شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa (مطالعه موردی- حوضه ناورود)

سیدهادی صادقی[۱*]، هدی قاسمیه[۱] و سیدجواد ساداتی نژاد[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶)

چکیده

مدل‌سازی فرآیند بارش- رواناب و پیش‌بینی دبی رودخانه یک اقدام مهم در مدیریت و مهار سیلاب ها، طراحی سازه‌های آبی در حوزه‌های آبخیز و مدیریت خشک‌سالی است. هدف این پژوهش شبیه‌سازی جریان روزانه در حوزه آبخیز ناورود با مدل WetSpa است. WetSpa یک مدل هیدرولوژیکی- فیزیکی است که قابلیت پیش‌بینی سیلاب در مقیاس حوزه آبخیز با گام های زمانی مختلف را دارد. مدل از لایه های توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک و همچنین آمار هواشناسی برای پیش‌بینی هیدروگراف‌های سیل استفاده می‌کند. در این پژوهش از آمار ۴ ایستگاه (خلیان، خرجگیل، گاوخس، ناو)، طی سال‌های آبی ۱۳۹۰- ۱۳۸۵ استفاده شده. به‌این ترتیب که ۳۶ ماه از مهر ۱۳۸۵ برای کالیبراسیون مدل و ۳۶ ماه از مهر ۱۳۸۸ تا شهریور ۱۳۹۱ برای آزمون مدل انتخاب شد. نتایج شبیه‌سازی با مدل WetSpa نشان داد که این مدل، جریان روزانه رودخانه را در دوره واسنجی و ارزیابی به‌ترتیب با معیار جمعی ۰/۶۳ و ۰/۶۱ شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به‌این نتیجه می‌توان بیان نمود که مدل مورد استفاده، برآورد نسبتاً خوبی از دبی اوج و حجم جریان در هر دو دوره داشته است. همچنین این مدل به‌خوبی توانست بیلان آب حوزه آبخیزه ناورود را شبیه‌سازی کند.

واژه‌های کلیدی: جریان روزانه، بیلان آب، مدل WetSpa، حوضه ناورود

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۲. گروه مهندسی اکو هیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Hadi.watershed@gmail.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]

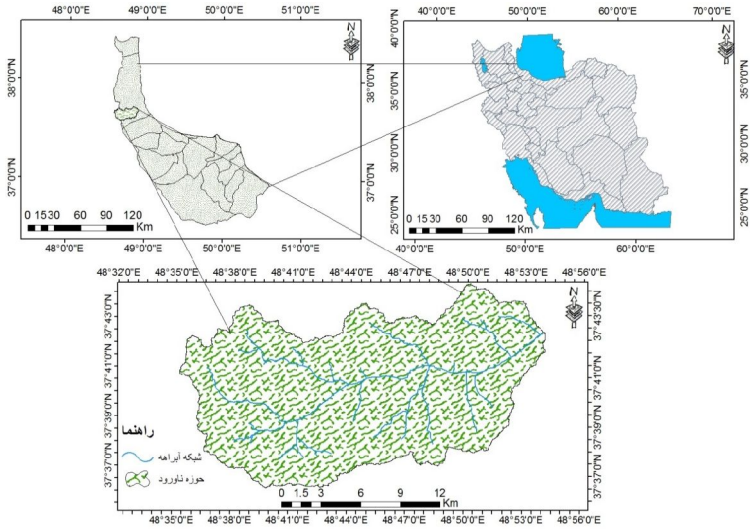
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]

