

پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۸  
صص. ۱۷-۳۳

## مدل‌سازی سیلاب در مناطق خشک و نیمه خشک با بهره‌گیری از مدل HEC-HMS مطالعه موردی (حوضه آبریز سد استقلال میناب)

معصومه اسدی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.  
ایرج جباری\* - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه.  
همایون حصادی - استادیار مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۲      تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۹/۲۸

### چکیده

مناطق خشک به لحاظ بارش‌های رگباری یکی از آسیب‌پذیرترین بخش‌های جهان از نظر وقوع سیلاب می‌باشند، که ویژگی‌های رگباری بارش پیش‌بینی سیلاب را در این مناطق دشوار می‌سازد. این پدیده در مناطق خشک و نیمه خشک ایران که داده‌های باران و رواناب ناقص می‌باشند شرایط پیش‌بینی را دشوارتر می‌گرداند. در این تحقیق حوضه آبریز سد میناب به عنوان نمونه‌ای از این مناطق، به دلیل دارا بودن داده‌ها، جهت شبیه‌سازی بارش - رواناب با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS انتخاب شده است. در فرآیند محاسبات مدل جهت محاسبه تلفات رواناب حوضه از روش SCS، جهت تبدیل فرآیند بارش مازاد به جریان سطحی از روش هیدروگراف واحد SCS، کلارک و اشنایدر و از مدل ثابت ماهانه برای محاسبه جریان پایه بهره گرفته شد. پارامترهای مدل بر اساس پنج هیدروگراف مشاهده‌ای مورد واسنجی و بر اساس دو هیدروگراف مشاهده‌ای دیگر اعتبارسنجی شد، که منجر به تنظیم پارامترهای حوضه آبریز گردید. تحلیل حساسیت مدل، نسبت به پارامترهای مختلف روش SCS نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به درصد اختلاف کمتر بین دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی روش هیدروگراف واحد SCS به عنوان روش مناسب برای حوضه مورد مطالعه تعیین شد. مقادیر RMSE برای هر سه مدل SCS، کلارک و اشنایدر به ترتیب برابر با ۳۵۳/۰، ۱۱۷/۷۵ و ۷۹/۶۲۰ می‌باشد. همچنین تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف نشان داد که تأثیرگذارترین عامل بر مدل به ترتیب CN با مقدار ۱/۵۹۱، تلفات اولیه با مقدار حساسیت ۱/۳۳۵ و زمان تاخیر با مقدار ۰/۸۱۳ می‌باشند.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی، HEC-HMS، سد استقلال میناب.

## مقدمه

وقوع سیلاب‌های ناگهانی از ویژگی‌های اصلی مناطق خشک می‌باشد. کشور ایران نیز به‌خاطر واقع شدن در منطقه خشک و نیمه خشک جهان از این قاعده مستثنی نیست به طوری که طی ۵۰ سال (۱۳۸۰-۱۳۳۰) تعداد ۳۷۰۰ مورد سیل حادثه‌خیز در آن به ثبت رسیده است (محمودیان و همکاران، ۱۳۸۱). این شرایط در مناطقی مانند استان هرمزگان قدری بحرانی‌تر است. برای مثال بر اثر بارندگی ۲۰ اسفند ۱۳۹۴ در یک روز ۱۱۰ میلیمتر بارندگی در شهرستان میناب ثبت شده و دو هزار میلیارد ریال خسارت وارد کرده است (خبرگزاری فارس ۱۳۹۴).

با توجه به اهمیت پیش‌بینی سیلاب در مطالعه و طراحی‌های هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آبی و اینکه پیش‌بینی سیلاب مستلزم نصب، راه‌اندازی و نگهداری از تجهیزات و سامانه ثبت سیلاب می‌باشد و بسیاری از حوضه‌های آبخیز کشور فاقد چنین امکاناتی هستند، استفاده از روش یا روش‌هایی که بتوان به کمک آن‌ها، میزان رواناب حاصل از بارندگی را در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص تخمین زد، از اهمیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد. به علاوه با توجه به رشد جمعیت و توسعه اجتماعی و اقتصادی و تغییرات آب و هوایی به علت تأثیر گرمایش جهانی، که سبب افزایش خسارات ناشی از سیل می‌گردد این امر اهمیت بیشتری می‌یابد. تا کنون مدل‌های زیادی جهت شبیه‌سازی بارش رواناب برای پیش‌بینی سیل مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. توسعه این مدل‌ها منجر به تولید مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل‌های کامپیوتری شده است. از جمله مدل‌های موفق در این زمینه، نرم‌افزار HEC-HMS است که بسیاری از محققین با بهره‌گیری از آن به پیش‌بینی سیلاب پرداخته‌اند. این مدل ابتدا در سال ۱۹۶۷ با عنوان مدل HEC-1 توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی موسسه تحقیقات آب هنگ مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا انتشار یافت و در سال ۱۹۹۴ جایگزین مدل HEC-1 شد.

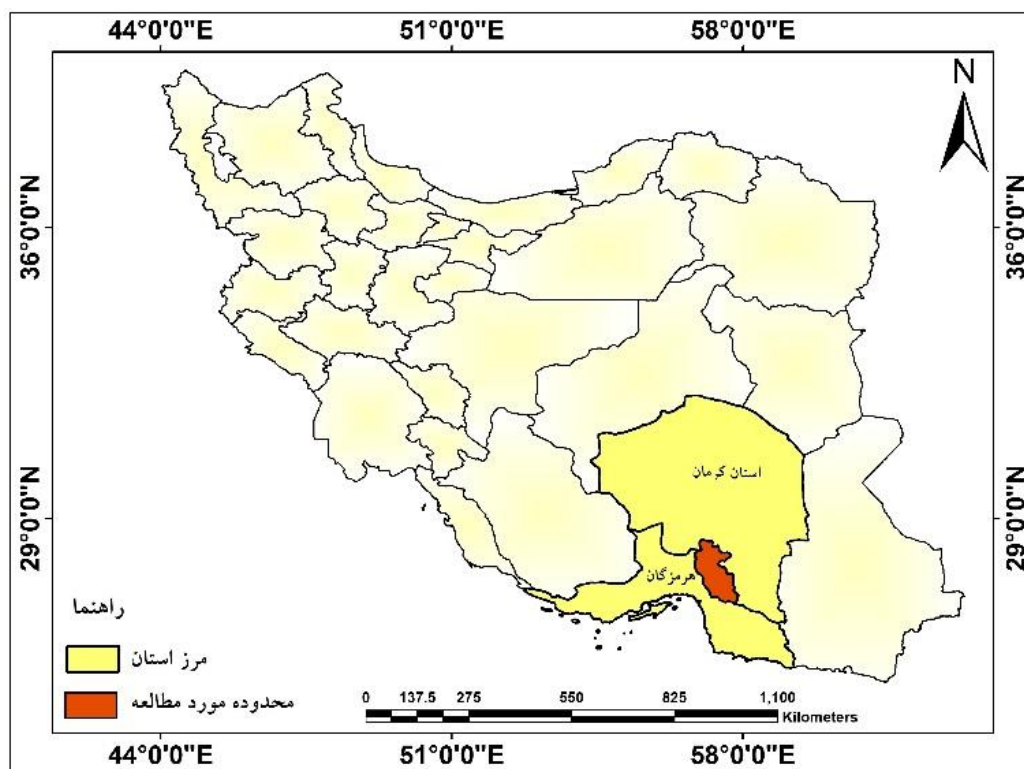
استفاده از این مدل به دلیل قابلیت‌های زیادی که دارا می‌باشد توسط محققین زیادی جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب استفاده شده است. کنول و همکاران (۲۰۰۳)، کافله و همکارانش (۲۰۰۷)، گارسیا و همکارانش (۲۰۰۸)، سمپات و همکاران (۲۰۱۵) و رومالی (۲۰۱۸) به ترتیب برای جنوب شرق ایالت داکوتای جنوبی، حوضه بگماتی، شمال اسپانیا، سریلانکا و سگامات مالزی با استفاده از این مدل به نتایج قابل قبولی دست یافتند. همچنین امکول و آگت (۲۰۰۶) و رازی و همکارانش (۲۰۱۰) در حوضه آبخیز کیتاتیس در واشنگتن و حوضه رودخانه جوهور مالزی با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS به این نتیجه رسیدند که مدل SCS توانایی کافی در اهداف مطالعه آن‌ها را داشته است. مطالعات بهادری خسروشاهی (۱۳۷۰)، خلیقی و همکاران (۱۳۸۳)، کریمی و همکارانش (۱۳۹۰)، شکری کوچک و همکارانش (۱۳۹۰)، پور حسین قادری و همکاران (۱۳۹۲)، حسینی و همکاران (۱۳۹۴)، مزیدی و کوشکی (۱۳۹۴)، حصادی و همکاران (۱۳۹۵)، حسین زاده و ایمنی (۱۳۹۵)، رحیم‌زاده و حبیبی (۱۳۹۷) در حوضه‌های آبخیز رودخانه جاجرود، باراندوزچای استان آذربایجان غربی، ليقوان، ایدنک، نازلو چای ارومیه، کشکان، خرم‌آباد، ناودار کرمانشاه، قوچک - رودک، روانسر نیز به این نتیجه رسیدند که روش SCS نسبت به روش‌های دیگر مدل نتایج قابل قبول‌تری داشته‌اند. مطالعات دیگری در مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از HEC-HMS صورت گرفته است که می‌توان از آن جمله به کارهای آزاگرا (۱۹۹۸) در حوضه رودخانه گوادالوپ، میلینگ (۲۰۱۶) در شمال غربی چین، نورهان و همکاران (۲۰۱۶) در وادی القیق مدینه، عربستان سعودی، دردور (۲۰۱۷) در منطقه نیمه خشک سفرا الجزیره، لاواچریا (۲۰۱۵) در شمال شرق الجزیره، و ایمانی (۲۰۱۶) در منطقه خشک غاردایا الجزایر، رادمنش و همکاران (۱۳۸۵) در حوضه آبخیز رود زرد و میرمهدی و جهانگیر (۱۳۸۷) در حوضه آبریز مارون اشاره کرد. آنها نیز در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که روش SCS بهترین نتیجه را برای هدف آن‌ها در بر داشته است.

