نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و ششم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۱/ مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۲۳۵ تا ۲۴۷

بررسی کارایی شماره منحنی فازی در شبیه‌سازی رواناب ماهانه در حوزهٔ آبخیز بهشت‌آباد

طیبه طهماسبی، خدایار عبدالهی و مهدی پژوهش[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۰)

چکیده

روش شماره منحنی رواناب به‌طور گسترده‌ای جهت پیش‌بینی رواناب استفاده شده و در بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری محبوب برای مدل‌سازی گنجانده شده است؛ اما تا حد زیادی به خصوصیات گروه‌های هیدرولوژیکی خاک وابسته است. بنابراین، تلاش در جهت کاهش این اثر و استخراج اطلاعات خاک ضروری است. مطالعه حاضر به‌منظور ادغام منطق فازی برای استخراج شماره منحنی رواناب انجام شده است. برای دستیابی به این هدف مدل توزیعی جدیدی به نام CNS2 توسعه داده شده است. در بخش نخست، فرموله‌کردن و برنامه‌نویسی مدل CNS2 با استفاده از محیط زبان برنامه‌نویسی پایتون انجام شد، سپس مدل در حوزه آبخیز بهشت‌آباد اجرا شد. این مدل در گام زمانی ماهانه با شماره منحنی فازی و در نظرگرفتن فاکتور تعداد روزهای بارانی، ضریب مدیریت معادله جهانی فرسایش خاک، شیب و ضریب تتای خاک، میزان تولید رواناب را در یک حوزه آبخیز شبیه‌سازی می‌نماید. نتایج بیانگر آن است که مدل با شاخص نش- ساتکلیف ۰/۶ و ضریب تبیین ۰/۶۳ در دورهٔ واسنجی و شاخص نش ۰/۵۳ و ضریب تبیین ۰/۵۶ در دورهٔ اعتبارسنجی، کارائی مناسب‌تری نسبت به روش سنتی شماره منحنی در شبیه‌سازی رواناب دارد. مزیت توزیعی‌بودن مدل امکان شناخت مناطق با تولید رواناب بیشتر را فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: مدل CNS2، شماره منحنی فازی، رواناب، حوزه آبخیز بهشت‌آباد

۱. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: drpajoohesh@gmail.com

مقدمه

روش شماره منحنی رواناب در سال ۱۹۷۲ از تجزیه و تحلیل تجربی رواناب از حوزه‌های کوچک و نقشه شیب تپه‌ها تحت نظارت وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا The U.S. Department of Agriculture (USDA) گسترش داده شده است، که در گذشته سازمان حفاظت خاک Soil Conservation Service (SCS) نامیده می‌شد. این مدل به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته و در مدل‌های رواناب برای مناطق مختلف و در بسیاری نرم افزارهای هیدرولوژیکی محبوب گنجانده شده است (۳ و ۱۶). این مدل یک روش مؤثر برای تعیین مقدار تقریبی رواناب مستقیم از یک بارش در یک منطقه خاص است. جهت بررسی کارایی مدل تحقیقاتی در این زمینه و بررسی کارایی این روش در مدل Soil and water Assessment Tool (SWAT) تحقیقاتی صورت گرفته است (۳ و ۱۹). در این روش جهت بررسی خاک از گروه هیدرولوژیکی خاک که توسط راهنمای ملی مهندسی ارائه شده است، استفاده می‌شود (۲۶). محدوده Curve Number (CN) تعیین شده بین صفر تا صد متغیر است. اما با تجربه‌های علمی بدست آمده در این محدوده تجدید نظر شده و مقدار آن در طبیعت بین ۴۰ تا ۹۸ متغیر است (۲۸). یکی از عوامل تأثیرگذار بر روی CN، Hydrologic Soil Group (HSG) (گروه‌های هیدرولوژیکی خاک) است (۲۱ و ۲۶). در حدود ۱۴۰۰۰ نوع خاک توسط ایالات متحده شناسایی شده است (۱۴) و این خاک‌ها با توجه به نفوذپذیری در چهار گروه A، B، C و D قرار می‌گیرند (۱۸). با توجه به اینکه یک خاک ممکن است کاملاً متعلق به یک گروه HSG نباشد، بنابراین در این روش عدم قطعیت و خطاهایی در تعیین نوع گروه هیدرولوژیکی خاک وجود دارد. به همین دلیل، یک روش بهبودیافته با بهره‌گیری از اطلاعات خاک از پایگاه داده‌های خاکی برای استخراج طبقه‌بندی HSG و CN موردنیاز است. روش فازی و تلفیق آن با روش شماره منحنی می‌تواند تناقض موجود در گروه‌های هیدرولوژیکی خاک را حل کرده و جزئیات فضایی بیش‌تری از محاسبه رواناب ارائه نماید که نمونه‌ای از این روش با نتایج رضایت‌بخشی در حوزهٔ تگزاس ایالات متحده ارائه شده است (۲۰). روش فازی Fuzzy Inference System (FIS) منطقی چندارزشی است که امکان درجه‌بندی مقادیر را برای کار با ارزش‌های مورد استفاده در یک سیستم فراهم می‌کند. این روش توسط پروفسور لطفی‌زاده ارائه شد و در طول زمان تغییرات زیادی بر روی این روش صورت گرفت و استفاده‌های گوناگونی از آن به عمل آمد. از جمله، می‌توان به محاسبه آب سطحی و زیرزمینی و اندازه‌گیری کیفیت آب اشاره کرد (۴ و ۵). در مقابل این مدل دارای نقاط ضعف نیز است. با وجود پیشرفت و توسعه مدل شماره منحنی در سه دهه گذشته نیاز به بهبود بیش‌تر همواره تجربه شده است. پس از بررسی انتقادی این روش، توجه زیادی به اصلاح و بررسی آن صورت گرفته است؛ به‌عنوان مثال می‌توان به اعمال اثر شیب روی شماره منحنی اشاره کرد (۱۰، ۱۱ و ۲۲). هم‌چنین پژوهش‌هایی تحت عنوان سیستم دو شماره منحنی (۲۳) و شماره منحنی مرکب (۷) صورت گرفته است. در مطالعه‌ای دیگر، شماره منحنی با استفاده از رویدادهای بارش، رواناب و تغییرات آن با مؤلفه‌های بارش در یک حوزه آبخیز جنگلی تعیین شده است؛ و نتایج نشان‌دهنده افزایش مقدار شماره منحنی پس از برقراری ارتباط آن با مؤلفه‌های بارش است (۱۷). با توجه به اینکه این روش در مقیاس روزانه طراحی شده است، تغییرات فصلی و ماهانه در این روش نادیده گرفته شده است، بنابراین برآورد شماره منحنی در مقیاس ماهانه می‌تواند برآورد مناسبی از رواناب ارائه دهد و موجب بهبود عملکرد CN شود. نمونه‌ای از اصلاح روش ماهانه شماره منحنی ارائه شده است که این روش ضریب نگه‌داشت اولیه را در مقدار اولیه ۰/۲ ثابت نگه داشته و منجر به عدم محاسبه نفوذ می‌شود (۸ و ۹). همچنین مدل شماره منحنی، روشی برای بررسی اثرات مقیاس فضایی ارائه نمی‌دهد. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی جهت بررسی تغییرات مکانی- زمانی مؤلفه‌های مؤثر در تولید رواناب رایج است؛ که در دهه‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ مدل‌های