مقدمه

تحلیل سیستم‌های مربوط به چرخه آب در مدیریت حوزهٔ آبخیز برای دستیابی به اهداف مدیریتی جایگاه مهمی دارد و مدل‌سازی یک ابزار مهم و کارآمد برای تحلیل سیستم‌ها است که در فرآیند شبیه‌سازی بارش و رواناب نیز می‌توان از آن استفاده کرد. 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. دراین 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 هیدرولوژیکی WetSpa یک مدل زمان پیوسته و توزیعی مکانی با پایه فیزیکی است که قابلیت شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب نیز در آن توسعه داده شده است. از جمله پژوهشگرانی که در این زمینه مطالعاتی داشته‌اند می‌توان اشاره داشت به، ونگ و همکاران (۱۹) مدل توزیعی WetSpa را در حوزه آبخیز ترکلپ – مولنبیک در بلژیک اجرا نمودند ونتایج بیانگر این بود که مدل به‌خوبی قابلیت پیش‌بینی رواناب سطحی را دارا است. علاوه‌بر این نتایج نشان دادند ترکیب مدل‌سازی توزیعی وGIS بسیارسودمند می‌باشد. لی یو و همکاران (۱۳)، در مقاله‌ای به بررسی انتقال جریان براساس مدل‌سازی سیلاب در حوضه آلزیت در لوگزامبورک پرداختند. آنها مدل را با داده‌های دبی و رواناب ساعتی مشاهده شده در ۳۰ ماه آزمون کردند و نتایج شان بیانگر توانایی بالایی مدل به‌منظور بررسی تأثیر کاربری اراضی و پوشش خاک بر روی رفتار هیدرولوژی رودخانه بود. لیو و دی اسمیت (۱۲)، مدل WetSpa را با گام زمانی یک ساعته در حوزه آبخیز کوچکی با مساحت ۶۷/۸ کیلومترمربع، در بلژیک اجرا نمودند. آنالیز آماری هیدروگراف‌های حاصل از مدل و هیدروگراف‌های مشاهده‌ای نشان داد که مدل به‌خوبی قابلیت پیش‌بینی جریان‌های عادی و سیلابی را دارد. یعقوبی و همکاران (۳) در حوزه آبخیز چهل‌چای، نقشه ضریب رواناب را با استفاده از مدل WetSpa به‌دست آوردند و به‌این نتیجه رسیدند که با اصلاح و بهبود کاربری اراضی در این مناطق، می‌توان تولید رواناب را کاهش داد. محمودی و همکاران (۱) توزیع مکانی هدررفت فسفر در حوزه آبخیز کرج را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند و با مقایسه مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در خروجی حوضه، ضریب کارایی مدل را برابر ۷۱ درصد برآورد کردند. در مجموع نتایج تحقیق نشان داد که از نظر مکانی، بیشترین هدررفت فسفر مربوط به کاربری مخلوط شخم و مرتع و کمترین هدررفت، مربوط به کاربری مخلوط جنگل و باغ است و از نظر زمانی نیز، بیشترین هدررفت در ماه‌های فروردین و اردیبهشت و کمترین هدررفت در ماه‌های دی و بهمن اتفاق می‌افتد. مرادی‌پور و همکاران (۲) در حوزه آبخیز طالقان، توانایی مدل WetSpa در شبیه‌سازی توزیعی مکانی سیل را مورد بررسی قرار دادند. در نهایت نمایه ارزیابی ناش- ساتکلیف برای برآورد رواناب برابر ۸۴/۸۵ درصد به‌دست آمد. صفری و همکاران (۱۸)، کاربرد مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa را برای پروژه‌ای در آمریکا DMIP2 مورد بررسی قرار دادند. آنها در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل از معیار یکپارچگی که نشان دهنده میزان اختلاف شکل، اندازه و حجم هیدروگراف مشاهده ای و شبیه‌سازی شده است، استفاده کردند. نتایج برای کالیبراسیون پنج رودخانه حوزه، به‌جز رودخانه بلو، با استفاده از معیار یکپارچگی عالی تا خیلی‌خوب و برای کل دوره اعتبارسنجی، خوب تا خیلی‌خوب بود که این نتایج نشان داد مدل قادر است فرآیندهای هیدرولوژیکی مربوطه را با دقت شبیه‌سازی کند. کبیر و همکاران (۱۱) در حوزه آبخیز گرگان‌رود، توانایی شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل WetSpa را پیش‌بینی کردند و نمایه ناش- ساتکلیف برای برآورد دبی روزانه را برابر ۷۱ تا ۷۶ درصد به‌دست آوردند. سرانجام نتایج بیانگر قابلیت بالای مدل در برآورد مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و به تبع آن شبیه‌سازی دقیق‌تر بیلان آبی بود. حقی‌زاده (۸)، شبیه‌سازی جریان روزانه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]



