



مدل سازی توزیعی و دینامیک بیلان آب حوزه آبخیز چهل چای در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی

واحدبردی شیخ^۱، عبدالجلیل حزبی^۲ و عبدالرضا بهره‌مند^۳

۱- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، (نویسنده مسؤل: v.sheikh@yahoo.com)

۲ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۱

چکیده

مدل سازی فرآیندهای هیدرولوژی اطلاعات مناسبی را برای مدیریت آبخیزها فراهم کرده، دید بهتر و جامع‌تری نسبت به آبخیزها ایجاد می‌نماید. در این تحقیق بیلان آب و جریان خروجی حوزه آبخیز چهل چای در محیط GIS و برنامه نویسی PCRaster مدل سازی گردید. عوامل و پارامترهای دخیل در بیلان آب شامل بارش، ذوب برف، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، رواناب سطحی ناشی از بارش، آب پایه و جریان زیرقشری در نظر گرفته شده و با استفاده از روابط موجود بیلان آب مدل سازی گردیده و دبی خروجی روزانه حوزه از مجموع دبی رواناب، جریان زیرقشری و آب پایه به دست آمد. فرآیند واسنجی مدل برای دوره آماری (۸۷-۱۳۸۶) انجام گرفت. فرآیند اعتبارسنجی مدل با استفاده از یک دوره آماری سه ساله از ۸۴-۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ انجام گردید. نتایج به دست آمده از مدل سازی با داده‌های دبی مشاهداتی ثبت شده در خروجی حوزه مورد ارزیابی قرار گرفتند. ضریب نش- ساتکلیف برای دوره واسنجی ۰/۷ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۵ به دست آمد. با توجه به اینکه مقدار ضریب نش- ساتکلیف هر دو دوره بالاتر از ۰/۳۶ می‌باشد، می‌توان گفت که مدل از کارایی مطلوب و قابل قبولی برخوردار است. با توجه به مناسب بودن شبیه‌سازی جریان خروجی، مولفه‌های بیلان آب حوزه به تفکیک محاسبه و ارائه گردید. مدل توسعه داده شده ضریب آبدهی کل سالانه حوزه را برای دوره واسنجی ۱۹/۱٪ به دست آورد در حالیکه مقدار مشاهده شده آن در این دوره ۲۲ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی هیدرولوژیک، واسنجی، اعتبارسنجی، بیلان آب، PCRaster

مقدمه

وجود یک مدل دینامیک و توزیعی این امکان را به محققین و کارشناسان می‌دهد تا بسیاری از مسائل هیدرولوژی و مدیریتی را در یک حوزه مورد بررسی قرار دهند (۱۲). مدل‌های دینامیک قادر به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و تغییر اقلیم در حوزه می‌باشند. یک مدل منطقه‌ای که با توجه به شرایط محلی ساخته می‌شود می‌تواند ابزار مناسبی را برای شبیه‌سازی خصوصیات منحصر به فرد آن منطقه فراهم کند (۳۵). علیرغم وجود مدل‌های متعدد در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز، احساس نیاز به یک مدل منطقه‌ای برای کمک به تحلیل مسائل مطالعاتی و مدیریتی کشور باعث گردید تا در این تحقیق در حوزه آبخیز چهل چای اقدام به مدل سازی توزیعی و دینامیک بیلان آب و شبیه‌سازی جریان خروجی حوزه گردد. برای مدل سازی بیلان آب و جریان خروجی از محیط PCRaster استفاده گردید.

با توجه به اهمیت مطالعه و شبیه‌سازی فرآیندهای بیلان آب حوزه‌های آبخیز، مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی بیلان آب حوزه‌های آبخیز توسعه و بکار برده شده‌اند. در ابتدا تمام مدل‌های ارائه شده یکپارچه بودند

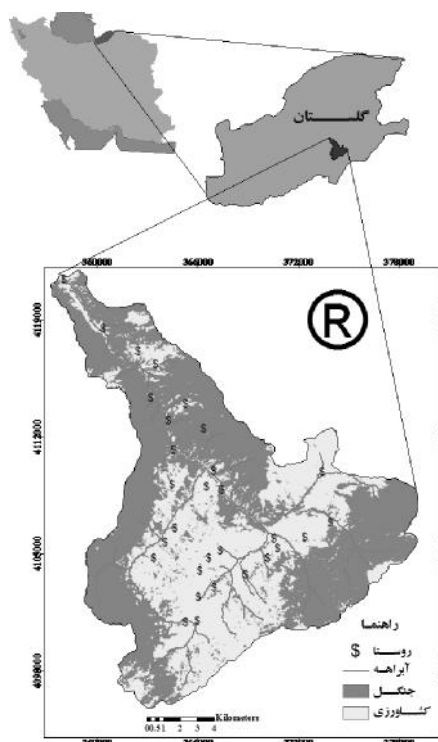
و سپس مدل‌های نیمه توزیعی توسعه یافته و اکنون نیز بدلیل فراهم شدن سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی اکثر مدل‌ها بصورت کاملاً توزیعی توسعه داده می‌شوند (۲۷). یکی از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی که با هدف فراهم آوردن محیط مدل سازی توزیعی دینامیک محیط زیستی ارائه شده است محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و برنامه نویسی PCRaster می‌باشد که با استفاده از آن تعدادی از مدل‌های هیدرولوژیکی از جمله LISFLOW (۳۲)، LISEM (۷)، LISFLOW (۱۴)، BEACH (۲۸) و PCR_GLOBWB (۳۰) توسعه داده شده‌اند. ون دیورسن و کوادیک (۳۲) برای شبیه‌سازی تغییرات مولفه‌های بیلان آب رودخانه راین مدل RHINEFLOW را توسعه دادند. این مدل با استفاده از PCRaster و در مقیاس زمانی ماهانه و در شبکه‌های سلولی ۳×۳ کیلومتر ساخته شد. کاربرد این مدل برای رودخانه راین و سرشاخه‌های آن نشان داد که علیرغم سادگی رویکرد بکار گرفته شده، نتایج شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. به‌طوریکه معیار ارزیابی ناش- ساتکلیف، کارایی مدل در تخمین رواناب بین ۰/۷ الی ۰/۸۵ متغیر بوده است. دی رو (۷) مدل هیدرولوژی و فرسایش خاک LISEM را با کمک

(۵) جهت روندیابی الگوریتم رواناب سطحی و مدل‌سازی تشکیل گالی‌ها و ژائو و همکاران (۳۶) در زیرحوزه ژئوتیالو که از مهم‌ترین زیرحوزه‌های حوزه آبخیز تای‌هو در جنوب شرق چین است برای مدل‌سازی منشایی منبع آلودگی رسوب از زبان برنامه‌نویسی PCRaster استفاده کردند و همگی بر سهولت کار، قابلیت بالای مدل‌سازی دینامیک و کارآمدی سیستم اطلاعات جغرافیایی و برنامه‌نویسی PCRaster تاکید کرده‌اند.

مواد و روش‌ها

حوزه مورد تحقیق از حوزه‌های کوهستانی کشور با وسعت ۲۵۶۸۳ هکتار می‌باشد که در بین ۲۳° ۵۵ تا ۳۸° ۵۵ طول شرقی و ۵۹° ۳۶ تا ۱۳° ۳۷ عرض شمالی واقع شده است. این حوزه از لحاظ تقسیمات سیاسی در محدوده شهرستان مینودشت قرار گرفته و یکی از زیر حوزه‌های بزرگ حوزه آبخیز گرگانود می‌باشد. حداقل ارتفاع از سطح دریا ۱۳۵ متر و حداکثر ارتفاع آن ۱۹۳۰ متر می‌باشد. بارش سالانه منطقه حدود ۷۶۵ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین دبی رودخانه ۲/۱۳ مترمکعب بر ثانیه است. بررسی و تحلیل آمار هیدرومتری حوزه نشان می‌دهد که آبدهی رودخانه چهل‌چای از مهر تا فروردین افزایش می‌یابد به طوری که حداکثر آبدهی در فروردین ماه اتفاق می‌افتد سپس آبدهی از اردیبهشت و خرداد تدریجاً کاهش ادامه یافته و در ماه‌های تابستان به حداقل خود می‌رسد. آبراهه‌های اصلی حوزه آبخیز چهل‌چای با جهت کلی جنوب به شمال نزولات جوی را جمع‌آوری می‌کنند. ۵۱٪ از مساحت حوزه را کاربری جنگل و ۴۹٪ باقی مانده را کاربری زراعت تشکیل می‌دهد. در این حوزه آبخیز ۳۰ روستای مسکونی وجود دارد. این مسئله همراه با رشد جمعیت و افزایش نیاز غذایی و نیاز به شغل و درآمد باعث هجوم روستاییان به اراضی جنگلی و گسترش بی‌رویه زراعت در حوزه شده است. زراعت در اراضی با شیب تند یکی از معضلات حوزه می‌باشد که باعث افزایش شدید سیل‌خیزی و فرسایش خاک در حوزه شده است.

