

ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان جریان زیرسطحی با استفاده از مدل WetSpa، مطالعه موردی: حوزه آبخیز هرو-دهنو

سحر دارایی^{۱*}، عبدالرضا بهره‌مند^۲ و حمید کریمی^۳

^۱ کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۲ دانشیار، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و ^۳ کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳

چکیده

تغییرات کاربری اراضی موجب تغییر مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی و افزایش و یا کاهش مقادیر رواناب می‌شوند. رواناب زیرسطحی یکی از بخش‌های مهم رواناب در مناطق مرطوب به‌خصوص مناطق شیب‌دار با پوشش گیاهی عالی است. با توجه به مزیت‌ها و قابلیت‌های مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی، این مدل‌ها برای بررسی تغییرات کاربری اراضی و برآورد کمی این تغییرات مناسب هستند. در این تحقیق، به ارزیابی اثرات سناریوهای تغییر کاربری اراضی بر روی میزان جریان زیرسطحی با استفاده از مدل WetSpa در پایه زمانی روزانه در حوزه آبخیز هرو-دهنو با مساحت ۲۶۳/۴۳ کیلومتر مربع پرداخته شده است. برای اجرای مدل از داده‌های هیدرومتئورولوژی روزانه از سال آبی ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ شامل داده‌های تبخیر، بارش و دما به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. مدل ارتفاعی رقومی، کاربری اراضی و بافت خاک نقشه‌های ورودی مدل هستند. طبق پتانسیل حوزه آبخیز هرو-دهنو، چهار سناریو تغییر کاربری اراضی در محیط نرم‌افزار Arc GIS طراحی و برای شبیه‌سازی به مدل واسنجی شده وارد شدند. برای استفاده از مدل برای شبیه‌سازی اثر سناریوهای تغییر کاربری اراضی، آزمون تحلیل حساسیت و عدم قطعیت به‌صورت دستی و سپس با برنامه بهینه‌سازی PEST انجام شد. با مقایسه هیدروگراف خروجی جریان زیرسطحی در وضعیت موجود با نتایج شبیه‌سازی شده از چهار سناریو، تغییرات در فرایندها و پارامترهای هیدرولوژیکی بررسی شد. در این تحلیل مشخص شد که بهبود کاربری حوضه باعث افزایش مقادیر جریان زیرسطحی، افزایش نفوذ عمقی، کاهش رواناب سطحی و افزایش زمان تمرکز شده و از طرفی با تخریب منطقه در جهت قهقرا مقدار جریان زیرسطحی و مقادیر نفوذپذیری و آب‌گذری به آبخوان سطحی و عمیق کاهش یافته و به حجم رواناب افزوده می‌شود. لذا، لزوم حفظ کاربری فعلی حوضه و بهبود و اصلاح آن، یکی از راه‌کارهای اساسی در جهت مدیریت رواناب سطحی در حوزه آبخیز مورد مطالعه است.

واژه‌های کلیدی: جریان زیرسطحی، سناریوی تغییر کاربری اراضی، مدل هیدرولوژیکی توزیعی، مناطق مرطوب، واکنش هیدرولوژیکی

مقدمه

هیدرولوژیکی حوضه است. پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به‌عنوان شاخص جامعی از شرایط فعلی حوزه آبخیز و پیش‌بینی کننده اثرات تغییرات کاربری اراضی بر

هدف اصلی از مدیریت زمین بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی در تغییرات متناسب با پاسخ

Smedt, ۲۰۰۹). به منظور مطالعه اثرات تغییر کاربری اراضی در محدوده حوضه‌ها و برآورد کمی این تأثیر، شبیه‌سازی به‌وسیله مدل‌سازی رایانه‌ای برای کمتر از ۴۰ سال است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارزیابی اثرات کاربری اراضی بر واکنش‌های هیدرولوژیکی منطقه مثل رواناب و سیل، از مباحث مهم مورد بحث در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است و سرفصل بسیاری از تحقیقات اخیر را تشکیل می‌دهد (Bahremand, ۲۰۰۶). برای پاسخ به سؤالات مربوط به اثرات تغییر کاربری اراضی و مدیریت آبی، مدل‌های هیدرولوژیکی ابزاری مفید هستند (Schmalz و Fohrer, ۲۰۰۹). در این پژوهش، از مدل توزیعی-مکانی WetSpa بدین منظور استفاده شده است. در این زمینه پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. Bahremand (۲۰۰۶)، اثرات تغییر کاربری اراضی بر میزان رواناب سطحی و هیدروگراف را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa بررسی نمود. اثر جنگل‌کاری بر سیل در سه سناریو در دو حوضه رودخانه هورنارد و مارگسانی در کشور اسلواکی^۱ شبیه‌سازی شد. هیدروگراف روزانه با معیار ناش-ساتکلیف^۲ چند معیاره با دقت خوبی بین ۰/۷۵ تا ۰/۸ شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از این بود که جنگل‌کاری و احیای اراضی دبی پیک را ۱۲ درصد کاهش داده و زمان رسیدن به اوج ۱۴ ساعت افزایش یافت. Rwebatula و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa به پیش‌بینی رواناب در رودخانه Simiyu از شاخه‌های دریاچه ویکتوریا پرداختند. معیار خطای مدل در محاسبه بیلان آبی و ناش-ساتکلیف به ترتیب ۲/۴ و ۵۷ درصد به‌دست آمد. نتایج حاصل از آزمون مدل نشان داد که مدل به‌خوبی قابلیت روندیابی جریان را در رودخانه دارد. Wang و همکاران (۲۰۰۸)، با مدل‌سازی اثر گزینه‌های مختلف کاربری اراضی در حوضه‌ای در چین به این نتیجه رسیدند که کاربری‌های اراضی مختلف اثرات مختلفی بر مقدار رواناب و آب زیرزمینی حوضه دارد و تبدیل اراضی جنگلی به اراضی مرتعی در حوضه منجر به افزایش میزان رواناب سالانه و کاهش آب زیرزمینی

کمیت و کیفیت آب است (Hernandez و همکاران, ۲۰۰۰). درک رابطه بین تغییرات کاربری اراضی و عوامل به‌وجود آورنده آن و اثرات ثانوی آن بر رژیم هیدرولوژیکی، اطلاعات ضروری برای برنامه‌ریزی استفاده از زمین و مدیریت پایدار منابع طبیعی فراهم می‌کند (Palamuleni و همکاران, ۲۰۱۱). تغییر سرزمین در ابعاد مختلف بر عملکرد حوزه‌های آبخیز تأثیرگذار بوده، پیامدهای متنوعی را به دنبال دارد. این تغییرات در بیشتر حالات می‌توانند دارای پیامدهای ناخوشایندی روی خاک باشند. بنابراین، ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی به‌منظور مدیریت مناسب و جلوگیری از تخریب و هدر رفت خاک در مناطق مختلف امری ضروری است (Salvati و همکاران, ۲۰۱۰). کاربری اراضی بر روی فرایندهای نفوذ و توزیع مجدد آب خاک اثر می‌گذارد، مخصوصاً هدایت هیدرولیکی اشباع، تحت تأثیر ریشه گیاهان و خلل و فرج ایجاد شده به‌وسیله جانوران خاکزی قرار می‌گیرد (Cooper و Ragab, ۱۹۹۳). تغییرات شدید کاربری اراضی در کوتاه‌مدت باعث اختلال در سامانه هیدرولوژیکی، هم به‌صورت افزایش مقدار آب از طریق سیلاب و هم به‌صورت کاهش آب از طریق کاهش و یا حذف جریان کمینه می‌شود (Croke و همکاران, ۲۰۰۴). در این مورد تغییرات کاربری اراضی علاوه بر تغییر جریان سطحی بر جریان زیرسطحی و آب زیرزمینی نیز تأثیرگذار است (Palamuleni و همکاران, ۲۰۱۱). جریان زیرسطحی کم‌عمق افقی نیز یکی از اجزاء کلیدی در تعادل آب و خاک به حساب می‌آید و عبارت است از میزان آبی که به سطح خاک نفوذ کرده، در طول لایه بالایی خاک به‌طور افقی شروع به حرکت کرده تا جایی که وارد یک کانال می‌شود. این جریان شامل جریان لاش‌برگ، جریان برگشتی، جریان غیر اشباع زیرقشری، جریان میانی اشباع و ... بوده، به جریان آب زیرزمینی وارد نمی‌شود. به‌دلیل زمان تأخیر جریان، اثر جریان زیرسطحی معمولاً در شکل شاخه نزولی هیدروگراف مشاهده می‌شود، اما می‌تواند بخشی از دبی پیک خروجی حوضه را نیز شامل شود که این موضوع به‌خصوص در مناطق گرم و مرطوب با شیب تند و پوشش گیاهی جنگلی بیشتر دیده می‌شود (Zeinivand و De

