دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

شبیه‌سازی توزیعی مکانی- زمانی رواناب با استفاده از مدل WetSpa در حوزه آبخیز طالقان

شهین مرادی‌پور[۱]، عبدالرضا بهره‌مند[۲]، حسین زینی‌وند[۳] و علی نجفی‌نژاد[۲]

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، (نویسنده مسوول: shahin_moradipour@yahoo.com)
۲- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۳- استادیار، دانشگاه لرستان

تاریخ دریافت: ۹۱/۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۲/۹/۱۲

چکیده

به‌منظور ارزیابی و پیش‌بینی فرآیندهای هیدرولوژیک با ماهیت پیچیده، اثرات تغییر فرآیندها روی رفتار غیرخطی سیستم آبخیز در گذشته و آینده و تبیین تدابیر حفاظت آب و خاک، علاوه بر استفاده از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری، استفاده از روش‌های غیرمستقیم از جمله شبیه‌سازی فرآیندهای سیستم آبخیز ضرورت دارد. هدف این تحقیق بررسی تولید رواناب در هر مکان و زمان در حوزه آبخیز با استفاده از مدل هیدرولوژیک توزیعی WetSpa می‌باشد. بدین منظور در تحقیق حاضر با استفاده از مدل اشاره‌شده، شبیه‌سازی جریان رواناب در حوزه آبخیز طالقان از زیرحوزه‌های سفیدرود صورت گرفت. در این راستا، با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه یک دوره آماری ۱۱ ساله هم‌چنین تلفیق اطلاعات سه نقشه اصلی مدل، دبی‌های پیک و هیدروگراف جریان در هر مکان از شبکه آبراهه، پیش‌بینی و توزیع مکانی فرآیندهای هیدرولوژیک از جمله رواناب شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تطابق قابل‌قبولی بین داده‌های شبیه‌سازی شده مدل و مشاهدات وجود دارد. بر اساس معیار نش- ساتکلیف، دقت ۸۳/۳ درصد در شبیه‌سازی‌ها، کارایی بالای مدل را در این حوزه نشان می‌دهد. با توجه به خروجی مدل و فاکتورهای هیدرولوژیک با توزیع مکانی در گام زمانی روزانه، مدل قابلیت آنالیز اثرات توپوگرافی، بافت خاک و کاربری اراضی در رفتار هیدرولوژیک حوزه را داراست.

واژه‌های کلیدی: مدل هیدرولوژیک توزیعی- مکانی، WetSpa، شبیه‌سازی رواناب، حوزه آبخیز طالقان

مقدمه

استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک توزیعی به‌عنوان بستر توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری، راه‌حلی برای فایق آمدن بر محدودیت‌ها و معضلات شناخت و بررسی فرآیندهای هیدرولوژیک، برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های مدیریت حوزه‌های آبخیز و منابع آب محسوب می‌شود. با تلفیق مدل‌سازی سیل و GIS امکان دسترسی، ذخیره و بازیابی سریع اطلاعات مکانی، توصیفی و سری‌های زمانی همچنین گزینش روش‌های کنترل سیل و اولویت‌بندی مکانی سیل‌خیزی فراهم می‌شود. مدل‌سازی هیدرولوژیک حوزه‌های بزرگ و متوسط به دلیل عدم ادراک کامل سیستم هیدرولوژیک و رفتار تصادفی متغیرها و فرآیندهای هیدرولوژیک پیچیده می‌باشد (۵). با توجه به ناهمگنی و عدم یکنواختی در توپوگرافی، خاک، پوشش/ کاربری اراضی و عوامل زمین شناسی، تغییر اقلیم در زمان و مکان در این حوزه‌ها و برآورد واقعی‌تر از سیستم فیزیکی، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک توزیعی نسبت به مدل‌های میانگین ارجحیت دارد (۱۰،۴). مدل‌های هیدرولوژیک توزیعی پیچیده‌ای توسعه داده شده است که به داده‌ها و اطلاعات اندازه‌گیری‌شده فراوانی نیاز دارند که در بسیاری از حوزه‌های آبخیز بسیاری از کشورها از جمله کشور ایران، چنین داده‌هایی وجود ندارد و این عامل، کاربرد این مدل‌ها را با مشکل مواجه ساخته است. بنابراین در انتخاب مدل مناسب، باید به مؤلفه‌هایی مانند توزیعی یا یکپارچه بودن، فیزیکی یا تجربی بودن ساختار آن، ساده یا پیچیده بودن و در دسترس بودن یا نبودن داده‌های مورد نیاز به عنوان ورودی مدل و یا برای واسنجی توجه داشت (۲۲). لیو و همکاران (۱۱) با تست مدل هیدرولوژیک-توزیعی WetSpa در حوزه آلزیت لوکزامبورگ با داده‌های دبی و رواناب ساعتی مشاهده شده در ۳۰ ماه و تعیین عملکرد انتقال موج پخشی جریان به این نتیجه رسیدند که این مدل توانایی بالایی در بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی یا پوشش خاک روی رفتار هیدرولوژی رودخانه دارد. ریتابولا و همکاران (۱۶) به پیش‌بینی رواناب در رودخانه سیمیو در محدوده دریاچه ویکتوریا تانزانیا با استفاده از مدل هیدرولوژیک WetSpa پرداختند. نتایج حاصل از کاربرد مدل نشان داد که در این حوزه رواناب سطحی و زیرسطحی هر یک به ترتیب ۳۸/۶ و ۶۷/۴ درصد از کل رواناب را شامل می‌شوند. در حالی که سهم آب زیرزمینی صفر است و حجم رواناب تولید شده در اراضی کشاورزی در حدود ۹۰ درصد از کل رواناب را تشکیل می‌دهد. زینی‌وند و دسمت (۲۱) به استخراج و مقایسه نقشه سطح برف با استفاده از مدل WetSpa و سنجنده مودیس[1] در حوزه سد لتیان پرداختند. معیار

