

برآورد رواناب رویداد مبنا در حوضه کوهستانی با استفاده از مدل توزیعی- فیزیکی GSSHA

علی شریفی^۱، میثم سالاری جزی^{۲*}، خلیل قربانی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی

و منابع طبیعی گرگان

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۶/۰۳)

چکیده

مدل‌های توزیعی- فیزیکی در شبیه‌سازی فرایندهای رواناب سطحی در حوضه‌هایی با شرایط پیچیده فیزیکی به جواب‌هایی با اعتمادپذیری بیشتر منجر می‌شوند. در این مطالعه مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب در حوضه آبریز کوهستانی زیارت با استفاده از مدل توزیعی- فیزیکی GSSHA بررسی شده است. به این منظور نقشه‌های مدل رقوم ارتفاعی، نوع خاک و کاربری اراضی تهیه شده و سه رویداد برای واسنجی و دو رویداد برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. معیارهای دقت برازش نش- ساتکلیف (NSE)، درصد خطای برآورد حجم (PEV)، درصد خطای برآورد دبی اوج (PETP) و درصد خطای برآورد زمان دبی اوج (PEP) و معیار بصری برای تحلیل نتایج استفاده شد. میانه معیارهای PEV، PEP و PETP در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۲۵/۳ و ۶۱/۵، ۵/۵ و ۱۱/۸ و ۴/۸ و ۰ بوده که نشان‌دهنده کم‌برآوردی حجم، دقت مناسب در دبی اوج و دقت بسیار خوب در زمان دبی اوج است. نیز بررسی بصری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و معیار NSE تأییدکننده دقت مدل در شبیه‌سازی شکل هیدروگراف رواناب است. نتایج نشان می‌دهد اگرچه پارامتر رطوبت اولیه خاک در مرحله صحت‌سنجی بر اساس یک تخمین اولیه در نظر گرفته شده، در مجموع دقت مدل در برآورد مشخصه‌های رواناب مناسب است.

کلیدواژگان: بارش- رواناب، توزیعی- فیزیکی، زیارت، GSSHA.

مقدمه

دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در طراحی و برنامه‌ریزی‌های مهندسی منابع آب و محیط زیست مستلزم شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی سطحی و زیرسطحی است [۱]. محدودیت تکنیک‌های اندازه‌گیری، پیش‌بینی مقادیر حدی، تغییر نوسانات فرایندهای هیدرولوژیکی و غیره موجب می‌شود استفاده از مدل‌ها در مطالعات هیدرولوژیکی مورد توجه روزافزون قرار بگیرد و توسعه یابد. در هیدرولوژی کاربردی و عملیاتی مدل‌های بارش-رواناب یکی از ابزارهای مهم به کار گرفته شده برای تصمیم‌گیری در مباحث توسعه و مدیریت منابع آب و خاک و محیط زیست است [۲]. مدل‌های هیدرولوژیکی زیادی برای مدل‌سازی بارش-رواناب در مقیاس حوضه نظیر مدل‌های یکپارچه مانند مفهوم هیدروگراف واحد تا مدل‌های توزیعی با پیچیدگی بسیار زیاد مانند مدل‌های توزیعی-فیزیکی وجود دارد [۳]. مدل‌های یکپارچه در مقایسه با مدل‌های توزیعی به دلیل اینکه تغییرپذیری مکانی پارامترها را در نظر نمی‌گیرند و کل حوضه را یک واحد محاسباتی فرض می‌کنند، در بیشتر موارد نیاز به دسترسی به داده‌های محدودتری دارند [۴ و ۵]. از این مدل‌ها می‌توان برای مدل‌سازی در حوضه‌های دارای آمار و حتی مدل‌سازی در حوضه‌های فاقد آمار استفاده کرد، اما محدودیت‌های خاص ناشی از در نظر نگرفتن توزیع مکانی متغیرها دارند [۶ و ۷]. هنگام استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی بارش-رواناب به تعیین مقادیر پارامترها برای هر سلول در دامنه محاسباتی نیاز است. مدل‌های توزیعی سلول‌های متعددی هستند و روش معمول برای دسته‌بندی سلول‌ها، به کارگیری مفاهیم کاربردی مانند کاربری اراضی یا اطلاعات مرتبط با نوع خاک است. دسته‌بندی سلول‌ها بر اساس مفاهیم بیان شده معمولاً به علت کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده برای مقادیر پارامترها صورت می‌گیرد و مقادیر این سلول‌ها در بیشتر موارد بعد از فرایند واسنجی تعدیل و تصحیح می‌شوند [۸ و ۹]. پیش‌بینی جریان در حوضه تحت تأثیر عوامل مختلف و یکی از دلایل اصلی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب برای یک حوضه است و مدل‌های توسعه‌یافته در این زمینه نتایج گوناگونی را برای پیش‌بینی دبی در خروجی حوضه ارائه می‌دهند [۱۰ و ۱۱].

نشان می‌دهند، نمی‌توانند بیان‌کننده فرایند اتفاق افتاده در مقیاس هر سلول باشند. مدل‌های توزیعی مبتنی بر پایه فیزیکی می‌توانند بیان‌کننده این واقعیت باشند که فرایندهای واقعی، به‌درستی شبیه‌سازی شده‌اند. برای اثبات اینکه چنین مدل‌هایی (توزیعی پایه فیزیکی) در واقع می‌توانند فرایندهای هیدرولوژیکی را به‌خوبی شبیه‌سازی کنند و صرفاً توسط روابط تجربی توسعه نیافته‌اند، نیاز به اندازه‌گیری‌های مستقل (به‌منظور اعتبار این ادعا) است که این کار با توجه به اینکه داده‌های در دسترس کامل نیستند، به‌ندرت انجام می‌شود. سؤالاتی که مطرح می‌شود چنین است: ۱. به‌منظور تقریبی از فرایندهایی که در سطح سلول انجام می‌شود چه سطحی از پیچیدگی مدل مورد نیاز است؟ ۲. این حجم از اطلاعات مورد نیاز و پیچیدگی‌های محاسباتی، توانایی مدل به‌منظور شبیه‌سازی دبی خروجی را افزایش می‌دهد؟ [۱۲].

