جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۱۰، بهار ۱۳۹۳
صص. ۵۵-۴۳

ارزیابی تأثیر عملیات مکانیکی آبخیزداری بر کاهش سیلاب (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد)

همایون حصادی – استادیار، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، کرمانشاه
نرگس امیدی* - کارشناس ارشد منابع آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه
رضا مسعودی‌تبار - کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد

وصول: ۱۳۹۲/۰۷/۱۴ **پذیرش:** ۱۳۹۲/۱۱/۱۵

چکیده

افزایش رو به رشد تلفات منابع آب‌وخاک حوضه‌های آبخیز در چند دههٔ اخیر، در اثر بهره‌برداری غیر اصولی از منابع، شدّت فزاینده‌ای یافته است. این موضوع موجب تشدید وقوع سیلاب‌ها، افزایش نرخ تولید رسوب و کاهش عمر مفید مخازن سدها گردیده است. این پژوهش که در حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد واقع در استان کرمانشاه انجام گرفته، در پی ارزیابی تأثیر عملیات آبخیزداری بر روی میزان ذخیرهٔ رواناب، کاهش سیلاب و سیل‌خیزی است. در ابتدا، بررسی‌های صحرایی انجام شد و مشخّصات مکانیکی و فیزیکی سازه‌های احداث‌شده ثبت و تحلیل داده‌ها انجام گرفت. در مرحلهٔ بعد با استفاده از مدل هک اچ‌ام‌اس و شبیه‌سازی سیلاب حوضه، اقدام به بررسی تأثیر سازه‌ها در کنترل سیلاب و رواناب حوضهٔ مورد مطالعه گردیده است. طبق بررسی‌های انجام‌شده و بازدیدهای مکرّر میدانی، حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد از نقطه‌نظر سیل‌خیزی کم‌سیل‌خیز بوده و اکثر رواناب‌های ایجادشده قبل از رسیدن به خروجی حوضه در زمین نفوذ می‌کنند. همچنین در پشت سازه‌های کنترل سیلاب احداث‌شده در حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد (بند خاکی، خشکه‌چین و گابیون) هیچ‌گونه انباشت رسوب دال بر ایجاد رواناب سطحی ملاحظه نگردید. این وضعیّت نشان می‌دهد که تعداد سازندهای احداث‌شده خیلی بیشتر از نیاز منطقه بوده است.

واژگان کلیدی: آبخیزداری، کنترل سیلاب، مدل HEC-HMS، نرم‌افزار GIS.

*. نویسندهٔ مسئول: ۰۹۳۵۴۶۵۱۹۳۰ E-mail: narges.omidi2013@gmail.com

مقدّمه

به طور کلّی عوامل متعدّدی در بروز سیلاب حوضه‌های آبخیز نقش دارند که از جمله می‌توان به خصوصیات حوضه و بهره‌برداری غیر اصولی انسان از طبیعت اشاره نمود. در این میان، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی حوضه، به لحاظ تأثیرگذاری بر مؤلّفه‌هایی نظیر روند تولید، حرکت و نحوهٔ تجمیع رواناب از اهمّیّت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس اجرای هرگونه عملیات مکانیکی در سطح حوضه، با ایجاد تغییر در نفوذپذیری خاک و روند جریان، موجب بروز رفتارهای متفاوتی در تولید رواناب و دبی اوج هیدروگراف سیل حوضه‌های آبخیز می‌گردد (خلقی، ۱۳۸۱). بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که موضوعات متنوّعی در ارتباط با سیل و راه‌های پیشگیری از آن در سطح دنیا انجام شده و یا در حال انجام است.

استفاده از مخازن متوالی جهت به حداقل رساندن دبی اوج سیلاب، توسّط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (جونز[1]، ۲۰۰۰). در همین ارتباط، استفادهٔ تلفیقی از عملیات ساختمانی و غیر سازه‌ای به منظور دستیابی به موفّقیّت بیشتر در عملیات مهار سیل پیشنهاد گردیده است (فریسک[2]، ۲۰۰۴). مطالعات انجام‌شده در ارتباط با تأثیر تغییرات کاربری اراضی روی دبی سیلاب نشان می‌دهد که قطع پوشش جنگلی در برخی از مناطق حوضهٔ آبخیز می‌تواند موجب کاهش دبی اوج نیز گردد (بروکس[3] و همکاران، ۱۹۹۱). در همین راستا، تحقیقات مختلفی انجام شده است. شی[4] و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل هیدرولوژیک HEC-HMS، تأثیر تغییرات جریان سیلاب ناشی از به‌کارگیری سازه‌های کوتاه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمون بیانگر معنی‌داربودن تغییرات سیلاب بوده است.

سلطانی و همکاران (۱۳۹۰) برای بررسی تأثیر سازه‌های اصلاحی در حوضهٔ آبخیز منشاد یزد از مدل HEC-HMS برای مقایسهٔ تغییرات دبی قبل و بعد از اقدامات استفاده و جهت تعیین تأثیر سازه‌های اصلاحی، زمان تمرکز در شرایط بعد از اجرای اقدامات محاسبه و با اعمال تغییرات ایجادشده در ورودی‌های مدل اقدام به شبیه‌سازی رفتار سیلاب کردند. نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش زمان تمرکز حاصل از به‌کارگیری ۵۶۳ سازهٔ کوتاه، دبی اوج سیلاب به میزان ۳۱٪ کاهش می‌یابد. ثقفیان و همکاران (۲۰۰۲)، در همین ارتباط، طی پژوهش دیگری در حوضهٔ رود زرد، واقع در شمال شرق استان خوزستان، سطوح مؤثّر بر دبی اوج سیل این حوضه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد مناطق مختلف حوضه، اثرات متفاوتی در نحوهٔ شکل‌گیری دبی اوج سیلاب دارند که با شناسایی آنها و تمرکز عملیات مهار سیل در این‌گونه مناطق، ضمن بهینه‌سازی سطوح عملیات، کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینهٔ اجرایی پروژه‌ها قابل پیش‌بینی است. غفاری و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی سازه‌های گابیونی و سنگی ملاتی احداث‌شده در حوضهٔ آبخیز کن پرداخت. نتایج نشان داد بیش از ۸۰٪ از حجم عملیات مکانیکی پیشنهادشده برای حوضه اجرا شده است و در مواردی شاهد نامناسب‌بودن مکان پیشنهادی، عدم انطباق بین مکان سازه‌های ساخته‌شده و مکان‌های پیشنهادشده و عدم رعایت استانداردهای لازم در ساخت سازه‌ها بوده‌اند که ضعف نظارت و ارزیابی پروژه را از دلایل مهمّ این مشکلات برشمرده‌اند.

