

شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل WetSpa، مطالعه موردی: حوزه آبخیز همدان، بهار

مهتاب صفری شادا^۱، محمود حبیب نژاد روشن^۲، کریم سلیمانی^۳، علیرضا ایلدرمی^۴، حسین زینی وند^۵
^۱ دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، ^۲ و ^۳ استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، ^۴ دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ایران و ^۵ دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه لرستان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹

چکیده

بسیاری از مشکلات زیست محیطی، ناشی از تغییرات مولفه‌های اصلی چرخه هیدرولوژیکی است. با این حال، مدل‌سازی بیلان آب می‌تواند به درک بهتر از اجزای چرخه هیدرولوژیکی به‌منظور توسعه گزینه‌های مدیریتی مناسب، کمک کند. هدف پژوهش حاضر، محاسبه سه مولفه مهم بیلان آب سطحی با استفاده از مدل WetSpa و ارزیابی این مدل در حوزه آبخیز همدان، بهار واقع در استان همدان در مقیاس زمانی ماهانه است. با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق در محاسبات بیلان آب، نقشه‌های تبخیر و تعرق خروجی مدل به تفکیک کاربری‌های مختلف ارزیابی شدند. ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی نیز با توجه به محاسبات دستی این متغیر برای سال ۹۲-۱۳۹۱، انجام شد. سپس، نتایج ضریب همبستگی کرامر بین نقشه‌های توزیع مکانی رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی، با نقشه‌های ورودی به مدل بررسی شد. به‌طور کلی، نتایج ارزیابی مدل در این تحقیق نشان داد، ضریب تبیین میان رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۷۹ و ۰/۸۳ است. نتایج ارزیابی نقشه‌های تبخیر و تعرق خروجی مدل WetSpa، قابلیت مدل را در شبیه‌سازی رواناب، تبخیر و تعرق و تغذیه آب زیرزمینی با دقت قابل قبول تایید کرد. نتایج، حاکی از وجود ضریب همبستگی بالا بین مولفه تبخیر و تعرق با کاربری اراضی (۰/۵۴)، بافت خاک (۰/۴۵)، پتانسیل تبخیر و تعرق (۰/۴۲) و درجه حرارت (۰/۳۱) است. همچنین، نتایج نشان داد بین مولفه رواناب با کاربری اراضی (۰/۶۲) و بافت خاک (۰/۵۸) همبستگی بالا و بین مولفه تغذیه آب زیرزمینی با کاربری اراضی (۰/۳۲) و بافت خاک (۰/۳۴) همبستگی متوسط وجود دارد. بنابراین، کاربری اراضی و بافت خاک به‌ترتیب اولین و دومین عامل تاثیرگذار بر توزیع مولفه‌های بیلان سطحی بودند.

کلمات کلیدی: تبخیر و تعرق، تغذیه آب زیرزمینی، کاربری اراضی، ضریب همبستگی کرامر، مدل‌های هیدرولوژیکی

مقدمه

کلی هر کشوری دارد (Shukla و همکاران، 2017).
ایران با قرار گرفتن در کمربند خشک جهانی بیشتر با مساله بحران آب روبه‌رو است.
با توجه به کمبود آب، بررسی بیلان آب در حوزه های آبخیز یکی از راهکارهای موثر در جهت مدیریت

امروزه کمبود آب در جهان یکی از اساسی‌ترین مشکلاتی بوده که زندگی بشر را تحت تاثیر قرار داده است (Cudennec و همکاران، 2007). توسعه کارآمد و استفاده بهینه از منابع آب اهمیت زیادی در توسعه

آب‌های زیرزمینی در حوزه آبخیز همدان، بهار با توجه به اهمیت نقش این حوضه در تامین آب آشامیدنی شهرستان‌های همدان و بهار، آب کشاورزی بهار و آب صنعتی کارخانه‌ها، با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS^۲)، سنجش از دور و مدل WetSpass برای اولین بار در ایران است.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز همدان، بهار در دامنه‌های شمالی الوند با مساحت ۲۴۶۰ کیلومتر مربع، بین عرض جغرافیایی ۳۴°۰۴' تا ۱۰' ۳۵° شمالی و طول جغرافیایی ۴۸° ۳۷' تا ۴۸° ۷' شرقی واقع شده است (شکل ۱). بیشینه و کمینه ارتفاع حوضه به ترتیب ۳۳۷۲ متر در ارتفاعات الوند و ۱۷۱۰ متر در محل خروجی حوضه و شیب عمومی منطقه جنوب غربی، شمال شرقی است.

همچنین، بیش از ۲۴ مسیل عمده شامل آبراهه‌هایی با جریان فصلی و دائمی، در این حوضه جریان دارد. این آبراهه‌ها در قسمت مرکزی به هم پیوند خورده و رودخانه اصلی را تحت عنوان سیمینه‌رود، تشکیل می‌دهد و این رودخانه از ناحیه شمال شرقی حوضه خارج شده است و به رودخانه قره‌چای می‌ریزد (Hamedan Regional Water Company, 2014).

فرایندهای هیدرولوژیکی در مدل WetSpass: در مدل WetSpass، بیلان آب کل یک منطقه معین از مجموع بیلان آب هر سلول رستری محاسبه می‌شود. خروجی‌های مدل شامل تبخیر و تعرق واقعی، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی است (رابطه‌های ۱ تا ۳).

$$ET_{raster} = avET_v + asEs + aoEo + aiEi \quad (1)$$

$$Sr_{raster} = avSv + asSs + aoSo + aiS \quad (2)$$

$$Rr_{raster} = avRv + asRs + aoRo + aiR \quad (3)$$

که در آن، ET_{raster} ، Sr_{raster} و Rr_{raster} به ترتیب تبخیر و تعرق واقعی، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی و ET_v ، ET_s ، ET_o ، ET_i به ترتیب تبخیر و تعرق برای پوشش گیاهی، خاک لخت، آب روباز و سطوح غیر قابل نفوذ هستند. هر مولفه دارای جز

منابع آب است (Troch, 2000; Güntner و همکاران، 2004; Anquetin و همکاران، 2010). اطلاع از وضعیت بیلان آب، یک منبع اطلاعاتی مهم برای سیاست‌گذاران، تصمیم‌گیرندگان و سایر ذی‌نفعان مربوطه برای تعیین انواع تهدیدات امنیتی آب و طراحی استراتژی‌هایی به منظور تخصیص، استفاده و مدیریت بهتر منابع آب شیرین، مدیریت فاضلاب و پیش‌بینی سیل است (Anderson و همکاران، 2006; Hill و Boughton, 1997).

به‌عنوان مثال، در ایران مطالعات بیلان آب برای تخصیص بودجه‌های مالی برای سیاست‌ها و پروژه‌های منابع آب مرسوم است (Ghandhari و Alavimoghadam, 2011). انتخاب روش مناسب به منظور مدلسازی بیلان آب، بستگی به اهداف مطالعه و در دسترس بودن داده‌ها دارد (Zhang و همکاران، 2002). افزایش پیچیدگی مدل لزوماً دقت آن را بهبود نمی‌بخشد (Walker و Zhang, 2002) و عملکرد مدل‌های ساده توزیعی نیز ممکن است مانند مدل‌های پیچیده یا حتی دقیق‌تر از آن‌ها باشند (Hornberger و Jakeman, 1993).