پیشینه تحقیق

به‌منظور بررسی کارایی مدل‌های توزیعی-فیزیکی مطالعات مختلفی صورت گرفته است. نیدزیالک و اوگدن (۲۰۰۳) در تحقیقی کارایی مدل توزیعی پایه فیزیکی GSSHA و مدل مفهومی یکپارچه HEC-1 (هرچند در حال حاضر از این مدل استفاده نمی‌شود) را در شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در حوضه‌های شهری به مساحت تقریباً یک کیلومتر مربع مقایسه کردند. آنها با بررسی ۴۰ رویداد بارش در حوضه شهری نتیجه گرفتند که مدل GSSHA نسبت به مدل HEC-1 به‌طور قابل توجهی در شبیه‌سازی سیل حوضه شهری موفق‌تر بوده و دلیل این امر را توانایی مدل در شبیه‌سازی شرایط متغیر مکانی پیچیده با به‌کارگیری معادلات هیدرودینامیکی دانستند [۱۳]. اوگدن و داوونر (۲۰۰۴) مدل توزیعی پایه فیزیکی GSSHA را در حوضه مودی بروک، در اینگتون ایالات متحده آمریکا ارزیابی کرده و مدل را در برآورد رواناب در حوضه‌هایی با مکانیسم پیچیده در حالتی که جریان سطحی و زیرسطحی تأثیر متقابل قابل توجهی بر یکدیگر دارند، بسیار کارآمد توصیف کردند [۱۴]. عماد و همکارانش (۲۰۰۸) در تحقیقی با استفاده از مدل GSSHA تأثیر موضعی خطای باران‌سنج‌ها روی شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه گودوین کریک در قسمت شمالی می‌سی‌سی‌پی را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که خطاهای رادار بارش ویژگی‌های پیچیده مکانی-زمانی دارد

حوضه کوچکی در جزیره ایشیگاکي ژاپن، با هدف پیش‌بینی جریان سیلاب و غلظت رسوب با استفاده از دو مدل GSSHA و SWAT را مطالعه کردند. نتایج پژوهش آنها بیان کرد که برای شبیه‌سازی کوتاه‌مدت، مدل GSSHA کارایی نسبتاً بهتری در شبیه‌سازی جریان سیلاب در مقایسه با مدل SWAT طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی داشت. همچنین GSSHA دقت نسبتاً بهتری برای پیش‌بینی غلظت رسوب فقط در دوره کالیبراسیون داشت؛ در حالی که مدل SWAT برای شبیه‌سازی طولانی‌مدت غلظت رسوب را بهتر از مدل GSSHA پیش‌بینی کرد [۲۱].

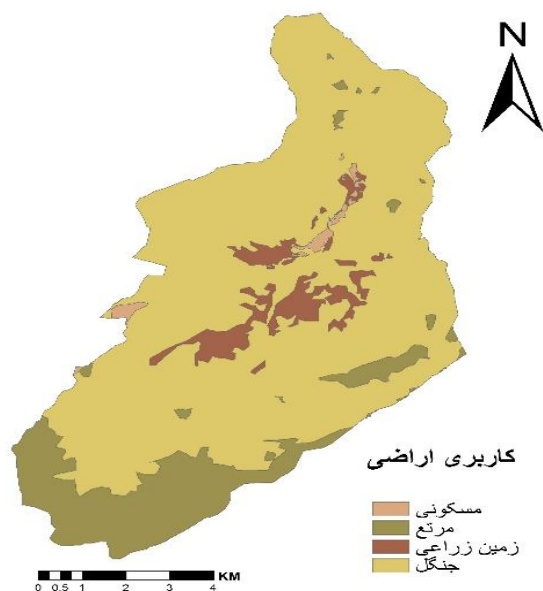
تا کنون تحقیقات متعددی در داخل کشور در زمینه کاربرد مدل‌های یکپارچه یا توزیعی در مدل‌سازی بارش-رواناب صورت گرفته است، اما با توجه به اهمیت مدل‌های توزیعی-فیزیکی در این زمینه تحقیقات صورت گرفته بسیار محدود است. هدف این مطالعه کاربرد مدل توزیعی-فیزیکی GSSHA برای مدل‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبریز زیارت در استان گلستان است. ویژگی‌های این حوضه موجب شده است که فرایند تشکیل رواناب در آن پیچیدگی خاص داشته باشد. بنابراین، در این مطالعه تلاش می‌شود تا به این سؤال پاسخ داده شود که آیا کاربرد یک مدل توزیعی-فیزیکی با رویکرد واسنجی-صحت‌سنجی می‌تواند به نتیجه مناسب در شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب منجر شود؟

مواد و روش‌ها

مشخصات و موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده: محدوده مطالعه شده حوضه زیارت شامل سه بخش کوهستانی، شهری و دشت است. رودخانه زیارت در منطقه کوهستانی از دو رودخانه به نام‌های آبشار و طول بنه تشکیل شده که پس از اتصال این دو رودخانه، رودخانه زیارت تشکیل می‌شود. این حوضه که با مساحت ۹۵/۱۵ کیلومتر مربع و محیط ۴۰/۵۱ کیلومتر در استان گلستان، در جنوب شهرستان گرگان و بین طول جغرافیایی ۵۴°، ۲۳° و ۵۳° تا ۵۴°، ۳۱° و ۱۱° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶°، ۳۶° و ۵۱° تا ۳۶°، ۳۶° و ۴۳° شمالی قرار گرفته است. بیشترین ارتفاع

که بیان‌کننده نمونه‌گیری‌های مهم و تغییرات طبیعی است و خطاهای تصادفی رادار بارش رابطه مهمی با زمان و مکان ندارند. همچنین هیدروگراف‌های رواناب شبیه‌سازی شده به خطاهای رادار بارش حساس‌اند [۱۵]. پادل و همکارانش (۲۰۱۰) برای مقایسه قابلیت‌های مدل توزیعی و یکپارچه در تحلیل آثار تغییر کاربری اراضی از دو مدل HEC-HMS و GSSHA استفاده کرده‌اند. در این تحقیق مدل یکپارچه نتوانسته است تغییرات دبی اوج جریان و نیز حجم رواناب را به خوبی در نظر بگیرد در حالی که در مدل‌سازی توزیعی این تغییرات به خوبی لحاظ شده‌اند. همچنین نشان داده شده است مدل توزیعی در مقایسه با مدل یکپارچه به شکل مؤثری می‌تواند موقعیت مناطق نفوذناپذیر و تأثیر آن در مدل‌سازی جریان را در نظر بگیرد [۱۶]. آلموتاز و همکارانش (۲۰۱۳) با بررسی شبیه‌سازی ۲ مدل HEC-HMS و GSSHA در حوضه نیمه‌شهری در سن آنتونیو تگزاس با استفاده از داده‌های رادار به عنوان داده‌های ورودی بارش به این نتیجه رسیدند که مدل توزیعی پایه فیزیکی GSSHA کارایی بهتری نسبت به مدل مفهومی HEC-HMS دارد و به واسنجی کمتری نیاز دارد [۱۷]. چینتالاپودی و همکارانش (۲۰۱۴) برای شبیه‌سازی سیلاب سال ۲۰۰۷ در حوضه بالادست رودخانه گوادالوپ با مساحت ۱۲۳۲ کیلومتر مربع در ایالت تگزاس از مدل توزیعی استفاده کرده و تأثیر ورودی‌های بارش را با کاربرد داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که استخراج ورودی بارش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای موقعی که باران‌سنج‌ها یا رادارهای زمینی مشاهده‌ای پراکنده هستند، به نتایج مناسب‌تر منجر می‌شود [۱۸]. حامدی و همکارانش (۲۰۱۵) در حوضه پارک سیتی ایالت یوتا با به‌کاربردن دو مدل هیدرولوژیکی GSSHA و HEC-HMS و داده‌های ایستگاه باران‌سنجی و داده‌های رادار به‌عنوان دو نوع مختلف ورودی بارش برای همان حوضه به این نتیجه رسیدند که در هر دو نوع ورودی‌های بارش، مدل GSSHA چه از لحاظ معیار نش-ساتکلیف و چه معیار RMSE برآورد بهتری نسبت به مدل HEC-HMS دارد [۱۹]. فورل و همکارانش (۲۰۱۵) با استفاده از مدل توزیعی GSSHA سیلاب سال ۲۰۱۰ در حوضه‌ای در هوستن ایالات متحده آمریکا را، که دارای دوره بازگشت ۵۰۰ سال بود، شبیه‌سازی کرده و توانایی زیاد مدل را در این شبیه‌سازی گزارش کردند [۲۰]. راتینو سیز و همکارانش (۲۰۱۷) در