¹ Margecany and Hornard Watersheds, Slovakia

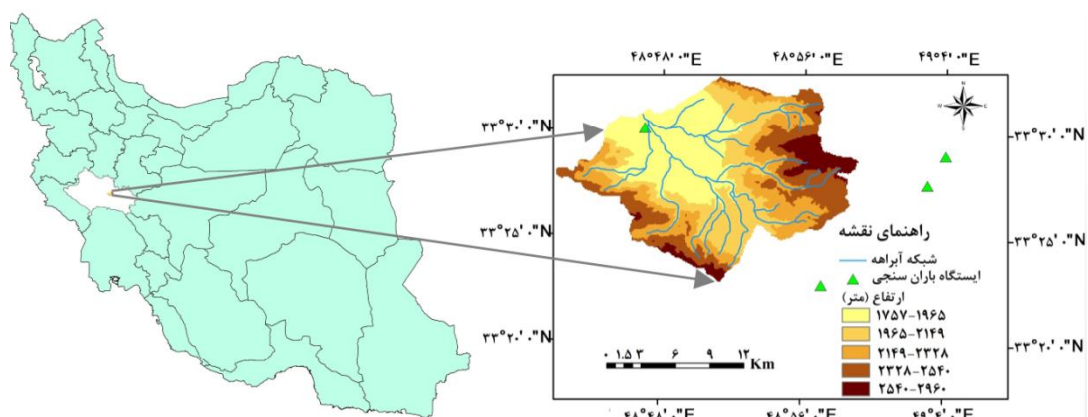
² Nash and Sutcliffe

اثر تغییرات کاربری اراضی بر رواناب حوضه و پارامترهای مربوط به آن را دارد. هدف از این تحقیق، ارزیابی اثرات سناریوهای تغییر کاربری اراضی بر روی میزان جریان زیرسطحی با استفاده از مدل WetSpa در حوزه آبخیز هرو-دهنو، تحت چهار سناریوی مدیریتی متفاوت در دو گرایش مثبت و منفی است. بعد از اجرای مدل WetSpa برای هر سناریو تغییرات ایجاد شده در مقادیر جریان زیرسطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسبی برای مدیران منابع آب در جهت مدیریت بهتر منابع آب و سرزمین در منطقه مورد مطالعه باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز هرو-دهنو با مساحت ۲۶۳/۴۳ کیلومتر مربع در محدوده شهرستان خرم‌آباد در استان لرستان قرار دارد. این حوضه یکی از سرشاخه‌های رودخانه کرخه است که آب آن به خلیج فارس می‌ریزد. زیرحوضه هرو-دهنو حد فاصل $33^{\circ} 22'$ الی $33^{\circ} 32'$ عرض شمالی و $48^{\circ} 41'$ الی $48^{\circ} 59'$ طول شرقی قرار دارد. حداکثر، حداقل و میانگین ارتفاع حوزه آبخیز دهنو به‌ترتیب ۲۹۶۰، ۱۷۵۷ و ۲۱۵۲ متر است (Karimi, ۲۰۱۵). شکل ۱، موقعیت جغرافیایی، توپوگرافی، ایستگاه‌های باران‌سنجی و شبکه آبراهه حوزه آبخیز دهنو در ایران و استان لرستان را نشان می‌دهد.

حوضه می‌شود. Bayat و همکاران (۲۰۱۰)، مدل WetSpa را برای تحلیل اثرات کاربری اراضی بهینه بر روی جریان روزانه حوزه آبخیز مرک در استان کرمانشاه اجرا کردند. کارایی مدل در مرحله واسنجی ۰/۸۱ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۷۷ به‌دست آمد. نتایج نشان داد که مدل برای بررسی تغییر کاربری اراضی و اثرات بهینه‌سازی آن، کارایی قابل قبولی دارد. Azin Mehr (۲۰۱۳) با استفاده از مدل WetSpa اثر سناریوهای کاربری اراضی را بر هیدروگراف جریان در حوزه آبخیز دینور، شبیه‌سازی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که انطباق خوبی بین هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با توجه به معیار ناش-ساتکلیف ۰/۶۶ وجود دارد. هشت سناریوی تغییر کاربری در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 طراحی شد و نتایج نشان داد که شبیه‌سازی این تغییرات به‌وسیله مدل قابل قبول است. Javidan (۲۰۱۳) مدل WetSpa را برای ارزیابی اثرات سناریوهای تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل در حوزه آبخیز زیارت مورد استفاده قرار داد. مدل هیدروگراف ساعتی را با توجه به معیار ناش-ساتکلیف ۰/۶۸ در مرحله واسنجی و ۰/۷۴ در مرحله اعتبارسنجی پیش‌بینی کرد. طی پنج سناریو، تغییرات در فرایندها و پارامترهای هیدرولوژیکی بررسی شد و نتایج نشان داد که شبیه‌سازی این تغییرات در سناریوها به‌وسیله مدل قابل قبول است. نتایج تحقیقات ذکر شده نشان می‌دهد که مدل WetSpa به‌خوبی قابلیت شبیه‌سازی



شکل ۱- مدل ارتفاعی رقومی، موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و شبکه آبراهه همراه با موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (Karimi, ۲۰۱۵)

ایستگاه هیدرومتری هرو-دهنو به عنوان خروجی مرز حوضه به روش خودکار در نرم افزار ArcGIS 9.3 ترسیم شد. خصوصیات فیزیوگرافی منطقه که در محیط GIS به دست آمده است، در جدول ۱ ارائه شده است.

خصوصیات فیزیوگرافی، ویژگی های اقلیمی، بافت خاک و کاربری اراضی منطقه: مرز هیدرولوژیکی حوزه آبخیز هرو-دهنو با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ رقومی شده (سازمان نقشه برداری کشور) و نرم افزار ArcGIS 9.3 تعیین شد. با قرار دادن

جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافی حوضه هرو-دهنو (Karimi, ۲۰۱۵)

نوع عارضه	مقدار
مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	۲۶۳/۴۳
محیط حوضه (کیلومتر)	۸۰/۹۳
ارتفاع بیشینه حوضه (متر)	۲۹۶۰
ارتفاع کمینه حوضه (متر)	۱۷۵۷
ارتفاع متوسط حوضه (متر)	۲۱۵۲
طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	۲۶/۲۹

که انواع و مقدار مساحت هر کاربری در جدول ۳ ارائه شده است. نقشه کاربری اراضی منطقه (تهیه شده در اداره منابع طبیعی استان لرستان) در شکل ۲ ارائه شده است. برای استفاده نقشه در مدل WetSpa این نقشه با سامانه سلولی ۱۰۰×۱۰۰ تهیه شده و بر اساس طبقات کاربری مدل WetSpa که ۱۷ طبقه است، کدبندی شده که در جدول ۴ کدهای مربوط به هر طبقه ارائه شده است.

این حوضه متأثر از رژیم آب و هوایی زاگرس در غرب و جنوب غرب ایران است و حدوداً هشت ماه از سال از اوایل مهر ماه تا اواخر اردیبهشت ماه بارش های جوی و در زمستان ریزش برف در سطح این نواحی حکم فرما است. مشخصات ایستگاه های هواشناسی و هیدرومتری حوزه آبخیز هرو-دهنو در جدول ۲ ارائه شده است.

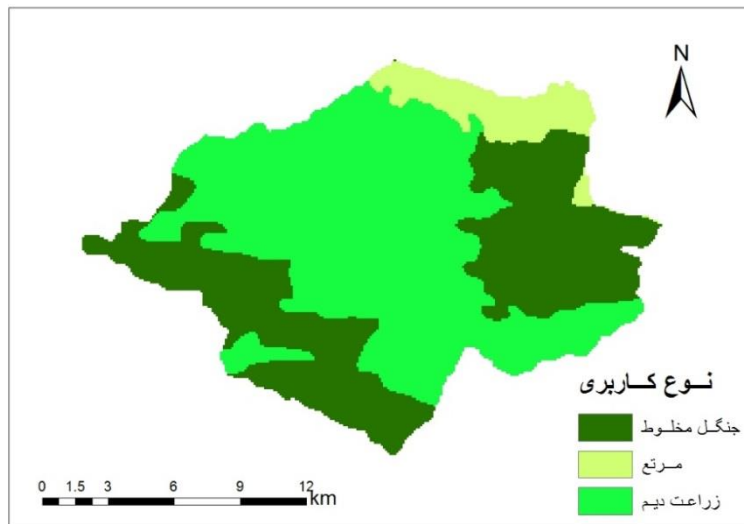
داده ها: این حوضه دارای سه نوع کاربری اراضی است