بسته نرم‌افزاری PCRaster برای شبیه‌سازی فرسایش خاک در اراضی تپه ماهوری لسی جنوب هلند بکار بردند. مدل لیسیم یکی از اولین نمونه‌های مدل شبیه‌سازی فرسایش خاک با مبنای فیزیکی است که دینامیک رواناب و فرسایش خاک را در طول وقایع رگباری بصورت توزیعی مکانی شبیه‌سازی می‌کند و در خروجی حوزه آبخیز هیدروگراف سیل و سدیگراف (رسوب گراف) را ترسیم می‌کند. این مدل پس از توسعه در کشورهای مختلفی از جمله چین (۱۰)، نروژ (۳۱) و ایران (۱۱) بکار برده شد و نتایج رضایت بخشی ارائه کرده است. مدل LISFLOOD یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی باشد که برای پیش‌بینی سیلاب‌ها، ارزیابی اثرات اقدامات مدیریتی، تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی روی رژیم هیدرولوژیکی آبخیزها توسط مرکز تحقیقات مشترک^۱ کمیسیون اروپایی توسعه یافته است (۱۴). برای توسعه این مدل از قابلیت‌های زبان برنامه‌نویسی PCRaster و پایتون استفاده شد. مدل بیلان آب جهانی PCR_GLOBWB یک مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس دیگر می‌باشد که با هدف شبیه‌سازی روزانه بیلان آب خشکی‌های سیار زمین در مقیاس شبکه سلولی ۵۰×۵۰ کیلومتر در محیط PCRaster توسط گروه جغرافیای فیزیکی دانشگاه یوتراخت هلند طراحی و تدوین شده است (۳۰). شیخ و همکاران (۲۸) مدل شبیه‌سازی BEACH را در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و برنامه‌نویسی PCRaster با هدف تولید نقشه‌های روزآمد رطوبت خاک توسعه دادند. این مدل توزیعی مکانی که در مقیاس روزانه اجرا می‌شود با استفاده از نقشه‌های پایه خاک، توپوگرافی و کاربری اراضی و داده‌های هواشناسی روزانه، بیلان آب هر یک از شبکه‌های سلولی را شبیه‌سازی نموده و نقشه هر کدام از مولفه‌های بیلان آب از جمله نقشه رطوبت خاک را تولید می‌کند. اکثر مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب تک‌رخداد^۲ نقشه رطوبت خاک را به عنوان یکی از ورودی‌های اساسی نیاز دارند. فال و فال (۸) جهت مدل‌سازی دینامیک مناظر طبیعی، کانتون و همکاران (۴) در آلمریای اسپانیا در تحقیق خاکشناسی-ژئومورفولوژیکی خود جهت تهیه بخشی از نقشه‌های مورد نیاز خود، چاپلوت و همکاران



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز چهل چای

آماده سازی داده‌های ورودی

گردآوری اطلاعات حوزه آبخیز چهل چای و لایه‌های اطلاعاتی لازم که شامل نقشه‌ها، آمار و اطلاعات می‌باشند اولین اقدام جهت مدل‌سازی حوزه می‌باشد. اطلاعات، نقشه‌های پایه و آمار هیدروکلیماتولوژی حوزه آبخیز چهل چای مورد نیاز جهت انجام تحقیق و فرآیند مدل‌سازی از ایستگاه‌های هواشناسی لزوره و نراب، ایستگاه‌های باران سنجی قلعه‌قافه و دوزین و ایستگاه هیدرومتری لزوره گردآوری شدند.

مراحل مدل‌سازی

پس از جمع‌آوری نقشه‌ها و آمار و اطلاعات لازم، مدل مفهومی بیلان آبی تدوین گردید (شکل ۲). در سطح زمین قسمتی از ریزش‌های جوی به وسیله شاخ و برگ گیاهان نگهداری می‌شود، مقداری از آن در خاک نفوذ می‌کند. اندکی از این آب توسط ریشه‌های گیاهان جذب می‌گردد و بخشی از آن از دسترس ریشه‌های گیاهان خارج شده و در اعماق خاک جریان می‌یابد و آب‌های زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. در نهایت قسمت بیشتری از آب حاصل از ریزش‌های جوی بعد از اشباع کردن قشر سطحی خاک به صورت جویبارهای کوچک در سطح زمین جریان یافته و بعد از به هم پیوستن جریان آبراهه‌ها را تشکیل می‌دهند (۲۹). آب نفوذ یافته در خاک به دو قسمت تقسیم می‌شود، بخشی

معرفی PCRaster

عده‌ای از محققین دانشگاه یوترخت^۱ هلند یک سیستم اطلاعات جغرافیایی رستری را با نام PCRaster توسعه دادند که شامل مجموعه‌ای از ابزارهای کامپیوتری جهت ذخیره، مدیریت، تجزیه و تحلیل و بازیابی اطلاعات جغرافیایی است که امکان مدل‌سازی کارتوگرافیک و دینامیک عرصه‌های طبیعی را برای محققان و کارشناسان رشته‌های علوم محیطی که اکثراً تخصص برنامه‌نویسی کامپیوتری را ندارند، فراهم نماید. PCRaster یک محیط GIS و یک زبان برنامه‌نویسی سطح بالا برای مدل‌سازی دینامیک زیست محیطی است (۱۲). در حالی‌که سایر محیط‌های GIS پرکاربرد مثل ArcView و ArcGIS استاتیک می‌باشند، قابلیت دینامیک محیط PCRaster امکان ساخت مدل‌های دینامیک زیست محیطی توزیعی پیوسته^۲ را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار یک بسته غنی از توابع ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی است که آن را از دیگر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی متمایز می‌کند. این توابع شامل آنالیز قابلیت دید^۳، آنالیز حوزه آبخیز^۴ و روندیابی انتقال مواد (آب و رسوب) در داخل حوزه آبخیز است. علاوه بر اینها همانند دیگر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، توابع جبری^۵ نیز بسادگی روی نقشه‌ها قابل اعمال هستند (۲۱).

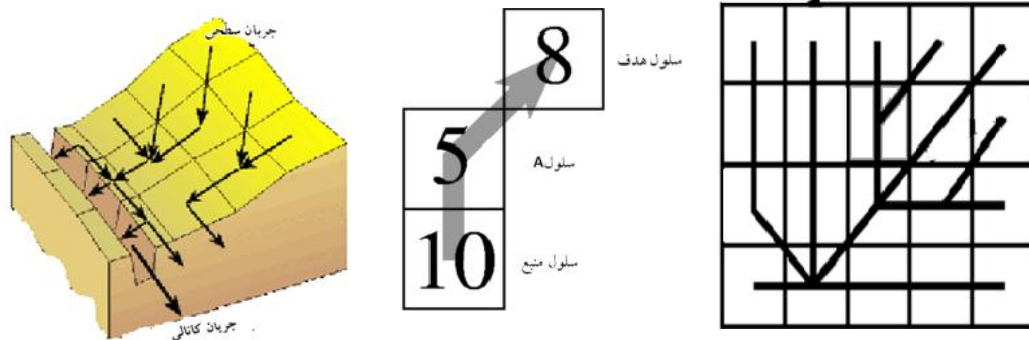
1- Utrecht
4- Watershed analysis

2- Iterative spatio-temporal environmental models
5- Algebraic functions

3- Visibility analysis

بارندگی که نفوذ نمی‌کند در سطح خاک جریان می‌یابد. برای محاسبه جریان سطحی از روش SCS استفاده می‌گردد که در محاسبه میزان تلفات آب ذخیره چالایی نیز در نظر گرفته می‌شود. رواناب تشکیل شده روی سطح در امتداد شیب دامنه‌ها به سمت پایین و به طرف آبراهه‌ها و رودخانه حرکت می‌کند و جریان آبراهه‌ای را تشکیل می‌دهد. برای تعیین مسیر حرکت آب روی دامنه‌ها و آبراهه‌ها رویکردهای مختلفی وجود دارد که در این مطالعه از روش و دستور LDD¹ در محیط PCRaster که از رویکرد انتقال رواناب یک سلول، فقط به یک سلول مجاور در پایین دست که دارای بیشترین شیب بین سلول مبدا و سلول مقصد می‌باشد، استفاده گردید (شکل ۲).

