مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد هجدهم، شماره سوم، ۱۳۹۰
www.gau.ac.ir/journals

شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی– توزیعی WetSpa در حوزه آبخیز چهل‌چای در استان گلستان

*فاطمه یعقوبی[۱] و عبدالرضا بهره‌مند[۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی‌ارشد آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی گرگان و عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام، [۲]استادیار گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۶/۱۱

چکیده

در این مقاله کاربرد مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa در پایه زمانی روزانه ارائه می‌شود. مدل داده‌های ارتفاع، کاربری اراضی، و خاک را با استفاده از GIS ترکیب و هیدروگراف جریان روزانه رودخانه و توزیع مکانی ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوزه را پیش‌بینی می‌کند. مدل WetSpa برای محاسبه رواناب از روش استدلالی اصلاح شده (روش ضریب رواناب مبتنی بر رطوبت خاک) استفاده می‌کند. رواناب حوزه با استفاده از مدل انتقال موج پخشی مبتنی بر شیب، سرعت جریان و ویژگی‌های توزیعی در طول مسیرهای جریان روندیابی می‌شود. آبخیز چهل‌چای با مساحتی حدود ۲۵٤/۹ کیلومترمربع در شرق استان گلستان واقع شده است. دامنه تغییرات ارتفاعی حوزه بین ۱۹٤ تا ۲۵٤۷ متر، شیب متوسط ۳٤ درصد و بارش میانگن سالانه حوزه تقریبا ۷٦٦/۵ میلی‌متر می‌باشد. داده‌های آب و هواشناسی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ شامل داده بارش از سه ایستگاه (لزوره، دوزین و نراب)، دما و تبخیر اندازه‌گیری شده از ۲ ایستگاه (لزوره و دوزین)، به‌عنوان داده‌های ورودی مدل استفاده شد. سه نقشه پایه شامل توپوگرافی، کاربری اراضی و تیپ خاک با اندازه سلول‌های ۹۰ متر در ۹۰ متر در GIS تهیه شدند. آنگاه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده با هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده برای همان دوره‌های ۳ و ۲ ساله موجود مقایسه شدند. نتایج

* مسئول مکاتبه: fatemehyaghubi@yahoo.com

شبیه‌سازی تطابق به نسبت خوبی بین هیدروگراف‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در خروجی حوزه نشان داد. مدل بر اساس معیار ناش- ساتکلیف، هیدروگراف‌های روزانه را با دقت نسبتاً خوبی بیش از ۵۰ و ۵۷ درصد به‌ترتیب برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: آبخیز چهل‌چای، شبیه‌سازی جریان، مدل هیدرولوژیکی توزیعی، WetSpa

مقدمه

شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب در حوزه آبخیز از نقطه نظر درک بهتر مسائل هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، مهندسی رودخانه، سازه‌های کنترل سیل و ذخیره سیلاب اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا مدل‌های بسیاری جهت شبیه‌سازی فرآیندهای حوزه آبخیز وجود دارد که مدل‌های توزیعی از جمله آنها می‌باشند. برآورد بارش- رواناب با مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی و با استفاده از تکنیک سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌صورت گسترده امکان‌پذیر، کاربردی و متداول شده است. مدل WetSpa[1] یک مدل شبکه‌ای و توزیعی شبیه‌سازی رواناب و بیلان آبی است که در پایه زمانی متفاوت ساعتی یا روزانه اجرا می‌شود. مدل در هر نقطه از حوزه جریان سطحی روزانه/ساعتی که اتفاق افتاده هیدروگراف در نقطه خروجی و پارامترهای هیدرولوژیکی توزیعی حوزه را پیش‌بینی می‌کند. ورودی‌های مدل شامل داده رقومی ارتفاع، تیپ خاک، کاربری اراضی و سری‌های زمانی بارش و تبخیر (اندازه‌گیری شده از تشت) می‌باشد. استفاده از داده‌های دبی رودخانه فقط برای واسنجی مدل می‌باشد، در غیر این صورت انتخابی و دلخواه می‌باشد.

ونگ و همکاران (۱۹۹۷)، مدل توزیعی WetSpa را در حوزه آبخیز ترکلپ- مولنبیک[2] در بلژیک اجرا نمودند و نتایج بیانگر این بود که مدل به خوبی قابلیت پیش‌بینی رواناب سطحی را داراست. علاوه بر این نتایج نشان دادند ترکیب مدل‌سازی توزیعی و GIS بسیار سودمند می‌باشد. لیو و دی‌اسمت (۲۰۰۵)، مدل WetSpa را با گام زمانی یک ساعت در حوزه آبخیز کوچکی با مساحت ٦٧/٨ کیلومترمربع، در بلژیک اجرا نمودند. آنالیز آماری هیدروگراف‌های حاصل از مدل و هیدروگراف‌های مشاهده‌ای نشان داد که مدل به خوبی قابلیت پیش‌بینی جریان‌های عادی و سیلابی را

1- Water and Energy Transfer between Soil Plants and Atmosphere
2- Terklep_Molenbik

دارد. ریتابول و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa به پیش‌بینی رواناب در رودخانه سیمیو، در محدوده دریاچه وکتوریا[1] در تانزانیا پرداختند. نتایج به‌دست آمده از تست مدل توسط آنها نشان داد که مدل به خوبی قابلیت روندیابی جریان در رودخانه را دارد. در ایران نیز مطالعات کبیر و همکاران (۲۰۱۰) کاربرد مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa را در حوزه گرگانرود با مساحت ٦٧١٧ کیلومترمربع مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد تطابق خوبی بین هیدروگراف‌های محاسبه شده و مشاهده‌ای وجود دارد و با توجه به معیار ناش–ساتکلیف مدل هیدروگراف‌های روزانه را با دقت ۷۱ تا ۷۷ درصد پیش‌بینی کرد. بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۵)، با استفاده از مدل WetSpa در رودخانه هورناراد[2] حوزه اسلواکی با مساحت ٤٢٦٢ کیلومتر مربع نشان داد که در خروجی حوزه و در زیرحوزه‌های اصلی، انطباق خوبی بین هیدروگراف حاصل از مدل با هیدروگراف مشاهده‌ای وجود دارد و با توجه به معیار ناش– ساتکلیف مدل هیدروگراف‌های روزانه را با دقت، ۷۵ تا ۸۵ درصد پیش‌بینی کرد. صفری و همکاران (۲۰۰۹)، کاربرد مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa را برای پروژه‌ای در آمریکا DMIP2[3] مورد بررسی قرار دادند. آنها در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل از معیار یکپارچگی که نشان‌دهنده میزان اختلاف شکل، اندازه و حجم هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است، استفاده کردند. نتایج برای کالیبراسیون پنج رودخانه حوزه، به جز رودخانه بلو[4] عالی تا خیلی خوب و برای کل دوره اعتبارسنجی، خوب تا خیلی خوب بود که نشان داد مدل قادر است فرآیندهای هیدرولوژیکی مربوطه را با دقت شبیه‌سازی کند. به‌طورکلی مطالعات مختلف انجام گرفته در کشورهای مختلف از جمله لوگزامبرگ، بلژیک، اسلواکی، مجارستان، تانزانیا، تایلند، لهستان و ایران بیانگر این است که مدل در نواحی مختلف جغرافیایی و آب و هوایی و در توپوگرافی‌های کاملاً متنوع و همچنین مدل در حوزه‌های کوچک تا خیلی بزرگ به خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان اعم از سیل و یا جریان روزانه رودخانه می‌باشد. نکته قابل توجه این است که نتایج مدل هم برای خروجی حوزه‌های مورد مطالعه و هم در سرشاخه‌ها و زیرحوزه‌ها چشمگیر بوده است. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که مدل قادر به پیش‌بینی فرآیندهای مختلف هیدرولوژیک در حد خیلی خوب بوده است. به گونه‌ای که به محققین مختلف این امکان را داده که