روغنی و همکاران (۲۰۰۷)، به ارزیابی تأثیر عملیات آبخیزداری بر روی میزان ذخیرهٔ رواناب، کاهش

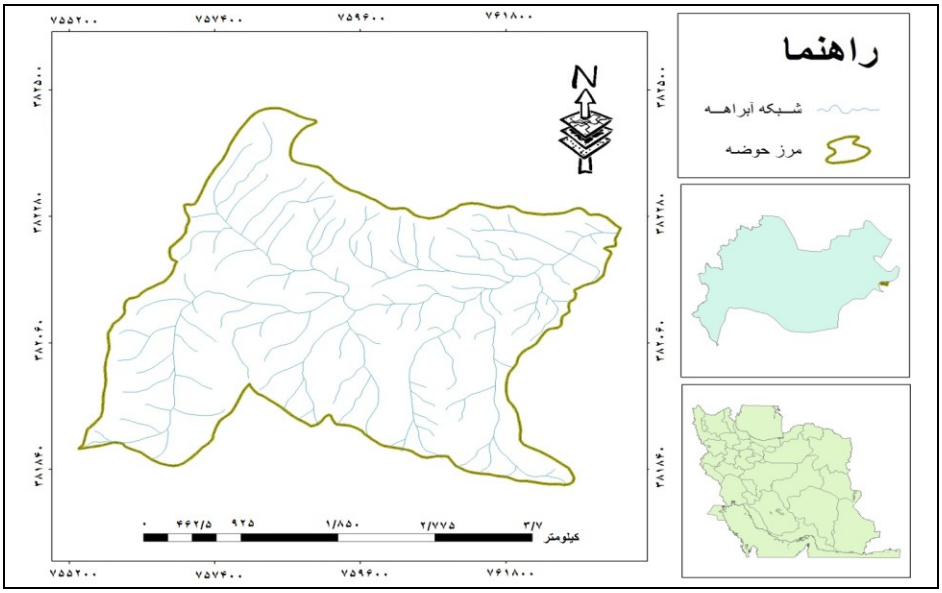
1- Jons
2- Friesecke
3- Brooks
4- Shieh

سیلاب و سیل‌خیزی حوضهٔ حیدری در استان چهارمحال پرداخت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سازه‌های احداث‌شده در حدود ۱۳۰۶۷ مترمکعب، ضمن ذخیرهٔ رواناب و تأثیر بر نفوذ عمقی جریان رواناب، قادر به کنترل سیلابی با دورهٔ بازگشت حدود ۵۰ سال است. یثربی و همکاران (۱۳۸۹)، مطالعه‌ای روی اثرات کمّی اقدامات آبخیزداری بر روی حوضهٔ آبخیز گل‌گل در استان ایلام انجام دادند. در ارزیابی کمّی از پارامترهای میانگین متحرّک، منحنی تداوم جریان و بررسی رژیم هیدرولوژیکی استفاده نمودند.

رئیسیان (۱۳۸۳) تأثیر عملیات مکانیکی آبخیزداری را در حوضهٔ آبخیز هرچگان، واقع در شمال استان چهارمحال و بختیاری مورد بررسی قرار داد نتایج نشان می‌دهند که با توجّه به اندازه‌گیری دبی ورودی و خروجی از بندهای احداث‌شده اختلاف این دو مقدار یعنی ۱۴۲/۸ لیتر در ثانیه از آب‌های ورودی به مخازن بندها در طول آبراهه نفوذ نموده است که این میزان آب حداقل در طول یکصد روز از سال در این بخش از آبراهه جاری است. در پژوهش حاضر، میزان اثرگذاری عملیات آبخیزداری انجام‌شده بر کاهش سیل‌خیزی به صورت کمّی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. با آگاهی از نحوهٔ تأثیرگذاری عملیات، پیشنهادهای لازم به منظور ارائهٔ راهکارهای کاربردی در نحوهٔ بهره‌برداری از منابع آب‌وخاک حوضه و بهینه‌سازی عملیات آبخیزداری ارائه خواهد گردید.

مواد و روش‌ها

حوضهٔ حاجی‌آباد با مساحت ۲۸۹۶/۷۶۰ هکتار یکی از سرشاخه‌های کوچک رودخانهٔ گاماسیاب از زیرحوضه‌های حوضهٔ آبخیز کرخه است که در غرب کشور استان کرمانشاه، شهرستان کنگاور واقع شده است. از نظر موقعیّت جغرافیایی این حوضه بین ″۳۰، (۴۶ و °۴۷ تا ″۳۰، ′۵۲ و °۴۷ طول شرقی و ″۰۰، ′۲۸ و °۳۴ تا ″۰۰، ′۳۲ و °۳۴ عرض شمالی واقع شده است. حداکثر ارتفاع در داخل حوضه ۲۳۹۰ متر و حداقل آن ۱۵۳۶ متر در خروجی می‌باشد. نقشهٔ حوضه در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. موقعیّت حوضهٔ حاجی‌آباد

مشکل اساسی در برآورد آبدهی حوضه‌های آبخیز نبود ایستگاه‌های آب‌سنجی در خروجی حوضه است که هیدرولوژیست‌ها را ناگزیر به استفاده از روش‌های تجربی برای برآورد آبدهی حوضه‌ها می‌نماید. برای برآورد

پتانسیل آبدهی در حوضهٔ حاجی‌آباد از اطّلاعات دمای متوسّط، بارندگی متوسّط و آبدهی تطویل‌شدهٔ رودخانه‌های قره‌سو، گاماسیاب، صحنه، هرسین، دینور، جامیشان و مریم‌نگار و همچنین کاربرد روابط تجربی جاستن، رابطهٔ دبی ویژه - مساحت حوضه استفاده شد و نهایتاً روش جاستین برای محاسبهٔ آبدهی زیرحوضه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

بیلان آب در یک حوضهٔ آبخیز تابع فاکتورهای متعدّد آب و هوایی و فیزیکی و خصوصیات خاک به‌ویژه فیزیک خاک و اطّلاعات در زمینه آب‌های زیرزمینی و... است. در آبخیزداری بیلان هیدرولوژیکی یک حوضهٔ آبخیز هدف دستیابی به روشی است که تعیین نماید ریزش‌های جوی سالانه در سطح حوضهٔ آبخیز به چه مؤلّفه‌هایی و به چه میزانی تبدیل می‌شوند. خلاصه بیلان هیدرولوژیکی محاسبه‌شده در مطالعات آبخیزداری حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد و زیرحوضه‌های آن به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱. خلاصه بیلان آبی واحدهای مطالعاتی حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد

زیرحوضه	بارش (P)	جریان متوسّط حوضه (R+G)	تبخیر و تعرّق واقعی (ET)
H1	۰/۴۰	۰/۲۱	۰/۱۸
H2	۱/۵۵	۱/۰۵	۰/۵۰
H3	۱/۲۰	۰/۸۱	۰/۳۹
H4	۱/۷۲	۱/۰۸	۰/۶۴
H5-1	۲/۴۳	۱/۳۸	۱/۰۴
H5	۳/۸۳	۲/۱۱	۱/۷۲
H6-1	۱/۴۲	۰/۶۷	۰/۷۵
H6	۲/۸۵	۱/۳۲	۱/۵۳
H7	۱/۰۳	۰/۵۷	۰/۴۷
H8	۰/۳۵	۰/۱۹	۰/۱۶
کلّ حوضه	۱۴/۶۶	۷/۶۷	۶/۹۹

برای برآورد مقادیر حداکثر سیلاب ناشی از بارندگی در حوضهٔ حاجی‌آباد از روش‌های تجربی استدلالی، روش S.C.S (روش CN) و تجزیه و تحلیل منطقه‌ای سیلاب استفاده شد. زمان تمرکز، زمانی است که طی آن، جریان رواناب فرصت می‌کند تا از بالاترین منطقهٔ حوضهٔ آبخیز به نقطهٔ خروجی حوضه برسد. این فرض وجود دارد که اگر مدّت رگبار مساوی با زمان تمرکز حوضهٔ آبخیز باشد در این صورت جریان رواناب تولیدی از کلّ حوضه هم‌زمان از خروجی آن می‌گذرد و در نتیجه بیشترین بده خروجی در چنین شرایطی مشاهده خواهد شد. فرمول‌های زیادی جهت برآورد زمان تمرکز پیشنهاد گردیده که اغلب بر اساس دو عامل طول آبراههٔ اصلی و شیب آن در نظر گرفته شده است. برای حوضه‌های کوهستانی کوچک عموماً فرمول کرپیچ مورد استفاده قرار می‌گیرد که در رابطهٔ ۱ آمده است.

$$Tc = 0.949(\frac{L^3}{H})^{0.385}$$ رابطهٔ ۱

که در آن، Tc: زمان تمرکز (ساعت)، H: اختلاف ارتفاع بین نقطهٔ تمرکز و بلندترین قسمت حوضه (متر)، L: طول مسیر حرکت آب آبراهه یا رودخانه در داخل واحد هیدرولوژیک یا حوضهٔ آبخیز (کیلومتر).