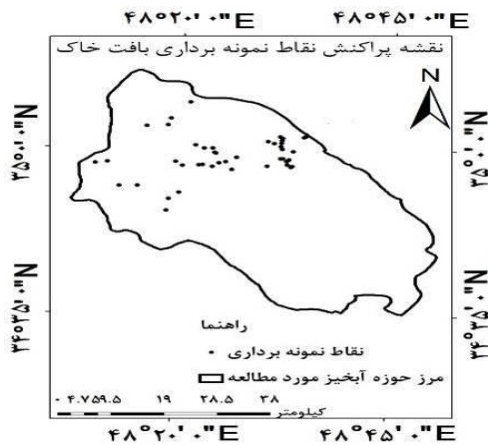
مدل WetSpass^۱ یکی از مدل‌های بیلان آب در مقیاس ماهانه بوده که توانایی شبیه‌سازی توزیع مکانی تغذیه آب زیرزمینی، رواناب سطحی و تبخیر-تعرق را برای مقیاس زمانی ماهانه و سالانه دارد. مزیت مدل جدید WetSpass این است که برای آبخیزهای متوسط و بزرگ قابل استفاده است و ویژگی‌های زمانی-مکانی این مدل، امکان کمی‌سازی توزیعی اجزای بیلان آب را با استفاده از مزایای داده‌های سنجش از دور فراهم می‌سازد. همچنین، مدل WetSpass تنوع مکانی بافت خاک، کاربری اراضی، شیب و شرایط هواشناسی را در برآورد تغذیه آب زیرزمینی در نظر می‌گیرد. در مطالعات اخیر، از جمله مطالعه Aish (2010) و Pandian و همکاران (2014) بر توانایی این مدل در کمی‌سازی توزیعی اجزای بیلان آب اذعان شده است.

هدف این پژوهش، محاسبه اجزای بیلان آب از جمله رواناب سطحی، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه

² Geographic information system

¹ Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under quasi Steady State

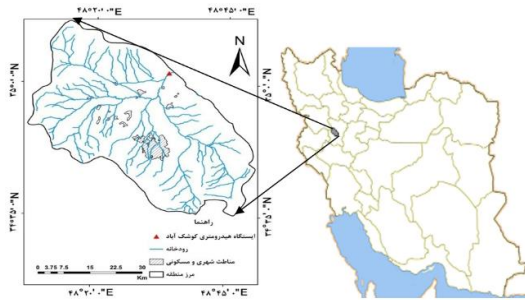
انجام اصلاحات مورد نیاز در مرحله پیش‌پردازش شد. به‌منظور حذف خطاهای اتمسفری از روش نسبی به معنی تفریق تیره‌ترین پیکسل، استفاده شد. در تصاویر، بسیاری از خطاهای دستگاهی و زمین‌مرجع کردن قبل از تهیه تصویر مورد توجه قرار گرفت و برطرف شد. لذا، در این بررسی به اصلاح خطاهای دستگاهی نیاز نیست. سپس، به روش Image to map، تصحیح هندسی انجام شد.



شکل ۲- نقشه پراکنش نمونه‌های بافت خاک از نقاط فاقد آمار بافت خاک

با توجه به این‌که هیچ نوع خطای رادیومتریک در تصویر دریافتی دیده نشد، لذا، این مرحله حذف شد. علاوه بر نمونه‌برداری بر روی تصاویر ماهواره‌ای، جمع‌آوری نمونه‌های آموزشی مورد نیاز، عمدتاً از طریق گوگل‌ارث^۱ انجام و برای سطوح کاربری اراضی پیچیده مثل مناطق کشاورزی، نمونه‌های آموزشی به تعداد زیاد جمع‌آوری شد. اما برای سطوح کاربری اراضی با اراضی بایر، شهر، و مناطق ساخته‌شده، علاوه بر عملیات میدانی از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی نیز استفاده شد. به کمک نمونه‌های برداشت شده واقعیت زمینی، بر روی تصاویر ماهواره‌ای نمونه‌برداری به صورت نظارت‌شده انجام شد. تعداد پیکسل‌های انتخاب‌شده به‌عنوان نمونه‌های تعلیمی در هر یک از سال‌های مورد بررسی، برحسب وسعت کاربری‌ها، با پراکنش مناسب انتخاب شدند. پس از معرفی نمونه‌های تعلیمی بر روی تصاویر ماهواره‌ای، به

پوشش گیاهی، خاک لخت، آب روباز و سطوح غیر قابل نفوذ هستند که به‌ترتیب به‌وسیله a_i و a_o ، a_s ، a_v مشخص شده‌اند. نقشه‌های بافت خاک، کاربری اراضی، مدل رقمی ارتفاعی، شیب، عمق آب زیرزمینی، پوشش برف (در صورت موثر بودن برف) و داده‌های هیدروکلیماتولوژی، با اندازه پیکسل ۵۰ در ۵۰ متر، به همراه جدول‌های توصیفی بافت خاک و کاربری اراضی ورودی‌های مورد نیاز به‌منظور اجرای این مدل هستند (Zomlot و همکاران، 2015).



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز همدان، بهار در ایران

بافت خاک: به‌منظور تهیه نقشه بافت خاک منطقه مورد مطالعه، برای نواحی فاقد آمار، نمونه‌های بافت خاک برای مناطق زراعی از عمق ۳۰ سانتی‌متر و برای باغات از عمق ۱۰۰ سانتی‌متر در روزهایی که زمین خشک بود، برداشت شد. پس از تعیین بافت ۵۶ نمونه خاک، جدول بافت خاک به روش هیدرومتری به کمک اطلاعات موقعیت جغرافیایی هر نقطه تهیه شد و در محیط ArcGIS ابتدا برای نواحی فاقد آمار، نقشه بافت خاک تهیه شد و سپس با استفاده از دستور Union در نرم‌افزار ArcGIS با نقشه بافت خاک برخی از نواحی که آمار آن موجود بود، ترکیب و در نهایت، نقشه بافت خاک برای کل منطقه تهیه شد.

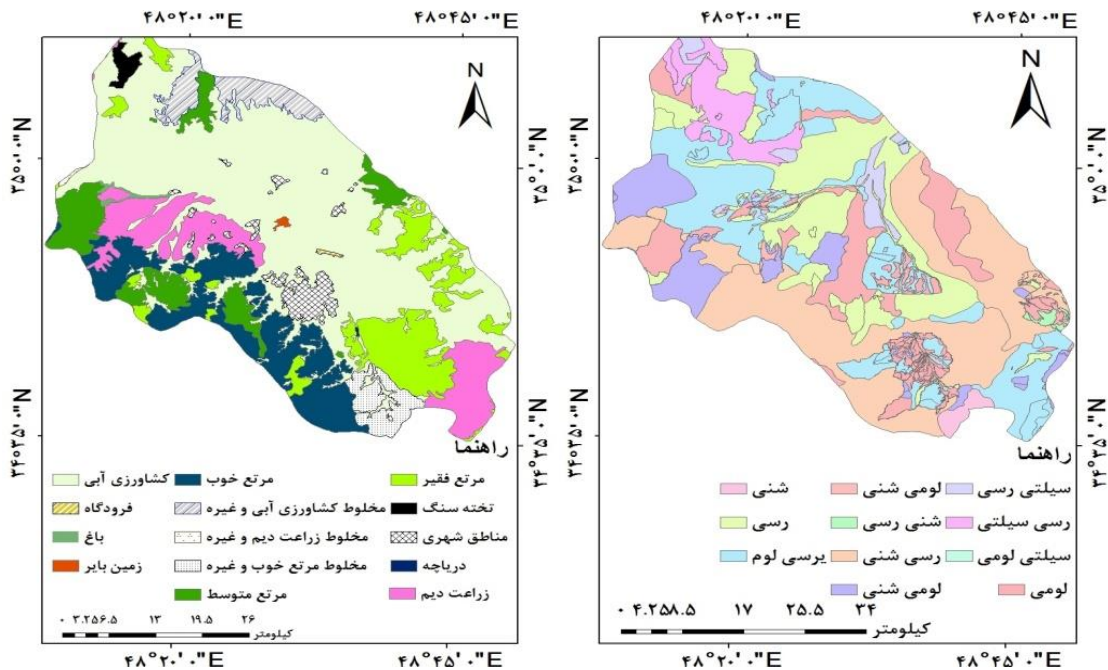
نقشه پراکنش نمونه‌های بافت خاک در شکل ۲، نشان داده شده است. با توجه به نقشه بافت خاک تهیه‌شده، ۱۱ نوع بافت خاک برای منطقه مورد مطالعه وجود داشت و بافت غالب در حوزه آبخیز مذکور، لومی رسی است.