شکل ۱: موقعیت حوضه ناورود در استان گیلان و کشور جمهوری اسلامی ایران

با WetSpa را با تأکید بر فرسایش خاک در حوضه نکا، استان مازندران را مورد بررسی قرار داد که نتایج حاصل از کالیبراسیون و آزمون به‌ترتیب با استفاده از معیار یکپارچگی، خیلی‌خوب و عالی بود. به‌طور کلی 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 توپوگرافی های کاملاً متنوع و همچنین مدل در حوزه‌های کوچک تا خیلی بزرگ به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان اعم از سیل و یا جریان روزانه رودخانه می‌باشد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که مدل قادر به پیش‌بینی فرآیندهای مختلف هیدرولوژیک در حد خیلی‌خوب بوده است. به‌گونه‌ای که به محققین مختلف این امکان را داده که تأثیر عوامل مختلف مؤثری مانند تغییر اقلیم و یا تغییر کاربری را بر جریان خروجی حوزه و همچنین بر مؤلفه‌های بیلان آبی و پدیده‌های هیدرولوژیک مختلف حوزه به‌صورت توزیعی محاسبه نماید (۱۷ و ۶). اهمیت بروز سیلاب‌های متعدد در آبخیزهای کوهستانی جنگلی شمال کشور و نیز برنامه‌ریزی پروژه‌های عمرانی از مواردی است که ضرورت انجام این پژوهش را توجیه می‌نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، حوزه آبخیز ناورود اسالم است که در دامنه شرقی سلسله جبال البرز در مختصات جغرافیایی ′۳۵ °۴۸ تا ′۵۴ °۴۸ طول شرقی و ′۳۶ °۳۷ تا ′۴۵ °۳۷عرض شمالی قرار دارد و مساحت و محیط آن به‌ترتیب ۲۶۶ و۸۴ کیلومترمربع است و بین ارتفاعات ۱۲۰و ۲۹۷۴ متری از سطح دریا قرار گرفته، که رودخانه اصلی آن در وسط حوضه و به موازات طول آن جریان دارد رژیم رودخانه، برفی- بارانی و دارای دو دوره پر آبی با طول و شدت کم و بیش مساوی است. رودخانه‌های کوچک دیگری نیز در شمال این رودخانه جریان دارند و به دلتای آن ملحق می‌شوند. موقعیت حوضه ناورود در شکل شماره (۱) نشان داده شده است.

مدل WetSpa اولین بار توسط ونگ و همکاران (۱۹) ارائه و سپس توسط لیو و همکاران (۱۲) برای پیش‌بینی سیل توسعه داده شد. در مدل برای هر شبکه سلولی، ۴ 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]

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 به‌روش آبشاری تنظیم می‌شوند، به‌این معنی که رخداد فرآیندها پس از وقوع بارش به‌صورت پی در پی فرض شده است. در مدل ترکیبی از روابط فیزیکی و تجربی برای شرح فرآیندهای پایه به‌کار 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 کنترل کننده حجم رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی، تبخیر و تعرق و دبی آب زیرزمینی می‌باشد. مدل قادر است کلیه شبیه‌سازی ها 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 (۱) محاسبه می‌گردد:

$$D\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = I\text{-}P\text{-}V\text{-}E\text{-}R\text{-}F \qquad [۱]$$

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=Ia+Da تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی (Ia) و ذخیره چالابی (Da) در گام زمانی (متر بر ساعت /روز)،V رواناب سطحی یا بارش مازاد (متر بر ساعت /روز)، E تبخیر و تعرق (متر برساعت /روز)، R میزان نفوذ عمقی از منطقه ریشه (متر بر ساعت/روز) وF 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 بررطوبت 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 تعیین می شود که این جداول‌ها براساس نقشه‌های شیب، کاربری و تیپ خاک تهیه می‌شوند. میزان جریان زیر سطحی نیز براساس قانون دارسی و معادلات موج سینماتیکی محاسبه می‌گردد. به‌این 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 زیر حوضه تعریف می‌گردد. جریان آب سطحی و زیر سطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به‌سوی کانال اصلی روندیابی می‌شود و در خروجی هر زیر حوضه آب زیر زمینی هم به آن اضافه شده و سپس کل جریان به سمت خروجی حوضه روندیابی می‌گردد. روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادلات تقریب موج پخشی سنت و نانت انجام می‌گیرد که در رابطه ۲ بیان شده است.

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + c\frac{\delta Q}{\delta Q} - d\frac{\delta^2 Q}{\delta t^2} = 0 \qquad [۲]$$

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 رابطه ۳ به‌دست می‌آید که در آن v سرعت جریان ، d ضریب پخش در سلول می‌باشد، و از رابطه ۴ 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_o 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 (۹) و (۱۵). برای محاسبه میزان دبی در انتهای مسیر جریان از رابطه ۵، به‌عنوان تابع پاسخ خطی سنت و نانت استفاده می‌گردد(۱۵).