در محدودهٔ طرح مورد مطالعه از آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلّق به سازمان هواشناسی که دارای آمار روزانه است و ایستگاه آب‌سنجی حاجی‌آباد به عنوان خروجی حوضه استفاده شد و آمار این ایستگاه‌ها جهت

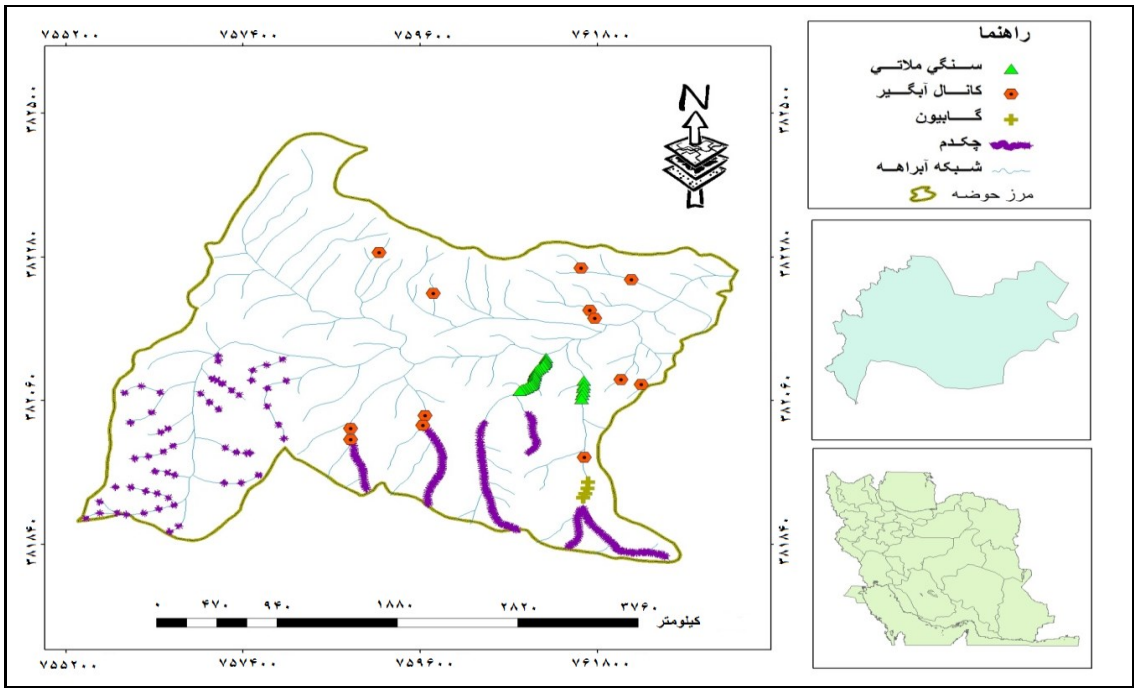
ورودی برنامه شبیه‌سازی HEC-HMS مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا، با بررسی آمار بارش روزانه و سیلاب از آذر ۱۳۹۰ تا اردیبهشت ۱۳۹۲ کلّیهٔ وقایع سیلاب و بارش هم‌زمان با آن استخراج شد. با توجّه به اطّلاعات قابل دسترس جهت استخراج پارامترهای مورد نیاز محاسبهٔ تلفات اوّلیّه، از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شد. پارامتری که در این روش به منظور محاسبهٔ رواناب تولیدی در سطح حوضه بایستی به مدل وارد شود، زمان تأخیر است. زمان تأخیر حوضه عبارت از فاصلهٔ زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و زمان دبی اوج در هیدروگراف واحد است.

در این پژوهش، با در نظرگرفتن اطّلاعات قابل دسترس، روش هیتوگراف سفارشی به کار رفته است. از این روش جهت معرّفی هیتوگراف‌های ثبت‌شدهٔ بارندگی و ایستگاه باران‌سنجی به مدل استفاده می‌شود. در مطالعاتی که در زمینهٔ بارش و رواناب حاصل از آن در سطح یک حوضه انجام می‌شود، انتخاب بارشی که در حوضهٔ مورد نظر دارای توزیع مناسبی باشد و سطح حوضه را به طور کامل پوشش دهد، بسیار مهم است. در این پژوهش، پس از بررسی ۶ واقعهٔ بارش انتخاب‌شده به صورت بارش‌های دوره‌ای، به طور تصادفی با چهار واقعهٔ بارش، شبیه‌سازی مدل و با دو واقعهٔ دیگر، اعتباریابی مدل انجام شده است. مشخّصه‌های کنترل در کنار مدل حوضه و مدل هواشناسی یکی دیگر از مؤلّفه‌های لازم برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌ها در نرم‌افزار HEC-HMS است. تاریخ و ساعت شروع و اتمام یک سناریو، همچنین گام زمانی در این بخش معرّفی می‌شود. کنترل محدودهٔ زمانی شبیه‌سازی توسّط مؤلّفهٔ مشخّصهٔ کنترل، انجام می‌پذیرد. این مؤلّفه، شامل زمان‌های شروع و پایان تحلیل و گام‌های زمانی محاسبات است. گام زمانی در نظر گرفته‌شده برای حوضه ۲۴ ساعت منظور گردید. جهت شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب در مدل هیدرولوژیکی نیاز است که پارامترها به مدل وارد گردند. پس از واردکردن پارامترهای محاسبه‌شده و معرّفی کامل مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخّصه‌های کنترل به محیط نرم‌افزار HEC-HMS می‌توان محاسبات هیدرولوژیکی را توسّط برنامه آغاز کرد و پس از تجزیه و تحلیل داده‌های وارده به نرم‌افزار و پایان یافتن کلّیهٔ محاسبات می‌توان برای هر واقعهٔ بارندگی اشکال متنوّعی از نتایج را مشاهده کرد. در استفاده از مدل HEC-HMS یکی از مراحل کار تحلیل روابط بارش - رواناب و کالیبراسیون پارامترهای مورد استفاده در مدل است. در فرایند مدل‌سازی پس از ورود پارامترها به مدل و شبیه‌سازی اوّلیّهٔ هیدروگراف‌ها، نتایج حاصل از اوّلین اجرای پروژه توسّط فرایندی به نام واسنجی یا کالیبراسیون قابل بهینه‌سازی است. طی این فرایند، مقادیر پارامترهای معرّفی‌شده به مدل با هدف دسترسی به نتایج همگون با داده‌های واقعی و طبیعی، تصحیح خواهند شد. پس از انجام واسنجی مدل و به دست آمدن مقادیر جدید و بهینه‌شده برای پارامترهای مورد استفاده در مدل، نوبت به بررسی صحّت پارامترهای جدید می‌رسد که بدین منظور از دو واقعهٔ بارش دیگر استفاده شده است. پس از ورود پارامترهای جدید به مدل، هیدروگراف مربوط به دو واقعهٔ بارش جدید محاسبه و شبیه‌سازی می‌شوند، چنانچه هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده از نظر مقدار دبی اوج نزدیک باشند، نشان‌دهندهٔ صحّت مقادیر پارامترهای واسنجی‌شده است و می‌توان از مقادیر واسنجی‌شده پارامترها به عنوان مقادیر مورد استفاده در مدل نهایی بارش - رواناب استفاده کرد.