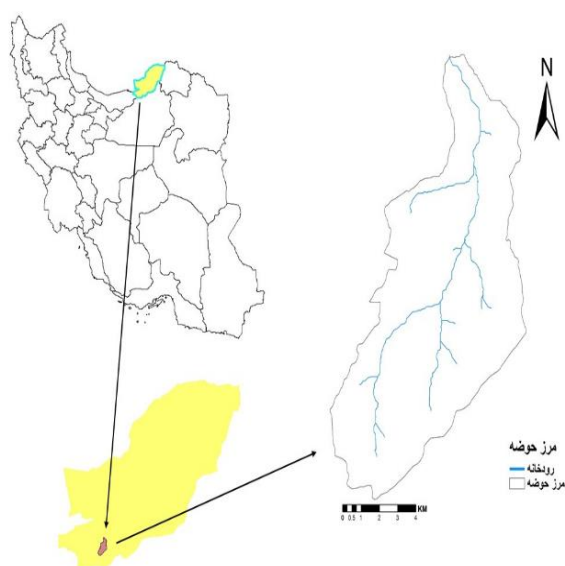
را نسبت به ورودی‌های هواشناسی-هیدرولوژیکی داده شده شبیه‌سازی کند. در این مدل حوضه به سلول‌هایی که تشکیل یک شبکه تفاضل محدود یکنواخت را می‌دهند، تقسیم می‌شود. فرایندهایی که قبل، هنگام و بعد از یک رویداد بارندگی رخ می‌دهند برای هر سلول با هم یکپارچه شده و پاسخ حوضه را تشکیل می‌دهند. مدل GSSHA در برگزیده اجزای مختلف چرخه هیدرولوژی شامل بارش توزیعی، انباشت و ذوب برف، برگاب، تراوش، تبخیر و تعرق، نگهداشت سطحی آب، روندیابی جریان در کانال، مدل کردن منطقه اشباع‌نشده، جریان آب زیرزمینی اشباع‌شده، فرسایش در سطح، انتقال، ته‌نشست و روندیابی رسوب در کانال است [۲۲]. بارندگی جزء ورودی‌های پایه‌ای هر مدل هیدرولوژیکی است. در مدل GSSHA بارندگی می‌تواند به صورت یکنواخت در مکان و زمان با یک شدت ثابت در مدت زمان معین برای یک رویداد واحد و یا به صورت کاملاً متغیر در مکان و زمان برای هر تعداد رخداد بارش به مدل معرفی شود. روش چندضلعی تیسن و روش معکوس مربع فاصله به عنوان تکنیک‌های میان‌یابی برای بارش توزیعی در مدل در نظر گرفته شده‌اند [۲۳].



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی حوضه زیارت

حوضه ۳۰۲۷ متر و بارندگی متوسط سالانه ۷۵۰ میلی‌متر است. موقعیت حوضه زیارت در شکل ۱ به نمایش درآمده است. نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز زیارت از تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه شده است (شکل ۲). نقشه بافت خاک حوضه آبریز زیارت طبق گزارش‌های سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری و نیز نقشه‌های خاک‌شناسی فراهم شده است (شکل ۳). همچنین نقشه مدل رقمی ارتفاعی بر اساس اطلاعات در دسترس قرارگرفته از سوی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری آماده شده است (شکل ۴). داده‌های باران‌سنجی و نیز سنجش دبی رودخانه بررسی شده در این تحقیق از شرکت آب منطقه‌ای گلستان اخذ شده است. این داده‌ها شامل داده‌های دو ایستگاه باران‌سنجی زیارت و نهارخوران و داده‌های ایستگاه هیدرومتری نهارخوران است که به صورت پیوسته و با گام زمانی یک‌ساعته در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۹۳ ثبت شده است.

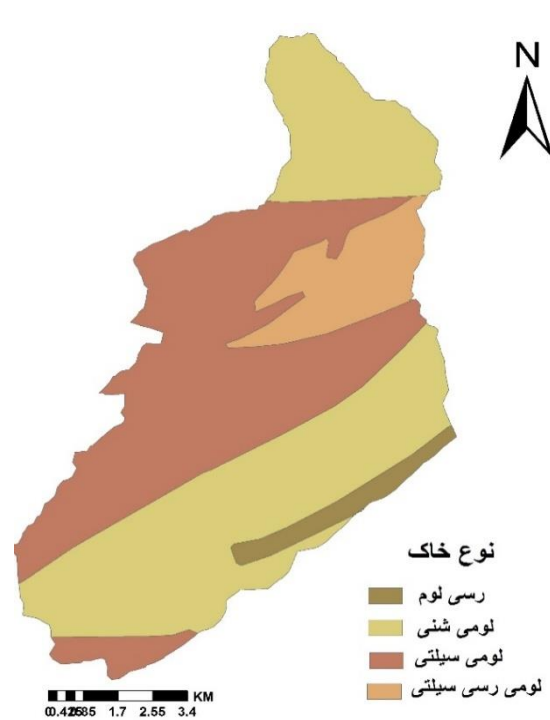
مدل توزیعی GSSHA: مدل GSSHA نسخه بازنویسی شده و بهبودیافته مدل هیدرولوژیکی CASC2D است. مدل GSSHA یک مدل توزیعی- فیزیکی و ساختار شبکه‌ای است که می‌تواند پاسخ هیدرولوژیکی یک حوضه