$$C=(5/3) \times V \qquad [۳]$$

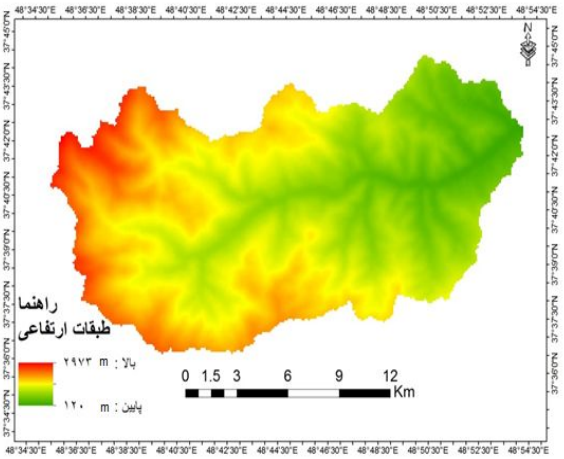
$$d =(vH/2 S_o) \qquad [۴]$$

$$T_O = \int \frac{1}{c} dx \qquad [۵]$$

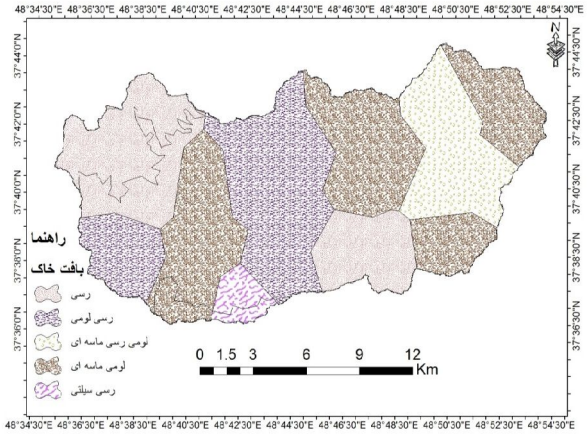
$$\sigma = \sqrt{\int \frac{2d}{c^3} dx} \qquad [۶]$$

که در آن U(t) تابع پاسخ مسیر جریان برای تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای جریان به‌کار می‌رود و روندیابی مسیر جریان تا خروجی حوزه را ممکن می‌سازد. T_o زمان پیمایش (ساعت) وδ انحراف استاندارد زمان جریان می‌باشد که

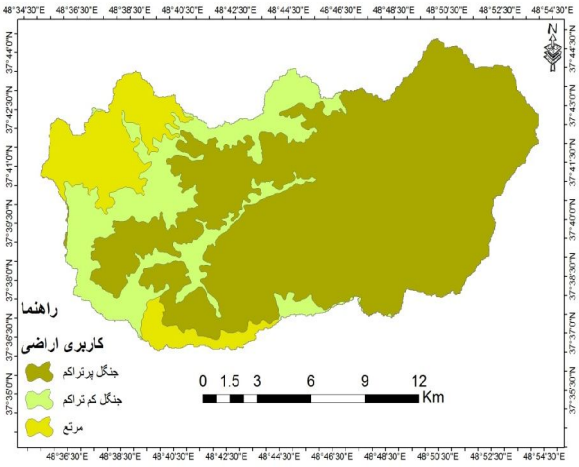
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]



شکل۲. نقشه طبقات ارتفاعی در حوزه آبخیز ناورود



شکل ۳. نقشه بافت خاک در حوزه آبخیز ناورود



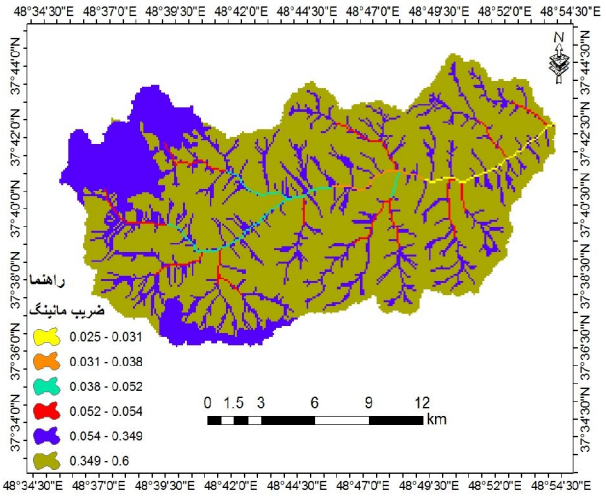
شکل۴. نقشه کاربری اراضی در حوزه آبخیز ناورود

هر یک براساس روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند و با انتگرال‌گیری ازرابطه 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 می دهد که به‌عنوان ورودی های مدل عمل کنند. ورودی های مدل شامل داده رقومی ارتفاع، تیپ خاک، کاربری اراضی، سری‌های زمانی بارش و تبخیر است که کلیه فرآیندهای هیدرولوژیکی در محیط GIS شبیه‌سازی می‌شوند.