نتایج و بحث

طبق بررسی‌های انجام‌شده و بازدیدهای مکرّر میدانی، معلوم شد که در سال‌های گذشته، تعداد ۱۶۷ عدد بند اصلاحی خشکه‌چین (به روش خربزهٔ چینی)، تعداد ۴ بند اصلاحی توری‌سنگی و تعداد ۱۱۰ مورد کانال

خاکی با هدف ذخیره‌سازی رواناب و کنترل سیلاب در حوضهٔ حاجی‌آباد توسّط ادارهٔ آبخیزداری استان کرمانشاه احداث شده است. در این پژوهش، نقش سازه‌ها در کاهش سیلاب حوضه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۲ سازه‌های موجود در حوضه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نقشهٔ سازه‌های اجراشده در حوضهٔ حاجی‌آباد

نهایتاً روش SCS برای تعیین شمارهٔ منحنی رواناب، مناسب‌تر تشخیص داده شد و مورد استفاده قرار گرفت. بر همین مبنا، مقادیر شمارهٔ منحنی در هر یک از واحدهای هیدرولوژیک حوضه در وضعیّت رطوبتی متوسّط برآورد شد که نتایج آن به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲. مقادیر CN در حوضهٔ حاجی‌آباد در سه وضعیّت رطوبتی

زیرحوضه	CN I	CN II	CN III
H1	۷۳	۸۷	۹۵
H2	۸۰	۹۱	۹۷
H3	۶۷	۸۳	۹۳
H4	۷۳	۸۷	۹۵
H5-1	۶۲	۷۹	۹۱
H5	۶۴	۸۱	۹۲
H6-1	۶۸	۸۴	۹۳
H6	۶۷	۸۳	۹۳
H7	۶۳	۸۰	۹۱
H8	۵۷	۷۵	۸۸
کلّ حوضه	۶۷	۸۳	۹۳

جدول ۳ میزان ارتفاع رواناب و حجم رواناب سالیانهٔ حوضهٔ حاجی‌آباد را به روش دبی - سطح و جدول ۴ برآورد این مقادیر را به روش نقطه‌ای نشان می‌دهد. مقادیر زمان تمرکز واحدهای هیدرولوژیک حوضهٔ حاجی‌آباد از رابطهٔ کرپیچ محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۳. برآورد مقادیر آبدهی و ضریب رواناب با استفاده از رابطهٔ دبی - سطح

واحد مطالعاتی	مساحت (km^2)	دبی ($m3/s$)	ارتفاع رواناب (mm)	میانگین بارش سالانه (mm)	ضریب رواناب (٪)
H2	۲/۸۶	۰/۰۱۶	۱۷۶/۹۳	۵۴۲	۳۴/۶۷
H3	۲/۲۵	۰/۰۱۳	۱۸۱/۰۵	۵۳۵	۳۳/۸۵
H4	۳/۲۳	۰/۰۱۸	۱۷۴/۹۱	۵۳۳	۳۲/۸۰
H5-1	۴/۶۴	۰/۰۲۵	۱۶۸/۹۷	۵۲۳	۳۲/۳۲
H5	۷/۴۳	۰/۰۳۸	۱۶۱/۵۷	۵۱۶	۳۱/۳۳
H6-1	۲/۸۴	۰/۰۱۶	۱۷۶/۹۴	۴۹۸	۳۵/۵۴
H6	۵/۷۵	۰/۰۳۰	۱۶۵/۵۶	۴۹۶	۳۳/۴۰
H7	۲/۱۱	۰/۰۱۳	۱۸۲/۱۱	۴۸۹	۳۷/۲۴
H8	۰/۷۵	۰/۰۰۵	۲۰۱/۰۴	۴۶۶	۴۳/۱۷
کلّ حوضه	۲۸/۹۷	۰/۱۳	۱۴۱/۹۶	۵۰۶	۲۸/۰۶

جدول ۴. برآورد مقادیر آبدهی در واحدهای آبخیز حاجی‌آباد با استفاده از روش نقطه‌ای

زیرحوضه	مساحت (km^2)	میانگین بارش سالانه (mm)	حجم بارندگی سالانه (MCM)	حجم میانگین آبدهی سالانه (MCM)	دبی (m^3/s)	ارتفاع رواناب (mm)	ضریب رواناب (٪)
H1	۰/۸۵	۴۶۴	۰/۳۹۶	۰/۱۵۴	۰/۰۰۵	۱۸۱	۳۹
H2	۲/۸۶	۵۴۲	۱/۵۴۹	۰/۶۰۴	۰/۰۱۹	۲۱۱	۳۹
H3	۲/۲۵	۵۳۵	۱/۲۰۱	۰/۴۶۸	۰/۰۱۵	۲۰۹	۳۹
H4	۳/۲۳	۵۳۳	۱/۷۲۱	۰/۶۷۱	۰/۰۲۱	۲۰۸	۳۹
H5-1	۴/۶۴	۵۲۳	۲/۴۲۵	۰/۹۴۶	۰/۰۳۰	۲۰۴	۳۹
H5	۷/۴۳	۵۱۶	۳/۸۳۲	۱/۴۹۵	۰/۰۴۷	۲۰۱	۳۹
H6-1	۲/۸۴	۴۹۸	۱/۴۲۳	۰/۵۵۵	۰/۰۱۸	۱۹۴	۳۹
H6	۵/۷۵	۴۹۶	۲/۸۵۰	۱/۱۱۱	۰/۰۳۵	۱۹۳	۳۹
H7	۲/۱۱	۴۸۹	۱/۰۳۳	۰/۴۰۳	۰/۰۱۳	۱۹۱	۳۹
H8	۰/۷۵	۴۶۶	۰/۳۴۸	۰/۱۳۶	۰/۰۰۴	۱۸۲	۳۹
کلّ حوضه	۲۸/۹۷	۵۰۶	۱۴/۶۵۸	۵/۷۱۶	۰/۱۸۱	۱۹۷	۳۹

جدول ۵. مقادیر زمان تمرکز واحدهای هیدرولوژیک حوضهٔ حاجی‌آباد از رابطهٔ کرپیچ

زیرحوضه	ارتفاع خروج (m)	ارتفاع مبدأ آبراهه (m)	اختلاف ارتفاع بالا و پایین حوضه (mm)	طول آبراههٔ اصلی (km)	زمان تمرکز (hr)	زمان تمرکز (min)
H1	۱۵۸۶	۱۹۸۶	۴۰۰	۱/۳	۰/۱۳	۷/۶
H2	۱۶۳۶	۲۳۹۰	۷۵۴	۴/۱	۰/۳۸	۲۲/۷
H3	۱۶۷۴	۲۳۹۰	۷۱۶	۳/۳	۰/۳۰	۱۷/۹
H4	۱۷۹۶	۲۳۷۰	۵۷۴	۲/۵	۰/۲۳	۱۳/۹
H5-1	۱۸۶۴	۲۳۰۵	۴۴۱	۳/۵	۰/۳۸	۲۲/۸
H5	۱۸۰۲	۲۳۰۵	۵۰۳	۶/۲	۰/۷۱	۴۲/۷
H6-1	۱۸۳۰	۱۹۸۹	۱۵۹	۲/۶	۰/۴۱	۲۴/۷
H6	۱۸۰۲	۲۰۱۰	۲۰۸	۴/۷	۰/۷۳	۴۳/۷
H7	۱۵۹۸	۲۰۲۷	۴۲۹	۳/۵	۰/۳۹	۲۳/۷
H8	۱۵۷۶	۱۹۳۰	۳۵۴	۱/۷	۰/۱۸	۱۱
کلّ حوضه	۱۵۳۶	۲۳۹۰	۸۵۴	۱۱/۱	۱/۱۴	۶۸/۳