از آن به صورت رطوبت خاک سطحی در افق بالایی خاک می‌ماند و بخشی دیگر نیز به اعماق نفوذ می‌کند. رطوبت خاک سطحی در معرض تبخیر و تعرق قرار می‌گیرد. با توجه به این که در منطقه مورد مطالعه داده‌های عناصر جوی از جمله رطوبت نسبی، سرعت باد و تشعشعات خورشیدی موجود نبوده و فقط داده‌های درجه حرارت موجود بود برای برآورد تبخیر و تعرق روزانه از روش هارگریوز- سامانی استفاده گردید. آنچه که به عنوان تاثیر رطوبت پیشین خاک در ایجاد رواناب شناخته می‌شود در اصل همین بیلان و تبادل رطوبتی سطح خاک است. اینکه رطوبت خاک چه مقدار است و ظرفیت نفوذ آن چقدر می‌باشد به میزان آب ورودی، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق بستگی دارد. تبخیر و تعرق باعث افزایش ظرفیت رطوبتی خاک می‌شود. بخشی از



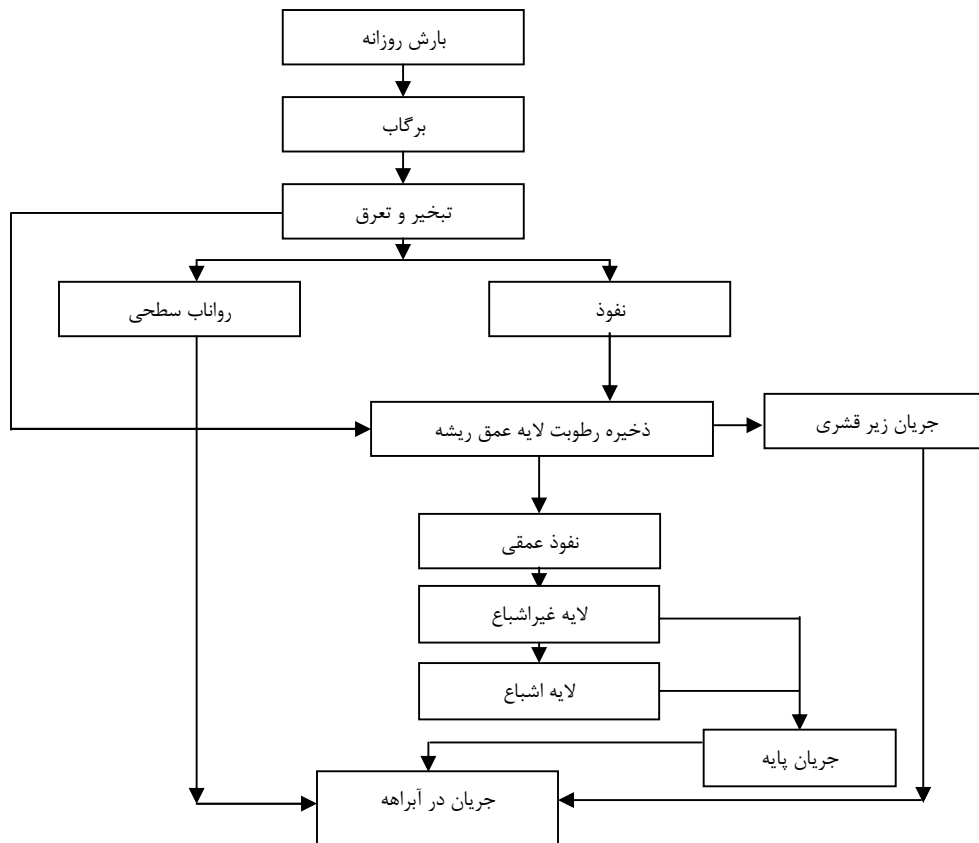
شکل ۲- نمایی از روش LDD در محیط PCRaster و رویکرد انتقال رواناب یک سلول

آبخیز مورد توجه قرار گیرد. با استفاده از آمار باران‌سنجی ایستگاه‌های لزوره، دوزین و قلعه‌قافه نقشه بارش منطقه تهیه گردید. به این منظور ابتدا با استفاده از روش تیسن سطح اثر هر ایستگاه مشخص گردید و سپس با استفاده از جداول سری‌های زمانی بارش سه ایستگاه و نقشه تیسن، نقشه‌های بارش روزانه تولید شدند.

بعد از تبیین مدل مفهومی و انتخاب زیر مدل‌ها و روابط ریاضی مورد نیاز، برنامه نویسی کامپیوتری مدل به زبان PCRaster کدنویسی و تدوین گردید.

بارش ورودی

متغیر بارش در معادله بیلان آب بیان‌کننده ورودی اصلی آب به یک حوزه آبریز است که بایست به‌عنوان اولین مرحله در فرآیند مدل‌سازی بیلان آب یک حوزه



شکل ۳- مدل مفهومی تدوین شده برای مدل‌سازی حوزه آبخیز چهل چای مینودشت

تفکیک بارش برف و فرآیند ذوب برف

در مناطق کوهستانی و ارتفاعات بالا بارش برف سهم قابل توجهی از بارش ورودی حوزه را تشکیل می‌دهد. با توجه به کوهستانی بودن حوزه آبخیز چهل‌چای بارش برف و فرآیند ذوب آن در چرخه هیدرولوژیکی حوزه اهمیت فراوانی داشته و در کنترل رژیم جریان حوزه نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. با در نظر گرفتن این که تقریباً نزولات جوی در مناطق دارای درجه حرارت زیر صفر درجه به صورت برف است و با تعیین خطوط هم‌دمای صفر درجه و مشخص کردن نوع بارندگی این مناطق، ارتفاع برف را به دست می‌آورند (۱۶).

برای برآورد میزان بارش برف فرض شد که در روزهایی که دما زیر صفر درجه سانتیگراد باشد، بارش به صورت برف خواهد بود. به این منظور ابتدا با استفاده از رابطه زیر دمای هر سلول بر اساس ارتفاع و گرادیان دمایی منطقه به دست آمده، سپس نوع بارش هر سلول برای روزهای همراه با بارندگی مشخص گردید.

$$T_i = T_{ref} - 0.005(H_i - H_{ref}) \quad (1)$$

در این رابطه

T_i : دمای محلی برای هر سلول بر حسب درجه سانتی‌گراد و براساس گرادیان دمایی منطقه
 T_{ref} : دمای متوسط روزانه اندازه‌گیری شده در نقطه مرجع (ایستگاه هواشناسی)
 H_i : ارتفاع سلول
 H_{ref} : ارتفاع نقطه مرجع

برای برآورد ذوب برف از روابط ارائه شده توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا (۱۶) استفاده گردید. با استفاده از این روابط برای دو کاربری اصلی حوزه، جنگل و زراعت، نقشه ارتفاع ذوب برف محاسبه گردید. با این فرض که تمامی آب ناشی از ذوب برف درون خاک نفوذ می‌یابد، این مقادیر به رطوبت خاک اضافه گردیدند. برای شبیه‌سازی بهتر و واقعی‌تر میزان برف حوزه، مقدار برف باقی مانده در هر روز به میزان برف روز بعد اضافه شده، ارتفاع برف روزانه به صورت تجمعی نیز به دست آمد.

تبخیر و تعرق^۱

تبخیر و تعرق از عوامل بسیار موثر و تعیین‌کننده در بیلان آب می‌باشد. در نظر گرفتن آن در چرخه آب لازم بوده، برای مدل‌سازی بیلان آب، محاسبه آن امری ضروریست. برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی رابطه زیر استفاده گردید (۲۶).

$$ET_a = (K_s \cdot K_{cb} + K_r \cdot K_e) ET_0 \quad (2)$$

که در آن:

ET_a : تبخیر و تعرق واقعی

K_s : ضریب کاهنده تعرق که بستگی به میزان رطوبت خاک دارد

K_e : ضریب تبخیر از سطح خاک لخت

K_r : ضریب کاهنده میزان تبخیر از سطح خاک است که

به مقدار رطوبت خاک بستگی دارد

ET_0 : تبخیر و تعرق پتانسیل است که از رابطه هارگریوز - سامانی (۲) به دست می‌آید.