شبیه‌سازی مختلفی جهت محاسبه رواناب ناشی از بارندگی و رسوب ارائه شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به توسعهٔ مدل توزیعی Water and Energy Transfer (WetSpa) between Soil, Plants and Atmosphere و ارائهٔ مدل ماهانهٔ بیلان آب Water and Energy Transfer (Wetspass) between Soil, Plants and Atmosphere under quasisteady state اشاره کرد (۱ و ۲۹). بنابراین، اهداف این تحقیق شامل: ۱) استفاده ازضریب تنای خاک جهت تهیه شماره منحنی برای از بین‌بردن تناقض گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، ۲) تلفیق منطق فازی و روش شماره منحنی برای از بین‌بردن عدم قطعیت در محاسبه رواناب و ۳) بررسی تغییرات توزیعی و مکانی رواناب در گام زمانی ماهانه به وسیله توسعهٔ مدل شبیه‌ساز رسوب Curve Number Sediment Simulation (CNS2) است.

مواد و روش‌ها

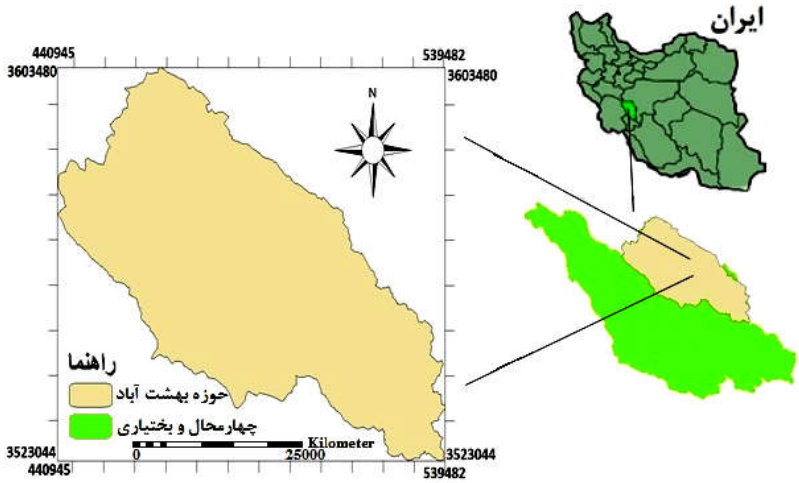
منطقه مورد مطالعه: حوزهٔ آبخیز بهشت‌آباد با مساحت حدود ۳۸۴۸/۰۴ کیلومتر مربع در شمال شرق استان چهارمحال و بختیاری حدود ۱۲/۹ درصد از مساحت منطقه زاگرس مرکزی را به خود اختصاص داده است (شکل ۱). منطقه مطالعاتی با ارتفاع متوسط ۲۴۲۲ متر از سطح دریا و شیب متوسط ۲۱/۷ درصد در مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه، ۲۰ دقیقه، ۳۰ ثانیه تا ۵۱ درجه، ۲۶ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه، ۴۹ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۲ درجه، ۳۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی قرار گرفته است. متوسط درجه حرارت حداقل و حداکثر به‌ترتیب ۲/۳۲ و ۲۰/۴۳ درجه سانتی‌گراد، متوسط مجموع روزهای یخبندان ۱۲۱ روز و نزولات جوی سالانه به تفکیک شهرستان‌های منطقه شامل: بروجن۳۲۲/۵ میلی‌متر، شلمزار ۳۸۹/۷۰ میلی‌متر و فارسان ۴۹۶/۸۰ میلی‌متر است و جزو مناطق سردسیر و پرارتفاع کوهستانی است (جدول ۱).

مدل CNS2، مدلی برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب است و برای مدل‌سازی تمامی حوزه‌های آبخیز با مقیاس‌های کوچک و بزرگ کاربرد دارد. این مدل یک مدل توزیعی و از نوع ماهانه است که با فازی‌کردن شماره منحنی و با در نظرگرفتن فاکتورهای تعداد روزهای بارانی، ضریب مدیریت، شیب، ضریب تنای بافت خاک، مقدار رواناب و رسوب را در یک حوزه آبخیز شبیه‌سازی می‌کند. ورودی‌ها و خروجی‌های مدل نقشه‌های رستری با فرمت اسکی (Ascii) در گام زمانی ماهانه است. برای برنامه‌نویسی (اسکریپت) مدل از زبان برنامه‌نویسی پایتون (Python) و محیط اسکریپت نویسی (Script) سامانه مدل‌سازی Hydrology and Hydraulic Programming Library (H2PL) استفاده شد (۱). ابتدا طراحی کامل مدل در محیط اکسل انجام شد و سپس اسکریپت مدل در محیط پایتون نوشته شد و در حوزه آبخیز بهشت‌آباد اجرا شد. پردازش در مدل با خواندن داده‌ها شروع می‌شود. ورودی‌های مدل شامل نقشه‌های ثابت و نقشه‌هایی است که با ماه تغییر می‌کنند که نقشه‌های ثابت شامل نقشه مدل رقومی ارتفاع، نقشه بافت خاک، نقشه کاربری اراضی، نقشه طول جریان و نقشه شیب هستند. نقشه‌های متغیر با ماه شامل نقشه بارش، نقشه تعداد روزهای بارانی، نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل، شاخص سطح برگ و نقشه دما هستند (۲۷).

مدل‌سازی با استفاده از سامانه استنتاج فازی

مرحله اول- متغیرهای مؤثر و دامنهٔ آن‌ها: متغیرهای مورد استفاده عبارتند از شماره منحنی (فازی)، تعداد روزهای بارانی، ضریب مدیریت، ارتفاع رواناب، برف، توپوگرافی (درصد شیب) و بار رسوب. متغیرهای مؤثر با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی تعیین شدند و بیشترین تأثیر را بر رواناب و رسوب حوزه دارند.

مرحله دوم- تعیین مقادیر زبانی هر متغیر و تابع عضویت آن‌ها: بعد از تعیین دامنه تغییرات، لازم است تا توابع عضویت و مقادیر زبانی هر متغیر نیز تعریف شود. توابع عضویت متغیرها براساس نظر افراد متخصص، تعیین شدند. سپس متغیرهای زبانی به صورت کیفی تعریف، و با واژه‌های خیلی خیلی کم، خیلی کم، نسبتاً خیلی کم، نسبتاً کم، کم، متوسط، نسبتاً زیاد، زیاد، نسبتاً خیلی زیاد، خیلی زیاد و خیلی خیلی زیاد نام‌گذاری شدند (جدول ۲).



