



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی گران

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هفتم، شماره اول، ۱۳۹۹

۲۵-۴۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2020.17733.3330

بررسی تغییرات زمانی و مکانی مؤلفه‌های بیلان آب و هیدروگراف تفکیک‌شده حوزه آبخیز ارازکوسه از طریق مدل‌سازی تغذیه آب زیرزمینی با مدل WetSpass

زینب محمودی^۱، * عبدالرضا بهره‌مند^۲، خدایار عبدالهی^۳، امیر سعدالدین^۴،

شاپور کوهستانی^۵ و چوقی‌بایرام کمکی^۵

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مدیریت آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۲ دانشیار گروه مدیریت آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۳ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد،

^۴ استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت،

^۵ استادیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷

چکیده

سابقه و هدف: یکی از فاکتورهای مهم و اساسی در توسعه و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، تغذیه آب زیرزمینی است. البته با توجه به ارتباط مؤلفه‌های بیلان آب سایر عوامل هیدرولوژیکی را نیز باید در نظر گرفت. برآورد میزان تغذیه یک فرآیند پیچیده و چالش‌برانگیز است. به این دلیل که تغذیه به متغیرهایی محیطی دیگر مانند کاربری اراضی، توپوگرافی، خاک، شرایط اقلیمی و دیگر ویژگی‌های هیدرولوژیکی وابسته است. در پژوهش حاضر، به کمی‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس زمانی ماهانه با رویکرد توزیعی با استفاده از مدل WetSpass پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها: با استفاده از مدل WetSpass و داده‌های بارش، دما، تبخیر، سرعت باد، عمق آب زیرزمینی و نقشه‌های بافت خاک، توپوگرافی و کاربری اراضی حوزه آبخیز ارازکوسه مؤلفه‌های بیلان آبی شامل تبخیر و تعرق، رواناب، برگاب و تغذیه آب زیرزمینی طی سال‌های آماری ۲۰۱۵-۲۰۰۱ در مقیاس ماهانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر شبیه‌سازی شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از پژوهش با توجه به معیارهای ارزیابی مورد استفاده در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی اجزای هیدروگراف جریان شامل رواناب مستقیم، جریان پایه و جریان کل شبیه‌سازی توسط مدل و هیدروگراف‌های تفکیک‌شده با استفاده از نرم‌افزار WHAT نشان‌دهنده کارایی خوب مدل WetSpass برای شبیه‌سازی تغذیه آب زیرزمینی و سایر مؤلفه‌های بیلان آبی حوزه آبخیز ارازکوسه است. لازم به ذکر است که مقادیر ضریب نش-ساتکلیف

* مسئول مکاتبه: abdolreza.bahremand@gmail.com

به‌عنوان معیار ارزیابی رایج در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی برای رواناب مستقیم برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۶ و ۰/۵۴، برای جریان پایه برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر ۰/۵۵ و ۰/۵۳ و برای رواناب کل برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۵۶ به‌دست آمد. بررسی توزیع زمانی- مکانی مؤلفه‌های بیلان آب در ماه‌های مختلف در انواع کاربری اراضی و طبقات شیب مختلف نشان داد که میزان تغییرپذیری مؤلفه‌ها به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تأثیر فاکتورهای اقلیمی به‌ویژه بارش، تغییرات فصلی، ویژگی‌های فیزیوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری منطقه می‌باشد. به‌نحوی که در مناطق جنگلی حجم سالانه تغذیه و رواناب با توجه به سطح زیرپوشش این کاربری به‌ترتیب برابر با ۲۳،۱۱۵،۷۹۱ مترمکعب و ۱،۷۷۶،۲۱۷ مترمکعب است. بیش‌ترین سهم تغذیه آب زیرزمینی در اراضی جنگلی مربوط به طبقه شیب صفر تا ۱۰ درصد می‌باشد و بیش‌ترین سهم رواناب در این کاربری متعلق به شیب‌های بالاتر از ۳۰ درصد می‌باشد. بیش‌ترین حجم رواناب سالانه در حوزه آبخیز ارازکوسه به اراضی مسکونی در شیب‌های متوسط و بالا با توجه به درصد سطح تحت پوشش و برابر با ۱۵۶/۳۰۰ مترمکعب است.

نتیجه‌گیری: با توجه به ارزیابی مؤلفه‌های بیلان آب می‌توان بیان کرد تغذیه به‌عنوان عامل مهم بررسی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی شناخته شده است. از طرفی مؤلفه مذکور تحت‌تأثیر فاکتورهای مختلف اقلیمی و فیزیوگرافی و پوشش گیاهی و کاربری اراضی حوزه آبخیز می‌باشد، به همین دلیل تخمین صحیح میزان آن می‌تواند نقش مهمی در مدیریت و توسعه پایدار منابع آب سطحی و زیرزمینی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه آب زیرزمینی توزیعی مکانی، جریان پایه، رواناب مستقیم

مقدمه

توجه به این واقعیت، در بسیاری از مدل‌های بیلان آبی، تغذیه به‌عنوان باقی‌مانده معادله بیلان آبی محاسبه می‌شود که ممکن است مدل‌سازی آن، عدم قطعیت‌های قابل‌توجهی در تخمین تغذیه آب زیرزمینی، ایجاد نماید (۱۰ و ۱۵). به همین دلیل، در طی مرحله واسنجی مدل‌های جریان آب زیرزمینی، تغذیه عموماً به‌عنوان یک پارامتر تعدیل‌کننده، مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۳). توزیع مکانی- زمانی تغذیه در بررسی و ارزیابی‌های هیدرولوژیکی از جمله مدل‌سازی جریان آب سطحی و زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. برای برآورد تغذیه روش‌ها و مدل‌های مختلفی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به SWAT (۵)، DREAM (۱۸)، WetSpa (۲۹) اشاره کرد. امروزه کاربرد مدل‌های توزیعی به‌دلیل افزایش دسترسی به داده‌های سنجش‌ازدور، وجود داده‌های توزیعی مانند نقشه‌های هم‌دما و... در مقیاس‌های نسبتاً خوب،

آب زیرزمینی بزرگ‌ترین مخزن آب شیرین مایع روی کره زمین است و برای حفظ و ادامه به‌منظور تأمین نیازهای شرب، کشاورزی، زیست‌محیطی و صنعتی اهمیت زیادی دارد (۲۵ و ۲۸). در واقع، یکی از فاکتورهای مهم و اساسی در توسعه و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، تغذیه آب زیرزمینی است. البته باید سایر عوامل هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی را نیز در نظر گرفت (۲۶). هر آبی که از هر جهت به سیستم آب‌زیرزمینی وارد می‌شود می‌تواند به‌صورت تغذیه تعریف شود. برآورد میزان تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی به‌دلیل تعامل آن‌ها با فرآیندهای سطحی یک فرآیند پیچیده و چالش‌برانگیز است. همچنین، تغذیه به متغیرهای مختلف از جمله کاربری اراضی، توپوگرافی، خاک، شرایط اقلیمی و دیگر ویژگی‌های هیدرولوژیکی وابسته است (۸). با

گیاهی و عمق آب زیرزمینی می‌باشند (۳۱). همچنین، عبدالهی و همکاران (۲۰۱۷) مدل بیلان آبی توزیعی ماهانه WetSpass- M را توسعه داده و در حوزه آبخیز Black Volta در کشور غنا در غرب آفریقا به‌منظور برآورد توزیعی اجزای بیلان آبی شامل رواناب سطحی، تبخیر واقعی، تغذیه آب زیرزمینی و برگاب مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصل از این بررسی در دو بخش توسعه مدل WetSpass در جهت تبدیل مقیاس زمانی فصلی به ماهانه و نتایج کاربرد آن در حوزه مذکور موارد ذیل را شامل می‌شود: در بخش توسعه مدل: مدل WetSpass سابق برای شبیه‌سازی بیلان آبی در حوزه‌های مرطوب کاربرد داشته است اما به‌روزرسانی‌های انجام‌گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد که مدل WetSpass- M، قابلیت استفاده در حوزه‌های نیمه‌خشک و خشک را نیز دارد. در مدل WetSpass- M، مقیاس زمانی ریزتر شده و از مقیاس زمانی فصلی به ماهانه با تعریف اجزای بیلان آبی در مقیاس ماهانه تبدیل شده است. نتایج کاربرد مدل WetSpass- M در حوزه آبخیز Black Volta، تطابق خوبی بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی (نش- ساتکلیف برابر با ۰/۷۷) را نشان داد (۲). علاوه بر این، مصطفی و همکاران (۲۰۱۷) در یک پژوهش برای شناسایی فاکتورهای مؤثر بر خشک‌سالی آب زیرزمینی و تخلیه آن در شمال غرب بنگلادش از مدل WetSpass- M، برای شبیه‌سازی تغذیه ماهانه آب زیرزمینی و بررسی اثر تغییرات تاج پوشش زمین بر تغذیه استفاده نمودند. در این بررسی، تغییرات فصلی و زمانی تغذیه آب زیرزمینی نشان می‌دهد که روند طولانی‌مدت آن در طی این ۲۸ سال معنی‌دار نبوده و همچنین نتایج نشان داد که تغذیه آب زیرزمینی ماهانه نوسانات قابل‌توجهی دارد به‌طوری‌که در فصول خشک خیلی کم (نوامبر تا آوریل) است و در طول ماه‌های ژانویه، جولای، اوت و سپتامبر میزان تغذیه بسیار بالاست.

اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی حوزه آبخیز (به‌عنوان مثال مدل‌های رقمی ارتفاع) در مقیاس کوچک و همچنین از منظر محاسباتی افزایش دسترسی به منابع کامپیوتر قدرتمند افزایش یافته است (۲۴). البته از آنجاکه این نوع مدل‌ها به داده‌های ورودی وسیعی برای شبیه‌سازی نیاز دارند، استفاده از این مدل‌ها، زمانی سودمند است که اطلاعات گسترده‌ای از حوزه آبخیز مانند پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاکشناسی حوزه، شیب و غیره در دسترس باشد (۳). یکی دیگر از مدل‌های بیلان آب‌وخاک در مقیاس توزیعی مدل WetSpass است که یک مدل بر مبنای ساختار مدل بیلان آبی توزیعی زمانی- مکانی WetSpa (۲۹) است که می‌تواند تغذیه آب زیرزمینی را تا حد قابل‌قبولی شبیه‌سازی و برآورد نماید. این مدل ابتدا در دیارتمان مهندسی هیدرولوژی و هیدرولیک دانشگاه بروکسل بلژیک به‌منظور پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر تحت شرایط نیمه پایدار تهیه شده بود (۷). نسخه جدید این مدل تحت عنوان WetSpass- M با قابلیت استفاده در مناطق خشک و نیمه‌خشک، توانایی شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس زمانی ماهانه توسعه یافته است (۱ و ۲). مطالعات بسیاری با استفاده از مدل WetSpass در نقاط مختلف جهان انجام شده است که می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

زوملت و همکاران (۲۰۱۵) در حوزه آبخیز Flanders در شمال بلژیک، به شبیه‌سازی توزیعی- مکانی آب زیرزمینی حوزه و مقایسه آن با رواناب سطحی پرداختند، نتایج بررسی آن‌ها توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی نشان داد و همچنین نتایج مطالعه آن‌ها بیان می‌کند که مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر جریان آب زیرزمینی، میزان بارش، بافت خاک و پوشش گیاهی است؛ درحالی‌که مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کننده جریان پایه، پوشش

