نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال دوازدهم. شماره چهل و هشت. تابستان ۱۴۰۱

شبیه سازی بارش- رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوضه آبخیز بهشت آباد

مهسا حبیبی[۱]، شهلا پایمزد*[۲]، مه‌نوش مقدسی[۳]

تاریخ ارسال:۱۳۹۹/۱۰/۲۶
تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۱۲/۲۴

مقاله پژوهشی برگرفته از کارشناسی ارشد

چکیده

اهمیت فراوان فرایند بارش-رواناب در حوضه‌آبخیز، از منظر مهندسی منابع آب، مهندسی رودخانه، سازه های کنترل سیل و ذخیره سیلاب باعث شد که محققان مدل‌های شبیه‌سازی را به عنوان ابزاری جهت تجزیه و تحلیل و ارزیابی رفتار حوضه‌ها مورد بررسی قرار دهند. لذا در این پژوهش هدف، ارزیابی کاربرد مدل WetSpa برای شبیه‌سازی بارش و هیدروگراف جریان حوضه آبریز بهشت آباد می‌باشد. بدین منظور با استفاده از داده‌های هواشناسی و هیدرومتری روزانه ایستگاه‌های منتخب طی سال‌های ۹۳-۸۹ و سه نقشه اصلی توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک رواناب حوضه شبیه‌سازی گردید. قابل ذکر است از این دوره آماری پنج سال ۹۳-۸۹ برای واسنجی و دو سال ۸۸-۸۷ برای اعتبارسنجی مدل مدنظر قرار گرفته است. نتایج نشان داد مدل قادر بوده است هیدروگراف‌های روزانه را با دقت خوب و با ضریب ناش ساتکلیف ۶۰/۱۲ درصد پیش‌بینی کند. به علاوه نتایج حاکی از آن است که مدل مولفه‌ها و عامل های هیدرولوژیکی را با دقت قابل قبول برآورد کرده و برای محاسبه دبی جریان روزانه موثر واقع می‌گردد.

واژه‌هلای کلیدی: پیش بینی هیدروگراف سیل، حوضه آبخیز بهشت آباد، شبیه سازی، مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب، مدل هیدرولوژیکی Wetspa.

[۱] فارغ التحصیل گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک اراک، ایران mahsan_habibi@yahoo.com
[۲] * نویسنده مسئول و استادیارگروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران paimozd.ar@hotmail.com
[۳] دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران mah_moghaddasi@hotmail.com

مقدمه

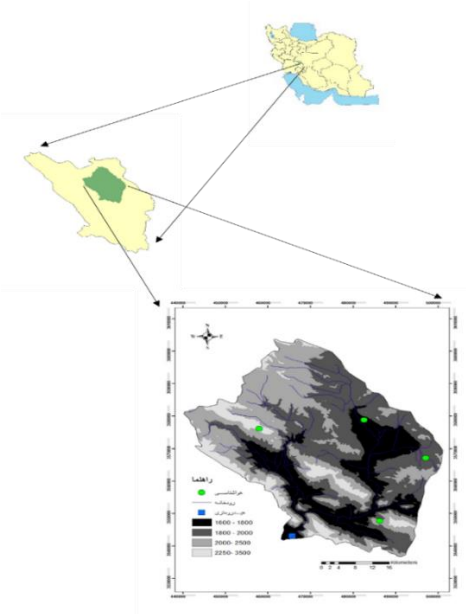
پیش‌بینی عملکرد یک سیستم پیچیده و بررسی اثر تغییرات روی عملکرد سیستم هدف اولیه یک مدل شبیه-سازی می‌باشد (نجفی، ۱۳۸۱). در واقع اساس مدل‌های توزیعی هیدرولوژیکی فیزیکی، درک ما از فیزیک فرایندهای هیدرولوژیکی است که عکس‌العمل حوضه‌آبخیز را کنترل می‌کند و در توصیف این فرایندها از معادلات و روابط فیزیکی بهره می‌برد. از همین‌رو این مدل‌ها قابلیت کاربرد برای هرمنطقه‌ای را دارند (زینی‌وند، ۱۳۸۹). مدل انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر (WetSpa) اولین بار توسط Wang و همکاران (۱۹۹۶) و سپس توسط Liu و همکاران (۲۰۰۳)، برای پیش‌بینی سیل و در ادامه توسط Zeinivand and De Esmeth (۲۰۰۹)، به منظور شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب توسعه داده شد. این مدل قابلیت پیش‌بینی سیل و شبیه‌سازی بیلان آبی، فرسایش و انتقال رسوب، بررسی تغییر اقلیم و کاربری اراضی در فرآیندهای هیدرولوژیک، کیفیت آب و مدیریت آبخیز را در مقیاس حوضه، زیرحوضه و شبکه سلولی با گام‌های زمانی مختلف دارا می‌باشد. در این زمینه تحقیقات متعددی انجام شده‌است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد. در تحقیقی Zeinivand و De Smedt (۲۰۱۰) مدل WetSpa را در حوضه‌آبخیر بزرگی در اسلواکی، به نام توریسا اجرا نموده و با استفاده از نرم افزار PEST آنالیز حساسیت و عدم قطعیت عامل‌های مدل را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها Ke یا فاکتور تبخیر و تعرق از بالاترین حساسیت برخوردار بود . همچنین فاکتور Kg دارای بیشترین عدم قطعیت می‌باشد. نتایج مطالعات آن‌ها حاکی از این است که تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی بر پایه GIS و PEST باعث تخمین دقیق‌تر و نزدیک به واقعیت عامل‌های شبیه‌سازی شده می‌گردد. Zeinivand (۲۰۱۰) در تحقیق دیگری با استفاده از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa در حوضه‌آبخیز هورنارد در کشور اسلواکی به شبیه‌سازی توزیعی-مکانی فرسایش خاک و رسوب پرداخت. شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب برای دو رگبار متفاوت در حوضه‌آبخیز هورنارد و مقایسه آن با مقادیر دبی و رسوب اندازه‌گیری شده قابلیت نسبتا بالای این مدل را برای پیش‌بینی فرسایش خاک در حوضه‌آبخیز نشان می‌دهد. Kabir و همکاران (۲۰۱۱) به پیش‌بینی رواناب در حوضه‌آبخیز گرگانرود در ایران با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل هیدرولوژیکی WetSpa پرداختند. مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسبه-ای در خروجی حوضه نشان دهنده کارایی بالای مدل در پیش‌بینی می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان دادند که مدل قابلیت پیش‌بینی هیدروگراف‌های روزانه را در منطقه با دقت ۷۱٪ تا ۷۶٪ داراست. مرادی‌پور و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa، به شبیه‌سازی جریان سیل در حوضه آبی طالقان از زیر حوضه‌های سفیدرود پرداختند. در این تحقیق مقایسه گرافیکی نتایج نشان دهنده تطابق بسیار خوبی بین داده‌ها شبیه‌سازی مدل و مشاهداتی وجود دارد. با توجه به خرجی مدل و فاکتورهای هیدرولوژیکی با توزیع مکانی در هر گام زمانی مدل قابلیت آنالیز اثرات توپوگرافی، بافت خاک و کاربری-اراضی در رفتار هیدرولوژیکی حوضه را دارد. Azinmehr و Bahremand (۲۰۱۵) به بررسی آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل WetSpa در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان حوضه دینور کرخه پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که مدل WetSpa هیدروگراف خروجی حوضه را به خوبی شبیه‌سازی کرده و مدل هیدروگراف روزانه را طبق معیار ناش- ساتکلیف ۶۶% با صحت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. Legzaeiyan Pour و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه نازلوچای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش دما، بارندگی و رواناب در دوره آتی تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 است. خدابخشی سورشجانی و همکاران (۱۳۹۵)، اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی – توزیعی WetSpa را در حوضه رود زرد واقع در استان خوزستان ارزیابی کردند. نتایج، نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی فرایند بارش -رواناب است. علاوه بر این، نتایج حاصل از بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب، حاکی از کاهش رواناب سالانه به میزان ۱۴/۵۳٪ (۱۲/۳۶) تحت حالت متوسط سناریوی انتشار A2 (B1) است. پژوهش و همکارن (۱۳۹۷)، رواناب