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. اطلاعات اصلی ورودی‌های حوزه آبخیز بهشت آباد

انحراف استاندارد	حداکثر	حداقل	میانه	میانگین	واحد	عنوان
۲۳۳/۸۹	۳۶۰۰	۱۶۸۷	۲۲۷۰	۲۳۱۷/۶۹	متر	ارتفاع
۱۷/۸۹	۱۹۲/۰۲۱	۰	۱۱/۱۴۳	۱۷/۱۹	درصد	شیب متوسط
۱۱۱/۸۷	۷۰۱/۳۹۵	۰	۱۲۰/۸۴	۱۳۶/۸۷	میلی‌متر/ماه	تبخیر و تعرق
۴۰/۷۴	۱۸۹/۹	۰	۲۳/۹۱	۳۶/۹۱	ماه/میلی‌متر	بارش
۳/۴۱۸	۱۴/۱۷	۰	۴/۲۰۵	۴/۱۶۳	عدد	تعداد روزهای بارانی
۱۰/۴۱۱	۲۵/۱۱	-۲۰/۹۸	۱۱/۵۸	۱۱/۴۵۷	درجه‌سانتیگراد	دما
۱۹/۳۴۴	۱۱۹/۴۴۳	۰/۸۴۷	۷/۲۰۹	۱۴/۴۰۲	متر مکعب/ثانیه	دبی
۲۲۰۵۸/۴۳	۱۰۴۹۷۶/۳۰۰	۰	۵۹۳۱۲/۷۸۰	۵۸۸۲۴/۴۱	سانتی‌متر	طول جریان

جدول ۲. دامنه متغیرهای مستقل و مقادیر زبانی

کد	خیلی خیلی کم	خیلی کم	نسبتاً خیلی کم	نسبتاً کم	کم	متوسط	نسبتاً زیاد	زیاد	نسبتاً خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی خیلی زیاد
تعداد روزهای بارانی					۰-۵	۵-۱۰	>۱۳				
ضریب تتا	۰-۰/۱	۰/۲-۰/۱	۰/۲-۰/۳	۰/۳-۰/۴	۰/۴-۰/۵	۰/۵-۰/۶	۰/۶-۰/۷	۰/۷-۰/۷۱	۰/۷۱-۰/۷۲	۰/۷۲-۰/۷۳	۰/۷۳-۰/۸۵
ضریب مدیریت	۰/۹۹-۱	۰/۹-۰/۹۹	۰/۸-۰/۹	۰/۷-۰/۸	۰/۶-۰/۷	۰/۵-۰/۶	۰/۴-۰/۵	۰/۳-۰/۴	۰/۲-۰/۳	۰/۱-۰/۲	۰-۰/۱
شماره منحنی	۴۰-۴۵	۴۵-۵۰	۵۰-۵۵	۵۵-۶۰	۶۰-۶۵	۶۵-۷۰	۷۰-۷۵	۷۵-۸۰	۸۰-۸۵	۸۵-۹۰	۹۰-۱۰۰

مرحله سوم- تعیین قوانین اگر و آنگاه فازی: قوانین فازی به صورت اگر و آنگاه برای ۳ متغیر مستقلی که بر روی متغیر وابسته (رسوب) تأثیر دارند نوشته شدند. مقدار رسوب تولید شده در یک منطقه بستگی به ضریب تتا، نوع کاربری اراضی (مدیریت) و تعداد روزهای بارانی منطقه دارد. این متغیرها اثر متفاوتی بر مقدار بار رواناب و رسوب دارند. بالارفتن مقدار ضریب مدیریت در خاک‌ها باعث کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش میزان رواناب و به تبع آن رسوب می‌شود. از سوی دیگر وجود تعداد بالای روزهای بارانی به دلیل عدم نفوذ در خاک اشباع موجب افزایش رواناب و رسوب می‌شود و بالابودن مقدار شماره منحنی که تابع خصوصیات هیدرولوژیکی خاک و نوع کاربری اراضی است، سبب افزایش مقدار رواناب و بار رسوب می‌شود. با توجه به اثر ۳ متغیر بر روی مقدار رسوب، قواعد در ۳۶۱ دستور تحت عنوان جدول شماره منحنی مدل تهیه شد که نمونه‌ای از آن به اینصورت است که اگر تعداد روزهای بارانی کم، ضریب تتا خیلی خیلی کم و ضریب مدیریت خیلی خیلی زیاد باشد، آنگاه شماره منحنی خیلی خیلی کم و رواناب و رسوب حاصل خیلی خیلی کم خواهد بود. مرحله چهارم- انجام استنتاج فازی: برای انجام استنتاج فازی، به وسیله قانون ترکیبی استنتاج، ابتدا قوانین به وسیله روابط فازی صورت بندی و بیان شد. سپس نتایج بدست آمده پس از خارج شدن از حالت فازی، با مقدار دبی مشاهده‌ای براساس معیار ضریب تبیین و نش- ساتکلیف کنترل شد (۲۷).

روابط مورد استفاده در مدل CNS2

جهت محاسبه شماره منحنی طبق مراحل ذکر شده در بخش سوم ابتدا قوانین اگر و آنگاه فازی تعیین شده و براساس آن یک مقدار عددی به شماره منحنی تخصیص داده شد. سپس شماره منحنی دی فازی شده معادل با CNII در نظر گرفته شد. با استفاده از فرمول هنگ (۱۵) تأثیر شیب بر روی شماره منحنی اعمال می‌شود (رابطه۲). در این رابطه مقدار CN_M برابر با CNII است و مقدار α از (رابطه۱) محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{\text{Slope}}{100} \qquad (۱)$$

$$CN_H = CNII \times \frac{322.79 + 15.63\alpha}{\alpha + 323.52} \qquad (۲)$$

در مدل CNS2 جهت محاسبه رواناب سطحی به صورت ماهانه، مقدار R براساس میلی‌متر محاسبه می‌شود (رابطه۳) (۲۴ و ۲۵).

$$R = \frac{\left(\overline{P} - 0.2S\right)^2}{\left(\overline{P} + 0.8S\right)} \qquad (۳)$$

$$\overline{P} = \frac{P_m}{D} \qquad (۴)$$

که در رابطه ۳، R ارتفاع رواناب براساس میلی‌متر، $\overline{P}$ مقدار بارش بر تعداد روزهای بارانی که از (رابطه۴) محاسبه می‌شود و P_m معرف مقدار بارش برحسب میلی‌متر و D معرف تعداد روزهای بارانی (کمتر از ۵ روز، ۵ تا ۱۰ روز و بیش‌تر از ۱۳ روز) و S ضریب نگه‌داشت براساس میلی‌متر محاسبه می‌شود (رابطه ۵)، که Sreduction ضریب کاهش نگهداشت در حالت ماهانه است (۲۴ و ۲۵).

$$S = \left(\left(\frac{25400}{CNH}\right) - 254\right) / \text{Sreduction} \qquad (۵)$$

جهت محاسبه دبی حجمی آب سطحی از (رابطه ۶) استفاده می‌شود و در این رابطه دبی پیکسل به دبی حوزه آبخیز تبدیل می‌شود:

$$Q_{(sr)} = x \sum_{cell=1}^{N} Q_{sr_{(t-1)}} + (1-x) \sum_{Cell=1}^{N} W_i \times R \times A / T_p \qquad (۶)$$

که در رابطه ۶، Q_{sr} دبی حجمی آب سطحی برحسب مترمکعب در ماه، cell معرف یک سلول و A معرف مساحت برحسب کیلومترمربع، R معرف رواناب برحسب میلی‌متر در ماه، t معرف زمان برحسب ماهانه، x معرف ضریب ذخیره ماهانه و T_p زمان دبی پیک و پارامتر کالیبراسیون است (۲۴ و ۲۵). مقدار W_i که معرف اثر جریان مداوم است، از (رابطه۷) محاسبه می‌شود:

$$W_i = W_L \left(\exp\left(\frac{-L}{L\max}\right)\right) \qquad (۷)$$

که در این رابطه مقدار W_L به‌طور پیش‌فرض برابر یک در نظر گرفته شده و پارامتر کالیبراسیون مدل است که معرف طول رواناب است، L طول جریان و Lmax حداکثر مقدار عددی طول جریان است.

