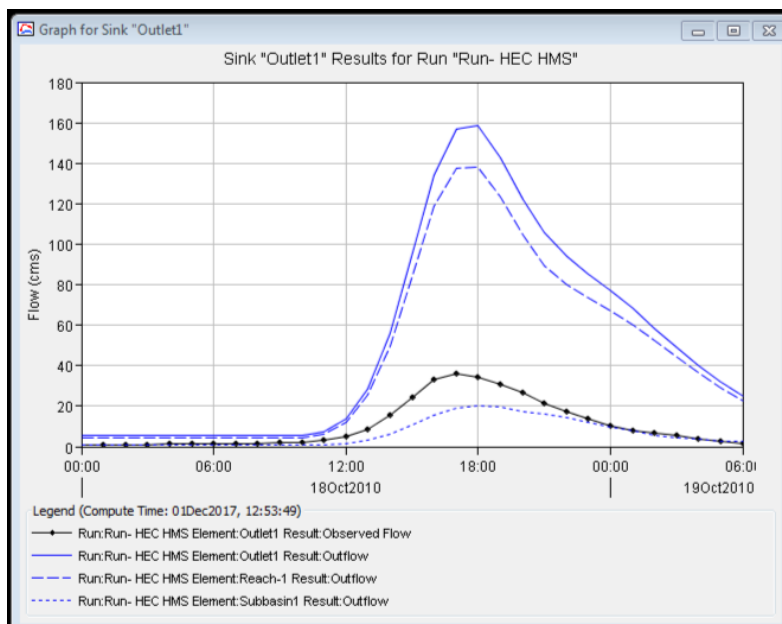
زیرحوضه	قبل کالیبراسیون	بعد کالیبراسیون
Sub ^۱	۸۰.۷۳	۷۳
Sub ^۲	۷۸.۶۴	۷۲.۱
Sub ^۳	۷۹.۲۱	۷۱.۳
Sub ^۴	۸۰.۴۹	۷۳.۷
Sub ^۵	۷۹.۹۱	۷۱.۶

برای مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از طریق نرم‌افزار HEC-HMS از شاخص‌های نکویی برازش بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی استفاده شده است. نتایج مدل با شاخص نکویی برازش در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج بیانگر این است که اختلاف میان هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حداقل شده است.

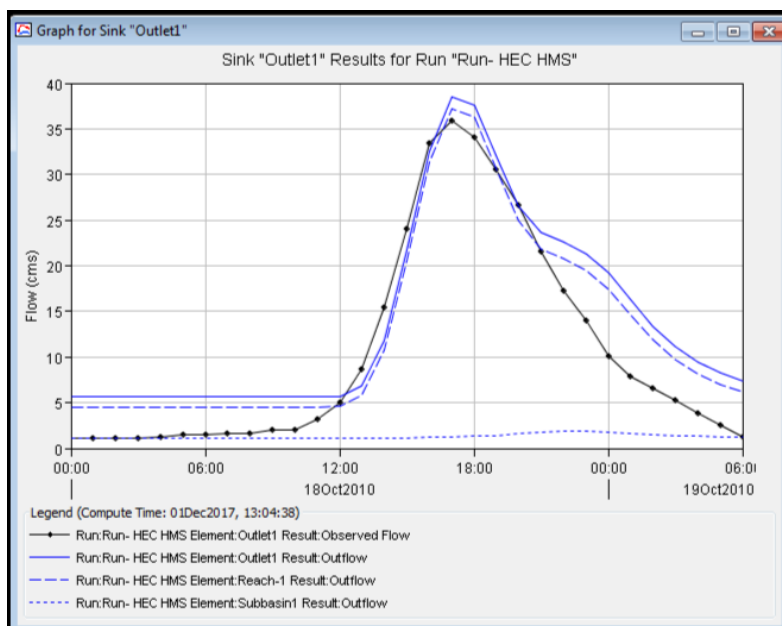
به منظور حاصل شدن نتایج مناسب‌تر پس از اجرای مدل، مدل کالیبره شد. از سویی جهت بهسازی مدل پارامتر CN که تأثیر بیشتری نسبت به پارامتر زمان تأخیر داشت مورد استفاده واقع شد. نتایج بهسازی هر یک از وقایع به شرح زیر است.