شکل ۱. موقعیت حوضه زیارت در استان گلستان و کشور



شکل ۴. نقشه مدل رقومی ارتفاعی حوضه زیارت



شکل ۳. نقشه بافت خاک حوضه زیارت

روندبایی می‌شود. مرز حوضه به‌عنوان مرز بدون جریان در روندبایی جریان سطحی در نظر گرفته شده است به‌طوری که اگر سلولی از شبکه روی مرز حوضه قرار گیرد، جریان از میان مرز روندبایی نمی‌شود. وقتی جریان وارد شبکه سلولی کانال می‌شود، حجم آن بر سیستم کانال اضافه شده و به سمت خروجی حوضه روندبایی می‌شود. در مدل GSSHA روال جریان سطحی اجازه تشکیل ذخیره در گودال‌ها را می‌دهد به‌طوری که آب می‌تواند در چاله‌ها انباشته شود تا زمانی که ارتفاع لازم را برای غلبه بر شرایط توپوگرافی به‌دست آورد و یا اینکه در زمین نفوذ کند و یا تبخیر شود [۲۳]. مدل GSSHA با حل معادلات موج پخشیدگی با استفاده از روش حجم محدود صریح دوگامی^۴ روندبایی جریان یک‌بعدی در کانال و جریان دوبعدی در سطح را، جایی که جریان بر اساس ارتفاع هیدرولیکی محاسبه و حجم آن بر اساس جریان محاسباتی بروز و تصحیح می‌شود، انجام می‌دهد. در مقایسه با متدهای پیچیده‌تر اختلاف محدود زمانی و سیستم‌های اجزای محدود، الگوریتم به‌کاررفته در مدل نسبتاً ساده است. در این مدل شیب اصطکاکی بین یک سلول شبکه و همسایگی آن بر اساس اختلاف ارتفاع آب در آنها تقسیم بر

مدل GSSHA اجازه می‌دهد آب بر سطح سلول‌ها جمع شود و بر حسب شرایط در خاک نفوذ کند. شدت نفوذ به خصوصیات هیدرولیکی و شرایط رطوبت پیشین وابسته بوده و ممکن است تحت تأثیر بارندگی‌های قبل، تبخیر و تعرق و سطح سفره آب زیرزمینی قرار گیرد. در این مدل ناحیه غیراشباع، که کنترل‌کننده نفوذپذیری است، می‌تواند بر اساس حل یک‌بعدی معادله ریچارد و همچنین روش گرین و آمپت، که حالت ساده‌شده معادله ریچارد است، شبیه‌سازی شود. سه انتخاب از معادله گرین و آمپت در مدل وجود دارد: حالت اصلی مدل^۱، حالت چندلایه‌ای^۲ و حالت توزیع مجدد^۳. روش‌های اصلی و چندلایه‌ای از مدل نفوذ گرین و آمپت برای بارش‌های تک‌واقع، در جایی که بین بارش وقفه قابل توجهی وجود نداشته باشد، مناسب است. این در حالی است که روش توزیع مجدد برای شبیه‌سازی طولانی‌مدت و یا در مواقعی که بین رخدادهای بارش وقفه ایجاد شده به‌کار می‌رود. مدل GSSHA در شبیه‌سازی سطحی تقریبی از معادله موج پخشیدگی را در دو بعد (x و y) به‌کار می‌گیرد. جریان در دو جهت عمود بر هم در هر سلول از شبکه طی هر گام زمانی

4. Two-step explicit finite volume schemes

1. Traditional GA
2. Multilayer GA
3. Green and Ampt infiltration with redistribution (GAR)

به‌خصوص در آغاز رویداد بارندگی در سیل‌های زودگذر، جهت جریان در اطراف هر گره تعیین می‌شود. این روش، روندیابی را در کانال‌هایی با شیب معکوس در زمانی که جریان آب در سلول بالادست کم بوده و یا وجود نداشته باشد پایدار می‌کند و همچنین اجازه می‌دهد آثار جریان برگشتی شبیه‌سازی شود. جریان‌های بین گره‌ها برای محاسبه حجم، V ، در گره به‌صورت زیر به‌کار می‌رود:

$$V_i^{n+1} = V_i^n + \Delta t (q_{lat}^{n+1} \Delta x + q_{recharge}^{n+1} \Delta x + Q_{i-1/2}^n - Q_{i+1/2}^n) \quad (3)$$

که $(m^{\tau} \cdot s^{-1})$ برابر با جریان ورودی جانبی از سلول‌های جریان سطحی در مجاورت گره و $(m^{\tau} \cdot s^{-1})$ برابر با تبادل جریان آب زیرزمینی و کانال است. این حجم‌های جدید برای محاسبه مقادیر ارزش گره‌ها A و d و پیرامون مرطوب در زمان $n+1$ به‌کار می‌رود. محاسبات از مرز بالادست به سمت مرز پایین‌دست انجام می‌شود [۱۴].

روندیابی جریان سطحی: مدل GSSHA برای

روندیابی جریان سطحی از روش مشابهی که برای روندیابی یک‌بعدی کانال توضیح داده شد، استفاده می‌کند، با این تفاوت که محاسبات در دو بعد انجام می‌شود. اگر دبی‌های بین سلولی در سطح در محور x و y برابر با q باشد، آن‌گاه در سلول ij از عمق d_{ij} در n امین مرحله زمانی با استفاده از معادله مانینگ با ضریب زبری متغیر از لحاظ مکانی n_{Mij} برای محاسبه رابطه ارتفاع-دبی در جهت x و y به‌ترتیب محاسبه شده است:

$$P_{ij}^n = \frac{1}{n_{Mij}} (d_{ij}^n)^{\frac{5}{3}} (S_{fx}^n)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$P_{ij}^n = \frac{1}{n_{Mij}} (d_{ij}^n)^{\frac{5}{3}} (S_{fy}^n)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

عمق در هر سلول در مرحله زمانی $n+1$ بر مبنای جریان هر سلول محاسبه می‌شود.

$$d_{ij}^{n+1} = d_{ij}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (p_{i-1,j}^n + q_{i,j-1}^n - p_{ij}^n - q_{ij}^n) \quad (6)$$

علاوه بر فرمول‌بندی اصلی در مدل CASC2D که شامل روش حل صریح است، دو نوع روش حل جدید به مدل GSSHA اضافه شده است. طرح صریح مسیر متناوب^۱ (ADE) و همراه با یک گام اصلاحگر^۲ (ADEPC). هر

اندازه سلول محاسبه می‌شود. در مقایسه با روش موج سینماتیک، روش موج پخشیدگی به مدل اجازه می‌دهد تا جریان را از میان چاله‌ها، فرورفتگی‌ها و شیب‌های معکوس روندیابی کند. در مدل GSSHA فرمول مانینگ برای ارتباط عمق و دبی جریان به‌کار رفته است که این امر بر آشفتگی بودن جریان و عدم وابستگی زبری به عمق در شبیه‌سازی دلالت دارد. به‌رغم سادگی این مدل بسیار قدرتمند است زیرا اجازه می‌دهد در مواقعی که فقط در قسمتی از شبکه آبراه‌های و یا حوضه آبریز سیلاب رخ داده است محاسبات انجام پذیرد. اهمیت این ویژگی زمانی مشخص می‌شود که بارندگی فقط در یک بخش از حوضه اتفاق افتاده باشد [۲۳]. در ادامه معادلات حاکم بر روندیابی جریان سطحی و جریان در کانال در مدل GSSHA و همچنین معادله نفوذ گرین و آمپت معرفی می‌شود.