1- Modis

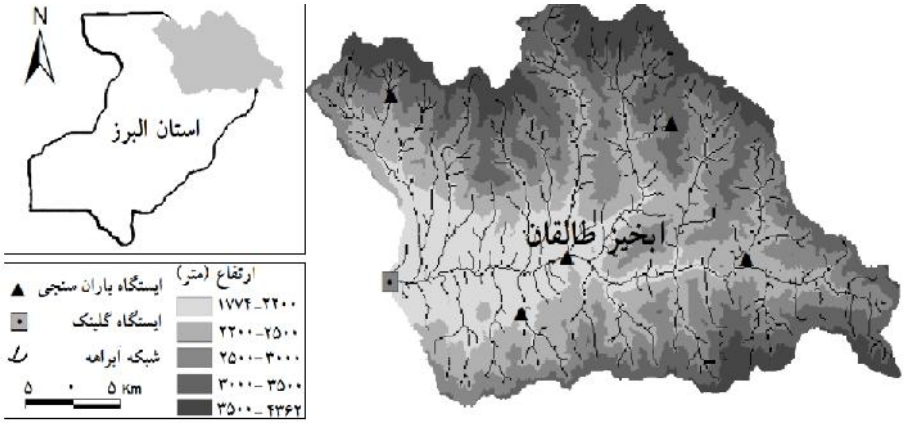
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]

نش- ساتکلیف ۸۷/۹ درصد و نتایج خروجی مدل حاکی از انطباق خوب سطح برف استخراج شده از مدل WetSpa و تصاویر سنجنده مودیس می‌باشد. بهره‌مند و همکاران (۳) در حوزه آبخیز توریسا در اسلواکی با استفاده از کالیبراسیون، پارامترهای مدل WetSpa را تخمین و سپس آنالیز حساسیت و آنالیز پیش‌بینی را انجام دادند. نتایج نشان داد که ضریب اصلاحی تبخیر بیشترین حساسیت را داشته و عدم‌قطعیت پارامترها و آنالیز پیش‌بینی بینش مناسبی از مجموعه پارامترها و بازه‌های آنها به ما می‌دهد. همچنین نشان دادند که عدم‌قطعیت پارامترهای مدل منجر به سطح معنی‌داری از عدم‌قطعیت پیش‌بینی نخواهد شد. صفری و همکاران (۱۷) در حوزه آبخیز میسوری ایالات متحده آمریکا مدل کالیبره شده WetSpa را در یک حوزه بزرگ برای کاربرد در زیرحوزه‌های کوچک‌تر فاقد آمار به‌کار بردند و متوجه شدند که بسته به نوع زیرحوزه ممکن است نتایج مختلفی ارائه شود. هم‌چنین برای ارزیابی مدل می‌توان از یک معیار تجمعی که جنبه‌های مختلف هیدروگراف شبیه‌سازی شده مانند شکل، ابعاد و حجم را در نظر داشته، استفاده نمود. در حوزه‌های آبخیز ایران مدل‌های معدودی مورد استفاده قرار گرفته که قادر به شبیه‌سازی توزیعی- مکانی و زمانی فرآیندهای هیدرولوژیک در گام زمانی روزانه و کمتر باشد. هدف این تحقیق با توجه به قابلیت‌های مدل WetSpa و اهمیت استفاده از مدل‌های توزیعی، شبیه‌سازی جریان رودخانه و بررسی تولید رواناب در هر مکان و زمان در حوزه آبخیز با استفاده از مدل هیدرولوژیک توزیعی- مکانی WetSpa جهت شناسایی مناطق با پتانسیل تولید رواناب زیاد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز طالقان یکی از مهم‌ترین زیرحوزه‌های آبخیز سفیدرود به‌شمار می‌رود که در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و در محدوده شهرستان ساوجبلاغ استان البرز قرار گرفته است. این حوزه از شمال به حوزه آبخیز الموت، از جنوب به زیاران و صمغ‌آباد، از شرق به بخشی از حوزه آبخیز کرج و از غرب به حوزه آبخیز شاهرود محدود می‌گردد (۱۸). منطقه مورد مطالعه قسمتی از حوزه آبخیز طالقان (بخش‌های سراب و میانی) با مساحت ۸۰۹ کیلومترمربع می‌باشد و بین عرض‌های شمالی "۴۸ ’۲۰ °۳۶ و "۲۳ ’۵ °۳۶ و طول‌های شرقی "۳۵ ’۳۹ °۵۰ و "۷ ’۱۱ °۵۱ واقع شده است. متوسط بارندگی حوزه در سال ۵۹۱ میلی‌متر می‌باشد. این حوزه با ارتفاع متوسط ۲۷۵۰ متر و حداکثر ارتفاع ۴۳۶۲ متر و شیب متوسط ۴۰/۴۸٪ از حوزه‌های کوهستانی محسوب می‌شود. طول رودخانه دائمی طالقان‌رود ۵۲ کیلومتر و نقطه خروجی حوزه به ایستگاه هیدرومتری گلینک منتهی می‌شود (۱۴). شکل ۱ موقعیت و محدوده حوزه آبخیز طالقان در استان البرز و طبقات ارتفاعی، شبکه آبراهه و پراکنش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه را نشان می‌دهد.



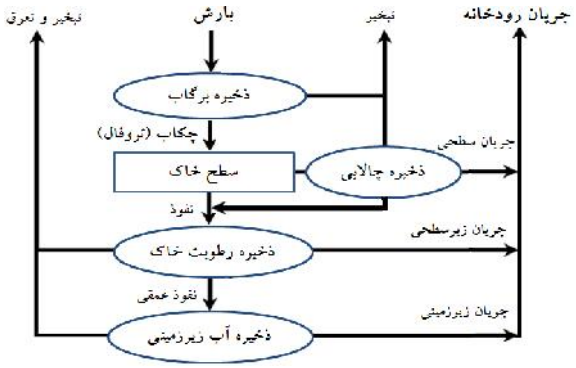
شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز طالقان در استان البرز و طبقات ارتفاعی، شبکه آبراهه و پراکنش ایستگاه‌های باران‌سنجی

مدل WetSpa

مدل WetSpa اولین بار توسط ونگ و همکاران (۱۹) ابداع و سپس توسط دسمت و همکاران (۶)، لیو و همکاران (۱۱) و زینی‌وند (۲۱) توسعه پیدا کرده است.