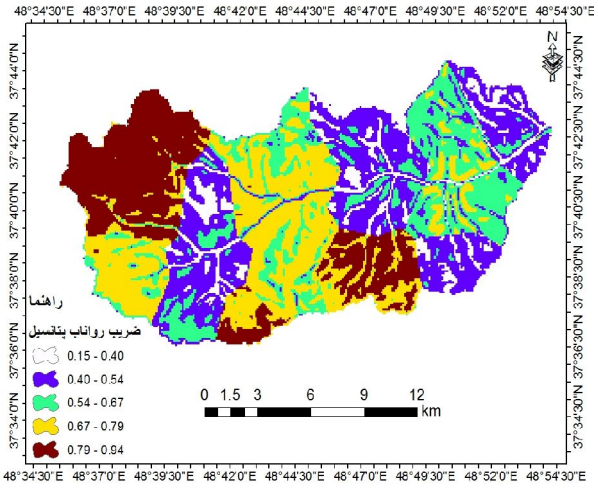
سپس برای انجام مراحل اجرایی استفاده از مدل ابتدا نقشه رقومی ارتفاعی (DEM) با اندازه سلولی ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر از نقشه توپوگرافی تهیه شد(شکل۲). سپس نقشه کاربری اراضی از سازمان منابع طبیعی گیلان با اندازه سلولی ۱۰۰ متر در ۱۰۰متر به‌صورت شکل ۳ تهیه گردید. که براساس این نقشه ۰/۷۰ جنگل با تراکم پوشش زیاد، ۰/۱۸ جنگل با ترکم کم و۱۲/. دارای پوشش مرتع می‌باشد. نقشه خاک نیز با اندازه سلولی برابر با نقشه کاربری تهیه شد (شکل۴) که براساس آن ۰/۲۳ ازحوضه دارای بافت رسی، ۰/۲۵ رسی- لومی، ۰/۱۴ لومی- رسی ماسه‌ای، ۰/۳۵ لومی- رسی و ۰/۳ دارای بافت رسی- سیلتی می‌باشد.

سپس در ادامه شبیه‌سازی در هر شبکه سلولی، خصوصیات

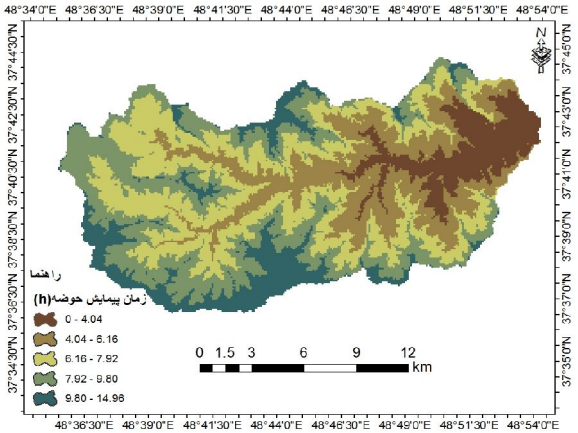
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]



شکل ۵. نقشه ضریب زبری مانینگ در حوزه آبخیز ناورود



شکل ۶. نقشه ضریب رواناب پتانسیل در حوزه آبخیز ناورود



شکل ۷. نقشه زمان پیمایش در حوزه آبخیز ناورود

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 باقی مانده 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 براساس نقشه کاربری طبقه‌بندی شدند. ضریب زبری مانینگ برای کانال ها براساس شبکه رتبه بندی رودخانه به‌صورت خطی درون‌یابی شد، که ۰/۰۲۵ ریشه سوم متر بر ثانیه برای حداقل رتبه و ۰/۶ ریشه سوم متر بر ثانیه برای حداکثر رتبه (شکل ۵). نقشه‌های ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی نیز به‌صورت ترکیبی از کاربری ،خاک و ارتفاع هستند. طبق (شکل ۶)، متوسط ضریب رواناب پتانسیل در کل حوضه ۵۴/۴۵ درصد به‌دست آمد. شبکه های سلولی برای بارش ،دما و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری، مرز حوضه و برنامه کمکی پلی گون 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 ۷).