جدول ۲- مشخصات ایستگاه های هواشناسی هیدرولوژی داخل و اطراف حوزه آبخیز هرو-دهنو

کد	ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
-	هواشناسی دورود	باران سنجی، تبخیرسنجی	۱۵۲۶	۴۹° ۴'	۳۲° ۲۹'
۲۱-۱۶۷	هرو دهنو	باران سنجی، تبخیرسنجی، دماسنجی، دبی سنجی	۱۸۰۰	۴۸° ۴۶'	۳۳° ۳۰'
۲۱-۲۸۱	چم چیت	باران سنجی	۱۲۹۰	۴۸° ۵۷'	۳۳° ۲۲'
۲۱-۲۶۷	تیره دورود	باران سنجی	۱۴۵۰	۴۹° ۳'	۳۳° ۲۷'

جدول ۳- کاربری اراضی حوزه آبخیز دهنو (اداره منابع طبیعی استان لرستان)

کاربری اراضی	سطح (Km ²)
جنگل مخلوط	۱۰۰/۲۸
اراضی دیم	۱۴۳/۸۳
مرتع	۱۹/۳۲



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز هرو-دهنو

جدول ۴- پارامترهای پیش فرض طبقات کاربری اراضی (Zeinivand, ۲۰۰۹)

دسته	طبقات	عمق ریشه	ضریب مانینگ	ظرفیت برگابی (میلی متر)	حداکثر	حداقل
۱	درختان سوزنی برگ همیشه سبز	۱	۰/۴۰	۲	۰/۵	
۲	درختان پهن برگ همیشه سبز	۱	۰/۶۰	۳	۰/۵	
۳	درختان سوزنی برگ خزان کننده	۱	۰/۴۰	۲	۰/۵	
۴	درختان پهن برگ خزان کننده	۱	۰/۸۰	۳	۰/۵	
۵	جنگل مخلوط	۱	۰/۵۵	۳	۰/۵	
۶	بوته زارهای بسته	۰/۸	۰/۴۰	۳	۰/۵	
۷	بوته زار باز	۰/۸	۰/۴۰	۲	۰/۵	
۸	ساوان مرطوب	۱	۰/۵۰	۳	۰/۵	
۹	دشت	۰/۸	۰/۴۰	۲	۰/۵	
۱۰	مرتع	۰/۸	۰/۳۰	۲	۰/۵	
۱۱	تالاب دائم	۰/۵	۰/۵۰	۱	۰/۲	
۱۲	زراعت	۰/۸	۰/۳۵	۲	۰/۵	
۱۳	شهری	۰/۵	۰/۰۵	۰	۰	
۱۴	پوشش گیاهی طبیعی	۰/۸	۰/۳۵	۲	۰/۵	
۱۵	برف و یخ	۰/۰۱	۰/۰۵	۰	۰	
۱۶	زمین لخت	۰/۵	۰/۱۰	۱	۰/۲	
۱۷	سطوح آبی	۰/۱	۰/۰۵	۰	۰	

خاک در آزمایشگاه خاک شناسی به دست می آید (تهیه شده در اداره منابع طبیعی استان لرستان). این حوضه دارای چهار نوع بافت خاک شنی لومی، شنی رسی لومی، رسی لومی و رسی است که نوع و مقدار مساحت آن ها در جدول ۵ ارائه شده است. استاندارد مثلث طبقه بندی بافت خاک USDA که از ۱۲ طبقه تشکیل شده است، مبنای تهیه نقشه بافت خاک در

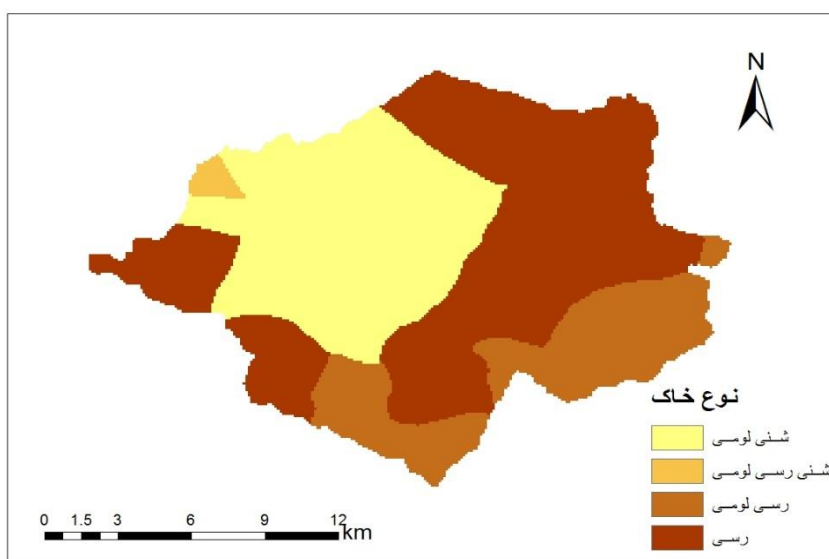
مدل رقومی ارتفاعی: مدل ارتفاعی رقومی با سامانه سلولی ۱۰۰×۱۰۰، ایجاد و سپس برای هماهنگ شدن با نرم افزار ArcView به فایل ASCII تبدیل شد. شکل ۱، مدل رقومی ارتفاعی منطقه را نمایش می دهد.

نقشه بافت خاک: بافت خاک حوزه آبخیز با توجه به اطلاعاتی تهیه می شود که از آزمایش پروفیل سطحی

جدول ۵- انواع بافت خاک حوزه آبخیز هرو-دهنو و مساحت مربوط به آن‌ها (اداره منابع طبیعی استان لرستان)

بافت خاک	سطح (Km ²)
شنی لومی	۸۶/۳۲
شنی رسی لومی	۲/۷
رسی لومی	۵۰/۱۳
رسی	۱۲۴/۲۶

مدل WetSpa است. طبقه‌بندی بافت خاک در این روش بر اساس درصد رس، سیلت و ماسه مشخص می‌شود. برای استفاده از نقشه بافت خاک در مدل WetSpa، به هر نوع بافت خاک یک کد عددی که کدهای مربوط به مدل است، اختصاص می‌یابد. سامانه سلولی ۱۰۰×۱۰۰ در نقشه بافت خاک نیز منطبق می‌شود. مقادیر قراردادی جدول بافت خاک در جدول ۶ مشاهده می‌شود. شکل ۳ نقشه بافت خاک منطقه را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- نقشه بافت خاک حوزه آبخیز هرو-دهنو

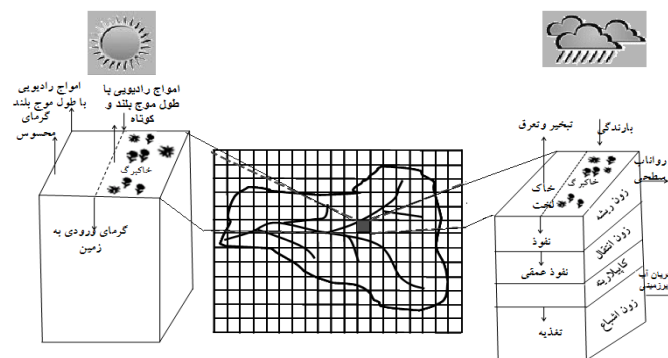
جدول ۶- پارامترهای پیش‌فرض طبقات بافت خاک (Zeinivand, ۲۰۰۹)

دسته	بافت خاک	رطوبت باقی‌مانده (m ³ m ⁻³)	نقطه پژمردگی (m ³ m ⁻³)	ظرفیت زراعی (m ³ m ⁻³)	تخلخل (m ³ m ⁻³)	هدایت هیدرولیکی (mmh ⁻¹)
۱	شن	۰/۰۲۰	۰/۰۲۴	۰/۰۶۲	۰/۴۳۷	۲۰۸/۸۰
۲	شنی لومی	۰/۰۳۵	۰/۰۴۷	۰/۱۰۵	۰/۴۳۷	۶۱/۲۰
۳	لومی شنی	۰/۰۴۱	۰/۰۸۵	۰/۱۹۰	۰/۴۵۳	۲۵/۹۲
۴	لومی سیلتی	۰/۰۱۵	۰/۱۳۵	۰/۲۸۴	۰/۵۰۱	۱۳/۳۲
۵	سیلتی	۰/۰۱۵	۰/۱۲۶	۰/۲۸۵	۰/۴۸۲	۶/۸۲
۶	لومی	۰/۰۲۷	۰/۱۱۶	۰/۲۳۲	۰/۴۳۶	۵/۵۸
۷	لومی رسی شنی	۰/۰۶۸	۰/۱۳۶	۰/۲۲۴	۰/۳۹۸	۴/۳۲
۸	لومی رسی	۰/۰۴۰	۰/۲۱۰	۰/۳۴۲	۰/۴۷۱	۲/۳۰
۹	رسی لومی	۰/۰۷۵	۰/۱۸۷	۰/۳۱۰	۰/۴۶۴	۱/۵۱
۱۰	رسی شنی	۰/۱۰۹	۰/۲۲۱	۰/۳۲۱	۰/۴۳۰	۱/۱۹
۱۱	رسی سیلتی	۰/۰۶۵	۰/۲۵۱	۰/۳۷۱	۰/۴۷۹	۰/۹۰
۱۲	رسی	۰/۰۹۰	۰/۲۵۱	۰/۳۸۷	۰/۴۷۵	۰/۶۰