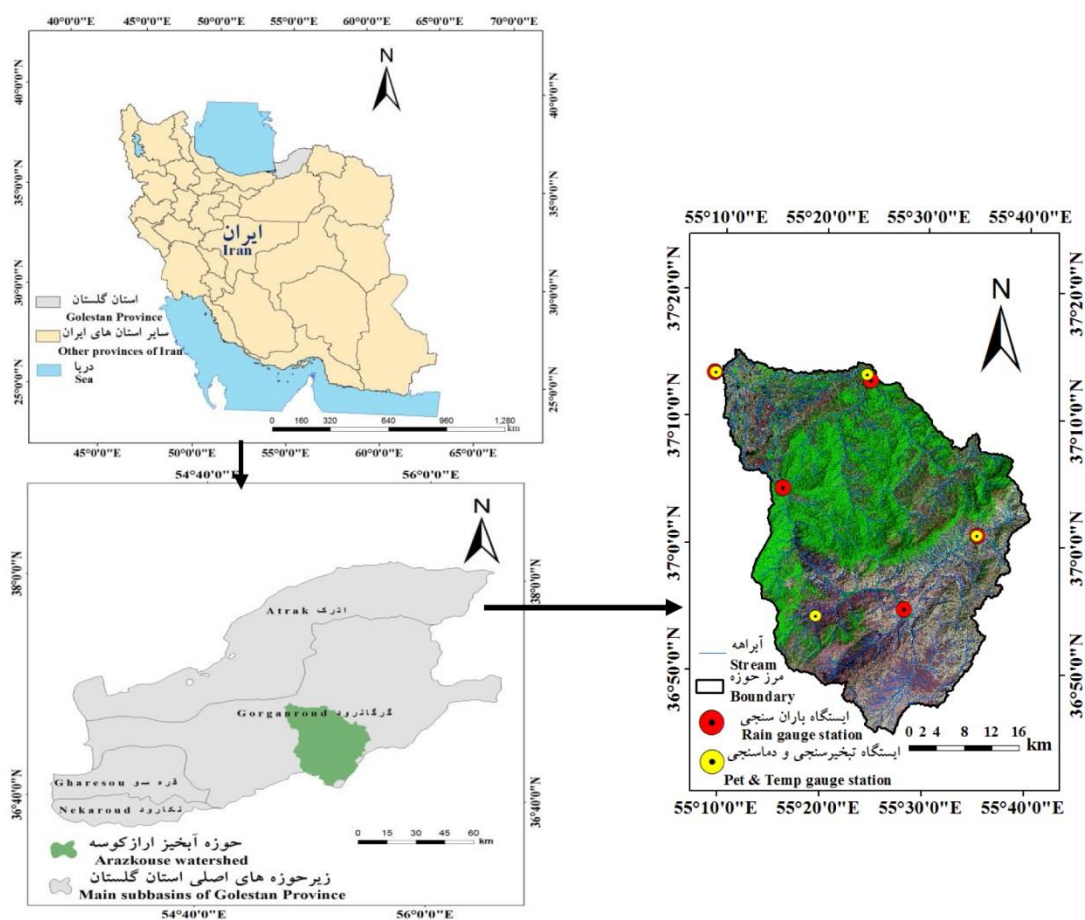
مقیاس ماهانه است. در گام دوم پژوهش به بررسی اثر تغییرات مکانی اجزای بیلان آبی در طبقات کاربری اراضی و شیب سطح زمین حوزه آبخیز ارازکوسه پرداخته می‌شود. نتایج این بررسی‌ها این امکان را فراهم می‌کند که مناطق دارای بیشترین پتانسیل تبخیر و تعرق را شناسایی کرد و تمهیدات لازم برای کاهش تبخیر و تعرق در مناطق بحرانی را پیش‌بینی و اجرا نمود. همچنین نتایج این پژوهش در رابطه با مناطقی که بیشترین میزان رواناب را دارند و می‌توانند باعث سیل‌خیزی در منطقه شوند را می‌توان با کم‌ترین هزینه و زمان شناسایی کرد، طبیعتاً شناخت بهتر شرایط، فرصت کاهش خسارات ناشی از سیل در منطقه را فراهم می‌کند. همچنین، بررسی توزیعی - مکانی میزان تغذیه آب زیرزمینی می‌تواند کمک قابل توجهی در شناسایی مناطق مناسب تغذیه مصنوعی نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، حوزه آبخیز ارازکوسه است که با مساحت حدود ۱۵۳۵ کیلومتر مربع بخشی از حوزه گرگان‌رود واقع در استان گلستان بوده که در شمال شرقی کشور در مختصات طول جغرافیایی $55^{\circ} 40' 40''$ تا $55^{\circ} 09' 12''$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 15' 10''$ تا $36^{\circ} 45' 15''$ شمالی قرار گرفته است. بارش متوسط سالانه این حوزه ۶۵۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه آن ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد است. در ادامه تصویر ماهواره‌ای لندست سال ۲۰۱۵ با ترکیب رنگی کاذب باندهای ۳ و ۴ و ۵ از حوزه آبخیز ارازکوسه ارائه شده است. همچنین، داده‌های پنج ایستگاه باران‌سنجی و چهار ایستگاه تبخیرسنجی و دماسنجی مورداستفاده در این مطالعه به همراه شبکه هیدروگرافی ارائه شده است (شکل ۱).

همچنین، نتایج آن‌ها نشان داد که عمق آب زیرزمینی به‌طور پیوسته در حال افزایش است که ناشی از بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب زیرزمینی برای مصارف آبیاری است و تغییر اقلیم در خشک‌سالی آب زیرزمینی طی این دوره کم‌تر نقش دارد (۲۰). در نهایت، ملکی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل WetSpss، میزان تغذیه آب زیرزمینی را در حوزه آبخیز گافسای شمالی تحت شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک در تونس، محاسبه نمودند. در این مطالعه واسنجی مدل با استفاده از تطابق مجموع تغذیه و مقادیر رواناب محاسبه‌شده توسط مدل WetSpss انجام شد و مقادیر به‌دست‌آمده توسط روش‌های اقلیمی موردقیاس واقع شد. نتایج ارزیابی در مقیاس ماهانه نشان داده است که بارش متوسط سالانه (۱۸۳/۳ میلی‌متر در سال) به ۵، ۱۵/۳، ۳۶/۸ و ۴۲/۸ درصد به ترتیب برای برگاب، رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه تقسیم می‌شود (۱۹).

از میان مطالعات انجام‌شده در کشور ایران می‌توان به مطالعات فاریابی و چیت‌سازان (۲۰۱۶) در حوزه آبخیز اندیمشک اهواز اشاره نمود که با استفاده از مدل WetSpss در مقیاس فصلی میزان تغذیه را برآورد نمودند. سلیمانی‌مطلق و همکاران (۲۰۲۰) در حوزه آبخیز سراب صیدعلی در استان لرستان به شبیه‌سازی تغذیه آب زیرزمینی و بررسی فاکتورهای اقلیمی بر آن پرداختند (۲۷). همچنین بیاتی و همکاران (۲۰۱۸) در حوزه آبخیز ونک در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از مدل WetSpss در مقیاس ماهانه میزان رواناب و تغذیه توزیعی آب زیرزمینی را با هدف ارزیابی مؤلفه‌های بیلان آب ماهانه حوزه آبخیز ونک در استان‌های چهارمحال و اصفهان استفاده نمودند (۹ و ۱۱). هدف از انجام پژوهش حاضر، برآورد اجزای بیلان آبی شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل توزیعی - مکانی WetSpss در

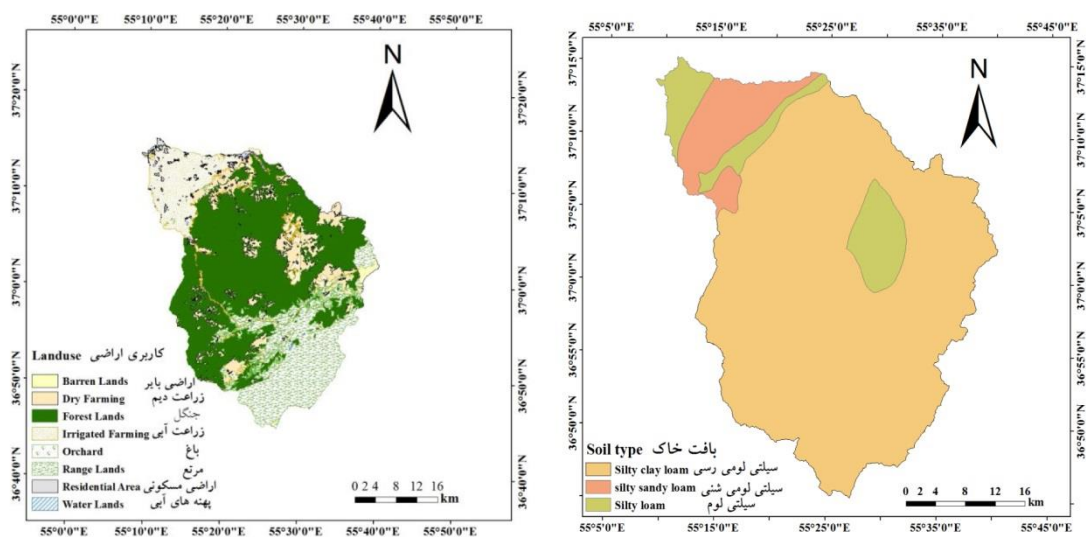


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز ارازکوسه در استان گلستان و کشور ایران به همراه شبکه هیدروگرافی و ایستگاه‌های تبخیرسنجی و باران‌سنجی مورد استفاده در پژوهش.

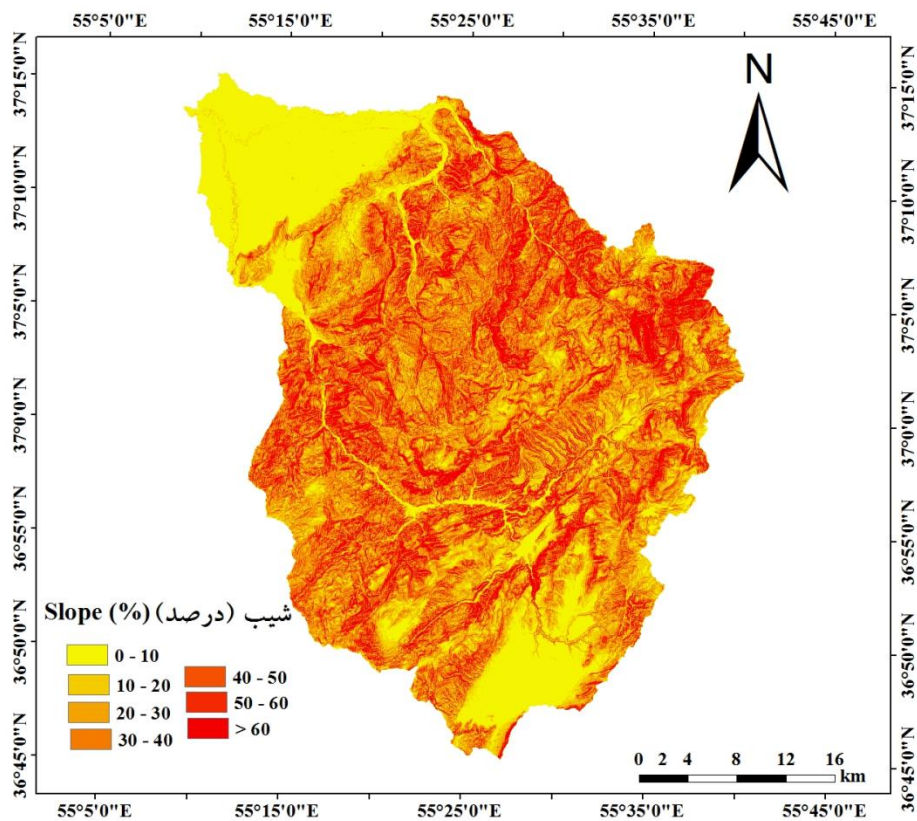
Figure 1. Geographical location of the Arazkouse watershed in Golestan province and Iran country with hydrographic network and evaporation and rain gauge stations used in the study.