و رسوب را در حوضه بهشت‌آباد با استفاده از مدل WetSpaشبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تطابق قابل قبولی بین داده‌های شبیه‌سازی شده مدل و مشاهدات رواناب و رسوب وجود دارد. براساس معیار ناش ساتکلیف، دقت ۵۷/۵۷٪ در شبیه‌سازی رواناب، کارایی قابل قبول مدل را در این حوضه نشان می‌دهد. Mohammady و همکاران (۲۰۱۸)، به مدلسازی و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی بر روی تولید رواناب با مدل های CLUE و WetSpa پرداختند. از مدل WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس روزانه استفاده شد. صحت شبیه سازی مدل WetSpa با راندمان ناش-ساتکلیف که برای داده های کالیبراسیون و اعتبارسنجی به ترتیب ۶۱/۰ و ۵۶/۰ درصد ارزیابی شد تطابق بالای مدل را نشان می دهد. Azizi و همکاران (۲۰۱۸)، به شبیه‌سازی و پیش-بینی جریان با استفاده از مدل WetSpa در حوضه رودخانه زیارت پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شباهت خوبی بین هیدروگراف‌های محاسبه شده و اندازه-گیری شده در خروجی حوضه رودخانه وجود دارد. هم-چنین آمار حوضه رودخانه زیارت نشان داد که نتایج حاصل از مدل در دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی خوب بوده است. با توجه به تحقیقات انجام شده، هدف در این تحقیق ارزیابی مدل هیدرولوژیکی WetSpa در شبیه-سازی بارش و رواناب و نیز بهره‌گیری از قابلیت مطابقت با تکنولوژی GIS در گام‌های زمانی متغیر در حوضه آبریز بهشت‌آباد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

انتخاب دوره آماری و اجرای مدل WetSpa: با بررسی آمار هواشناسی در شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال-وبختیاری و نیز شرایط حوضه‌آبخیز فارسان_بهشت‌آباد، سال‌های ۸۸-۸۷ و ۹۳-۸۹ برای اجرای مدل انتخاب شد. ازاین دوره آماری، دوسال ۸۸-۸۷ برای اعتبار سنجی و پنج‌سال ۹۳-۸۹ برای واسنجی مدل مدنظر قرار گرفته است. پس از جمع‌آوری آمار روزانه دوره منتخب، مدل تست شده و سپس مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار می-گیرد.

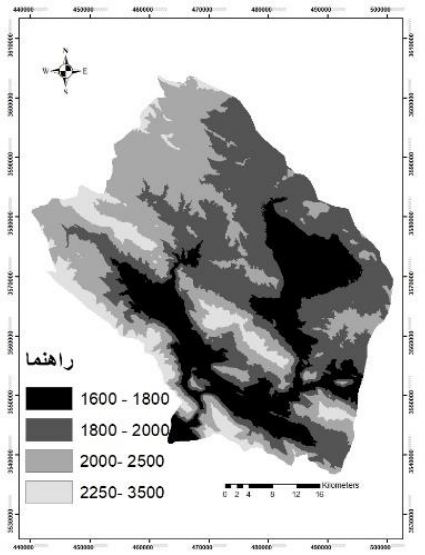
منطقه مطالعاتی: حوضه فارسان_بهشت‌آباد در محدوده جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. حوضه فارسان-_بهشت‌آباد با ۲۱۶۵/۷۰ کیلومتر مربع وسعت، وسیع‌ترین زیرحوضه‌آبریز کارون شمالی است (شکل ۱). در حوضه بهشت‌آباد به دلیل قرارگیری در ناحیه زاگرس میانی و هم‌جواری با مناطق مرکزی ایران، از تنوع اقلیمی زیادی برخوردار است، به نحوی که متوسط مقدار ریزش‌های جوی سالانه این حوضه از حدود ۱۰۰۰ میلیمتر در قسمت‌های غربی تا کمتر از ۲۵۰ میلیمتر در قسمت‌های شرقی آن متغیر است. به طور کلی رژیم آبدهی در سرشاخه‌های رودخانه کارون، رژیم مدیترانه‌ای است. بدین ترتیب که با آغاز فصل پاییز میزان بارش‌ها و تبخیر- تعرق در این منطقه از کشور به ترتیب زیاد و کم می‌شود و با رسیدن فصل تابستان با کاهش میزان بارش‌ها، مقدار تبخیر- تعرق افزایش می‌یابد (شرکت مهندسین مشاور جاماب، ۱۳۷۸).



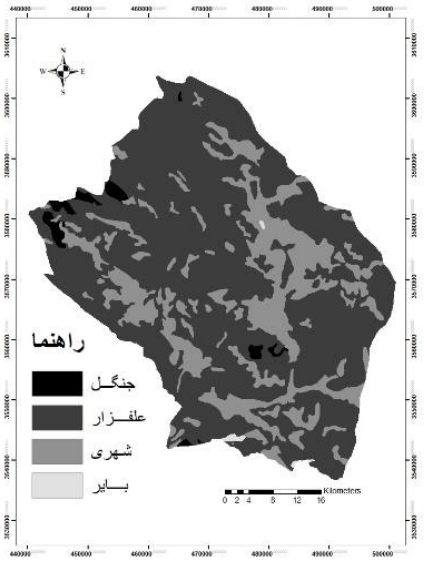
شکل (۱): منطقه مطالعاتی، ایستگاه‌های منتخب، مدل رقومی ارتفاع و رودخانه های حوضه

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق را می‌توان به سه دسته اطلاعات رقومی، هواشناسی و هیدرولوژیکی تقسیم نمود.