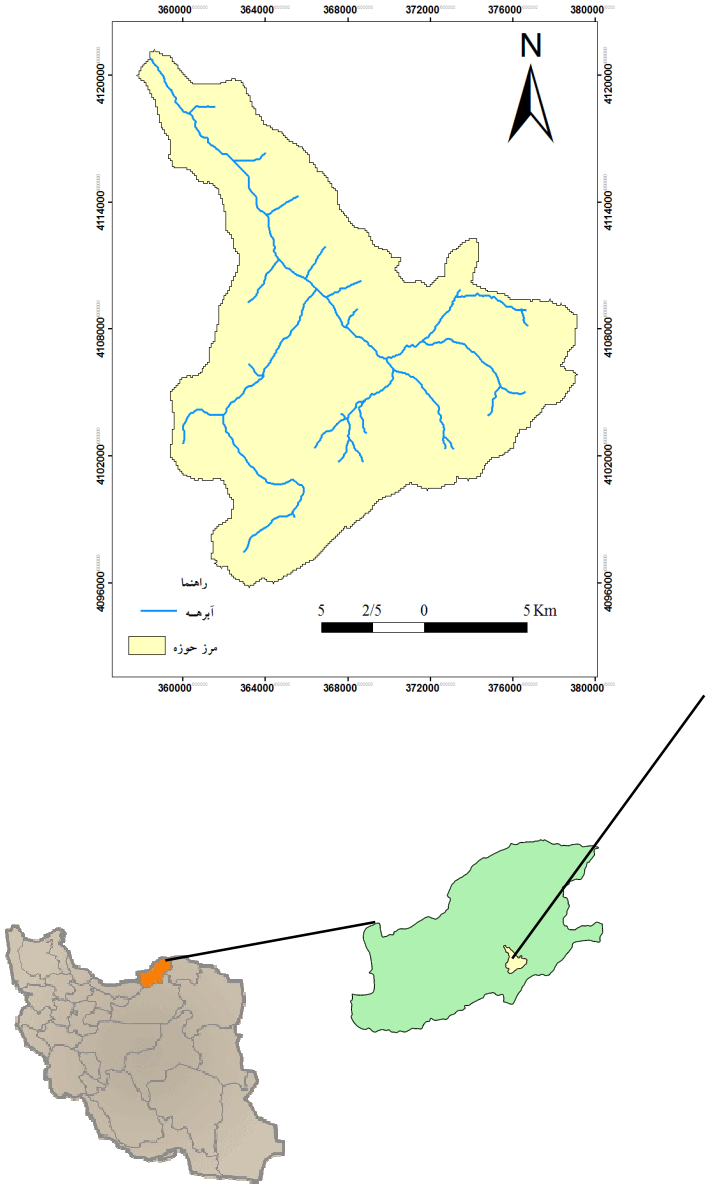
1- Victoria
2- Hornad
3- Distributed Model Intercomparison Project
4- Blue

تاثیر عوامل مختلف موثری مانند تغییر اقلیم و یا تغییر کاربری را بر جریان خروجی حوزه و همچنین بر مولفه‌های بیلان آبی و پدیده‌های هیدرولوژیک مختلف حوزه به صورت توزیعی محاسبه نماید (ریتابول و همکاران، ۲۰۰۷؛ بهره‌مند و همکاران، ۲۰۰۷). نتایج ونگ و همکاران (۱۹۹۷)، لیو و دی‌اسمت (۲۰۰۵)، بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۵ و ۲۰۰۷) که از مدل برای شبیه‌سازی جریان رودخانه و مقایسه بین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در تعدادی از حوزه‌های آبخیز در اروپا استفاده کرده‌اند نشان از توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی جریان دارد.

کوهستانی بودن حوزه چهل‌چای، تغییر کاربری شدید، استفاده بیش از حد از زمین و شرایط اقلیمی حاکم در منطقه مورد مطالعه در سال‌های اخیر سبب وقوع سیلاب‌های مخرب در منطقه شده است. با توجه به این‌که در کشور شبیه‌سازی جریان رودخانه با کمک مدل‌های پیوسته بارش- رواناب، با محدود مدل‌هایی از قبیل SWAT انجام گرفته، و نتایج این پژوهش‌ها با دقت‌های متفاوت و بطورعمده نه چندان خوب منتشر شده است. بررسی این پژوهش‌ها و ضرورت شبیه‌سازی کل هیدروگراف جریان رودخانه برای مدت زمان طولانی موجب شده که هدف اصلی این پژوهش ارائه و کاربرد مدلی باشد که به‌خوبی و با دقت بالا قادر به شبیه‌سازی پیوسته جریان رودخانه در گام‌های زمانی مختلف (در این مطالعه روزانه) باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز چهل‌چای در شرق استان گلستان با مساحتی حدود ۲۵ هزار هکتـار، در محدوده طول شرقی ۵۵ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۸ دقیقه و عرض شمالی ۵۹ درجه و ۳٦ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). حداقل ارتفاع حوزه ۱۹٤ متر در شمال و حداکثر ارتفاع آن، ۲٥٤۷ متر در جنوب حوزه و بارندگی متوسط حوزه، ۷٦٦/٥ میلی‌متر می‌باشد. شیب متوسط وزنی حوزه ۳٤ درصد است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