ارازکوسه، بیش‌تر منطقه دارای بافت سیلتی لومی رسی است (شکل ۲). به لحاظ توپوگرافی، حوزه آبخیز ارازکوسه دارای ارتفاع متوسط و شیب متوسط حوزه آبخیز ارازکوسه به‌ترتیب برابر با ۱۱۵۲ متر و ۲۹ درصد است (شکل ۳).

بیش‌ترین مساحت اراضی این حوزه را جنگل (۴۰ درصد) و مرتع (۳۶ درصد) تشکیل می‌دهد (شکل ۲). زراعت آبی و زراعت دیم نیز به‌ترتیب مساحت حدود ۱۹۸ کیلومترمربع (۱۲/۹ درصد) و ۱۳۶ کیلومترمربع (۸/۸۶ درصد) از حوزه آبخیز ارازکوسه را پوشش می‌دهد. مطابق نقشه بافت خاک حوزه آبخیز



شکل ۲- پراکنش انواع کاربری اراضی و بافت خاک در حوزه آبخیز ارازکوسه.
 Figure 2. Land use and soil types of the Arazkouse Watershed.



شکل ۳- نقشه طبقات شیب حوزه آبخیز ارازکوسه.
 Figure 3. Slope classes map of the Arazkouse watershed.

$$P = I + S_v + T_v + R_v \quad (4)$$

که در آن، نمادهای P ، I ، S_v ، T_v و R_v به ترتیب مقدار بارش، برگاب، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق و تغذیه آب زیرزمینی (میلی متر) را نشان می دهد (۲). هم چنین، مقدار رواناب سطحی به صورت رابطه ۵ محاسبه می شود.

$$SR_m = C_{sr} C_h (P_m - I_m) \quad (5)$$

که در آن، SR_m ، P_m ، I_m به ترتیب مقدار رواناب سطحی، بارش و برگاب ماهانه (میلی متر) هستند و C_{sr} ضریب رواناب واقعی (بدون بعد) است که به صورت رابطه های ۶ تا ۹ محاسبه می شود.

$$C_{sr} = \frac{C_{wp} \overline{P_{24}}}{C_{wp} \overline{P_{24}} - RCD \times C_{wp} + RCD} \quad (6)$$

$$C_{wp} = (1 - \frac{A_{imp}}{100}) C_{per} + \frac{A_{imp}}{100} C_{imp} \quad (7)$$

$$C_{per} = W_1 (\frac{0.02}{n}) + W_2 (\frac{\theta_w}{1 - \theta_w}) + W_3 (\frac{s_p}{10 + s_p}) \quad (8)$$

$$C_{imp} = 0.9 \exp(0.024 A_{imp}) \quad (9)$$

که در آن ها، C_{wp} ، $\overline{P_{24}}$ ، RCD ، A_{imp} ، C_{per} ، C_{imp} ، n و θ_w به ترتیب ضریب رواناب پتانسیل، میانگین بارش روزانه (میلی متر بر روز در هرماه)، سطح خشکی متوالی منطقه (میلی متر)، درصد سطح نفوذناپذیر در هر پیکسل، ضریب رواناب مناطق نفوذپذیر، ضریب رواناب مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ، مقدار رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی و شیب سطح زمین (درصد) هستند. ضرایب W_1 ، W_2 و W_3 نیز وزن سه مؤلفه (کاربری اراضی،

مدل WetSpas-M: مدل مورد استفاده در این پژوهش با توجه به هدف محاسبه توزیع مکانی مؤلفه های بیلان آب به ویژه تغذیه آب زیرزمینی مدل WetSpas-M است که نسخه اولیه آن در بخش مهندسی هیدرولوژی و هیدرولیک دانشگاه بروکسل بلژیک به منظور پیش بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و جو تحت شرایط شبه ماندگار تهیه شد. نسخه جدید این مدل با قابلیت استفاده در مناطق خشک و نیمه خشک و توانایی شبیه سازی مؤلفه های بیلان آب در مقیاس زمانی ماهانه توسعه یافته و دارای یک ضریب رواناب کلی با قابلیت برآورد رواناب برای طبقات کاربری اراضی مختلف نیز است (۱) و (۲). مدل WetSpas حوزه را به صورت یک الگوی منظم از سلول های شطرنجی تبدیل نموده و به منظور لحاظ مفهوم عدم همگنی در مقیاس پیکسل کاربری اراضی در هر سلول را به چهار قسمت پوشش گیاهی، خاک لخت، مخازن آب و قسمت نفوذناپذیر تقسیم کرده و سپس مؤلفه های بیلان آب بر اساس رابطه های ۱ تا ۳ را برای این بخش ها محاسبه می شود (۳۰).

$$ET_{raster} = \alpha_v ET_v + \alpha_s ET_s + \alpha_o ET_o + \alpha_i ET_i \quad (1)$$

$$S_{raster} = \alpha_v S_v + \alpha_s S_s + \alpha_o S_o + \alpha_i S_i \quad (2)$$

$$R_{raster} = \alpha_v R_v + \alpha_s R_s + \alpha_o R_o + \alpha_i R_i \quad (3)$$

که در آن ها، ET_{raster} ، S_{raster} و R_{raster} به ترتیب نشان دهنده تبخیر-تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی (میلی متر) و α_v ، α_s ، α_o و α_i نیز به ترتیب مساحت مربوط به بخش های پوشش های گیاهی، خاک لخت، مخازن آب و سطح نفوذناپذیر در هر سلول هستند. در واقع، رابطه بیلان آب در این مدل، به صورت رابطه ۴ است:

ماه موردبررسی است. مقدار ϕ برای سلولی با حوزه مشارکت‌کننده A (مترمربع) با شاخص خشکیدگی K (روز) مطابق رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$\phi = \frac{1.15A}{K} \quad (13)$$

داده‌های ورودی: ابتدا نقشه‌های مرز حوزه، موقعیت ایستگاه‌ها و شبکه آبراه‌ها، مدل رقومی ارتفاع و شیب منطقه، با استفاده از نرم‌افزار ILWIS و ArcGIS تهیه شد. نقشه بافت خاک (به روش زمین‌آمار و برگرفته از نمونه‌برداری‌های انجام شده از خاک در نقاط مختلف استان گلستان در سال ۱۳۹۲) و نقشه کاربری اراضی (تهیه‌شده در سال ۲۰۱۵) حوزه آبخیز ارازکوسه از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان تهیه شد. داده‌های هیدرواقلمی نیز از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان جمع‌آوری شد. با تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع، سری زمانی نقشه‌های هم‌میزان تبخیر و دما با استفاده از رابطه رگرسیون این پارامترها با ارتفاع منطقه در محیط ILWIS به صورت نقشه رستری با اندازه سلولی 100×100 متر تهیه شد. سپس سری زمانی نقشه‌های رستری بارش با استفاده از ادغام روش تیسن و کریگینگ و عمق آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ تهیه شد. برای تهیه نقشه رستری سرعت باد از داده‌های سرعت باد ایستگاه سینوپتیک گنبد استفاده شد. در مدل WetSpass، اثر تغییرات فصلی پوشش گیاهی بر بیلان آب از طریق شاخص سطح برگ (LAI) نشان داده می‌شود. به این منظور با استفاده از تصاویر LAI اخذشده از سایت مودیس، نقشه‌های ماهانه LAI تهیه شد و تصحیحات هندسی لازم روی آن‌ها در محیط ArcGIS انجام شد. دوره آماری این پژوهش ۱۵ سال (۲۰۰۱-۲۰۱۵)

بافت خاک و شیب سطح زمین) تشکیل‌دهنده C_{per} هستند (۱). هم‌چنین C_h در رابطه ۱۰ ضریب توصیف‌کننده وضعیت رطوبت خاک (بدون بعد) است که به دلیل نادر بودن داده‌های برداشت‌شده زمینی رطوبت خاک در مقیاس ماهانه از رابطه زیر برآورد می‌شود (۶).

$$C_h = \frac{P_m}{LP(P_m^\alpha + ET_m^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (10)$$

که در آن، LP ، ET_m و α به ترتیب تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در ماه)، ضریب واسنجی بدون بعد اثر تبخیر-تعرق بر رواناب سطحی و ضریب تبخیر و تعرق هستند. رابطه فوق در شرایطی است که مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل بیش‌تر از بارش ماهانه باشد، در غیر این صورت مقدار C_h برابر با یک خواهد بود. پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی R_m نیز در این مدل به عنوان باقی‌مانده رابطه بیلان آب (رابطه ۱۱) محاسبه می‌شود (۲).

$$R_m = P_m - SR_m - ET_m \quad (11)$$

از آنجائی که تغذیه یک فرآیند نسبتاً کند است، به منظور لحاظ اثر ذخیره تبادلی بین ماه‌ها جریان پایه ماهانه بر اساس ذخیره ماه قبل و تغذیه آب زیرزمینی در ماه موردبررسی، با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود (۱).

$$Q_{b(t)} = \beta Q_{b(t-1)} + N_m(1-\beta)\phi R_m \quad (12)$$

که در آن، β پارامتر ذخیره است که مقدار آن بین صفر و ۱ است، $Q_{b(t-1)}$ جریان پایه از ماه قبل برحسب مترمکعب در ماه، N_m تعداد روزهای هرماه و ϕ پارامتر مشارکت‌کننده در تغذیه برای جریان پایه در

$$ENS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs})^2} \quad (15)$$

محدوده تغییرات ضریب نش- ساتکلیف (ENS) از یک تا بی نهایت منفی است و هرچه مقدار این شاخص به عدد یک نزدیک تر باشد، عملکرد بهتر مدل را نشان می دهد (۲۱). در رابطه ۱۵، Q_{sim} و Q_{obs} به ترتیب مقدار جریان مشاهداتی و شبیه سازی شده و میانگین جریان مشاهداتی و شبیه سازی شده است.

معیار KGE از جدیدترین معیار ارزیابی برای مقایسه هیدروگراف های شبیه سازی شده و مشاهده شده است. گوپتا و همکاران (۲۰۰۹) ضمن معرفی این شاخص به مقایسه و بررسی مزیت های آن با معیار معروف نش- ساتکلیف پرداخته اند (۱۴). این معیار در سال ۲۰۱۲ به صورت بازبینی شده (KGE) به کار گرفته شد. (۱۶).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (16)$$

که در آن، r ضریب همبستگی بین داده های شبیه سازی و مقادیر مشاهداتی است. α نسبت انحراف معیار مقادیر شبیه سازی به انحراف معیار مقادیر اندازه گیری است. β نسبت میانگین مقادیر شبیه سازی به میانگین مقادیر اندازه گیری (مشاهداتی) است. بهترین مقدار برای معیار ارزیابی کلینگ- گوپتا عدد یک است که نشان دهنده تطابق کامل هیدروگراف ها است. در معیار بازبینی شده کلینگ- گوپتا به جای α از گاما استفاده می شود که نسبت ضریب تغییرات مقادیر شبیه سازی به ضریب تغییرات مقادیر مشاهداتی است (۱۲).