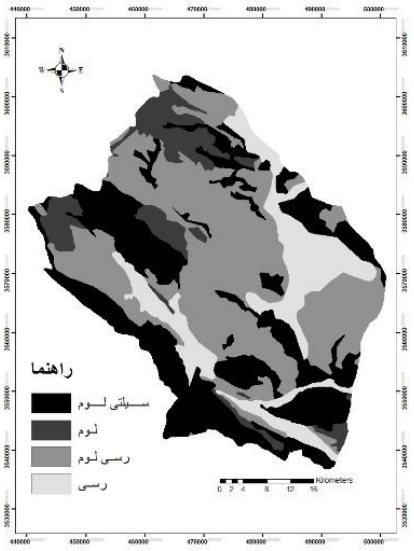
اطلاعات رقومی: سه نقشه‌ی اصلی مورد استفاده توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰ هستند. دیگر پارامترهای هیدرولوژیکی مورد نیاز در مدل نیز بر اساس این سه نقشه تهیه شده است (شکل۲). نقشه مدل رقومی ارتفاعی ۱۰متری از نقشه توپوگرافی حاصل شده‌است. قابلیت تفکیک مکانی و ارتفاعی DEM بایستی به قدر کافی باشد، تا امکان تعیین دقیق اطلاعات مورد نیاز حوضه که بر رفتار هیدرولوژیکی آن اثر می‌گذارند 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. اطلاعات کاربری زمین به عنوان یکی دیگر از ورودی‌های مهم مدل WetSpa محسوب می‌شود که منظور از کاربری زمین عبارت است از نوع پوشش سطح حوضه که شامل هرگونه پوشش گیاهی، لاشبرگ، آب‌های سطحی مانند دریاچه‌ها و باتلاق‌ها و نیز سطوح غیرقابل‌نفوذ نظیر جاده‌ها و مناطق مسکونی می‌باشد. سیستم تعیین شده کدبندی خاک در مدل WetSpa برمبنای مثلث طبقه‌بندی بافت خاک می‌باشد که توسط (USDA) درصد رس، سلیت و ماسه مشخص می‌شود. اطلاعات خاک موجود در نقشه خاکشناسی نوع خاک حوضه را تعیین می‌کند. بنابراین به منظور آماده‌سازی داده‌ها، بایستی نقشه اصلی خاک به نقشه‌رستری با کدهای خاکشناسی مربوط به مدل WetSpa تبدیل گردد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۲): (الف) نقشه مدل رقومی ارتفاعی حوضه بهشت-آباد- (ب) نقشه کاربری اراضی حوضه بهشت‌آباد - (ج) نقشه بافت خاک حوضه بهشت‌آباد

اطلاعات هواشناسی و هیدرومتری: بر اساس آمار و اطلاعات، چهار ایستگاه هواشناسی شهرکرد، فارسان، دزک و فرخ شهر و یک ایستگاه هیدرومتری بهشت آباد انتخاب گردید (شکل ۱).

جدول(۱):مشخصات ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی

ایستگاه	رودخانه	ارتفاع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
هواشناسی شهرکرد	بهشت-آباد	۲۰۵۰	۵۱-۵۰	۳۲-۱۷
هواشناسی فارسان	بهشت-آباد	۲۲۵۰	۵۰-۳۵	۳۲-۱۵
هواشناسی دزک	بهشت-آباد	۲۰۵۴	۵۸-۵۰	۳۲-۰۵
هواشناسی فرخشهر	بهشت-آباد	۲۰۷۳	۵۶-۵۰	۳۲-۱۸
هیدرومتری بهشت-آباد	بهشت-آباد	۱۶۹۵	۵۰-۴۵	۵۰-۳۷

در این تحقیق از آمار روزانه پنج سال (۸۹-۹۳) برای داده‌های بارش،تبخیر و دما از چهار ایستگاه (شهرکرد-فارسان-دزک-فرخشهر) و برای داده‌های دبی از ایستگاه فارسان_بهشت‌آباد استفاده گردید.

معادله بارش $P_i = P_{ref} + (H_i - H_{ref})\alpha$ می‌باشد که در آن P_i : بارندگی در سلول i (mm)، P_{ref} : میزان بارش در ایستگاه بارندگی مبنا (mm)، H_i و H_{ref} : ارتفاع در سلول i و در ایستگاه مبنا (m) و α : نرخ تصحیح بارندگی (mm/m).

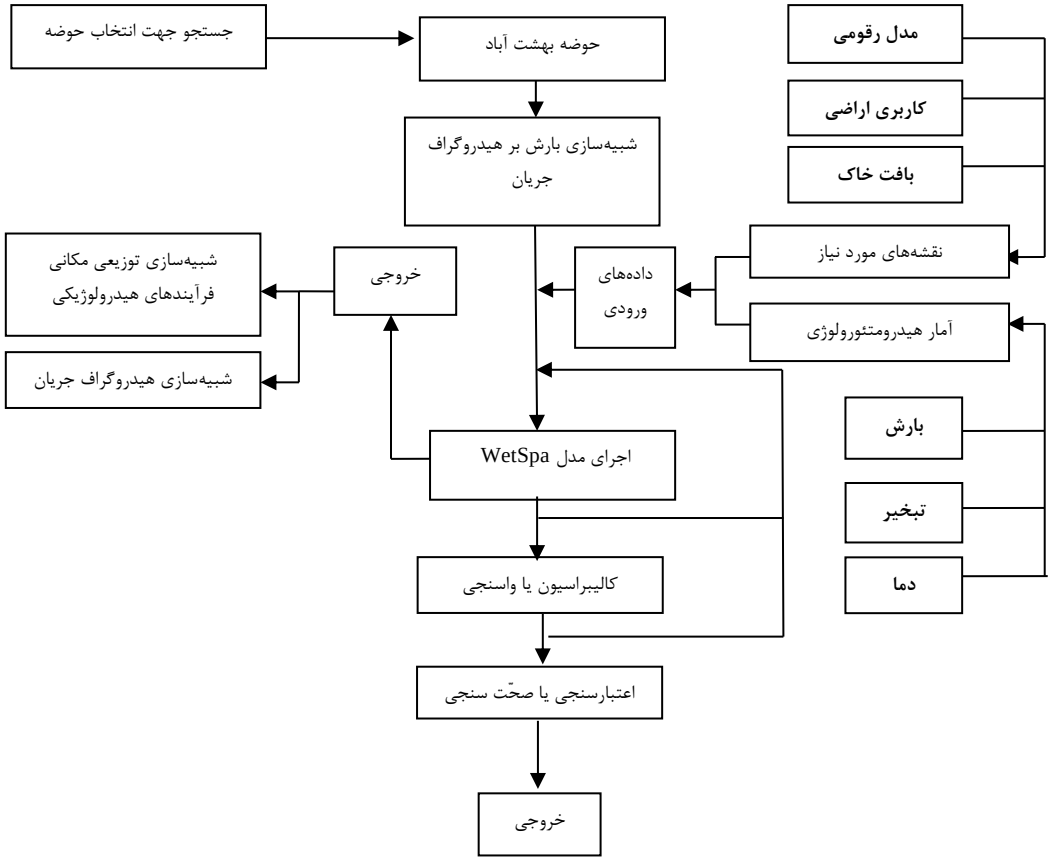
معادله دما $T_i = T_{ref} + (H_i - H_{ref})\beta$ می‌باشد که در آن T_{ref} : درجه حرارت در ایستگاه مبنا (°C)، H_i : ارتفاع در سلول i، H_{ref} : ارتفاع در ایستگاه مبنا و $\boldsymbol{\beta}$: نرخ تصحیح درجه حرارت.