داده‌های اقلیمی: داده‌های هواشناسی مورد استفاده

در این بررسی، از سازمان هواشناسی کل کشور،

سازمان تماب و سازمان آب منطقه‌ای جمع‌آوری شد. در تحقیق حاضر از داده‌های چهار ایستگاه باران‌سنجی، یک ایستگاه دماسنجی و دو ایستگاه تبخیرسنجی استفاده شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل، آمار دبی مشاهداتی روزانه در خروجی حوزه آبخیز در ایستگاه هیدرومتری دهنو



شکل ۴- ساختار مدل WetSpa (Liu و De Smedt، ۲۰۰۴)

پایه شبیه‌سازی مدل WetSpa، شبیه‌سازی در سطح سلولی است. این مدل با دخالت دادن روابط فیزیکی، تجربی و عوامل آب و هواشناسی (بارش، دما و تبخیر) تمامی فرایندهای هیدرولوژیکی شامل مقادیر بارش باران و برف، ذخیره برگابی گیاهان، نفوذ عمقی، ذخیره چالابی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، بیلان آب، جریان آب زیرزمینی، جریان زیرسطحی و رواناب سطحی را شبیه‌سازی می‌کند. ورودی‌های مدل شامل مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، نقشه بافت خاک منطقه، نقشه کاربری اراضی و داده‌های آب و هواشناسی شامل بارش، تبخیر و دما به‌صورت روزانه و داده‌های دبی متوسط روزانه است. بیلان آبی حوضه برای بررسی تغییرات آبی سامانه هیدرولوژیکی و همچنین، به‌عنوان وسیله‌ای برای تعیین کارایی مدل است که با توجه به نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین می‌شود. معادله عمومی بیلان آب حوضه به‌صورت زیر است.

$$P = RT + ET + \Delta SS + \Delta SG \quad (1)$$

که در آن، P بارش کل حوضه در طول دوره
شیشه‌سازی (میلی‌متر)، RT و ET رواناب کل و تبخیر و

هدایت هیدرولیکی جانبی بزرگتر به صورت جریان‌های جانبی حرکت می‌کند، تا به صورت جریان‌های عمودی. در مدل، بستر خاک به صورت یکنواخت فرض می‌شود، اما در واقعیت پروزیت و قابلیت نفوذ خاک با وزن خاک در اعماق معین و جابه‌جاشدگی مواد خاک طی نفوذ عمقی به جریان زیرسطحی جانبی، میل به کاهش دارد. علاوه بر این الحاق سریع آب موجود خاک به رودخانه در اثر کانال‌های ریشه، تونل‌های جانوران و یا حفره‌های ناشی از فرسایش زیرسطحی ممکن است پیک جریان را بحرانی جلوه دهد. برای محاسبه این اثرات یک عامل مقیاس برای هدایت هیدرولیکی جانبی در محاسبه جریان زیرسطحی در مدل به کار گرفته می‌شود. این عامل معمولاً بزرگتر از یک است و با مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی واسنجی می‌شود.

معیارهای ارزیابی دقت مدل WetSpa

بایاس مدل (MB): اختلاف میانگین نسبی بین دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده است. مقدار ایده‌آل این معیار (رابطه ۳) صفر است و مقادیر کوچک آن نشان‌دهنده نتایج مطلوب مدل‌سازی است.

معیار ناش-ساتکلیف (NSE): یک ضریب بی‌بعد است که تحت عنوان ناش-ساتکلیف معروف است. این معیار (رابطه ۴) شامل استاندارد واریانس باقی‌مانده‌ها است و دقت شبیه‌سازی مدل را نشان می‌دهد. معیار ناش-ساتکلیف از مقادیر منفی بی‌نهایت تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک شود، نشان‌دهنده تناسب بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی شده است.

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Si} - Q_{Oi})}{\sum_{i=1}^n Q_{Oi}} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Si} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - \overline{Q_O})^2} \quad (4)$$

که در آن‌ها، Q_{Si} دبی شبیه‌سازی شده، Q_{Oi} دبی مشاهداتی در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه)، $\overline{Q_O}$ نشان‌دهنده میانگین جریان مشاهداتی، N تعداد گام‌های زمانی و Q_O دبی اندازه‌گیری شده (مترمکعب بر ثانیه) هستند.

می‌تواند بخشی از دبی پیک خروجی حوضه به‌خصوص در مناطق مرطوب با شیب تند و پوشش گیاهی جنگلی را نیز شامل شود. در این مدل، فرض شده که جریان زیرسطحی پس از فرایند نفوذ عمقی شکل می‌گیرد و زمانی که میزان رطوبت خاک از ظرفیت زراعی کم‌تر شود، متوقف می‌شود. مقدار جریان زیرسطحی خروجی از هر سلول به‌وسیله رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$RI_i(t) = K_i D_i S_i k[\theta_i(t)] \Delta t / W_i \quad (2)$$

که در آن، $RI_i(t)$ مقدار جریان زیرسطحی خروجی از هر سلول (میلی‌متر) در گام زمان Δt (ساعت)، D_i عمق ریشه (متر)، S_i شیب سلول (متر در متر)، $k[\theta_i(t)]$ هدایت هیدرولیکی مؤثر سلول تحت محتوای رطوبت $\theta_i(t)$ (متر مکعب در متر مکعب)، W_i عرض سلول (متر) و K_i عامل مقیاس وابسته به کاربری زمین هستند. در مناطق با رطوبت بالا، شیب تند و پوشش گیاهی مناسب، جریان زیرسطحی به سرعت تشکیل می‌شود. مدل بیش از ۲۲ پارامتر توزیعی (نقشه) دارد که به‌وسیله خود مدل محاسبه می‌شوند و هرگز واسنجی نمی‌شوند و همچنین، ۱۱ پارامتر عمومی دارد که فقط این پارامترها در معرض واسنجی قرار می‌گیرند. پارامترهای عمومی مدل عبارت‌اند از: عامل مقیاس برای محاسبات جریان زیرسطحی (K_i)، ضریب افت آب‌های زیرزمینی (K_g)، ذخیره اولیه آب‌های زیرزمینی (G_0)، ضریب درجه روز-دما (K_{snow})، ضریب درجه روز-باران (K_{rain})، مؤلفه رواناب سطحی برای شدت بارندگی نزدیک صفر (K_{run})، شدت بارندگی مربوط به توان یک رواناب سطحی (P_{max})، عامل تصحیح برای تبخیر و تعرق پتانسیل (K_{ep})، مقدار رطوبت نسبی اولیه (K_{ss})، بیشترین ذخیره آب زیرزمینی (G_{max})، دمای پایه ذوب برف (T_0).

معرفی پارامتر مرتبط با جریان زیرسطحی (عامل

مقیاس K_i): جریان زیرسطحی یکی از مؤلفه‌های تأثیرگذار در مقدار رواناب است. این مسئله در مناطق با اقلیم مرطوب، شیب‌دار و با پوشش گیاهی خوب حساسیت بیشتری پیدا می‌کند. Dingman (۱۹۹۴) اشاره می‌کند که با توجه به ناهمگنی محیط و مقادیر هدایت هیدرولیکی متفاوت، آب موجود در خاک تحت

اجرای مدل: در این مطالعه از نقشه‌های توزیعی- مکانی پارامترهای هیدرولوژیک و همچنین، از داده‌های اقلیمی یک دوره آماری چهار ساله در پایه زمانی روزانه استفاده شد. داده‌های سه سال (۱۳۸۵/۰۷/۰۱ تا ۱۳۸۸/۰۶/۳۱) برای دوره واسنجی و داده‌های سال چهارم (۱۳۸۸/۰۷/۰۱ تا ۱۳۸۹/۰۶/۳۱) برای دوره اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. بعد از تهیه نقشه‌های پایه در نرم‌افزار ArcGIS9.3، نقشه‌ها به نرم‌افزار ArcView منتقل شد و سایر نقشه‌های پارامترهای رقومی-هیدرولوژیکی (۳۰ نقشه)، بر اساس این سه نقشه پایه و همچنین، با ورود داده‌های اقلیمی بالا و جدول‌های ویژه مورد استفاده مدل WetSpa، ساخته شدند. واسنجی مدل به صورت واسنجی دستی و خودکار با استفاده از برنامه بهینه‌سازی PEST انجام شد. نتایج شبیه‌سازی جریان زیرسطحی با کاربری فعلی با نتایج شبیه‌سازی از هر سناریو مقایسه شد. هیدروگراف جریان زیرسطحی برای هر سناریو رسم و سناریوها مقایسه شدند.