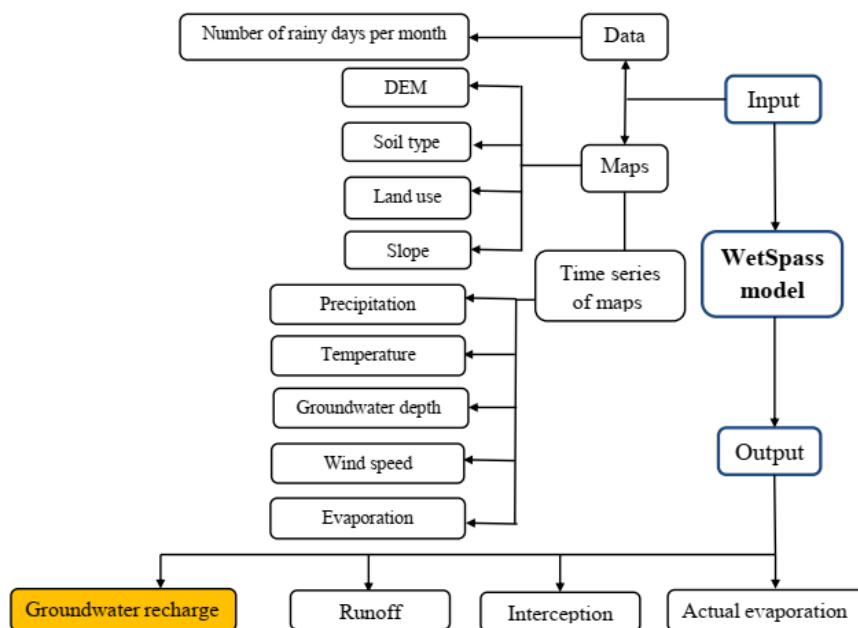
است؛ که ۱۰ سال برای دوره واسنجی و ۵ سال برای دوره اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۴ شماتیکی از ورودی ها و خروجی های مدل WetSpss را نشان می دهد.

تفکیک جریان پایه روزانه برای کل دوره آماری با سه روش حداقل محلی، فیلتر دیجیتال تک پارامتره و فیلتر دیجیتال برگشتی در نرم افزار WHAT^۱ انجام شد. انحراف معیار کم تر جریان پایه ملاک انتخاب بهترین روش تفکیک می باشد (۳۱). در این پژوهش، روش فیلتر دیجیتال تک پارامتره به عنوان بهترین روش تفکیک جریان پایه انتخاب شد. معادله آن به صورت رابطه ۱۴ است (۴، ۱۷ و ۲۲).

$$q_t = \alpha \times q_{t-1} + \frac{1+\alpha}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (14)$$

که در آن، q_t رواناب مستقیم فیلتر شده در گام زمانی t برحسب مترمکعب در ثانیه، q_{t-1} رواناب مستقیم فیلتر شده در گام زمانی $t-1$ برحسب مترمکعب در ثانیه، α پارامتر فیلتر، Q_t کل جریان رودخانه در گام زمانی t برحسب مترمکعب در ثانیه و Q_{t-1} جریان رودخانه در گام زمانی $t-1$ برحسب مترمکعب در ثانیه است. در این روش عدد ۰/۹۵ برای پارامتر فیلتر در نظر گرفته شد که مقدار این پارامتر، نتایج واقعی را در مقایسه با نتایج تفکیک به صورت دستی ارائه می دهد (۲۲).

به منظور ارزیابی کارایی مدل در شبیه سازی مؤلفه های بیلان آب از جمله رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی شاخص های ارزیابی نش- ساتکلیف (ENS) و ضریب کلینگ- گوپتای اصلاح شده استفاده گردید.

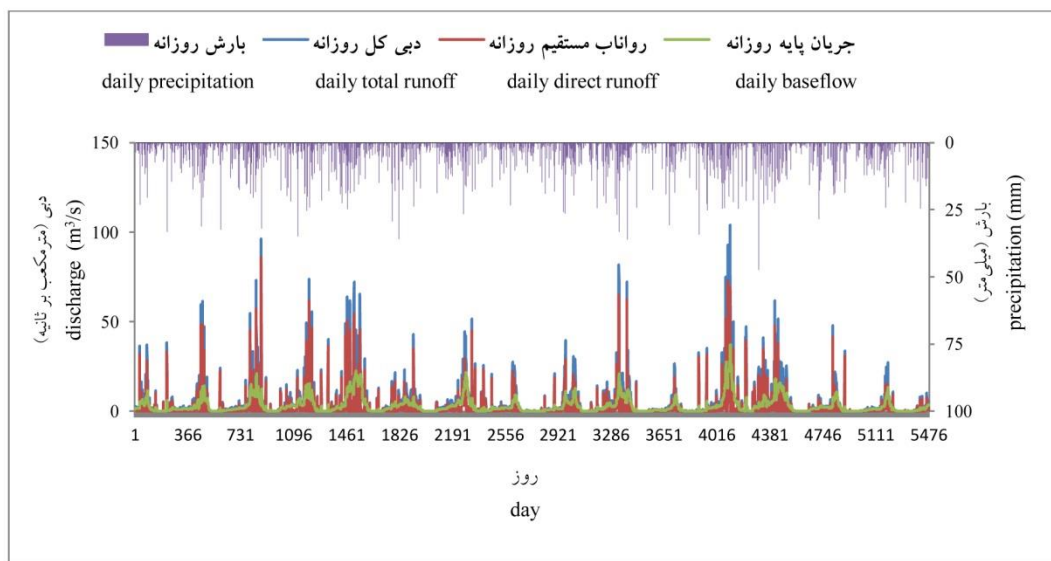


شکل ۴- شماتیکی از متغیرهای ورودی و خروجی مدل WetSpss.
 Figure 4. Schematic of inputs and outputs in WetSpss model.

نتایج و بحث

در داده‌های جریان پایه به‌عنوان بهترین روش در نظر گرفته شد. نتایج جداسازی با استفاده از نرم‌افزار WHAT و براساس فیلتر دیجیتال ۰/۹۵ ارائه شده است (شکل ۵).

در این بخش قبل از ارائه نتایج مدل‌سازی، نتایج مربوط به تفکیک آب‌پایه و رواناب مستقیم ارائه می‌شود. در این پژوهش روش فیلتر دیجیتال تک‌پارامتره به‌علت داشتن انحراف معیار کم‌تر (۳/۵)



شکل ۵- نمودار جریان سطحی شامل کل دبی جریان روزانه، رواناب مستقیم و جریان پایه به همراه نمودار میلی‌ای تغییرات بارش روزانه.
 Figure 5. Surface flow diagram including daily discharge, direct runoff, and base flow Bar chart of daily rainfall changes with Bar chart of daily rainfall changes.

روز بعد مقدار جریان پایه ثابت می‌شود. در اواسط دوره مدل‌سازی کاهش مقدار جریان سطحی و اجزای آن می‌تواند مبین اثر دوره خشک و کاهش بارش در منطقه مورد مطالعه باشد. به‌منظور شبیه‌سازی جریان، سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۱ برای دوره واسنجی و سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۰ برای دوره اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. در فرآیند واسنجی مدل از داده‌های ماهانه جریان در ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه استفاده شد. واسنجی اولیه مدل به روش دستی و با استفاده از روش سعی و خطا و روش Goal Seek انجام شد. بدین‌منظور، ابتدا با انتخاب مقادیر متوسط پارامترها مدل اجرا شد، سپس با توجه به مقدار ضریب نش-ساتکلیف و مقایسه عددی و مشاهداتی و تغییر مقادیر جریان شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی و تغییر مقادیر پارامترهای واسنجی مدل، مقدار بهینه هر پارامتر به‌دست آمد (جدول ۱). هم‌چنین، نتایج مقدار معیارهای ارزیابی کارایی بالای مدل WetSpss در شبیه‌سازی جریان ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه را نشان می‌دهد (جدول ۲).

برآورد دبی پایه در ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه براساس روش فیلتر دیجیتال تک‌پارامتره نشان داد که دبی پایه بخش زیادی از جریان رودخانه (حدود ۷۰ درصد) را شامل می‌شود. تفکیک هیدروگراف جریان بر اساس روش فیلتر دیجیتال تک‌پارامتره نشان می‌دهد (شکل ۴) که با افزایش بارش، شاخه صعودی هیدروگراف شکل گرفته و نقطه اوج آن، تقریباً مطابق با مقدار حداکثر بارش است. به‌عنوان مثال، در تاریخ ۲۰۰۲/۰۴/۱۲ با وقوع بارش ۹/۵ میلی‌متر، میزان جریان سطحی ۳۸/۲ مترمکعب بر ثانیه است؛ در روز بعد با وقوع بارش ۲۰/۳۲ میلی‌متر، مقدار جریان سطحی به ۴۰ مترمکعب بر ثانیه افزایش یافته است و در تاریخ ۲۰۰۲/۰۴/۱۴ نیز مقدار جریان سطحی به ۶۱/۴۳ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد که ۴۸ و ۱۳/۳۷ مترمکعب بر ثانیه از این مقدار را به‌ترتیب جریان سطحی و جریان پایه تشکیل می‌دهد که در واقع نشان‌دهنده نقطه اوج هیدروگراف است. در سه روز بعد نیز مقدار جریان پایه روند افزایشی داشته و بعدازآن، روند کاهش جریان پایه آغاز شده و در ۷

جدول ۱- مقادیر قابل قبول (۱) و بهینه پارامترهای واسنجی مدل در هر زیرمدل از مدل WetSpss.

Table 1. Acceptable and optimal values of model calibration parameters in each sub-model of WetSpss model.

مقدار بهینه Optimal value	محدوده قابل قبول Acceptable range	زیرمدل Sub model	پارامتر Parameter
8	1- 20	برگاب Interception	A
9.5	1- 20	تبخیر و تعرق Evapotranspiration	A
0.92	0.3- 3.5	رواناب سطحی Surface runoff	LP
0.45	0- 1	رواناب سطحی Surface runoff	X
0.38	0- 1	جریان پایه Baseflow	B
0.17	0- 1	تغذیه Recharge	Φ

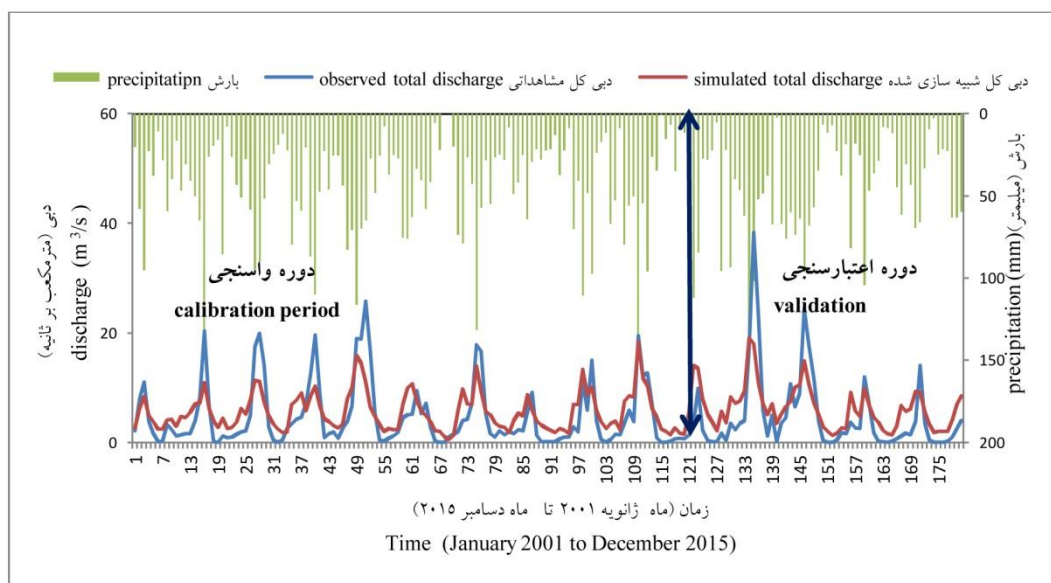
جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی برای اجزای هیدروگراف در ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه.