خروجی نهایی: در مدل WetSpa، انواع فایل‌های خروجی، با توجه به گزینه‌های انتخاب شده در طول اجرای شبیه‌سازی تولید می‌شوند. خروجی‌های اصلی شامل پیش بینی هیدروگراف‌ها در خروجی حوضه یا در خروجی زیرحوضه‌های انتخاب شده و تعادل آب برای کل حوضه در طول دوره شبیه‌سازی است. مطالعه بیلان آبی حوضه برای بررسی تغییرات آبی سیستم هیدرولوژیکی و هم-چنین به عنوان وسیله‌ای برای تعیین کارایی مدل می‌باشد که با توجه به نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین می‌گردد. از بین اجزای اصلی سیستم، محتوای رطوبتی خاک به عنوان یک عامل محسوب می‌شود که بر حرکت جریان به داخل و خارج از زون ریشه (نفوذ پذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی و نیزجریان زیر سطحی) و هم-چنین تعادل انرژی بر روی سطح زمین تاثیر می‌گذارد. ذخایر برگابی و چالابی، رطوبت خاک و آب زیرزمینی از اجزای مهم دیگر می‌باشند که در مرحله بعدی اهمیت قرار دارند. بارندگی به عنوان ورودی سیستم و رواناب مستقیم، جریان زیر سطحی، جریان آب زیر زمینی و تبخیر و تعرق به عنوان تلفات سیستم هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند. معادله کلی بیلان آبی حوضه به صورت زیر می‌باشد.

$$P=RT+ET+\Delta SS+\Delta SG$$

روش تحقیق

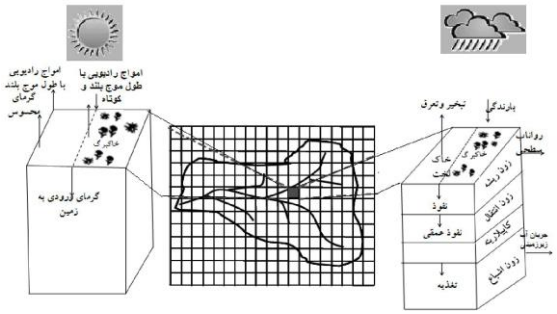
ابتدا برای دنبال نمودن بهتر ، فلوچارت روند تحقیق در شکل ذیل ارائه شده است. سپس ابزار مورد استفاده در آن شرح داده خواهد شد.



شکل (۳):فلوچارت روند تحقیق

مدل WetSpa: این مدل اولین بار توسط ونگ و همکاران (۱۹۹۶) ارائه و سپس توسط لیو و همکاران (۲۰۰۳) جهت پیش‌بینی سیلاب و محاسبه بیلان آبی توسعه یافت و بعد از آن قابلیت شبیه‌سازی کیفیت آب توسط لیو و همکاران (۲۰۰۶) به آن اضافه شد و دی اسمت و همکاران (۲۰۰۰) و زینی‌وند (۲۰۰۹) توانایی محاسبه ذوب برف و شبیه-سازی فرسایش خاک و حمل رسوب را بر آن افزود. برای غلبه بر ناهمگونی‌های موجود، حوضه به تعدادی سلول‌های شبکه‌ای تقسیم‌بندی می‌شود. که در این تحقیق ۵۰ متردر ۵۰ متر لحاظ شده است. در واقع مدل برای هر شبکه سلولی، ۴ لایه در جهت عمودی در نظر می‌گیرد 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 می‌باشد، که دارای تعادل آب و انرژی است (شکل ۴).



شکل (۴): ساختار مدل WetSpa

پارامترهای عمومی مدل: برای آسان‌سازی واسنجی پارامترها، ۱۱ پارامتر قراردادی در مدل WetSpa مورد استفاده قرار گرفته است، که عبارتند از فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل، فاکتور تصحیح جریان زیرسطحی، ضریب افت آب زیرزمینی، رطوبت اولیه خاک، ذخیره آب زیرزمینی اولیه، حداکثر ذخیره آب زیرزمینی، درجه حرارت پایه برای ذوب برف، ضریب روز - درجه حرارت، ضریب روز -درجه بارش، توان رواناب سطحی و شدت بارش مربوط a=۱ می‌باشد.

معیارهای کارایی و ارزیابی مدل: به منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa در تولید هیدروگراف محاسبه‌ای در مقایسه با مشاهده‌ای، معیارهای های آماری ذیل مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۲).

جدول (۲): جدول مشخصات شاخص کارایی

شاخص کارایی	رابطه مربوطه	پارامترها
انحراف مدل	$MB=\frac{\sum_{i=1}^{N}(Qs_i-Qo_i)}{\sum_{i=1}^{N}Qo_i}$	MB: انحراف مدل Qs_i و Qo_i : جریان شبیه-سازی شده و مشاهده‌ای در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه) ، N: تعداد گام‌های زمانی درطول دوره شبیه‌سازی است. (هر چقدر نزدیکتر به صفر باشد نمایانگر عملکرد خوب مدل است)
قابلیت اعتمادمدل	$CR2=\frac{\sum_{i=1}^{N}(Qs_i-\overline{Qo})^2}{\sum_{i=1}^{N}(Qo_i-\overline{Qo})^2}$	$CR2$: قابلیت اعتماد مدل $\overline{Qo}$: متوسط دبی جریان مشاهده شده طی دوره شبیه سازی (هر چقدر نزدیکتر به یک باشد نمایانگر عملکرد خوب مدل است)
ناش-ساتکلیف	$NS=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}(Qs_i-Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Qo_i-\overline{Qo})^2}$	NS : شاخص کارایی ناش- ساتکلیف که برای ارزیابی توانایی شبیه‌سازی جریان آبراهه بکار می‌رود (هر چقدر نزدیکتر به یک باشد نمایانگر عملکرد خوب مدل است) .
ناش-ساتکلیف برای ارزیابی دبی‌های کم	$NSL=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}[\ln(Qs_i+\varepsilon)-\ln(Qo_i+\varepsilon)]^2}{\sum_{i=1}^{N}[\ln(Qo_i+\varepsilon)-\overline{\ln(Q_O+\varepsilon)}]^2}$	NSL: ضریب کارایی ناش‌ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی دبی‌های پایین است(هر چقدر نزدیکتر به یک باشد نمایانگر عملکرد خوب مدل است)
ناش-ساتکیلیف برای ارزیابی دبی‌های بالا	$NSH=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}(Qo_i+\overline{Qo})(Qs_i-Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Qo_i+\overline{Qo})(Qo_i-\overline{Qo})^2}$	NSH: ضریب کارایی ناش‌ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی دبی‌های بالا است(هر چقدر نزدیکتر به یک باشد نمایانگر عملکرد خوب مدل است) .
ضریب همبستگی اصلاح شده	$r_{\mathrm{mod}}=r\times\left[\frac{\min\{\sigma_o,\sigma_s\}}{\max\{\sigma_o,\sigma_s\}}\right]$	Qo و Qs به ترتیب انحراف استاندارد زمان جریان دبی های مشاهده‌ای و شبیه سازی، r : ضریب همبستگی بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی می‌باشد و N : تعداد مشاهدات در دوره موردنظر(هر چقدر نزدیکتر به یک باشد نمایانگر عملکرد خوب مدل است).