۱- اجرای مدل در رویداد ۱۹، ۱۸/۱۰/۲۰۱۰

در این حالت مدت بارش‌ها در ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد بررسی ۵-۶ ساعت است. همچنین پیک سیلاب ثبت شده با فواصل ۱ ساعته در ایستگاه کردخیل تا مقدار ۱۵۸.۶ مترمکعب بر ثانیه رسیده است. همان‌طور که قبل‌تر ذکر شده بود، جهت کالیبراسیون از پارامتر CN و برای کالیبره کردن از روش آزمون و خطا استفاده شده است. جدول ۵ به شماره منحنی‌های قبل و بعد از کالیبراسیون اشاره شده است.



شکل ۱۰: هیدروگراف خروجی مدل قبل از کالیبراسیون



شکل ۱۱: هیدروگراف خروجی مدل بعد از کالیبراسیون

جدول ۶: نتایج مدل با شاخص نکویی برازش در واقعه ۱۸، ۱۹، ۲۰/۱۰/۲۰۱۰

میانگین قدرمطلق خطا		درصد خطای نسبی پیک سیلاب		ضریب همبستگی		خطای جذر میانگین مربعات		ناش - سانتکلیف	
بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از
کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون
۴.۱	۴۱.۶	۷.۲	۳۳۷.۶	۰.۹۷	۰.۹۶	۴.۶۲	۵۷.۶	۰.۸۳	-۲۴.۷

دارد. از طرف دیگر جدول ۸ نتایج مربوط به شاخص نکویی برازش را در سال ۲۰۰۸ نشان داده است.

جدول ۷: نتایج مربوط به پارامتر CN قبل و بعد از

کالیبراسیون

زیرحوضه	قبل کالیبراسیون	بعد کالیبراسیون
Sub ^۱	۸۰.۴۹	۷۷.۶
Sub ^۲	۷۸.۶۴	۷۶.۳
Sub ^۳	۷۹.۲۱	۷۶.۵
Sub ^۴	۸۰.۷۳	۷۷.۸
Sub ^۵	۷۹.۹۱	۷۷.۵

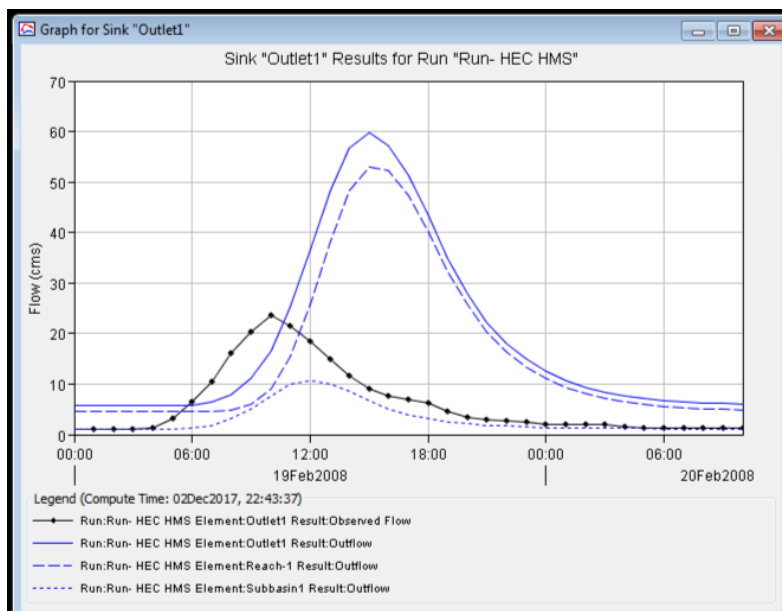
از جدول ۸ می‌توان نتیجه گرفت میزان خطا در هر ۲ شاخص پس از کالیبراسیون کاهش پیدا کرده است. اما در کل در مقایسه یا رویداد سال ۲۰۱۰ نتایج ضعیف‌تری داشته است.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ هیدروگراف خروجی مدل را قبل و بعد از کالیبراسیون نشان داده است.