فاکتور مدیریت زمین

جهت محاسبه فاکتور مدیریت زمین و پوشش از ضرب دو نقشه C و P که به‌ترتیب براساس کشت روی خطوط تراز با توجه به نقشه کاربری اراضی و جدول کاربری اراضی مدل CNS2 برگرفته از جداول پوشش اراضی جنگلی دست نخورده و جدول عملیات حفاظتی خاک تعریف شده در مدل Revised Universal Soil Loss Equation-3D RUSLE-(3D) محاسبه می‌شود (۳۰).

$$C = K_C \times \overline{C} \qquad (۸)$$

که در این رابطه C به‌طورکلی معرف فاکتور مدیریت سالانه در تغییرات ماهانه مدیریت است، K_C معرف تغییرات مدیریت در ماه است که جهت محاسبه آن از (رابطه ۹) استفاده می‌شود (۱۲) و $\overline{C}$ معرف تغییرات سالانه مدیریت است.

$$K_C = (0.27 \times LAI) + 0.27 \qquad (۹)$$

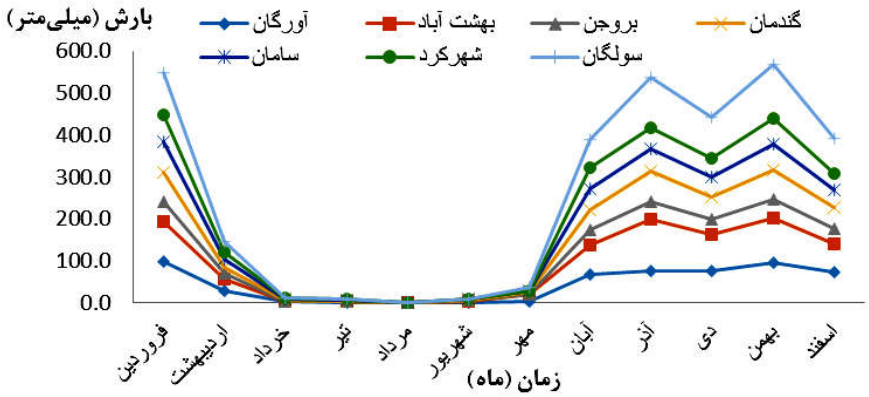
جهت تهیه نقشه‌های ورودی بارش، تعداد روزهای بارانی، تبخیر و تعرق پتانسیل و دما از داده‌های دوره آماری ۱۴ ساله (سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۴) استفاده شد. ده سال اول (سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰) دورهٔ واسنجی و چهارسال دوم (سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴) دورهٔ اعتبارسنجی است. برای تهیه نقشه‌های ورودی به‌عنوان واحدهای کاری از محیط متن باز نرم افزار الویس (ILWISS3.3) با اندازه سلولی ۱۰۰متر استفاده شد. جهت تهیهٔ نقشه‌های تعداد روزهای بارانی از روش میان‌یابی کریجنگ ساده استفاده شد، همچنین برای تهیه نقشه‌های بارش از روش میان‌یابی به روش تیسن با در نظر گرفتن سطح اثر یکسان استفاده شد. برای تهیه نقشه‌های تبخیر و تعرق پتانسیل و دما از روش گرادیان ارتفاعی استفاده شد و برای تهیه نقشه‌های شاخص سطح برگ از تصاویر ماهواره‌ای ماهانه لندست ۸ (سال ۲۰۱۵-۲۰۰۲) استفاده شد. ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شده شامل هفت ایستگاه آورگان، بهشت آباد، بروجن، گندمان، سامان، شهرکرد و سولگان است (شکل ۲) و از داده‌های دبی مشاهده‌ای ایستگاه خروجی بهشت‌آباد استفاده شد.

نتایج و بحث

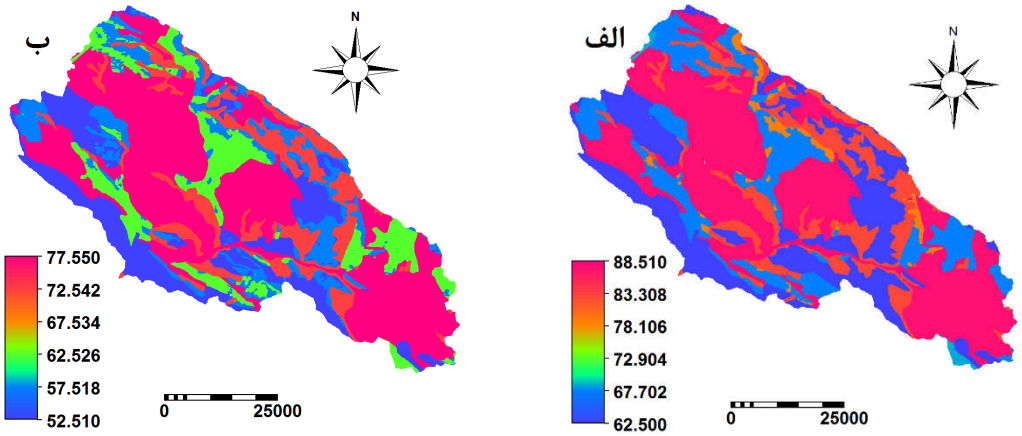
با توجه به اینکه روش محاسبه رواناب در این مدل شماره منحنی فازی است، ابتدا قوانین اگر و آنگاه فازی به وسیلهٔ سه عامل تعداد روزهای بارانی، ضریب تتای خاک و نوع مدیریت زمین، تعیین شده و براساس آن یک مقدار عددی به شماره منحنی تخصیص داده شد. سپس شماره منحنی دی‌فازی شده معادل با CNII در نظر گرفته شد. که مقدار به‌دست آمده آن در حوزه آبخیز بهشت‌آباد برای کل حوزه به‌طور متوسط ۷۱/۸ برآورد شد. مدل تغییرات شماره منحنی را به صورت مکانی در گام زمانی ماهانه نشان می‌دهد (شکل ۳). با توجه به شکل، بیش‌ترین مقدار شماره منحنی در اردیبهشت ماه برابر ۸۸/۵ و در آبان ماه ۷۷/۵ است و در مناطقی که دارای کاربری مرتع و خاک لخت هستند، دیده می‌شود.