K_{cb} : ضریب پایه گیاه که برای کاربری‌های غالب حوزه بصورت جدول زیر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در هر کاربری انواع مختلف گونه‌های گیاهی وجود دارد ضرایب پایه گیاهی برای هر کاربری برابر حداکثر ضریب موجود در جداول مربوطه در نشریه شماره ۵۶ فائو انتخاب گردید. بنابراین مقدار این ضرایب در یک پارامتر کاهنده () که از طریق واسنجی به دست می‌آید ضرب می‌گردد.

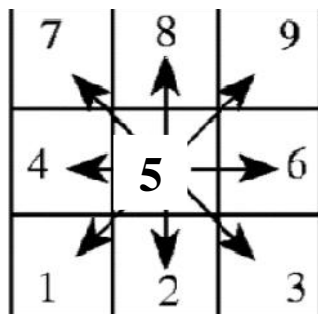
جدول ۱- ضریب پایه گیاه برای کاربری‌های غالب حوزه آبخیز چهل‌چای

کاربری	دوره شروع رشد	دوره میانی رشد	دوره پایانی رشد
جنگل	۰/۵	۱/۲۳	۰/۸۵
زراعت	۰/۲	۱/۰۵	۰/۲

برآورد ارتفاع رواناب با استفاده از روش شماره منحنی

برای محاسبه ارتفاع رواناب از روش شماره منحنی یا روش سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS استفاده گردید. در این روش مقدار تلفات بارش (S) با استفاده از پارامتر مقدار شماره منحنی (CN) به دست می‌آید که بستگی به کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک برای شرایط رطوبت پیشین متوسط به دست می‌آید. از آنجایی که شرایط رطوبت پیشین برای روزهای گوناگون متفاوت می‌باشد، مقدار (CN) نیز برای آن شرایط متفاوت خواهد بود. به همین دلیل بر اساس رطوبت پیشین خاک مقدار تلفات بارش روزانه اصلاح شده و ارتفاع رواناب روزانه برای هر سلول محاسبه گردید (۲۰). رواناب تجمع یافته روی یک سلول قاعدتاً در امتداد

شیب دامنه و مسیر آبراه‌ها به سمت پایین و نقطه خروجی جاری خواهد شد. بنابراین رواناب برای هر کدام از سلول‌ها مسیری را تا نقطه خروجی حوزه آبخیز طی خواهد نمود که بایست این مسیر مشخص گردد. برای این منظور نقشه LDD حوزه تهیه گردید. LDD نقشه‌ایست شامل ارزش‌هایی برای هر سلول (اعداد ۱ الی ۹ که در شکل ۴ نشان داده شده است)، که مسیر و امتداد جریان را به هر یک از سلول‌های همسایه نشان می‌دهد (۳۲). در محیط PCRaster برای به دست آوردن نقشه‌ها و شبیه‌سازی دبی و حجم رواناب در نقطه خروجی یک حوزه آبخیز بایستی نقشه LDD تهیه گردد. نقشه مزبور از روی نقشه DEM به دست می‌آید.



شکل ۴- ارزش‌های مبنای سلول‌ها برای تهیه نقشه LDD

نفوذ آب در خاک و رطوبت خاک

مقدار آبی که در خاک نفوذ پیدا می‌کند به‌عنوان ذخیره رطوبت خاک نقش مهمی در فرآیندهای زیستی و همچنین هیدرولوژیکی ایفا می‌کند. مقدار رطوبت خاک هر یک از سلول‌های حوزه آبخیز به‌صورت روزانه بر اساس ورودی‌ها (باران نفوذ یافته و ذوب برف) و خروجی‌ها (تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرقشری و آب پایه منطقه غیراشباع) تبیین و تدوین گردیده و نقشه رطوبت خاک روزانه حوزه آبخیز به دست آمد.

نفوذ عمقی

رطوبت موجود در لایه سطحی خاک هرگاه که از میزان رطوبت ظرفیت مزرعه بیشتر شود شروع به حرکت عمقی در خاک نموده، قسمتی از رطوبت موجود در خاک به‌صورت نفوذ عمقی از دست رفته به سفره‌های آب زیرزمینی می‌پیوندد. میزان این نفوذ به خصوصیات رطوبت خاک و بافت خاک بستگی دارد. برای به دست آوردن میزان نفوذ به‌صورت روزانه از رابطه زیر استفاده گردید (۲۳).

$$DP_{i,t,k} = D_k \dagger_{i,k} (n_{s,i,k} - n_{fc,i,k}) \frac{e^{n_{i,t,k} - n_{fc,i,k}} - 1}{e^{n_{s,i,k} - n_{fc,i,k}} - 1} \quad \text{if } n_k > n_{fc,k} \quad (3)$$

$$DP_{i,t,k} = 0 \rightarrow \text{if } n_k < n_{fc,k}$$

که در آن:

DP: مقدار آب نفوذ یافته به‌صورت نفوذ عمقی (mm)
 D_k : ضخامت لایه مورد مطالعه که در این تحقیق یک متر در نظر گرفته شده است
 n_s : رطوبت اشباع خاک که در اینجا بر حسب میلی‌مترمکعب آب در میلی‌مترمکعب خاک است
 n_{fc} : رطوبت ظرفیت مزرعه است که مانند پارامتر بالا بر حسب میلی‌مترمکعب آب در میلی‌مترمکعب خاک است
 n_i : رطوبت خاک بر حسب میلی‌مترمکعب آب در میلی‌مترمکعب خاک

: یک ویژگی زهکشی بدون بعد است که مقدار آن بین صفر و یک تغییر می‌کند و از رابطه زیر به‌دست می‌آید (۲۳).

$$\dagger = 0.0866 e^{0.8063 \log_{10}(K_{sat})} \quad (4)$$

که در آن:

K_{sat} : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به میلی‌متر در روز است.

ارتفاع آب نفوذ یافته هر روز به عنوان خروجی رژیم رطوبتی خاک در نظر گرفته شده و از رطوبت خاک روزانه آن روز کسر گردید.

جریان زیر قشری

در حوزه‌های آبخیز کوهستانی و تپه ماهوری جریان زیرقشری اهمیت بسیاری برای تولید رواناب و تخلیه آب‌های زیرزمینی دارد. اهمیت تاریخی جریان زیرقشری در تولید رواناب رودخانه در سال ۱۹۵۵ توسط کاروالد هنگام بررسی و تجزیه هیدروگراف بیان گردید (۹).

برای محاسبه جریان افقی زیرقشری از رابطه زیر استفاده گردید (۱۷). در این رابطه فرض می‌شود که جریانات زیرقشری زمانی شروع می‌شود که رطوبت خاک از حد رطوبت ظرفیت مزرعه تجاوز کند.

(۵)

$$\Delta Q_{i,t,k} = \left(\frac{W_{i,k} \sum_{j=1}^{N(up)} \max[c_k(n_{j,i,k} - n_{fc,j,k}) D_k, 0]}{\sum_{j=1}^{N(up)} W_{j,k}} \right) - \max[c_k(n_{i,t,k} - n_{fc,i,k}) D_k, 0]$$

که در آن:

n_{fc} : رطوبت ظرفیت مزرعه به میلی‌متر در میلی‌متر
 $n_{j,t,k}$: میزان رطوبت موجود لایه k و سلول j در روز t بر حسب میلی‌متر
 n_{fc} : ضریب جریان زیرقشری است که معمولاً ثابت و برابر با ۰/۲۵ است

W_j : شاخص رطوبتی در سلول j است به طوری که اندیس j نشان‌دهنده شماره سلول‌های بالادست سلول i و $N(up)$ بیانگر تعداد کل سلول‌های بالادست سلول i است. مقدار شاخص رطوبتی در سلول j از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۳).

$$W_j = \ln\left(\frac{a}{\tan S}\right) \quad (6)$$

که در آن:

a: مساحت بالادست هر سلول تقسیم بر طول سلول
 : شیب در امتداد مسیر جریان آب می‌باشد.
 نکته قابل توجه در این روش این است که فرض می‌شود جریان زیرقشری خروجی در هر لایه از یک سلول وارد سلول پایین دست می‌شود (۲۶). پس از به دست آوردن جریان روزانه زیرقشری این جریان به دبی خروجی حوزه اضافه گردید.