این مدل یک نوع مدل هیدرولوژیک و فرسایش خاک است (۲۰) که قابلیت پیش‌بینی سیلاب و شبیه‌سازی بیلان‌آبی (۱۹)، فرسایش و انتقال رسوب، بررسی تأثیر تغییر اقلیم و کاربری‌اراضی در فرآیندهای هیدرولوژیک، کیفیت آب و مدیریت آبخیز را در مقیاس حوزه، زیرحوزه و شبکه سلولی با گام‌های‌زمانی مختلف داراست (۱۴). شکل ۲ ساختار مدل WetSpa را در مقیاس سلولی نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]



شکل ۲- ساختار مدل WetSpa در مقیاس سلولی

بارش نیروی محرکه اصلی و ورودی حساس مدل است که خطا در اندازه‌گیری آن منجر به ایجاد خطای بیشتر در داده‌های شبیه‌سازی شده خواهد شد. مدل بر اساس شبکه‌سلولی طراحی شده که در آن هر سلول شامل چهار لایه تاج پوشش، ناحیه ریشه، ناحیه انتقال و ناحیه اشباع در جهت عمودی می‌باشد. برای هر سلول منفرد رستری خصوصیات خاک، بارش، مقدار رطوبت خاک، پوشش گیاهی و پوشش زمین ایزوتروپیک و هموژن فرض می‌شود. مدل در هر شبکه سلولی با استفاده از مجموعه‌ای از روابط فیزیکی و تجربی و با توجه به میزان بارندگی، دما و تبخیر و تعرق، کلیه فرآیندهای هیدرولوژیک و پیش‌بینی سیل از جمله مقدار بارش، ذخیره برگابی گیاهان، ذخیره چالابی، نفوذ، رواناب سطحی، نفوذعمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی و بیلان آب در ناحیه‌های ریشه و اشباع را شبیه‌سازی نماید. هم‌چنین دبی‌های پیک و هیدروگراف جریان در هر مکان از شبکه آبراهه را پیش‌بینی و توزیع مکانی فرآیندهای هیدرولوژیک را شبیه‌سازی می‌کند (۱۲). در مدل WetSpa، بیلان آب در ناحیه ریشه برای هر سلول با معادله زیر محاسبه می‌گردد:

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

در معادله بالا، D عمق‌ریشه (متر)، $\Delta\theta$ تغییرات رطوبتی خاک (مترمکعب بر مترمکعب)، Δt گام زمانی (روز)، P بارش، I تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی و ذخیره چالابی در گام زمانی، V رواناب‌سطحی یا بارش مازاد، E تبخیر و تعرق، F نرخ جریان زیرسطحی در زمان و R سرعت نفوذعمقی از ناحیه ریشه بر حسب متر بر روز می‌باشد. در مدل WetSpa، یک روش اصلاحی برای برآورد فرآیندهای رواناب‌سطحی و نفوذ ارائه شده که عوامل توپوگرافی، پوشش‌زمین، رطوبت خاک و شدت بارش را در ایجاد رواناب و نفوذ مؤثر برشمرده است:

$$PE_i(t)=C_i(P_i(t)-I_i(t)+M_i)(\frac{\theta_i(t)}{\theta_{si}})^{\alpha} \qquad (۲)$$

$$F_i(t)=P_i(t)-I_i(t)-PE_i(t) \qquad (۳)$$

که در آن $PE_i(t)$ بارش مازاد در سلول i (میلی‌متر)، $P_i(t)$ بارش سلول i (میلی‌متر)، $I_i(t)$ تلفات برگاب (میلی‌متر)، $\theta_i(t)$ محتوای رطوبت خاک در سلول i و زمان t (مترمکعب در مترمکعب)، θ_{si} تخلخل خاک در سلول i (مترمکعب در مترمکعب)، M_i مقدار ذوب برف (میلی‌متر)، $F_i(t)$ مقدار نفوذ در سلول i (میلی‌متر)، C_i ضریب بارش مازاد پتانسیل (ضریب رواناب پتانسیل) سلول i که در شرایط ایده‌آل تقریبا ثابت است و توان α ضریب متغیری است که تأثیر شدت بارش بر روی ضریب بارش مازاد را منعکس کرده و مقادیر آستانه برای این ضریب با واسنجی تعیین می‌شود (۱۳،۱۲). با این فرض که یک سلول به‌صورت بازه‌ای با جریان یک بعدی غیرماندگار بوده و با صرف‌نظر از شرایط ماند معادله ممنتم سنت- ونانت، فرآیند جریان سلول را می‌توان با استفاده از معادله خطی موج پخشی سنت- ونانت به‌صورت زیر شبیه‌سازی نمود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+c_i\frac{\partial Q}{\partial x}-d_i\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}=0 \qquad (۴)$$

که در آن Q دبی جریان (مترمکعب در ثانیه) در زمان t (ثانیه) و در مکان x (متر)، c_i سرعت موج سینماتیکی در سلول i (متر در ثانیه) و d_i ضریب پخش در سلول i (متر در ثانیه) می‌باشد. دو پارامتر c_i و d_i با استفاده از رابطه منینگ به‌صورت زیر ارائه شده است:

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]

$$c_i = \frac{5}{3} v_i \quad (۵)$$

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

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. دسمت و همکاران راه حل تقریب عددی تابع پاسخ مسیر جریان را ارائه دادند که دبی در انتهای مسیر جریان را با رواناب در آغاز مسیر جریان مرتبط می‌سازد (۶):

$$U_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sigma_i^2 t^3 / t_i^3}} \exp\left[-\frac{(t - t_i)^2}{2\sigma_i^2 t / t_i} \right] \quad (۷)$$