با توجه به اینکه منطقه بهشت‌آباد کوهستانی است، یکی از عوامل مؤثر در ایجاد رواناب عامل توپوگرافی (شیب) است. اثر این عامل نیز بر روی شماره منحنی اعمال شده و شماره منحنی متأثر از شیب شبیه‌سازی شد (شکل ۴)، که متوسط آن برای کل حوزه آبخیز بهشت‌آباد ۷۲/۳ است. محدوده تغییرات شیب نیز ۰ تا ۱۹۲ درصد است. بنابراین، در مناطقی که شیب تندتر باشد، شماره منحنی و به تبع آن رواناب افزایش می‌یابد و با کاهش شیب مقدار شماره منحنی و رواناب نیز کاهش می‌یابد. مقدار ضریب نگه داشت خاک نیز با استفاده از شماره منحنی دی‌فازی شده و با اعمال تأثیر شیب بر روی آن به روش هنگ، توسط مدل محاسبه شد که متوسط آن برای کل حوزه ۱۰۷ میلی‌متر در سال است.

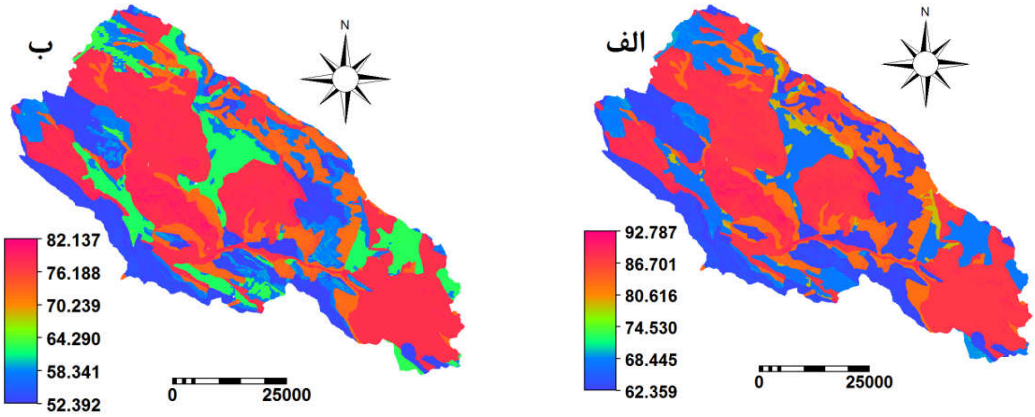
همانطور که مشاهده می‌شود در مقایسه با شکل۳، با اعمال اثر شیب به روش هنگ بر روی شماره منحنی، مقدار شماره منحنی افزایش یافته است. بنابراین، با توجه به کوهستانی‌بودن منطقه با افزایش شیب، مقدار شماره منحنی افزایش می‌یابد و نتیجه مناسب‌تری نسبت به روش بدون اعمال اثر شیب برای محاسبهٔ شماره منحنی نشان می‌دهد که این می‌تواند نشان‌دهنده مؤثربودن شیب در شبیه‌سازی توسط مدل باشد. نتایج پژوهش‌های گذشته نیز نشان‌دهنده این موضوع است که در مناطقی که شیب افزایش می‌یابد به همان میزان نیز مقدار شماره



شکل ۲. بارش متوسط ماهانه هفت ایستگاه ورودی به مدل (سال ۱۳۹۴-۱۳۸۱) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

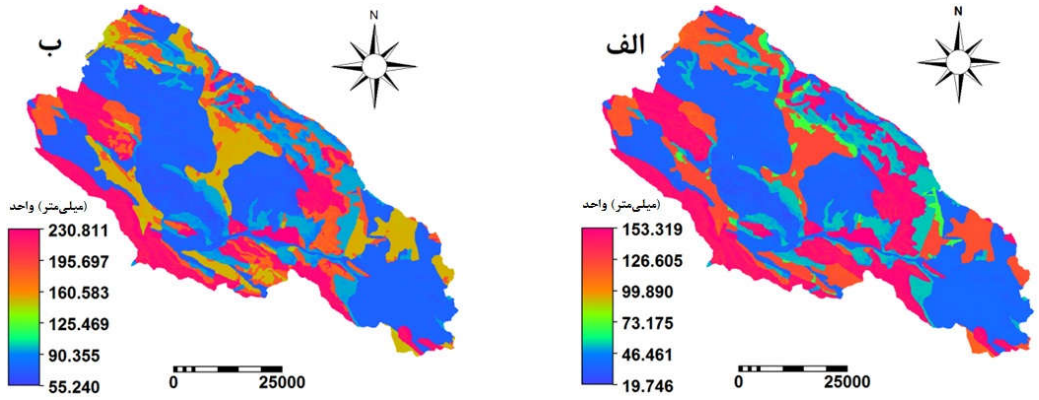


شکل ۳. نقشه ماهانه شماره منحنی حوزه آبخیز بهشت‌آباد، الف) اردیبهشت و ب) آبان، سال ۱۳۸۱ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

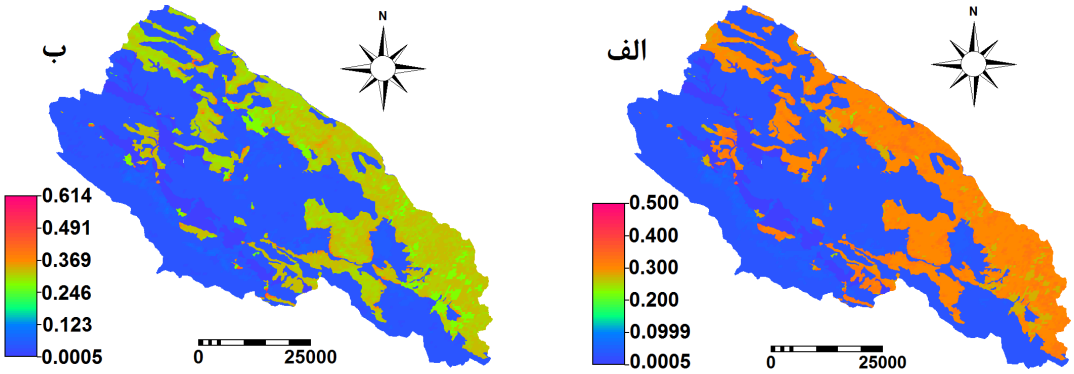


شکل ۴. نقشه شماره منحنی متأثر از شیب حوزه آبخیز بهشت‌آباد، الف) اردیبهشت و ب) آبان، سال ۱۳۸۱ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

منحنی افزایش می‌یابد و دقت روش هنگ نسبت به سایر روش‌های اعمال اثر شیب بر روی شماره منحنی بیشتر است (۲). با توجه به شکل ۵، مناطقی که شماره منحنی بیش‌تری دارند، دارای ضریب نگه‌داشت کمتری هستند به‌طوری که در اردیبهشت ماه مقدار آن ۱۹/۷ میلی‌متر و در آبان ماه ۵۵/۲ میلی‌متر است که متأثر از بارش‌های متوالی است و این درحالی



شکل ۵. نقشه ماهانه ضریب نگه‌داشت حوزه آبخیز بهشت‌آباد، الف) اردیبهشت و ب) آبان، سال ۱۳۸۱ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