مدل WetSpa: مدل WetSpa اولین بار توسط ونگ و همکاران (۱۹۹۷) ارائه و سپس توسط دی‌اسمت و همکاران (۲۰۰۰) و لیو و همکاران (۲۰۰۳) برای پیش‌بینی سیل توسعه داده شد. در مدل برای هر شبکه سلولی، ٤ لایه شامل: منطقه ریشه، منطقه انتقال، لایه تاج پوشش و منطقه اشباع (سفره آب زیرزمینی) در نظر گرفته می‌شود. فرآیندهای هیدرولوژیکی مدل نیز شامل بارش، برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی و بیلان آب است. بیلان آبی در هر سلول ترکیبی از تعادل آبی خاک لخت، پوشش گیاهی، آب‌های با سطوح آزاد و بخش غیرقابل نفوذ هر سلول می‌باشد. در هر شبکه سلولی فرآیندها به روش آبشاری تنظیم می‌شوند، به این معنی که رخداد فرآیندها پس از وقوع بارش به صورت پی در پی فرض شده است. در مدل ترکیبی از روابط فیزیکی و تجربی برای شرح فرآیندهای پایه به کار می‌رود. رواناب در شبکه سلولی حاصل مجموع رواناب سطحی، جریان زیر قشری و دبی آب‌های زیرزمینی است. تعادل آب در منطقه ریشه مهمترین بخش در نگهداشت آب محسوب می‌گردد، زیرا این بخش کنترل‌کننده حجم رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی، تبخیر و تعرق و دبی آب زیرزمینی می‌باشد. مدل قادر است کلیه شبیه‌سازی‌ها و پدیده‌های مختلف هیدرولوژیکی در پایه‌های زمانی متفاوت (ساعت/روز) را برآورد کند. تغییرات گام زمانی مدل با تغییر گام زمانی در فایل ورودی به راحتی قابل انجام است. در مدل WetSpa تعادل آب در زون ریشه برای هر شبکه سلولی با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D\frac{\Delta\theta}{\Delta t}=P-I-V-E-R-F \qquad (۱)$$

که در آن D عمق ریشه (متر)، $\Delta\theta$ تغییرات رطوبتی خاک (مترمکعب بر مترمکعب)، Δt گام زمانی (ساعت/ روز)، P بارش (متر بر ساعت / روز)، $I=I_a+D_a$ تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی (I_a) و ذخیره چالابی (D_a) درگام زمانی (متر بر ساعت/ روز)، V رواناب‌سطحی یا بارش مازاد (متر بر ساعت/ روز)، E تبخیروتعرق (متر بر ساعت/ روز)، R میزان نفوذ عمقی از منطقه ریشه (متر بر ساعت/ روز) و F میزان جریان زیر سطحی در زمان (متر بر ساعت/ روز) می‌باشد. در این مدل بارش مازاد با استفاده از روش استدلالی اصلاح شده (روش ضریب رواناب مبتنی بر رطوبت خاک) و بر مبنای خصوصیات هر شبکه شامل شیب، کاربری، نوع خاک، میزان بارش و رطوبت پیشین خاک

محاسبه می‌گردد. ضریب پتانسیل رواناب براساس جدول مرجع[1] تعیین می‌شود که این جداول‌ها بر اساس نقشه‌های شیب، کاربری و تیپ خاک تهیه می‌شوند. میزان جریان زیرسطحی نیز بر اساس قانون دارسی و معادلات موج سینماتیکی محاسبه می‌گردد. به این علت که جریان آب زیرزمینی بسیار آهسته‌تر از حرکت آب در سطح و نزدیک به سطح می‌باشد، جریان آب زیرزمینی به‌صورت یک مخزن خطی یکپارچه در مقیاس زیرحوزه تعریف می‌گردد. جریان آب سطحی و زیر سطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به سوی کانال اصلی روندیابی می‌شود و در خروجی هر زیر حوزه آب زیرزمینی هم به آنها اضافه شده و سپس کل جریان به سمت خروجی حوزه روندیابی می‌گردد. روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادلات تقریب موج پخشی سنت و نانت انجام می‌گیرد (معادله ۲).

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+c\frac{\partial Q}{\partial X}-d\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}=0 \qquad (۲)$$

در رابطه بالا Q دبی (مترمکعب بر ثانیه)، t زمان (روز)، x مسافت در جهت جریان (متر)، c سرعت موج سینماتیکی در سلول (پیکسل) می‌باشد و از معادله ۳ به‌دست می‌آید، در اینجا v نمایانگر سرعت است و d ضریب پخش در سلول می‌باشد، و از رابطه ٤ به‌دست می‌آید که در آن v سرعت جریان (متر بر ثانیه) با معادله مانینگ محاسبه شده و H شعاع هیدرولیکی یا متوسط عمق جریان است (متر) و S_0 شیب کف آبراهه می‌باشد و فرض بر این است که در مسیر ثابت می‌ماند. این دو پارامتر بستگی به عمق و سرعت جریان و خصوصیات زمین دارند (هندرسون، ۱۹٦٦). لیو و همکاران (۲۰۰۳)، برای محاسبه میزان دبی در انتهای مسیر جریان از رابطه ۵، به‌عنوان تابع پاسخ خطی سنت و نانت استفاده نمودند (میلروکانج، ۱۹۷۵).