نقشه کاربری اراضی: نقشه کاربری اراضی به کمک تصاویر ماهواره‌ای لندست، گوگل ارث و نقشه کاربری اراضی دریافت شده از منابع طبیعی همدان، بر اساس استاندارد مدل WetSpa تهیه شد. در ابتدا، اقدام به

^۱ Google earth

پیکسل مرکز در طبقه اکثریت نباشد، در طی این عملیات به طبقه اکثریت تغییر داده می‌شود. اما اگر در پنجره متحرک هیچ طبقه اکثریتی وجود نداشته باشد، پیکسل مرکزی تغییر نمی‌یابد. در این تحقیق، ماتریس خطا برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی تصاویر استفاده شد. در شکل ۳، نمونه‌ای از نقشه کاربری برای سال ۱۳۹۰ ارائه شده است.

کمک نرم‌افزار ENVI، عمل طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده انجام شد. سپس، به منظور متعادل‌سازی و حذف پیکسل‌های انفرادی در تصویر، از فیلتر اکثریت (Majority) استفاده شد. این فیلتر یک پنجره متحرک در سرتاسر تصویر طبقه‌بندی شده اعمال می‌کند که در طی آن، طبقه اکثریت درون پنجره مشخص می‌شود و اگر



شکل ۳ - نقشه کاربری اراضی و بافت خاک منطقه مورد مطالعه

ارزش پیکسل‌ها و یا Recode کردن پیکسل‌ها، بازتاب خالص نوار دو بیش از ۱۱ درصد بازتاب کل به‌عنوان شرط نوار دو و بازتاب خالص نوار چهار مساوی یا بالاتر از ۱۰ درصد بازتاب کل، به‌عنوان شرط نوار چهار به صورت یک و صفر درآمده و در تصویر NDSI ضرب شدند تا تصویر نهایی سطح پوشیده از برف به‌دست آید. این روش دقت نسبتاً بالایی داشته و سطح برف را به‌خوبی جدا می‌کند. در شکل ۴، نمونه‌ای از نقشه‌های پوشش برف ارائه شده است.

$$NDSI = \frac{band_4 - band_6}{band_4 + band_6} \quad (4)$$

در مرحله بعد، به منظور استخراج بهترین رابطه برای تهیه نقشه‌های هم‌بارش از نرم‌افزار CurveExpert استفاده شد. ابتدا، برای هر ماه در یک فایل اکسل اطلاعات ارتفاع ایستگاه‌ها در یک ستون و در ستون دیگر مقدار بارش مدنظر درج شد. سپس، با ورود

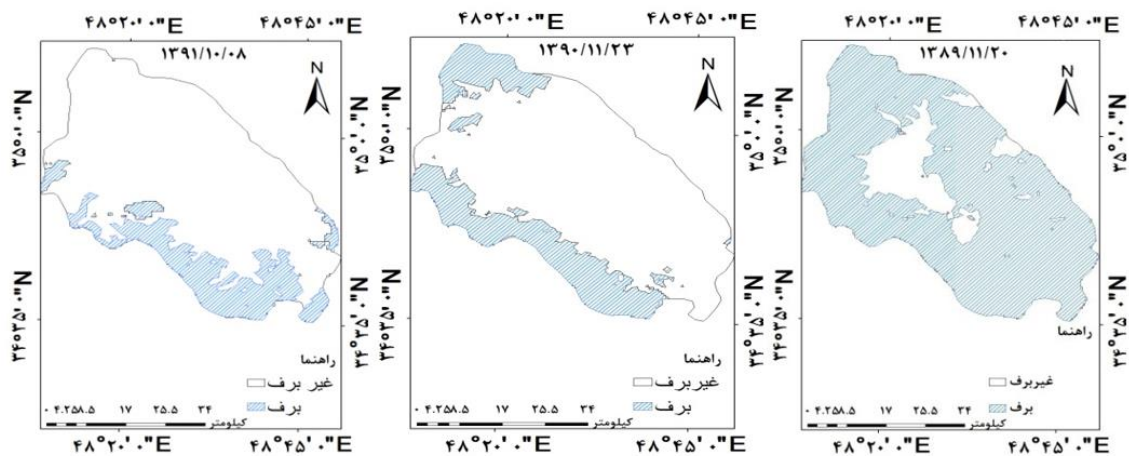
نقشه‌های پوشش برف: نقشه‌های پوشش برف بر مبنای نسبت اختلاف بازتابندگی نوار چهار سنجنده MODIS^۱ (نوار مرئی) (۰/۵۴۵ تا ۰/۵۶۵ میکرومتر) و نوار شش سنجنده MODIS (مادون قرمز میانی) (۱/۶۲۸ تا ۱/۶۶۵ میکرومتر) تقسیم بر مجموع بازتابندگی در این دو نوار تحت عنوان شاخص NDSI^۲ مطابق رابطه (۴) تهیه شد (Hall و همکاران، ۲۰۱۲). با وجود شاخص NDSI، به‌منظور جلوگیری از قرار گرفتن آب در گروه برف و همچنین، به‌منظور تفکیک مناطق تاریک و سایه‌دار از برف، از میزان بازتاب‌های نوار چهار برای اشیای تاریک و نوار دو برای آب استفاده شد. بدین ترتیب که با عملیات تغییر

^۱The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

^۲The Normalized Difference Snow Index

روش‌های درون‌یابی با توجه شاخص‌های ضریب تبیین (R^2 , Coefficient of Determination)، میانگین مربعات خطا (RMSE, Root Mean Square Error) و میانگین خطای مطلق (MAE, Mean Absolute Error)، روش کریجینگ معمولی به دلیل داشتن دقت بیشتر و خطای کمتر نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی انتخاب شد.

اطلاعات به نرم‌افزار CurveExpert و استفاده از دستور Run curve finder و گزینه info نرم‌افزار مذکور بر اساس ضریب تبیین، بهترین رابطه برازش داده شده برای رابطه بین ارتفاع ایستگاه‌ها و مقدار بارش، تعیین شد. سپس، رابطه استخراجی در نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از دستور Raster calculator نوشته شد و نقشه‌های هم‌بارش تهیه شدند. به منظور تهیه نقشه‌های هم‌عمق سطح آب زیرزمینی از بین



شکل ۴- نمونه‌ای از نقشه‌های پوشش برف استخراجی از تصاویر ماهواره‌ای MODIS

میانگین بارندگی ایستگاه‌های منطقه در برابر یکدیگر ترسیم شد.