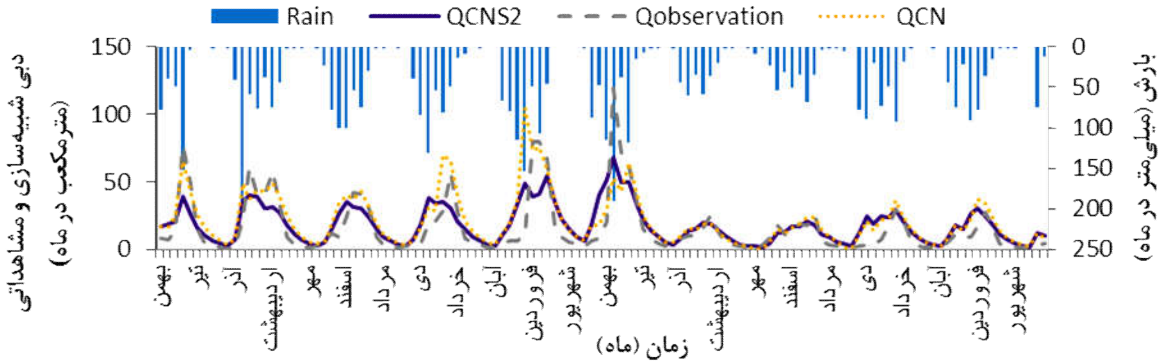


شکل ۶. نقشه ماهانه ضریب مدیریت حوزه آبخیز بهشت آباد، الف) اردیبهشت و ب) آبان، سال ۱۳۸۱ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

است که بیش‌ترین مقدار ضریب نگه‌داشت در این دو ماه به‌ترتیب ۱۵۳/۳ و ۲۳۰/۸ میلی‌متر است. مقدار ضریب نگه داشت کمتر در بخش عظیمی از حوزه نشان‌دهنده نفوذ کمتر و پتانسیل زیادی جهت ایجاد رواناب در این مناطق است. همین امر باعث افزایش سرعت ایجاد رواناب در هنگام بارندگی‌های شدید شده و شماره منحنی رواناب را افزایش می‌دهد. متوسط نوع مدیریت بعد از کالیبراسیون رواناب برای کل حوزه آبخیز بهشت‌آباد ۰/۱۳ است. با توجه به اینکه در این مدل تنها عامل تغییرات ماهانه شاخص سطح برگ (LAI) است، ضریب مدیریت تغییر زیادی را در طول یک سال نشان نمی‌دهد (شکل ۶).

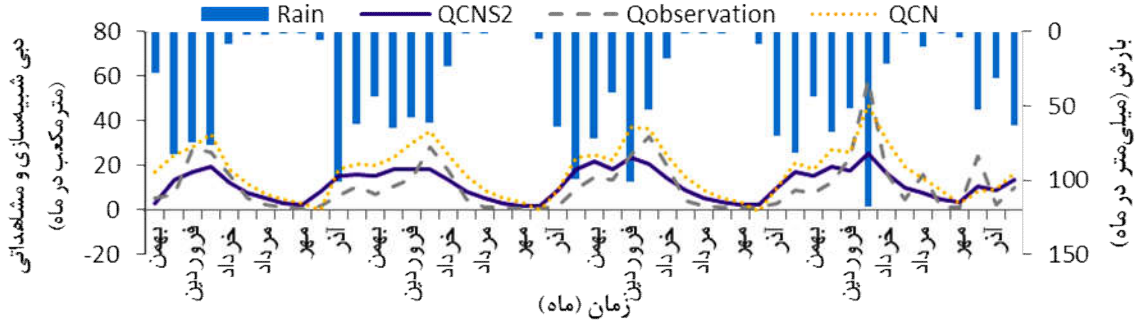
رواناب حوزه‌آبخیز در این مدل به روش شماره منحنی فازی شبیه سازی شده است. متوسط رواناب متوسط کل حوزه‌آبخیز بهشت‌آباد در دوره واسنجی ۱۸/۲۹ مترمکعب بر ثانیه در سال و در دورهٔ اعتبارسنجی ۱۱/۷۳ مترمکعب بر ثانیه در سال است.

با توجه به هیدروگراف دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی در دو دوره واسنجی (شکل ۷) و اعتبارسنجی (شکل ۸)، برای مقایسه روش قدیمی شماره منحنی (CN) با شماره منحنی فازی‌شده و اعمال اثر شیب بر روی آن با استفاده از مدل CNS2 نتایج حاصله از مدل رضایت بخش‌تر است و تطابق قابل قبولی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی نشان می‌دهد، به گونه‌ای که با افزایش بارش‌ها مقادیر دبی نیز روبه افزایش است در واقع تغییرات مکانی رواناب در گام زمانی ماهانه نشان می‌دهد که بیش‌ترین رواناب مربوط به ماه پربارش است. اما در شبیه‌سازی دبی‌های پیک اختلافاتی وجود دارد که می‌تواند متأثر از عوامل مختلفی مانند نحوهٔ محاسبه برف یا وجود کارست در این حوزه‌آبخیز باشد. جهت بررسی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب توسط مدل CNS2 در دو دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی علاوه‌بر نش–ساتکلیف از ضریب تبیین استفاده گردید. مقدار شاخص



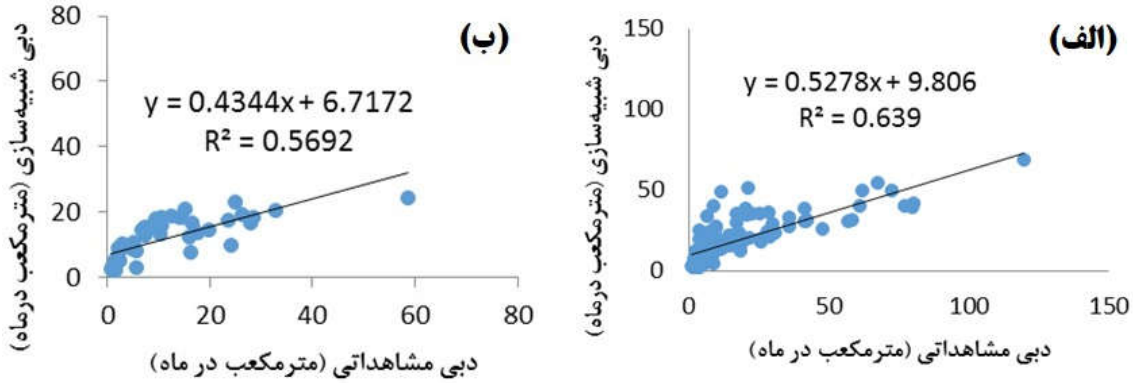
شکل ۷. هیدروگراف دبی شبیه‌سازی (دو روش CN و مدل CNS2) و مشاهداتی ماهانه در دوره واسنجی (۱۳۹۰-۱۳۸۱)

(رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۸. هیدروگراف دبی شبیه‌سازی (دو روش CN و مدل CNS2) و مشاهداتی ماهانه در دوره اعتبارسنجی (۱۳۹۴-۱۳۹۱)