$$C=(۵/۳)\times v \qquad (۳)$$

$$d=(vH/(۲S_o) \qquad (٤)$$

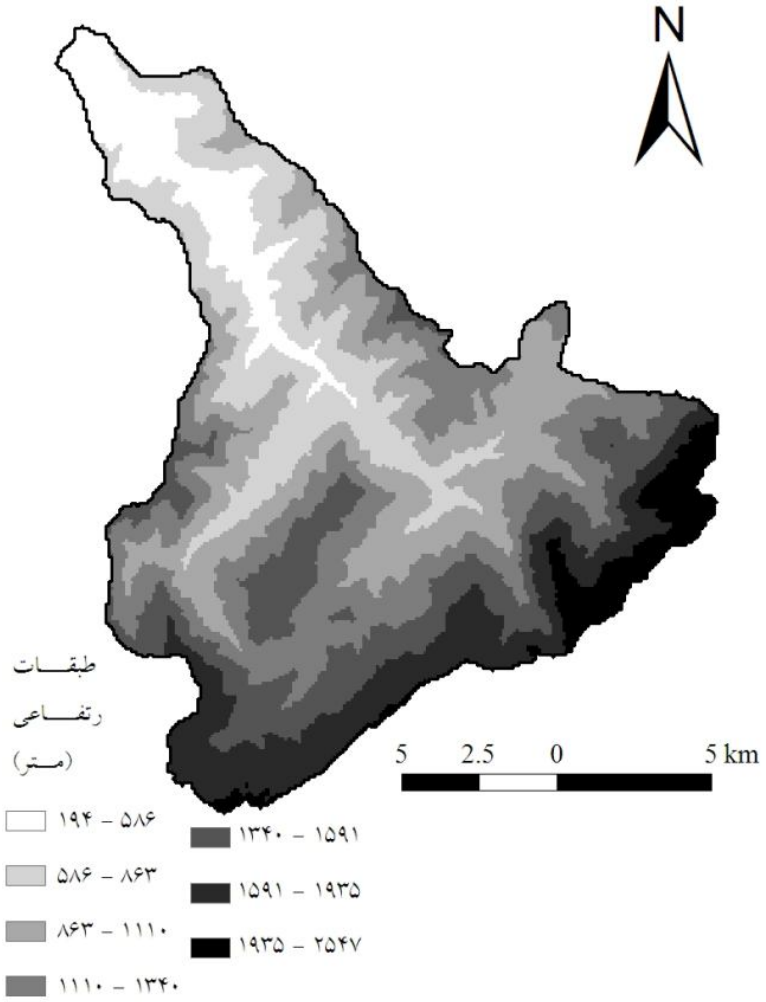
$$t_0=\int\frac{1}{c}dx \qquad (۵)$$

$$\sigma=\sqrt{\int\frac{2d}{C^3}dx} \qquad (٦)$$

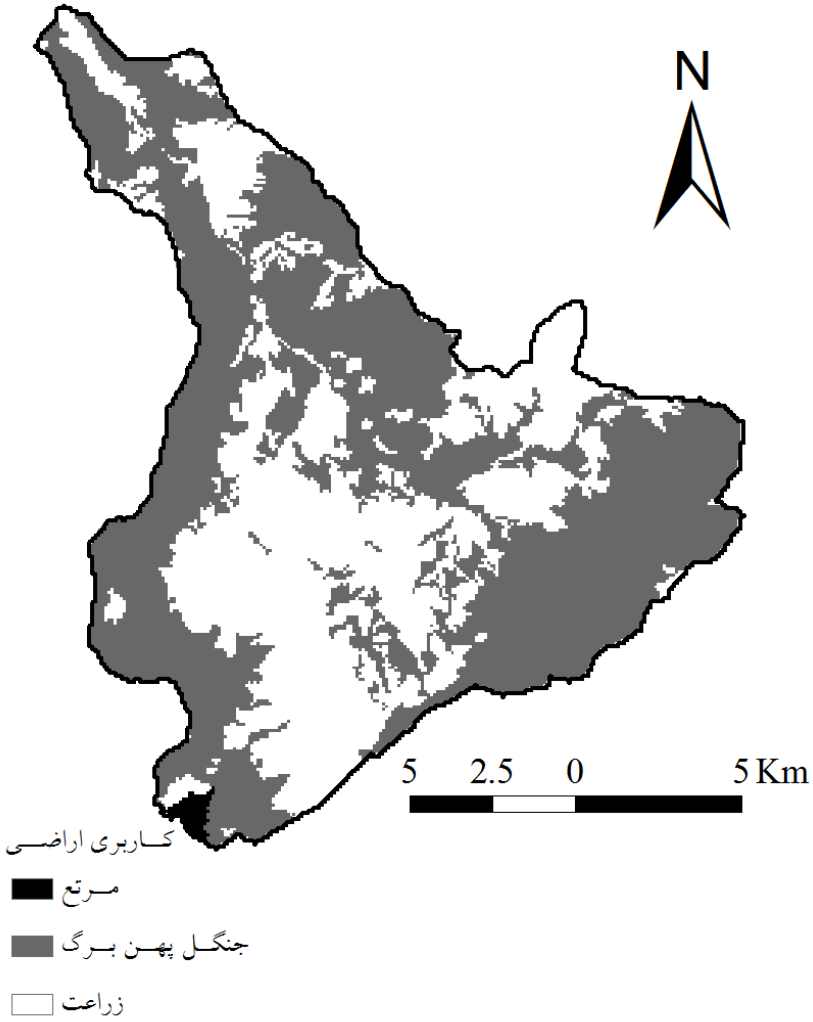
1- Lookup table

که در آن U (t) تابع پاسخ مسیر جریان برای تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای جریان بکار می‌رود و روندیابی مسیر جریان تا خروجی حوزه را ممکن می‌سازد. T_o زمان پیمایش (ساعت) و δ انحراف استاندارد زمان جریان می‌باشد که هر یک بر اساس روابط ٦ و ٧ محاسبه می‌شوند و با انتگرال‌گیری از رابطه هم‌گرایی جریان تمام شبکه سلولی دبی خروجی حوزه به‌دست می‌آید. حسن این روش این است که به پارامترهای هیدرولوژیکی و رواناب توزیعی مکانی حوزه آبخیز این امکان را می‌دهد که به عنوان ورودی‌های مدل عمل کنند. ورودی‌های مدل شامل داده رقومی ارتفاع، تیپ خاک، کاربری اراضی، سری‌های زمانی بارش و تبخیر است که کلیه فرآیندهای هیدرولوژیکی در محیط GIS شبیه‌سازی می‌شوند.

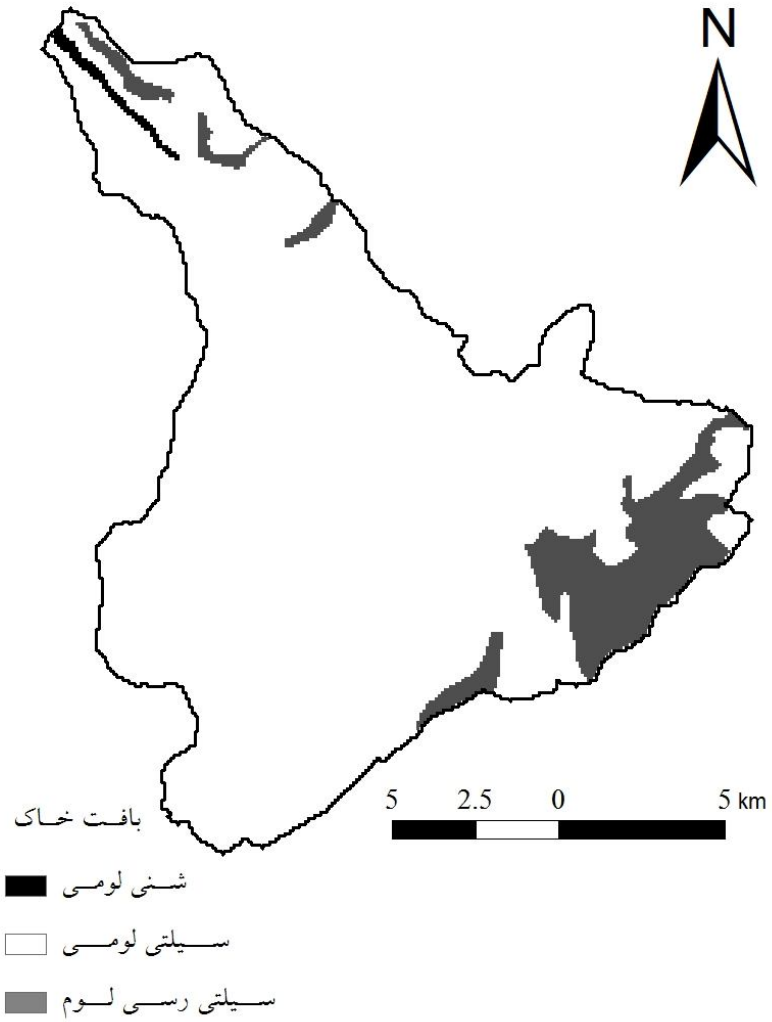
سپس برای انجام مراحل اجرایی استفاده از مدل ابتدا نقشه رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه سلولی ۹۰ متر در ۹۰ متر از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ آبخیز چهل‌چای تهیه شد (شکل ۲). سپس نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای IRS و باند Liss III مربوط به سال ۲۰۰٦ با اندازه سلولی ۹۰ متر در ۹۰ متر به صورت شکل ۳ تهیه گردید (بای و همکاران، ۲۰۱۰) که بر اساس این نقشه ۵۹/۳۳ درصد از حوزه دارای پوشش جنگل و ٤۰/۲۳ درصد از حوزه دارای پوشش زراعت دیم و ۰/٤۳ درصد از حوزه دارای پوشش مرتع می‌باشد. براساس نقشه خاک ۸۹/۷۹ درصد از حوزه دارای بافت سیلتی لوم، ۹/۳٦ درصد و ۰/٥٦ درصد از مساحت حوزه به‌ترتیب دارای بافت سیلتی رسی لوم و شنی لوم می‌باشد (اداره کل کشاورزی گرگان و گنبد، ۲۰۰۵).