تغذیه آب زیرزمینی: در مدل WetSpa، تغذیه آب زیرزمینی یک فرایند نسبتاً آرام است، از آنجایی که تغذیه آب زیرزمینی به‌عنوان جزء باقی‌مانده از بیلان آب، محاسبه می‌شود، بنابراین، احتمالاً تغذیه در پاسخ به تغییر در تعداد زیادی از عوامل محاسبه می‌شود. به‌منظور ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده، تغذیه از سطح آبخوان که شامل نفوذ از آب‌های متفاوت است، طبق رابطه (۵) برای سال ۹۱-۹۲ با استفاده از اطلاعات دریافتی از سازمان آب منطقه‌ای محاسبه شد.

$$Recharge = A + B + C + D \quad (5)$$

که در آن A ، نفوذ از بارش بر سطح آبخوان، B تغذیه از آب مصرفی کشاورزی، C تغذیه از پساب آب مصرفی شرب و صنعت که عمده آن از طریق چاه‌های جذبی و D تغذیه از جریان‌های سطحی یا رودخانه‌ها

شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی: با توجه به اهمیت مولفه تبخیر و تعرق واقعی، مقادیر تبخیر و تعرق ماهانه واقعی به تفکیک ارزیابی شد. با روی هم اندازی و برش مرز دریاچه سد اکباتان بر روی تصاویر هر ماه، نتایج تبخیر مربوط به پیکره‌های آبی برای دوره زمانی مورد مطالعه استخراج شد. خروجی مدل با مقادیر مشاهداتی تشک تبخیر ایستگاه سد اکباتان برای سال‌های ۹۰-۹۱ و ۸۹-۹۰ (با اعمال ضریب ۰/۶۸ برای تبدیل تبخیر پتانسیل به تبخیر و تعرق واقعی (Rahimi و همکاران، ۲۰۱۳)) جهت ارزیابی نتایج، مقایسه شد. مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق واقعی برای اراضی کشاورزی باغی و زراعی حاصل از مدل با لایسیمتر برای چهار ماه خرداد تا شهریور ۹۲ مقایسه شد. علاوه بر داده‌های لایسیمتر، از داده‌های نیاز آبی به‌منظور ارزیابی نتایج تبخیر و تعرق شبیه‌سازی به‌وسیله مدل استفاده شد. همچنین، تغییرات تبخیر و تعرق اراضی دیم مدل‌سازی شده به‌وسیله مدل و

این عامل، برابر ۲۷ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شد.

تغذیه از طریق سامانه تغذیه مصنوعی: در سال های اخیر به علت افت شدید آب های زیرزمینی در منطقه هارون آباد و بند سه بهار، اقدام به ساخت دو پروژه تغذیه مصنوعی در دشت همدان، بهار شده است. لذا، با توجه به اندازه گیری های به عمل آمده به وسیله قسمت آب های سطحی و محاسبات میزان ورودی و خروجی دبی رودخانه های وارده به سامانه تغذیه مصنوعی حجم تغذیه ناشی از پروژه ها معادل ۳/۳۲ میلیون مترمکعب در سال آبی ۹۱-۹۲ برآورد شد. نتایج نهایی محاسبه در جدول ۱، ارائه شده است. در مدل WetSpass، تغذیه آب زیرزمینی برای سال ۹۲-۹۱ برابر ۱۳۱/۸۲ میلی متر به دست آمد که با نتایج محاسباتی به وسیله مدل، ۱۰۹/۳۸ میلی متر حدود ۲۲ میلی متر بیش برآورد دارد (Hamedan Regional Water Company, 2013).

جدول ۱- میانگین تغذیه آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی برای سال ۹۱-۹۲

عوامل تغذیه	مقدار (میلی متر)
نفوذ از بارش بر سطح آبخوان	۷۰/۵۷
نفوذ از آب مصر فی کشاورزی	۱۱/۸۰
نفوذ از آب شرب و صنعت	۱۰/۹۷
نفوذ از جریان های سطحی	۱۵/۰۸
تغذیه کل	۱۰۹/۳۸

پس از ورود داده ها، واسنجی مدل WetSpass از طریق مقایسه دبی شبیه سازی شده با دبی مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری کوشک آباد بر اساس چهار پارامتر انجام شد.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت، واسنجی، و اعتبارسنجی مدل WetSpass: نقشه های بافت خاک، کاربری اراضی، مدل رقومی ارتفاعی، شیب، عمق آب زیرزمینی، آب برگشتی زراعی، پوشش برف، داده های

که میزان تغذیه مصنوعی نیز در این عامل گنجانده شد.

نفوذ مستقیم از ریزش های جوی: نفوذ مستقیم، میزان بارانی است که مستقیماً بر سطح آبخوان ریزش می کند. در محدوده مطالعاتی بر اساس ایستگاه های باران سنجی کوشک آباد، بهاردربیگ، سد اکباتان و فرودگاه، متوسط بارندگی دوره آماری بلندمدت منطقه مطالعاتی معادل ۳۵۵/۸ میلی متر به دست آمد. با در نظر گرفتن ۲۰ درصد نفوذ، حجم آب تغذیه شده در محدوده بیان معادل ۱۸۷/۸۶ میلیون مترمکعب شد. در سال آبی ۹۱-۹۲، متوسط بارندگی چهار ایستگاه فوق معادل ۳۵۲/۹ میلی متر بود، لذا با در نظر گرفتن ۲۰ درصد نفوذ، حجم تغذیه این سال معادل ۱۷۳/۶۲ میلیون مترمکعب برآورد شد.

نفوذ از جریانات سطحی: وسعت محدوده مطالعاتی همدان، بهار برابر با ۲۴۶۰ کیلومتر مربع و وسعت محدوده ارتفاعات برابر با ۲۰۲۴ کیلومتر مربع است. میزان بارش در سال آبی ۹۱-۹۲ برابر با ۳۵۲/۹ میلی متر، حجم بارش در ارتفاعات برابر ۶۷۹/۶۶ میلیون مترمکعب بود و با احتساب ضریب رواناب ۲۵ درصد، حجم رواناب تولید شده برابر ۱۶۹/۹۱ میلیون مترمکعب شد و با احتساب ۲۰ درصد نفوذ، حجم تغذیه ای این عامل برابر ۳۳/۹۸ میلیون مترمکعب برآورد شد.

آب برگشتی زراعی: در محدوده بیان حجم کل برداشت آب زراعی به وسیله چاه های عمیق و نیمه عمیق معادل ۱۰۳/۹۱ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد. حجم آب برگشتی به سفره با توجه به بافت خاک منطقه و نوع آبیاری که عمدتاً سنتی است، ۳۰ درصد آب مصرفی محاسبه و رقم آن معادل ۳۱/۱۷ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد.

آب برگشتی مصارف شرب و صنعت: در محدوده مورد مطالعه حجم آب مصرفی شرب ۶۰ میلیون مترمکعب (۳۷ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی و ۲۳ میلیون مترمکعب از آب های سطحی) و آب مصرفی صنعت نه میلیون مترمکعب است، که با توجه به نوع سامانه شبکه جمع آوری فاضلاب، آب برگشتی به سفره آب زیرزمینی معادل ۴۵ درصد برآورد می شود و بدین ترتیب، حجم آب تغذیه شده از

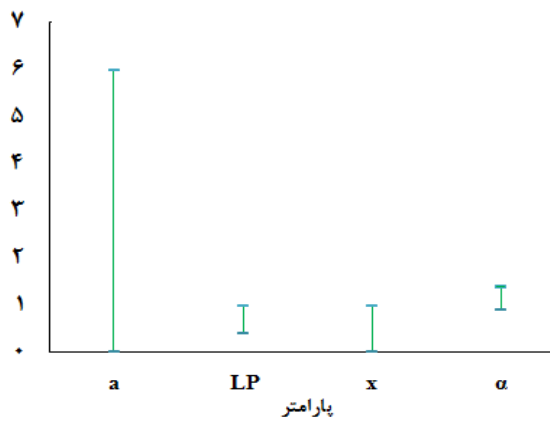
مقایسه میزان دبی برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی با داده‌های مشاهداتی به ترتیب برابر ۰/۷۹ و ۰/۸۳ شد که بیانگر مقبولیت مدل در شبیه‌سازی رواناب منطقه است.