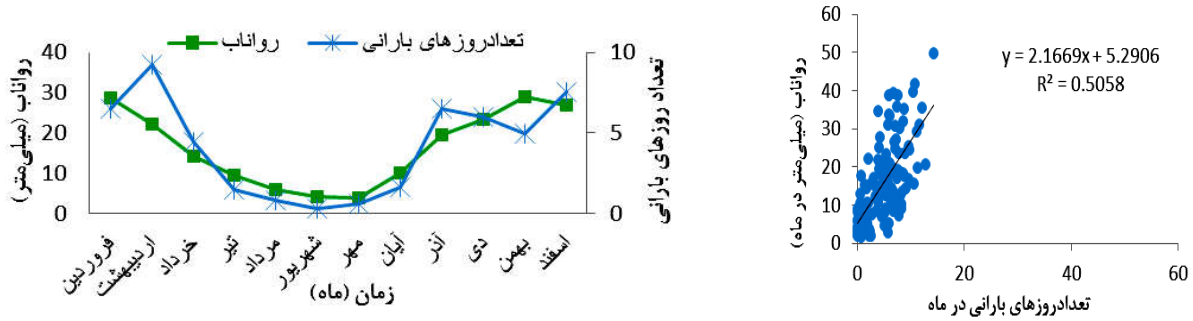
(رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۹. مقایسه دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره: الف) واسنجی و ب) اعتبارسنجی

نش جهت بررسی کارایی مدل CNS2 در دورهٔ واسنجی برابر ۰/۶ و توسط روش قدیمی شماره منحنی ۰/۵۲ برآورد گردید، همچنین، مقدار آن برای مدل CNS2 در دورهٔ اعتبارسنجی برابر ۰/۵۴ و برای روش CN برابر ۰/۴۲ محاسبه شد. همچنین مقدار ضریب تبیین برای مدل CNS2 در دوره واسنجی برابر ۰/۶۳ و در دورهٔ اعتبارسنجی برابر ۰/۵۶است (شکل ۹).

با توجه به قوانین فازی برای استخراج شماره منحنی، یکی از متغیرهای موثر در ایجاد آن تعداد روزهای بارانی بود که رابطه آن با



شکل ۱۰. نمودار تغییرات تعداد روزهای بارانی با رواناب (سال ۱۳۹۴-۱۳۸۱)

رواناب مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۰). با افزایش تعداد روزهای بارانی مقدار رواناب نیز سیر صعودی دارد به گونه‌ای که با کاهش تعداد روزهای بارانی در ماه‌های خرداد تا مهر مقدار رواناب نیز کاهش پیدا کرده است و ضریب تبیین ۰/۵ رابطه‌ای خطی بین این دو را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه با افزایش بارش مقدار رواناب نیز افزایش می‌یابد. در ماه‌های آبان تا اسفند روند بارش‌ها افزایشی است و میزان رواناب شبیه‌سازی توسط مدل نیز روند افزایشی را نشان می‌دهد و در کمبود بارش در ماه‌های خرداد تا مهر رواناب نیز تولید چندانی ندارد.

نتیجه‌گیری

صحت پیش‌بینی‌هایی که یک مدل انجام می‌دهد، بستگی به این موضوع دارد که اولاً ساختمان مدل تا چه حد خوب تعریف شده باشد و ثانیاً اینکه پارامترهای مدل تا چه حد به واقعیت نزدیک‌تر باشد. با گسترش روزافزون مدل‌های هیدرولوژیکی در مناطق مختلف دنیا، پذیرش عمومی مدل‌ها زمانی فراهم می‌شود که پارامترهای عمومی کمتری داشته باشد و واسنجی آن‌ها راحت‌تر انجام پذیرد. همچنین داده‌های ورودی به مدل در دسترس باشد و مدل برای شرایط آب و هوایی کشور ساخته شده باشد. که در ساخت مدل CNS2 در این پژوهش سعی شد تمامی موارد فوق به نحوی رعایت شود. همچنین روش شماره منحنی و منطق فازی نسبت به سایر روش‌های تجربی، به‌نسبت ساده بوده و بدون هیچگونه محدودیتی، می‌توان عوامل دیگری را برای محاسبه در آن دخالت داد. نتایج پژوهش نشان داد که سامانه استنتاج فازی می‌تواند با استفاده از متغیرهای زبانی (کم، متوسط، زیاد و ...)، برآورد کمی از داده‌ها ارائه نماید. به بیان دیگر این روش به‌طور همزمان قادر به بیان اطلاعات عددی و زبانی است. این روش می‌تواند مقدار خطای برآوردی را کاهش و برآورد بهتری از رواناب ارائه نماید. همچنین جهت محاسبه شماره منحنی از دو فاکتور جدید تعداد روزهای بارانی و ضریب تتای خاک استفاده شد و با اعمال اثر شیب به روش هنگ بر روی شماره منحنی دی‌فازی شده مقدار شماره منحنی حوزه نسبت به روش سنتی آن به واقعیت نزدیک‌تر بوده و رواناب بیش‌تری در منطقهٔ کوهستانی به‌دست می‌دهد. در حوزهٔ بهشت‌آباد بیش‌تر مساحت‌های کاربری اراضی به مرتع و مناطق لم‌یزرع تعلق دارد، بنابراین مشاهده شد، میزان رواناب تولیدی ناشی از آن در این مناطق بیش‌تر است و عدد عامل مدیریت در این مناطق به یک نزدیک‌تر است. اما با توجه به اینکه تنها عامل تغییردهنده مدیریت نقشه شاخص سطح برگ است، بنابراین عامل مدیریت تغییرات زیادی را طی یکسال نشان نمی‌دهد. با توجه به اینکه در نظرگرفتن سطح اثر یکسان در تهیه نقشه‌های بارش باعث بهبود نتایج شد، نتیجه‌گیری می‌شود باران عاملی مؤثر در این حوزه باشد. همچنین به دلیل اهمیت زیاد آب پایه در این حوزه آبخیز این عامل با استفاده از میزان نفوذ شبیه‌سازی مدل محاسبه و به دبی اضافه شد و جهت مقایسه تغییرات دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی استفاده شد. جریان سطحی در

هیدروگراف محاسبه شده اختلافاتی را در چگونگی روند محاسبات و مشاهدات نشان می‌داد که این اختلافات در ماه‌های سرد سال بیش‌تر بوده و در ماه‌های گرم سال کمتر است، اما در جریان زیرسطحی این انطباق مناسب نبود تا آنکه لحاظ ذخیره آب پایه و اضافه کردن آن به جریان کل به‌طور قابل توجهی در این حوزه به بهبود نتایج کمک کرد. استفاده از شماره منحنی فازی در قالب مدل شبیه‌ساز رسوب CNS2 امکان بررسی مکانی مؤلفه‌های هیدرلوژیکی را فراهم کرده است. با توجه به نبود داده‌های روزانه یا ساعتی در اکثر حوزه های آبخیز ایران، استفاده از گام زمانی ماهانه در این مدل امکان بررسی تغییرات فصلی از ضریب نگه‌داشت و رواناب نسبت به روش سنتی آن به وجود آورده است. همچنین در روش‌های دستی گذشته برای هر زیرحوزه یک شماره منحنی در نظر گرفته می‌شد و امکان بررسی سلولی فقط با GIS امکان‌پذیر بود. بنابراین، این مدل را یک نرم افزار متن‌باز (open source) قراردادیم تا کاربر بتواند تغییرات CN و R را برای محاسبه سلولی استفاده نماید.

