مقاله پژوهشی

هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۳۲، سال نهم، پاییز ۱۴۰۱، صص ۴۲-۲۵
Hydrogeomorphology, Vol. 9, No. 32, Fall 2022, pp (25-42)
CC BY-NC

شبیه‌سازی رواناب رودخانه با استفاده از مدل WetSpa در حوضه آبریز قورچای

کاکا شاهدی [*۱]، مهتاب فروتن دانش [۲]

۱- استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۷

چکیده

شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب در یک حوضه از نقطه نظر درک بهتر مسائل هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، مهندسی رودخانه، سازه‌های کنترل سیل و ذخیره سیلاب اهمیت ویژه‌ای دارد. برآورد بارش- رواناب با مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی و با استفاده از تکنیک سامانه اطلاعات جغرافیایی به صورت گسترده امکان‌پذیر، کاربردی و متداول شده است. مدل وتسپا یک مدل شبکه‌ای و توزیعی شبیه‌سازی رواناب و بیلان آبی است که در پایه زمانی متفاوت ساعتی یا روزانه اجرا می‌شود. در این تحقیق اقدام به شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل وتسپا در حوضه آبریز قورچای شده است. این حوضه (به عنوان یکی از زیرحوضه‌های گرگانرود) با مساحت ۲۵۴ کیلومتر مربع در جنوب شهرستان رامیان در استان گلستان قرار دارد. داده‌های مورد استفاده مدل وتسپا نقشه‌های کاربری اراضی، بافت خاک، مدل رقومی ارتفاعی، داده‌های بارش، تبخیر، دما و دبی جریان (برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل) می‌باشد. پس از آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز مدل اجرا و واسنجی ۱۱ پارامتر با دو روش دستی و خودکار برای ۷ سال ابتدای دوره‌ی آماری و اعتبارسنجی مدل برای دوره ۵ سال انجام شد. نتایج ارزیابی مدل، صحت شبیه‌سازی دبی جریان و تطابق بسیار خوب بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را براساس معیار نش- ساتکلیف ۶۷/۲۱ درصد در دوره‌ی واسنجی و ۷۶/۳۴ درصد در دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد. همچنین ضریب رواناب محاسبه شده توسط مدل وتسپا برای کل حوضه ۲۸/۳۱درصد بوده که در مقایسه با ضریب رواناب مشاهداتی۳۰/۱۲ درصد نشان‌دهنده‌ی شبیه‌سازی خوب مدل است. نتایج نشان می‌دهد مدل در 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 به دست آورد.

کلمات کلیدی: مدل WetSpa، شبیه‌سازی، رواناب، قورچای، واسنجی و اعتبارسنجی، استان گلستان.

* نویسنده‌ی مسئول **E-mail:**k.shahedi@sanru.ac.ir

۱- مقدمه

درصد زیادی از حجم بارندگی در مناطق مختلف کشور تحت تأثیر عواملی مانند، تشکیلات و ساختار زمین-شناسی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، شیب زمین و شکل حوضه آبریز به رواناب سطحی تبدیل می‌شود. بنابراین برآورد حجم رواناب به دست آمده از بارندگی، به کارگیری روش‌های جمع‌آوری و مهار آب سطحی از نظر تأمین آب روزبه‌روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه آبریز از نقطه نظر درک بهتر مسائل هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، مهندسی رودخانه، سازه‌های کنترل سیل و ذخیره سـیلاب اهمیت ویژه‌ای دارد (نجفی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۰: ۱۲۱). در این راستا مدل‌های بسیاری همانند مدل‌های توزیعی جهت شبیه‌سازی فرآیندهای حوضه آبریز وجود دارد. برآورد بارش-رواناب با مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی و با استفاده از تکنیک سامانه اطلاعات جغرافیایی به صورت گسترده امکان‌پذیر، کاربردی و متداول شده است. مدل‌های هیدرولوژیک حالت ساده‌شده‌ای از چرخه هیدرولوژی هـستند. مدل‌های هیدرولوژیکی از دو بخش اصلی به نام‌های هسته هیدرولوژیک و پوسته تکنولوژی، تشکیل شده‌اند، که هسته هیدرولوژیک شامل مفاهیم علم هیدرولوژی بوده که تعاریف متغیر، فرآیندهای توصیفی و دیگر جنبه‌ها را در بر می‌گید و پوسته تکنولوژی که شامل برنامه‌ریزی، کاربرهای حد واسط و غیره می‌باشد. 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 حوضه که جریان سطحی روزانه/ ساعتی اتفاق می‌افتد هیدروگراف در نقطه خروجی و پارامترهای هیدرولوژیکی توزیعی حوضه را پیش‌بینی می‌کند. ورودی‌های مدل شامل داده رقومی ارتفاع، تیپ خاک، کاربری اراضی و سری زمانی بارش و تبخیر می‌باشد. استفاده از داده‌های دبی رودخانه فقط برای واسنجی مدل می‌باشد، در غیر این صورت انتخابی و دلخواه می‌باشد (مرادی‌پور، ۱۳۸۹: ۱۴۹). یعقوبی (۱۳۸۹) به شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه آبریز چهل‌چای با استفاده از مدل هیدرولوژیک- توزیعی WetSpa و بررسی کارایی مدل جهت پیش‌بینی هیدروگراف جریان پرداخت. نتایج شبیه‌سازی حاکی از قابلیت مدل در پیش‌بینی هیدروگراف‌های روزانه با دقت ۵۰ تا ۵۷ درصد بر اساس معیار نش- ساتکلیف می‌باشد. مرادی‌پور و همکاران (۱۳۹۰) شبیه‌سازی توزیعی رواناب را با مدل هیدرولوژیک WetSpa در حوضه آبریز کوهستانی طالقان بررسی کردند. دبی‌های پیک و هیدروگراف جریان روزانه در هر مکان از شبکه آبراهه پیش‌بینی و توزیع مکانی خصوصیات هیدرولوژیک شبیه‌سازی شد. دقت ۸۴/۸۵ درصد در شبیه‌سازی‌ها بر اساس ضریب نش- ساتکلیف، کارایی بالای مدل را نشان می‌دهد. با توجه به خروجی مدل و فاکتورهای هیدرولوژیک با توزیع مکانی در گام

1- Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere

زمانی روزانه، مدل قابلیت آنالیز اثرات توپوگرافی، بافت‌خاک و کاربری اراضی در رفتار هیدرولوژیک حوضه را داراست. عزیزی (۱۳۹۱) با استفاده از مدل هیدرولوژیک WetSpa نسبت به شبیه‌سازی جریان ساعتی رودخانه زیارت در استان گلستان به منظور بررسی سناریوهای بارش اقدام نـموده و نتایج آن خوب توصیف شده است. بطوری که کارایی مدل را بیش از ۷۴ درصد طبق معیار نش- ساتکلیف ارائه کرده‌اند. (ریتابول، ۲۰۰۷؛ بهره‌مند و همکاران، ۲۰۰۷). نتایج ونگ و همکاران (۱۹۹۷)، لیو و دی اسمیت (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 حوضه‌های آبریز در اروپا استفاده کرده‌اند نشان از توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی جریان دارد. کاویان و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر رواناب سطحی با استفاده از مدل WetSpa پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش مناطق مسکونی میزان رواناب سطحی افزایش پیدا می‌کند. عزیزی و همکاران(۲۰۱۸) شبیه‌سازی جریان رودخانه زیارت را با استفاده از مدل WetSpa انجام دادند، نتایج نشان داد مقدار ضریب نش ساتکلیف بالای ۰/۶ نشان‌دهنده‌ی شبیه‌سازی خوب مدل WetSpa بود. الماسی و همکاران (۱۴۰۰) به ارزیابی کارایی مدل WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب پرداختند. ضریب نش-ساتکلیف[1] برای دوره-های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۵۸ حاصل شد و مؤید این است که مدلWetSpa عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی رواناب در حوضه مندرجان داشته است. فروتن و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS به مدل‌سازی تناسب زمین برای توسعه مناطق مسکونی و تهیه سناریو بهینه پرداختند، و به بررسی اثرات سناریوهای مناطق مسکونی بر روی غلظت رسوب را با استفاده از مدل WetSpa پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با اجرای سناریو بهینه مناطق مسکونی میزان غلظت رسوب کاهش یافت. نجفی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۰ به بررسی اثرات تغییر اقلیم برهیدروگراف جریان در حوضه‌ی آبریز طالقان پرداختند. برای شیبه‌سازی جریان از مدل WetSpa و برای تهیه سناریوهای تغییر اقلیم از مدل SDSM استفاده کردند. در نهایت نتایج نشان داد که در سناریوی در نظر گرفته شده، میانگین رواناب حوضه آبریز تا ۴۵ درصد بر اساس تغییر اقلیم در آینده افزایش خواهد یافت. همچنین میانگین رواناب در تمامی ماه‌های سال (به استثنای مهرماه) نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. این افزایش در ماه آوریل بارزتر است. به طور کلی نتایج مطالعات مختلف انجام گرفته حاکی از این است که مدل توزیعی در نواحی مختلف جغرافیایی و آب و هوایی و در توپوگرافی‌های کاملاً متنوع و همچنین مدل در حوضه‌های 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 دقت نتایج مدل هم برای خروجی حوضه‌های مورد مطالعه و هم در سرشاخه‌ها و زیرحوضه‌ها چشمگیر بوده است. به گونه‌ای که به

1- Nash–Sutcliffe

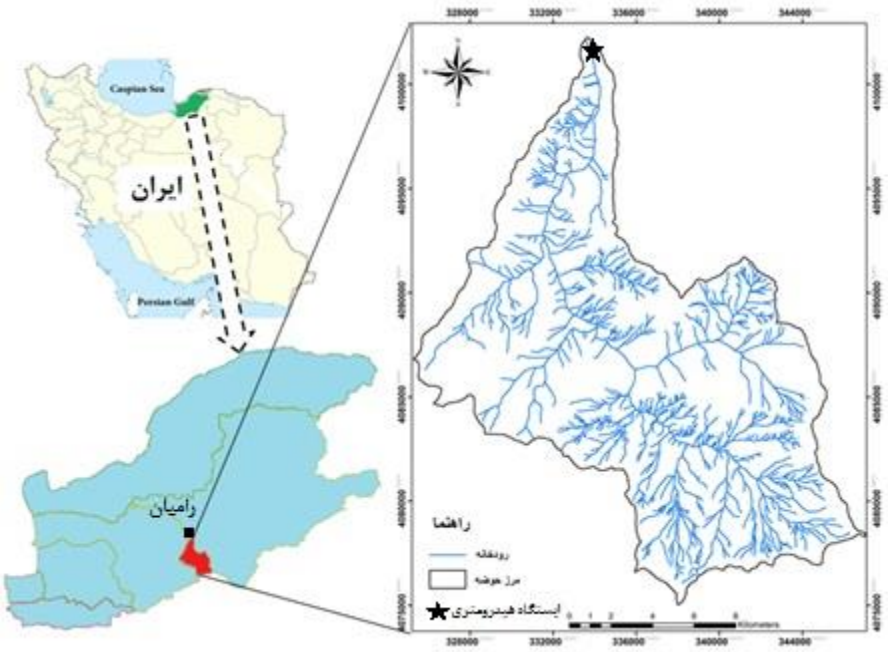
محققین مختلف این امکان را داده که تأثیر عوامل مختلف موثری مانند تغییر اقلیم و یا تغییر کاربری را برجریان خروجی حوضه و همچنین بر مؤلفه‌های بیلان آبی، پدیده‌های هیدرولوژیک مختلف حوضه به صورت توزیعی محاسبه نماید.

حوضه آبریز قورچای استان گلستان از حوضه‌های مهم ولی بحرانی از نظر تغییر کاربری، فرسایش و سیلخیزی در استان گلستان است. عوامل طبیعی (مانند شیب زیاد) و فعالیت‌های انسانی (مانند تغییر کاربری زمین، کاربرد نادرست از زمین و کشاورزی روی زمین های با شیب زیاد) موجب بروز یافتن فرسایش، سیل‌خیزی و حرکت‌های توده ایی مختلف در این حوضه شده است. این آبریز در سال‌های اخیر دستخوش تغییرات شدیدی قرار گرفته است و کاربرد نادرست از آبریز باعث کاهش یافتن پوشش گیاهی و افزایش سرعت جریان و ضریب رواناب شده است. با توجه به اینکه در این حوضه شبیه‌سازی جریان رودخانه با کمک مدل‌های پیوسته بارش- رواناب محدودی انجام شده است. بدین منظور در این تحقیق به شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوضه آبریز قورچای که یک حوضه کوهستانی و سیل‌خیز است، پرداخته شده است. شایان ذکر است مدل WetSpa قادر است شبیه‌سازی جریان را در گام‌های زمانی مختلف انجام دهد.