به طور کلی با بررسی پیشینه مطالعات قبلی می‌توان دریافت که مدل‌های مصنوعی پیش‌بینی سیلاب در مناطق خشک کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند (وِدِر، ۲۰۰۸). در صورتی که مناطق خشک با ویژگی‌های خاص خود چون بی‌نظمی بارش

و جریانات سطحی، نوسانات شدید هیدرولوژیکی و داده های محدود و پراکنده، سیلاب های غیر قابل پیش بینی تری را تجربه می کنند که با شدت و خسارات زیادی همراه می باشد. لذا جهت پیش بینی و ایجاد راهبردهای مدیریتی در کنترل سیلاب، به کارگیری مدل های پیش بینی سیلاب که به داده های هیدرومتری کمتری نیاز داشته باشد ضروری به نظر می رسد. با توجه به تغییرپذیری شرایط اقلیمی و ژئومورفولوژیکی در مناطق مختلف کشور مدل های مذکور در حوضه های آبخیز با خصوصیات اقلیمی، لیتولوژی و ژئومورفولوژیک متفاوت، پاسخ های متفاوتی بدنبال دارد. این امر ما را بر آن داشت تا در این پژوهش از مدل HEC-HMS و سه روش هیدروگراف واحد مصنوعی SCS، اشنایدر و هیدروگراف واحد لحظه ای کلارک واقع در آن جهت پیش بینی بارش - رواناب در حوضه آبریز سد استقلال میناب به دلیل دارا بودن داده های مورد نیاز به عنوان یک حوضه منطقه خشک و نیمه خشک، بهره گرفته شود تا مشخص شود که کدام یک از روش های فوق الذکر برای این مناطق جهت پیش بینی با واقعیت انطباق بیشتری دارد. انتخاب نوع مدل شبیه سازی بارش - رواناب به لحاظ دقت، بستگی به حوضه مورد مطالعه و اهداف پیش بینی هیدرولوژیکی آن دارد. از آنجا که در مناطق خشک ایران عموماً داده های مربوط به بارش و رواناب محدود است به نظر می رسد استفاده از روشی که متناسب با این شرایط باشد منطقی است. بر این اساس در این تحقیق مدل HEC-HMS بصورت متمرکز انتخاب شده است. زیرا هم مدل HEC-HMS دارای تنوع گزینه های مختلف تولید هیدروگراف خروجی می باشد و قابلیت اتصال به Arc-GIS را دارا است و هم اینکه داده های موجود در سطح حوضه در حدی نیست که بتوان از آن جهت مدل سازی توزیعی و یا نیمه توزیعی استفاده کرد.

#### منطقه مورد مطالعه

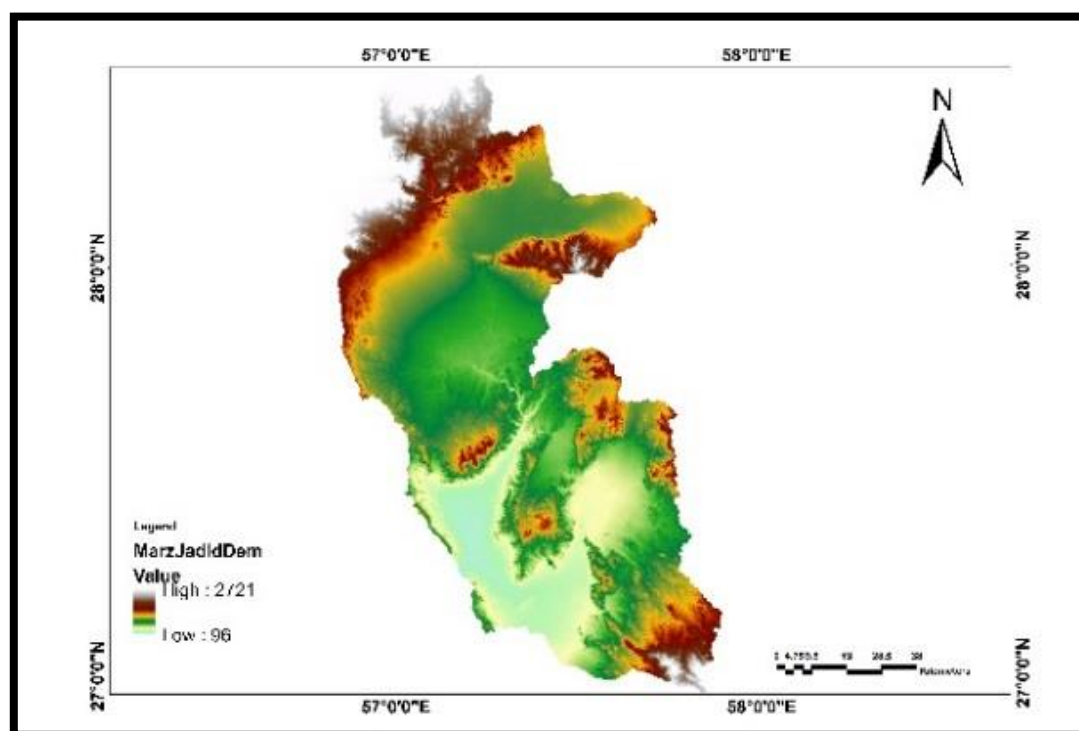
حوضه آبریز سد میناب در محدوده جغرافیایی ۲۶ ۵۷ ۲۰ تا ۲۸ ۳۰ ۴۵ عرض شمالی و ۴۴ ۴۹ ۵۶ تا ۱۷ ۴۳ ۵۷ طول شرقی، در جنوب غربی استان کرمان و شمال شرقی استان هرمزگان واقع شده است و با وسعت ۹۷۶۶ کیلومتر مربع از بزرگ ترین و مهم ترین حوضه های آبریز سواحل جنوبی ایران است (شکل ۱). اقلیم این حوضه گرم و خشک و دارای رژیم بارندگی مدیترانه ای با میانگین سالانه ۲۳۰ میلی متر است. متوسط تبخیر از تشتک تبخیر ۲۲۴۸/۱ میلی متر اندازه گیری شده است. اختلاف ارتفاع در سطح حوضه برابر ۲۶۲۵ متر می باشد و اراضی کوهستانی بیشتر در بخش های شمالی، شمال شرقی و غربی و شرق و بخش هایی از جنوب حوضه قرار دارد. وسعت دشت ها حدود یک سوم کل حوضه یعنی ۳۵۰۶ کیلومتر مربع دشت های حوضه به صورت ناپیوسته و پراکنده است. محدوده مورد مطالعه از نظر زمین شناسی ساختمانی در سه زون سنندج سیرجان، زاگرس مرتفع و مکران واقع شده است. سه رودخانه رودان، جغین و رودخانه میناب در سطح حوضه جاری می باشند که رودخانه میناب از اتصال دو رودخانه رودان و جغین به وجود می آید. شرایط ویژه منطقه تحت مطالعه به لحاظ محدودیت های اقلیمی، خشکی دائمی و خشکسالی های مکرر و وجود منابع آبی مطلوب منشاء گرفته از نواحی کوهستانی بالادست حوضه آبخیز که هر ساله بصورت سیلاب در بارش های فصلی و رگبارهای بسیار تند از دسترس خارج می شود، اهمیت توجه خاص به مهار رواناب های سطحی در آن را الزامی می کند.