برآورد سیلاب

هرچند روی رودخانه‌های اصلی کشور ایستگاه‌های اندازه‌گیری و ثبت داده‌های سیل وجود دارد ولی بیشتر رودخانه‌های کوچک و آبراهه‌ها فاقد آمار اندازه‌گیری بوده و همین امر کالیبراسیون مدل‌های برآورد سیل را محدود می‌سازد. در روش موسوم به سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) که از جامعیّت بیشتری برخوردار است به جای استفاده از آمار ثبت‌شدهٔ سیل از آمار بارندگی استفاده می‌شود؛ زیرا در بیشتر موارد، شبکهٔ ایستگاه‌های هواشناسی متراکم‌تر از شبکهٔ ایستگاه‌های هیدرومتری مجهّز به تجهیزات ثبت سیلاب بوده و اگر آمار سیل در اختیار نباشد حداقل آمار بارندگی در منطقهٔ مورد نظر وجود خواهد داشت. از دیگر سو، طی بازدیدی که از حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد و نیز مقاطع مختلف خروجی هریک از زیرحوضه‌ها به عمل آمد، مقادیر بده حداکثر حاصل از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا، تقریب نزدیک‌تری را به واقعیّت منطقه ارائه کرده است. از این رو، استفاده از نتایج حاصل از این روش برای سایر بخش‌ها به‌ویژه برای بخش طرّاحی سازه‌های مورد نیاز محدودهٔ مطالعاتی توصیه می‌گردد. مقادیر دبی سیلاب در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. مقادیر دبی سیلاب از روش SCS به مترمکعب بر ثانیه

زیرحوضه	دورهٔ بازگشت به سال					
	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
H1	۳/۹۹	۸/۲۵	۱۱/۳۶	۱۵/۴۵	۱۸/۵۵	۲۱/۶۵
H2	۱۲/۲۱	۲۱/۲۰	۲۷/۵۱	۳۵/۶۵	۴۱/۹۳	۴۸/۲۸
H3	۴/۵۴	۱۰/۰۸	۱۴/۴۷	۲۰/۶۳	۲۵/۴۴	۳/۳۸
H4	۱۰/۹۳	۲۲/۱۴	۳۰/۴۶	۴۱/۵۰	۴۹/۹۴	۵۸/۴۶
H5-1	۶/۷۴	۱۵/۹۸	۲۳/۵۴	۳۴/۲۰	۴۲/۶۲	۵۱/۳۰
H5	۱۲/۱۷	۲۴/۸۶	۳۴/۵۷	۴۷/۹۳	۵۸/۴۳	۶۹/۱۳
H6-1	۶/۹۳	۱۴/۲۳	۱۹/۶۹	۲۶/۹۶	۳۲/۶۶	۳۸/۶۳
H6	۱۴/۹۳	۲۸/۸۸	۳۹/۳۸	۵۳/۶۸	۶۴/۷۹	۷۶/۰۶
H7	۸/۵۶	۱۹/۹۲	۲۹/۰۱	۴۱/۵۷	۵۱/۴۳	۶۱/۵۶
H8	۰/۷۸	۲/۲۷	۳/۷۱	۵/۹۱	۷/۶۸	۹/۵۲
کلّ حوضه	۵۱/۳۱	۹۶/۵۳	۱۲۹/۶۵	۱۷۳/۱۸	۲۰۶/۲۳	۲۳۹/۴۹

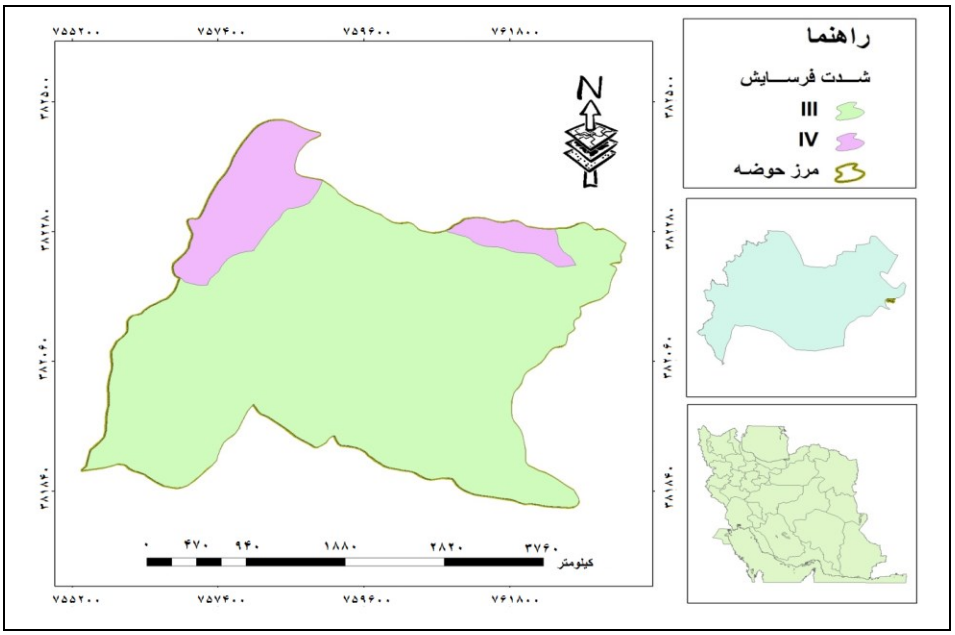
میزان فرسایش و رسوب حوضه

حجم کلّ رسوب سالیانهٔ حوضهٔ حاجی‌آباد حدود ۱۰۷۱۲/۱۱ تن برآورد شده است و میزان رسوب ویژهٔ حوضه ۹۵۹/۱۰ تن در کیلومترمربع در سال است. در یک جمع‌بندی کلّی می‌توان گفت اراضی آبی در این حوضه بیشترین رسوب و فرسایش ویژه را موجب می‌گردند؛ بنابراین لازم است تا با رعایت اصول کشت آبی در حوضه به‌ویژه بالادست در جهت کنترل فرسایش و تولید رسوب اقدام نمود. همچنین شیب و رواناب یکی دیگر از عوامل ایجاد فرسایش خاک در حوضهٔ مورد بررسی محسوب می‌شوند. مقادیر فرسایش و رسوب در جدول ۷ و نقشهٔ شدّت فرسایش در شکل ۳ ارائه شده است.

ابتدا هیدروگراف‌های مشاهداتی منتخب در محیط نرم‌افزار HEC-HMS شبیه‌سازی شدند. مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، تفاوت زیادی بین این دو هیدروگراف چه از نظر ابعاد هیدروگراف و چه از نظر مقدار دبی اوج، نشان می‌داد، از این رو، در مرحلهٔ بعد، پارامترهای مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی کالیبره گردیدند.