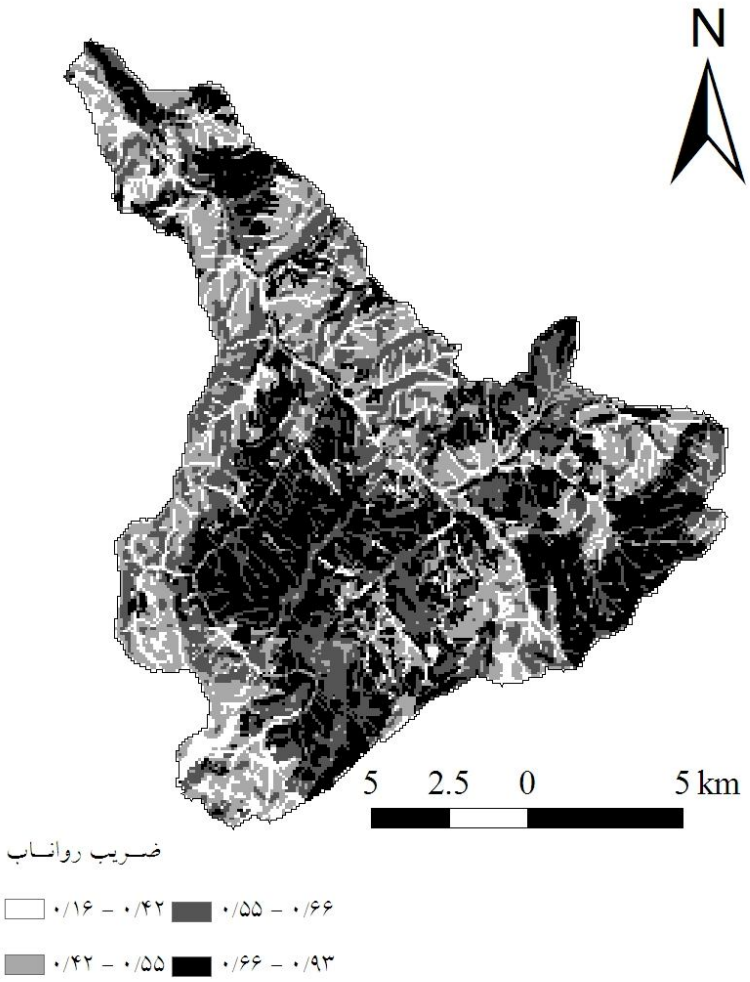
شکل ۲- نقشه طبقات ارتفاعی حوزه چهل‌چای در استان گلستان.



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی حوزه چهل‌چای در استان گلستان.



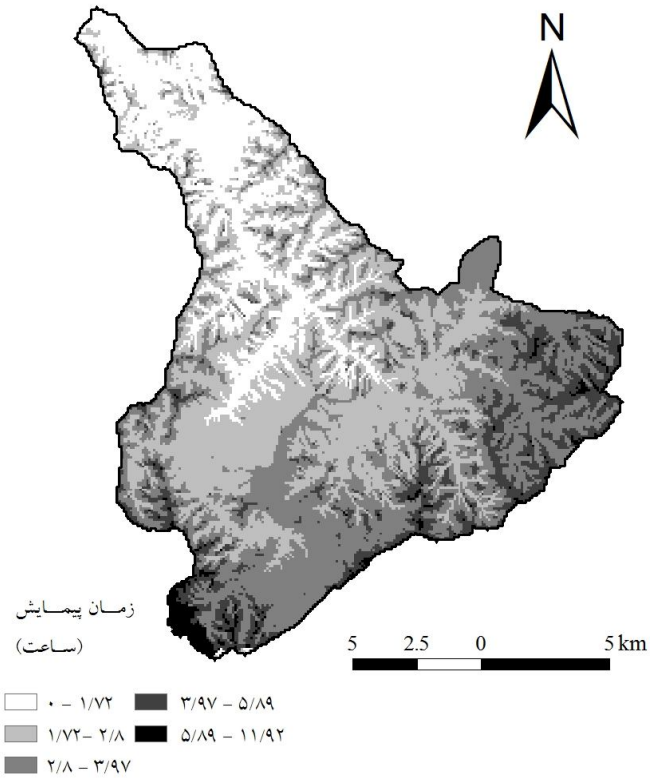
شکل ٤- نقشه بافت خاک حوزه چهل‌چای در استان گلستان.



شکل ۵- نقشه ضریب رواناب پتانسیل حوزه چهل‌چای.

سپس در ادامه شبیه‌سازی در هر شبکه سلولی خصوصیات زمین شامل ارتفاع، جهت جریان، شبکه آبراهه، انشعابات رودخانه، رتبه آبراهه و شعاع هیدرولیکی از طریق مدل رقومی ارتفاعی تهیه شدند. سپس با استفاده از بافت خاک و مقادیر جدول‌های مرجع، هدایت هیدرولیکی خاک، تخلخل و ظرفیت زراعی، رطوبت باقی‌مانده و شاخص توزیع اندازه ذرات و نقطه پژمردگی گیاه به‌صورت نقشه محاسبه گردید. به‌طور مشابه نقشه‌های شبکه عمق جریان، ظرفیت ذخیره برگابی و ضریب زبری مانینگ بر

اساس نقشه کاربری طبقه‌بندی شدند. ضریب زبری مانینگ برای کانال‌ها بر اساس شبکه رتبه‌بندی رودخانه به صورت خطی درون‌یابی و مقادیر ۰/۰۵۵ (ثانیه/ ریشه سوم متر) برای حداقل رتبه و ۰/۰۲۵ (ثانیه/ ریشه سوم متر) برای حداکثر رتبه در نظر گرفته شد. نقشه‌های ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی نیز به‌صورت ترکیبی از کاربری، خاک و ارتفاع هستند. طبق شکل ۵، متوسط ضریب رواناب پتانسیل در کل حوزه ۰/۵۷ به‌دست آمد. شبکه‌های سلولی برای بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری، مرز حوزه و برنامه کمکی پلی‌گون تیسن و آنالیز مکانی تشکیل شدند. سرانجام مدل با استفاده از سرعت جریان، زمان طی شده تا خروجی حوزه و انحراف معیار زمان جریان، هیدروگراف واحد لحظه‌ای از هر شبکه سلولی تا خروجی حوزه را محاسبه کرد (شکل ٦).