جدول ۲- مقدار تعیین شده پارامترها در فرایند واسنجی

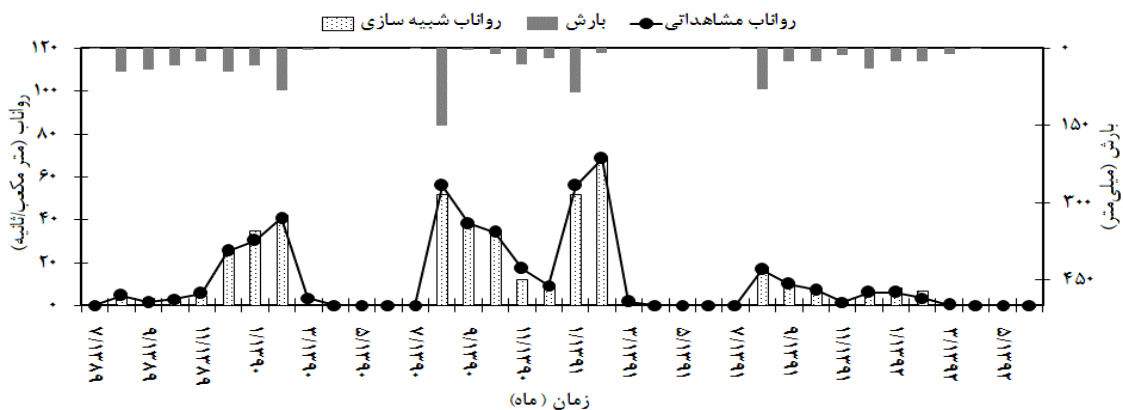
پارامتر	جز	مقدار تعیین شده
a	برگاب	۱/۵
LP	رواناب سطحی و تغذیه	۰/۸۵
x	رواناب سطحی	۰/۵۱
α	تبخیر تعرق	۰/۹

هیدروکلیماتولوژی، با اندازه پیکسل ۵۰ در ۵۰ متر، به همراه جداول توصیفی بافت خاک و کاربری اراضی به مدل WetSpa وارد و شبیه‌سازی انجام شد. در مدل WetSpa، واسنجی مدل بر اساس بهینه‌سازی چهار پارامتر عامل تصحیح تبخیر و تعرق (α)، عامل رواناب سطحی (LP)، عامل برگاب (a) و رواناب سطحی (x)، به صورت دستی با روش آزمون و خطا، و افزایش و کاهش ۰/۱، حدود ۱۰ بار انجام شد. در فرایند واسنجی مشخص شد، هرکدام از پارامترها فقط بر روی یک جز بیلان آب تاثیر دارند که در جدول ۲، نتایج ارائه شده است.

محدوده عدم قطعیت پارامترها در شکل ۵، ارائه شده است که عامل تصحیح تبخیر و تعرق (α) کمترین دامنه تغییرات و بالاترین حساسیت را داشت. عامل رواناب سطحی (LP)، در رتبه دوم حساسیت قرار داشت. عامل برگاب (a) دارای دامنه تغییرات زیاد و حساسیت کم بود. در مرحله بعد، تحلیل حساسیت به منظور پاسخ مدل به تغییر پارامترها انجام شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد، بارندگی و پتانسیل تبخیر و تعرق، متغیرهای ورودی خیلی حساس مدل بودند. در شکل ۶، نتایج واسنجی هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهداتی (مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۱) و نتایج اعتبارسنجی (مهر ۱۳۹۱ تا شهریور ۱۳۹۲)، ارائه شده است. نتایج حاصل از ضریب نش-ساتکلیف



شکل ۵- محدوده عدم قطعیت هر یک از پارامترهای مدل WetSpa



شکل ۶- نمودار مقایسه دبی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل و مشاهداتی (ایستگاه هیدرومتری کوشک‌آباد)

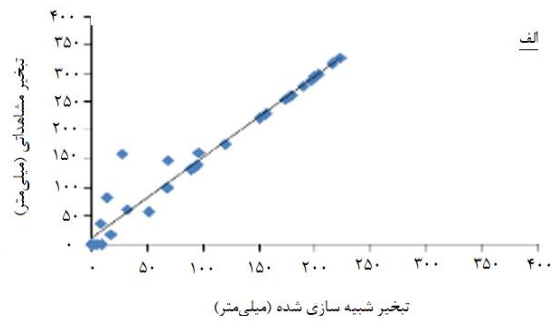
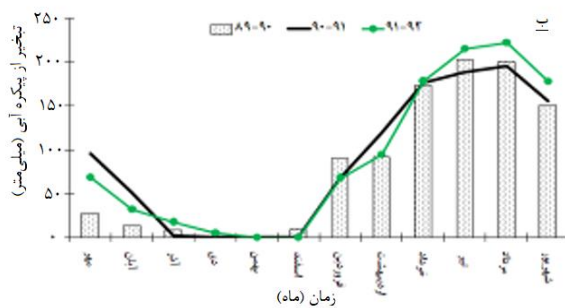
بیش برآورد بوده است. به علاوه، نتایج نشان می‌دهد دبی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل متأثر از مقدار بارش ماهانه است. به عنوان نمونه، بارندگی شدید (۱۵۱/۲

با توجه به شکل ۶، در دوره واسنجی، مدل شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف را به خوبی شبیه‌سازی کرده، اما در شبیه‌سازی، نقطه اوج جریان همراه با

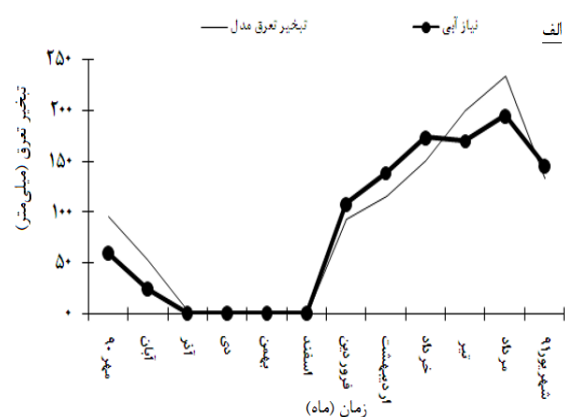
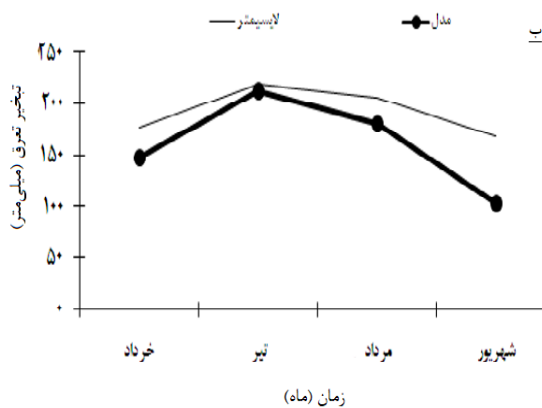
کاربری‌های مختلف ارزیابی شدند. ارزیابی مقادیر خروجی تبخیر و تعرق واقعی مدل WetSpss در کاربری‌های مختلف در شکل‌های ۷ تا ۹، نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در پیکره‌های آبی نتایج مدل WetSpss از دقت مناسبی برخوردار هستند. همچنین، مقایسه نتایج مدل با مقادیر مشاهداتی تشک تبخیر به انجام رسید و ضریب تبیین ۰/۸۷ حاصل شد که موید دقت مناسب مدل است. در اراضی کشاورزی ضریب تبیین ۰/۸۳ و ۰/۹۲، به ترتیب در مقایسه با داده‌های مشاهداتی لایسیمتر و داده‌های نیاز آبی محصولات زراعی و باغی به دست آمد. بنابراین، مدل در اراضی کشاورزی نیز نتایج مطلوبی داشت که قابل تعمیم به کل حوضه است. در اراضی دیم تبخیر و تعرق واقعی از کل ریزش سالانه کمتر شد که دقت مناسب مدل در این اراضی را نشان می‌دهد.