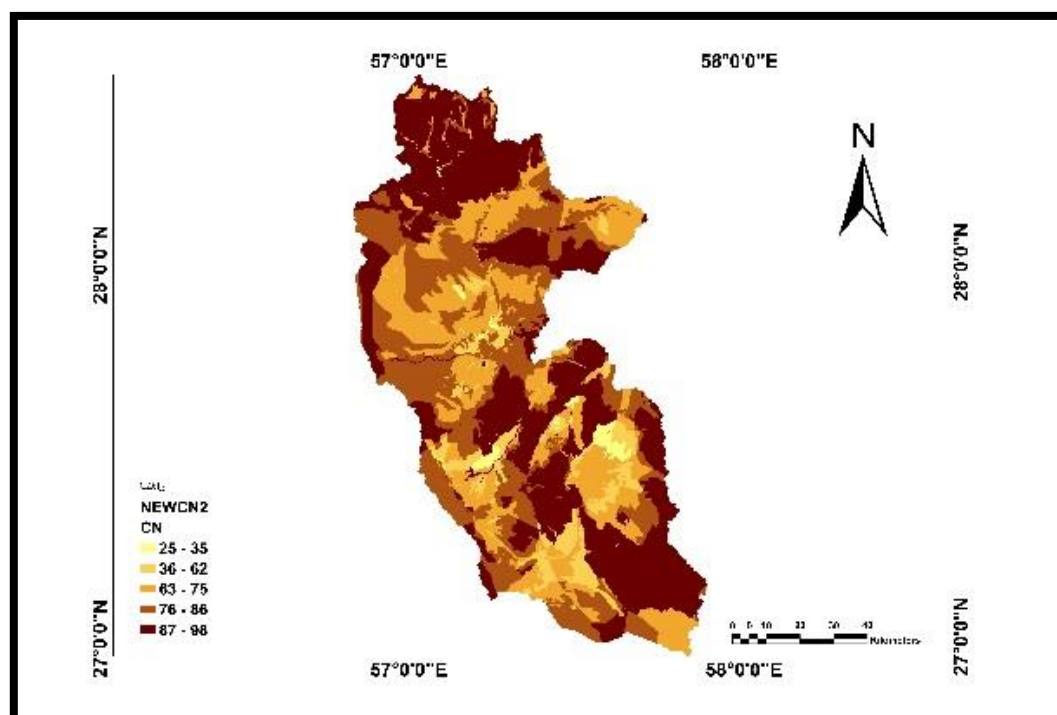
شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه

### داده‌ها و روش تحقیق

در این تحقیق برای شبیه‌سازی و بررسی رابطه بارش - رواناب در حوضه سد میناب از مدل HEC-HMS استفاده شده است. این روش بر مبنای پردازش اطلاعات هواشناسی و فیزیکی با استفاده از تکنیک‌های GIS است. برخی از پارامترهای فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی مورد نیاز شبیه‌سازی سیلاب حوضه بعنوان ورودی‌های مدل HEC-HMS، به کمک لایه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر (شکل ۲) و نقشه CN (شکل ۳) حوضه، در محیط نرم‌افزاری ArcGIS10.2 با استفاده از الحاقیه HEC-Geo-HMS10.2 استخراج و محاسبه گردید (جدول ۱). نقشه CN خود با استفاده از نقشه کاربری ارضی، پوشش گیاهی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، با میانگین وزنی ۷۹/۹۱ برای کل حوضه بدست آمد. آمار و اطلاعات مربوط به بارش و دبی سیلاب حوضه نیز با توجه به محدودیت وجود ایستگاه‌های هیدرومتری از ایستگاه‌های هواشناسی میناب و هیدرومتری برنطین در خروجی حوضه گردآوری شد.



شکل ۲. نقشه مدل ارتفاعی رقومی حوزه سد استقلال میناب



شکل ۳. نقشه شماره منحنی حوزه سد استقلال میناب

جدول ۱. خصوصیات فیزیوگرافی حوضه

طول آبراهه اصلی (km)	میانگین CN	توان تلفات IA	بیشترین ارتفاع (متر)	کمترین ارتفاع (متر)	شیب متوسط حوضه (درصد)	زمان تاخیر (ساعت)	زمان تمرکز (ساعت)
۲۰۷	۷۹/۹۱	۱۲/۷	۲۷۲۱	۹۶	۱۳/۱۸	۱۶/۲۹	۲۷/۲۲

جهت شبیه‌سازی رواناب ابتدا پارامترهای مورد نیاز ورودی از جمله شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تاخیر استاندارد و ضریب اوج اشنایدر، زمان تمرکز و ضریب ذخیره کلارک و سایر پارامترها آماده شد. همچنین از اطلاعات حوضه آبخیز، بارندگی، سیلاب و تجزیه و تحلیل آنها استفاده شده است. سپس با بررسی هیدروگراف‌ها و هیتوگراف‌های مولد آن از لحاظ داشتن شاخه صعودی و نزولی و طول مدت بارش و همزمانی وقوع بارش و سیلاب رخ داده شده، هیدروگراف‌های مناسب انتخاب شدند. از آنجا که انتخاب بارشی که در حوضه مورد نظر دارای توزیع مناسبی باشد و سطح حوضه را به طور کامل پوشش دهد بسیار مهم است، پس از بررسی یک دوره بارش روزانه ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه مورد مطالعه از نقطه نظر فراگیر بودن، انتخاب و داده‌های مربوط به آن برای ۵ واقعه استخراج شد. داده‌های سیلاب‌های مناسب جهت شبیه‌سازی به مدل HEC-HMS وارد شدند و مدل اولیه بر اساس آن تهیه شد.

سه روش مورد مطالعه در این تحقیق با ورود مقادیر لازم در بخش تلفات و در بخش رواناب و آب پایه اجرا شد. در بخش رواناب سه روش SCS، کلارک و اشنایدر مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت. در بخش تلفات در هر سه روش ذکر شده از روش SCS استفاده شد. پارامترهای مورد نیاز هر یک از این روش‌ها و مقادیر بدست آمده آن‌ها شامل میزان CN و تلفات اولیه که در هر سه روش مشترک است و زمان تاخیر در روش SCS، ضریب ذخیره و زمان تمرکز برای روش کلارک و زمان تاخیر استاندارد و ضریب اوج برای روش اشنایدر در حوضه مورد مطالعه محاسبه و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). هیدروگراف واحد SCS، بی بعد و تک اوجی می‌باشد و نسبت بین دبی‌های هیدروگراف واحد در هر زمان و دبی هیدروگراف واحد در زمان رسیدن به اوج را نشان می‌دهد. کلارک، هیدروگراف واحد یک حوضه آبخیز را به صورت صریح با دو فرایند اصلی در تبدیل بارش مازاد به رواناب شامل انتقال یا حرکت بارش اضافی از نقطه اصلی تا نقطه خروجی حوضه آبخیز و میرایی یا کاهش مقدار دبی به منزله ذخیره مازاد در سراسر حوضه آبخیز معرفی می‌کند. اشنایدر زمان تاخیر، دبی اوج و زمان پایه هیدروگراف را به عنوان مشخصات اصلی یک هیدروگراف واحد معرفی کرد.

جدول ۲. پارامترهای لازم در روش‌های مختلف محاسبه رواناب

نام روش	پارامترهای لازم	نتایج محاسبات
کلارک	زمان تمرکز (ساعت)	۲۷/۲۲
	ضریب ذخیره (ساعت)	۰/۳۷
اشنایدر	زمان تاخیر استاندارد (ساعت) (TP)	۲۰/۵۸
	ضریب اوج (Cp)	۰/۷۵
SCS	زمان تاخیر (ساعت)	۱۶/۲۹

پس از شبیه‌سازی اولیه جهت تعیین مقدار بهینه این پارامترها، عملیات واسنجی مدل برای پنج رویداد بارش - رواناب انجام گرفت. طی فرایند واسنجی مدل با تابع هدف درصد خطای دبی اوج و روش جستجوی نلدر و مید، تصحیح مکرر پارامترها و محاسبه بهترین برازش بین هیدروگراف محاسبه شده و مشاهده شده انجام گرفت. با مناسب بودن برازش و تولید

نزدیکترین هیدروگراف به هیدروگراف مشاهده شده، مقدار پارامتر به دست آمده از واسنجی مدل قابل قبول تشخیص داده شد.

اعتبارسنجی مدل بر اساس دو واقعه بارش-رواناب منتخب که در واسنجی دخالت داده نشده بودند، انجام شد. در قسمت اعتبارسنجی با یک پارامترهای جدید، مستقل از پارامترهای استفاده شده در مرحله واسنجی، شبیه‌سازی جریان انجام می‌شود. پارامترهای جدید حاصل میانگین عددی پارامترهای واسنجی شده است. میزان نزدیکی جریان محاسباتی به جریان مشاهداتی حاکی از معتبر بودن مدل است. در غیر این صورت، صحت و اعتبار مدل مورد قبول نخواهد بود.

برای تعیین میزان تاثیرگذاری هر یک از پارامترها بر دقت شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت روی آن‌ها انجام شد. به طور کلی حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای مختلف با معادله (۱) محاسبه می‌شود (خلیقی سیگارودی، ۱۳۸۳) که در آن، SEN مقدار حساسیت تابع هدف حاصل از تغییر در اندازه پارامتر، New مقدار جدید خروجی مدل حاصل از تغییر در اندازه پارامتر جدید، Old خروجی اولیه مدل و PC درصد تغییرات در پارامتر است.

$$\text{معادله (۱)} \quad \text{SEN} = 100 \frac{\text{New} - \text{Old}}{\text{Old} \cdot \text{PC}}$$

برای تحلیل حساسیت خروجی نسبت به پارامترها، از وقایع مختلف، واقعه ۱۳۹۳/۱۲/۲۱ انتخاب شد. دبی اوج مشاهده شده این واقعه ۳۷۹ مترمکعب بر ثانیه است که برای محاسبه میزان حساسیت دبی اوج نسبت به سه پارامتر زمان تاخیر، شماره منحنی و تلفات اولیه در روش SCS مورد استفاده قرار گرفت.