روندیابی صریح جریان در کانال: طرح روندیابی

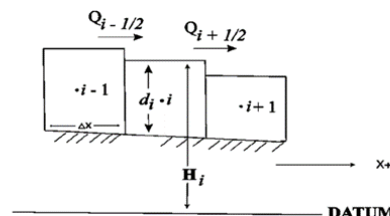
یک‌بعدی کانال در (شکل ۵) نشان داده شده است. جریان‌های (m^{τ}, s^{-1}) $Q_{i-1/2}$ و $Q_{i+1/2}$ در جهت طولی، X بر اساس عمق، $d(m)$ ، در n امین مرحله زمانی با استفاده از معادله مانینگ برای رابطه دبی خروجی محاسبه می‌شود:

$$Q_{i+1/2}^n = \frac{1}{n_M} A_i^n (R_{ij}^n)^{2/3} (S_{f+1/2}^n)^{1/2} \quad (1)$$

که n برابر با ضریب زبری مانینگ، A برابر با مساحت سطح مقطع جریان (m^{τ}) ، R برابر شعاع هیدرولیکی (m) و S_f شیب اصطکاکی است که توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$S_{f+1/2}^n = S_{o+1/2} - \frac{d_{i+1}^n - d_i^n}{\Delta x} \quad (2)$$

S_o برابر با شیب زمین در جهت طولی، X ، است.



شکل ۵. طرح روندیابی صریح جریان در کانال [۱۴]

اگر در کانال جریان معکوس رخ بدهد (جریان به سمت بالادست)، از ارتفاع سلول پایین‌دست برای محاسبه جریان استفاده می‌شود. به علت اینکه جهت جریان در هر نقطه از آبراهه ممکن است در هر لحظه تغییر کند،

1. Alternative direction explicit scheme (ADE)
2. ADE scheme with an additional predictor-corrector step (ADEPC)

مدل نفوذ گرین و آمپت: معادله اصلی گرین و آمپت (۱۹۱۱) که بر اساس تئوری فیزیکی حل تحلیلی دقیقی دارد به صورت زیر است:

$$f = k \left[1 + \frac{(\eta - \theta_i) S_f}{F} \right] \quad (11)$$

که در آن k هدایت هیدرولیکی مؤثر، S_f مکش مؤثر در جبهه رطوبتی، η تخلخل خاک، θ_i رطوبت اولیه، F نفوذ جمعی و f سرعت نفوذ است. برای کاربرد مدل گرین و آمپت، هدایت هیدرولیکی مؤثر، مکش جبهه رطوبتی، تخلخل خاک و رطوبت اولیه باید اندازه گیری یا برآورد شوند. این پارامترها می توانند با واسنجی تعیین شوند. هر چند برای مقاصد خاص کاربردی، ساده تر این است که پارامترها از داده های موجود در دسترس مانند داده های خاک و کاربری زمین تعیین شوند.

یافته ها

با استفاده از نقشه های استخراج شده کاربری اراضی، پوشش خاک و مدل رقوم ارتفاعی فایل داده های توزیعی مدل تهیه و به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد. با توجه به داده های در دسترس بارش-رواناب و در نظر گرفتن شرایط لازم برای کیفیت داده ها از جمله انطباق زمانی داده های بارش-رواناب تعداد پنج رویداد، که داده های قابل قبول داشته اند، برای مدل سازی انتخاب شد. از تعداد پنج رویداد در دسترس، سه رویداد برای مرحله واسنجی و دو رویداد دیگر برای مرحله صحت سنجی مد نظر قرار گرفت. در سه رویدادی که برای مرحله واسنجی مد نظر قرار گرفتند، ابتدا شبیه سازی اولیه صورت گرفت و در ادامه با استفاده از ویژگی واسنجی مدل توزیعی GSSHA پارامترهای مقدار رطوبت اولیه (درصد اولیه آب موجود در خاک)، ضریب زبری سطحی جریان و هدایت هیدرولیکی خاک که بنا بر مراجع بررسی شده و همچنین تجربه عملی که بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل داشتند واسنجی شده است. همچنین پارامترهای نفوذ شامل نقطه پژمردگی، ظرفیت مزرعه، رطوبت اشباع باقی مانده، تخلخل و صعود کاپیلاری نیز در مدل استفاده شده است که برای واسنجی مدل به کار گرفته نشد. پارامترهای واسنجی شده مدل در سه رویداد انتخابی فرایند واسنجی در جدول ۱ ارائه شده است. بررسی این پارامترها نشان می دهد ضریب زبری سطح و هدایت

دو متد ADE و ADEPC برای محاسبات جریان از تفاضل گرادیان استفاده می کنند. در روش ADE، جریان های بین سلولی ابتدا در جهت X با استفاده از معادله ۴ محاسبه می شوند. عمق ها در هر ردیف بر مبنای جریان های در جهت X به روز می شوند:

$$d_{ij}^{n+\Delta t} = d_{ij}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (p_{i-1,j}^n - p_{ij}^n) \quad (7)$$

جریان های بین سلولی در جهت y با استفاده از عمق های به روز شده محاسبه می شوند.

$$q_{ij}^{n+\Delta t} = \frac{1}{n_{Mij}} (d_{ij}^{n+\Delta t})^{\Delta/\tau} (S_{fy}^{n+\Delta t})^{1/\tau} \quad (8)$$

عمق های هر ستون بر مبنای جریان در جهت y محاسبه می شوند:

$$d_{ij}^{n+1} = d_{ij}^{n+\Delta t} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{i,j-1}^{n+\Delta t} - q_{ij}^{n+\Delta t}) \quad (9)$$