جریان پایه

آب پایه، دبی قبل از شروع سیلاب بوده و ممکن است در رودخانه‌های غیردائمی برابر صفر باشد و پس از فروکش نمودن سیل نیز تا مدتی کوتاه و یا حتی تا چندین ماه ادامه یابد که مربوط به تخلیه آب‌های زیرزمینی از راه رودخانه است (۱۶).

یکی از روش‌های بررسی آب در زیر سطح زمین، تقسیم‌بندی آن به دو منطقه اشباع و غیراشباع می‌باشد. در حقیقت تمام آب زیرسطح زمین به‌عنوان آب زیرزمینی می‌باشد، اما بهتر است مناطق اشباع و غیراشباع مجزا شود (۶). جریان آب پایه در حوزه تحت مطالعه نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. رودخانه

مجموع خروجی آب پایه از دو منطقه اشباع و غیراشباع به عنوان جریان روزانه آب پایه، به دبی خروجی حوزه اضافه گردیده و دبی کل خروجی حوزه آبخیز محاسبه گردید.

مولفه‌های بیلان آب

در این تحقیق مولفه‌های بیلان آب به تفکیک محاسبه و ارائه گردید. پس از شبیه‌سازی جریان خروجی و اطمینان از کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان خروجی، مولفه‌های بیلان آب نیز محاسبه گردیدند. این مهم به مدیران اجازه می‌دهد تا اثرات تغییرات مدیریتی و اقلیمی را روی اجزای مختلف بیلان آب بررسی کرده و بتوانند تصمیمات بهتر و منطقی‌تری اتخاذ نمایند.

واسنجی مدل

اجرای اولیه مدل نشان داد که میزان دبی مدل‌سازی شده بیشتر از مقادیر واقعی ثبت شده در خروجی حوزه بوده و مدل فرآیند شبیه‌سازی حوزه را به خوبی انجام نمی‌دهد. برای رفع این مسئله پارامترهای اصلی مدل جهت اخذ نتایج بهتر و صحیح‌تر به روش دستی مورد واسنجی قرار گرفتند.

اعتبارسنجی مدل

برای انجام اعتبارسنجی از یک دوره آماری سه ساله مربوط به سال‌های هیدرولوژیکی ۸۶-۱۳۸۵، ۸۵-۱۳۸۴ و ۸۴-۱۳۸۳ استفاده گردید. با توجه به عدم همخوانی داده‌های بارش ثبت شده با دبی در تعدادی از روزهای این دوره آماری، داده‌ها با آمار ایستگاه‌های مجاور مورد مقایسه هم‌زمان قرار گرفتند و با استفاده از روش ایستگاه‌های معرف و میانگین داده‌های آنها، داده‌های بارش مفقود و مشکوک اصلاح گردیدند.

ارزیابی کارایی مدل

بدون ارزیابی و اثبات کارایی یک مدل نمی‌توان به مدل ارائه شده اعتماد نمود. هر مدل بایستی مورد ارزیابی قرار گرفته، دقت انجام کار آن با دلایل علمی و آماری اثبات گردد. فرآیند ارزیابی کارایی مدل نه تنها در جریان توسعه مدل و فرآیند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین نیز از اهمیت اساسی برخوردار است (۲۵).

شاخص‌ها و روش‌های گوناگونی جهت ارزیابی ارائه شده‌اند که در این تحقیق برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، از روش نش-ساتکلیف (NS) استفاده گردید (۲۵).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N [q_{obs}(t) - q_{sim}(t)]^2}{\sum_{t=1}^N [q_{obs}(t) - \bar{q}_{obs}]^2} \quad (10)$$

خروجی حوزه دائمی بوده و همواره دارای دبی خروجی می‌باشد که این امر بیانگر وجود آب پایه و تأثیر جریان پایه بر خروجی حوزه می‌باشد. در این مطالعه تخلیه آب نفوذ یافته به صورت جریان آب پایه در دو منطقه مجزای منطقه اشباع و غیراشباع مورد بررسی گرفت. فرض گردید که آب نفوذ یافته عمقی وارد منطقه اشباع شده، به صورت یک مخزن غیرخطی عمل نموده و جریان آب پایه را تقویت می‌نماید. از طرف دیگر رطوبت منطقه غیراشباع نیز در ایجاد جریان پایه نقش انکارناپذیری ایفا می‌کند. مقدار آب تخلیه شده از این منطقه در آب پایه محاسبه می‌گردد.

برای برآورد جریان آب پایه برای منطقه غیر اشباع از رابطه تجربی زیر استفاده گردید (۱۸). این معادله جهت محاسبه آب پایه از رطوبت منطقه غیراشباع می‌باشد.

$$D_B = K_b \left(\frac{A_t - A_c}{A_m - A_c} \right) \quad (7)$$

در این رابطه:

D_B : میزان آب پایه برحسب میلی‌متر در روز برای منطقه غیراشباع

K_b : عاملی است که به هدایت هیدرولیکی منطقه اشباع بستگی داشته و از طریق واسنجی به دست می‌آید.

A_t : رطوبت خاک برحسب میلی‌متر

A_m : حداکثر رطوبت خاک در دسترس که خود از رابطه ۸ به دست می‌آید

A_c : حداقل رطوبت خاک لازم برای ایجاد جریان پایه که ۱٪ مقدار A_m در نظر گرفته می‌شود

$$A_m = (n_s - n_{pwp}) \times h \quad (8)$$

در این رابطه:

s : رطوبت اشباع خاک بر حسب مترمکعب بر مترمکعب
 pwp : رطوبت نقطه پژمردگی خاک بر حسب مترمکعب بر مترمکعب

h : ارتفاع لایه خاک بر حسب میلی‌متر

برای محاسبه جریان آب پایه منطقه اشباع، کل حوزه آبخیز به عنوان یک مخزن غیرخطی در نظر گرفته شد. آب نفوذ یافته عمقی به‌عنوان ورودی مخزن و آب پایه خروجی هر روز نیز به‌عنوان خروجی مخزن برای آن روز در نظر گرفته شد. برای محاسبه جریان آب پایه منطقه اشباع از رابطه زیر استفاده گردید (۱۵).

$$QG = cg(SG/1000)^m \quad (9)$$

که در این رابطه:

QG : جریان آب پایه خروجی از منطقه اشباع

Cg : ضریب ثابت که غالباً ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود

SG : ذخیره مخزن منطقه اشباع

m : توان معادله که برای مخازن خطی ۱ و برای مخازن غیرخطی ۲ می‌باشد.

زهکشی محلی (LDD)، دبی مجموع خروجی حوزه آبخیز چهل چای به دست آمد.

نتایج مرحله واسنجی مدل

پس از اجرای اولیه مدل با مقادیر متوسط پارامترهای اصلی و مشاهده تفاوت قابل ملاحظه بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی برای سال آماری ۸۷-۱۳۸۶ نسبت به اعمال تغییرات مقادیر پارامترها و واسنجی مدل اقدام گردید تا مقادیر بهینه پارامترها تعیین شود (جدول ۲).