در این تحقیق به منظور بررسی و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدروگراف سیل پس از بهینه‌سازی، از چهار آماره ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (معادله ۲)، MSE (معادله ۳)، MAE (معادله ۴) و MAPE (معادله ۵) استفاده گردید. فرمول کلی این معادله‌ها به ترتیب در روابط زیر نمایش داده شده است.

$$\text{معادله (۲)} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(O_i) - (P_i)]^2}$$

$$\text{معادله (۳)} \quad \text{MSE} = \sum_{i=1}^n [(O_i) - (P_i)]^2$$

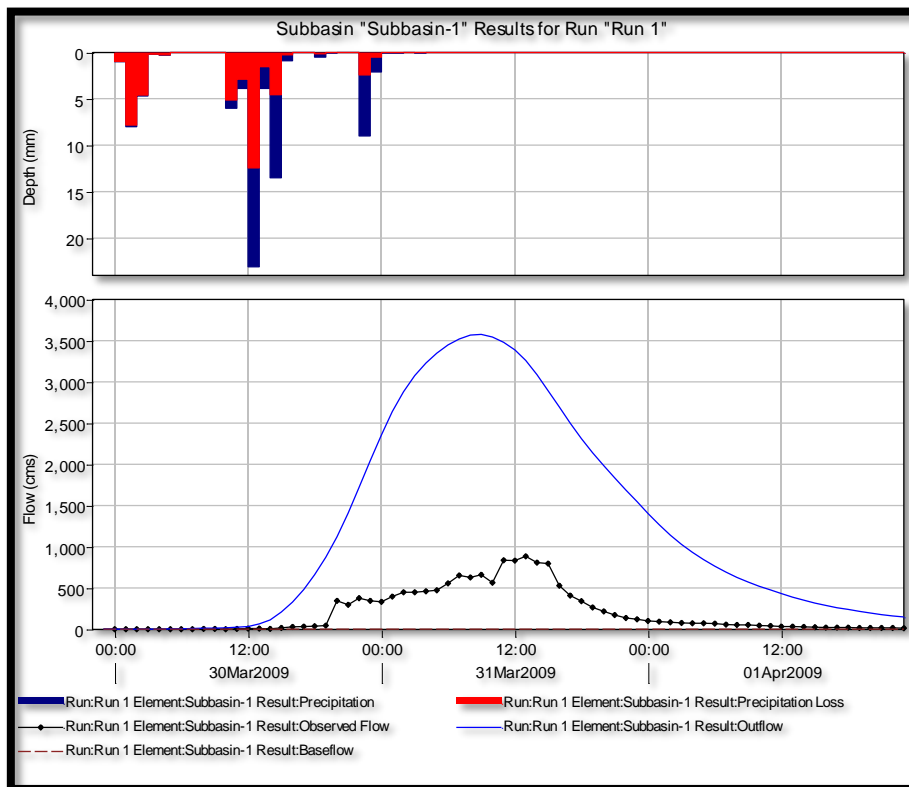
$$\text{معادله (۴)} \quad \text{MAPE} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{P_i} \right|$$

$$\text{MAE} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{N} \right|$$

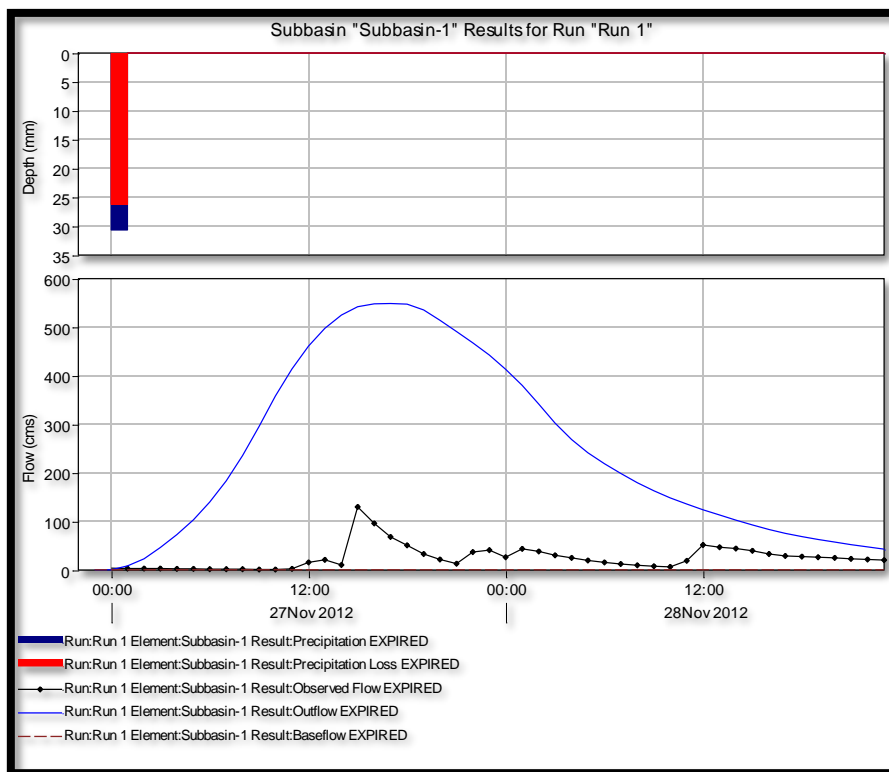
در معادله‌های فوق  $O_i$  و  $P_i$ : به ترتیب مقادیر مربوط به داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است،  $\bar{O}$ : میانگین داده‌های مشاهداتی و  $n$ : تعداد داده هست.

### یافته‌ها و بحث

نتایج شبیه‌سازی در این تحقیق (اشکال ۴ تا ۸) نشان می‌دهد که اختلاف داده‌ها در محاسبه زمان دبی اوج و حداکثر دبی اوج سیلاب به وضوح قابل مشاهده است. هیدروگراف‌های ترسیمی در تاریخ‌های ۱۳۸۸/۱/۱۱، ۱۳۹۱/۹/۷ و ۱۳۹۳/۱۲/۲۱ و مقادیر محاسباتی در برآورد دبی اوج سیلاب و حجم سیلاب، بیشتر از مقادیر واقعی آنها است (اشکال ۴، ۵ و ۶). در مقابل در تاریخ‌های ۱۳۸۹/۱۲/۱۰ و ۱۳۹۲/۲/۲۰ مقادیر محاسباتی در برآورد دبی اوج سیلاب و حجم کمتر از مقادیر واقعی آنها می‌باشد (اشکال ۷ و ۸). همچنین در هیدروگراف‌های ۱۳۸۹/۱۲/۱۰، ۱۳۸۸/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۹/۷ زمان دبی اوج تقریباً بر زمان واقعی منطبق است. در تاریخ ۱۳۹۲/۲/۲۰ اوج آن حدود یک ساعت زودتر از زمان واقعی اتفاق افتاده است. و در تاریخ ۱۳۹۳/۱۲/۲۱ با تاخیر حدود ۱۲ ساعت اوج هیدروگراف محاسباتی رخ داده است. بنابراین، تفاوت یاد شده باعث شد که واسنجی مدل انجام گیرد.