۲-مواد و روش

۲-۱-منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز قورچای (یکی از زیر حوضه‌های آبریز گرگانرود و در جنوب آن) در جنوب شهرستان رامیان در استان گلستان قرار دارد. منطقه مورد مطالعه از لحاظ موقعیت سیاسی، در مرز استان‌های سمنان و گلستان واقع شده است. این حوضه در طول جغرافیایی ″۵۵°۲′۲۴ تا ″۵۵°۱۶′۴۷ شرقی و عرض جغرافیایی ″۳۶°۴۸′۲۶ تا ″۳۷°۳′۵ شمالی قرار دارد. رودخانه قورچای از سرشاخه‌های اصلی گرگانرود می باشد. متوسط بارندگی سالانه حوضه ۶۸۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز قورچای در استان گلستان و همچنین جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات فیزیوگرافی و مساحت کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.



شکل (۱):نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز قورچای
Fig (1): The study area

جدول (۱): ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه آبریز قورچای رامیان
Table (1): Physiographic features of Ghorchay Ramyan basin

ویژگی	مساحت (km^2)	محیط (km)	طول آبراهه اصلی(km)	ارتفاع حداکثر (m)	ارتفاع حداقل (m)	ارتفاع متوسط (m)	شیب متوسط حوضه(٪)	شیب متوسط رودخانه اصلی(٪)	طول کل آبراهه-ها(km)	تراکم آبراهه‌ها (km/km^2)
مقدار	۲۵۴	۹۸	۳۹	۲۸۳۱	۱۰۵	۱۲۷۱/۸	۴۰/۷۹	۷/۵۳	۴۵۵	۱/۸

جدول (۲): مساحت کاربری‌های اراضی حوضه آبریز قورچای رامیان
Table (1): Area of land uses of Ghorchay Ramyan basin

ویژگی	جنگل(km^2)	مرتع(km^2)	مسکونی(km^2)	زراعت(km^2)	جمع(km^2)
مقدار	۱۵۷	۴۹	۴	۴۴	۲۵۴

روش تحقیق

تشریح مدل WetSpa

مدل اولین بار توسط ونگ و همکاران (۲۰۰۰) ابداع و سپس توسط دی اسمت و همکاران ۲۰۰۱) و لیو و همکاران (۲۰۰۳) برای پیش‌بینی سیل توسعه داده شد. برای غلبه بر ناهمگنی‌های موجود، حوضه به تعدادی سلول‌های شبکه‌ای تقسیم‌بندی می‌گردد. در مدل برای هر شبکه سلولی، چهار لایه در جهت عمودی در نظر

گرفته می‌شود که عبارتند از لایه تاج پوشش، منطقه ریشه، منطقه انتقال و منطقه اشباع، علاوه بر آن هر سلول خود شامل خاک لخت و خاک دارای پوشش گیاهی می‌باشد که دارای تعادل آب و انرژی می‌باشند. فرآیندهای هیدرولوژیکی مدل شامل بارش، برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی و بیلان آب است. در مدل WetSpa، روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادله خطی موج پخشی صورت می‌گیرد. این روش برای شبیه‌سازی جریان ورقه‌ای و آبراهه‌ای مناسب بوده و از مزایای مهم آن این است که از طریق جبری قابل حل بوده و نیازی به محاسبات عددی و تعیین دقیق شرایط مرزی ندارد. معادله ممنتم سنت ـ ونانت، فرآیند جریان سلول را می‌تواند با استفاده از معادله‌ی خطی موج پخشی سنت ـ ونانت به صورت زیر شبیه‌سازی کند (میلر و کانژ[1]، ۱۹۷۵):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C_i \frac{\partial Q}{\partial x} - d_i \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C_i \frac{\partial Q}{\partial x} - d_i \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \qquad (۲)$$

Q دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه) در زمان t (ثانیه) و در مکان x (متر)، C_i سرعت موج سینماتیکی در سلول i (متر در ثانیه) ، d_i ضریب پخش در سلول i (متر در ثانیه) می‌باشد. تابع پاسخ لحظه‌ای سلول در خروجی سلول و در سرعت جریان و ضریب پخش ثابت با استفاده از توزیع چگالی اولین زمان عبور حرکت براونی جریان به صورت زیر خواهد بود (زینی‌وند، ۲۰۰۹):

$$U_i(t) = \frac{l_i}{2\sqrt{\pi d_i t^3}} \exp\left[-\frac{(C_i t - l_i)^2}{4 d_i t}\right] \qquad (۴)$$

در معادله $U_i(t)$ تابع پاسخ لحظه ای سلول (عکس ثانیه)، l_i اندازه سلول (متر)، دو پارامتر C_i و d_i با استفاده از رابطه مانینگ به صورت زیر آمده است(هندرسن[2]، ۱۹۶۶):

$$C_i = \frac{5}{3} v_i \qquad (۵)$$

$$d_i = \frac{v_i R_i}{2 S_i} \qquad (۶)$$

1- Miller and Cunge

2- Henderson

که در آن R_i شعاع هیدرولیکی متوسط سلول i (متر)، S_i شیب سلول (متر بر متر) و v_i سرعت جریان در سلول i (متر بر ثانیه) می‌باشد. شعاع هیدرولیکی را می‌توان با استفاده از یک رابطه توانی با احتمال وقوع تعیین کرد (مولنر و رامبرز[1]، ۱۹۹۸)؛ این رابطه شعاع هیدرولیکی را با سطح کنترل مربوط ساخته و رفتار تقریبی سلول و شکل هندسی کانال را نشان می‌دهد.

$$R_i=a_p\,(A_i)^{b_p} \qquad (۷)$$

A_i سطح زهکشی در بالادست سلول(کیلومتر مربع) که با استفاده از تابع تجمع جریان در GIS Arcview تعیین شده، ap (-) ثابت شبکه آبراهه و b_p(-) توان مقیاس ژئومتری (هر دو پارامتر به فراوانی دبی بستگی دارند) می‌باشد. تعیین سرعت جریان با استفاده از رابطه مانینگ به صورت زیر به‌دست آمده است:

$$v_i=\frac{1}{n_i}\,R_i^{\frac{2}{3}}\,S_i^{\frac{1}{2}} \qquad (۸)$$

n_i ضریب زبری مانینگ که بستگی به کاربری اراضی و خصوصیات آبراهه دارد.