منابع مورد استفاده

1. Abdollahi, K., I. Bashir, B. Verbeiren, M. Harouna, A. V. Griensven, M. Huysmans and O. Batelaan. 2017. A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
2. Akbari, A., A. S. Azizan and S. K. Ngien. 2016. Effect of slope Adjustment on curve number using global digital elevation data: new look into Sharply-Williams and Huang Methods". *In:* Second International Conference on Science, Engineering and Environment, Osaka, Japan.
3. Bauwe, A., P. Kahle and B. Lennartz. 2016. Hydrologic evaluation of the curve number and green and ampt infiltrations using SWAT. *Journal of Hydrology* 537:311-321.
4. Cheng-Chang, L., H. Jay and Y. Chu Wen Chen. 2013. A fuzzy inference system for the conjunctive use of surface and subsurface water. *Advances in Fuzzy Systems* 128393: 1-10.
5. Deng, W., G. Wang and X. Zhang. 2015. A novel hybrid on cloud model and fuzzy forecasting. *chemometrics and Intelligent Laboratory System* 149:39-49.
6. Fan, F. L., Y. B. Deng, X. F. Hu and Q. H. Weng. 2013. Estimating composite curve number using on improved SCS-CN method with remotely sensed variables in Guangzhou, China. *Remote Sensing* 5:1425-1438.
7. Gajbhiye, S., S. K. Mishra and A. Pandey. 2013. Effects of curve number for selected watersheds of Narmade basin. *International Journal of Environmental Sciences* 3:2034-3046.
8. Gundalia, M. and M. Dholakia. 2014. Impact of monthly curve number on daily runoff estimation for Ozat catchment in India. *Open Journal of Modern Hydrology* 4:144-155.
9. Huang, M., J. Gallichand, Zh. Wang and M. Goulet. 2006. A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes* 20 (3): 579-589.
10. Huang M., J. Gallichand, Cu. Dong., Zh. Wang and M. Shao. 2007. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes* 21 (11): 1471-1481.
11. Kang, Sh., X. Hao, R. Ding, L. Tong, F. Li and Y. Zhang. 2014. Variations of crop coefficient and its influencing factors in an arid advective cropland of northwest China. *Hydrological processes* 29 (2): 239-249.
12. Lotfi Zadeh. A. 1965. Fuzzy Sets and Systems. In: Fax J, (Ed.). System Theory. Brooklyn, NY: Polytechnic Press.
13. Mc Cuen, R. H. 2004. Hydrologic Analysis and Design. Prentice Hall, Upper Saddle River.
14. Mishra, S. K., P. Singh Vijay, J. J. Sansalone and V. Aravamuthan. 2003. A modified SCS-CN method: characterization and testing. *Water Resources Management* 17 (1): 37-68.
15. Mishra, S., M. Jain, P. Suresh Babu, K. Venugopal and S. Kaliappan. 2008. Comparison of AMC-dependent CN-conversion formulae. *Water Resource Management* 22(10):1409-1420.
16. Mostafazadeh, R., Sh. Mirzaei and P. Nadiri. 2018. Curve number determination using rainfall and runoff data and its variations with rainfall components in a forested watershed. *Water and Soil Science* 21(4): 15-28.
17. Musgrave, G.W. 1995. How Much of the Rain Enters the Soil? USDA, Yearbook of Agriculture, Water, Washington, DC.
18. Ponce, V.M. and Rh. Hawkins. 1996. Runoff curve number: has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)* 1(1):11-19.

19. Runkui, L., R. Xiaoping, Zh. A-Xing, L. Junzhi, B. Lawrence, S. Xianfeng. 2014. Increasing detail of distributed runoff modeling using fuzzy logic in curve number. *Environmental Earth Science* 73(7): 1-9.
20. Shirmohammadi, A., K. S. Yoon, W. J. Rawls and Oh. Smith. 1997. Evaluation of curve number procedures to predict runoff in GLEAMS. *Journal of American Water Resources Association* 33 (5):1069-1075.
21. Sharpley, A. N. and J. R. Williams. 1990. EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator: 1, Model Documentation. USDA Technical Bulletin No. 1768, Washington, D.C.
22. Soulis, K. X. and J. D. Valiantzas. 2012. SCS-CN Parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds: The two-CN System Approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 16:1001-1015.
23. Soil Conservation Service National Engineering Handbook. 1985. Section 4: Hydrology. Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C.
24. Soil Conservation Service. 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical release United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, USA.
25. Soil Conservation Service, USDA. 2004. National Engineering Handbook, 210-VI. Part630, Chapter7, Hydrologic Soil-Cover Complex. Natural Resources Conservation Services, Washington, DC.
26. Tahmasbi, T., M. Pajoohesh and Kh. Abdollahi. 2017. A Fuzzy inference system to investigate influencing factors of the sediment load in Alej-dam Basin using different operators. Master Thesis, Sharekord University, Shahrekord, Iran (In Farsi).
27. Van Mullem, J. A. 1991. Runoff and peak discharges using green-ampt infiltration model. *Journal of Hydrological Engineering* 117(3): 354-370.
28. Wang, F., G. Hall and N. Subaryono. 1990. Fuzzy information representation and processing in conventional GIS software: Data Base Design and Application. *International Journal of Geographical Information systems* 4(3): 261-283.
29. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA, Washington, D.C.
30. Young, D. F. and J. N. Carleton. 2006. Implementation of a probabilistic curve number method in the PRZM runoff model. *Environmental Modelling and Software* 21 (8): 1172-1179.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 2, Summer 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Efficiency of Fuzzy Curve Number on Monthly Runoff Simulation in Beheshtabad Watershed

T. Tahmasbi, Kh. Abdollahi and M. Pajoohesh[1*]

(Received: August 8-2021; Accepted: October 12-2021)

Abstract

The runoff curve number method is widely used to predict runoff and exists in many popular software packs for modeling. The curve number is an empirical parameter important but depends largely on the characteristics of soil hydrologic groups. Therefore, efforts to reduce this effect and extract more accurate soil information are necessary. The present study was conducted to integrate fuzzy logic for extraction runoff curve numbers. A new distribution model called CNS2 has been developed. In the first part of this research, the formulation and programming of the CNS2 model were done using the Python programming language environment, then the model was implemented in the Beheshtabad watershed. This model simulates the amount of runoff production in a watershed in the monthly time step with the fuzzy curve number and takes into account the factor of rainy days, the coefficient of management of the RUSLE-3D equation, and the soils theta coefficient. The results indicated that the model with Nash-Sutcliff 0.6 and the R^2 coefficient 0.63 in the calibration set and Nash index 0.53 and R^2 coefficient 0.56 in the validation set had appropriate efficiency in runoff simulation. The advantage of the model is that distributive and allows for the identification of areas with higher runoff production.

Keywords: CNS2 Model, Fuzzy curve number, Runoff, Behshtabad watershed

1. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resousces and Earth Science, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
*: Corresponding author, Email: drpajoohesh@gmail.com