که در آن t_i میانگین زمان جریان از سلول ورودی تا پایان مسیر جریان (ثانیه) و σ_i^2 واریانس زمان جریان (مجذور ثانیه) است. در نهایت پاسخ جریان در انتهای مسیر برای ورودی دلخواه به سلول آغازی، با مجموع حاصل‌ضرب حجم رواناب ورودی در تابع پاسخ مسیر جریان واحد محاسبه می‌شود. بنابراین دبی هیدروگراف برای یک ورودی دلخواه با معادله زیر تعیین می‌شود:

$$Q_i(t) = \sum_{\tau=0}^{t-2} V_i(\tau) U_i(t - \tau) \quad (۸)$$

که در آن $Q_i(t)$ دبی خروجی در انتهای مسیر جریان با ورودی دلخواه در سلول i (مترمکعب بر ثانیه)، $U_i(t-\tau)$ تابع پاسخ مسیر جریان (عکس ثانیه) معادل هیدروگراف واحد لحظه‌ای و τ زمان تأخیر (ثانیه) و $V_i(\tau)$ حجم رواناب ورودی (مترمکعب) در سلول i در زمان تأخیر، شامل رواناب‌سطحی، جریان زیرسطحی و رواناب آب‌های زیرزمینی (در صورتی که سلول i در خروجی زیرحوزه واقع شده باشد) می‌باشد. پاسخ جریان حوزه با در نظر گرفتن قابلیت تفکیک مکانی در روش روندیابی خطی، حاصل مجموع پاسخ تمام سلول‌ها می‌باشد. بنابراین پاسخ جریان در کل حوزه را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{N_w} Q_i(t) \quad (۹)$$

در معادله بالا، $Q(t)$ دبی کل در خروجی حوزه (مترمکعب در ثانیه) و N_w تعداد کل سلول‌های حوزه می‌باشد (۱۲).

پارامترهای عمومی و ورودی‌های مدل WetSpa

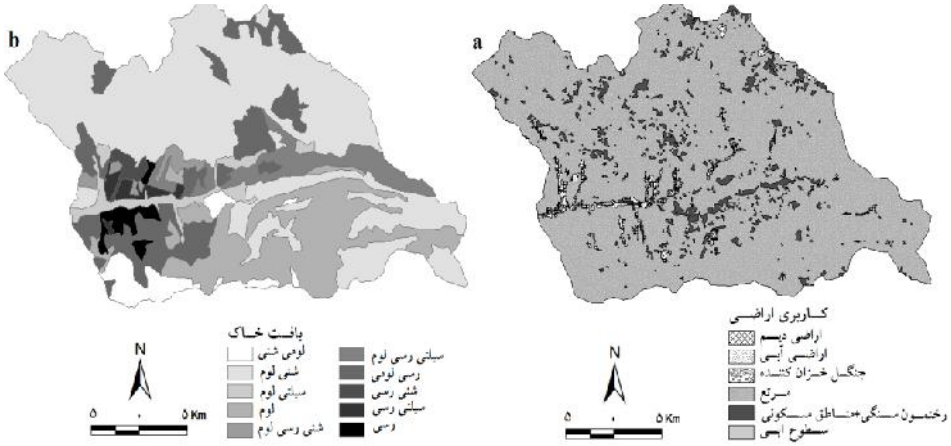
در مدل WetSpa، ۱۱ پارامتر قراردادی در صورت استفاده از روش درجه- روز برای شبیه‌سازی تجمع و ذوب برف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق کلیه ۱۱ پارامتر عمومی مدل در فرآیند واسنجی شرکت داشتند. در جدول ۱ پارامترهای عمومی مدل WetSpa آمده است.

جدول ۱- پارامترهای عمومی مدل WetSpa

ردیف	پارامترهای عمومی مدل	علامت اختصاری	واحد
۱	فاکتور مقیاس جریان زیرسطحی	Ki	-
۲	ضریب افت آب‌های زیرزمینی	Kg	d^{-1}
۳	مقدار رطوبت نسبی اولیه	K_ss	mm
۴	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل	K_ep	-
۵	ذخیره فعال آب‌های زیرزمینی	G0	mm
۶	حداکثر ذخیره آب‌های زیرزمینی	G_max	mm
۷	دمای آستانه ذوب	T0	^oC
۸	ضریب دما درجه- روز	K_snow	$mm\ ^oC^{-1}d^{-1}$
۹	ضریب باران درجه- روز	K_rain	$^oC^{-1}d^{-1}$
۱۰	مؤلفه رواناب سطحی برای شدت بارندگی نزدیک صفر	K_run	-
۱۱	شدت بارندگی متناظر با توان رواناب سطحی	P_max	mmd^{-1}

در محیط GIS، نقشه نهایی پوشش‌اراضی سال ۱۳۸۰ در قالب رستر با پیکسل سایز ۸۵ متر با ۶ کلاس پوشش اراضی شامل سطوح آب، جنگل پهن‌برگان، اراضی دیم و آبی، مرتع (۸۸/۵٪) و رخنمون سنگی استخراج شد. به علت موجود نبودن نقشه بافت خاک طالقان، با توجه به گزارش مطالعات خاک‌شناسی حوزه آبخیز طالقان، نقشه واحدهای اراضی و پروفیل‌های شاهد نقشه بافت خاک حوزه در محیط GIS در قالب رستر با ۱۰ کلاس بافت پردازش و تجزیه و تحلیل شد. بیش‌ترین مساحت به کلاس شنی لوم (۵۰/۱٪) اختصاص دارد. در شکل ۳ نقشه‌های کاربری اراضی و بافت خاک حوزه آبخیز طالقان آمده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]



شکل ۳- نقشه‌های کاربری اراضی (a) و بافت خاک (b) حوزه آبخیز طالقان

آمار و اطلاعات بارش، تبخیر، دما و دبی از شرکت تماب تهیه شد که شامل داده‌های روزانه دوره آماری ۱۱ ساله (۱۳۸۳-۱۳۷۳) مربوط به ۹ ایستگاه باران‌سنجی، ۳ ایستگاه هواشناسی داخل و خارج حوزه و ایستگاه هیدرومتری خروجی حوزه می‌باشد. لازم به ذکر است جهت آگاهی از ماهیت داده‌های مورد استفاده، از روش پلات چندک- چندک و آزمون عددی کلموگروف- اسمیرنوف (۸) در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. طبق نتایج آزمون، داده‌های بارش و دبی مشاهداتی غیرنرمال و ناهمگن می‌باشد.