ورودی‌های مدل

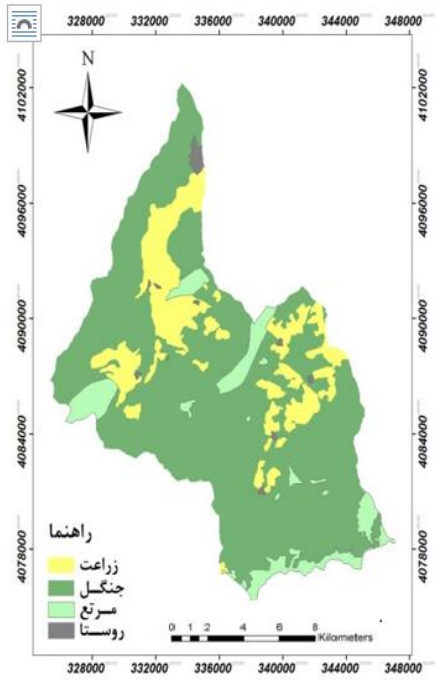
اطلاعات رقومی

نقشه کاربری اراضی: به منظور تهیه لایه کاربری اراضی، تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال ۲۰۱۶ منطقه در محیط نرم افزار ArcGIS زمین مرجع شده است. برای تهیه‌ی لایه‌ی کاربری اراضی از طریق تصاویر ماهواره‌ای لندست از شاخص پوشش گیاهی NDVI استفاده شد. سپس با استفاده از امکانات نرم‌افزار ILWIS کاربری اراضی منطقه مشخص گردید (شکل ۱).

نقشه بافت خاک: نقشه بافت خاک حوضه آبریز قورچای با ۳ طبقه نیز برای اجرای مدل WetSpa تهیه شد. لازم به ذکر است در این مطالعه از نقشه‌ی بافت خاک استان گلستان مربوط به سال ۱۳۹۳، تهیه شده توسط مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان استفاده شده است. سامانه‌ی کدبندی خاک که در مدل WetSpa بر مبنای مثلث طبقه‌بندی بافت خاک می‌باشد که توسط (USDA) درصد رس، سیلت و ماسه مشخص می‌شود. بنابراین به منظور آماده‌سازی داده‌ها، بایستی نقشه‌ی اصلی بافت خاک تبدیل به نقشه‌ی رستری با کدهای خاک‌شناسی مربوط به مدل WetSpa گردد (شکل۲).

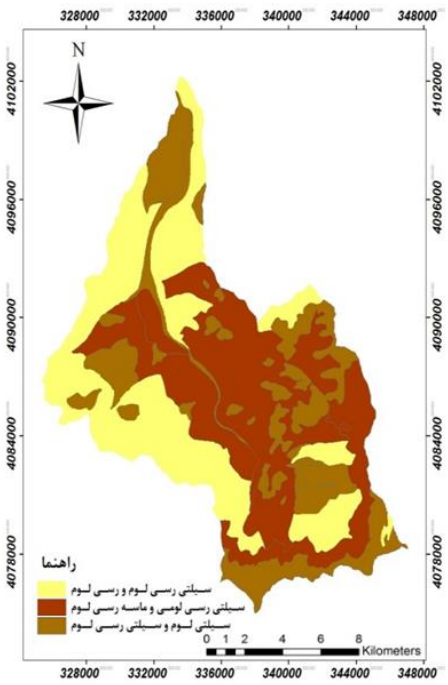
1- Molnar and Ramierz

مدل رقومی ارتفاعی: مدل رقومی ارتفاعی که از نقشه توپوگرافی حاصل شده است. قابلیت تفکیک مکانی و ارتفاعی DEM بایستی به قدر کافی باشد، تا امکان تعیین دقیق اطلاعات اثرگذار بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه وجود داشته باشد. پس از فیلتر کردن اطلاعات اولیه و از بین بردن مقادیر خطا، میزان شیب، جهت شیب، جهت جریان، طول جریان و تجمع جریان برای هر شبکه سلولی تعیین می‌گردد. در گام بعدی تعیین شبکه آبراهه صورت می‌گیرد و فرض براین است که همه سلول‌هایی که بیشتر از یک مساحت معین در بالادست را زهکشی می‌کنند، بخشی از آن شبکه محسوب می‌شوند و بسته به آستانه‌ای که برای مساحت بالادست انتخاب می‌شوند، شبکه‌های آبراهه با تراکم‌های متفاوت حاصل می‌شود. سپس در نهایت، جهت آبراهه و زیرحوضه‌های متعلق به این بازه‌ی آبراهه مشخص می‌گردند. شایان ذکر است در این مطالعه، نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاعی حوضه از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ با ابعاد پیکسل ۳۰ متر تهیه شده است (شکل۳).