سناریوهای مختلف کاربری اراضی: GIS ایزاری قدرتمند برای جمع‌آوری، تحلیل و تصمیم‌گیری‌های پیچیده است که عموماً برای مدیریت اکوسیستم پذیرفته شده است (Miller و همکاران، ۲۰۰۷). به منظور برنامه‌ریزی برای آینده، با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی و نیمه‌توزیعی می‌توان قادر به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در بلندمدت بر اکوسیستم بود. در این مطالعه، برای پیش‌بینی تغییرات هیدرولوژیکی حوضه در آینده چهار سناریو در جهت گرایش مثبت و منفی با توجه به قابلیت منطقه، توپوگرافی، نوع خاک و اقلیم آن در نظر گرفته شد و نقشه کاربری اراضی متناظر در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 اصلاح و وارد مدل شد. با تغییر مساحت انواع کاربری و افزودن یا حذف کاربری‌های فعلی به طور منطقی برای هر سناریو، نقشه کاربری جدید ایجاد و مدل در هر سناریو با نقشه کاربری جدید اجرا شد. در نهایت خروجی مدل که مقادیر انواع جریان از جمله جریان زیرسطحی است، بر مبنای گزینه‌های مختلف مدیریت اراضی استخراج و مورد تجزیه و

تحلیل قرار گرفت. سناریوی اول، سناریوی شاهد است که با کاربری فعلی و با فرض حفظ کاربری‌های موجود تهیه شد. با توجه به استعداد منطقه و قابلیت اراضی و شرایط اقلیمی چهار سناریو تهیه و بررسی شد.

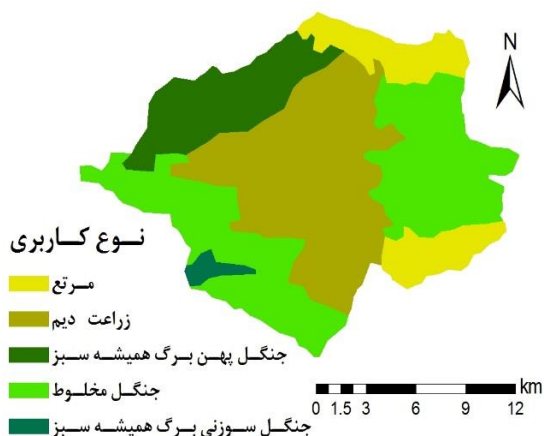
در سناریوی مثبت یک، کاربری‌ها به طور مثبت تغییر کرده به طوری که ۱۰/۱۲ درصد از اراضی زراعی دیم در جنوب منطقه به اراضی جنگلی و ۱۲/۴۷ درصد دیگر از این اراضی زراعی در شمال و جنوب غرب منطقه به مرتع تبدیل و ۴۸/۴۷ درصد به مساحت اراضی مرتعی اضافه شد.

در سناریوی مثبت دو، ۲۵/۷۲ درصد از مساحت اراضی زراعی دیم در شمال حوضه به جنگل پهن‌برگ همیشه سبز و ۲/۵۴ درصد از این اراضی زراعی در جنوب غربی حوضه به جنگل سوزنی برگ همیشه سبز تبدیل شد و مجموعاً میزان اراضی جنگلی حوضه ۴۱/۰۶ درصد افزایش یافت. همچنین، میزان جزئی اراضی مرتعی در شرق حوضه به اراضی جنگلی تغییر کاربری یافت و میزان ۸/۹۲ درصد از اراضی زراعی در جنوب حوضه کاهش یافت و ۶۵/۹۰ درصد به اراضی مرتعی اضافه شد.

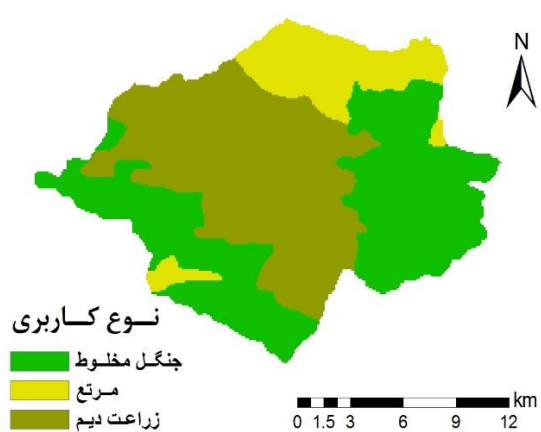
در سناریوی منفی یک، اراضی زراعی دیم با شیب کم‌تر از ۱۰ درصد به مناطق مسکونی تبدیل شد به- طوری که ۵۱/۱۰ درصد از این اراضی زراعی کاسته و به مناطق مسکونی در شمال و جنوب غرب حوضه تبدیل شد. اراضی مرتعی در شمال شرق حوضه توسعه یافت و ۱۰/۸۱ درصد از اراضی جنگل مخلوط کاسته شد.

در سناریوی منفی دو، ۱۰/۸۱ درصد از جنگل مخلوط در شمال شرق حوضه به مراتع افزوده شد. اراضی زراعی با شیب کمتر از ۱۰ درصد به میزان ۵۱/۱۰ درصد به مناطق مسکونی تبدیل شد. کاربری جنگل مخلوط در غرب و جنوب غربی به کاربری زراعت دیم تغییر یافت و مجموعاً در این سناریو ۶۱ درصد از کاربری زراعی از بین رفت.

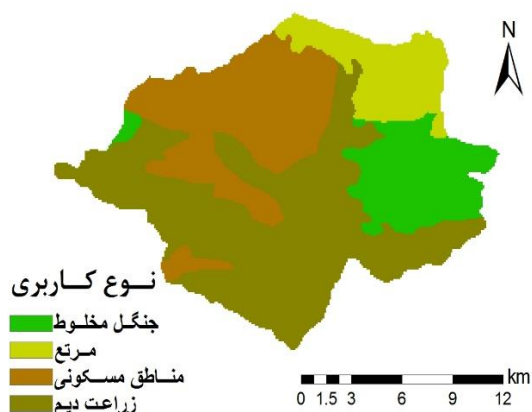
نقشه سناریوها در شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ و نیز مساحت هر کاربری اراضی در هر یک از سناریوها در جدول ۷ ارائه شده است.



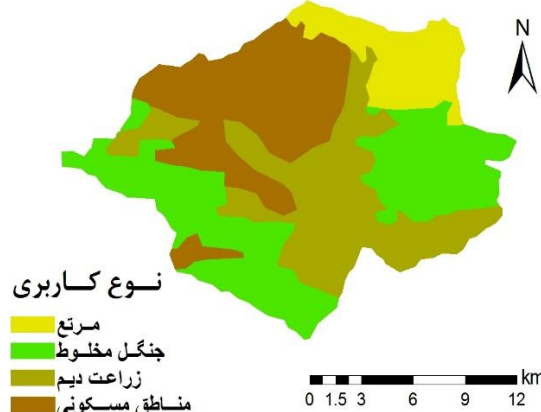
شکل ۶- نقشه سناریوی دو (مثبت) کاربری اراضی در منطقه



شکل ۵- نقشه سناریوی یک (مثبت) کاربری اراضی در منطقه



شکل ۸- نقشه سناریوی دو (منفی) کاربری اراضی در منطقه



شکل ۷- نقشه سناریوی یک (منفی) کاربری اراضی در منطقه

جدول ۷- سناریوهای مختلف کاربری اراضی و درصد مساحت تحت پوشش هر یک از کاربری‌ها در هر سناریو

نوع کاربری	مساحت (درصد)				
	سناریوی شاهد	سناریوی یک مثبت	سناریوی دو مثبت	سناریوی یک منفی	سناریوی دو منفی
جنگل مخلوط	۳۸/۲۵۵	۴۳/۷۵۹	۳۸/۰۶۶	۳۴/۱۱۶	۱۵/۰۹۶
مرتع	۷/۳۶۴	۱۴/۲۹۳	۱۲/۴	۱۱/۵	۱۱/۵
زراعت دیم	۵۴/۳۷۹	۴۱/۹۴۷	۳۴/۱۵	۲۷/۷۹	۴۶/۸۱
جنگل پهن برگ	-	-	۱۳/۹۹	-	-
جنگل سوزنی برگ	-	-	۱/۳۸۳	-	-
مناطق مسکونی	-	-	-	۲۶/۵۸۹	۲۶/۵۸۹