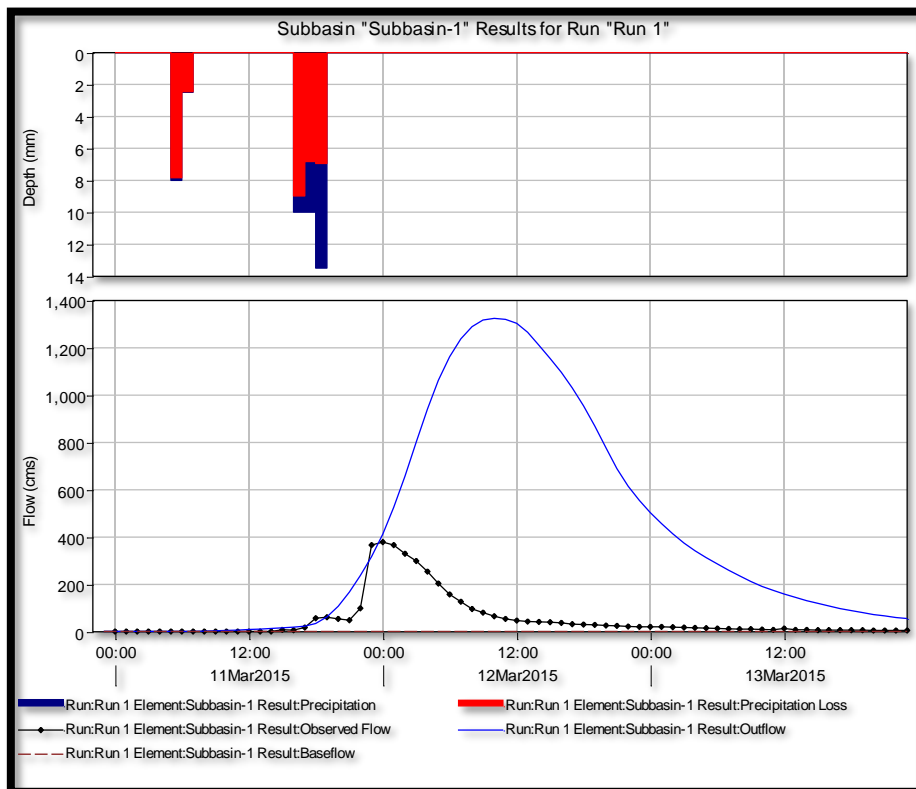


شکل ۴. هیدروگراف واقعه ۱۳۸۸/۱/۱۱

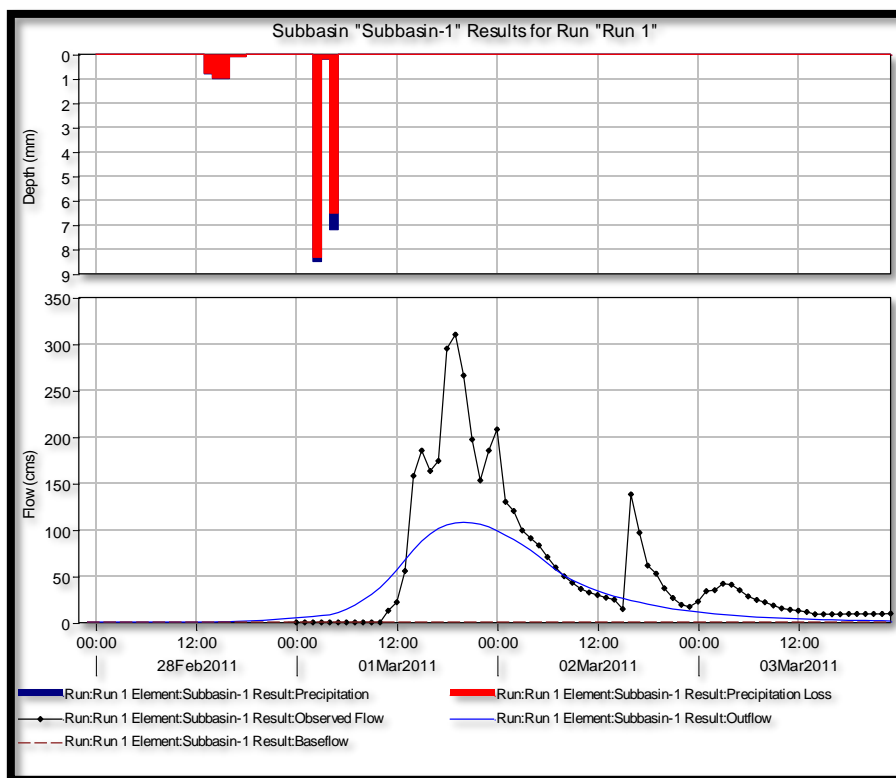


شکل ۵. هیدروگراف واقعه ۱۳۹۱/۹/۷

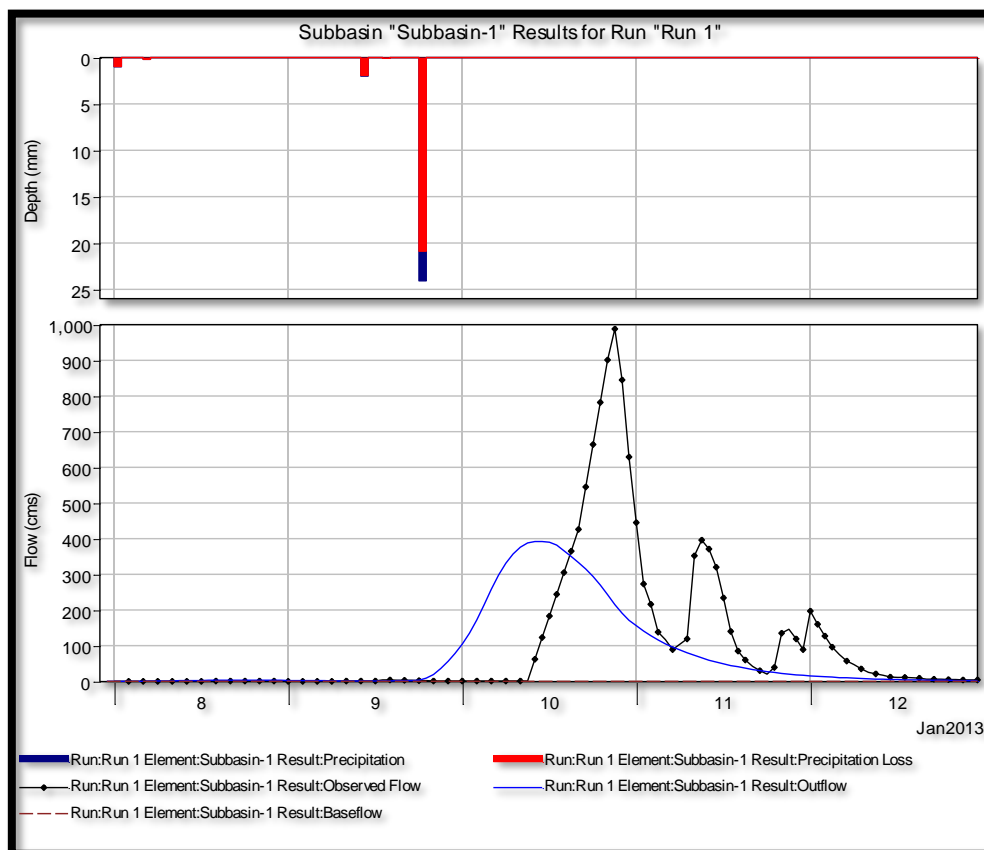




شکل ۶. هیدروگراف واقعه ۱۳۹۳/۱۲/۲۱



شکل ۷. هیدروگراف واقعه ۱۳۸۹/۱۲/۱۰

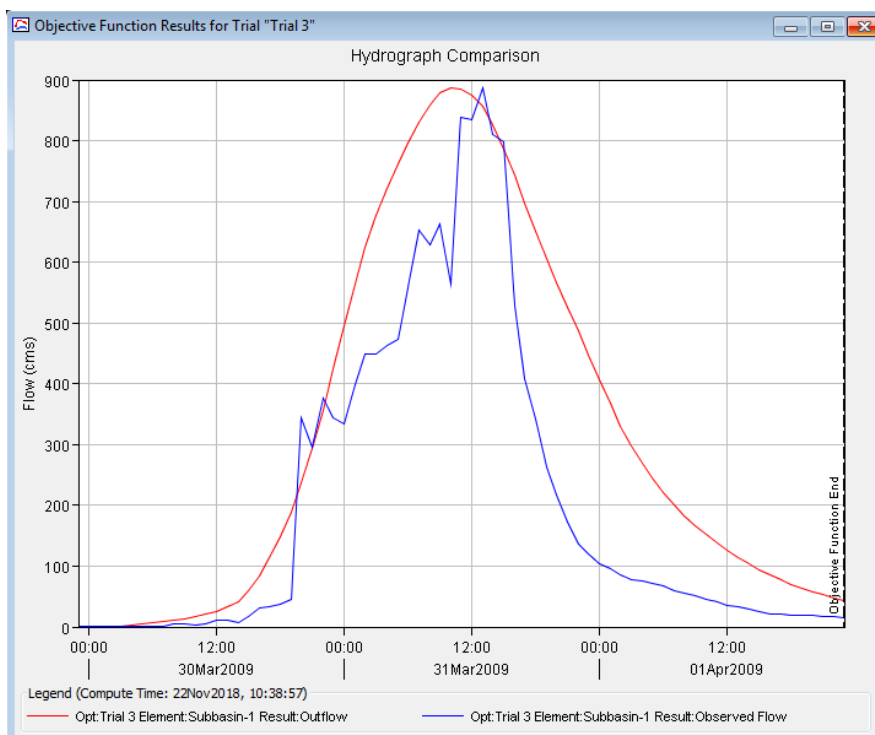


شکل ۸. هیدروگراف واقعه ۱۳۹۱/۱۰/۲۱

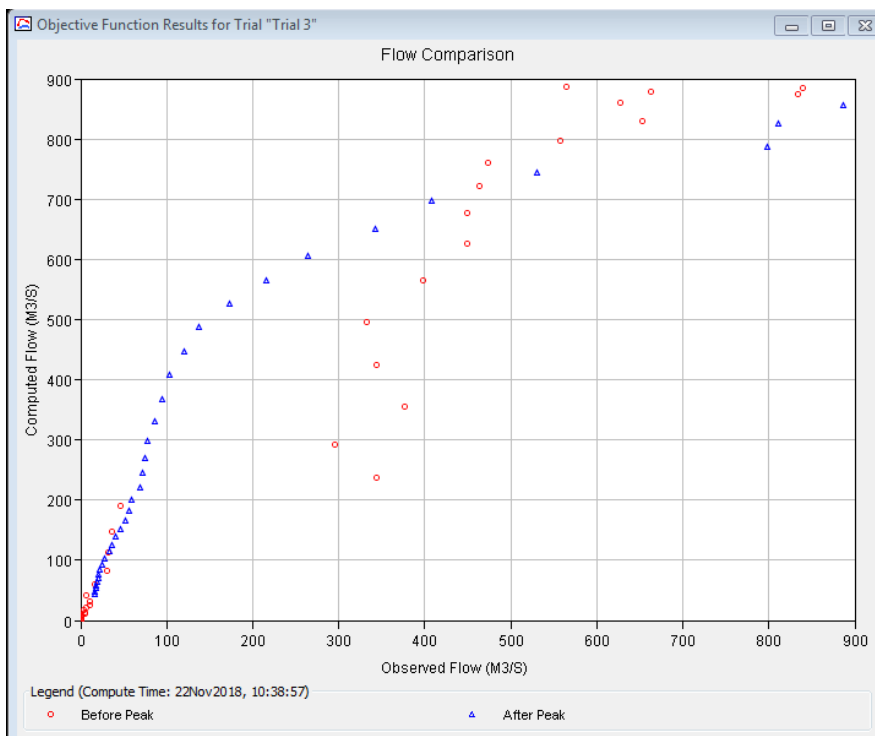
برای واسنجی مدل، مقادیر دبی اوج سیل به دلیل با اهمیت بودن به عنوان شاخص واسنجی مورد توجه قرار گرفت. نتایج واسنجی برای پنج واقعه به دست آمد، که نمونه آن بر اساس مدل SCS برای واقعه ۱۳۸۸/۱/۱۱ در جدول (۳) و اشکال (۹ و ۱۰) نشان داده شده است.

جدول ۳. مقادیر واسنجی پارامترها در بخش تبدیل بارش به رواناب در هر ۳ روش ذکر شده در واقعه ۱۳۸۸/۱/۱۱

روش	کلارک	SCS	اشنایدر
تلفات اولیه	۲۶/۷۵۵	۲۸/۴۶۷	۶/۱۶۵
CN	۵۱/۸۰۲	۴۸/۸۴۷	۸۲/۶۱۶
زمان تمرکز(ساعت)	۴۳/۱۱۵		
ضریب ذخیره(ساعت)	۱/۰۴۹		
زمان تاخیر(دقیقه)		۹۸۶/۰۱	
زمان تاخیر استاندارد			۱۲/۶۰۹