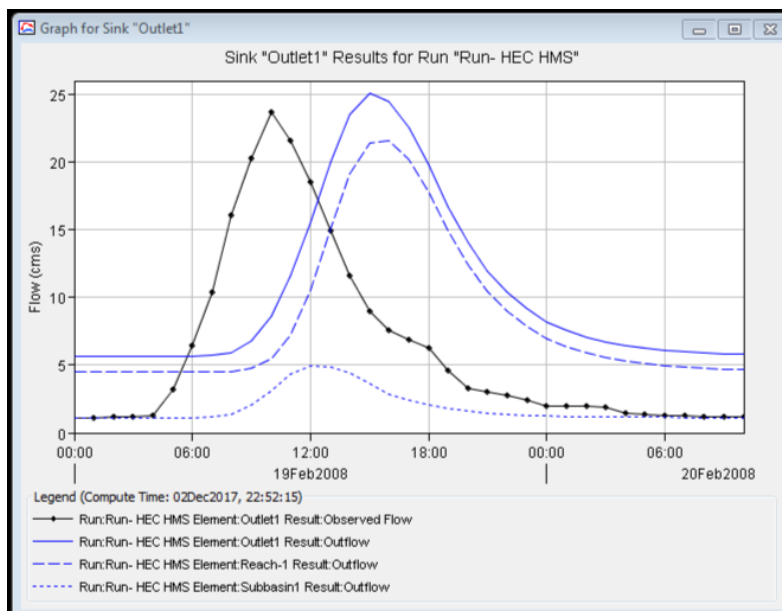
از طرف دیگر شاخص‌های درصد خطای نسبی و میانگین قدرمطلق خطای مدل کالیبره شده نیز کاهش یافته است. شکل ۱۰ هیدروگراف خروجی مدل را قبل و قبل از کالیبراسیون نشان داده است که با توجه به اختلاف میان هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی می‌توان گفت، مقادیر پیک سیلاب به‌طور مناسبی پیش‌بینی شده است. از طرف دیگر شکل ۱۱ نشان‌دهنده خروجی مدل پس از کالیبراسیون است. همان‌طور که مشخص است می‌توان گفت اختلاف میان هیدروگراف‌ها به حداقل رسیده است.

۲- اجرای مدل در رویداد ۱۹، ۲۰، ۲۰/۰۲/۲۰۰۸

در این رویداد مدت بارش در ایستگاه‌های مختلف در این حوضه حدود ۹ ساعت است. همچنین مقدار پیک سیلاب شبیه‌سازی شده با فواصل ۱ ساعته در ایستگاه کردخیل تا حدود ۶۰ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. جدول ۷ مقادیر پارامتر CN قبل و بعد از کالیبراسیون نشان داده شده است. از این جدول می‌توان نتیجه گرفت که مقدار CN در رویداد مربوط به سال ۲۰۰۸ تغییرات کمتری نسبت به رویداد سال ۲۰۱۰ داشته است که این نشان از تناسب بیشتر رویداد سال ۲۰۰۸



شکل ۱۲: هیدروگراف خروجی مدل قبل از کالیبراسیون



شکل ۱۳: هیدروگراف خروجی مدل بعد از کالیبراسیون

جدول ۸: نتایج مدل با شاخص نکویی برازش در واقعه ۱۹، ۲۰/۲/۲۰۰۸

ناش - ساتکلیف		خطای جذر میانگین		ضریب همبستگی		درصد خطای نسبی		میانگین قدرمطلق خطا	
قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از
کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون
-۸.۶۷	-۰.۶۹	۲۰.۷	۸.۶	۰.۲۷	۰.۳۳	۱۵۲.۳۳	۵.۹	۱۴.۵	۷.۵

همان‌طور که از جدول ۱۰ مشخص است معیارهای ارزیابی خطا پس از کالیبراسیون نتایج بهتری داشته است؛ به طوری که مقدار شاخص ناش - ساتکلیف به ۱ نزدیک شده است. این موضوع بیانگر این است که تناسب بیشتری میان داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. همچنین در خصوص معیار ارزیابی خطا بعد از کالیبراسیون نتایج بهتر بوده است؛ به صورتی که خطای جذر میانگین مربعات پس از کالیبراسیون کمتر شده است.