در این پژوهش از داده‌های ثبت شده مقادیر روزانه دبی،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]

جدول ۱. دسته‌بندی کارایی مدل (۴،۵،۱۰)

دسته‌بندی	معیارجمعی
عالی	۰/۸۵
خیلی‌خوب	۰/۷۰-۰/۸۵
خوب	۰/۵۵-۰/۷۰
ضعیف	۰/۴۰-۰/۵۵
خیلی‌ضعیف	<۰/۴۰

بارش، دما به‌این ترتیب که ۳۶ ماه از مهر ۱۳۸۵ تا ۳۱ شهریور ۱۳۸۸ برای کالیبراسیون و ۳۶ ماه از مهر ۱۳۸۸ تا ۳۱ شهریور۱۳۹۱ برای ارزیابی مدل استفاده شده است. 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 شاخص های زیر استفاده شد.

۱. انحراف مدل، نسبت میانگین اختلاف بین جریان مشاهداتی وشبیه‌سازی شده

$$MB = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{si} - Q_{oi})}{\sum_{i=1}^{n} Q_{oi}} \right] \qquad [۷]$$

۲. ضریب همبستگی اصلاح شده

نشان دهنده تفاوت بین اندازه هیدروگراف و شکل آن می‌باشد(۱۴)

$$R_{mod} = \left[\frac{\min(\delta_o / \delta_s)}{\max(\partial_o / \partial_s)} * r \right] \qquad [۸]$$

۳. معیار ناش- ساتکلیف

معیار ناش– ساتکلیف (۱۶)، نشان می‌دهد که دبی‌های جریان تا چه حد توسط مدل درست شبیه‌سازی شده‌اند.معادله آن به شرح زیر می‌باشد.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (Qo_i - \overline{Qo})^2} \qquad [۹]$$

۴. معیار جمعی

نشان دهنده میزان تفاوت‌های از قبیل اندازه، شکل و حجم، بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است.

$$AM = \frac{R_{mod} + NS + (1 - |MB|)}{3} \qquad [۱۰]$$

در روابطه بالا MB انحراف مدل، Qs_iو Qo_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 برازش بهتر و میزان صفر نمایانگر شبیه‌سازی کامل میزان جریان مشاهده‌ای می‌باشد. در معادله ضریب همبستگی اصلاح شده δ_s و δ_o 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 ایده‌آل است و نشان دهنده ارزیابی مناسبی از کارایی مدل است. همچنین مقدار یک برای معیار جمعی نشان دهنده تطابق کامل دو هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است(جدول ۱).

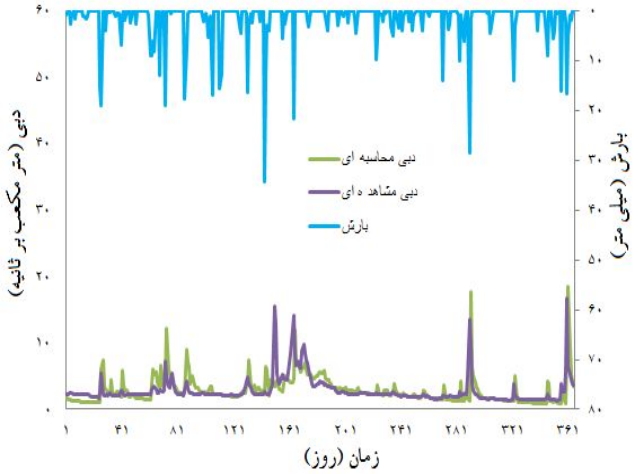
نتایج

براساس مقادیر روزانه دبی، بارش و دما مربوط به سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۱، نتایج ارزیابی آماری قابل قبول می‌باشد. نتایج بررسی معیارهای ارزیابی موردنظر مانند ضریب ناش–

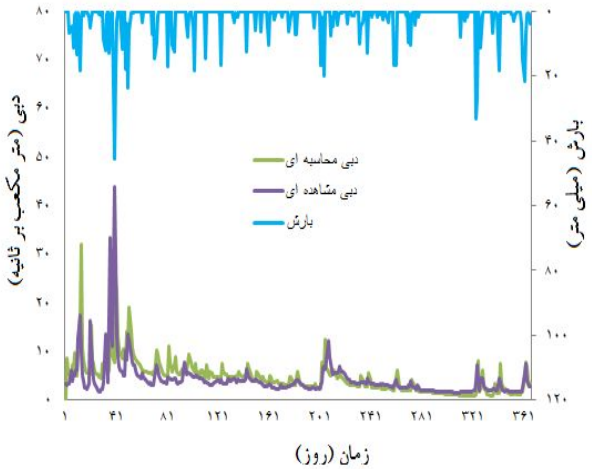
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]