اجرا و ارزیابی کارایی مدل WetSpa

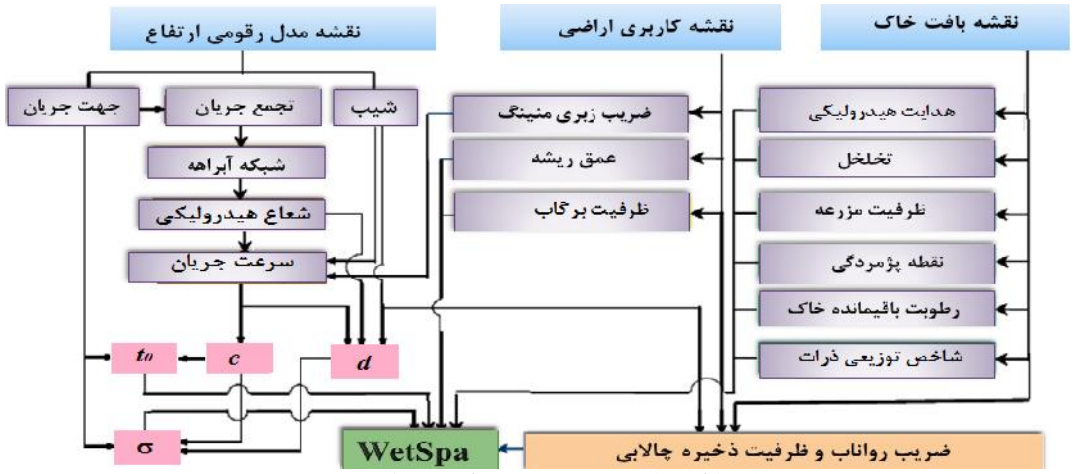
روند استخراج پارامترهای توزیعی مختلف از نقشه‌های ورودی مدل و ضریب رواناب و ظرفیت ذخیره چالابی که حاصل تلفیق اطلاعات نقشه‌های ورودی بوده در شکل ۴ ارائه شده است. مدل با استفاده از نقشه‌های توزیعی- مکانی پارامترهای هیدرولوژیک و سری‌های زمانی دوره ۱۳۷۸-۱۳۷۳ اجرا شد. دوره آماری شش سال آغاز دوره برای واسنجی و دوره پنج ساله ۱۳۸۳-۱۳۷۹ برای اعتبارسنجی مدل انتخاب شد. جهت واسنجی مدل از دو روش آزمون و خطا و خودکار با کاربرد PEST (Parameter ESTimator) به عنوان ابزار بهینه‌سازی و تخمین پارامترهای مدل (۳،۷) استفاده شد. در روش دستی با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، نتایج و روند به خوبی قابل مشاهده و قابل‌کنترل می‌باشد. در مدل WetSpa، به منظور ارزیابی کیفیت بازسازی هیدروگراف مشاهداتی علاوه‌بر مقایسه‌های گرافیکی، از معیارهای آماری مختلف نظیر، اریب مدل، قابلیت اعتماد مدل، ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف (۱۵)، ضریب همبستگی و غیره استفاده می‌شود. معیارهای اشاره شده امکان برآوردهای کمی و نکویی برازش بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده را فراهم آورده و بر اساس نتایج این شاخص‌ها، قابلیت پیش‌بینی مدل بررسی می شود.

نتایج و بحث

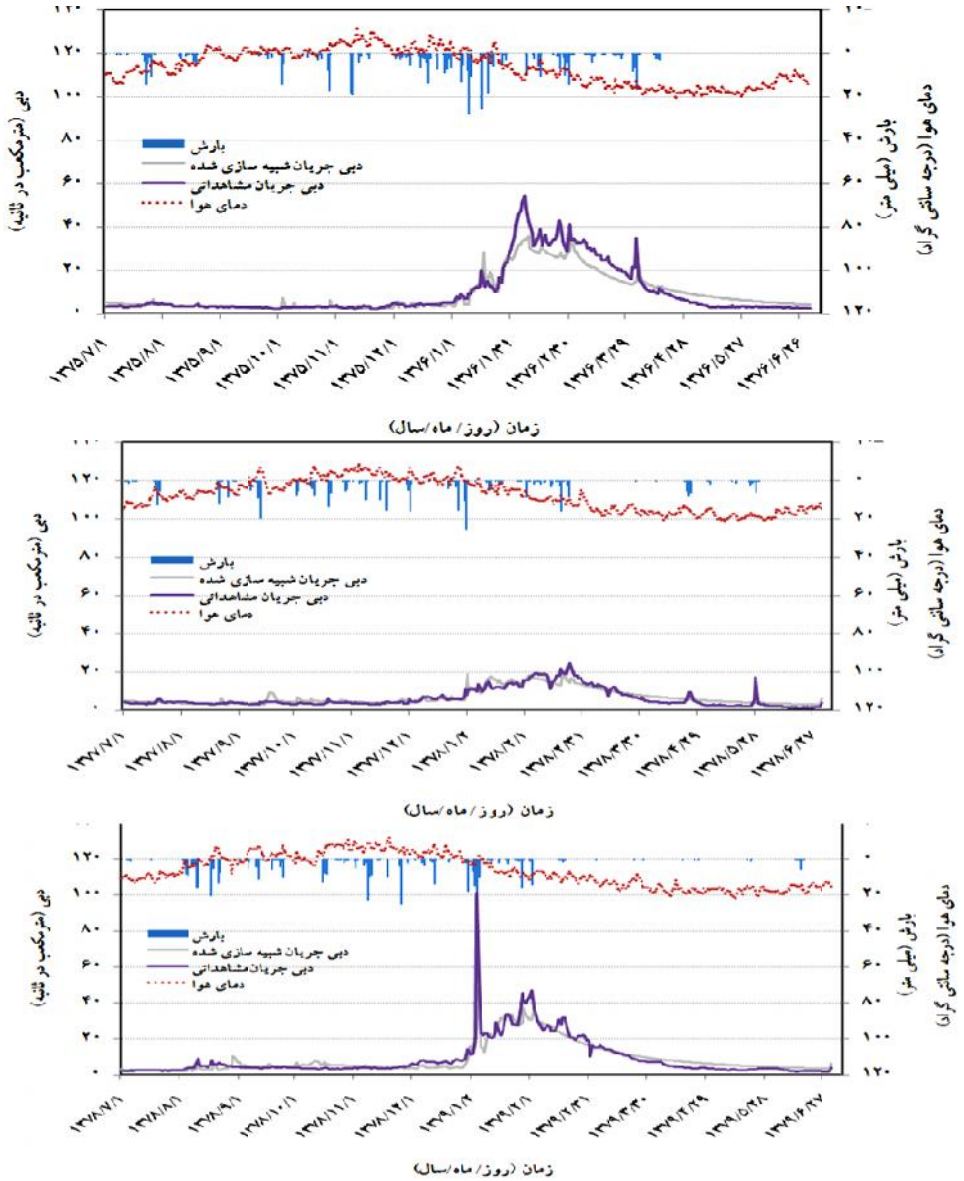
پارامترهای توزیعی مدل بر اساس شیب سطحی، کاربری اراضی و بافت خاک و با توجه به مطالعات پیشین برآورد می‌شود. در استخراج نقشه شبکه آبراهه، آستانه سلولی ۱۰ تعیین شده که به این معناست که به ازای هر ۱۰ سلول یک آبراهه عمل زهکش را انجام داده (۲) به این ترتیب حداقل مساحت هر زیرحوزه ۷/۲ هکتار برآورد می‌شود. به دلیل مشکل بودن پایش میدانی، پارامترهای عمومی مدل واسنجی می‌شوند. در صورتی که پارامترهای توزیعی مستخرج از نقشه‌های پایه شامل هدایت هیدرولیکی، عمق ریشه، ظرفیت ذخیره برگاب شده در شرایط میانگین از منابع به دست آمده و نیازی به واسنجی ندارند. مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، تطابق مناسبی را بین نتایج شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد که با تحقیقات لیو و همکاران (۱۱) و بهره‌مند و همکاران (۲) همسو می‌باشد.