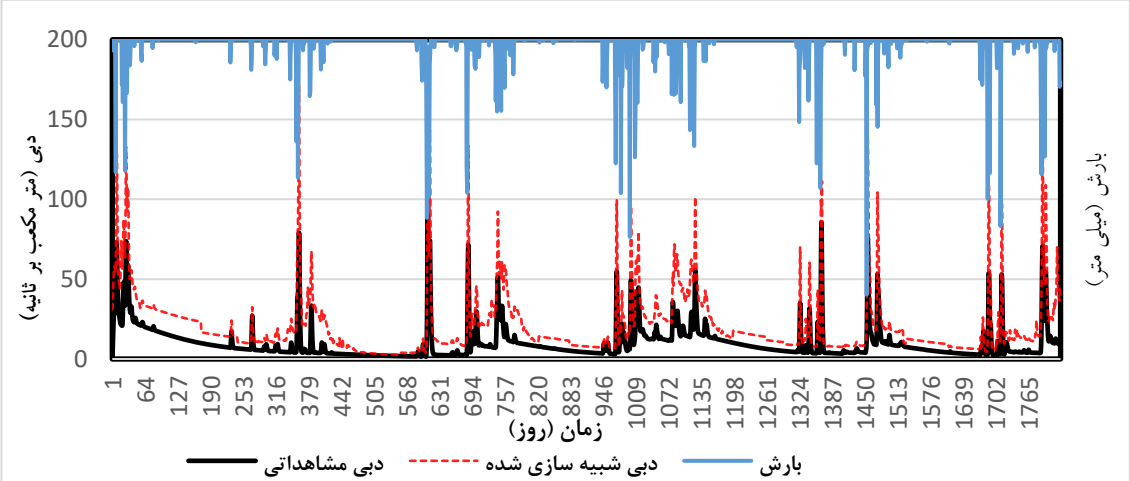
بحث و نتایج

واسنجی مدل: به منظور اصلاح عملکرد مدل و کاهش اثر عدم قطعیت‌ها برای شرایط مختلف، انجام فرایند واسنجی مدل ضروری می‌باشد. برای سهولت واسنجی مدل، ۱۱ پارامتر اصلی در مدل WetSpa انتخاب شده است. قابل ذکر است در این تحقیق برای واسنجی از روش دستی (آزمون و خطا) استفاده گردید. در این روش مدلبا مقادیری انتخابی از پارامترهای اولیه اجرا و خروجی آن با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه می‌گردد و این کار تا بهترین تطبیق بین خروجی‌ها ادامه خواهد یافت (جدول ۳).

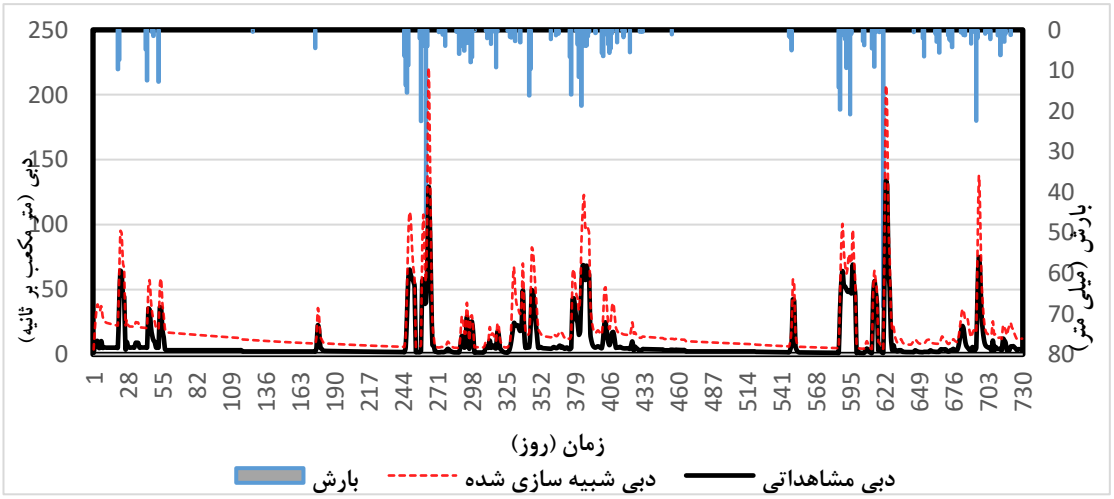
جدول (۳): مقادیر عددی واسنجی شده پارامترهای عمومی حوضه

علامت	مقدار عددی واسنجی شده	پارامتر	واحد
K_i	۰/۸۵۳۶۵۴۶	فاکتور جریان زیرسطحی	(-)
K_g	۰/۰۰۳۴۹۱۶	ضریب افت آب زیرزمینی	(h^{-1})
K_{ss}	۱/۱۵۲۱۹	رطوبت اولیه خاک	(mm)
K_{ep}	۰/۲۲۸۲۳۲	فاکتور تصحیح تبخیر و تعریق پتانسیل	(-)
G_0	۱۵۵/۶۶۴	ذخیره آب زیرزمینی اولیه	(mm)
G_{max}	۱۰۹۰/۳۳۱	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی	(mm)
T_0	۱/۰۲۵۱	ضریب درجه حرارت آستانه	(°C)
K_{snow}	۱/۰۸۲۲۱۸	ضریب روز درجه حرارت	$(mm\ °C^{-1}\ h^{-1})$
K_{rain}	۱/۶۰۰۰	ضریب روز درجه بارش	$mm\ mm\ °C^{-1}\ )\ (h^{-1}$
K_{run}	۳/۵۰	توان رواناب سطحی	(-)
P_{max}	۱۸۰۰	حداکثر شدت بارش	(mm)

اجرای مدل: پس از واسنجی مدل و تعیین مقادیر پارامترهای ورودی، مدل برای دوره اعتبارسنجی اجرا و هیدروگراف جریان شبیه سازی گردید (شکل ۵ و ۶). همانطور که قابل مشاهده است هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی تطابق خوبی با هم داشته و روند مشابهی را دنبال می‌کنند که می‌توان نتیجه گرفت کالیبراسیون مدل به‌خوبی انجام شده است.



شکل (۵): مقایسه بین جریان اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده روزانه برای دوره واسنجی برای سال‌های ۹۳-۸۹



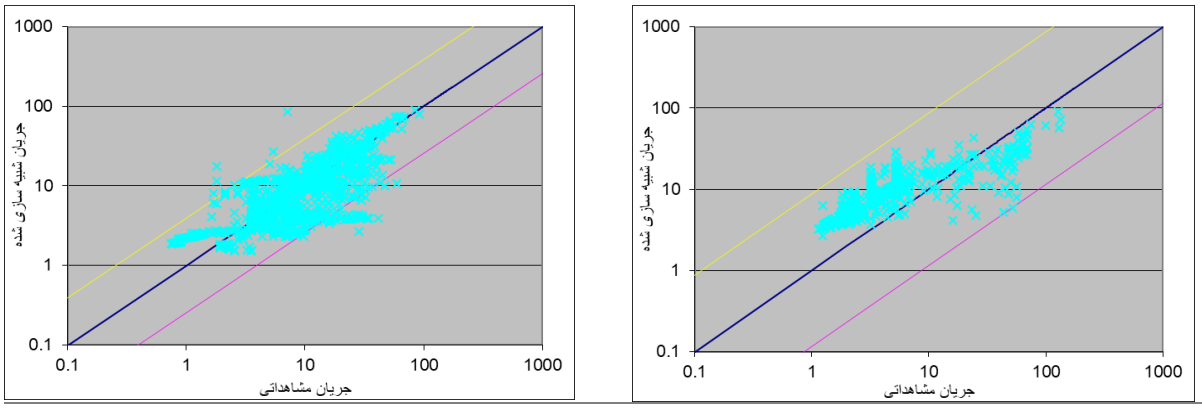
شکل(۶): مقایسه بین جریان اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده روزانه برای دوره اعتبارسنجی سال‌های ۸۸-۸۷