جدول ۷. رسوب و فرسایش ویژه و کلّ هر یک از واحدهای کاری

واحد هیدرولوژیکی	مساحت (ml^2)	ضریب رسوب‌دهی (SDR%)	رسوب ویژه (m3/Km2/y)	فرسایش ویژه (m3/Km2/y)	وزن مخصوص خاک	رسوب ویژه (ton/km2/y)	فرسایش ویژه (ton/km2/y)	رسوب کل (ton/y)	فرسایش کل (ton/y)
h1	۰/۳۳	۶۳/۵۹	۲۷۵/۶۸	۴۳۳/۵۳	۱/۱۴	۳۱۴/۲۷	۴۹۴/۲۳	۲۶۷/۸۶	۴۲۱/۲۵
h2	۱/۱	۵۳/۵۵	۳۳۹/۵۲	۶۳۴/۰۲	۱/۱۲	۳۸۰/۲۶	۷۱۰/۱۱	۱۰۸۷/۶۶	۲۰۳۱/۱۱
h3	۰/۸۶	۵۵/۴۲	۳۱۹/۴۱	۵۷۶/۳۴	۱/۱۲	۳۵۷/۷۳	۶۴۵/۵۰	۸۰۳/۱۴	۱۴۴۹/۲۰
h4	۱/۲۴	۵۲/۶۵	۳۶۶/۴۲	۶۹۵/۹۵	۱/۱۲	۴۱۰/۳۹	۷۷۹/۴۷	۱۳۲۴/۱۹	۲۵۱۵/۰۷
h5-1	۰/۷۹	۵۰	۳۴۰/۶۰	۶۸۱/۲۰	۱/۱۲	۳۸۱/۴۷	۷۶۲/۹۴	۱۷۶۹/۷۵	۳۵۳۹/۵۱
h5-int	۱/۰۱	۵۳/۷۴	۳۰۹/۷۵	۵۷۶/۳۸	۱/۱۳	۳۵۰/۰۱	۶۵۱/۳۱	۹۷۷/۲۵	۱۸۱۸/۴۸
h5	۲/۸	۴۶/۷۷	۳۲۹/۳۷	۷۰۴/۲۳	۱/۱۲	۳۶۸/۸۹	۷۸۸/۷۳	۲۷۰۸/۱۵	۵۷۹۰/۳۶
h6-1	۱/۱۰	۵۳/۵۶	۲۴۳/۳	۴۵۴/۲۶	۱/۱۳	۲۷۴/۹۳	۵۱۳/۳۱	۷۸۵/۹۷	۱۴۶۷/۴۶
h6-int	۱/۱۱	۵۳/۴۸	۲۶۰/۷۳	۴۸۷/۵۳	۱/۱۴	۲۹۷/۲۳	۵۵۵/۷۸	۸۵۸/۸۶	۱۶۰۵/۹۵
h6	۲/۲۱	۴۸/۵	۲۵۳/۵۶	۵۲۲/۸۱	۱/۱۴	۲۸۹/۰۶	۵۹۶	۱۶۶۱/۶۱	۳۴۲۵/۹۹
h7	۰/۸۱	۵۵/۹۱	۲۸۰/۴۹	۵۰۱/۶۹	۱/۱۲	۳۱۴/۱۵	۵۶۱/۸۹	۶۶۳/۴۴	۱۱۸۶/۶۲
h8	۰/۲۸	۶۴/۸	۲۵۲/۸۴	۳۹۰/۱۹	۱/۱۱	۲۸۰/۶	۴۳۳/۱۱	۲۰۹/۴۸	۳۲۳/۲۷۹
h-int	۱/۴۴	۵۱/۵۴	۳۱۰/۱۸	۶۰۱/۸۳	۱/۱۳	۳۵۰/۵۰	۶۸۰/۰۷	۱۳۱۲/۸۳	۲۵۴۷/۲۱
کلّ حوضه	۱۱/۱۸	۳۸/۵۶	۳۲۷/۲۸	۸۴۸/۷۶	۱/۱۳	۳۶۹/۸۳	۹۵۹/۱۰	۱۰۷۱۳/۱۱	۲۷۷۸۲/۹۰



شکل ۳. شدّت فرسایش در حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد

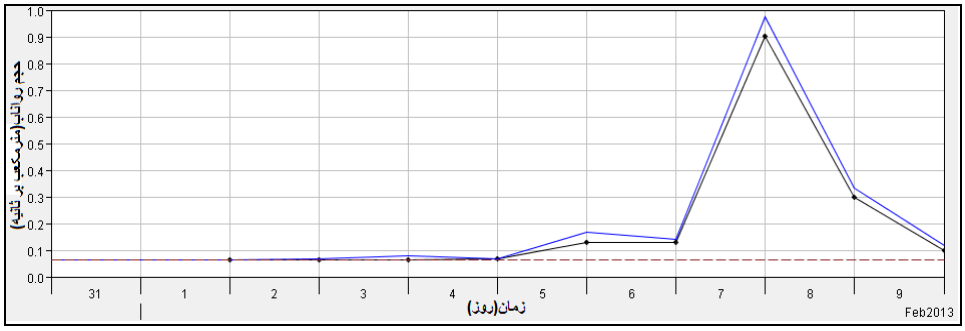
کالیبراسیون مدل و بهینه‌سازی پارامترها

نتایج کار نشان می‌دهد که با مساحت کلّ حوضه در شبیه‌سازی مدل به اعداد قابل قبول نخواهیم رسید. دلیل آن نیز اینکه در سیلاب‌های واقع‌شده و اندازه‌گیری‌شده در زیرحوضه‌ها به این نتیجه دست یافتیم که تمام زیرحوضه‌ها در ایجاد رواناب کلّی حوضه نقش نداشته و فقط تعدادی از آنها رواناب مؤثّر تولید می‌نمایند. در اندازه‌گیری‌های انجام‌شدهٔ زیرحوضه‌های H-int, H1, H5-int, H6-1, H6-int, H7, H8 در بارش‌های اتّفاق افتاده تولید رواناب نموده‌اند و بقیهٔ زیرحوضه‌ها هرچند بارش‌های مناسبی اتّفاق افتاده، به دلیل اجرای عملیات‌های آبخیزداری شامل احداث خشکه‌چین، گابیون و بند خاکی نقشی در تولید رواناب ایجاد نکرده‌اند. برای اصلاح این مورد، اگر مساحت زیرحوضه‌های مولّد سیلاب به عنوان مساحت مؤثّر (۱۳,۱۷ کیلومترمربع)

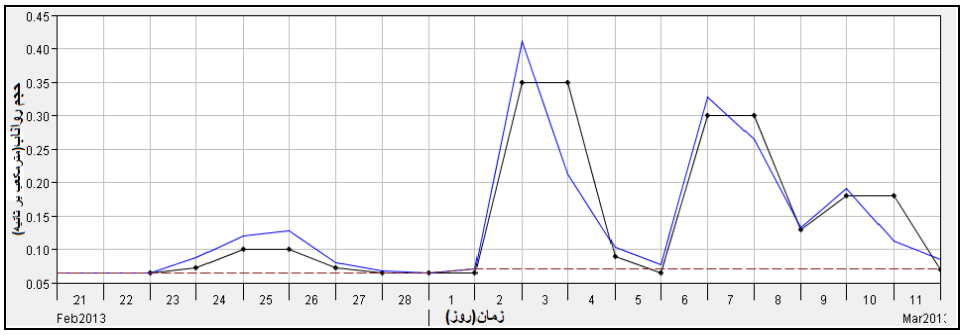
تولید رواناب به مدل داده شود نتایج شبیه‌سازی‌شده به اندازه‌گیری‌شده بسیار نزدیک می‌گردد؛ بنابراین، ادامهٔ تحقیق با این فرض که مساحت حوضه ۱۳,۱۷ کیلومترمربع است ادامه پیدا کرده است. نتایج حاصل از کالیبراسیون در جدول ۸ و شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ ارائه شده است.