در این رابطه

NS: شاخص نش- ساتکلیف

$Q_{obs}(t)$: دبی مشاهداتی در زمان t

$Q_{sim}(t)$: دبی شبیه‌سازی در زمان t

Q_{obs} : میانگین دبی مشاهداتی می‌باشد

نتایج و بحث

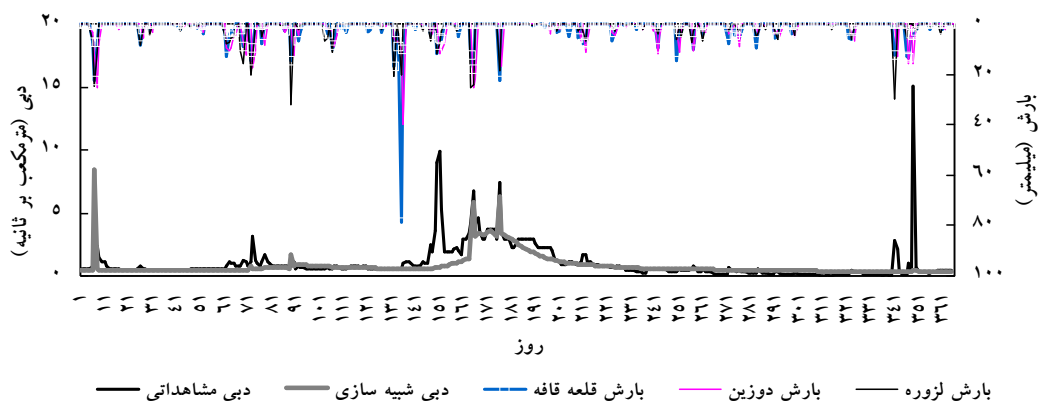
پس از جمع کردن دبی جریان زیرقشری، دبی جریان پایه و دبی سیلاب ناشی از بارش تک تک سلول‌ها و تجمیع آنها بصورت تراکمی در امتداد شبکه

جدول ۲- پارامترهای نیازمند واسنجی در مدل

ردیف	نام پارامتر	واحد	مشخصه پارامتر	مقدار اولیه	مقدار بهینه
۱	توان معادله تخلیه آب پایه از مخزن منطقه اشباع	-	m	۱	۲/۴۵
۲	عامل وابسته به هدایت هیدرولیکی منطقه اشباع	-	K_b	۱	۰/۵
۳	پارامتر کاهنده ضریب پایه گیاهی	-		۱	۰/۶۵

دبی‌های سیلابی مشاهده می‌شود و یا برعکس. بعلاوه برای چنین روزهای استثنایی آمار بارش و دبی مشاهداتی حوزه‌های آبخیز مجاور نیز مورد بررسی قرار گرفتند تا در مورد صحت و سقم داده‌های استثنایی تصمیم‌گیری شود. نتایج بررسی‌ها بیانگر مطمئن نبودن داده‌های بارش ورودی و دبی مشاهداتی ثبت شده در بعضی از روزهای سال می‌باشد. هرچند، علیرغم وجود چنین خطاهایی در داده‌های ورودی و مشاهدات ثبت شده، مدل بطور کلی نتایج قابل قبولی ارائه نموده است. در ذیل نمودار مقایسه‌ای دبی مدل‌سازی شده و دبی مشاهداتی ثبت شده در خروجی حوزه جهت مشاهده و قیاس بصری ارائه گردیده است.

نتایج واسنجی مدل با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای اصلی نشان داد که روند کلی تغییرات جریان روزانه رودخانه به طور مطلوبی شبیه‌سازی گردیده است. هرچند که برای بعضی از روزهای سال تفاوت بسیار چشمگیری بین دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده وجود دارد که دور از انتظار به نظر می‌رسد. بنابراین به منظور پی بردن به دلیل این اختلافات بارز و تفسیر منطقی آنها نسبت به بررسی دقیق و مقایسه متناظر داده‌های بارش روزانه و دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی اقدام گردید. مقایسه نظیر به نظیر داده‌های بارش و دبی نشان داد که برای بعضی از روزهای سال علیرغم عدم بارش در آن روز یا روزهای قبل و بعد آن



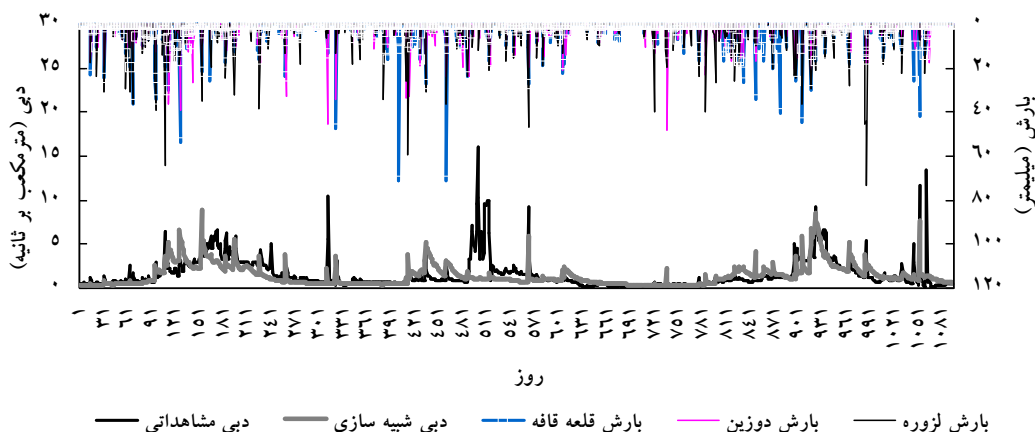
شکل ۵- نمودار روزانه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حوزه آبخیز چهل چای برای سال ۸۷-۱۳۸۶

مشاهداتی باشد. این مسئله در مطالعات اکبری (۱) و یعقوبی (۳۴) که به ترتیب بوسیله مدل‌های SWAT و WetSpa شبیه‌سازی جریان خروجی را در حوزه آبخیز چهل چای را انجام داده‌اند نیز مشاهده و ذکر گردیده

همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، اختلافاتی بین دبی‌های سیلابی مشاهداتی و مدل‌سازی شده وجود دارد که به نظر می‌رسد به دلیل غیرواقعی بودن داده‌های ورودی و همچنین خطای ثبت داده‌های

مربوط به سال‌های آبی ۱۳۸۵-۸۶، ۱۳۸۴-۸۵ و ۱۳۸۳-۸۴. نتایج دوره اعتبارسنجی (سال‌های آبی ۱۳۸۳-۸۶) در شکل ۷ ارائه گردیده است.

است. لذا داده‌های متناظر بارش و رواناب مربوط به این وقایع در ارزیابی کارایی مدل کنار گذاشته شدند. **نتایج مرحله اعتبارسنجی مدل** برای انجام اعتبارسنجی از یک دوره آماری سه ساله



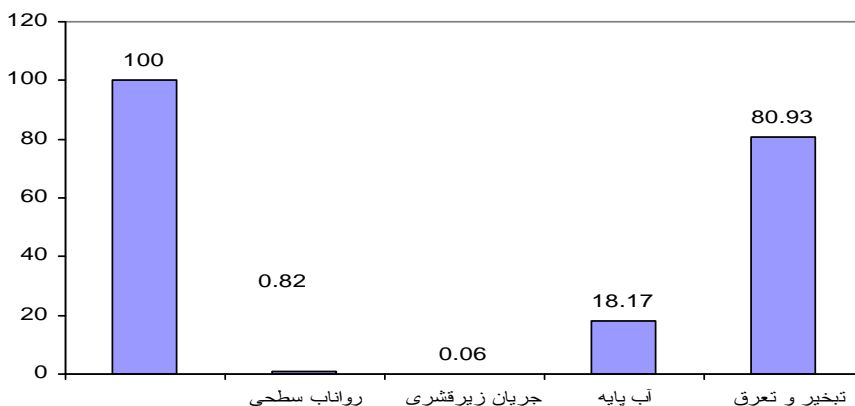
شکل ۶- نمودار روزانه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دوره سه ساله (۱۳۸۳ - ۸۶) اعتبارسنجی حوزه آبخیز چهل‌چای

۰/۸۲ درصد آن به صورت رواناب سطحی، ۰/۰۶ درصد به صورت جریان زیرقشری و ۱۸/۱۷ درصد جریان آب پایه را شامل می‌شود. با توجه به این که ضریب آبدهی مشاهده شده حوزه چهل‌چای برای دوره واسنجی برابر با ۲۲ درصد می‌باشد عملکرد و ضریب آبدهی مدل‌سازی شده در حدود ۲۰ درصد عدد قابل قبولی می‌باشد و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل توسعه داده شده نتایج رضایت بخشی داشته است.

از مشاهدات و بررسی‌های داده‌های موجود چنین بر می‌آید که هر چه داده‌ها قدیمی‌تر باشند از دقت آنها نیز کاسته می‌شود.