جدول ۲. مقادیر معیارهای کارایی مدل در دوره واسنجی (مهر ۱۳۸۵ تا شهریور۱۳۸۸) وارزیابی (مهر۱۳۸۸ تا شهریور۱۳۹۱)

شاخص کارایی	واسنجی	آزمون
انحراف مدل برای تعادل حجم جریان	-۰/۰۵	۰/۰۳
معیار ناش- ساتکلیف	۰/۴۳	۰/۳۲
معیار ناش- ساتکلیف برای جریان های زیاد	۰/۴۷	۰/۳۸
معیار ناش ساتکلیف برای جریان‌های کم	۰/۳۶	۰/۲۸
ضریب تصحیح اصلاح شده	۰/۵۲	۰/۵۴
معیار جمعی	۰/۶۳	۰/۶۱



شکل۸. مقایسه بین جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روزانه برای دوره واسنجی حوضه ناورود در سال ۱۳۸۷



شکل ۹. مقایسه بین جریان اندازه‌گیری وشبیه‌سازی شده روزانه برای دوره ارزیابی حوضه ناورود در سال ۱۳۸۸

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 براساس 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 به‌خوبی به‌دست آورد. مقایسه بین جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی روزانه در خروجی حوزه ناورود، برای دوره واسنجی و ارزیابی در شکل(۸ و ۹) ارائه شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

مقایسه چشمی و آماری آب نمودهای محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای دوره‌های واسنجی و آزمون مدل WetSpa نشان‌دهنده تطابق خوب بین دو آبنمود است. همچنین نتایج این تحقیق با نتایج لیو و دی اسمت (۱۲)، بهره‌مند و همکاران (۶ و۷)، مبنی بر پایین بودن نمایه ناش- ساتکلیف برای جریان‌های کم همخوانی دارد. این محققین در تحقیقات خود نمایه ناش- ساتکلیف را برای جریان‌های حداکثر بیش از جریان‌های کم برآورد کرده‌اند. در این پژوهش ضرایب کارایی مدل هیدرولوژیک شامل انحراف مدل برای تعادل حجم جریان، معیار ناش- ساتکلیف برای دبی‌های بالا و پایین، ضریب همبستگی اصلاح شده و معیار جمعی استفاده شد. مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی براساس معیار جمعی، امکان ارزیابی کلی دقت مدل مورد استفاده در پیش‌بینی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]

رفتار هیدرولوژیک آبخیز را فراهم نموده که با جای‌گذاری مقادیر حاصل از ارزیابی مدل در رابطه ۱۰، معیار جمعی برای دوره واسنجی ۰/۶۳ و برای دوره ارزیابی برابر با ۰/۶۱ به‌دست آمد. طبق جدول ۱ و با توجه به معیار جمعی میزان کارایی مدل در حوضه ناورود برای هر دو دوره واسنجی و آزمون خوب می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که مدل مورد استفاده برآورد خوبی از دبی اوج و حجم جریان داشته است و با نتایج حقی‌زاده (۸) و صفری و همکاران (۱۸) در راستای استفاده از شاخص یاد شده برای ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیک مطابقت دارد.

براساس مقادیر جدول ۲، معیار معرف دقت تعادل آب، ۳ درصد است که نشان می‌دهد مدل به مقدار ناچیز، حجم جریان را کمتر تخمین می‌زند. همچنین توزیع مکانی خصوصیات هیدرولوژیکی در هر گام زمانی در خروجی حوضه می‌تواند به‌دست آید، لذا مدل به‌منظور بررسی و آنالیز تأثیر توپوگرافی، نوع خاک و کاربری اراضی روی رفتار هیدرولوژیکی حوضه کاربرد مفید دارد. نتایج حاصل از مطالعات لیو و همکاران (۱۳) و لیو و دی اسمیت (۱۲)، مؤید مطلب ذکر شده است.