جدول ۸. نتایج حاصل از واسنجی مدل HEC-HMS در ایستگاه حاجی‌آباد

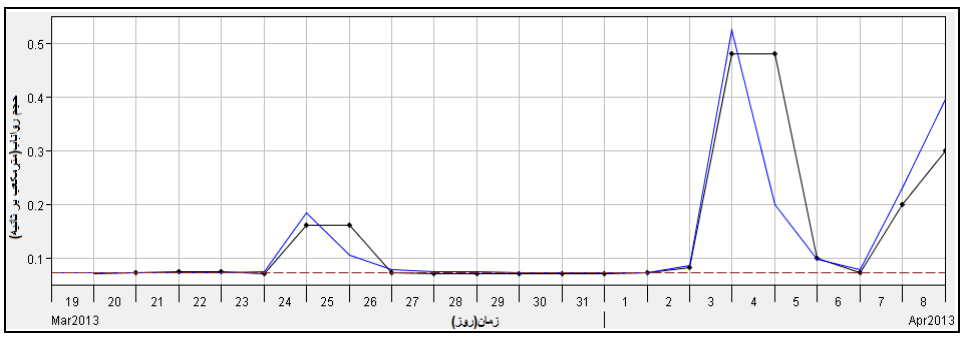
ایستگاه	مقدار بارش (mm)	تاریخ وقوع بارش	دبی محاسباتی (m^3/s)	حجم محاسباتی (mm)	CN	Ia (mm)	T Lag (hr)	دبی مشاهداتی (m^3/s)	حجم مشاهداتی (mm)
حاجی‌آباد	۲۴/۹	۲۰۱۳/۰۲/۰۱ تا ۲۰۱۳/۰۲/۱۰	۱	۱۳/۴۷	۷۶	۱۵/۶	۶/۹	۰/۹	۱۲/۰۳
	۱۴/۹	۲۰۱۳/۰۲/۲۱ تا ۲۰۱۳/۰۳/۱۲	۰/۴	۱۷/۳۹	۷۶	۱۵/۶	۶/۹	۰/۳۵	۱۷/۳۴
	۱۳/۳	۲۰۱۳/۰۳/۱۹ تا ۲۰۱۳/۰۴/۰۹	۰/۵	۱۷/۱۱	۷۶	۱۵/۶	۶/۹	۰/۴۸	۱۷/۰۱
	۱۲/۶	۲۰۱۳/۰۵/۰۸ تا ۲۰۱۳/۰۵/۱۸	۰/۴	۱۱/۶۴	۷۶	۱۵/۶	۶/۹	۰/۳۳	۱۰/۶۱



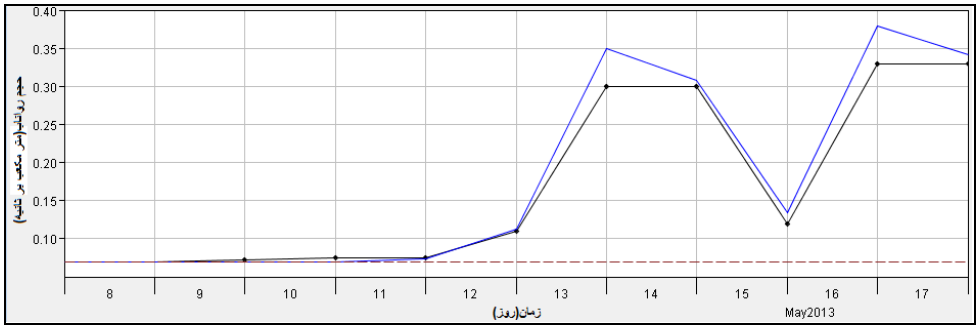
شکل ۴. هیدروگراف‌های کالیبره‌شدهٔ ۲۰۱۳/۰۲/۰۱



شکل ۵. هیدروگراف‌های کالیبره‌شدهٔ ۲۰۱۳/۰۲/۲۱



شکل ۶. هیدروگراف‌های کالیبره‌شدهٔ ۲۰۱۳/۰۳/۱۹



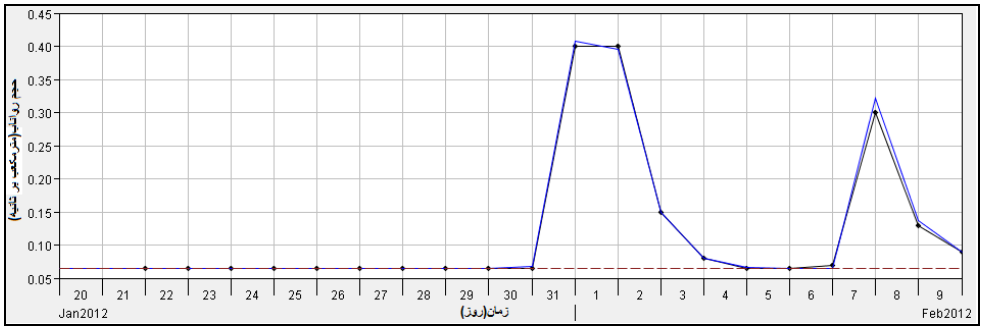
شکل ۷. هیدروگراف‌های کالیبره‌شدهٔ ۲۰۱۳/۰۵/۰۸

اعتباریابی مدل

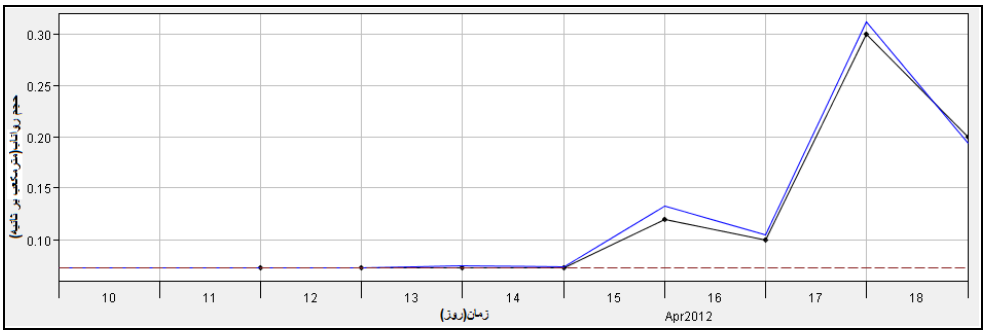
جدول ۹ تاریخ وقوع رگبارهای مورد استفاده برای اعتباریابی مدل و مقادیر پارامترهای هیدروگراف‌های مشاهده‌شده و محاسبه‌شده طی دو رگبار مورد استفاده در واسنجی مدل را نشان می‌دهد. شکل‌های ۸ و ۹ آب‌نمود سیل اعتباریابی‌شده را نشان می‌دهد.