شکل‌های ۵ و ۶ مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حوزه آبخیز طالقان را در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]

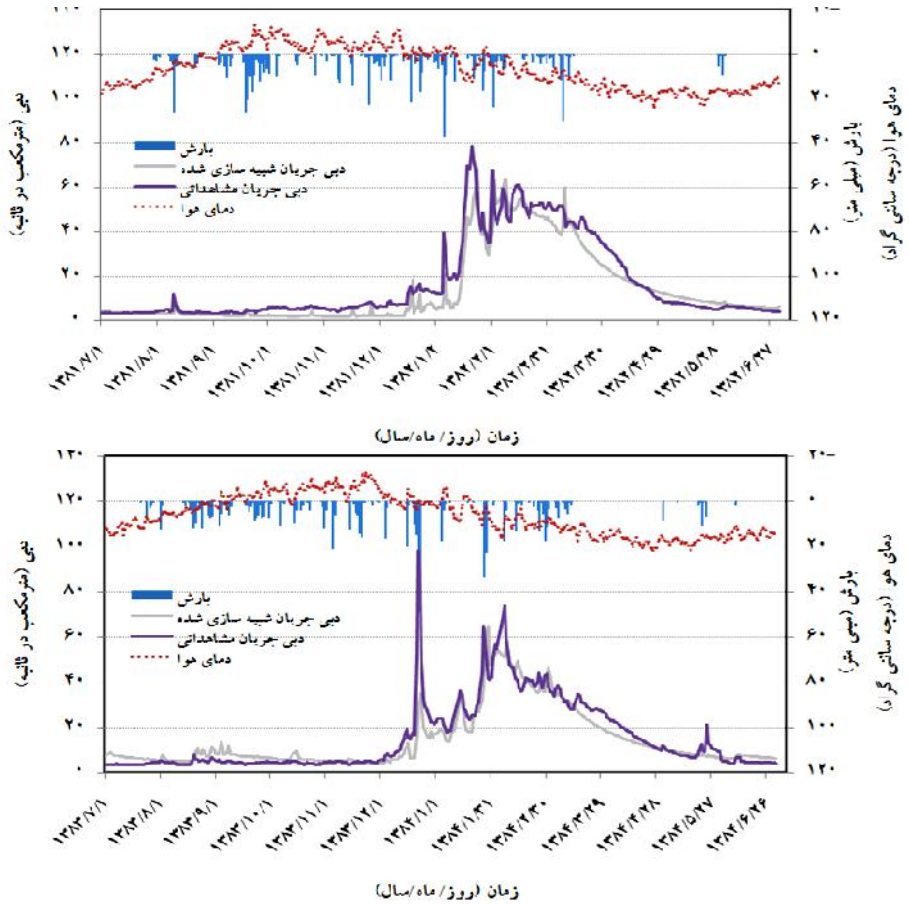


شکل ۴- پارامترهای توزیعی مستخرج از نقشه‌های ورودی مدل



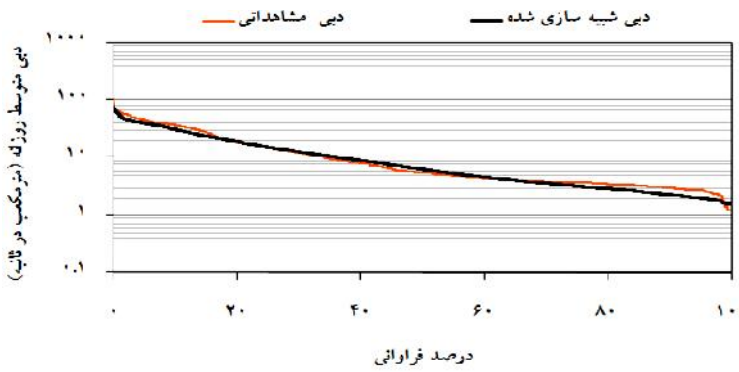
شکل ۵- مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حوزه آبخیز طالقان در دوره واسنجی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]



شکل ۶- مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حوزه آبخیز طالقان در دوره اعتبارسنجی