شکل ٦- نقشه زمان پیمایش حوزه چهل‌چای.

در این پژوهش از داده‌های ثبت شده مقادیر روزانه دبی، بارش، دما مربوط به سال‌های آبی (۱۳۸۱ تا ۱۳۸۳) برای واسنجی و نیز ۲ سال آبی (۱۳۸٤ تا ۱۳۸۵) برای ارزیابی مدل استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی با هیدروگراف‌های اندازه‌گیری به‌صورت گرافیکی و آماری مقایسه گردید. جهت مقایسه کمی کارایی مدل (جریان خروجی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی) در دو مرحله واسنجی و ارزیابی از شاخص‌های زیر استفاده شد.

$$MB = \left[\frac{\sum_{I=1}^{N} (Q_{si} - Q_{oi})}{\sum_{i=1}^{N} Q_{oi}} \right] \qquad (۸)$$

۲- ضریب همبستگی اصلاح شده[1]

نشان‌دهنده تفاوت اندازه هیدروگراف و شکل آن می‌باشد (مک‌کویین و اشنایدر، ۱۹۷۵).

$$r_{mod} = \left[\frac{\min \{\delta_o, \delta_s\}}{\max \{\delta_o, \delta_s\}} \times r \right] \qquad (۹)$$

۳- معیار ناش- ساتکلیف[2]

معیار ناش- ساتکلیف (۱۹۷۰)، نشان می‌دهد که دبی‌های جریان تا چه حد توسط مدل درست شبیه‌سازی شده‌اند. معادله آن به شرح زیر می‌باشد.

$$NS = \frac{1 - \sum_{i=1}^{N} (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^{N} (Q_{oi} - \overline{Q_o})^2} \qquad (۱۰)$$

٤- معیار جمعی[3]

نشان‌دهنده میزان تفاوت‌هایی از قبیل اندازه، شکل و حجم، بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است.

1- Modified Correlation Coefficient
2- Nash-Sutcliffe
3- Aggregated Measure

$$AM = \frac{r_{\mathrm{mod}} + NS + (1 - |MB|)}{3} \qquad (11)$$

در رابطه بالا، MB انحراف مدل، Qo_i, Qs_i جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه)، $\overline{Q}$ متوسط جریان رودخانه مشاهده‌ای در کل دوره شبیه‌سازی و N تعداد گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی است. مقادیر MB پایین نشان دهنده برارزش بهتر و میزان صفر نمایانگر شبیه‌سازی کامل میزان جریان مشاهده‌ای می‌باشد. در معادله ضریب همبستگی اصلاح شده σ_o و σ_s به‌ترتیب انحراف معیار زمان جریان دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی و r ضریب تصحیح بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی می‌باشد (توسط مدل محاسبه می‌شود).

هم‌چنین مقدار یک، برای هر دو معیار ناش- ساتکلیف و ضریب تصحیح اصلاح شده حالت ایده‌ال است و نشان‌دهنده ارزیابی مناسبی از کارایی مدل است. همچنین مقدار یک برای معیار جمعی، نشان‌دهنده تطابق کامل دو هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است (جدول ۱).

جدول ۱- دسته‌بندی کارایی مدل (آندرسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ آندرسون و همکاران، ۲۰۰۲؛ هنریکسون و همکاران، ۲۰۰۳).

دسته‌بندی	عالی	خیلی خوب	خوب	ضعیف	خیلی ضعیف
معیار جمعی	>۰/۸۵	۰/۷-۰/۸۵	۰/۵۵-۰/۷	۰/٤-۰/۵۵	<۰/٤

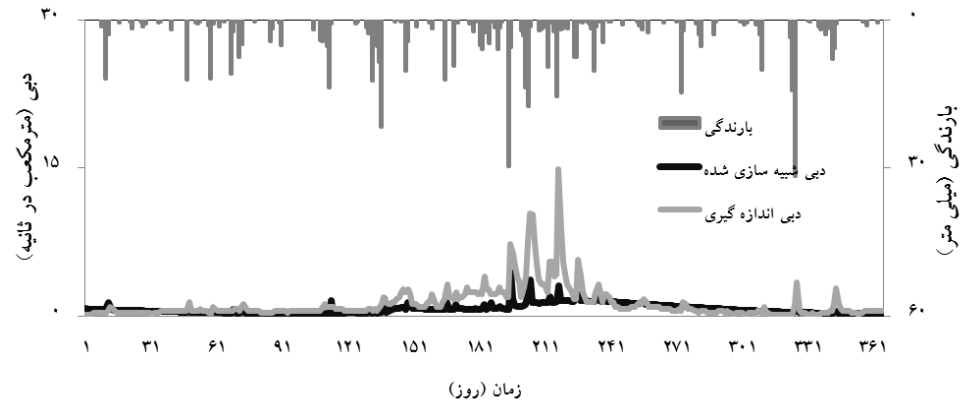
نتایج

براساس مقادیر روزانه دبی، بارش و دما مربوط به سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵، نتایج ارزیابی آماری قابل قبول می‌باشد. نتایج بررسی معیارهای ارزیابی مورد نظر مانند ضریب ناش- ساتکلیف و کارایی اصلاح شده ناش- ساتکلیف برای دبی‌های بالا و پایین در جدول ۲ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد مدل در یک وضعیت و شرایط واقعی مکانی بر اساس ۳ نقشه توپوگرافی، کاربری و نوع خاک قادر به در نظر گرفتن بارش، رطوبت پیشین و فرآیندهای تولید رواناب می‌باشد. که باعث می‌شود مدل مقادیر جریان‌های زیاد و روند هیدرولوژیکی عمومی را به خوبی به‌دست آورد. مقایسه بین جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی روزانه در خروجی حوزه چهل‌چای، برای دوره واسنجی و ارزیابی در شکل (۷ و ۸) ارائه شده است. شکل (۹) پراکنش ابر نقاط لگاریتمی جریان مشاهده‌ای را در مقابل