PC			۰/۱۰۰



شکل ۹. دبی‌های مشاهده‌شده و محاسباتی بعد از واسنجی در واقعه ۱۳۸۸/۱/۱۱



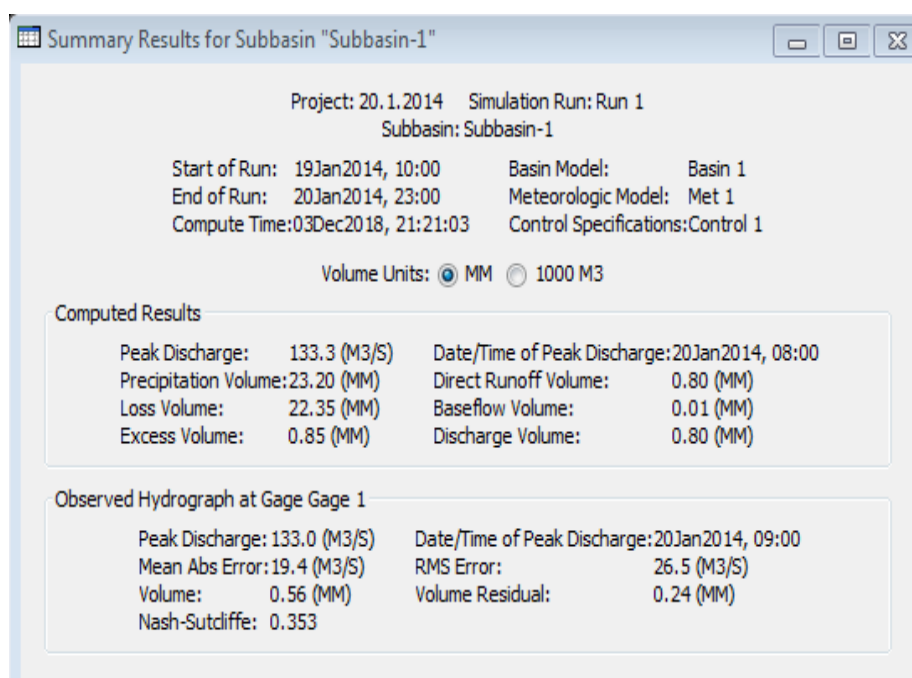
شکل ۱۰. گراف پراکندگی در واقعه ۱۳۸۸/۱/۱۱

اعتبارسنجی مدل‌ها برای دو رویداد دیگر بارش - رواناب که در واسنجی لحاظ نشده بودند، پس از ورود پارامترهای جدید به مدل انجام شد. این رگبارها شامل رگبارهای ۱۳۹۲/۱۰/۳۰ و ۱۳۹۲/۱۲/۲۳ هستند. ارزیابی اختلاف دبی اوج شبیه‌سازی شده وقایع بعد از اعتبارسنجی، به عنوان نمونه در مدل SCS (جدول ۴) با مقدار خطای ۰/۲ و ۰/۰۶ درصد، نشان داد که

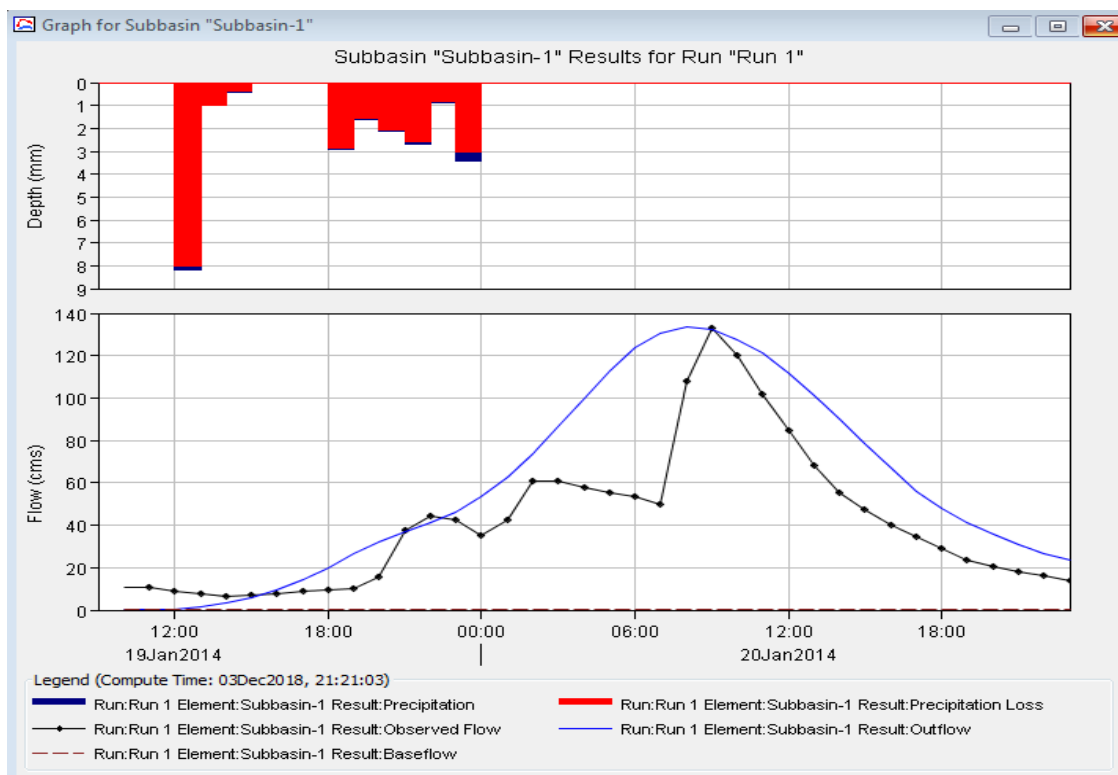
این مدل به دلیل خطای کم از اعتبار بالایی برخوردار است. به دلیل صحت مقادیر پارامترهای واسنجی شده می‌توان از این مقادیر در مدل نهایی بارش-رواناب حوضه استفاده کرد. اشکال (۱۱ و ۱۲) هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده واقعه ۱۳۹۲/۱۰/۳۰ را به عنوان نمونه بعد از اعتبارسنجی نمایش می‌دهد. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج رحیم‌زاده (۱۳۹۷) مطابقت دارد.