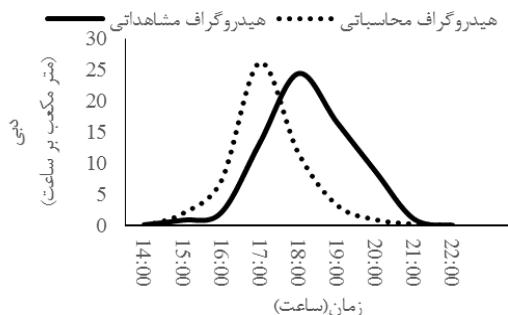
در روش ADEPC، گام های اضافی برای افزایش دقت و پایداری اضافه می شود. در هر بار اجرای الگوریتم، در ردیف ها یا ستون ها، یک برآورد از ارتفاع بر مبنای جریان های محاسبه شده، محاسبه می شود (معادلات ۴ و ۹). سپس با استفاده از عمق های به روز شده، برآوردهای به روز شده از جریان در زمان $n+1$ محاسبه می شوند.

$$q_{ij}^{n+1} = \frac{1}{n_{Mij}} (d_{ij}^{n+1})^{\Delta/\tau} (S_f^{n+1})^{1/\tau} \quad (10)$$

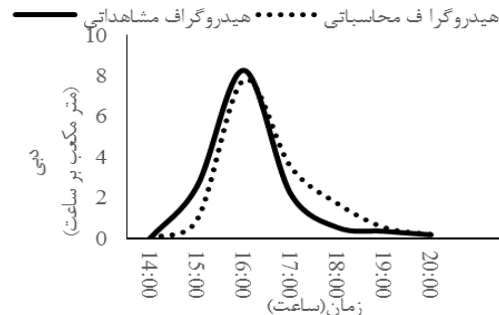
جریان های اصلی و جریان های به روز شده میانگین گیری می شوند تا یک برآورد از جریان میانگین برای گام زمانی محاسبه شود. سپس این جریان ها برای به روز کردن عمق های اصلی به کار می روند (۴ و ۹) [۱۴]. با به کارگیری متدهای ADE و ADEPC می توان گام زمانی مدل را با توجه به شرایط حوضه از ۲۰ تا ۲۴۰ درصد افزایش داد که این امر تأثیر قابل توجهی در کاهش زمان شبیه سازی دارد. به طور کلی، انتخاب روش حل مناسب با توجه به شرایط حوضه انجام می پذیرد به طوری که برای مناطق ناهموار روش ADEPC کارایی زیادی داشته این در حالی است که زمان شبیه سازی در روش یاد شده به دلیل داشتن گام های اضافی محاسباتی بیشتر از دو روش دیگر است. شایان یادآوری است روش های Explicit و ADE را می توان برای مدل رقومی ارتفاعی هموارتر و یا مناطقی با پستی و بلندی کم با صرفه جویی در زمان به کار برد [۲۲].

تبعیت نمی‌کند. بر اساس مقادیر پارامترهای بهینه‌شده در هر رویداد نتایج مدل در شکل‌های ۶-۸ ارائه شده و نتایج معیارهای دقت برازش در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

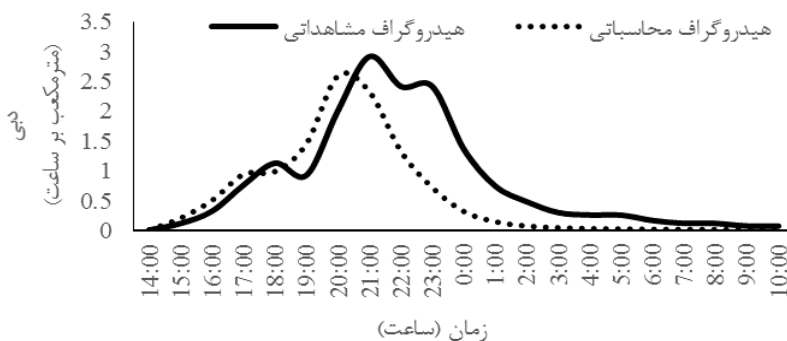
هیدرولیکی اشباع خاک پارامترهایی هستند که طی رویدادهای متفاوت نسبتاً تغییرپذیری کمی را از خود نشان می‌دهند در حالی که پارامتر رطوبت اولیه از این خصوصیت



شکل ۷. هیدروگراف جریان در تاریخ ۱۳۹۲/۷/۴



شکل ۶. هیدروگراف جریان در تاریخ ۱۳۸۹/۴/۱



شکل ۸. هیدروگراف جریان در تاریخ ۱۳۹۰/۶/۵

صحت‌سنجی استفاده شده است. در مرحله صحت‌سنجی رویدادهای انتخابی بر اساس پارامترهای به‌دست‌آمده از مرحله واسنجی مدل شد. مقادیر پارامترها در جدول ۳ که به‌دست‌آمده از واسنجی است، آورده شده است. در این مرحله مقدار ضریب زبری کانال ۰/۰۳ و با در نظر گرفتن شرایط حوضه رطوبت اولیه در حالت خشک در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته در مرحله صحت‌سنجی در شکل‌های ۹ و ۱۰ و در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در هر دو رویداد مقدار حجم رواناب محاسباتی از حجم رواناب مشاهداتی کمتر است که این تفاوت در رویداد تاریخ ۱۳۸۸/۳/۲۹ قابل توجه است، اما در رویداد تاریخ ۱۳۹۰/۵/۱۹ آن‌چنان قابل توجه نیست. در هر دو رویداد مرحله صحت‌سنجی مقدار دبی اوج با اختلاف کمی کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد شده است، اما در عین حال زمان دبی اوج در هر دو رویداد کاملاً دقیق شبیه‌سازی شده است.

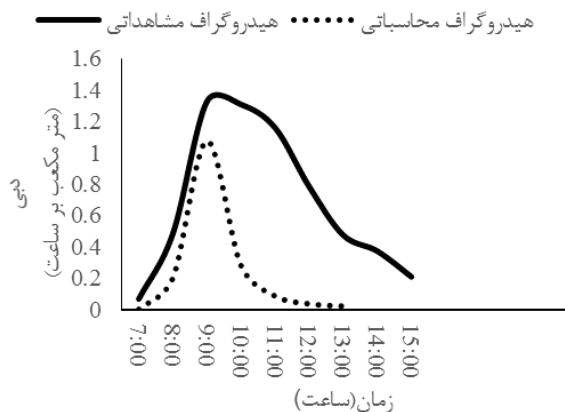
بررسی نتایج بیان می‌کند که در دو رویداد از سه رویداد در مرحله واسنجی دبی اوج محاسباتی کمتر از دبی اوج مشاهداتی است و در یک رویداد دیگر عکس این حالت مشاهده می‌شود، اگرچه مقدار خطا در برآورد دبی اوج قابل توجه نیست. همچنین در دو رویداد زمان دبی اوج محاسباتی کمتر از زمان دبی اوج مشاهداتی است که البته این اختلاف نیز محسوس نیست و در یک رویداد دیگر باقی‌مانده زمان دبی اوج محاسباتی و مشاهداتی بر یکدیگر منطبق است. مقدار خطای حجم رواناب نیز بیان‌کننده آن است که خطای برآورد حجم رواناب محاسباتی در مرحله واسنجی از خطای برآورد دبی اوج و برآورد زمان دبی اوج بازتر است، اما بررسی شکل‌های مقایسه‌ای هیدروگراف‌های رواناب محاسباتی و مشاهداتی در کنار معیار نش-ساتکلیف بیان‌کننده دقت زیاد مدل GSSHA در مرحله واسنجی است. با این‌وجود، پس از واسنجی لازم است درستی پارامترهای تصحیح‌شده صحت‌سنجی شود. به این منظور از دو رویداد برای