جدول ۹. نتایج حاصل از اعتباریابی مدل HEC-HMS در ایستگاه حاجی‌آباد

ایستگاه	تاریخ وقوع بارش	دبی مشاهداتی (m^3/s)	حجم مشاهداتی (mm)	دبی محاسباتی (m^3/s)	حجم محاسباتی (mm)	CN	Ia (mm)	T Lag (hr)
حاجی‌آباد	۲۰۱۳/۰۱/۲۰ تا ۲۰۱۳/۰۲/۱۰	۰/۴	۱۶/۱۹	۰/۴	۱۵/۷۹	۷۶	۱۵/۶	۶/۹
	۲۰۱۳/۰۳/۱۰ تا ۲۰۱۳/۰۳/۱۸	۰/۳	۶/۸۸	۰/۳	۶/۴۶	۷۶	۱۵/۶	۶/۹



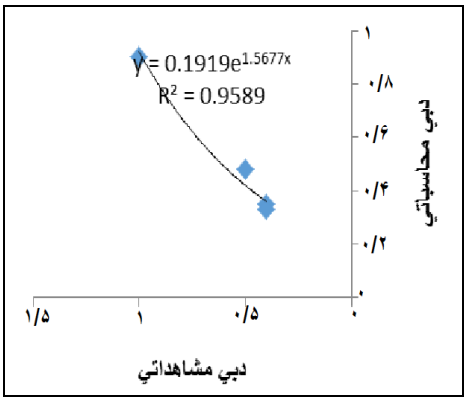
شکل ۸. هیدروگراف اعتباریابی‌شدهٔ ۲۰۱۳/۰۱/۲۰



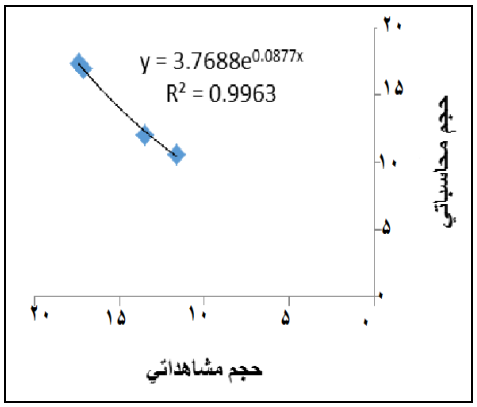
شکل ۹. هیدروگراف اعتباریابی‌شدهٔ ۲۰۱۳/۰۳/۱۰

شبیه‌سازی بارش رواناب برای پنج رویداد بارندگی که بیشترین مقدار را در طول مدّت اجرای طرح داشتند

انجام شد. واقعهٔ شمارهٔ ۱ مربوط به سال ۱۳۹۰ و وقایع ۲، ۳ و ۴ مربوط به سال ۱۳۹۱ است در بین رویدادهای ثبت‌شده، واقعهٔ ۱ با مدّت دوام ۳۶ ساعت و ارتفاع بارش ۲۴/۹ میلی‌متر، رواناب قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پنج واقعه و مقایسهٔ هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده نشان داد که مدل با همبستگی ۹۶٪ می‌تواند در شبیه‌سازی بارش رواناب حوضه عمل کند. نتایج در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۰. رابطهٔ دبی مشاهداتی و محاسباتی



شکل ۱۱. رابطهٔ حجم مشاهداتی و محاسباتی

نتیجه‌گیری

طبق بررسی‌های انجام‌شده و بازدیدهای مکرّر میدانی، حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد از نقطه‌نظر سیل‌خیزی کم‌سیل‌خیز بوده و اکثر رواناب‌های ایجادشده قبل از رسیدن به خروجی حوضه در زمین نفوذ می‌کنند. همچنین در پشت سازه‌های کنترل سیلاب احداث‌شده در حوضهٔ آبخیز حاجی‌آباد که شامل بند خاکی، خشکه‌چین و گابیون است، هیچ‌گونه انباشت رسوب دال بر ایجاد رواناب سطحی ملاحظه نگردید. این وضعیّت نشان می‌دهد که تعداد سازندهای احداث‌شده خیلی بیشتر از نیاز بوده است.

به طور کلّی بایستی توجّه داشت که هدف از انجام عملیات آبخیزداری به‌ویژه در پروژه‌های مرتبط با کنترل سیلاب، کاهش سیلاب تا حدّ صفر و آن‌هم در کلّیّهٔ سطوح حوضهٔ مدّنظر نیست؛ بلکه به‌کارگیری فعّالیّت‌های مکانیکی و بیولوژیکی در عملیات آبخیزداری بایستی حول محور اجتماعی و اقتصادی حوضه و در نظر داشتن کلّیّهٔ روابط موجود در حوضه انجام گیرد. بر این اساس، توصیه می‌شود تا حجم عملیات و گسترهٔ آن متناسب با شرایط کلّی حوضه صورت گیرد.

منابع

خلقی، مجید (۱۳۸۱) کاربرد روش MCDM در اولویّت‌بندی زیرحوضه‌ها به منظور کنترل سازه‌ای سیلاب، **مجلّهٔ منابع طبیعی ایران**، ۵۵ (۴)، صص. ۴۹۰-۴۷۹.

رئیسیان، روانبخش (۱۳۸۳) اثربخشی عملیات آبخیزداری در مهار آب‌های سطحی، **کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب‌وخاک**، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

سلطانی، محبوبه؛ اختصاصی، محمدرضا؛ طالبی، علی؛ پوراغنیایی، محمد جواد؛ سرسنگی، علیرضا (۱۳۹۰) اثر احداث سدهای اصلاحی بر کاهش دبی اوج سیلاب (مطالعهٔ موردی: حوزهٔ آبخیز منشاد یزد)، **نشریه پژوهش‌های آبخیزداری**، ۲۴ (۴)، صص. ۵۴-۴۶.

غفاری، گلاله؛ کریمی‌زاده، کیوان؛ حیدری؛ رنگین؛ احمدی، حسن (۱۳۹۰) بررسی سازه‌های گابیونی و سنگی ملاتی

احداث‌شده در حوضهٔ آبخیز کـن، **هفتمین همایش ملّی علوم و مهندسـی آبخیـزداری ایـران**، اصـفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان.

یثربی، بنفشه؛ نورمحمدی، فرهاد؛ ایزانلو، حسن (۱۳۸۹) ارزیابی کمّی اقدامات آبخیزداری حوضهٔ آبخیز گل‌گل استان ایلام، **ششمین همایش ملّی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران**،دانشگاه تربیت مدرّس.

Brooks, K. N., Folliott, P. F., Gregersen, H. M., Thames, J. L. (1991) **Hydrology and the Management of Watershed**, Lowa State University Press.

Friesecke, F. (2004) Precautionary and Sustainable Flood Protection in Germany – Strategies and Instruments of Spatial Planning, **3rd FIG Regional Conference. Jakarta, Indonesia**, October 3-7, pp.1-17.

Roughani, M., Ghafori, A., Tabatabai, M. (2007) An Innovative Methodology in Prioritization on Sub-Catchments for Flood Control, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 9 (1), pp. 79-87.

Saghafian, B., Julien, P. Y., Rajaie, H. (2002) Runoff Hydrograph Simulation Based on Time Variable Isochrones Technique, **Hydrology**, 261 (1-4), pp. 193-203.

Shieh, Ch. L., Guh, Y. R., Wang, Sh. O. (2007) The Application of Range of Variability Approach to the Assessment of a Check Dam on Riverine Habitat Alternation, **Environmental Geology**, 52 (3), pp. 427-435.