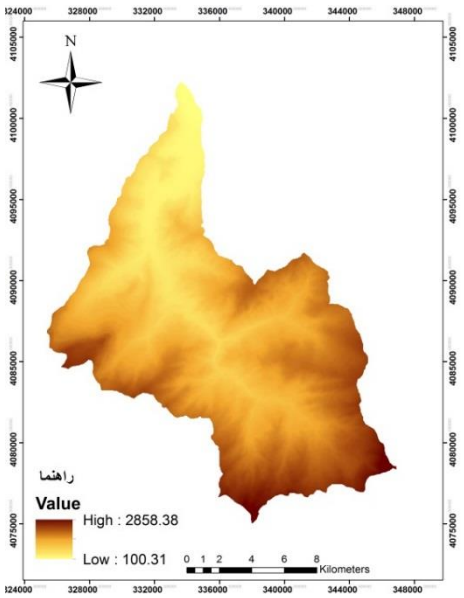
شکل(۱): نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز قورچای استان گلستان، اردیبهشت سال ۱۳۹۵

Fig (1): Land use map of Ghorchay basin of Golestan province, May 2015



شکل(۲) : نقشه بافت خاک حوضه آبریز قورچای استان گلستان، سال ۱۳۹۳

Fig (2): Soil texture map of Ghorchay basin, Golestan province, 2013



شکل(۳): نقشه مدل رقومی ارتفاع حوضه آبریز قورچای استان گلستان

Fig (3): Digital elevation model map of Ghorchay basin, Golestan province

اطلاعات هیدرولوژیکی ـ هواشناسی

اطلاعات هواشناسی پایه مورد نیاز شامل بارندگی و تبخیر می‌باشد که درصورت شبیه‌سازی ذوب برف، بایستی آمار درجه حرارت را نیز به مدل وارد نمود. داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق ۱۲ سال (۱۳۸۴-۱۳۹۶) و مربوط به ایستگاه رامیان می‌باشد.

بارش: بارندگی یک عامل محرک پایه بوده و به عنوان یک ورودی کلیدی در اکثر فرآیندهای هیدرولوژیکی محسوب می‌گردد. معمولاً مدل‌های بارش ـ رواناب نسبت به عامل بارندگی بسیار حساس بوده و هرگونه خطا درآن باعث تغییر شدید در شبیه‌سازی جریان می‌گردد. سری‌های بارندگی که به مدل داده می‌شود، بایستی از نظر گام زمانی با مدل همخوانی داشته باشند. آمار بارندگی به صورت کلی تجمعی در نظر گرفته می‌شود، بنابراین آمار مربوط به هر زمان مشخص برابر است با میزان بارندگی و تا پایان آخرین گام زمانی به همین ترتیب می‌باشد.

تبخیر: آمار تبخیر به عنوان یکی از ورودی‌های مورد نیاز مدل WetSpa می‌باشد که بایستی با همان گام زمانی سری بارندگی به مدل وارد شوند. آمار تبخیر را می‌توان از طریق اندازه‌گیری میدانی تعیین نمود و یا اینکه از

معادلات فیزیکی و تجربی موجود تخمین زد. آمار تبخیر به صورت کلی تجمعی در نظر گرفته می‌شود، بنابراین آمار مربوط به هر زمان مشخص برابر است با میزان تبخیر و تا پایان آخرین گام زمانی به همین ترتیب می‌باشد.

دبی: به منظور واسنجی و ارزیابی مدل، آمار دبی مشاهداتی در خروجی حوضه مورد نیاز می‌باشد که این آمار بایستی گام زمانی مشابه با سری بارندگی داشته باشند، تا بتوان مقایسه چشمی و آنالیزهای آماری را انجام داد. آمار دبی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری داخل حوضه نیز می‌توان برای تایید مدل مورد استفاده قرارگیرد. آمار دبی در هر زمان مشخص همان دبی متوسط می‌باشد که تا انتهای گام زمانی به همین ترتیب است.

پارامترهای عمومی مدل WetSpa: برای سهولت واسنجی در مدل WetSpa ۱۱پارامتر قراردادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای مذکور فیزیکی بوده و در کنترل رواناب و هیدروگراف خروجی حوضه نقش مهمی دارند. اما تعیین نمودن آنها در مقیاس شبکه سلولی مشکل می‌باشد. بنابراین برای کسب نتایج بهتر در مدل، واسنجی این پارامترها در مقابل داده‌های رواناب مشاهده‌ای ترجیح داده می‌شود. در جدول ۳ پارامترهای عمومی مدل WetSpa و مقادیر واسنجی شده آن‌ها ارائه شده است.

جدول(۳): مقادیر اولیه و واسنجی شده پارامترهای عمومی مدل WetSpa (بهره مند و همکاران،۲۰۰۵)

Table (3): Initial and calibrated values of general parameters of wetspa model (Bahremand et al., 2005)

علامت	پارامتر	واحد	مقادیر اولیه	مقادیر واسنجی شده
K_i	فاکتور جریان زیرسطحی	(-)	۱/۹۱	۱/۵۹
k_g	ضریب افت آب زیرزمینی	(h^{-1})	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۳۴۵
k_{ss}	رطوبت اولیه خاک	(mm)	۰/۹۲	۰/۹۵
k_{ep}	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل	(-)	۱/۳۶	۱/۳۲
G_0	ذخیره آب زیرزمینی اولیه	(mm)	۱۵۰	۱۶۹
G_{max}	حدکثر ذخیره آب زیرزمینی	(mm)	۲۱۶/۲۶	۴۲۵/۳۱۹
T_0	ضریب درجه حرارت آستانه	(^0c)	۰/۹۹	۱/۲۵
K_{snow}	ضریب روز درجه حرارت	($mm\ ^0\ c^{-1}\ h^{-1}$)	۰/۷۵	۰/۶۹
k_{rain}	ضریب روز درجه بارش	($mm\ mm\ ^0\ c^{-1}\ h^{-1}$)	۱/۷۹	۱/۸۵
K_{run}	توان رواناب سطحی	(-)	۵/۹	۴/۶۹
P_{max}	حداکثر شدت بارش	(mm)	۵۹/۵۳	۱۰۱/۲۳

واسنجی مدل و بهینه‌سازی نتایج

نتایج حاصل از اجرای مدل توسط فرایندی به نام واسنجی قابل بهینه‌سازی می‌باشد. در طی این فرایند مقادیر پارامترهای معرفی شده به مدل با هدف دسترسی به نتایج همگون با داده‌های واقعی و طبیعی تصحیح می‌شود.