جدول ۱. مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی شده مدل GSSHA

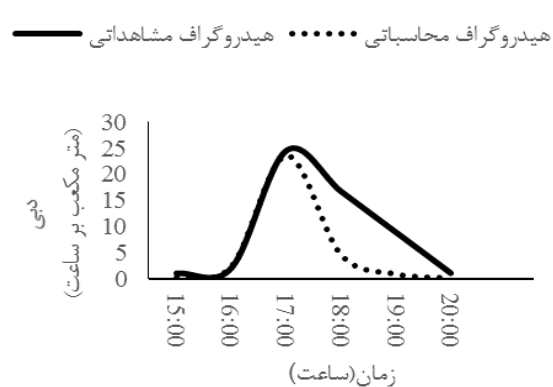
پارامتر واسنجی مدل	پارامترهای واسنجی مدل		بافت خاک	زمان رویداد بارش
	کاربری اراضی	هدایت هیدرولیکی اشباع		
ضریب زبری سطح	ضریب زبری سطح			
۰/۱۹۱	جنگل	۲/۲۵	۰/۴۳۵	۱۳۸۹/۱/۴
۰/۳۲۶	مرتع	۰/۷۱۵	۰/۴۹۴	
۰/۳۱	زمین زراعی	۰/۱۹۶	۰/۴۷۰	
۰/۰۱۳	مسکونی	۰/۱۹۶	۰/۴۱	
۰/۱۹۱	جنگل	۲/۱۸	۰/۴۵۳	۱۳۹۰/۶/۵
۰/۳۴۷	مرتع	۰/۶۸	۰/۵۰۱	
۰/۱۰۲	زمین زراعی	۰/۲	۰/۴۷۱	
۰/۰۱۳	مسکونی	۰/۲	۰/۴۶۴	
۰/۱۹۱	جنگل	۲/۲۵	۰/۳۸۲	۱۳۹۲/۷/۴
۰/۳۲۶	مرتع	۰/۷۱۵	۰/۴۵۹	
۰/۳۰۶	زمین زراعی	۰/۱۹۶	۰/۴۴۳	
۰/۰۱۳	مسکونی	۰/۱۹۶	۰/۳۵۷	
۰/۱۹۱	جنگل	۲/۲۲۵	۰/۴۲۳	میانگین
۰/۳۳۳	مرتع	۰/۷۰۳	۰/۴۸۵	
۰/۲۳۸	زمین زراعی	۰/۱۹۷	۰/۴۶۱	
۰/۰۱۳	مسکونی	۰/۱۹۷	۰/۴۱۰	
۰/۰۰۱	جنگل	۰/۰۱۸	۰/۰۸۷	ضریب تغییرات
۰/۰۳۷	مرتع	۰/۰۲۸	۰/۰۴۶	
۰/۴۹	زمین زراعی	۰/۰۱۱	۰/۰۳۴	
۰	مسکونی	۰/۰۱۳	۰/۱۳	

جدول ۲. شاخص نکویی برازش بر اساس رویدادهای واسنجی مدل GSSHA

شاخص نکویی برازش				رویداد
درصد خطای زمان دبی اوج	درصد خطای دبی اوج	درصد خطای حجم	نش-ساتکلیف	
۵/۵۶	-۷/۰۲	۲۵/۲۵	۵۰/۶۷	۱۳۸۹/۴/۱
۴/۷۶	۱۱/۰۷	۳۵/۱۸	۷۶/۸۱	۱۳۹۰/۶/۵
۰	۵/۵۰	۳/۱۱	۹۲/۶۷	۱۳۹۲/۷/۴



شکل ۱۰. هیدروگراف جریان در تاریخ ۱۳۹۰/۵/۱۹



شکل ۹. هیدروگراف جریان در تاریخ ۱۳۸۸/۳/۲۹

جدول ۳. پارامترهای صحت‌سنجی مدل GSSHA

پارامتر صحت‌سنجی	بافت خاک	زمان رویداد بارش
رطوبت اولیه		
۰/۱۹	لومی شنی	۱۳۸۸/۳/۲۹
۰/۲۴	لومی سیلتی	۰
۰/۲۹	لومی رسی سیلتی	۱۳۹۰/۵/۱۹
۰/۲۳	لومی رسی	

جدول ۴. شاخص نکویی برازش برای صحت‌سنجی مدل GSSHA

شاخص نکویی برازش				رویداد
درصد اختلاف در زمان پیک	درصد اختلاف در پیک	درصد اختلاف در حجم	نش-ساتکلیف	
۰	۱۸/۸۵	۷۷/۷۲	۴۸/۷۵	۱۳۸۸/۶/۲۹
۰	۴/۶۶	۴۵/۳۷	۶۹/۶۴	۱۳۹۰/۵/۱۹

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل‌سازی جریان سطحی به روش توزیعی با استفاده از مدل توزیعی-فیزیکی GSSHA در حوضه آبریز زیارت با مساحت ۹۵/۱۵ کیلومترمربع، به‌منظور شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب صورت گرفت. ابتدا بر اساس داده‌های پایه نقشه ورودی‌های توزیعی مانند مدل ارتفاع رقومی، نقشه خاک و کاربری اراضی استخراج شد. یکی از ویژگی‌های مهم کاربرد مدل توزیعی-فیزیکی اطمینان‌پذیری بیشتر نتایج در مقایسه با مدل‌های مفهومی است زیرا این‌گونه مدل‌ها هم در فرایند به‌کارگیری داده‌های ورودی و هم در فرایند مدل‌سازی تطابق بسیار بیشتری به واقعیت‌های فیزیکی در سطح حوضه آبریز دارند. مدل‌سازی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب بر اساس کاربرد داده‌های سه و دو رویداد انجام شد و با استفاده از معیارهای عددی دقت برازش کارایی مدل GSSHA در فرایند واسنجی و صحت‌سنجی ارزیابی شد. با بررسی نمودارهای مقایسه‌ای هیدروگراف‌های مدل‌شده برای هیدروگراف‌های محاسبه‌شده به نظر می‌رسد که مدل در برآورد بازوی بالارونده هیدروگراف نسبت به برآورد بازوی پایین‌رونده هیدروگراف دقت بیشتری داشته است. در مرحله واسنجی درصد خطای حجم رواناب دامنه زیادی داشته است در حالی که خطای برآورد دبی اوج و زمان دبی اوج تغییرپذیری کمی داشته است و می‌توان گفت که ترتیب پارامترهای هیدروگراف رواناب شبیه‌سازی‌شده بر اساس دقت برازش مدل GSSHA در مرحله واسنجی به‌ترتیب به‌صورت