با توجه به جدول ۴ که مقادیر شاخص‌های کارایی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد؛ مدل توانسته به‌خوبی با معیار ناش ساتکلیف ۰/۶۰ و ۰/۵۸ درصد به ترتیب در دوره واسنجی و اعتبارسنجی، الگوی تغییرات رواناب منطقه مطالعاتی را شبیه‌سازی کند. در این منطقه معیار ناش-ساتکلیف در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی برای جریان‌های کم به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۴۳ و برای جریان‌های زیاد به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۸ درصد برآورد شده است که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل است.

شاخص کارایی	واسنجی	اعتبارسنجی
بایس (انحراف مدل برای تعادل حجم جریان)	-۷/۱۳	-۷/ ۹۹
معیار ناش -ساتکلیف	۶۰/۱۲	۵۸/۷۸
معیار ناش -ساتکلیف برای جریان‌های زیاد	۶۹/۰۶	۶۸/۲۸
معیار ناش -ساتکلیف برای جریان‌های کم	۶۱/۵۸	۴۳/۰۰
ضریب همبستگی اصلاح شده	۷۹/۶۸	۶۳/۹

جدول (۴): مقادیر شاخص های کارایی مدل در دوره واسنجی و ارزیابی

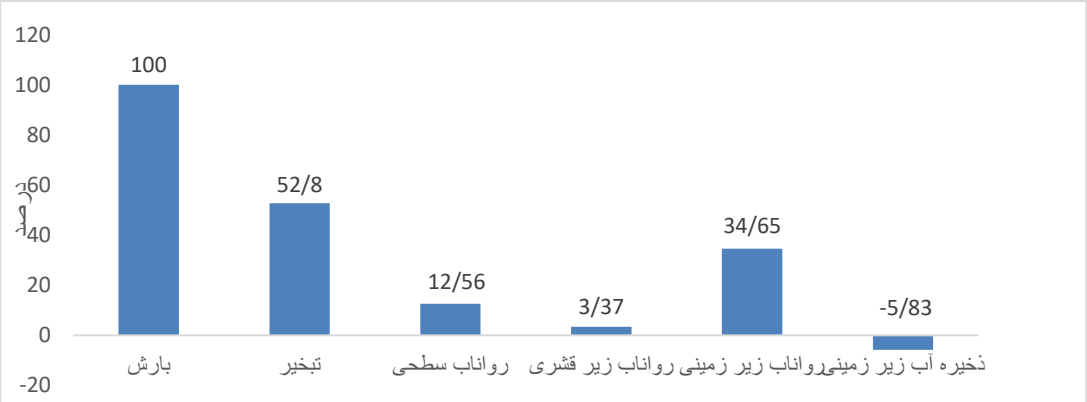
به‌منظور نمایش بهتر کارایی مدل در شکل ۷ پراکنش لگاریتمی ابر نقاط جریان شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای طی دوره واسنجی و اعتبارسنجی به نمایش گذاشته شده است. همانطور که در این دو گراف مشاهده می‌گردد، علت پایین بودن ضریب ناش-ساتکلیف برای جریان‌های کم را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود. دسته اول علل کلی می‌باشند که می‌توان آن‌ها را به مدل و فرضیات آن‌ها نسبت داد. از این دسته می‌توان به ساده‌سازی مدل در مورد آب زیرزمینی اشاره نمود. مدل WetSpa برای محاسبه آب زیرزمینی از یک روش ساده به نام مخزن خطی استفاده می کند، که جریان آب زیرزمینی را در سطح زیر حوضه‌های کوچک تعیین کرده و قادر نیست توزیع مکانی آب زیرزمینی را محاسبه نماید. هم‌چنین تخمین نامناسب تبخیر از سفره-های آب زیرزمینی طی دوره‌های خشک را می‌توان از علل مربوط به این گروه دانست. دسته دوم علل را می‌توان به شرایط موجود در حوضه‌آبخیز فارسان- بهشت‌آباد مرتبط دانست. از این دسته نیز می‌توان یکی به برداشت آب پایه در تابستان برای کارهای زراعی و هم‌چنین وجود مخازن کوچک در پایین دست جریان اشاره نمود. زیرا در مدل WetSpa تاثیر دریاچه‌ها و مخازن بر دبی جریان در نظر گرفته نمی‌شود.



الف) نمایش لگاریتمی در مرحله واسنجی ب) نمایش لگاریتمی در مرحله اعتبارسنجی

شکل (۷): نمایش لگاریتمی ابرنقاط دبی مشاهده‌ای در مقابل دبی شبیه سازی شده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با حدود اطمینان ۹۵ درصد

بیلان آب: یکی از اهداف مدل WetSpa شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه می باشد. شکل ۸ بیلان آبی محاسبه شده توسط مدل، را برای دوره واسنجی نشان می دهد. مطالعات بیلان آبی حوضه برای بررسی تغییرات آبی سیستم هیدرولوژیکی و هم‌چنین به عنوان وسیله‌ای برای تعیین کارایی مدل می‌باشد، که با توجه به نتایج شبیه-سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین می‌گردد. بررسی نتایج بیلان آبی حاصل از مدل WetSpa در حوضه نشان می‌دهد که ۲/۴۵٪ از بارش توسط تاج پوشش گیاهان جذب شده، ۵۲/۸٪ از طریق تبخیر به اتمسفر بر می‌گردد، ۵/۸۳-٪ تغذیه آب زیرزمینی می‌گردد و ۵۰/۵۸٪ به رواناب تبدیل می‌شود که از این مقدار ۱۲/۵۶٪ رواناب سطحی، ۳/۳۷٪ رواناب زیرسطحی و ۳۴/۶۵٪ جریان آب زیرزمینی را شامل می‌شود. قابل ذکر است این یافته‌ها با توجه به اطلاعات موجود راجع به خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه منطقی به نظر می‌رسد.



شکل (۸): مولفه‌های بیلان آبی شبیه‌سازی شده (درصد) نسبت به بارندگی سال‌های ۹۳-۸۹

نتیجه گیری

نتایج حاصل از مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مدل به‌خوبی قادر به اداره فرایندهای هیدرولوژیکی، در شرایط گوناگون توپوگرافی، خاک، کاربری، مساحت و غیره بوده و در این زمینه از توانایی بالایی برخوردار است. در این مطالعه نیز مدل برای حوضه آبریز فارسان-بهشت آباد آزمون گردید. دقت شبیه‌سازی بر طبق شاخص ناش-ساتکلیف حدود ۶۰ درصد در دوره واسنجی و ۵۸ درصد در دوره اعتبارسنجی تعیین گردید که گویای همخوانی بالای هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای می‌باشد. طبق مطالعه Porretta et al. (2011) ضریب ناش-ساتکلیف بین ۰/۶۵ – ۰/۵۰ درصد نشان‌دهنده عملکرد خوب و مقادیر ۰/۶۵ – ۰/۸۵ برای این ضریب بیانگر عملکرد خیلی خوب مدل است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت که مدل با دقت قابل قبولی می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان رودخانه مورد استفاده قرار گیرد و از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است. معیار ناش-ساتکلیف در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی برای جریان‌های زیاد به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۸ درصد و جریان‌های کم به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۴۳ برآورد گردید که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل می‌باشد.