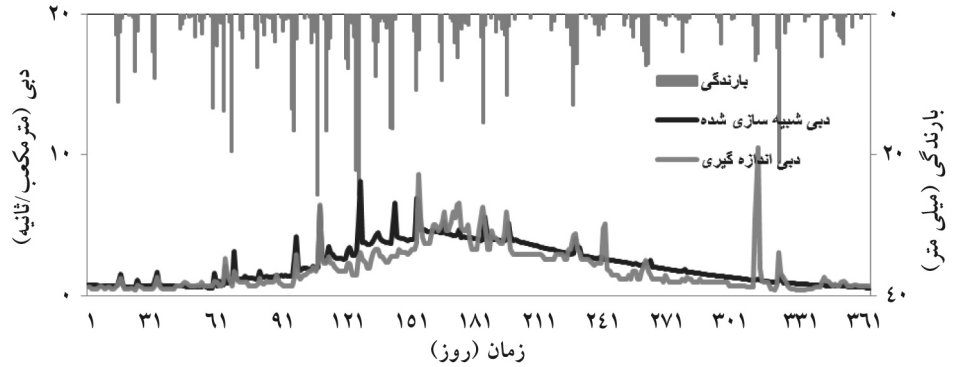
جریان محاسبه شده را با حدود اطمینان ۹۹ درصد، برای دوره ارزیابی مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، دبی‌های شبیه‌سازی شده اطراف خط ۱:۱ و در محدوده ۹۹ درصد واقع شده‌اند و این نشان از کارایی و شبیه‌سازی خوب مدل می‌باشد. خروجی‌های مدل برای دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ۸/۸۹ درصد از بارندگی توسط تاج پوشش متوقف شده و متعاقباً تبخیر می‌شود (ذخیره برگابی). میزان ۳۳/۲٤ درصد از بارش تبدیل به رواناب شده که از این میزان ۲/٤٥ درصد رواناب سطحی، ۰/۰٦ درصد رواناب زیرسطحی و ۳۰/۷۳ درصد دبی آب زیرزمینی است. بقیه یعنی میزان ٦٦/۷٦ درصد میزان تبخیر محاسباتی می‌باشد. قابل ذکر است که مدل میزان ۸۷/۰٤ درصد از بارش را در ابتدا به‌صورت نفوذ آب در خاک محاسبه کرده است، که البته خروجی‌های مدل نشان می‌دهد که چه مقدار از نفوذ دوباره تبخیر و چه مقدار نفوذ عمقی صورت می‌گیرد.

جدول ۲- مقادیر معیارهای کارایی مدل در دوره واسنجی (سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۳) و ارزیابی (سال‌های ۱۳۸٤ تا ۱۳۸۵).

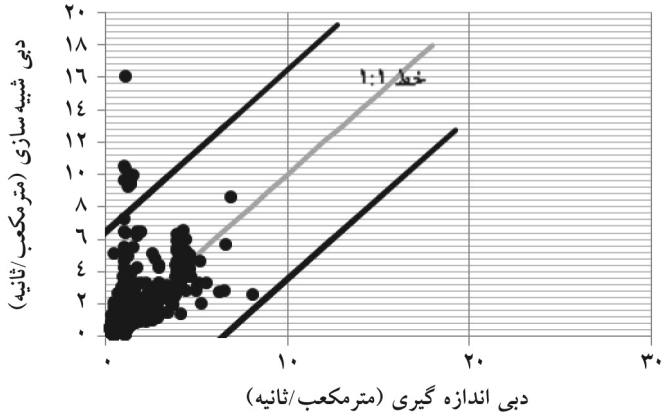
شاخص کارایی	واسنجی	ارزیابی
انحراف مدل برای تعادل حجم جریان	-۰/۰۲۳۲	۰/۰۲٤٦٦
معیار ناش- ساتکلیف	۰/۵۰۳۳	۰/۵۷۰٦
معیار ناش- ساتکلیف برای جریان‌های زیاد	۰/۵٤۸۱	۰/٦۰۲۹
معیار ناش- ساتکلیف برای جریان‌های کم	۰/۳۲۲۰	۰/۵۸۹۲
ضریب تصحیح اصلاح شده	۰/٤۸٤۲	۰/۷۹۱۵
معیار جمعی	۰/٦۵٤۷	۰/۷۰۵۱



شکل ۷- مقایسه بین جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روزانه برای دوره واسنجی حوزه چهل‌چای در سال ۱۳۸۱.



شکل ۸- مقایسه بین جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روزانه برای دوره واسنجی حوزه چهل‌چای در سال ۱۳۸٤.



شکل ۹- نمایش لگاریتمی ابر نقاط جریان مشاهده‌ای در مقابل جریان شبیه‌سازی برای دوره ارزیابی با حدود اطمینان ۹۹ درصد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از خصوصیات حوزه و داده‌های هواشناسی به‌عنوان ورودی مدل توزیعی- مکانی WetSpa، جریان روزانه در حوزه چهل‌چای شبیه‌سازی می‌شود. مدل در حوزه کوهستانی چهل‌چای با داده‌های ۵ سال بارش و تبخیر روزانه مشاهده شده به‌کار رفت و تطابق خوبی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده به‌دست آمد. در این پژوهش ضرایب کارایی مدل هیدرولوژیک شامل انحراف مدل (بیاس) برای تعادل حجم جریان، معیار ناش- ساتکلیف برای دبی‌های بالا و پایین و