جدول ۴. ارزیابی اختلاف دبی اوج شبیه‌سازی شده بعد از اعتبارسنجی

TLag	IA	CN	خطا(درصد)	دبی اوج	دبی اوج	کل بارش (میلیمتر)	تاریخ وقوع بارش
				محاسباتی	مشاهداتی		
۶۲۰/۷۳۴	۱۶/۰۹۶	۶۷/۷۳۳	۰/۲	۱۳۳/۳	۱۳۳	۲۳/۲	۱۳۹۲/۱۰/۳۰
۶۲۰/۷۳۴	۱۶/۰۹۶	۶۷/۷۳۳	۰/۰۶	۶۵۸/۴	۶۵۸	۳۹/۱	۱۳۹۲/۱۲/۲۳



شکل ۱۱. واقعه ۱۳۹۲/۱۰/۳۰ بعد از اعتبارسنجی



شکل ۱۲. هیدروگراف واقعه ۱۳۹۲/۱/۳۰ بعد از اعتبارسنجی

پس از اعتبار سنجی برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل، مقدار سه پارامتر تلفات اولیه، شماره منحنی و زمان تأخیر بعد از واسنجی، در بازه‌ای از  $-20\%$  تا  $+20\%$  با فواصل  $5\%$  تغییر داده شد و اثر آن بر دبی اوج سیل تعیین گردید. نتایج این بخش نشان داد که تابع هدف (دبی اوج) بیشترین حساسیت را نسبت به تغییر شماره منحنی و تلفات اولیه دارد و نسبت به تغییرات زمان تأخیر حساسیت کمتری را دارا می‌باشد (جدول ۵). نتایج تحقیقات کتول و همکاران (۲۰۰۳) و چیداز و همکاران (۱۳۸۸) نشان داد که حساس‌ترین پارامترها شماره منحنی است که مشابه نتیجه این تحقیق می‌باشد. نتایج تحقیق کریمی (۱۳۹۰) که در آن بیشترین حساسیت مربوط می‌شود به پارامتر تلفات اولیه با نتایج آن متفاوت است.

جدول ۵. مقایسه میزان حساسیت پارامترها برای واقعه ۱۳۹۳/۱۲/۲۱

+۰/۲۰	+۰/۱۵	+۰/۱۰	+۰/۵	۰	-۰/۵	-۰/۱۰	-۰/۱۵	-۰/۲۰	درصد تغییرات پارامتر
۶۸/۲۶	۶۵/۴۱	۶۲/۵۷	۵۹/۷۲	۵۶/۸۸.۵	۵۴/۱۰۴	۵۱/۱۱۹	۴۸/۱۳۵	۴۵/۱۵۰	CN
۵۲۹/۸	۴۸۴/۸	۴۴۵/۳	۴۱۰/۲	۳۷۹	۳۵۰/۹	۳۲۵/۵	۳۰۲/۵	۲۸۱/۵	دبی اوج
۳۹/۷۸	۲۷/۹۱	۱۷/۴۹	۸/۲۳	۰	-۷/۴۱۴	-۱۴/۱۱	-۲۰/۱۸	-۲۵/۷۲	درصد تغییرات دبی اوج
۱/۹۸	۱/۸۶	۱/۷۴	۱/۶۴	۰	-۱/۴۸	-۱/۴۱	-۱/۳۴	-۱/۲۸	میزان حساسیت CN
۲۵/۵۷	۲۴/۵۰	۲۳/۴۴	۲۲/۳۷	۲۱/۳۱۳	۲۰/۲۴	۱۹/۱۸	۱۸/۱۱	۱۷/۰۵	IA
۲۸۵/۷	۳۰۷/۶	۳۳۰/۳	۳۵۴/۳	۳۷۹	۴۰۵	۴۳۱/۸	۴۵۹/۸	۴۸۸/۵	دبی اوج
-۲۴/۶۱	-۱۸/۸۳	-۱۲/۸۴	-۶/۵۱	۰	۶/۸۶	۱۳/۹۳	۲۱/۴۱	۲۸/۸۹	درصد تغییرات دبی اوج
-۱/۲۳	-۱/۲۵	-۱/۲۸	-۱/۳۰	۰	۱/۳۷	۱/۳۹	۱/۴۲	۱/۴۴	میزان حساسیت IA
۱۱۷۴/۳۶	۱۱۲۵/۴۳	۱۰۷۶/۴۹	۱۰۲۷/۵۶	۹۷۸/۶۸	۹۲۹/۶۹	۸۸۰/۷۶	۸۳۱/۸۲	۷۸۲/۸۸	Lag
۳۲۰/۲	۳۳۳	۳۴۶/۸	۳۶۲	۳۷۹	۳۷۹/۴	۴۱۷/۶	۴۴۰/۳	۴۴۶/۱	دبی اوج
-۱۵/۵۱	-۱۲/۱۳	-۸/۴۹	-۴/۴۸	۰	۰/۱۰۵	۱۰/۱۸	۱۶/۱۷	۱۷/۷۰	درصد تغییرات دبی اوج
-۱/۷۷	-۱/۸۰۹	-۱/۸۴۹	-۱/۸۹۷	۰	۱/۰۲۱	۱/۰۱۸	۱/۰۷۸	۰/۸۸	میزان حساسیت Lag

نتایج ارزیابی مدل در این پژوهش نشان داد که مدل SCS توان پیش‌بینی سیلاب‌ها برای حوضه سد استقلال میناب را بهتر از روش‌های اشنایدر و کلارک دارد (جدول ۶). شواهد نشان می‌دهد که این روش در مناطق نیمه خشک و خشک به نتایج قابل قبولی منجر می‌شود. نتایج مطالعات در دور (۲۰۱۷)، یمانی (۲۰۱۶)، رادمنش (۱۳۸۵)، میرمهدی (۱۳۸۷) هم این امر را تصدیق می‌کند. نتایج قابل قبول این مدل چنان که نتایج پژوهش میلینگ (۲۰۱۶) و حسین‌زاده و همکار (۱۳۹۵) نشان می‌دهد همیشه نمی‌تواند مصداق داشته باشد. بر اساس نتیجه مطالعه برخورداری و همکاران (۱۳۸۵) مدل SCS در مناطق دشتی نتایج قابل قبولی دارد. از آنجا که حدود یک سوم سطح حوضه مورد مطالعه را دشت در بر می‌گیرد، مدل SCS در این منطقه به نتیجه مناسبی رسیده است.

جدول ۶. ارزیابی نتایج مدل‌های SCS، کلارک و اشنایدر واقع در نرم‌افزار HEC-HMS

مدل	MSE	RMSE	MAE	MAPE
SCS	۰/۱۲۵	۰/۳۵۳	۰/۰۰۱	۰/۱۴۳
کلارک	۱۳۸۷۳/۴۵	۱۱۷/۷۸۵	۱۰۱/۱۵	۲۷/۶۱۰
اشنایدر	۶۳۳۹/۴۶	۷۹/۶۲۰	۵۶/۵	۴۲/۳۶۱

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از اعتبارسنجی و ارزیابی مقادیر خطا، در این حوضه نشان داد که روش SCS در خصوص برآورد دبی اوج هیدروگراف سیل نسبت به روش‌های اشنایدر و کلارک برتری دارد. بررسی بر روی پارامترهای مدل نشان داد که پارامتر شماره منحنی و تلفات اولیه که با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه در ارتباط هستند دارای حساسیت بالایی می‌باشند، در صورتی که سایر پارامترها دارای حساسیت کمتری نسبت به تغییر مقدار تابع هدف در مدل HEC-HMS هستند. از آنجا که این منطقه در ناحیه نیمه خشک و خشک قرار دارد و بسیاری از پیش‌بینی‌های موفق سیلاب برای مناطق خشک بر اساس SCS به دست آمده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که این مدل برای مناطق خشک مدل مناسبی محسوب می‌شود. به ویژه در مناطقی که حوضه‌های مورد بررسی شرایط ژئومورفولوژیکی شبیه منطقه بالادست سد میناب داشته باشند با اطمینان بیشتر می‌توان این روش را به کار برد. در منطقه مورد مطالعه با وجود این که شکل ظاهری حوضه کشیده است، سیستم زهکشی آن از تلاقی دو شاخه مجزا شکل می‌گیرد که در صورت وقوع بارندگی که کل سطح حوضه را در بر بگیرد می‌تواند در خروجی حوضه رواناب زیاد و پیک بالایی را ایجاد کند. به علاوه بخش اعظم حوضه را نواحی کوهستانی تشکیل می‌دهد که در سیلابی بودن حوضه نقش مهمی ایفا می‌کند. با یک نگاه اجمالی به وضعیت ژئومورفولوژیکی حوضه می‌توان دریافت که بخش شمالی حوضه به لحاظ کوهستانی بودن و آرایش سیستم زهکشی آن به لحاظ دریافت شاخه‌های مجزا و غیر خطی و بخش‌هایی از غرب آن به لحاظ وجود بدلند نقش موثری را در تولید رواناب دارند. به طور کلی با بررسی بیشتر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و تاکید بر مدل‌سازی بر اساس این ویژگی‌ها می‌تواند به ساخت مدل‌ها و پیش‌بینی‌های دقیق منجر شود.