مطالعه تعادل آبی حوزه آبخیز نیز به‌منظور بررسی تغییرات آبی سیستم هیدرولوژیکی است که با توجه به‌نتایج داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های مشاهده شده تعیین می‌گردد. بررسی نتایج حاصل از بیلان آبی مدل WetSpa برای دوره آزمون نشان داد که ۷ درصد از بارندگی توسط تاج پوشش متوقف شده و متعاقباً تبخیر می‌شود (ذخیره برگابی). ۵۴ درصد از بارش تبدیل به رواناب شده که از این میزان، ۱۰ درصد رواناب سطحی،۱۱ درصد رواناب زیرسطحی و ۳۳ درصد، دبی آب زیرزمینی است. بنابراین ۳۹ درصد باقی‌مانده، میزان تبخیر محاسباتی است. میزان رواناب حوضه ۵۲ درصد از بارش سالانه تخمین زده شده که با میزان رواناب مشاهداتی که ۴۱ درصد از بارش سالانه است، تطابق نسبتاً خوبی دارد. بنابراین می‌توان این‌گونه استدلال نمود که مدل، مؤلفه بیلان آبی را نیز به‌خوبی برآورد نموده است.

منابع مورد استفاده

۱. محمودی، ز. ح. زینی‌وند.، و ع. حقی‌زاده. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی توزیعی- مکانی سیل با مدل هیدرولوژیکی WetSpa مبتنی بر GIS، فصل‌نامه بین‌المللی پژوهشی تحلیلی منابع آب و توسعه، ۱۰(۳): ۱۷۳-۱۵۹.

۲. مرادی‌پور، ش.، ع. ر. بهره‌مند.، ح. زینی‌وند و ع. نجفی‌نژاد.۱۳۹۰. شبیه‌سازی توزیعی– مکانی سیل با مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوزه آبخیز طالقان، لوح فشرده مجموعه مقالات هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۷ تا ۸ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۰.

۳. یعقوبی، ف. ع. ر. بهره‌مند و ن. نورا.۱۳۸۹. تهیه نقشه ضریب پتانسیل رواناب حوضه چهل‌چای با استفاده از مدل WetSpa، مجموعه مقالات ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ۸ تا ۹ اردیبهشت ماه ۱۳۸۹.

4. Andersen, J., J. C. Refsgaard and K. H. Jensen. 2001. Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin-model construction and validation. J. of Hydrology 247: 200-214.

5. Andersen, J., G. Dybkjaer, K. H. Jensen, J. C. Refsgaard and K. Rasmussen. 2002. Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model. J. of Hydrology 264: 34-50.

6. Bahremand, A., F. De Smedt, J. Corluy, Y. B. Liu, J. Poorova, L.Velcinicka and E. Kunikova. 2007. WetSpa Model Application for Assessing Reforestation Impacts on Floods in Margecany-Hornad Watershed, Slovakia, Watershed Resour Management 21:1373-1391.

7. Bahremand, A., J. Corluy, Y. B. Liu and F. De Smedt. 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.,

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]

Taylor- Francis Group, London. pp: 67-74.
8. Haghizadeh, A. 2012. Daily flow simulation using WetSpa model with emphasize on soil erosion Neka catchment in Mazandaran province, INTECH Resour. pp:173-191.
9. Henderson, F. M. 1966. Open Channel Flow. New York: McMillan. 522 P.
10. Henriksen, H. J., L. Troldborg, P, Nyegaard, T. O. Sonnenborg, J. C. Refsgaard and B. Madsen. 2003. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. J. of Hydrology 280: 52-71.
11. Kabir, A., M. Mahdavi, A. Bahremand and N. Noora. 2011. Application of a Geographical Information System (GIS) based Hydrological Model for flow Prediction in Gorganrood River Basin, Iran, African J. of Agri. Research 6(1): 35-45.
12. Liu, Y. B. and F. De Smedt. 2005. Flood Modeling for Complex Terrain Using GIS and Remote Sensed Information, Water Resources Management, 19 (5): 605-624.
13. Liu, Y. B., S. Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister. 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. J. of Hydrology 283: 91-106.
14. McCuen, R. H. and W. M. Snyder. 1975. A proposed index for comparing hydrographs. Water Resour Research 11(6): 1021-1024.
15. Miller, W. A. and J. A. Cunge. 1975. Simplified equations of unsteady flow, *In*: K. Mahmood and V. Yevjevich (Eds.), unsteady flow in open channels, Water Resour Publications, Fort Collins, Co.
16. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1. A discussion of principles. J. of Hydrology 10: 282-290.
17. Rwetabula, J., F. De Smedt and M. Rebhun. 2007. Prediction of runoff and discharge in the Simiyu River (tributary of Lake Victoria, Tanzania) using the WetSpa model. Hydrology and Earth System Sci. 4: 881-908.
18. Safari, A., F. De Smedt and F. Moreda. 2009. WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). J. of Hydrology.
19. Wang, Z., O. Batelaan and F. De Smedt. 1997. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). Physics Chemistry of the Earth. 21:189-193.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.23]