Table 2. Values of evaluation criteria for calibration and validation period for hydrograph components at Arazkouse hydrometer station.

رواناب کل Total Runoff	جریان پایه Baseflow	رواناب مستقیم Direct Runoff	معیار ارزیابی Evaluation Criteria	دوره Period
0.63	0.55	0.60	ENS	واسنجی Calibration
0.54	0.46	0.58	KGP	
0.56	0.53	0.54	ENS	اعتبارسنجی Validation
0.42	0.40	0.42	KGP	

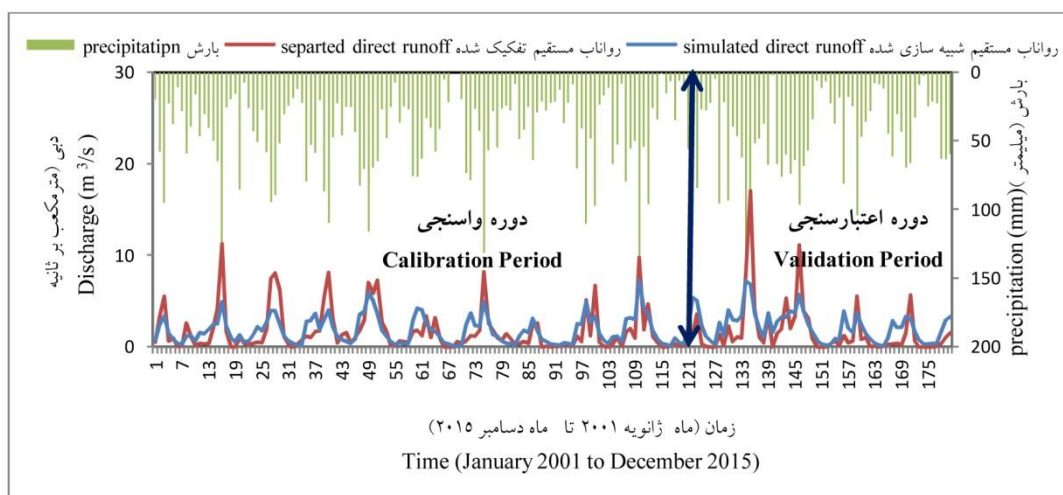
جریان‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اختلاف کمی می‌باشد. به‌طورکلی، با مشاهده رواناب مستقیم و جریان پایه شبیه‌سازی شده می‌توان به برازش مناسب مدل دست یافت که مبین دقت قابل قبول مدل در برآورد آب پایه (به‌عنوان تخمینی از تغذیه آب زیرزمینی) و رواناب مستقیم حوزه آبخیز ارازکوسه است.

هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی کل، رواناب مستقیم و جریان پایه نشان می‌دهد که با افزایش بارش، مقدار رواناب افزایش یافته است (شکل‌های ۶، ۷ و ۸). هم‌چنین گراف‌ها نشان می‌دهند که نقاط پیک شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل با مقادیر مشاهداتی نسبت به مقادیر معمولی بابا اختلاف زیادتری شبیه‌سازی شده‌اند، اما در برخی ماه‌ها نیز بین



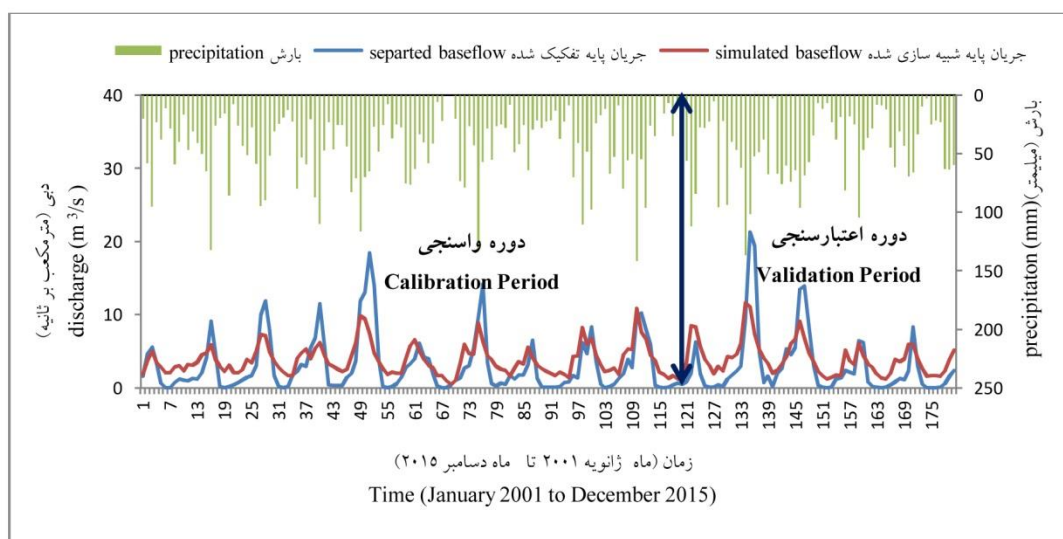
شکل ۶- هیدروگراف دبی کل مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی.

Figure 6. Hydrograph of total observed and simulated discharge at Arazkouse hydrometer station during calibration and validation period.



شکل ۷- هیدروگراف رواناب مستقیم شبیه سازی شده و رواناب مستقیم تفکیک شده از جریان اندازه گیری شده در ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی.

Figure 7. Hydrograph of simulated direct runoff and direct runoff separated from the measured total flow at the Arazkouse hydrometric station during calibration and validation period.

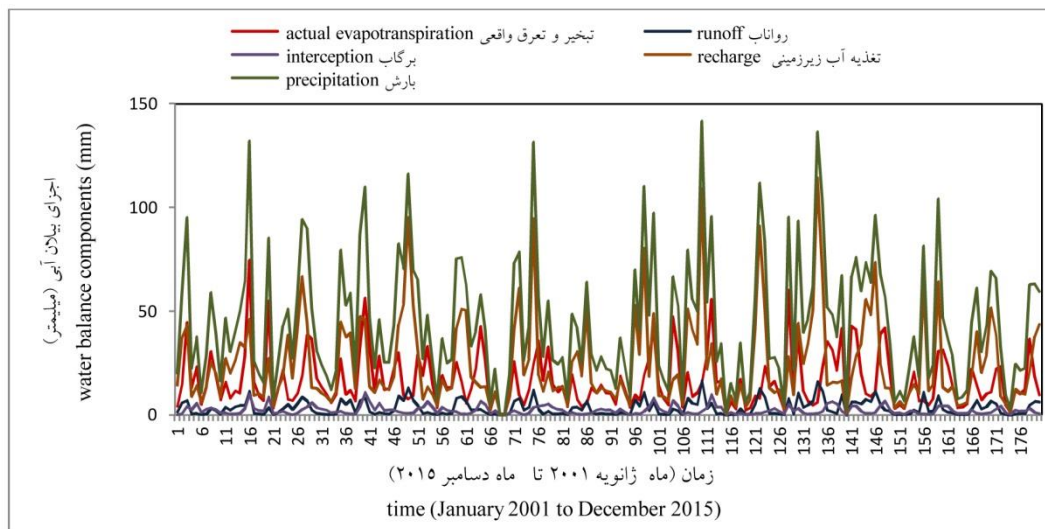


شکل ۸- هیدروگراف جریان پایه شبیه سازی شده و جریان پایه تفکیک شده از جریان اندازه گیری شده در ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی.

Figure 8. Hydrograph of simulated baseflow and separated baseflow the measured from total flow at the Arazkouse hydrometric station during calibration and validation period.

پتانسیل آب زیرزمینی می باشد و بعد از آن بیشترین مقدار مربوط به تبخیر و تعرق واقعی است. به طور کلی، می توان بیان نمود که روند اجزای بیلان آب از نوسانات بارش پیروی می کند.

نتایج اجزای بیلان ماهانه شامل تغذیه آب زیرزمینی، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق واقعی و برگاب منطقه مورد مطالعه به صورت نمودار در شکل ۹ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین سهم از میزان بارش مربوط به مقدار تغذیه

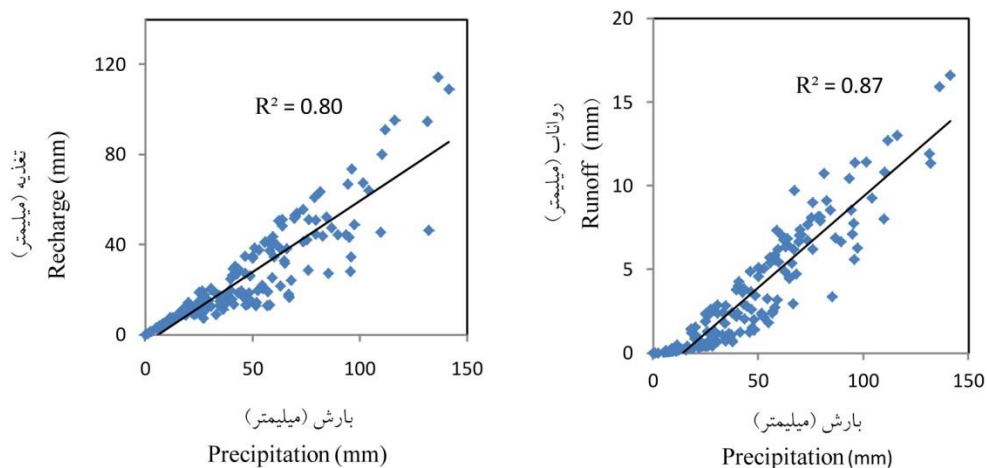


شکل ۹- اجزای بیلان آبی شبیه‌سازی شده توسط مدل WetSpss در حوزه آبخیز ارازکوسه.

Figure 9. Simulated water balance components by the WetSpss model in the Arazkouse watershed.

بارش ماهانه و تغذیه (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که بین بارش ماهانه و تغذیه محاسبه شده توسط مدل، رابطه قوی با ضریب تبیین ۸۰ درصد وجود دارد.

با توجه به اهمیت تغییرات زمانی و مکانی تغذیه، مهم‌ترین بخش نتایج استخراج شده از مدل WetSpss، محاسبه میزان تغذیه آب زیرزمینی در زمان و مکان‌های مختلف است. نتایج بررسی میزان



شکل ۱۰- نمودار همبستگی بین رواناب و تغذیه شبیه‌سازی با بارش ماهانه در حوزه آبخیز ارازکوسه.

Figure 10. Correlation graph between runoff and simulated recharge with monthly rainfall in Arazkouse watershed.