معیار جمعی می‌باشد. مدل برای دبی‌های حداکثر بر اساس معیار تطبیق داده شده ناش- ساتکلیف ٦٠ درصد دقت را نشان می‌دهد. این موضوع با هدف اصلی مدل که پیش‌بینی سیلاب می‌باشد، مطابقت داشته و با نتایج لیو و دی‌اسمت (۲۰۰۵)، بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۷) و ریتابول و همکاران (۲۰۰۷) هم‌خوانی دارد. مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بر اساس معیار جمعی، امکان ارزیابی کلی دقت مدل مورد استفاده در پیش‌یابی رفتار هیدرولوژیک آبخیز را فرآهم می‌آورد، که با جایگذاری مقادیر حاصل از ارزیابی مدل در رابطه ۹، معیار یکپارچگی برابر با ۰/۷۰۵۱ است. طبق جدول ۱ میزان کارایی مدل در حوزه چهل‌چای خیلی خوب می‌باشد. می‌توان گفت که مدل مورد استفاده برآورد خوبی از دبی اوج و حجم جریان داشته است و با نتایج صفری و همکاران (۲۰۰۹)، در راستای استفاده از شاخص یادشده برای ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیک مطابقت دارد. بر اساس مقادیر جدول ۲، معیار معرف دقت تعادل آب، ۰/۰۲٤ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد مدل به این میزان ناچیز حجم جریان را بیشتر تخمین می‌زند. به این دلیل که توزیع مکانی خصوصیات هیدرولوژیکی در هرگام زمانی در خروجی حوزه می‌تواند به‌دست آید، مدل به‌خصوص برای آنالیز تاثیر توپوگرافی، نوع خاک و کاربری اراضی روی رفتار هیدرولوژیکی حوزه کاربرد مفید دارد. نتایج حاصل از مطالعات دی‌اسمت و همکاران (۲۰۰۰)، لیو و همکاران (۲۰۰۳)، لیو و دی اسمت (۲۰۰۵)، بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۵)، موید مطلب یادشده می‌باشد. با توجه به این‌که مدل WetSpa قابلیت شبیه‌سازی رواناب در تمام شبکه سلولی حوزه را دارد، این قابلیت مدل برای مدیران و کارشناسان این امکان را فراهم می‌نماید که قبل از اجرای هر گونه عملیات، مناطق مختلف را از نظر پتانسیل ایجاد رواناب و رسوب شناسایی نمایند. توصیه می‌شود در سایر طرح‌های پیش‌بینی سیل، آب منطقه‌ای و منابع طبیعی این مدل را در حوزه‌های مشابه استفاده کنند. همچنین مدل مورد استفاده در این پژوهش را می‌توان در صورت آمار و اطلاعات دقیق مورد نیاز مدل، برای سایر آبخیزهای با وضعیت هیدرولوژیک مشابه توصیه نمود. از آنجا که مدل برای دبی‌های سیلابی طراحی شده است و براساس این مطالعه مقادیر پیک جریان را نسبتاً خوب شناسایی می‌کند، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده آن را در گام‌های ساعتی به کار برد تا توانایی مدل بهتر مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

1.Andersen, J., Refsgaard, J.C., and Jensen, K.H. 2001. Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin-model construction and validation. Journal of Hydrology, 247: 200–214.
2.Andersen, J., Dybkjaer, G., Jensen, K.H., Refsgaard, J.C. and Rasmussen, K. 2002. Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model. Journal of Hydrology, 264: 34–50.
3.Bay, M., Rahimi, M., Saadodin, A., Ownagh., M., and Salman Mahini, A.R. 2010. Investigation of Forest and Agriculture land surface changes using IRS and ETM images in Chehel-chai watershed, Golestan province. Abstracts of first Natural conference of Research of Resource Natural Iran. 28 and 29 October. 5 (In Persian).
4.Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poorova, J., Velcinicka, L., and Kunikova, E. 2007. WetSpa Model Application for Assessing Reforestation Impacts on Floods in Margecany–Hornad Watershed, Slovakia, Watershed Resource Management, 21:1373-1391.
5.Bahremand, A., Corluy, J., Liu, Y.B., and De Smedt, F. 2005. Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia, floods, from Defence to management edited by van Alphen, j., van Beek, E., and Taal, M., Taylor- Francis Group, London. pp: 67-74.
6.Department of Agriculture of Gorgan and Gonbad. 2005. Multi-objective forestry project, Chehel-Chai Watershed 51P (In Persian).
7.De Smedt, F., Liu, Y. B., and Gebremeskel, S. 2000. Hydrological modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information. pp: 295–304. In: C.A. Brebbia (ed.), Boston: WTI Press.
8.Henderson, F.M. 1966. Open Channel Flow. New York: McMillan. 522 P.
9.Henriksen, H.J., Troldborg, L., Nyegaard, P., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C., and Madsen, B. 2003. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. Journal of Hydrology, 280: 52–71.
10.Kabir, A., Mahdavi, M., Bahremand, A., and Noora, N. 2010. Application of a geographical information system (GIS) based hydrological model for flow prediction in Gorganrood river basin, Iran. Journal of Agricultural Research, 5: 23.
11.Liu, Y.B., and De Smedt, F. 2005. Flood Modeling for Complex Terrain Using GIS and Remote Sensed Information, Water Resources Management, 19:5. 605–624.
12.Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., and Pfister, L. 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. Journal of Hydrology, 283: 91–106.
13.McCuen, R.H., and Snyder, W.M. 1975. A proposed index for comparing hydrographs. Water Resources Research, 11: 6. 1021–1024.

14.Miller, W.A., and Cunge, J.A. 1975. Simplified equations of unsteady flow, In: K. Mahmood and V. Yevjevich (eds.), unsteady flow in open channels, Water Resources Publications, Fort Collins, Co.
15.Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282–290.
16.Rwetabula, J., De Smedt, F., and Rebhun, M. 2007. Prediction of runoff and discharge in the Simiyu River (tributary of Lake Victoria, Tanzania) using the WetSpa model. Hydrology and Earth System Sciences. 4: 881–908.
17.Safari, A., De Smedt, F., and Moreda, F. 2009. WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). Journal of Hydrology.
18.Wang, Z., Batelaan, O., and De Smedt, F. 1997. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). Physics Chemistry of the Earth. 21:189–193.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 18(3), 2011
www.gau.ac.ir/journals

Streamflow Simulation using Spatially Distributed Hydrologic Model, WetSpa in Chehel-Chai Watershed in Golestan Province

***F. Yaghoubi[1] and A.R. Bahremand[2]**

[1]M.Sc. student, Dept. of Watershed, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources and Young Researchers Club, Islamic University Ilam Branch, Ilam, Iran,
[2]Assistant Prof. Dept. of Watershed, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources
Received: 2010-11-23; Accepted: 2011-9-2

Abstract

An application of a spatially distributed hydrologic model WetSpa working on a daily time scale is presented in this paper. The model combines elevation; soil and land use data within GIS, and predicts flood hydrograph and the spatial distribution of hydrologic characteristics through a watershed. WetSpa model uses a modified rational method to calculate runoff .The runoff is routed through the basin along flow paths using a diffusive wave transfer model that depending upon slope, flow velocity and dissipation characteristic along the flow lines. The Chehel-chai basin is located in the east of Golestan Province with an area of 254.9 km^2. Elevation rangs from 194 to 2547 m and a mean slope is 34%. The mean annual precipitation in the catchment is 766.5 mm. Daily hydrometeorological data from 2002 to 2006, including precipitation data from three stations (Lazoreh, Dozin, and Narab), temperature and evaporation data from two stations (Lazoreh, Dozin) were used as input to the model. Three base maps, i.e. DEM, land use and soil types are prepared in GIS form using 90×90 m cell size. Simulated hydrographs are compared with measured hydrographs which are available for the same 2 and 3 year periods. Results of the simulations show a rather good agreement between calculated and measured hydrographs. The model predicts the daily hydrographs with a rather good accuracy, more than 50 and 57% for calibration and validation periods respectively according to the Nash-Sutcliff criterion.

Keywords: Chehel-Chai basin; Distributed hydrologic model; Stream flow simulation; WetSpa.

*Corresponding Author; Email: fatemehyaghubi@yahoo.com