میلی‌متر) در آبان سال ۱۳۹۰ منجر به بیش برآورد دبی شبیه‌سازی شده نسبت به مشاهداتی شده است. دلیل این شبیه‌سازی غیر معقول را می‌توان خطا در درون‌یابی بارندگی و عدم پراکنش یکنواخت ایستگاه‌های باران‌سنجی در منطقه مطالعاتی دانست. با این حال، در دوره اعتبارسنجی جریان شبیه‌سازی و مشاهداتی دارای مطابقت بیشتری بودند. مدل WetSpss، میزان جریان را در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۷۹ و ۰/۸۳ برآورد کرد.

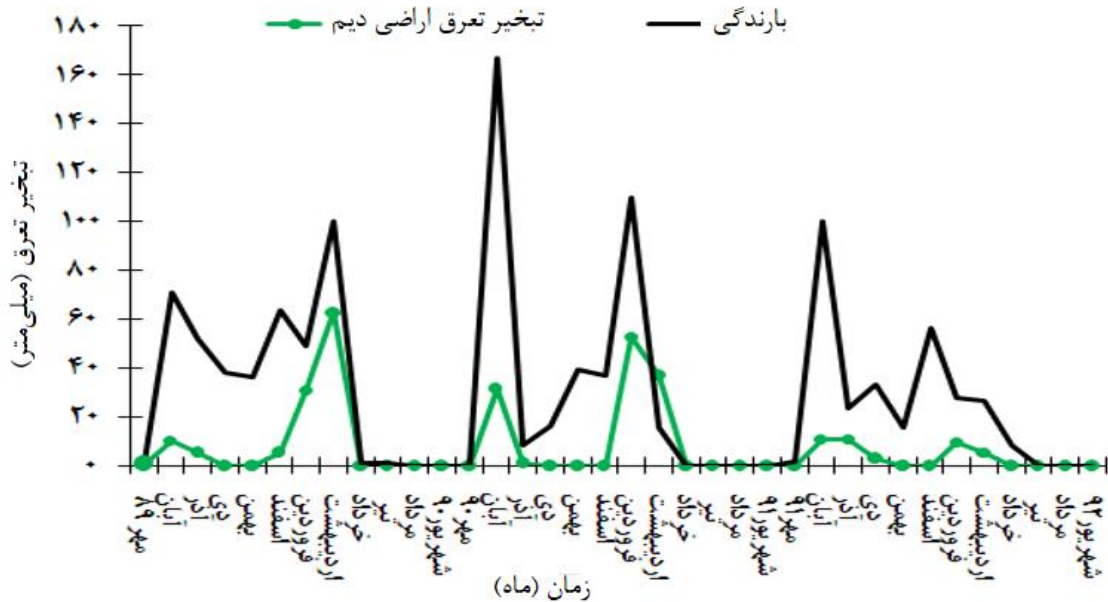
بررسی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل به تفکیک کاربری‌ها: با توجه به اهمیت مولفه تبخیر و تعرق واقعی در محاسبات بیلان آب، به عنوان یکی از مهم ترین و موثرترین پارامتر هدررفت آب در حوزه‌های آبخیز، نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی به تفکیک



شکل ۷- نمودار همبستگی نتایج برآورد مدل با مقادیر مشاهداتی تحت تبخیر (الف) و مقادیر ماهانه تبخیر از پیکره‌های آبی حاصل از مدل WetSpss (ب)



شکل ۸- روند تغییرات مقادیر حاصل از مدل و داده‌های مشاهداتی لایسیمتر (الف) و آمار گزارش شده نیاز آبی محصولات زراعی و باغی (ب)



شکل ۹- تغییرات ماهانه تبخیر و تعرق واقعی برای اراضی دیم در برابر بارندگی

و تغذیه آب زیرزمینی خروجی مدل و نقشه‌های ورودی به مدل با استفاده از آماره ضریب تبیین کرامر از طریق نرم‌افزار Idrisi ارائه شده است (Kumar و همکاران، 2014).

طبق نتایج جدول ۳، در منطقه مورد مطالعه، توزیع مکانی تبخیر و تعرق به ترتیب همبستگی بالا با کاربری اراضی، پتانسیل تبخیر تعرق، بافت خاک، و درجه حرارت دارد. رواناب، بیشترین همبستگی را با کاربری اراضی، بارش و بافت خاک و با سایر متغیرها، همبستگی کمتری دارد. تغذیه آب زیرزمینی، همبستگی متوسط با بافت خاک و کاربری اراضی دارد.

تغذیه آب زیرزمینی: با توجه به عدم دسترسی به داده‌های تغذیه آب زیرزمینی، ابتدا تغذیه آب زیرزمینی به صورت میانگین برای سال ۹۱-۹۲ محاسبه و سپس با مقادیر خروجی مدل مقایسه شد. در مدل WetSpass، تغذیه آب زیرزمینی برای سال ۹۱-۹۲ برابر با ۱۳۱/۸۲ میلی‌متر شد که در مقایسه با نتایج محاسباتی به صورت دستی (جدول ۱) حدود ۲۲ میلی‌متر بیش برآورد دارد.

همبستگی میان داده‌های ورودی به مدل و رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی، شبیه‌سازی شده: در جدول ۳، نتایج همبستگی بین نقشه‌های رواناب، تبخیر و تعرق واقعی

جدول ۳- ضریب همبستگی (سطح اطمینان ۹۵ درصد) بین نقشه‌های رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی خروجی مدل و داده‌های ورودی به مدل

نقشه ورودی	نقشه رواناب	تبخیر و تعرق واقعی	تغذیه آب زیرزمینی
بافت خاک	۰/۵۸	۰/۴۵	۰/۳۴
کاربری اراضی	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۳۲
شیب	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۵
بارش	۰/۳۳	۰/۱۹	۰/۴۳
درجه حرارت	۰/۱۶	۰/۳۱	۰/۱۴
پتانسیل تبخیر و تعرق	۰/۲۱	۰/۴۲	۰/۲۸
عمق آب زیرزمینی	۰/۰۶۲	۰/۰۶	۰/۰۳