خاک لخت و تعرق گیاه)، حدود ۷/۱۳ درصد رواناب (۳/۳۵ میلی‌متر)، ۲/۲۷ درصد صرف برگاب (۱/۲۵ میلی‌متر) و ۵۵ درصد (۲۴/۶۵ میلی‌متر) صرف تغذیه

نتایج مدل ماهانه WetSpss نشان می‌دهد که به‌طور متوسط ۳۵/۶ درصد بارش ماهانه (۱۶/۷ میلی‌متر)، صرف تبخیر و تعرق واقعی (تبخیر از سطح

تغذیه آب زیرزمینی، رطوبت خاک و جریان‌های زیرقشری) می‌شود. این موضوع در واقع منعکس‌کننده شرایط اقلیمی، فیزیکی و هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه در سهم هریک از اجزای بیلان آب نسبت به بارش است.

پس از واسنجی و اعتبارسنجی، یک سری زمانی از نقشه‌های میانگین توزیعی- مکانی رواناب، تغذیه آب زیرزمینی، برگاب و تبخیر و تعرق تولید گردید. در بررسی مقادیر رواناب و تغذیه آب زیرزمینی بیش‌ترین میانگین مقدار تغذیه و رواناب مربوط به ماه‌های فوریه، ژانویه و مارس است. مقدار میانگین این مؤلفه‌ها در ماه‌های ژوئن، جولای، اوت و سپتامبر به حداقل می‌رسد. به طوری که کم‌ترین مقدار تغذیه و رواناب در طی دوره آماری مورد بررسی مربوط به ماه‌های خشک اوت و سپتامبر سال ۲۰۰۶ است. بیش‌ترین میانگین تغذیه آب زیرزمینی در طی دوره آماری مورد استفاده در پژوهش مربوط به ماه فوریه سال ۲۰۱۲ است که برابر با ۱۱۴/۳۸ میلی‌متر است، نقشه توزیعی رواناب متناظر این تاریخ میانگین رواناب را ۱۵/۹ میلی‌متر نشان می‌دهد که در طی دوره شبیه‌سازی اختلاف خیلی کمی با بیش‌ترین میزان رواناب (۱۶/۴ میلی‌متر در ماه فوریه سال ۲۰۱۰) دارد.

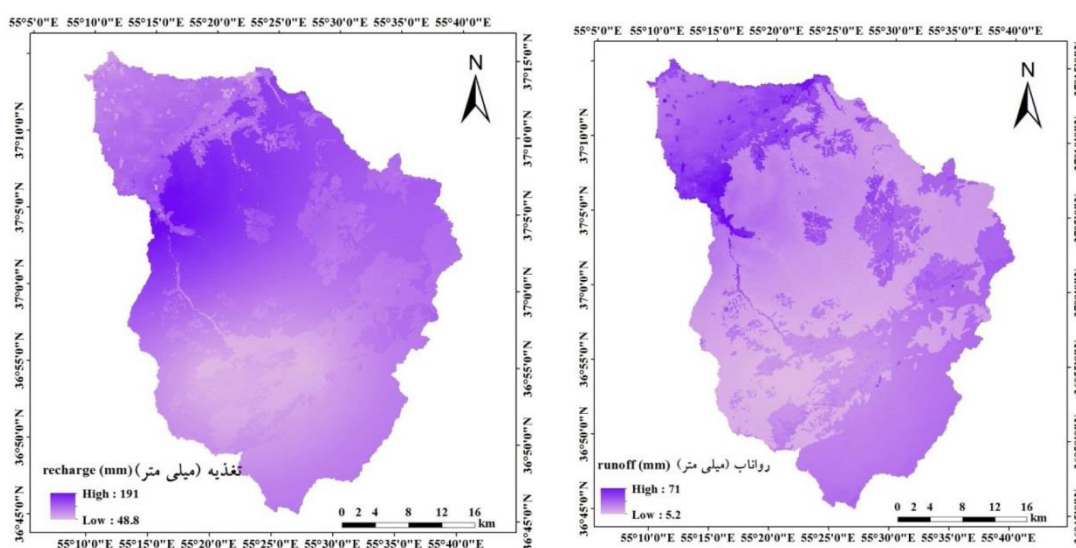
با هدف بررسی تغییرات مکانی میزان تغذیه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز ارازکوسه در ارتباط با انواع کاربری اراضی، بافت خاک و طبقات شیب حوزه آبخیز ارازکوسه نیز مدنظر قرار گرفت. در رابطه با کاربری اراضی بیش‌ترین میزان تغذیه آب زیرزمینی مربوط به اراضی جنگلی است. کم‌ترین میزان تغذیه به ترتیب مربوط به کاربری اراضی مسکونی است.

کاربری مراتع به‌طور کلی دارای تغذیه متوسط است؛ اما مناطق مرتفع با توجه به شیب بالاتر دارای تغذیه کم‌تری می‌باشند، به‌طور کلی، در کل سطح حوزه به‌جز مخازن آب سطحی، میزان تغذیه پتانسیل که معرف نفوذ آب به خاک است، بیش‌تر از میزان رواناب در سطح حوزه است؛ اما در مناطقی که بیش‌ترین میزان تغذیه وجود دارد، رواناب مقادیر کم‌تری را به خود اختصاص داده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود کاربری جنگل دارای بیش‌ترین میزان تغذیه و کم‌ترین میزان رواناب است. در مناطق پایین‌دست حوزه با توجه به این‌که مناطق مسکونی و سطوح غیرقابل نفوذ افزایش می‌یابد، مقدار رواناب افزایش یافته، ولی مقدار تغذیه به حداقل می‌رسد. در رابطه با طبقات شیب و میزان توزیعی مکانی تغذیه و رواناب مشاهده می‌شود که در طبقات با شیب بالا با کاربری مرتع مقدار تغذیه آب زیرزمینی کم‌تر است؛ اما در طبقات شیب از ۱۰ تا ۳۰ درصد با کاربری جنگل مقدار تغذیه کاهش می‌یابد؛ به طوری که در طبقه شیب ۱۰ تا ۲۰ درصد نسبت به طبقه شیب ۴۰-۳۰ درصد در کاربری یکسان جنگل مقدار تغذیه بیش‌تر و در همین طبقات شیب پاسخ حوزه نسبت به رواناب عکس تغذیه هست، بدین معنی که با افزایش شیب میزان رواناب افزایش می‌یابد. در قسمت شمال حوزه، با کاهش شیب و افزایش کاربری مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی میزان تغذیه آب زیرزمینی کاهش و مقدار رواناب افزایش یافته است. در حوزه آبخیز ارازکوسه، با توجه این‌که بافت خاک منطقه تقریباً یکسان و از نوع سیلتی لوم است، میزان تغذیه آب زیرزمینی عمدتاً تحت تأثیر کاربری اراضی و شیب منطقه تغییر می‌کند.

پس از واسنجی و اعتبارسنجی، یک سری زمانی از نقشه‌های میانگین توزیعی- مکانی رواناب، تغذیه آب زیرزمینی، برگاب و تبخیر و تعرق تولید گردید. در بررسی مقادیر رواناب و تغذیه آب زیرزمینی بیش‌ترین میانگین مقدار تغذیه و رواناب مربوط به ماه‌های فوریه، ژانویه و مارس است. مقدار میانگین این مؤلفه‌ها در ماه‌های ژوئن، جولای، اوت و سپتامبر به حداقل می‌رسد. به طوری که کم‌ترین مقدار تغذیه و رواناب در طی دوره آماری مورد بررسی مربوط به ماه‌های خشک اوت و سپتامبر سال ۲۰۰۶ است. بیش‌ترین میانگین تغذیه آب زیرزمینی در طی دوره آماری مورد استفاده در پژوهش مربوط به ماه فوریه سال ۲۰۱۲ است که برابر با ۱۱۴/۳۸ میلی‌متر است، نقشه توزیعی رواناب متناظر این تاریخ میانگین رواناب را ۱۵/۹ میلی‌متر نشان می‌دهد که در طی دوره شبیه‌سازی اختلاف خیلی کمی با بیش‌ترین میزان رواناب (۱۶/۴ میلی‌متر در ماه فوریه سال ۲۰۱۰) دارد.

با هدف بررسی تغییرات مکانی میزان تغذیه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز ارازکوسه در ارتباط با انواع کاربری اراضی، بافت خاک و طبقات شیب حوزه آبخیز ارازکوسه نیز مدنظر قرار گرفت. در رابطه با کاربری اراضی بیش‌ترین میزان تغذیه آب زیرزمینی مربوط به اراضی جنگلی است. کم‌ترین میزان تغذیه به ترتیب مربوط به کاربری اراضی مسکونی است.

کاربری مراتع به‌طور کلی دارای تغذیه متوسط است؛ اما مناطق مرتفع با توجه به شیب بالاتر دارای تغذیه کم‌تری می‌باشند، به‌طور کلی، در کل سطح حوزه به‌جز مخازن آب سطحی، میزان تغذیه پتانسیل که معرف نفوذ آب به خاک است، بیش‌تر از میزان رواناب در سطح حوزه است؛ اما در مناطقی که بیش‌ترین میزان تغذیه وجود دارد، رواناب مقادیر کم‌تری را به خود اختصاص داده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود کاربری جنگل دارای بیش‌ترین میزان تغذیه و کم‌ترین میزان رواناب است. در مناطق پایین‌دست حوزه با توجه به این‌که مناطق مسکونی و سطوح غیرقابل نفوذ افزایش می‌یابد، مقدار رواناب افزایش یافته، ولی مقدار تغذیه به حداقل می‌رسد. در رابطه با طبقات شیب و میزان توزیعی مکانی تغذیه و رواناب مشاهده می‌شود که در طبقات با شیب بالا با کاربری مرتع مقدار تغذیه آب زیرزمینی کم‌تر است؛ اما در طبقات شیب از ۱۰ تا ۳۰ درصد با کاربری جنگل مقدار تغذیه کاهش می‌یابد؛ به طوری که در طبقه شیب ۱۰ تا ۲۰ درصد نسبت به طبقه شیب ۴۰-۳۰ درصد در کاربری یکسان جنگل مقدار تغذیه بیش‌تر و در همین طبقات شیب پاسخ حوزه نسبت به رواناب عکس تغذیه هست، بدین معنی که با افزایش شیب میزان رواناب افزایش می‌یابد. در قسمت شمال حوزه، با کاهش شیب و افزایش کاربری مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی میزان تغذیه آب زیرزمینی کاهش و مقدار رواناب افزایش یافته است. در حوزه آبخیز ارازکوسه، با توجه این‌که بافت خاک منطقه تقریباً یکسان و از نوع سیلتی لوم است، میزان تغذیه آب زیرزمینی عمدتاً تحت تأثیر کاربری اراضی و شیب منطقه تغییر می‌کند.