با مقایسه هیدروگراف‌ها در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مشاهده می‌شود به طور کلی در زمستان و اواخر پاییز به دلیل بارش برف، در آغاز شاخه بالارونده تغییرات چندانی در دبی جریان رودخانه مشاهده نشده و مدل نیز با شبیه‌سازی مناسب تجمع برف و رواناب، پیش‌بینی مناسب و مطابق با واقعیت را در این شاخه نشان داده است. همچنین در ماه‌های اسفند و فروردین بارش باران و ذوب برف، تولید رواناب و پر شدن رودخانه‌ها را در پی داشته است. با توجه به هیدروگراف، می‌توان گفت دبی پیک و دبی پایه کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد شده است. شکل ۷ انحرافات دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. با توجه به نمودار، کم‌برآوردی دبی‌های کم (با فراوانی زیاد) و دبی‌های زیاد (با فراوانی کم) قابل تشخیص می‌باشد. نتایج مشابهی در این زمینه توسط صفری و همکاران (۱۷) ارائه شده است.



شکل ۷- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بر اساس درصد فراوانی در دوره واسنجی ۱۳۷۸-۱۳۷۳

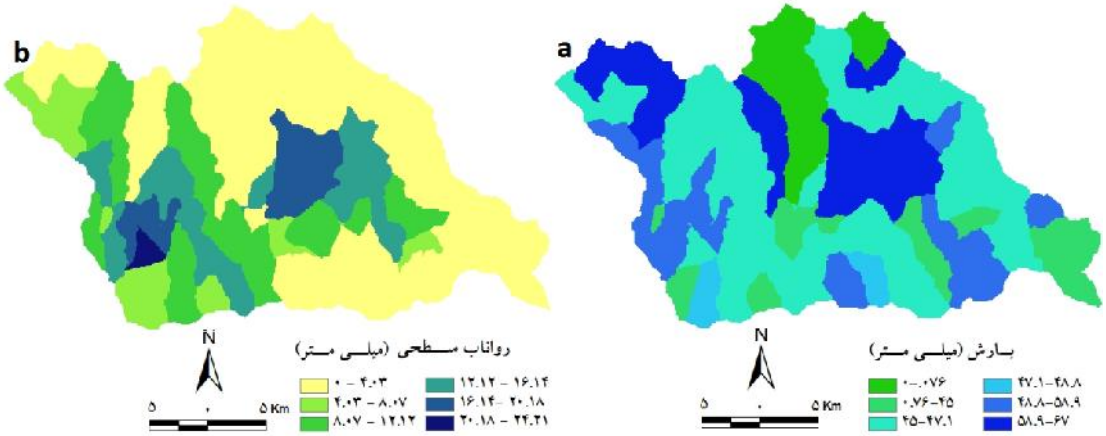
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]

با واسنجی مدل و با توجه به معیار نش- ساتکلیف، کارایی مدل ۸۳/۳ درصد برآورد شد. در جدول ۲ نتایج کارایی مدل بر اساس معیارهای آماری ارزیابی مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی آمده است. در مرحله واسنجی، دبی جریان رودخانه طالقان بر اساس معیار نش- ساتکلیف با دقت ۸۳/۳ درصد و دبی‌های جریان کم و زیاد به ترتیب ۸۲ و ۸۴/۳ درصد شبیه‌سازی شده است. این نتایج بیش‌ترین مطابقت را با مطالعه زینی‌وند (۲۰) در حوزه سد لتیان دارد. با توجه به معیار تجمعی (۱۷،۹،۱) ۸۹/۹ درصد، کیفیت شبیه‌سازی‌ها در طبقه عالی قرار می‌گیرد. معیار نش- ساتکلیف ۷۰/۲ درصد در مرحله اعتبارسنجی همان‌طور که در جدول ۲ آمده است، میزان صحت واسنجی پارامترهای مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی مدل WetSpa

معیار ارزیابی	واسنجی (٪)	اعتبارسنجی (٪)
اریب مدل	-۰/۷۵	۲/۱
مجذور میانگین مربعات خطا	۴۷/۲	۶۳/۷
نش- ساتکلیف	۸۳/۳	۷۰/۲
نش- ساتکلیف جریان‌های کم	۸۲	۷۱
نش- ساتکلیف جریان‌های زیاد	۸۴/۳	۷۲/۶
ضریب همبستگی اصلاح شده	۸۶/۱	۸۱/۸
معیار تجمعی	۸۹/۹	۸۳/۳

لازم به اشاره است که شبیه‌سازی مناسب ذوب برف و تجمع برف با وجود سه پارامتر مؤثر در برآورد ذوب برف در فرآیند واسنجی پارامترهای مدل، شبیه‌سازی دقیق‌تر میزان جریان رواناب‌سطحی را به دنبال داشته است. این مسئله از نقاط قوت مدل هیدرولوژیک WetSpa محسوب می‌شود. برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی توزیعی مکانی- زمانی رواناب و استخراج نقشه‌های توزیعی بارش و رواناب‌سطحی، بارش تاریخ ۱۳۷۳/۹/۲ با بیش‌ترین مقدار بارش (۵۱/۲ میلی‌متر) و رواناب چشم‌گیر ایجاد شده در طول دوره شبیه‌سازی در واحد ۷۰ زیرحوزه انتخاب شد (شکل ۸).