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، به منظور شبیه‌سازی جریان زیرسطحی روزانه در منطقه مورد مطالعه، ابتدا تمام مؤلفه‌های بیلان آبی شبیه‌سازی شده و پس از روندیابی جریان از هر پیکسل تا خروجی حوزه آبخیز، دبی روزانه و همچنین، جریان در تمام زیرحوضه‌ها در گام زمانی روزانه به دست آمد. در مدل WetSpa تمام مؤلفه‌های بیلان آبی و عوامل هیدرولوژیک مدل،

توزیعی-مکانی هستند و قابلیت ارائه آن‌ها به صورت نقشه وجود دارد که به دلیل تعداد زیاد نقشه‌ها امکان ارائه آن‌ها در این تحقیق وجود نداشت. برای کاربری فعلی حوضه هرو-دهنو، به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل، از آمار سه سال آبی اول برای واسنجی و یک ساله آخر برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. در واسنجی دستی که به منظور دقت آماری مناسب جریان شبیه‌سازی شده صورت

می‌گیرد، باید پارامترهای عمومی موجود در مدل را بهینه و مدل را به دفعات زیاد اجرا کرد و با توجه به شاخص‌های آماری مانند شاخص ناش-ساتکلیف، نتایج را ارزیابی کرد. با توجه به پارامترهای بهینه در مرحله واسنجی، اقدام به اعتبارسنجی مدل با داده‌های سال‌های باقی‌مانده می‌شود. در جداول ۸ و ۹ نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل به‌وسیله شاخص ارزیابی ناش-ساتکلیف ارائه شده است.

جدول ۸- مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی شده مدل برای شبیه‌سازی جریان در حوزه آبخیز هرو-دهنو

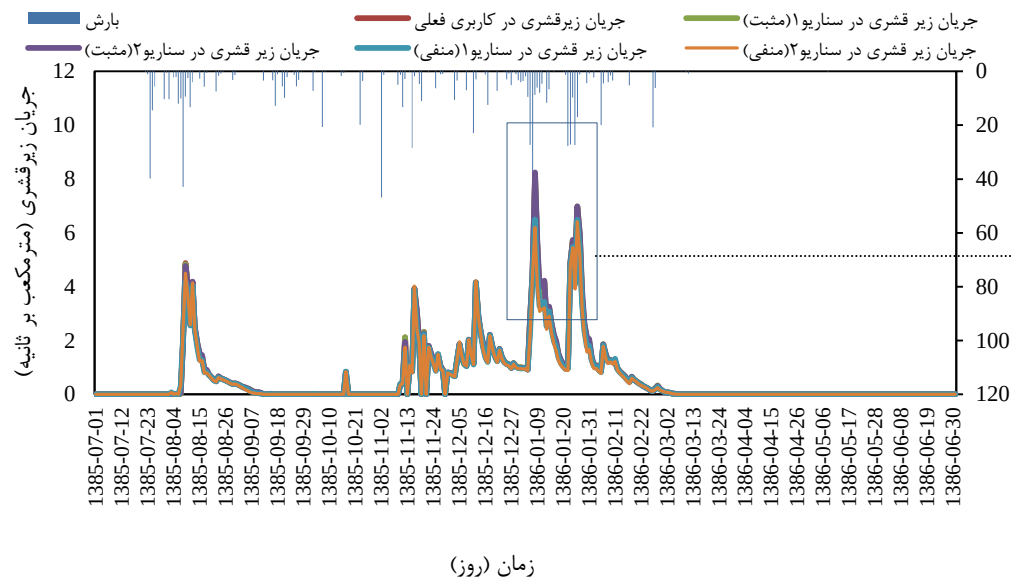
پارامتر	مشخصه	دامنه پارامترها	پارامترهای اولیه	بعد از واسنجی
محاسبات جریان زیرسطحی	Ki	۰/۰۰۰۱-۱۰	۰/۴۵	۱/۸۹۹
ضریب افت آب‌های زیرزمینی	Kg	۰/۰۰۰۰۰۱-۰/۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۵۹
مقدار رطوبت نسبی اولیه	Kss	۰/۱-۲	۰/۲	۰/۸۲۸
تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل	Kep	۰/۲-۲/۳	۰/۵	۰/۳۸
ذخیره اولیه آب‌های زیرزمینی	G0	۱-۲۰۰۰	۳۱	۱۷
بیشترین ذخیره آب زیرزمینی	Gmax	۱۰-۹۰۰۰	۱۰۰۰	۳۷۰/۵۰
دمای پایه ذوب برف	T0	۱/۵-(-۱/۱)	۱	۰/۹۸
ضریب درجه-روز دما	Ksnow	۰-۳/۵	۱	۰/۲۹۹
ضریب درجه-روز باران	Krain	-	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۵
مؤلفه رواناب سطحی	Krun	۱-۱۰	۶/۶	۸/۱
شدت بارندگی	Pmax	۱-۵۰۰	۲۵۰	۳۹۹/۵

جدول ۹- شاخص‌های ارزیابی مدل WetSpa در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی جریان

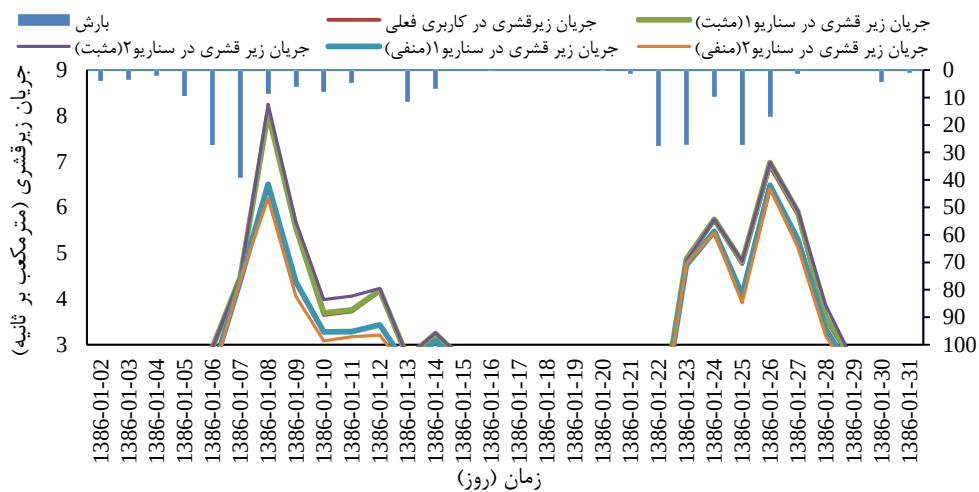
معیار ارزیابی	واسنجی	اعتبارسنجی
ناش-ساتکلیف (NS)	۰/۷۰۱۷	۰/۶۶۷۹
ناش-ساتکلیف برای جریان‌های کم (NSL)	۰/۵۲۹۴	۰/۸۵۴۹
ناش-ساتکلیف برای جریان‌های زیاد (NSH)	۰/۷۳۴۹	۰/۶۸۴۸
ضریب همبستگی اصلاح‌شده (r_{mod})	۰/۵۸	۰/۶۵۸۰
انحراف مدل (Bias)	۰/۱۸	۰/۱۲

ارزیابی در این مدل‌ها، رسیدن به دقت‌های بالا بديهي است (Safari و همکاران، ۲۰۰۹). برای ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری در حوضه بر روی جریان، اقدام به اجرای مجدد آن برای هر سناریو شد که نتایج آن‌ها با کمک رسم نمودار با کاربری فعلی مقایسه شد. در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ این نمودارها ارائه شده‌اند.