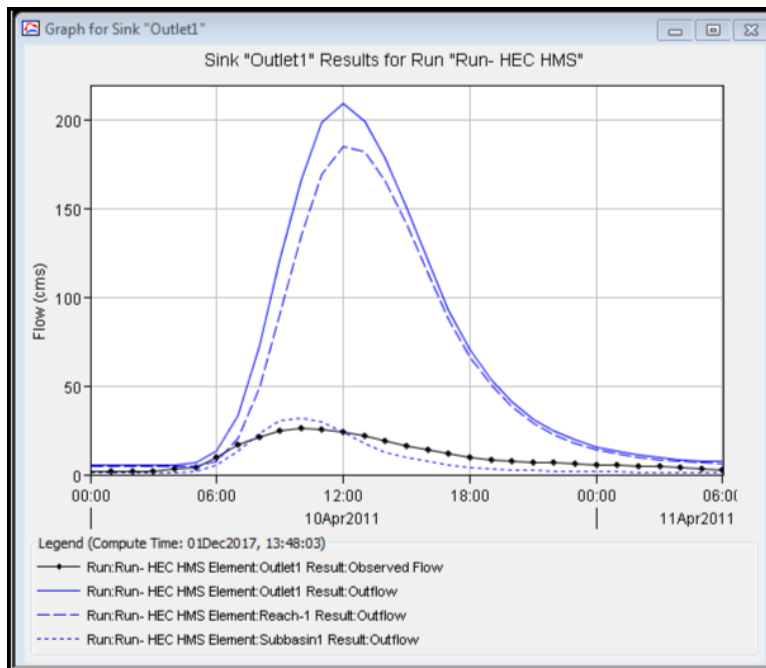
شکل‌های ۱۴ و ۱۵ هیدروگراف خروجی مدل را، قبل و بعد از کالیبراسیون، نشان داده است. نتایج بیان‌کننده این است بارش‌هایی که در زیرحوضه‌های مورد بررسی رخ داده است به صورت پراکنده رخ داده است. یکی از دلایل مربوط به اختلاف بسیار میان مقادیر دبی پیک شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، می‌تواند این موضوع باشد.

۳- اجرای مدل در رویداد ۱۰، ۲۰۱۱/۰۴/۱۱، مدت بارش در این رویداد همانند رویداد قبل در ایستگاه‌های مختلف در حوضه و حدود ۸ ساعت است. مقادیر پیک سیلاب شبیه‌سازی شده با فواصل ۱ ساعته نیز در ایستگاه هیدرومتری کردخیل تا مقدار ۲۰۹.۴ متر مکعب بر ثانیه است. جدول ۹ مقادیر پارامتر CN قبل و بعد از کالیبراسیون نشان داده شده است.

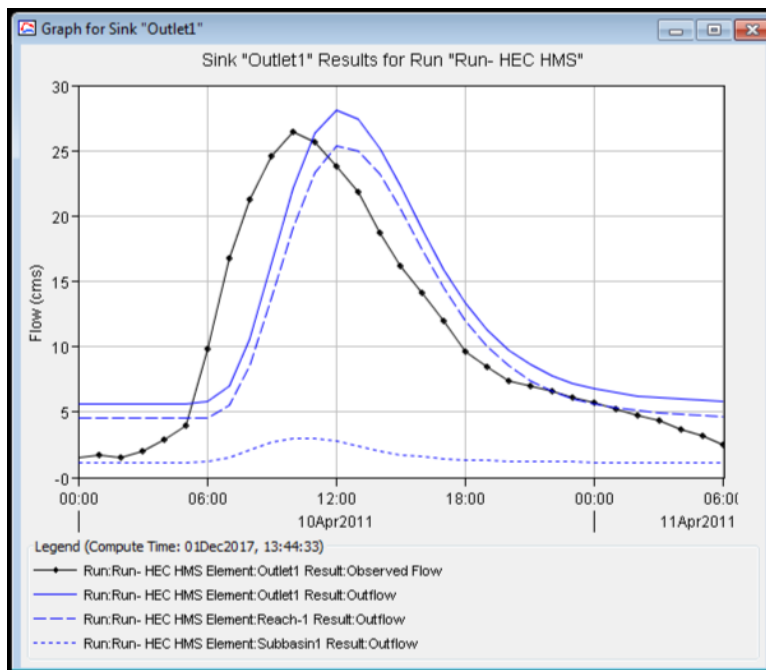
جدول ۹: نتایج مربوط به پارامتر CN قبل و بعد از

کالیبراسیون		
زیرحوضه	قبل کالیبراسیون	بعد کالیبراسیون
Sub ^۱	۸۰.۴۹	۷۳.۷
Sub ^۲	۷۸.۶۴	۷۲.۱
Sub ^۳	۷۹.۲۱	۷۱.۳
Sub ^۴	۸۰.۷۳	۷۳
Sub ^۵	۷۹.۹۱	۷۱.۶

از واقعه مربوط به سال ۲۰۱۱ به جهت برازش، بهترین مقدار از شاخص‌های نکویی برازش استفاده شده است. نتایج در جدول ۱۰ ارائه شده است. قابل ذکر است در این رویداد همانند رویدادهای پیشین درصد خطاهای پس از کالیبراسیون کمتر شده است.