شکل ۸- نقشه توزیعی مکانی بارش (a) و رواناب سطحی (b) در تاریخ ۱۳۷۳/۹/۲ در حوزه آبخیز طالقان

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، بارش یک روز قبل (۲۳/۴ میلی‌متر) در اشباع خاک این سطح مؤثر بوده که منجر به افزایش رطوبت خاک (حداکثر میزان در دوره واسنجی) و افزایش دبی جریان شده است. در این روز بیش‌ترین رطوبت خاک و رواناب سطحی شبیه‌سازی شده در زیرحوزه‌های اطراف رودخانه اصلی و خروجی حوزه مشاهده می‌شود. از ویژگی‌های زیرحوزه‌های مذکور با پتانسیل بالای تولید رواناب، می‌توان به شیب کمتر از شیب متوسط حوزه، بافت خاک رسی و سیلتی رسی با کاربری اراضی عمدتاً مرتع و بعضاً اراضی کشاورزی اشاره کرد. با توجه به نتایج و دقت شبیه‌سازی‌ها، مدل با دقت قابل قبولی جریان رواناب را در زمان و مکان پیش‌بینی کرده است. با توجه به کارایی بالا و قابلیت‌های مدل WetSpa و لزوم مدیریت رواناب در زمان و مکان در حوزه‌های آبخیز بزرگ استفاده از این دسته از مدل‌ها راه‌کار مناسبی به نظر رسیده و بر

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]

این اساس تشخیص مناطق سیل‌خیز جهت برنامه‌ریزی و اولویت‌بندی حفاظت آب و خاک را امکان‌پذیر می‌سازد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از آقای دکتر مجید حسینی از مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به خاطر ارائه نقشه‌های پایه و اطلاعاتی راجع به حوزه مذکور و شرکت تماب به خاطر همکاری در دسترسی به آمار هیدرومتری و باران‌سنجی حوزه آبخیز طالقان اعلام می‌دارند.

منابع

1. Andersen, J.A., J.C. Refsgaard and K.H. Jensen. 2001. Distributed hydrological modeling of the Senegal River basin-model construction and validation. Journal of Hydrology, 247: 200-214.
2. Bahremand, A., J. Corluy, Y.B. Liu and F. De Smedt. 2006. Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad River basin, Slovakia. in: J. van Alphen, E. van Beek, M. Taal (eds.), Floods, from Defence to Management, Taylor & Francis Group, London, 415-422. (In Persian)
3. Bahremand, A. and F. De Smedt. 2010. Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model. Water Resource Management, 24: 2869-2880.
4. Beven, K.J. 2000. Rainfall-runoff modeling. John Willey and Sons Ltd, England. 200 pp.
5. Booij, M.J. 2002. Appropriate modeling of climate change impacts of river flooding, Ph.D. thesis, Universiteit Twente, the Nederlands, 179 pp.
6. De Smedt, F., Y.B. Liu and S. Gebremeskel. 2000. Hydrological modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information, in: C.A. Brebbia (ed.), Risk Analysis II, WTI press, Boston, 295-304.
7. Doherty, J. 2005. PEST: model independent parameter estimation, user manual, 5th edn. Watermark Numerical Computing, Brisbane.
8. Helsel, D.R. and R.M. Hirsch. 2002. Statistical methods in water resources in techniques of water resources investigations, Book 4, chapter A3. U.S. Geological Survey. 522 pp.
9. 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. Journal of Hydrology 280: 52-71.
10. Liu, Y.B. 1999. GIS-based spatially distributed hydrological modeling of the Barebeek catchment (MSc thesis), Vrije Universiteit Brussel, Belgium. 85 pp.
11. Liu, Y.B., S. Gebremeskel, F. De Smedt and L. Pfister. 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling, Journal of Hydrology 283: 91-106.
12. Liu, Y.B. and F. De Smedt. 2004. WetSpa extension, A GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management and erosion and sediment transport simulation, Documentation and User Manual. 155 pp.
13. Liu, Y.B., O. Batelaan and F. De Smedt. 2005. Automated calibration applied to a GIS-based flood simulation model using PEST. Floods, from Defence to Management-Van Alphen, van Beek & Taal (eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 38050 2.
14. Moradipour, Sh. 2012. Soil erosion and sediment transport simulation using spatially distributed hydrological WetSpa model in Taleghan watershed, Alborz province. M.Sc. Thesis in Watershed Management. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 149 pp. (In Persian)
15. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual model, Journal of Hydrology. 10: 282-290.
16. 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 Sciences, 4: 881-908.
17. Safari, A., F. De Smedt and F. Moreda. 2012. WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). Journal of Hydrology, 418–419, pp 78–89.
18. Vahabi, J. 2006. Flood hazard zonation using hydrological and hydraulic models, case study: Taleghanrood. Journal of Research and Construction in Natural Resources, 71: 33- 40. (In Persian)
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 and Chemistry of the Earth, 21: 189-193.
20. Zeinivand, H. 2009. Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion and sediment transport. PhD Thesis, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel (VUB), Brussels, Belgium. 208 pp.
21. Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2009. Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach. Natural Hazards Journal, 54: 451-468.
22. Zeinivand, H. 2010. Spatially distributed simulation of soil erosion and sediment in the watershed scale. 6th National Conference on Watershed Management sciences and Engineering and 4th National Conference on Soil Erosion and Sediment, 18-19 May, Tarbiat Modarres University, Nour, Mazandaran. (In Persian)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]

Distributed Simulation of Runoff in Space and Time using Wetspa Model in Taleghan Watershed

Shahin Moradipour[1] Abdolreza Bahremand[2], Hossein Zeinivand[3] and Ali Najafinejad[2]

1- M.Sc., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
(Corresponding author: shahin_Moradipour@yahoo.com)
2 - Associate Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
3- Assistant Professor, Lorestan University
Received: October 20, 2012 Accepted: December 3, 2013

Abstract

In order to assessment and prediction of hydrological processes with inherent complexity, processes changes effects on the nonlinear behavior of watershed system in the past and future and specification of water and soil conservation operation, using indirectly methods such as simulation of watershed processes therewith directly methods is necessary. The objective of this research is evaluation of runoff generation in space and time using distributed hydrological WetSpa model in Taleghan watershed of the Sefidrood basin. Thus flow hydrographs and peak discharges in any space of the stream network were predicted also spatially distribution of hydrological processes such as runoff was simulated using incorporating of both daily meteorological data in an 11 year period and three base maps information. Simulated results reveal that there is good agreement between observations and simulations. The Nash- Sutcliffe criteria, 83.3% and accuracy of the simulation show the high performance of the model in this watershed. Regarding to the outputs and spatially distributed hydrological factors in daily time step the model is capable to analyze topography, soil type, and land use effects on the hydrological behavior of the watershed.

Keywords: Spatially Distributed Hydrological Model, Wetspa, Runoff Simulation, Taleghan Watershed

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-04-23]