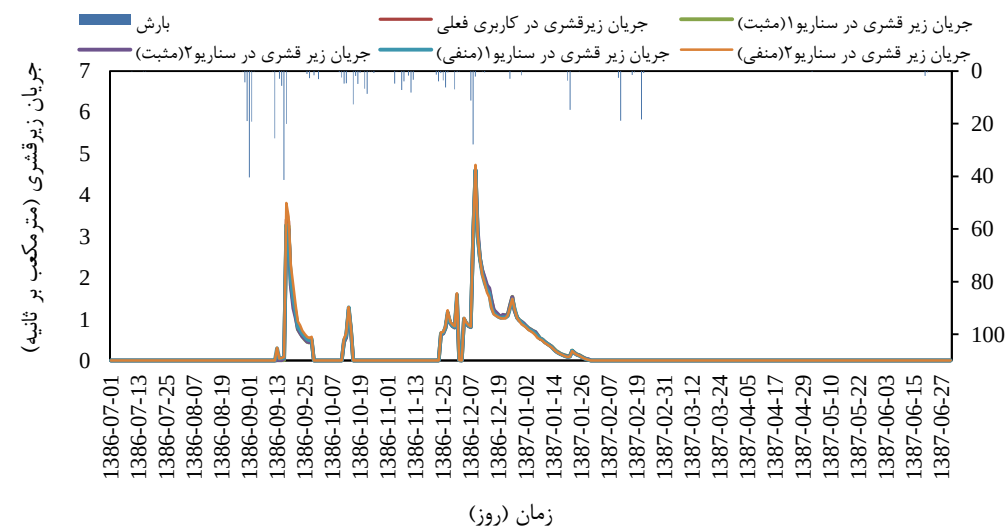
با توجه به این‌که شبیه‌سازی تغییرات روزانه جریان، فرایند پیچیده‌ای است، در نتیجه رسیدن به دقت بالای ۵۵ درصد در این مدل می‌تواند بسیار رضایت‌بخش باشد. چرا که در مدل‌های یکپارچه به‌دلیل نادیده گرفتن تغییرات زمانی کوتاه‌مدت جریان و ادغام این تغییرات با عمل میانگین‌گیری و همچنین، استفاده از میانگین داده‌های مشاهداتی در مرحله

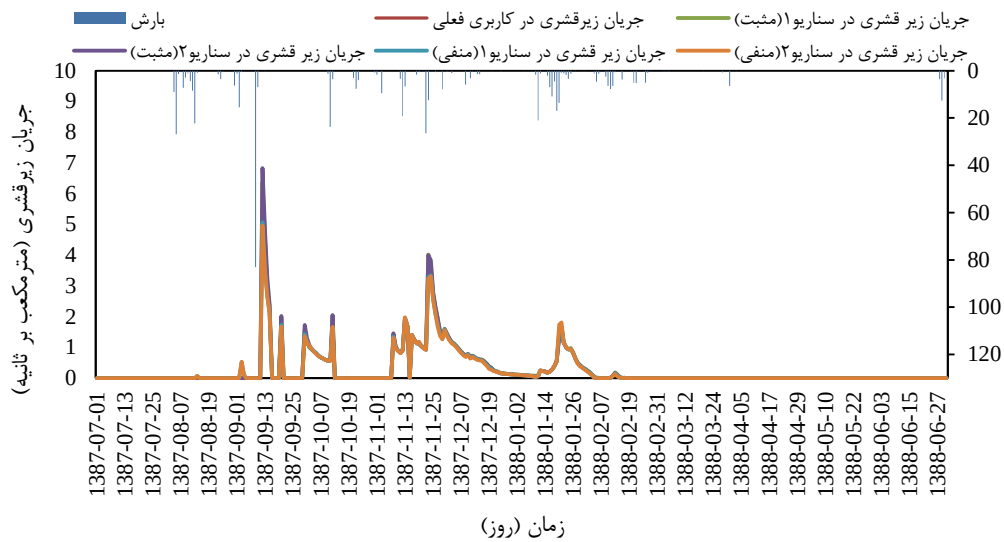


شکل ۱۰- نمودار جریان زیرقشری در کاربری فعلی و چهار سناریو در سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶

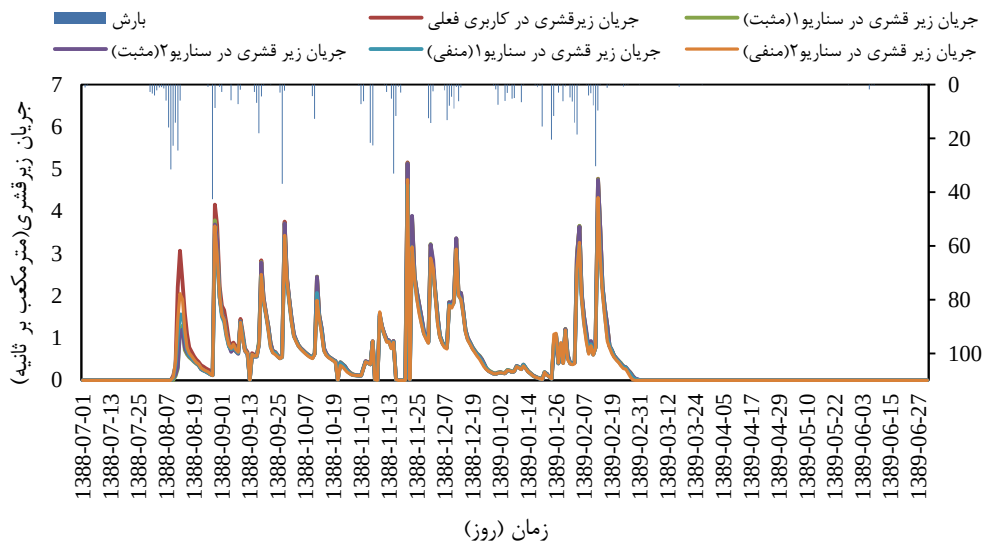


شکل ۱۱- نمودار جریان زیرقشری در کاربری فعلی و چهار سناریو در سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۷

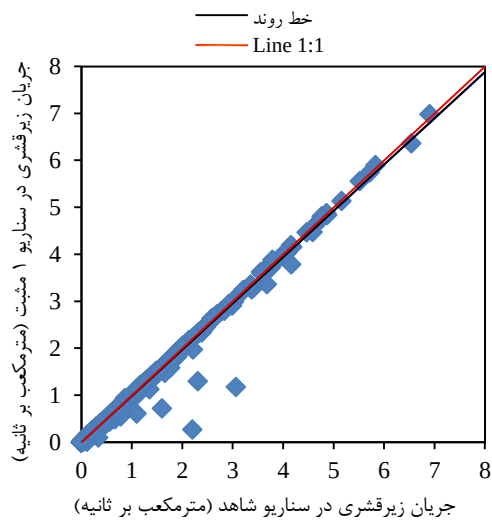




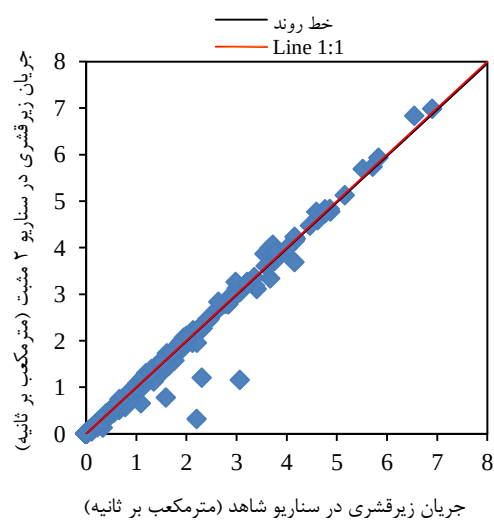
شکل ۱۲- نمودار جریان زیرقشری در کاربری فعلی و چهار سناریو در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸



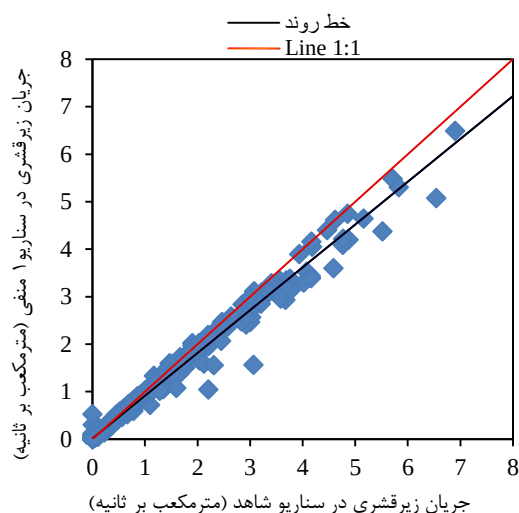
شکل ۱۳- نمودار جریان زیرقشری در کاربری فعلی و چهار سناریو در سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۹



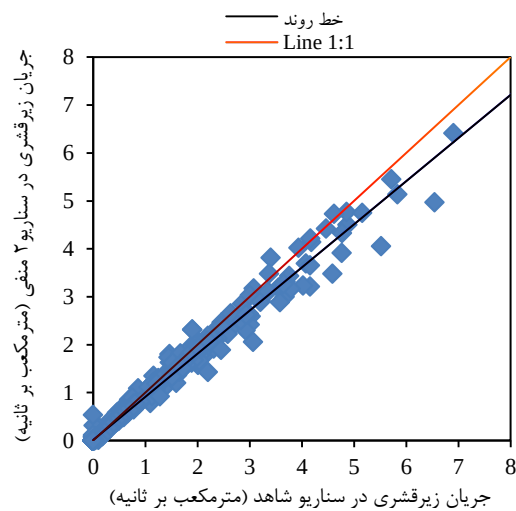
شکل ۱۵- نمودار مقایسه جریان زیرقشری در سناریو یک مثبت و سناریو شاهد نسبت به خط ۱:۱