شکل ۱۴: هیدروگراف خروجی مدل قبل از کالیبراسیون



شکل ۱۵: هیدروگراف خروجی مدل بعد از کالیبراسیون

جدول ۱۰: نتایج مدل با شاخص نکویی برازش در واقعه ۱۰، ۱۱/۰۴/۲۰۱۱

میانگین قدرمطلق خطا		درصد خطای نسبی پیک سیلاب		ضریب همبستگی		خطای جذر میانگین مربعات		ناش - ساتکلیف	
بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از
کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون	کالیبراسیون
۳.۷	۵۱.۲	۶.۴۴	۶۹۳.۱۸	۰.۸۹	۰.۸۵	۴.۵	۷۹.۹۳	۰.۶۷	-۹۷.۲۱



نتایج

مدل در شبیه‌سازی وقایع کوتاه‌مدت در منطقه را نشان می‌دهد.

جمع‌بندی

در این مطالعه ابتدا اطلاعات و نقشه‌های مورد نیاز در مدل HEC-GeoHMS به جهت ارزیابی کارایی این مدل در برآورد و شبیه‌سازی سیلاب در حوضه آبریز رودخانه تجن مهیا شد. در گام دوم به منظور شبیه‌سازی، این اطلاعات وارد مدل HEC-HMS شد. بعد از اجرای مدل، نتایج نشان داد که اختلاف چشمگیری میان مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی وجود دارد؛ بنابراین برای کاهش این اختلاف آنالیز حساسیت انجام شد. از طرف دیگر نتایج نشان داد CN پارامتری است که نتایج مدل، حساسیت بیشتری نسبت به آن دارد. در مرحله کالیبراسیون، اختلاف میان مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به علت تغییر در مقدار CN در زیرحوضه‌ها کاهش یافت. نتایج بیانگر آن است که مدل HEC-GeoHMS کارایی مناسبی در پیش‌بینی سیلاب دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت در شبیه‌سازی بارش - رواناب در حوضه مورد بررسی، مدل مذکور با تقریب نسبتاً خوبی می‌تواند به کار گرفته شود. به منظور ادامه این مطالعه پیشنهاد شده است که از سایر مدل‌های شبیه‌سازی در منطقه مورد بررسی استفاده شود و نتایج مورد مقایسه قرار بگیرد. همچنین با در نظر گرفتن اثرات متفاوت روش‌های محاسبات بر رواناب خروجی و مؤلفه‌های هیدرولوژی حوضه آبریز، این اثرات را با روش‌های مختلف استخراج و مورد ارزیابی قرار داد. از طرفی پیشنهاد شده است حوضه با تعداد و وسعت

رابطه تلفات بارش - رواناب فرایند پیچیده‌ای است که پارامترهای زیادی دارد؛ بنابراین به منظور درک این موضوع از مدل‌سازی استفاده می‌شود. پارامترهای اصلی در شبیه‌سازی به‌عنوان یک اصل مدنظر بوده است. اما با در نظر گرفتن بعضی فرایندها و کمی کردن آن‌ها، در یک‌سری از موارد می‌توان مقادیر شبیه‌سازی شده را به مقادیر واقعی تبدیل کرد. از مهم‌ترین مطالعات هیدرولوژیک در علوم مهندسی آب، مدل‌سازی بارش - رواناب یک منطقه است؛ چرا که از عمده‌ترین دلایل در کاهش حاصلخیزی خاک و کاهش کیفیت آب رواناب سطحی می‌باشد. همچنین متخصصان در تلاش هستند تا روابطی میان بارندگی و رواناب حاصل از بارندگی، به علت محدودیت منابع آب و اثرات ناشی از وقوع سیل، ارائه دهند. انتخاب یک مدل بارش - رواناب مناسب برای حوضه به علت تنوع این مدل‌های بارش - رواناب در دسترس، امری ضروری است. به همین دلیل نیازمند به تشخیص قابلیت و محدودیت مدل‌های هیدرولوژی حوضه است. تخمین صحیح رواناب رودخانه به علت مسائل مرتبط با مدیریت آب مصارف کشاورزی، خسارات ناشی از سیل و غیره، اثرات اقتصادی چشمگیری دارد. از سوی دیگر می‌توان کارایی مدل HEC-HMS را که بر مبنای وقایع است، با در نظر گرفتن وقایع دیگر در طی زمان‌های متفاوت در این حوضه مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاکی از آن است که این مدل در حوضه آبریز تجن در شبیه‌سازی بارش - رواناب نتایج مناسبی داشته است. این موضوع قابلیت بالای