فرایند واسنجی به دو صورت دستی (سعی و خطا) و خودکار انجام می‌پذیرد.که در تحقیق حاضر از روش کاملاً دستی استفاده شده است که در زیر شرح داده می‌شوند:

روش کاملاً دستی با استفاده از قضاوت مهندسی به روش تصحیح مکرر پارامترها و محاسبه بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه شده و مشاهده‌ای انجام پذیرفت. مقدار کمی بهترین برازش همان تابع هدف خواهد بود. کمترین مقدار تابع هدف، زمانی حاصل می‌شود که مقادیر پارامترهای بکار رفته در مدل، بهترین و نزدیک‌ترین هیدروگراف را به هیدروگراف مشاهده شده تولید کند. در این صورت پارامترهای بکار رفته در مدل دارای مقادیر بهینه خواهند بود.

شبیه‌سازی دبی جریان

پس از اجرای مدل در حوضه استفاده از سری‌های زمانی ساعتی دوره آماری مورد نظر، نتایج ارزیابی در فایل evaluation.txt آورده می‌شود. فایل مربوط، اطلاعاتی در مورد سطح حوضه، دوره شبیه‌سازی مدل، دوره داده‌های ناقص دبی در سری داده‌ها همچنین تغییرات رطوبت خاک و ذخیره آب‌های زیر زمینی در دوره شبیه‌سازی را برای بیلان آب با سری آیتم‌ها نشان می‌دهد. کلیه معیارهای ارزیابی کارایی مدل و مولفه‌های بیلان آب در فایل ارزیابی مدل ارائه می‌شود.

معیارهای کارایی و ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa در تولید هیدروگراف مشاهده‌ای، یک سری روش‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه برمقایسه چشمی، جهت ارزیابی بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه شده و مشاهده‌ای، معیارهای ارزیابی زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انحراف مدل[1]

انحراف مدل را می‌توان به صورت تفاوت میانگین نسبی بین جریان مشاهده شده و پیش‌بینی شده در یک نمونه بزرگ شبیه‌سازی بیان نمود. که انعکاس‌دهنده قابلیت تعیین تعادل آب بوده و شاید در عمل مهم‌ترین عامل برای مقایسه کارایی مدل باشد. این معیار به صورت معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

$$MB = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{s1}-Q_{o1})}{\sum_{i=1}^{N} Q_{o1}}\right] \qquad (۱)$$

1- Moddel bias

طبق معادله‌ی فوق MB انحراف مدل: جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه)، N: تعداد گام های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی است. مقادیر MB پایین نشان‌دهنده‌ی برازش بهتر و میزان صفر نمایانگر شبیه‌سازی کامل میزان جریان مشاهده‌ای می‌باشد.

ضریب همبستگی اصلاح شده

نشان‌دهنده‌ی تفاوت اندازه هیدروگراف و شکل آن می‌باشد (مک‌کوبین و اشنایدر، ۱۹۷۵).

$$r_{\mathrm{mod}} = \left[\frac{\min\{\delta_o,\delta_s\}}{\max\{\delta_o,\delta_s\}} \times \mathrm{r}\right] \quad (۲)$$

در این معادله δ_o و δ_s به ترتیب انحراف معیار زمان جریان دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی و r ضریب تصحیح بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای شبیه‌سازی می‌باشد.

کارایی ناش ـ ساتکلیف

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

$$NS = 1 - \sum_{i=1}^{N}(Q_{si} - Q_{oi})^2 \,/\, \sum_{i=1}^{N}(\mathrm{Q_{oi}} - \overline{\mathrm{Q_o}})^2 \quad (۳)$$

که Q_{si} و Q_{oi} جریان شبیه سازی شده و مشاهده‌ای در گام زمانی i (مترمکعب برثانیه) و N : تعداد گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی است.

NS: شاخص کارایی ناش ـ ساتکلیف که برای ارزیابی توانایی شبیه‌سازی جریان آبراهه بکار می‌رود، مقدار NS از یک مقدار منفی تا ۱ در تغییر است و زمانی که میزان آن به ۱ رسید، نمایانگر انطباق کامل بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده می‌باشد.

معیار جمعی

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

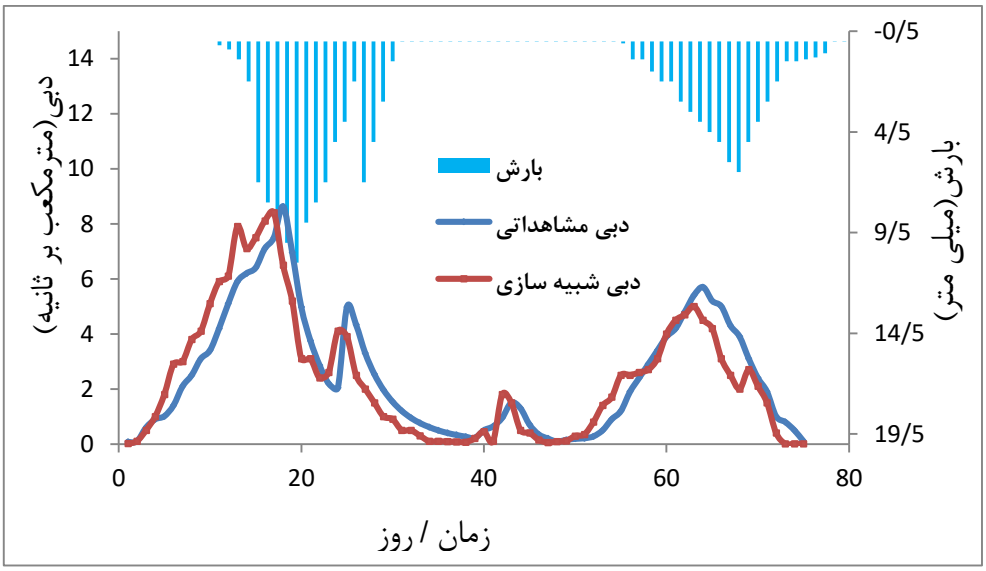
$$AM = \frac{\mathrm{r+NS+(1-|MB|)}}{3} \quad (۴)$$

جدول(۴): دسته‌بندی کارایی مدل (یعقوبی، ۱۳۸۶)
Table (4): Classification of model efficiency (Yaghoubi 2016)

دسته‌بندی	معیار جمعی
عالی	>۰/۸۵
خیلی خوب	۰/۷-۰/۸۸
خوب	۰/۵۵-۰/۷
ضعیف	۰/۴-۰/۵۵
خیلی ضعیف	<۰/۴