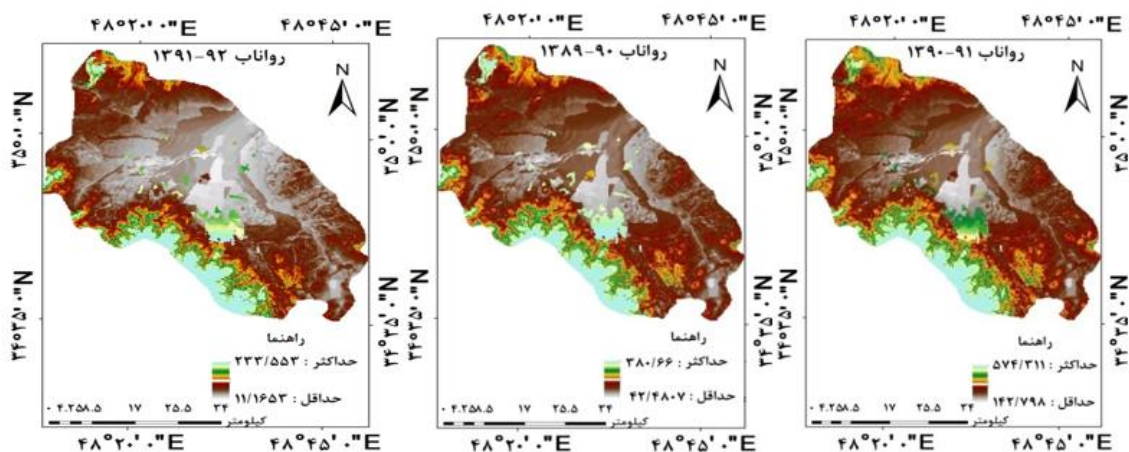
از آنجایی که نتایج حاکی از همبستگی بالا بین کاربری اراضی و بافت خاک با توزیع رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی بود، در مرحله بعد، تأثیر این دو عامل بر توزیع مکانی رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی بررسی شد. با توجه به نقشه‌های توزیع مکانی سالانه رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی در شکل ۱۰، کاربری اراضی و نوع پوشش زمین، بیشترین تأثیر را بر توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی دارد.

همچنین، تفاوت در نوع بافت خاک منجر به تغییرپذیری در تبخیر و تعرق واقعی یک نوع کاربری خاص شد. با توجه به نتایج، می‌توان بیان کرد، در منطقه مطالعاتی تبخیر و تعرق هر طبقه کاربری اراضی از بافت شنی به سیلتی افزایش و مولفه رواناب نیز افزایش می‌یابد. افزایش تبخیر و تعرق واقعی و رواناب در بافت نرم، همراه با کاهش در مقادیر تغذیه آب زیرزمینی مشاهده شد. بافت نرم صرف‌نظر از نوع طبقه کاربری منجر به کاهش تغذیه آب زیرزمینی شد. با توجه به شکل‌های توزیع مکانی تغذیه آب زیرزمینی، از آنجایی که تغذیه نتیجه‌ای از فرایند تبخیر و تعرق و رواناب است، این مولفه تمام اثرات و الگوی مکانی سایر مولفه‌ها را یکپارچه می‌سازد. بنابراین الگوی پیچیده‌ای برای نقشه‌های توزیعی تغذیه آب زیرزمینی حاصل شد.

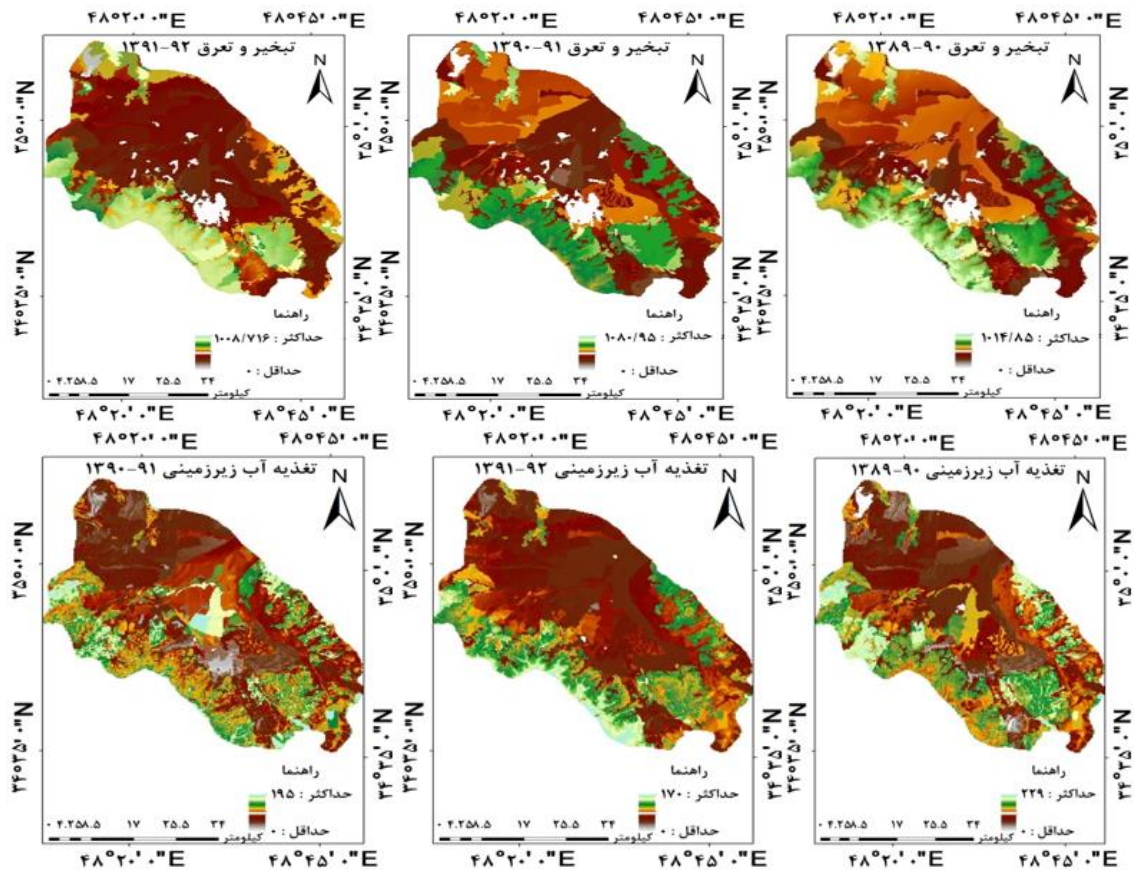
به‌طور کلی، به نظر می‌رسد کاربری اراضی بیشترین اثر را بر توزیع مولفه‌های بیلان سطحی منطقه مورد مطالعاتی دارد و بافت خاک دومین عامل مهم تأثیرگذار بر توزیع مولفه‌های بیلان آب سطحی است. طبق نتایج، پارامتر شیب، کمترین عامل تأثیرگذار بر توزیع مولفه‌های بیلان سطحی منطقه مطالعاتی است، دلیل آن را شاید بتوان به توپوگرافی ملایم بیشتر قسمت‌های منطقه مطالعاتی، نسبت داد.

اثر متوسط بارش، درجه حرارت، و پتانسیل تبخیر و تعرق بر توزیع مولفه‌های بیلان سطحی را می‌توان به تغییر نسبتاً اندک این عوامل در منطقه مورد مطالعه نسبت داد. به‌طور کلی، نتایج حاصل از دوره واسنجی و اعتبارسنجی بیانگر مقبولیت مدل در شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آب حوزه آبخیز مورد مطالعه بود که با نتایج مطالعه Aish و همکاران (2010)، Pandian و همکاران (2014)، Armanuos و همکاران (2016) و Gebremeskel و Kebede (2017) برای سایر مناطق همخوانی دارد.

توزیع پراکندگی سالانه رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه در سطح حوضه: با استفاده از نقشه‌های ماهانه خروجی مدل WetSpss و به کمک نرم‌افزار ArcGIS، مقادیر سالانه توزیع رواناب (میلی متر)، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی، به‌وسیله مدل در سطح حوضه تهیه شد.