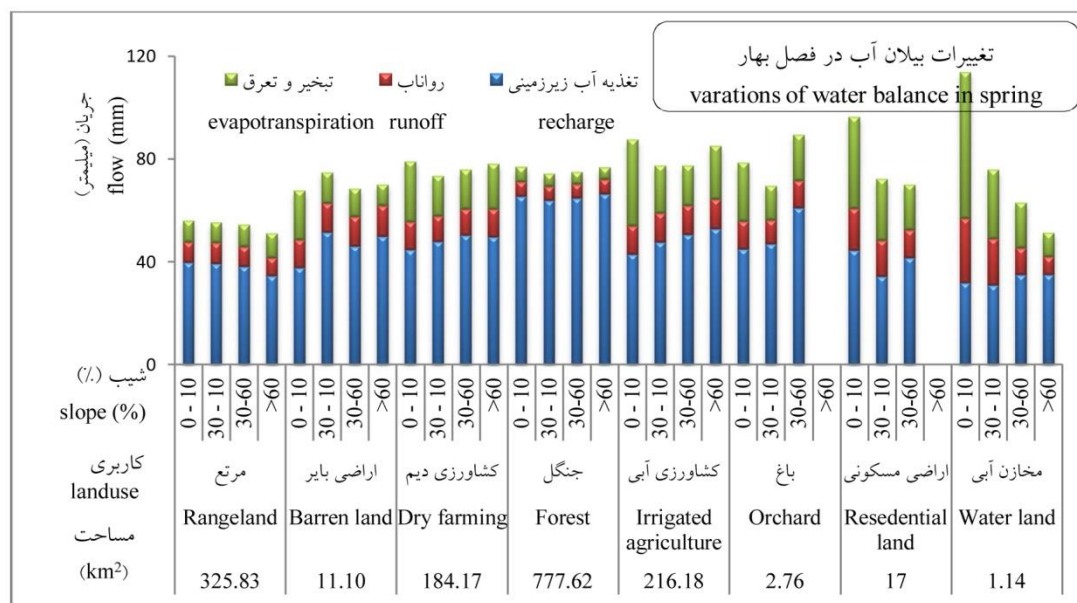
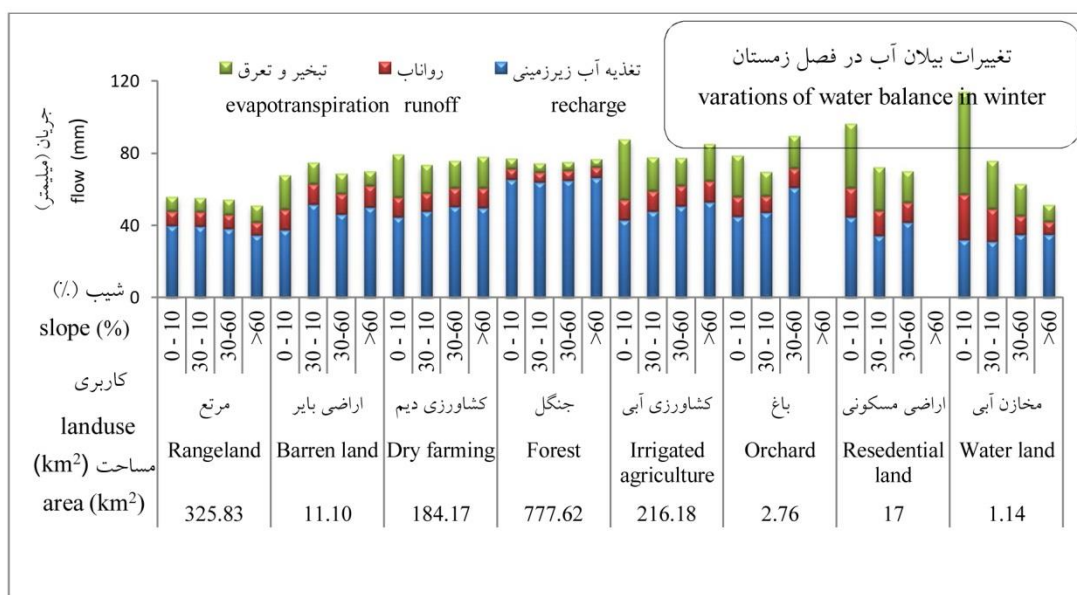


شکل ۱۱- نقشه توزیعی- مکانی میزان تغذیه و رواناب در ماه فوریه سال ۲۰۱۲.

Figure 11. Spatial distribution map of recharge and runoff values in February 2012.

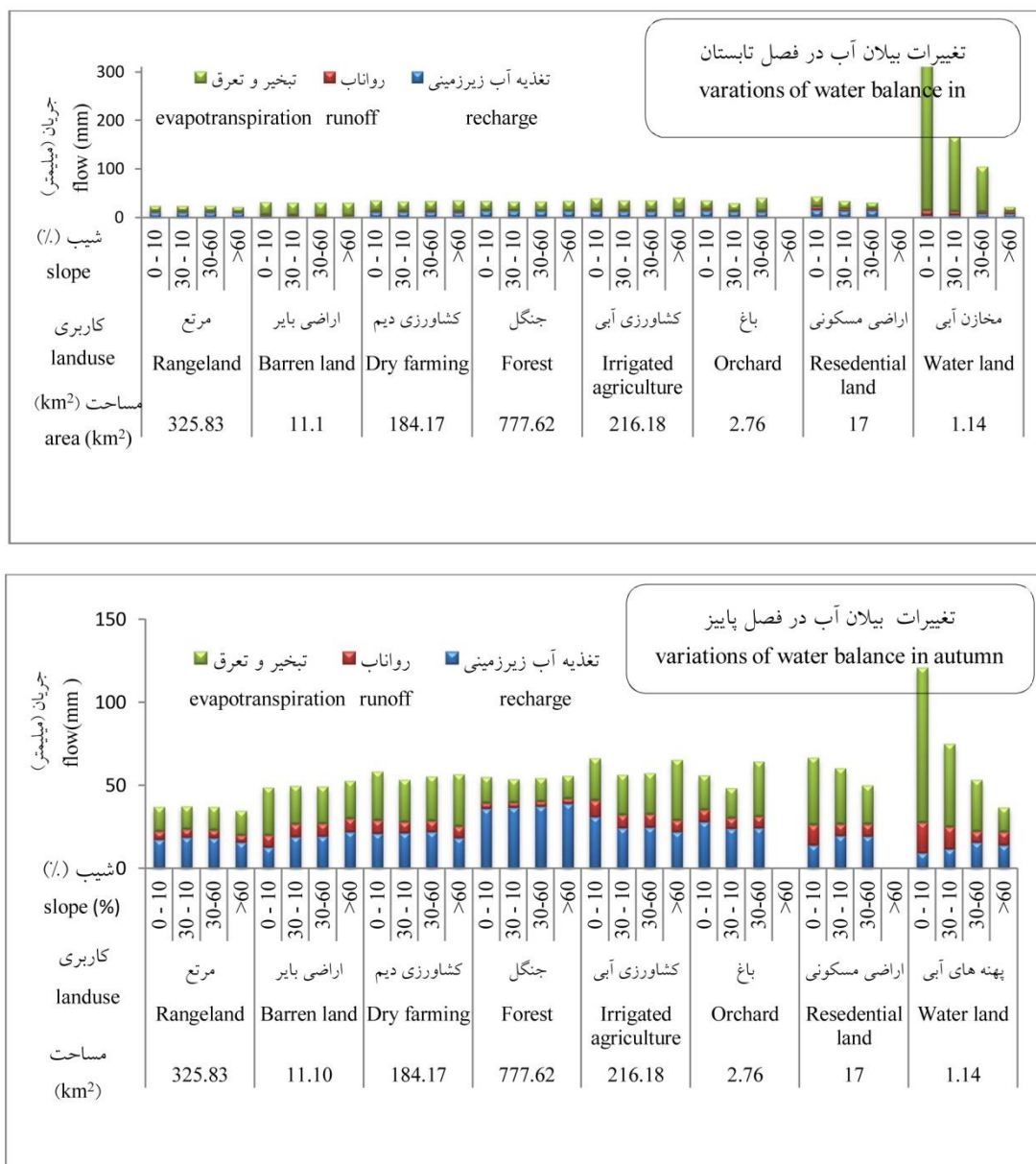
تعلق داشت. در کاربری‌های مختلف به‌طور کلی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد شیب منطقه، میزان تغذیه و تبخیر و تعرق کاهش یافته، ولی میزان رواناب افزایش می‌یابد. بیش‌ترین میزان تغذیه مربوط به شیب‌های کم تا ۳۰ درصد به‌خصوص در کاربری اراضی جنگلی مشاهده شد. هم‌چنین، بررسی تغییرات میزان تغذیه و رواناب در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد که بیش‌ترین تغییرات آن‌ها مربوط به ماه‌های فوریه، ژانویه و مارس است، ولی در ماه‌های ژوئن، جولای، اوت و سپتامبر به حداقل خود می‌رسد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات زمانی تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی و سایر مؤلفه‌ها به فصول تر و خشک و شرایط اقلیمی به‌ویژه بارش منطقه و تغییرات مکانی مؤلفه‌ها نیز به فیزیوگرافی، نوع خاک و کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه دارد. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج مطالعه پاندیانو همکاران (۲۰۱۴) و بیاتی و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد (۹ و ۲۳).

بررسی میانگین ماهانه تغذیه آب زیرزمینی، رواناب و تبخیر و تعرق حوزه آبخیز ارازکوسه در انواع کاربری اراضی و طبقات مختلف شیب ۱۰-۰، ۳۰-۱۰، ۶۰-۳۰ و بیش‌تر از ۶۰ درصد، انجام شد. میزان این مؤلفه‌ها در یک ماه از چهار فصل اقلیمی در مقیاس مکانی حوزه آبخیز ارازکوسه نشان داده شده است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). در فصل زمستان، تغذیه آب زیرزمینی نسبت به سایر فصول بیش‌تر بوده و به‌تدریج به سمت ماه‌های فصل بهار و تابستان میزان تغذیه کم‌تر و بر میزان تبخیر و تعرق افزوده می‌شود؛ به‌طوری‌که در فصل تابستان بیش‌ترین میزان تبخیر و تعرق رخ می‌دهد. در این فصل، بیش‌ترین میزان تبخیر و تعرق متعلق به کاربری مخازن آبی است (شکل ۱۲). در فصل تابستان، مقدار تغذیه و رواناب در کاربری‌های مختلف ناچیز است. مقدار تغذیه آب زیرزمینی در همه ماه‌ها، به‌جز مخازن آبی، در اکثر کاربری‌های اراضی بیش‌تر از میزان رواناب می‌شود. در مخازن آبی بیش‌ترین سهم به مؤلفه تبخیر و تعرق



شکل ۱۲- میانگین ماهانه تبخیر و تعرق، رواناب و تغذیه آب زیرزمینی در انواع کاربری اراضی و طبقات شیب در ماه فوریه (فصل زمستان) و آوریل (فصل بهار) حوزه آبخیز ارازکوسه سالهای ۲۰۰۱-۲۰۱۵.

Figure 12. Monthly averages of evapotranspiration, runoff and groundwater recharge in different types of land use and slope classes in February (winter) and April (spring) of the Arazkouse watershed in 2001-2015 years.



شکل ۱۳- میانگین ماهانه تبخیر و تعرق، رواناب و تغذیه آب زیرزمینی در انواع کاربری اراضی و طبقات شیب در ماه اوت (فصل تابستان) و نوامبر (فصل پاییز) حوزه آبخیز ارازکوسه سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۱۵.

Figure 13. Monthly averages of evapotranspiration, runoff and groundwater recharge in land use and slope classes in August (summer) and November (autumn) of the Arazkouse watershed in 2001-2015 years.