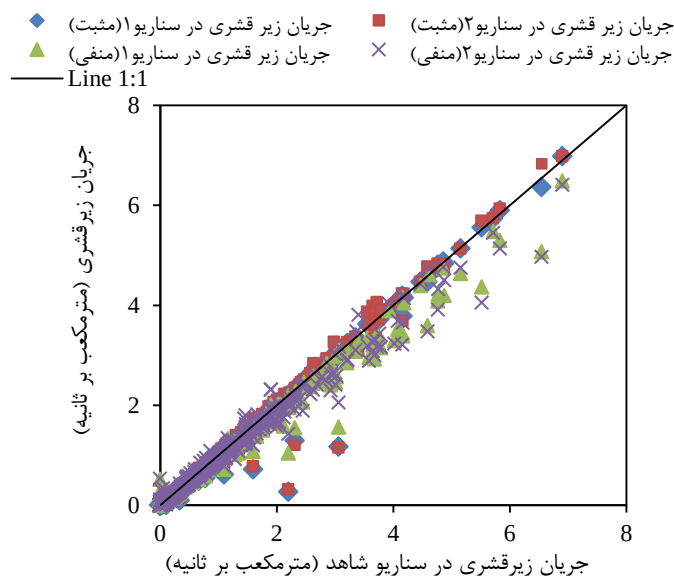
شکل ۱۴- نمودار مقایسه جریان زیرقشری در سناریو دو مثبت و سناریو شاهد نسبت به خط ۱:۱



شکل ۱۷- نمودار مقایسه جریان زیرقشری در سناریو یک منفی و سناریو شاهد نسبت به خط ۱:۱



شکل ۱۶- نمودار مقایسه جریان زیرقشری در سناریو دو منفی و سناریو شاهد نسبت به خط ۱:۱



شکل ۱۸- نمودار مقایسه جریان زیرقشری در سناریوها نسبت به سناریو شاهد

رواناب است. دلیل تغییرات بسیار کم در جریان زیرسطحی در سناریوهای مثبت را می‌توان به شباهت کاربری اراضی در سناریو شاهد و سناریوهای مثبت نسبت داد. به‌طور مثال کاربری مرتع با کاربری زراعی تقریباً دارای ویژگی‌های مشابه از نظر خاکشناسی و پوشش هستند، همچنین، تأثیر این تغییرات در جریان زیرسطحی کمی نامحسوس‌تر از تأثیر آن در جریان سطحی و یا زیرزمینی است و علت تغییرات محسوس-تر جریان زیرسطحی در سناریوهای منفی نسبت به سناریو شاهد می‌تواند به دلیل تغییر زیاد در کاربری مثلاً از جنگل یا کشاورزی به مناطق مسکونی باشد که

با توجه به نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی جریان زیرسطحی در کاربری فعلی و سناریوهای مختلف، نتیجه این‌گونه حاصل می‌شود که با تغییر کاربری اراضی در جهت مثبت در دو گرایش خوش‌بینانه (سناریو یک مثبت) و خیلی خوش‌بینانه (سناریو دو مثبت)، میزان جریان زیرسطحی و آب زیرزمینی افزایش و میزان رواناب سطحی کاهش می‌یابد و با تغییر کاربری در جهت قهقرا (بدبینانه و خیلی بدبینانه) و افزایش مناطق مسکونی در سناریوهای منفی میزان جریان زیرسطحی و زیرزمینی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش نفوذ عمقی و افزایش

در این تغییر کاربری‌های خاکشناسی و پوشش با هم تفاوت چشم‌گیری دارند.

منابع مورد استفاده

1. Azin Mehr, M. 2013. Simulating the effects of land use change scenarios on flow hydrograph using the spatially distributed hydrological model, WetSpa, in the Dinvar Watershed, Karkheh, Iran. MSc Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 145 pages (in Persian).
2. Bahremand, A. 2006. Simulation the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, 150 pages.
3. Bahremand, A., F. De Smedt, J. Corluy, Y.B. Liu, L. Poorova and E. Kunikova. 2007. Wetspa model application for assessing reforestation impact on floods in Margecany-Hornard Watershed. Slovakia Water Resource Management, (21): 1373-1391.
4. Bayat, B., A. Matkan, H. Zeinivand, A. Ghafouri and A. Bagherinejad. 2010. Water balance simulation of watershed using WetSpa model in the GIS environment, case study: Merek Watershed, Kermanshah Province. 2nd National Conference on Applied Research in Water Resources, Zanjan, Iran (in Persian).
5. Croke, B.F., W.S. Merrit and A.J. Jakeman. 2004. A dynamic model for predicting hydrologic response to land covers change in gauged and ungauged catchments. Journal of Hydrology, 291: 115-131.
6. De Smedt, F., Y.B. Liu and S. Gebremeskel. 2000. Hydrological modelling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information. Risk Analysis II, WIT press, Southampton, Boston.
7. De Smedt, F. and Y.B. Liu. 2013. Instructions and application wetspa model, Mashhad, Iran. Iran's Cooperation with the Publishing Notification System, 39-40 pages.
8. Hernandez, M., S.N. Miller, D.C. Goodrich, B.F. Goof, W.G. Kepner, C.M. Edmands and K.B. Jones. 2000. Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. Environmental Monitoring and Assessment, 64: 285-298.
9. Javidan, N. 2013. Simulation of impacts of land use changes scenarios on flood hydrograph using WetSpa model, case study: Ziarat Watershed of Golestan Province. MSc Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, 145 pages (in Persian).
10. Karimi, H. 2015. Efficiency comparison of WetSpa and SRM physical models for snowmelt runoff simulation and evaluation of snowmelt empirical formula results with the WetSpa model in Horo-Dehno Watershed, Lorestan Province, Iran. MSc Thesis, Lorestan University, 111 pages (in Persian).
11. Liu, Y.B., S. Gebremeskel, F. De Smedt and L. Pfister. 2003. A Diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. Journal of Hydrology, 283: 91-106.
12. Liu, Y.B. and F. De Smedt. 2004. WetSpa extension, documentation and user manual, department of hydrology and hydraulic engineering. Brussel. Brussels: Vrije Universiteit, 315 pages.
13. Miller, S., D. Semmens, D. Goodrich, M. Hernandez, R. Miller, W. Kepner and D.P. Guertin. 2007. The automated geospatial watershed assessment tool. Environmental Modelling and Software, 22: 365-377.
14. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting though conceptual models. Part 1, a discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.
15. Palamuleni, L.G., P.M. Ndomba and H.J. Annegarn. 2011. Evaluating land cover change and its impact on hydrological regime in Upper Shire river catchment, Malawi. Journal of Regional Environmental Change, 11(4): 845-855.
16. Ragab, R. and J.D. Cooper. 1993. Variability of unsaturated zone water transport parameters: implication for hydrological modeling, in situ measurements. Journal of Hydrology, 148: 109-131.
17. Rwetabula, J., F. De Smedt and M. Rebhun. 2007. Prediction of runoff and discharge in the Simiyu River (tributary of Lake Victoria, Tanzania) using the WetSpa model. Journal of Hydrology and Earth System Sciences, 4: 881-908.
18. Safari, A., F. De Smedt and F. Moreda. 2009. WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). Journal of Hydrology, 418-419: 78-89.
19. Salvati, B., S.H.R. Sadeghi and A. Darvishian. 2010. Land use changes monitoring in the subbasins of Kordistan Province using GIS. 6th National Seminar on Watershed Management Science and Engineering, Noor, Iran (in Persian).
20. Schmalz, B. and N. Fohrer. 2009. Comparing model sensitivities of different landscapes using the eco hydrological SWAT model. Advances in Geosciences, 21: 91-98.

21. Wang, Z.M., O. Batelaan and F. De Smedt. 1997. A Distributed model for Water and energy transfer between Soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Physics and Chemistry of the Earth*, 21(3): 189-193.
22. Wang, S., S. Kang, L. Zhang and F. Li. 2008. Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. *Journal of Hydrological Processes*, 22: 2502-2510.
23. Zarghami, M., A. Abdi, I. Babaeian, Y. Hassanzadeh and R. Kanani. 2011. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change*, 78(3-4): 137-146.
24. Zeinivand, H. 2009. Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion and sediment transport. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, 238 pages.
25. Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2009. Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach. *Natural Hazards Journal*, 54(2): 451-468.