شکل ۱۰- توزیع پراکندگی ارتفاع رواناب (میلی‌متر)، تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر) و تغذیه آب زیرزمینی (میلی‌متر) در سطح حوضه آبخیز همدان، بهار خروجی مدل WetSpss



ادامه شکل ۱۰- توزیع پراکندگی ارتفاع رواناب (میلی‌متر)، تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر) و تغذیه آب زیرزمینی (میلی‌متر) در سطح حوزه آبخیز همدان، بهار خروجی مدل WetSpa

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر ضمن تایید کارایی مدل WetSpa، نشان داد که توزیع مکانی منابع آب و فرایندهای هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه ارتباط نزدیکی با نوع پوشش زمین و بافت خاک دارد. در این تحقیق، مدل هیدرولوژیکی WetSpa برای اولین بار در ایران برای حوزه آبخیز مورد مطالعه تست شد. پیشنهاد می‌شود، کارایی مدل WetSpa به‌ویژه در بخش تبخیر و تعرق در سایر مناطق ایران آزمون

شود. یکی از معایب مدل WetSpa، واسنجی دستی آن است، پیشنهاد می‌شود، در تحقیقات آتی فرایند تعیین دامنه پارامترهای این مدل به‌صورت خودکار با استفاده از روش‌هایی مانند شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شود. امید است، نتایج این مقاله مورد توجه سازمان‌ها و مدیران منابع آب، به‌منظور بهبود مدیریت آب، حفاظت محیط زیست، و توسعه اقتصادی و اجتماعی منطقه مورد مطالعه واقع شود.

منابع مورد استفاده

1. Aish, A.M., O. Batelaan and F. Smedt. 2010. Distributed recharge estimation for groundwater modeling using WetSpa model, case study Gaza Strip, Palestine. The Arabian Journal for Science and Engineering, 35: 162-155.
2. Armanuos, A.M., A. Negm, C. Yoshimura and O.C.S. Valeriano. 2016. Application of WetSpa model to estimate groundwater recharge variability in the Nile Delta aquifer. Arabian Journal of Geosciences, 9: 1-14
3. Anderson, R., J. Hansen, K. Kukuk and B. Powell. 2006. Development of watershed-based water balance tool for water supply alternative evaluations. Proceedings of the Water Environment Federation, 6: 2817-2830.

4. Anquetin, S., I. Braud, O. Vannier, P. Viallet, B. Boudevillain, J.D. Creutin and C.L. Manus. 2010. Sensitivity of the hydrological response to the variability of rainfall fields and soils for the Grad 2002 flash-flood event. *Journal of Hydrology*, 394: 134–147.
5. Boughton, W. and P.I. Hill. 1997. A design flood estimation procedure using data generation and a daily water balance model. Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, Australia, 48 pages.
6. Cudennec, C., C. Leduc and D. Koutsoyiannis. 2007. Dry land hydrology in Mediterranean regions. *Hydrology Science Journal*, 52: 1077–1087.
7. Güntner, A., M.S. Krol, J.C. de Araújo and A. Bronstert. 2004. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semi-arid region. *Hydrological Science*, 49: 901–918.
8. Gebremeskel, G. and A. Kebede. 2017. Spatial estimation of long-term seasonal and annual groundwater resources: application of WetSpss model in the Werii Watershed of the Tekeze River Basin, Ethiopia. *Physical Geography*, 38: 338-359.
9. Ghandhari, A. and S.M.R. Alavi moghaddam. 2011. Water balance principles: a review of five watersheds in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4: 465–479.
10. Hall, D., J. Foster, N. DiGirolamo and G.A. Riggs. 2012. Snow cover, snowmelt timing and stream power in the Wind River Range Wyoming. *Geomorphology*, 137: 87–93.
11. Hamedan Regional Water Company. 2014. Study plan of Gharacheh Watershed, 57 pages (in Persian).
12. Hamedan Regional Water Company. 2013. Studies on updating the balance of water resources of the Salt Lake Watershed, 118 pages (in Persian).
13. Jakeman, A.J. and G.M. Hornberger. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall runoff model? *Water Resources Research*, 29: 2537–2649.
14. Kumar, R., S. Nandy, R. Agarwal and S.P. Kushwaha. 2014. Forest covers dynamics analysis and prediction modeling using logistic regression model. *Journal of Ecological Indicators*, 45: 444-455.
15. Pandian, M., U.A.B. Rajasimman and J. Saravanavel. 2014. Identification of ground water potential recharge zones using WetSpss model. *International Journal of Water Research*, 2: 27-32.
16. Rahimi, J., M. Ebrahimpour and A. Khalili. 2013. Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 112: 409– 418.
17. Shukla, A.K., S. Pathak, C.S.P. Ojha, A. Mijic and R.D. Garg. 2017. Spatio-temporal assessment of annual water-balance model for upper Ganga Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22: 5357-5371.
18. Troch, P.A. 2000. Data assimilation for regional water balance studies in arid and semi-arid areas, case study: the Volta Basin upstream the Akosombo Dam in Ghana. European Space Agency, 163-165.
19. Walker, G.R. and L. Zhang. 2002. Plot scale models and their application to recharge studies. CSIRO Publishing, Melbourne, 34 pages.
20. Zhang, L., G.R. Walker and W.R. Dawes. 2002. Water balance modelling: concepts and applications. *Water Balance Modelling*, 84: 31–47.
21. Zomlot, Z., B. Verbeiren, M. Huysmans and O. Batelaan. 2015. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: assessment of controlling factors. *Journal of Hydrology*, 4: 349–36.

Simulation of water balance components using WetSpass model, case study: Hamedan-Bahar Watershed

Mahtab Safari Shad^{1*}, Mahmoud Habibnejad Roshan², Karim Solaimani³, Alireza Ildoromi⁴ and Hossein Zeinivand⁵

¹ Phd, Department of Natural Resource, University of Sari, Iran, ^{2 and 3} Professor, Department of Natural Resource, University of Sari, Iran, ⁴ Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Malayer University, Iran and ⁵ Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Lorestan University, Iran

Received: 10 December 2021

Accepted: 25 April 2022

Abstract

Many of the environmental problems are caused by the changes in the main components of the hydrological cycle. However, water balance modeling can help to better understanding the components of the hydrological cycle in order to develop appropriate management options. The purpose of this study is to calculate three important components of surface water balance using the WetSpass model and evaluate the model in Hamadan-Bahar Watershed located in Hamadan Province on a monthly time scale. The results of the model evaluation in the study showed that the coefficient of determination between the observed and simulated runoff in the calibration and validation period is equal to 0.79 and 0.83, respectively. Groundwater nutrition assessment was also performed according to manual calculations of the variable for 2012-2013. Then, the results of Kramer correlation coefficient between spatial distribution maps of runoff, actual evapotranspiration and groundwater recharge were investigated with input maps of the model. In general, due to the importance of evapotranspiration in water balance calculations, the evaporation and transpiration maps of the model were evaluated separately for different uses. The evaluation results confirmed the capability of the WetSpass model in simulating runoff, evapotranspiration and groundwater feeding with an acceptable accuracy. The results of spatial distribution maps of runoff, actual evapotranspiration and groundwater recharge indicate a high correlation between evapotranspiration component with land use (0.54), soil texture (0.45), evapotranspiration potential (0.42) and temperature (0.31). Also, these results indicate a high correlation between runoff components with land use (0.62) and soil texture (0.58), and average correlations between groundwater recharge component with land use (0.32) and soil texture (0.34). Therefore, land use and soil texture were the first and second factors affecting the distribution of surface balance components, respectively.

Keywords: Evapotranspiration, Groundwater recharge, Hydrological models, Kramer correlation coefficient, Land use

* Corresponding author: mahtabsafari66@gmail.com