مولفه‌های بیلان آب

شکل ۷ مولفه‌های بیلان آبی محاسبه شده توسط مدل، را برای دوره ارزیابی نشان می‌دهد. بررسی نتایج بیلان آبی حاصله از مدل در حوزه نشان می‌دهد که ۸۰/۹۳ درصد بارندگی از طریق تبخیر و تعرق تلف می‌شود و ۱۹/۱۷ درصد آن به رواناب تبدیل می‌شود که



شکل ۷- مولفه‌های بیلان آبی شبیه‌سازی سال ۸۶-۸۷ به درصد نسبت به بارندگی

مربعات خطا (RMSE) مورد ارزیابی قرار گرفتند. همانطور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود برای بعضی از روزهای سال عدم همخوانی بین داده‌های بارش و رواناب مشاهداتی نظیر وجود دارد به طوری که برای

مقایسه آماری نتایج مدل

در این مرحله نتایج مراحل واسنجی و اعتبارسنجی با کنار گذاشتن داده‌های مشکوک با استفاده از شاخص‌های نش-ساتکلیف (NS) و ریشه میانگین

بررسی قرار گرفتند و اطمینان حاصل گردید که این داده‌ها غیرواقعی می‌باشند و بنابراین در مقایسه آماری بین دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی از سری آمار حذف شدند. جدول ۳ نتایج مدل را برای دوره واسنجی قبل و بعد از حذف این داده‌ها نشان می‌دهد.

بعضی روزها با اینکه بارندگی در همان روز یا چند روز قبل اتفاق نیفتاده است ولی داده‌های دبی، وقایع سیلابی را نشان می‌دهند. برای این روزهای مشکوک علاوه بر مقایسه نظیر به نظیر داده‌های دبی و بارندگی، وقایع بارندگی یا سیلابی حوزه‌های آبخیز مجاور نیز مورد

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل برای دوره واسنجی

نتایج بدون حذف جفت داده‌های مشکوک		نتایج با حذف ۴ جفت داده		نتایج با حذف ۵ جفت داده	
NS	RMSE	NS	RMSE	NS	RMSE
۰/۳۵	۱/۱۲	۰/۷۰	۰/۶۰	۰/۷۲	۰/۵۰

جدول ۴ نتایج اجرای مدل را برای دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد (جدول ۴).

جدول ۴- نتایج ارزیابی مدل برای دوره اعتبارسنجی

نتایج بدون حذف جفت داده‌های مشکوک		نتایج با کنار گذاشتن جفت داده‌های مشکوک	
NS	RMSE	NS	RMSE
۰/۱۴	۱/۶۷	۰/۵۰	۰/۸۴

هیدرولوژیکی در این حوزه آبخیز نیز به وجود این ناهماهنگی‌ها اشاره نموده‌اند. برای مثال، اکبری (۱) با استفاده از مدل SWAT جریان خروجی را در حوزه آبخیز چهل‌چای شبیه‌سازی نمود. ضرایب نش-ساتکلیف ناشی از ارزیابی این مدل برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۵۸ و ۰/۴ بوده است. وی اذعان می‌دارد با حذف داده‌های پرت و مشکوک ضریب مزبور به ۰/۷۵ می‌رسد که بیانگر خطای فراوان در داده‌های مشاهداتی در حوزه می‌باشد. یعقوبی (۳۴) نیز با مدل WetSpa جریان خروجی حوزه آبخیز چهل‌چای را شبیه‌سازی نمود و نتایج ارزیابی این مدل را در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۵۰ و ۰/۵۷ به دست آورد. اگرچه بایستی اذعان گردد که مولفه‌های بیلان آب به دست آمده از کاربرد مدل‌های SWAT و WetSpa تفاوت‌هایی را با نتایج مدل توسعه داده شده در تحقیق حاضر دارند ولی سهم نسبی مولفه‌های محاسبه شده شباهت‌های قابل ملاحظه ای دارند. البته با توجه به تفاوت‌هایی که در روش‌های محاسبه فرآیندهای هیدرولوژیکی و دوره‌های آماری مورد شبیه‌سازی در این مطالعات وجود دارد بروز چنین اختلافات کمی در نتایج بدست آمده بدیهی است. برای مثال، در مدل WetSpa رواناب حوزه توسط موج پخشی و در مدل SWAT به روش ماسکینگام روندیابی شده است ولی در مدل توسعه داده شده در مطالعه حاضر، رواناب سلول‌ها در طول مسیر جریان آب به صورت تراکمی جمع زده می‌شود و از هیچ گونه توابع انتقالی استفاده نشده است. علیرغم تفاوت‌های گزارش شده در مورد سهم نسبی مولفه‌های بیلان هیدرولوژیکی در این مطالعات، ضریب رواناب به دست آمده از مدل

همانطور که مشاهده می‌گردد مقدار شاخص نش-ساتکلیف در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷ و ۰/۵ به دست آمده است. امکان دارد یکی از دلایل پایین‌تر بودن شاخص نش-ساتکلیف در دوره اعتبارسنجی، طولانی‌تر بودن دوره آماری، قدیمی‌تر و نامطمئن‌تر بودن آمارهای این دوره باشد. به‌نظر می‌رسد که مدل علیرغم سادگی خود نتایج نسبتاً قابل قبولی را ارائه می‌نماید و در صورت وجود داده‌های مطمئن و دقیق، نتایج حاصل از مدل حتی می‌تواند بهتر نیز شود. مدل توسعه داده شده به طور نسبتاً قابل قبولی روند کلی رفتار هیدرولوژیکی حوزه را شبیه‌سازی نموده است (شکل ۵ و ۶). البته ناهماهنگی‌هایی بین دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای بعضی از روزهای سال مشاهده می‌گردد که می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد که وجود ایرادات و نواقص آماری (عدم قطعیت در داده‌های ورودی)، به ویژه آمار بارش و دبی مشاهداتی را می‌توان یکی از این دلایل دانست. هر چند برخی از این ناهماهنگی‌ها نیز ممکن است به دلیل در نظر نگرفتن شدت بارش توسط مدل به وجود آمده باشد (عدم قطعیت در ساختار مدل). عموماً اگر امتیاز شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (۱۹ و ۳۳ ۱۹۷۰). براساس این تقسیم‌بندی مدل حاضر کارایی رضایت‌بخشی داشته و می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان خروجی و تعیین و تفکیک مولفه‌های بیلان آب حوزه آبخیز چهل‌چای آن را به کار گرفته شود. شایان ذکر است که دیگر مطالعات مدل‌سازی

در فرآیند مدل‌سازی غالباً از روابط تجربی استفاده می‌شود که در ذات خود دارای مقداری خطا بوده و دارای دقت و صحت کامل نیستند. رفسگارد (۲۴) به نقل از پوپر (۲۲) اذعان می‌دارد که سیستم‌های طبیعی، سیستم‌های بسته نیستند و به همین دلیل روابط و مدل‌های عددی نمی‌توانند دقیقاً مورد ارزیابی و واسنجی قرار بگیرند. به همین دلیل بایست در مدل‌سازی خطایی را در حدود تعیین شده قبول نموده، کارایی مدل را به صورت نسبی پذیرفت. علی‌رغم مشکلات بسیار و اطلاعات کم و نه چندان مناسب، مدل نتایج نسبتاً مطلوب و قابل قبولی را ارائه نمود و نشان داد که می‌تواند نیازهای مدیریتی و تحقیقاتی را تا حدود زیادی برآورده نماید. دینامیک و توزیعی بودن این مدل در کنار منطقه‌ای بودن آن مهم‌ترین مشخصه و امتیاز آن می‌باشد. مدلی که در این تحقیق تدوین، طراحی و اجرا گردید یک مدل بیلان هیدرولوژیکی مفهومی و توزیعی برای حوزه آبخیز چهل‌چای می‌باشد. با توسعه و تدوین این مدل می‌توان تغییرات کاربری و مدیریتی را در هر نقطه حوزه و تاثیر آن را بر بیلان آب مورد محاسبه قرار داده و عکس‌العمل هیدرولوژی را بررسی و مطالعه نمود.

توسعه داده شده در تحقیق حاضر ۱۹/۱٪ است که با ضریب رواناب واقعی مشاهده شده سالانه (۲۲٪) تفاوت اندکی دارد.

بنابراین با توجه به نتایج فوق می‌توان بیان داشت که مدل از کارایی نسبتاً خوبی برخوردار است. اگرچه به دلیل پایین بودن صحت و دقت داده‌ها، چه داده‌های بارش و چه داده‌های دبی نتایج ارزیابی خیلی خوب نمی‌باشند. اما با این وجود می‌توان اعلام کرد که مدل علی‌رغم سادگی از توانایی خوبی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان خروجی برخوردار است. با توجه به این مطلب و همچنین نزدیکی برآورد آبدهی کل سالانه حوزه می‌توان مدل را برای برآورد و تفکیک مولفه‌های بیلان آب مناسب دانست.