زمان برآورد دبی اوج، مقدار دبی اوج و حجم رواناب بوده است. به‌طور مشخص مدل GSSHA در مرحله واسنجی در هر سه رویداد مقدار حجم رواناب را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد کرده است. مقدار دبی اوج در مرحله واسنجی در دو رویداد کمتر از مقدار مشاهداتی و در یک رویداد بیشتر از مقدار مشاهداتی برآورد شده است، اما در برآورد زمان دبی اوج در یک رویداد مدل زمان دبی اوج را درست شبیه‌سازی کرده است و در دو رویداد باقی‌مانده مدل GSSHA برآورد کمتری از زمان دبی اوج در مقایسه با داده‌های مشاهداتی داشته است. در مرحله صحت‌سنجی رفتار مدل در برآورد حجم رواناب تقریباً مشابه با مرحله واسنجی بوده است. همچنین در هر دو رویداد مقدار دبی اوج توسط مدل کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد شده است، اما نکته قابل توجه آن است که مدل GSSHA در هر دو رویداد زمان دبی اوج را دقیقاً درست شبیه‌سازی کرده است. باید توجه داشت با توجه به قابلیت مدل‌سازی مکانی مدل GSSHA هنگامی این مدل نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد که داده‌های با کیفیت مناسب بارش در منطقه موجود و این بارش نمایانگر شرایط واقعی حوضه باشد و همچنین در حوضه‌های بزرگ در مواردی که امکان برآورد دقیق داده‌های خاک و زبری سطوح وجود نداشته باشد می‌توان با انتخاب بخشی از حوضه که معرف نوع خاک و پوشش منطقه باشد، با انجام آزمایش‌های منطقه‌ای مقدار مناسب زبری سطوح و نفوذپذیری را استخراج و در کل حوضه به‌کار برد.

منابع

- [1]. Panday, Sorab; Huyakorn, Peter S. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in water Resources*, 2004, 27.4: 361-382.
- [2]. Refsgaard, Jens Christian; Knudsen, Jesper. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 1996, 32.7: 2189-2202.
- [3]. Refsgaard, Jens Christian; Storm, Borge; Refsgaard, Anders. Recent developments of the SystemeHydrologiqueEuropeen (SHE) towards the MIKE SHE. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 1995, 231: 427.
- [4]. Eidipour, Amin, et al. Flood Hydrograph Estimation Using GIUH Model in Ungauged Karst Basins (Case Study: Abolabbas Basin).
- [5]. Adib, Arash; Salarijazi, Meysam; Najafpour, Khosro. Evaluation of synthetic outlet runoff assessment models. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2010, 14.3
- [6]. Adib, Arash, et al. Comparison between GCIUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH, and Nash-IUH models. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2010, 34.2: 91-104.
- [7]. Adib, Arash, et al. Comparison between characteristics of geomorphoclimatic instantaneous unit hydrograph be produced by GcIUH based Clark Model and Clark IUH model. *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, 19.2: 201-209.
- [8]. Senarath, Sharika US, et al. On the calibration and verification of twodimensional, distributed, Hortonian, continuous watershed models. *Water Resources Research*, 2000, 36.6: 1495-1510.
- [9]. Ogden, Fred L., et al. GIS and distributed watershed models. II: Modules, interfaces, and models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2001, 6.6: 515-523.
- [10]. Goodrich, David Charles. Geometric simplification of a distributed rainfall-runoff model over a range of basin scales. 1990.
- [11]. Grayson, Rodger B.; Moore, Ian D.; McMahon, Thomas A. Physically based hydrologic modeling: 1. A terrain-based model for investigative purposes. *Water resources research*, 1992, 28.10: 2639-2658.
- [12]. Downer, Charles W.; Ogden, Fred L. Prediction of runoff and soil moistures at the watershed scale: Effects of model complexity and parameter assignment. *Water Resources Research*, 2003, 39.3.
- [13]. Niedzialek, Justin M.; Ogden, Fred L. Physics-based distributed rainfall-runoff modeling of urbanized watersheds revisited with GSSHA. In: *World Water & Environmental Resources Congress 2003*. 2003. p. 1-10.
- [14]. Downer, Charles W.; Ogden, Fred L. GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2004, 9.3: 161-174.
- [15]. Habib, Emad; Aduvala, Ananda V.; Meselhe, Ehab A. Analysis of radar-rainfall error characteristics and implications for streamflow simulation uncertainty. *Hydrological sciences journal*, 2008, 53.3: 568-587.
- [16]. Paudel, Murari. An examination of distributed hydrologic modeling methods as compared with traditional lumped parameter approaches. 2010.
- [17]. ELhassan, Almoutaz A., et al. Performance of a conceptual and physically based model in simulating the response of a semi-urbanized watershed in San Antonio, Texas. *Hydrological Processes*, 2013, 27.24: 3394-3408.
- [18]. Chintalapudi, Singaiah, et al. Physically Based, Hydrologic Model Results Based on Three Precipitation Products1. 2012.
- [19]. Hamed, Amirmasoud; Fuentes, Hector R. Comparative Effectiveness and Reliability of NEXRAD Data to Predict Outlet Hydrographs Using the GSSHA and HEC-HMS Hydrologic Models. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2015*. 2015. p. 1444-1453.
- [20]. Furl, Chad, et al. Hydrometeorological Analysis of Tropical Storm Hermine and Central Texas Flash Flooding, September 2010. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16.6: 2311-2327.
- [21]. Sith, Ratino; Nadaoka, Kazuo. Comparison of SWAT and GSSHA for High Time Resolution Prediction of Stream Flow and Sediment Concentration in a Small Agricultural Watershed. *Hydrology*, 2017, 4.2: 27.
- [22]. Downer, C. W.; Ogden, F. L. Gridded surface subsurface hydrologic analysis (GSSHA) user's manual. ERDC. CHL SR-06-1, United States Army Corps of Engineers, Engineering Research and Development Center, Vicksburg, 2006.
- [23]. Johnson, Billy E.; Gerald, Terry K. Development of Nutrient Submodules for Use in the Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (gssha) Distributed Watershed MODEL1. 2006.