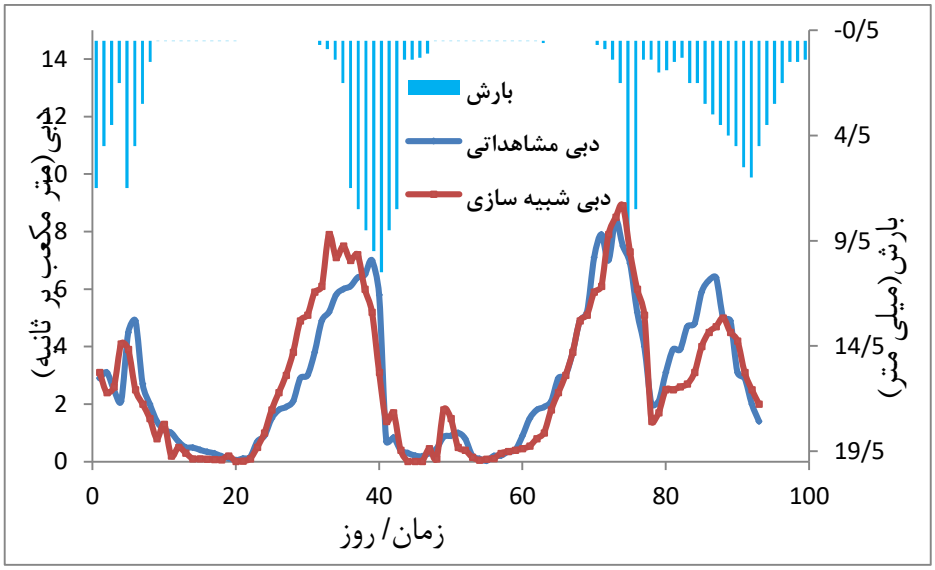
۳-نتایج و بحث

مقایسه‌ی ظاهری هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده امکان ارزیابی کلی و سریع دقت مدل‌ها را فراهم می‌نماید. نتایج گرافیکی مقایسه دبی حاصل از اجرای مدل WetSpa با پارامترهای واسنجی شده و دبی اندازه‌گیری شده برای دوره‌ی واسنجی در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین مقایسه گرافیکی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده روزانه دوره‌ی اعتبارسنجی با استفاده از مدل WetSpa در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهداتی در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی وجود دارد، که با تحقیقات لیو و همکاران (۲۰۰۵) و بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۵) همسو می‌باشد. همچنین همانطور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، مدل WetSpa توانایی بالایی در برآورد مقادیر دبی‌های حداکثر جریان روزانه‌ی آبریز قورچای داشته است و اکثر مقادیر دبی‌های حداکثر را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. بنابراین می‌توان گفت مدل WetSpa در شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر حوضه از خود توانایی بالایی را نشان داده است.



شکل (۵): مقایسه بین جریان اندازه‌گیری شده و جریان شبیه‌سازی شده برای دوره واسنجی (۱۳۸۷/۰۷/۰۵- ۱۳۸۷/۰۹/۱۵)

Fig (5): Comparison between measured flow and simulated flow for calibration period (1387/07/05-1387/09/15)



شکل(۶) : مقایسه بین جریان اندازه‌گیری شده و جریان شبیه‌سازی شده برای دوره اعتبارسنجی(۱۳۹۴/۰۸/۱۰- ۱۳۹۴/۱۱/۱۳)

Fig (6): Comparison between the measured flow and the simulated flow for the validation period (1394/08/10-1394/11/13)

در این تحقیق برای ارزیابی مدل از معیارهای قابلیت اعتماد، نش- ساتکلیف، نش- ساتکلیف جریان کم، نش- ساتکلیف جریان زیاد و معیار تجمعی استفاده شده است. بر اساس مقادیر روزانه دبی، بارش، دما مربوط به سال‌های ۱۳۸۴تا ۱۳۹۶، دبی جریان رودخانه قورچای در مرحله واسنجی براساس معیار نش- ساتکلیف با دقت ۶۷/۲۱درصد و دبی‌های جریان کم و زیاد به ترتیب ۶۲/۳۲و۷۴/۴۱ درصد شبیه‌سازی شده است. با توجه به معیار جمعی، کیفیت شبیه‌سازی در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد، نتایج اعتبارسنجی مدل نیز مشابه دوره واسنجی خوب برآورد شده و ضریب کارایی نش- ساتکلیف ۷۶/۳۴ درصد بیانگر این مطلب می‌باشد. بنابراین می‌توان برداشت کرد که این مدل کارایی خوبی در شبیه‌سازی جریان دارند، که با نتایج بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۶)، عزیزی و همکاران (۲۰۱۸)، دهمرده و همکاران (۲۰۱۸)، و فروتن و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد.

شایان ذکر است، دبی‌های جریان کم و زیاد به ترتیب با دقت ۶۹/۸۹ و ۷۵/۳۸ درصد برآورد شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد مدل در 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 به دست آورد. خروجی مدل برای دوره‌ی شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان ۳۱/ ۲۸ درصد از بارش تبدیل به رواناب شده است که با نتایج لیو و دی اسمیت۲۰۰۵، بهره‌مند و همکاران۲۰۰۶ و ریتابول و همکاران ۲۰۰۷همخوانی دارد. (جدول ۴).

جدول (۴): مقادیر معیارهای کارایی مدل در دوره واسنجی (۱۳۸۴ تا ۱۳۹۱) و اعتبارسنجی (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶)

Table (4): Values of the model efficiency criteria in the period of calibration (1384 to 1391) and validation (1391 to 1396)

فرآیند / معیار٪	واسنجی	اعتبارسنجی
انحراف مدل	۲/۳	-۱/۲
قابلیت اعتماد	۶۹/۴۵	۷۳/۸
نش- ساتکلیف	۶۷/۲۱	۷۶/۳۴
نش- ساتکلیف جریان کم	۶۲/۳۲	۶۹/۸۹
نش- ساتکلیف جریان زیاد	۷۴/۴۱	۷۵/۳۸
معیار تجمعی	۷۹/۹۱	۷۶/۵۴

۴-نتیجه‌گیری

نتایج نشان‌دهنده‌ی تطابق خوبی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه آبریز است. همچنین این مدل قادر است فرآیندهای بارش، رطوبت پیشین و تولید رواناب را بر اساس توپوگرافی، کاربری زمین و نوع خاک در نظر بگیرد. این مدل به ویژه برای تجزیه و تحلیل اثرات توپوگرافی، نوع خاک و کاربری زمین بر رفتار

هیدرولوژیکی حوضه آبریز رودخانه که مفید است و روندهای کلی هیدرولوژیکی با دقت بالا توسط مدل به تصویر کشیده شده است.

همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مجموعه پارامترهای واسنجی شده نسبت به مقادیر ابتدایی، ممکن است به طور قابل ملاحظه ای تغییر کند و بنابراین بر نتایج ارزیابی عملکرد مدل هم تأثیر بسزایی داشته باشد. این موضوع به دلیل غیر خطی بودن ساختار مدل وعدم قطعیت مدل و پارامترهای آن است. بنابراین با توجه به محدودیت‌ها و مشکلات مربوط به استفاده از مدل‌های توزیعی، مقادیر اولیه پارامترها باید با دقت انتخاب گردد و سعی شود این مقادیر به مقادیر صحیح پارامترها نزدیک باشد. به طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند برای بررسی شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان‌های جریان در خروجی حوضه‌ها با شرایط بارندگی متفاوت و رطوبت پیشین خاک مفید باشد. در هر حال، این امر شناخت کافی از مدل هیدرولوژیک مورد استفاده و شرایط فیزیکی حوضه مورد مطالعه را می‌طلبد با توجه به این که مدل WetSpa قابلیت شبیه‌سازی رواناب در تمام شبکه سلولی حوضه را دارد، این قابلیت مدل برای مدیران و کارشناسان این امکان را فراهم می‌نماید که قبل اجرای هرگونه عملیات، مناطق مختلف را از نظر پتانسیل ایجاد رواناب و رسوب شناسایی نمایند.

۵-منابع

Azizi, M. (2011). Simulation of the effect of precipitation scenarios on flow hydrographs using WetSpa distributed hydrological model in Ziarat watershed. MSc in Watershed management. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, *Faculty of Rangeland and Watershed Management*. 145 pages.

Azizi, M., Mohajeran, A., Akhavan, M. (2018). Simulating and Prediction of Flow Using by WetSpa Model in Ziyarat River Basin, Iran. *Journal of Geology* . Vol.8 No.3, March 2018

Almasi, P., Moghaddamnia, A., Khaliqi, Sh. and Salajaghe, A. (2021). Evaluation of the efficiency of WetSpa hydrological model for simulation of runoff in semi-arid climatic conditions (Case study: Mandarjan watershed) *Journal of Soil and Water Research*, Volume 52, Number 2, May 1400).

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.

Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poorova, L., and Kunikova, E. (2007). WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, *Slovakia Water Resource Management*, (21): 1373-1391.

De Smedt, F., Liu, Y.B. and Gebermeskel, S. (2000). Hydrological modelling a catchment scale using GIS and remote sensed land use information, in: C.A. Brebbia (ed), Risk AnalysisII, WTI, press, Boston, pp. 295-304.

Forootan Danesh, M., Dahmardeh, M., Alvandi, E., Gajbhiye, S and Kahya, E. (2020). Predicting the Impacts of Optimal Residential Development Scenario on Soil Loss Caused by Surface Runoff and Raindrops using TOPSIS and WetSpa Models. *Water Resources Management*, 34: 3257–3277.

Henderson, F.M. (1966). Open Channel Flow, 522, McMillan, New York.

Kavian, A., Javidan, N., **B**ahremand, A., Hazbavi, Z. (2020). Assessing the hydrological effects of land-use changes on a catchment using the Markov chain and WetSpa models. *Hydrological Sciences Journal*. Volume 65, 2020 - Issue 15.

Liu, Y.B., De Smedt, F., Hoffmann, L., and Pfister, L. (2004a). Assessing landuse impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modelling approach, Luxembourg. *Environmental Modeling and Assessment*, 9:227-235.

Liu, YB., Gebremeskel, S., De Smedt, F and Pfister, L. (2003). A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modelling, *Journal of Hydrology*, 283; 91-106.

Liu, YB., Baelaan, O., De Smedt, F., Hong, N.T, and Tam, V.T. (2005b). Test of distributed modelling approach to predict flood flows in the karst suoimuoi catchment in Vietnam, *Environmental Gelogy*, 48(7), 931-940.

Moradipor, SH., Bahremand, A., Zeinivand, H. and Najafinejad, A. (2011). Flow balance simulation st the watershed scale using the hydrological-distribution model and GIS. 7th National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology.

Moradipor, Sh. (1389). Simulation of soil erosion and sediment transport using WetSpa distributed hydrological model in Taleghan watershed, Tehran province. MSc in Watershed management. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Rangeland and Watershed Management. 149 pages.

Miller, W.A., and Cunge, J.A. (1975). Simplified equation of unsteady flow, eds., K. Mamood & V. Yevjevich, Unsteady flow in open channels, Water Resources Publications, Fort Collins, CO.

Molnar, P. and Ramirez, J.A. (1998). Energy dissipation theories and optimal channel characteristics of river network, *Water Resour. Res*., 34: 1809-1818.

Najafinejad , A., Heravi, H Bahremand, A and Zeinivand, H. (2020). Simulation of climate Change on river hydrograph using WetSpa Model, Case Study: Taleghan Watershed Alborz Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*. 7(1): 121-134.

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.

Wang, Z., Batelaan, O., and De Smedt, F. (1997). A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa), *Physics and chemistry of the earth*, (21): 189-193.

Weng, Q. (2001). Modelling urban growth effects on surface runoff with integration of remote sensing and GIS. *J. Environmental Management*. 28:737-748.

Yaghobi,F., Bahremand, A. and Nora, N. (2007). Preparation of runoff potential coefficient map of Chehelchai basin using WetSpa model. Sixth National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University: 8 p.

Yaghobi, F. (2010). Simulation of river flow using WetSpa distributed hydrological model in Chehel Chay watershed, Golestan province. MSc in Watershed management. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Rangeland and Watershed Management. 131 pages.

Zeinivand, H. (2009). Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion, and sediment transport. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.