مدل‌سازی فرآیندهای طبیعی امری بسیار پیچیده است. در چرخه آب و فرآیندهای هیدرولوژی عوامل بسیاری دخالت دارند که نمی‌توان تمام آنها را در غالب معادلات و روابط ریاضی و عددی گنجانده و رابطه‌ای ساخت که آیینه تمام‌نمای طبیعت باشد. می‌توان کلیاتی شبیه به طبیعت را فرموله نموده و روابطی تقریباً نزدیک به طبیعت ساخت اما نمی‌توان طبیعت را به طور کامل و دقیق در قالب یک رابطه یا مدل عددی گنجانده.

منابع

1. Akbari, H. 2010. Simulation of daily discharge for Chehel Chai river in Golestan province using SWAT model. M.Sc. Thesis, Watershed Management Dept., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. 83 pp. (In Persian)
2. Alizadeh, A. 2008. Principles of Applied Hydrology. Imam Reza Publication. 869 pp. (In Persian)
3. Beven, K.J. and M.J. Kirkby. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Science Bulletin*. 24: 43-69.
4. Cantón, Y., A. Sole-Benet and F. Domingo. 2004. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. *Journal of Hydrology*, 285: 199-214.
5. Chaplot, V., G. Giboire, P. Marchand and C. Valentin. 2005. Dynamic modelling for gully initiation and development under climate and land-use changes in northern Laos. *Catena*. 63: 318-328.
6. Davie, T. 2008. Fundamentals of hydrology. Routledge. ISBN: 0415399866. 200 pp.
7. De Roo, A.P.J. 1996. The LISEM project: an introduction, *Hydrological Processes*. 10: 1021-1025.
8. Fall, A. and J. Fall. 2001. A domain-specific language for models of landscape dynamics. *Ecological Modelling*, 141: 1-18.
9. Flugel, W.A. and R.E. Smith. 1999. Integrated process studies and modelling simulation of hillslope hydrology and interflow dynamic using the HILLS model, *Environmental Modelling & Software*, 14: 153-160.
10. Hessel, R. 2002. Modeling soil erosion in a small catchment on the Chinese loess plateau. PhD Thesis, University Utrecht. 317 pp.
11. Kalteh, A., V. Sheikh, A. Sadoddin and N. Noora. 2010. Evaluating efficiency of the hydrologic component of LISEM model in the Kechik Experimental watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 2: 65-83. (In Persian)
12. Karssenber, D.J. 1996. Manual PCRaster version2, Dept. Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, Netherlands.
13. Karssenber, D.J. 2002. Building dynamic spatial environmental models. *Netherlands Geographic Studies, NGS*, 305 pp.
14. Knijff, J. and A. De Roo. 2008. LISFLOOD: distributed water balance and flood simulation model, Revised User Manual. JRC, European Commission.
15. Liu, Y.B. and F. De Smedt. 2004. WetSpa Extension, AGIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management, (Documentation and User Manual), Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel (VUP), 126 pp.
16. Mahdavi, M. 1998. Applied Hydrology. Vol. 1. Tehran University Press. 362 pp. (In Persian)
17. Manfreda, S., M. Fiorentino and V. Iacobellis. 2005. DREAM: a distributed model for runoff, evapotranspiration, and antecedent soil moisture simulation. *Advances in Geoscience*. 2: 31-39.

18. Mello, C.R., M.R. Viola, L.D. Norton, A.M. Silva and F.A. Weimar. 2008. Development and application of a simple hydrologic model simulation for brazilian headwater basin, *Catena*, 75: 235-247.
19. Nash, J. and J. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
20. Neitch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2005. Soil and water assessment tool documentation, (user manual), 494 pp.
21. PCRaster team. 2011. PCRaster documentation. Release 3.0.1. Dept. Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, Netherlands.
22. Popper, K. 1959. *The logic of scientific discovery*. Hutchingson & Co, London. 514 pp.
23. Raes, D. 2002. BUDGET: a Soil Water and Salt Balance Model. Reference manual. Version 5.0. Catholic University of Leuven, Belgium. 79 pp.
24. Refsgaard, J. 2007. Hydrological modeling and river basin management. PhD thesis. Geological Survey of Denmark and Greenland. Danish Ministry of Environment. 96 pp.
25. Schaefli, B. and H.V. Gupta. 2007. Do Nash values have value?, *Hydrological Processes*, 21: 2075-2080
26. Sheikh, V. and Y. Mooshakhian. 2009. Generation of soil moisture map using the dynamic model of BEACH. 5th National Watershed Sciences and Engineering Conference. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, April 2009, Gorgan, Iran. 12 pp. (In Persian)
27. Sheikh, V. 2006. Soil moisture prediction: bridging even and continuous hydrological modeling. PhD thesis. Wageningen University. Wageningen, the Netherlands.
28. Sheikh, V., S. Visser and L. Stroosnijder. 2008. A simple model to predict soil moisture: Bridging Event Continuous Hydrological (BEACH) modeling, *Environmental Modelling & Software*, 542-556.
29. Simafar, Sh. 1994. *Engineering Hydrology*. Sahand Technical University. 418 pp. (In Persian)
30. Sperna Weiland, F.C., L.P.H. Van Beek, J.C.J. Kwadijk and M.F.P. Bierkens. 2010. The ability of a GCM-forced hydrological model to reproduce global discharge variability. *Hydrology and Earth System Science*, 14: 1595-1621.
31. Stolte, J. and H.K. French. 2006. Stormwater runoff under partially frozen condition. *Soil and Environment Division Norway*. 4 pp.
32. Van Duersn, W.P.A. and J.C.J. Kwadijk. 1993. RHINEFLOW: an integrated GIS water balance model for the Rhine River. In: *Proceeding of HydroGIS93 Conference* (ed. K. Kovar & H.P. Nachtnebel), IAHS Publication 211: 507-518.
33. Xu, Z.X., J.P. Pang, C.M. Liu and J.Y. Li. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model, *Hydrological Processes*, 23: 3619-3630.
34. Yaghoobi, F. 2010. Discharge simulation using WetSpa distributed hydrologic model in the Chehel Chai watershed, Golestan province, Iran. M.Sc. Thesis, Watershed Management Dept., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. 131 pp. (In Persian)
35. Zhang, X. 2006. Test and application of hydrological models with a spatial modelling language (PCRaster) for the discharge simulation of a wetland dominated catchment in Northern Germany, PhD thesis, Christian-Albrechts-Universitate, Kiel, 100 pp.
36. Zhao, G.J., G. Hormann, N. Fohrer, H.P. Li, J.F. Gao and K. Tian. 2011. Development and application of a nitrogen simulation model in a data scarce catchment in South China. *Agricultural Water Management*. 98: 619-631.

Distributed Dynamic Modeling of Water Balance in the Chehelchai Watershed within A GIS Environment

Vahedberdi Sheikh¹, Abdoljalil Hezbi² and Abdolreza Bahremand³

1- Associate Professor, Gorgn University of Agricultural Sciences and Natural Resources
(Corresponding author: v.sheikh@yahoo.com)

2 and 3- M.Sc. Student and Associate Professor, Gorgn University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: December 21, 2012 Accepted: March 9, 2014

Abstract

Modeling of hydrological processes provides appropriate information for watershed management through a deep and comprehensive insight on watershed systems. In this research a daily basis distributed water balance model for the Chehelchay watershed in the Golestan province in north east of Iran has been developed using the PCRaster GIS and dynamic modelling language. Various components of the watershed water balance including precipitation, snowmelt, evapotranspiration, soil moisture, surface runoff, interflow and baseflow have been simulated. Total discharge has been obtained by aggregating surface runoff, interflow and baseflow. Calibration of the developed model has been carried out by observed daily discharge during 2007-2008. For validation, the observed data of 2004-2006 period has been used. The Nash-Satcliffe efficiency criterion has been used to evaluate the model results. The results indicated that the value of the Nash-Satcliffe coefficient was 0.7 and 0.5 for the calibration and validation period, respectively. Since a Nash-satcliffe value for both the calibration and validation period is greater than 0.36, it can be concluded that the developed model has a relatively good capability to simulate the Chehelchay watershed discharge. Given that the results are suitable, different components of the water balance of the Chehelchai watershed have been calculated. The model results showed that the runoff coefficient of the watershed is 19.1 percent which is similar to its observed counterpart of 22 percent. The results of the developed model were also compared with the results of WetSpa model in this watershed.

Keyword: Hydrological Modeling, Calibration, Validation, Water balance, PCRaster