### منابع

- برخورداری، جلال؛ تلوری، عبدالرسول، غیائی، نجفقلی، رستگار حسین، ۱۳۸۵، بررسی قابلیت به‌کارگیری و ارزیابی روش‌های تهیه هیدروگراف واحد مصنوعی در برآورد سیلاب در حوضه آبخیز سیخوران استان هرمزگان، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۱، صفحات ۶۵-۵۷.

- پورحسین قادری، سیما؛ محمدنژاد، بایرامعلی، ۱۳۹۲، مدل‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبخیز نازلوچای ارومیه با استفاده از مدل *WMS/HEC-HMS*، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی.
- چیداز، آتنا؛ محسنی ساروی، محسن؛ وفاخواه، مهدی، ۱۳۸۸، ارزیابی مدل *HEC-HMS* به منظور برآورد هیدروگراف سیلاب در حوضه آبخیز کسلیان، پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۸۴، صفحات ۷۱-۵۹.
- حسین‌زاده، محمد مهدی؛ ایمنی، سپیده، ۱۳۹۵، مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز کوچک-رودک با استفاده از مدل *HEC-HMS*، پژوهش‌های دانش زمین، سال هفتم، شماره ۲۵، صفحه ۴۳-۳۱.
- حسینی، سید موسی؛ جعفریگللو، منصور؛ یمانی، مجتبی؛ گراوند، فاطمه، ۱۳۹۴، پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی رودخانه کشکان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی *HEC-HMS*، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۱.
- حسادی، همایون؛ امیدی، نرگس؛ مسعودی تبار، رضا، ۱۳۹۵، بررسی سیلاب حوضه ناودار به وسیله مدل هیدرولوژیکی *HEC-HMS*، سومین کنگره علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست ایران، تهران، انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین.
- خلیقی، ش، ۱۳۸۳، بررسی میزان تاثیر تغییر کاربری اراضی و مشخصات هیدرولوژیک آب‌های سطحی حوضه آبخیز باراندوز چای استان آذربایجان غربی، رساله دکتری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، صفحه ۲۱۸.
- رادمنش، ف؛ پرهمت، ج؛ بهنیا، عبدالکریم؛ آخوندعلی، علی محمد، ۱۳۸۵، واسنجی و ارزیابی مدل *HEC-HMS* در حوضه آبخیز رود زرد، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- رحیم‌زاده، زهرا؛ حبیبی، مینا، ۱۳۹۷، شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با مدل هیدرولوژیک *HEC-HMS* و پیش‌بینی دوره بازگشت در حوضه روانسر کرمانشاه. جغرافیا و توسعه، شماره، صفحات ۱۹۴-۱۷۵.
- شکری کوچک، سعید؛ بهنیا، عبدالکریم؛ رادمنش، فریدون؛ آخوندعلی، علی محمد، ۱۳۹۰، تخمین آبنمود سیلاب حوضه آبخیز با استفاده از مدل *HEC-HMS* و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه ایدنک)، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال سوم، شماره ۵، صفحات ۸۵-۶۳.
- کریمی، مریم؛ ملکی نژاد، حسین؛ عبقری، هیراد؛ عزیزیان، محمدصادق، ۱۳۹۰، ارزیابی روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با استفاده از بسته نرم‌افزاری *HEC-HMS* (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهل گزی)، مجله پژوهش آب ایران، سال پنجم، شماره ۹، صفحات ۳۸-۲۹.
- کریمی، مریم؛ غفاری، گلاره؛ عزیزیان، محمدصادق، ۱۳۹۰، شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب با استفاده از مدل *HEC-HMS* مطالعه موردی: حوضه آبخیز لیقوان، هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، صفحات ۱۲-۱.
- مزیدی، احمد؛ کوشکی، سمیرا، ۱۳۹۴، شبیه‌سازی بارش-رواناب و تخمین سیل در حوضه آبریز خرم‌آباد با مدل *HEC-HMS*، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۱، صفحات ۹-۱.
- محمودیان شوشتری، م؛ مجدزاده طباطبایی، م، یوسفی، ع، ۱۳۸۱، بررسی و کاربرد مدل *HEC-HMS* در مهندسی رودخانه، بررسی موردی: رودخانه‌های کر و سیوند استان فارس، ششمین سمینار بین‌المللی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۰۶۸-۱۰۶۱ ص.

- مهدی نسب، مهدی؛ طاووسی تقی؛ میرزایی رضا، ۱۳۹۳، پیش‌بینی احتمال وقوع سیل و حداکثر بارش متحمل زیر حوضه پلدختر با استفاده از روش سری های جزئی، اکوسیستم‌های طبیعی ایران، دوره ۵، شماره ۱، صفحات ۹۷-۱۰۹.
- میر مهدی، م؛ جهانگیر، ع، ۱۳۷۸، واسنجی مدل ریاضی HEC-HMS و ارزیابی این مدل در پاسخگویی به سیلاب حوضه آبریز مارون، چهارمین کنگره ملی مهندس عمران، دانشگاه تهران، ۷-۱.
- Azagra, E ., 1998. Rainfall runoff in the Guadalupe river basin-CE 397 GIS in Water Resources, Austin, Texas. www.ce.utexas.edu
- Garcia, A., Sainz, A., Revilla, J. and Alvarez, C., 2008. Surface Water Resources Assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain, Journal of Hydrology, V. 356, PP. 312-32.
- Derdour, A. Bouanani and K .Babahamed., 2017. Hydrological modeling in semi-arid region using HEC-HMS model. Case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW-Algeria), Journal of Fundamental and Applied Sciences, , 1027- 1049, doi: 10.4314/jfas.v9i2.27.
- Kafle, T.P., Hazarika, M.K., Karki, S., Shrestha, R.M., Sharma R., and Samarakoon, L ., 2007. Basin scale rainfall runoff modeling for flood forecasts, 5th Annual Mekong flood Forum. Vietnam. PP.41.
- Kathol J.P. Werner H.D. and Trooien T.P., 2003. Predicting Runoff for Frequency based Storm using a Prediction Runoff Model. A.S.A.E. South Dakota. U.S.A.
- Knebl, M.R., Yang, Z.L., Hutchison, K., Maidment, D.R., 2005. Regional Scale Flood Modeling using NEXRAD, Rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A Case Study for the San Antonio River Basin Summer 2002 Storm Event, Journal of Environmental Management, 75: 325-336.
- Laouacheria F. and Mansouri R., 2015. Comparison of WBNM and HEC-HMS for Runoff Hydrograph Prediction in a Small Urban Catchment. Water Resour Manage., 29, 2485-2501, doi 10.1007/s11269-015-0953-7
- McColl, Ch. and G. Aggett ., 2006. Land use forecasting and hydrologic model integration for improved land use decision support. Journal of Environmental Management, September 2007, pages 49
- Meiling W., Lei Z., Thelma D B., 2016. Hydrological Modeling in A Semi-Arid Region Using HEC-HMS. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering., Vol. 5 Iss. 3, 105-115, doi: 10.5963/JWRHE0503004
- Norhan A., Saud T., Fahad A., Kamarul A., 2016. Arid hydrological modeling at wadi Alaqiq, Madinah, Saudi Arabia. Jurnal Teknologi., 51-58, doi: 10.11113/jt.v78.4516
- N S Romali. Z Yusop, and A Z Ismail,. 2018. Hydrological Modelling Using HEC-HMS for Flood Risk Assessment of Segamat Town, Malaysia, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 318 012029 doi:10.1088/1757-899X/318/1/012029
- N. S. Romali, Z. Yusop and A. Z .Ismail ., 2018. Hydrological Modelling using HEC-HMS for Flood Risk Assessment of Segamat Town, Malaysia, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 318 012029 doi:10.1088/1757-899X/318/1/012029.
- Razi, M.A.M, J.Ariffin, W.Tahir and N.AM Arish ., 2010. "Flood estimation studies using hydrologic modeling system (HEC- HMS) for Johor river, Malaysia", Journal of Applide Sciences :N10: PP. 930-939.
- Shah S. M. S., O'Connell P. E. and Hosking J. R. M., 1996. Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response: Formulation and calibration of a stochastic rainfall field model. Journal of hydrology, v. 175: 67-88.
- Sampath D. S., Weerakoon S. B. and Herath S., 2015. HEC-HMS Model for Runoff Simulation
- in a Tropical Catchment with Intra-Basin Diversions Case Study of the Deduru Oya River



- *Basin, Sri Lanka. J. ENGINEER, Vol. XLVIII, No. 01. 1-9. doi:*
- *10.4038/engineer.v48i1.6843.*
- *Wheater H., Sorooshian S., Sharma K.D., 2008. Hydrological modelling in arid and semi-arid areas. Cambridge University Press, Cambridge UK (Eds.), 223p. DOI:*
- *10.1017/CBO9780511535734*
- *<http://www.irna.ir/fa/News/81546913>*