مطالعات بیلان آبی حوضه برای بررسی تغییرات آبی سیستم هیدرولوژیکی و هم‌چنین به عنوان وسیله‌ای برای تعیین کارایی مدل می‌باشد که بررسی نتایج بیلان آبی حاصل از مدل wetSpa در حوضه نشان می‌دهد که ۲/۴۵ درصد از بارش توسط تاج پوشش گیاهان جذب شده، ۵۲/۸ درصد از طریق تبخیر به اتمسفر بر می‌گردد، ۵/۸۳- درصد تغذیه آب زیرزمینی می‌گردد و ۵۰/۵۸ درصد به رواناب تبدیل می‌شود که از این مقدار ۱۲/۵۶ درصد رواناب سطحی، ۳/۳۷ درصد رواناب زیرسطحی و ۳۴/۶۵ درصد جریان آب زیرزمینی را شامل می‌شود. نتایج محاسبه شده درستی و صلاحیت شبیه‌سازی جریان روزانه را توسط مدل WetSpa نشان می‌دهد که این موارد با نتایج تحقیقات Chormanski et al. (2011) و Bahremand et al. (2005) و Safari et al. (2012) مطابقت دارد.

منابع

پژوهش م، طهماسبی ط و عبدالهی خ (۱۳۹۷). شبیه سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل WetSpa. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۸ (۴): ۴۶-۳۰.

سورشجانی خ، میرعباسی ر و نصراصفهانی م (۱۳۹۵). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa با رویکرد احتمالی و تحلیل عدم قطعیت. ۷ (۲۵): ۹۴-۷۶.

زینی‌وند ح (۱۳۸۹). شبیه‌سازی توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب در مقیاس حوزه آبخیز. مجموعه مقالات ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس.

شریفی ف، بزرگ حداد الف و علیمحمدی س (۱۳۸۴). پیش بینی جریان با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده شهید باهنر کرمان.

مرادی‌پور ش، بهره مند ع، زینی وند ح و نجفی‌نژاد علی (۱۳۹۰). شبیه‌سازی بیلان آبی در مقیاس حوزه آبخیز با استفاده از مدل هیدرولوژیکی -توزیعی و GIS. مجموعه مقالات هفتمین همایش ملّی علوم و مهندسی آبخیزداری گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان.

مرادی‌پور ش، بهره مند ع، زینی وند ح و نجفی‌نژاد علی (۱۳۹۰). شبیه‌سازی توزیعی- مکانی سیل با مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوزه آبخیز طالقان. مجموعه مقالات هفتمین همایش ملّی علوم و مهندسی آبخیزداری گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان.

مهندسین مشاور یکم(۱۳۹۷). مطالعات طرح جامع احیاء و توسعه کشاورزی و منابع طبیعی حوضه آبخیز شمالی رودخانه کارون، معاونت برنامه و بودجه وزارت جهاد کشاورزی.

شرکت مهندسین مشاور جاماب (۱۳۷۸) طرح جامع آب کشور حوضه آبریز کارون و دز، وزارت نیرو، سازمان مدیریت منابع ایران.

نجفی م ر (۱۳۸۱). سیستم‌های هیدرولوژیکی مدل‌سازی بارش -رواناب، وی پی سینگ. انتشارات دانشگاه تهران، جلد اول.

Azin Mehr M and Bahremand, A (2015). Simulation of the effect of land use change scenarios on Dinour watershed hydrograph using WetSpa Distributed-Hydrological Hydrological Model. Scientific Journal of Watershed Engineering and Management, 7: 500-510.

Azizi M, Mohajerani and Akhavan M (2018). Simulating and Prediction of Flow Using by WetSpa Model in Ziyarat River Basin. Jornal of Geology. 3:424-843.

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, van Beek and Taal. Taylor- Francis Group, London, pp, 67-74.

Chormanski, J. and Batelaan و O) 2011) .Application of the WetSpa distributed hydrological model for catchment with significant contribution of organic soil. Upper Biebrza case study. Land Reclamation 43(1): 25-35

De Smedt F (1997). Development of a continuous model for sewer system using MATLAB, MSc. Thesis, Laboratory of Hydrology, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Kabir A, Mahdavi M, Bahremand A and Noora N (2011). Application of a geographical information system (GIS) based hydrological model for flow prediction in Gorganrood river basin, Iran, African. Journal of Agricultural Research, 6(1): 35-45.

Legzaeiyan Pour Gh, MohammadRezaPour A and Malmir M (2016). Assessment of the effects of climate change on the amount of runoff of the Nazlochai River in the Orumieh Lake Basin, Geography and Development Magazine, 42: 183-198.

Liu YB, 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.

Liu YB (2004). Development and application of a GIS-based hydrologicl model for flood prediction and watershed managemen , phD Thesis, VrijeUniversiteitBrussel Belgium.

Liu YB and De Smedt F (2005a). Flood Modeling for Complex Terrain Using GIS and Remote Sensed Information. Water Resources Management, 19(5): 605–624.

Liu YB, Batelaan O, De Smedt F, Hong NT and Tam VT (2005b). Test of distributed modeling approach to predict flood flows in the karst suoimuoi catchment in Vietnam. Environmental Geology, 48(7): 931-940.

Liu YB, Corluy JYB, Bahremand A, De Smedt F, Poorova j and Velcicka L (2006). Simulation of runoff and phosphorus transport in a carpathian catchment. Slovakia; river research and Applications gournal, 22: 1009–1022.

Mohammady M, Moradi H, Zeinivand H, Temme A, Yazdani M and Pourghasemi H (2018). Modeling and assessing the effects of land use changes on runoff generation with the CLUE-s and WetSpa models, 133:459-471.

Porretta-Brandyk, L, Chormanski, J, Andrzej Brandyk, A and Okruszko, T (2011). Automatic Calibration of the WetSpa Distributed Hydrological Model for Small Lowland Catchments. Geoplanet: Earth and Planetary Sciences, 43-62.

Safari, A, De Smedt, F, Moreda, F (2012). WetSpa model application in the distributed model intercomparison Project (DMIP2), Journal of Hydrology, Volume 418- 419, pp 78-89.

Wang Zhong-Min, Batelaan O and De Smedt F (1996). A distributed model for water and energy transfer between soil plants and atmosphere (WetSpa). Physics and Chemistry of the Earth, 21(3):189-193.

Zeinivand H and De Smedt F (2010). Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach. Natural Hazards, 54(2): 451-468

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, and Mazandaran. (In Persian).

Zeinivand H (2009). Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, Soil erosion, and sediment transport,

2009, Ph.D thesis, Faculty of engineering, Vrije Universiteit Brussel, 238p.