Programming. *Water Resour. Manag.* ۳۰،
۲۵۱۷-۲۵۳۰. doi:۱۰.۱۰۰۷/S112۶۹-۰۱۶-۱۳۰۰-۳.

Foody, G.M., Ghoneim, E.M., Arnell, N.W.,
۲۰۰۴. Predicting locations sensitive to flash
flooding in an arid environment. *J. Hydrol.*
۲۹۲، ۴۸-۵۸.

Knebl, M.R., Yang, Z.-L., Hutchison, K.,
Maidment, D.R., ۲۰۰۵. Regional scale flood
modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and
HEC-HMS/RAS: a case study for the San
Antonio River Basin Summer ۲۰۰۲ storm
event. *J. Environ. Manage.* ۷۵، ۳۲۵-۳۳۶.

Oleyiblo, J.O., Li, Z., ۲۰۱۰. Application
of HEC-HMS for flood forecasting in
Misai and Wan' an catchments in
China. *Water Sci. Eng.* ۳، ۱۴-۲۲.

doi:۱۰,۳۸۸۲/j.issn.۱۶۷۴-
۲۳۷۰,۲۰۱۰,۰۱,۰۰۲

Ramly, S., Tahir, W., ۲۰۱۶. Application of
HEC-GeoHMS and HEC-HMS as Rainfall-
Runoff Model for Flood Simulation, in:
ISFRAM ۲۰۱۵. Springer Singapore,
Singapore, pp. ۱۸۱-۱۹۲. doi:۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۹۸۱-
۱۰-۰۵۰۰-۸_۱۵.

Razmkhah, H., ۲۰۱۶. Comparing
performance of different loss methods in
rainfall-runoff modeling. *Water Resour.* ۴۳،
۲۰۷-۲۲۴. doi:۱۰.۱۱۳۴/S.۰۹۷۸-۷۸۱۶۱۲۰۰۵۸

Saghafian, B., Farazjou, H., Sepehr, A.,
Najafinejad, A., ۲۰۰۶. Evaluation of land use
effect on flooding watershed of Golestan
dam. *Water Source Res. Iran* ۳، ۱۸-۲۸.

Saghafian, B., Khosroshahi, M., ۲۰۰۵. Unit
response approach for priority determination
of flood source areas. *J. Hydrol. Eng.* ۱۰،
۲۷۰-۲۷۷.

زیرحوضه‌های بیشتری مورد ارزیابی واقع شود و با
نتایج این مطالعه مقایسه شود. از طرف دیگر توصیه
شده در این تحقیق برای دیگر نواحی و حوضه‌ها
پوشش گیاهی و کاربری‌های متفاوتی صورت گیرد
و با نتایج این تحقیق مقایسه گردد.

مراجع

جوکار، ج، «بررسی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های
رودخانه شاپور با استفاده از شبیه‌سازی جریان‌های
سیلابی». دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱.

جوکار، ج، «بررسی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های
رودخانه شاپور با استفاده از شبیه‌سازی جریان‌های
سیلابی». دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع
طبیعی و علوم دریایی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد
آبخیزداری، ص ۱۲۶، ۱۳۸۱.

خداپرست، ر، «برآورد دبی‌های پیک سیلاب با روش
HEC-HMS در حوزه سد طرق» (خراسان رضوی)،
پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده منابع طبیعی
دانشگاه یزد، ۱۳۸۸.

خسروی، م، «بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر
روی هیدروگراف سیلاب در حوزه آبخیز سد شیخ
بشارت با استفاده از مدل HEC-HMS». پایان‌نامه
کارشناسی‌ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه
زابل، ۱۳۸۹.

Al-Juboori, A.M., Guven, A., ۲۰۱۶.
Hydropower Plant Site Assessment by
Integrated Hydrological Modeling, Gene
Expression Programming and Visual Basic