Zeinivand H and De Smedt F (2009). Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment transport at watershed scale. World Environmental and Water Resources Congress (EWRI), 60: 17-21.

Zeinivand H and De Smedt F (2009). Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach. Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, 54(2): 451-468.

Simulation of Runoff rainfall Using WetSpa Model in Behesht Abad Watershed

Mahsa Habibi[1], Shahla Paimozd[2]*, Mahnoosh Moghaddasi[3]

Abstract

The great importance of modeling the rainfall-runoff process from the perspective of water resources engineering, river engineering, flood control structures and flood storage led researchers to use simulation models as a tool to analyze and evaluate the behavior of the basin. So, in this study WetSpa model was used to simulate rainfall hydrograph flow in Beheshtabad basin. For this purpose, using hydrological and meteorological daily data of during the years 2008-2014, DEM, land use and soil texture were simulated runoff. It is noteworthy that from this statistical period, five years of 2008-2012 have been considered for calibration and the second two years of 2013-2014 have been considered for validation of the model. The simulation results show that the WetSpa model in the watershed is able to predict daily hydrographs with good accuracy and Nash Sutcliffe coefficient of 60.12%. In addition, the results show that the model of hydrological components and factors is accurately estimated and is effective for calculating daily flow rate.

Keywords: Prediction of flood hydrograph, Beheshtabad Watershed, Modeling of rainfall-runoff process,WetSpa hydrological model

[1]M.Sc. Graduate of Water Engineering, Department of Water Engineering, Arak University.Email: ahsan_habibi@yahoo.com.
[2]*Assistant Professor and Corresponding author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. Eamil: paimozd.ar@hotmail.com.
[3]Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. Email: mah_moghaddasi@hotmail.com.

Research Paper

Simulation of Runoff rainfall Using WetSpa Model in Behesht Abad Watershed

Mahsa Habibi [1], Shahla Paimozd*[2], Mahnoosh Moghaddasi[3]

[1]M.Sc. Graduate of Water Engineering, Department of Water Engineering, Arak University.Email:ahsan_habibi@yahoo.com.
[2]*Assistant Professor and Corresponding author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. Eamil:paimozd.ar@hotmail.com.
[3]Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. Email: mah_moghaddasi@hotmail.com.

10.22125/IWE.2021.268718.1472

Received:
January.36.2021
Accepted:
June.14.2021
Available online:
June.01.2022

Keywords:
Prediction of flood hydrograph, Beheshtabad Watershed, Modeling of rainfall-runoff process,WetSpa hydrological model ….

Abstract

The great importance of modeling the rainfall-runoff process from the perspective of water resources engineering, river engineering, flood control structures and flood storage led researchers to use simulation models as a tool to analyze and evaluate the behavior of the basin. So, in this study WetSpa model was used to simulate rainfall hydrograph flow in Beheshtabad basin. For this purpose, using hydrological and meteorological daily data of during the years 2008-2014, DEM, land use and soil texture were simulated runoff. It is noteworthy that from this statistical period, five years of 2008-2012 have been considered for calibration and the second two years of 2013-2014 have been considered for validation of the model. The simulation results show that the WetSpa model in the watershed is able to predict daily hydrographs with good accuracy and Nash Sutcliffe coefficient of 60.12%. In addition, the results show that the model of hydrological components and factors is accurately estimated and is effective for calculating daily flow rate.

1. Introduction

Predicting the performance of a complex system and examining the effect of changes on the performance of the primary target system is a simulation model (Najafi, 2002). In fact, the basis of physical hydrological distribution models is our understanding of the physics of hydrological processes that control watershed-reaction and use physical equations and relationships to describe these processes. Therefore, these models can be used for any region (Zinivand, 2010).

2. Materials and Methods

In this research, the three main maps used are topography, land use and soil texture at the scale of 1/10000. Other hydrological parameters required in the model are also prepared based on these three maps (Figure 2). The digital model map is 10 meters high from the topographic map. The spatial and elevation resolution of the DEM should be sufficient to be able to accurately determine the information required by the basin that affects its hydrological behavior. After filtering the initial information and eliminating the error values, the slope, slope direction, flow direction, flow length and flow accumulation are determined for each cellular network. Land use information is another important input of the WetSpa model. Land use refers to the type of basin surface cover that includes any vegetation, litter, surface water such as lakes and swamps as well as impermeable surfaces such as roads and residential areas. The designated soil coding system in the WetSpa model is based on the soil texture classification triangle, which is determined by the USDA percentage of clay, silt and sand. Soil information in the geological map determines the soil type of the basin. Therefore, in order to prepare the data, the original soil map should be converted into a raster map with WetSpa model geological codes.

3. Results

The results of previous studies show that the model is well able to manage hydrological processes in various conditions of topography, soil, land use, area, etc. and has a high ability in this field. In this study, the model for Farsan-Beheshtabad catchment was tested. The simulation accuracy according to the Nash-Sutcliffe index was about 60% in the calibration period and 58% in the validation period, which indicates the high consistency of the computational and observational hydrographs. According to a study by Porretta et al. (2011) Nash-Sutcliffe coefficient between 0.65 - 0.50% indicates good performance and values of 0.65 - 0.85 for this coefficient indicate very good performance of the model. Based on these results, it can be said that the model with acceptable accuracy can be used to simulate river flow and has high reliability. The Nash-Sutcliffe criterion in the calibration and validation stages for high currents was 0.69 and 0.68%, respectively, and low currents were 0.61 and 0.43%, respectively, which indicates the acceptable performance of the model. Basin water balance studies to investigate water changes in the hydrological system as well as a tool to determine the efficiency of the model

4. Discussion and Conclusion

The final results of WetSpa water balance results in the basin show that 2.45% of rainfall by the canopy The uptake of adsorbed plants, 52.8% is returned to the atmosphere through evaporation, 5.83% is fed to groundwater and 50.58% is converted to runoff, of which 12.56% is runoff. Surface contains 3.37% of groundwater runoff and 34.65% of groundwater flow. The calculated results show the accuracy and competence of daily flow simulation by WetSpa model, which is in line with the results of research by Chormanski et al. (2011) and et al. (2005) Bahremand and Safari et al. (2012) is consistent.

5. Six important references

1. Wang Zhong-Min, Batelaan O and De Smedt F (1996). A distributed model for water and energy transfer between soil plants and atmosphere (WetSpa). Physics and Chemistry of the Earth, 21(3):189-193.
2. Liu YB, 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
3. Liu YB (2004). Development and application of a GIS-based hydrologicl model for flood prediction and watershed management, phD Thesis, VrijeUniversiteitBrussel Belgium

4. Liu YB and De Smedt F (2005a). Flood Modeling for Complex Terrain Using GIS and Remote Sensed Information. Water Resources Management, 19(5): 605–624.
5. Liu YB, Batelaan O, De Smedt F, Hong NT and Tam VT (2005b). Test of distributed modeling approach to predict flood flows in the karst suoimuoi catchment in Vietnam. Environmental Geology, 48(7): 931-940.
6. Liu YB, Corluy JYB, Bahremand A, De Smedt F, Poorova j and Velcicka L (2006). Simulation of runoff and phosphorus transport in a carpathian catchment. Slovakia; river research and Applications gournal, 22: 1009–1022.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.