نشان داد کاربری مربوط به مخازن آبی مانند دریاها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها بیش‌ترین میزان تبخیر را دارند. بررسی‌های انجام‌شده در رابطه با طبقات مختلف شیب نیز نشان داد که با افزایش درصد شیب، مقدار تغذیه کاهش می‌یابد، اما مقدار رواناب افزایش یافته است. همچنین، بیش‌ترین مقدار تبخیر مربوط به اراضی پست (با شیب کم) حوزه آبخیز می‌باشند. تحلیل زمانی مؤلفه‌های بیلان آب شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل WetSpss هم‌چنین نشان می‌دهد که تغییرات فصلی و فاکتورهای اقلیم مانند بارش و دما بر میزان تغذیه آب زیرزمینی و سایر مؤلفه‌ها اثرات بسیار زیادی بر آب نفوذی در خاک دارند؛ به‌طوری‌که در فصل زمستان بیش‌ترین میزان تغذیه پتانسیل و در فصل تابستان بیش‌ترین میزان تبخیر اتفاق افتاده است. به‌علاوه از دیدگاه فصلی نیز بیش‌ترین رواناب نیز در فصل بهار وجود داشته است. این پژوهش نشان از ارتباط مؤلفه‌های هیدرولوژیکی با همدیگر دارد. به‌نحوی‌که میزان مؤلفه‌های بیلان آب و به‌ویژه میزان تغذیه که به‌عنوان عامل مهم بررسی برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی شناخته شده است که تحت‌تأثیر فاکتورهای مختلف اقلیمی، فیزیوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی حوزه آبخیز است، به همین دلیل تخمین صحیح میزان آن می‌تواند نقش مهمی در مدیریت و توسعه پایدار منابع آب سطحی و زیرزمینی باشد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در رابطه با تعیین هر یک از مؤلفه‌های بیلان آب به‌صورت توزیع زمانی - مکانی می‌توان از نتایج این پژوهش مکان‌هایی که دارای پتانسیل تغذیه مصنوعی و یا سیل‌خیزی هستند را شناسایی نمود و در راستای مدیریت و حفاظت آب‌و‌خاک تمهیدات مناسبی را اندیشید.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به این‌که محاسبه تغذیه توزیعی - مکانی در مناطق مختلف کشور به‌خصوص منطقه مورد مطالعه کم‌تر مورد توجه مطالعات پیشین قرار گرفته است. مدل مکان‌محور WetSpss می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی تغذیه توزیعی - مکانی در مقیاس زمانی ماهانه در مطالعات سری زمانی بلندمدت مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، مقایسه هیدروگراف‌های اجزای مختلف جریان شامل رواناب مستقیم و جریان پایه در حوزه آبخیز ارازکوسه استان گلستان نشان‌دهنده کارایی مدل با توجه به معیارهای ارزیابی مورد استفاده است. به‌دلیل این‌که داده اندازه‌گیری شده مستقیمی تحت عنوان تغذیه وجود ندارد؛ بنابراین، ارزیابی دقیق میزان تغذیه شبیه‌سازی‌شده تا حدودی مشکل است. بنابراین از روش تحلیل غیرمستقیم جریان پایه در طی دوره آماری به‌عنوان یک نماینده از میزان تغذیه استفاده شد. برای تفکیک هیدروگراف به سه روش مجزا، یعنی جداسازی جریان پایه با استفاده از نرم‌افزار WHAT انجام شد و در روش دیجیتال تک‌پارامتره فیلتر برگشتی به‌علت داشتن کم‌ترین انحراف معیار به‌عنوان روش بهتر انتخاب شد و مقایسه نتایج آن به‌عنوان مقادیر مشاهداتی جریان پایه با مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل گویای دقت آن است. تحلیل زمانی - مکانی مؤلفه‌های بیلان آب شامل تبخیر و تعرق، تغذیه آب زیرزمینی و رواناب نشان داد که پارامترهای مختلف مکانی شامل نوع کاربری اراضی، توپوگرافی، شیب و خاک منطقه بر مقدار و چگونگی تغییرات مؤلفه‌ها تأثیر می‌گذارند، به‌طوری‌که در کاربری اراضی جنگل بیش‌ترین میزان تغذیه و کم‌ترین میزان رواناب به وقوع می‌پیوندد. هم‌چنین، نتایج شبیه‌سازی‌شده

منابع

1. Abdollahi, K. 2015. Basin scale water balance modelling for variable hydrological regimes and temporal scales. PhD Thesis, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Faculty of Engineering, Vrije Universiteit Brussel, 176p.
2. Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M.R., Griensven, A.V., Husmans, M., and Batelaan, O. 2017. A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. *Environ. Earth Sci. J.* 76: 198. 1-18.
3. Afkhami, M., and NassiriSaleh, F. 2015. Evaluation of the application distributed and lumped hydrologic models in simulation of mean daily flow discharge in Gharasoo River Basin in Ardebil. *Modares Civil Engin. J.* 15: Supplementary Issue. 31-40.
4. Arnold, J.G., and Allen, P.M. 1999. Automated methods for estimating base-flow and groundwater recharge from stream-flow records. *Amer. Water Resour. Assoc. J.* 35: 2. 411-424.
5. Arnold, J.G., Muttiyah, R.S., Srinivasan, R., and Allen, P.M. 2000. Regional estimation of base- flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi River Basin. *Hydrol. J.* 227: 1-4: 21-40. doi: 10.1016/S0022-1694(99)00139-0.
6. Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poorova, J., Velcicka, L., and Kunikova, E. 2007. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad Watershed, Slovakia. *Water Resources Management. J.* 21: 8. 1373-1391.
7. Batelaan, O., and De Smedt, F. 2001. WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modeling. *Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics (Proceedings of a symposium held during the Sixth IAHS Scientific Assembly at Maastricht, The Netherlands, July 2001).* IAHS. 269: 11-18.
8. Batelaan, O., and De Smedt, F. 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Hydrol. J.* 337: 3. 337-355.
9. Bayati, S., Nasr Esfahani, A., and Abdollahi, Kh. 2018. An investigation on spatial distribution of runoff and groundwater recharge in land use and slope classes of Vanak Watershed, *Water. Engin. Manage. J.* 11: 4. 866-878, DOI: 10.22092/ ijwmse. 2018. 120332.1431. (In Persian)
10. Chen, J., Lee, F., Yeh, C.H., and Yu, J.L. 2005. A water budget model for the Yun-Lin Plain, Taiwan. *Water Resour. Manage. J.* 19: 5. 483-504.
11. Faryabi, M., and Chitsazan, M. 2016. Evaluation of river-aquifer interaction using physicochemical parameters, Case study: the north part of Dezful-Andimeshk district. *Environ. Geol. J.* 10: 34. 101-115. (In Persian)
12. Gebre, S.L. 2015. Application of the HEC-HMS Model for runoff simulation of upper Blue Nile River Basin. *Hydrology Current Research*, 6: 2. 1-8.
13. Ghiglieri, G., Carletti, A., and Pittalis, D. 2014. Runoff coefficient and average yearly natural aquifer recharge assessment by physiography-based indirect methods for the island of Sardinia (Italy) and its NW area (Nurra). *Hydrol. J.* 519: 2. 1779-1791.
14. Gupta, V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Hydrol. J.* 377: 1-2. 80-91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
15. Kendy, E., Gerard, P., Todd Walter, M., Zhang, Y., Liu, C., and Steenhuis, T.S. 2003. A soil water balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain. *Hydrological Processes*, 17: 10. 2011-2031.
16. Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Hydrol. J.* 424: 4. 264-277. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011.

17. Lin, Y.C., Yang, S.Y., Fen, C.S., and Yeh, H.D. 2016. A general analytical model for pumping tests in radial finite two-zone confined aquifers with Robin-type outer boundary. *Hydrol. J.* 54(9): 1162-1175.
18. Manfreda, S., Fiorentino, M., and Iacobellis, V. 2005. DREAM: a distributed model for runoff, evapotranspiration, and antecedent soil moisture simulation. *Advances in Geosciences*, 2: 2. 31-39.
19. Melki, A., Abdollahi, Kh., Fatahi, R., and Abida, H. 2017. Groundwater recharge estimation under semi-arid climate: Case of Northern Gafsa watershed, Tunisia. *J. Afric. Earth Sci. J.* 132:8. 37- 46. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2017.04.020.
20. Mustafa, S.M., Abdollahi, K., and Verbeiren, B. 2017. Identification of the influencing factors on groundwater drought and depletion in north-western Bangladesh. *Hydrogeol. J.* 25: 5. 1357-1375. DOI 10.1007/s10040-017-1547-7.
21. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. 1. A Discussion of Principles. *Hydrol. J.* 10: 3. 282-290.
22. Nathan, R.J., and McMahon, T.A. 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis. *Water Resour. Res. J.* 26: 7. 1465-1473.
23. Pandian, M., Balasubramaniam, R., and Saravanavel, J. 2014. Identification of groundwater potential recharge zones using WetSpa model in parts of Coimbatore and districts in Tamil Nadu, India. *Inter. J. Water Res. J.* 98: 2. 27-32.
24. Pechlivanidis, I., Jacson, B., McIntyre, N., and Wheeler, H. 2011. Catchment scale hydrological modeling. A review of model types, calibration approaches and uncertainty methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global Network Environ. Sci. Technol. J.* 13: 3. 193-214.
25. Shiklomanov, I.A. 2000. Appraisal and assessment of world water resources. *Water Int. J.* 25: 1. 11-32.
26. Seiler, K.P., and Gat, J.R. 2007. Groundwater recharge, runoff, infiltration and percolation. Springer, Dordrecht (Netherlands). 241p.
27. Soleimani-Motlagh, M., Ghasemieh, H., Talebi, A., Abdollahi, K., and Dragoni, W. 2020. Groundwater budget deficit caused by drought and overexploitation, *Water Supply.* 20: 2. 621-632.
28. Sophocleous, M. 2004. Groundwater recharge. In: Luis Silveira, Usunoff, E.J. (Eds.), *Groundwater, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Vol. I. Developed under the auspices of the UNESCO, EOLSS, Publishers, Oxford, UK, 41p. (<http://www.eolss.net/>).
29. Wang, Z.M., Batelaan, O., and de Smedt, F. 1997. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Physics and Chemistry of the Earth. J.* 21: 3. 189-193.
30. Yun, P., Huili, G., Demin, Z., Xiaojuan, L., and Nobukazu, N. 2011. Impact of land use change on groundwater recharge in Uishui River Basin, China. *Chinese Geograph. Sci. J.* 21: 6. 734-743.
31. Zomlot, Z., Verbiren, B., Huysmans, M., and Batelaan. O. 2015. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: Assessment of controlling factors. *Hydrol. J.* 531: 2. 349-368.



Investigation of temporal and spatial variations of water balance and separated hydrographs of the Arazkouse Watershed through groundwater recharge modeling using WetSpss model

**Z. Mahmoudi¹, *A. Bahremand², Kh. Abdollahi³, A. Sadoddin²,
Sh. Kouhestani⁴ and Ch.B. Komaki⁵**

¹Ph.D. Student of Watershed Management, Dept. of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

²Associate Prof., Dept. of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, ³Assistant Prof., Dept. of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Geology, Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

⁴Assistant Prof., Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran, ⁵Assistant Prof., Dept. of Arid Regions Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 12.29.2019; Accepted: 04.27.2019

Abstract

Background and Objectives: Groundwater recharge is one of the most important factors in sustainable development and management of groundwater resources. Obviously, other hydrological, social and economic factors should also be considered. Estimation of recharge is a complex and challenging process. This is due to the fact that recharge is dependent on variables such as land use, topography, soil, climatic conditions, as well as other hydrological factors. In this research, the monthly water balance components were estimated using the distributed WetSpss model.

Materials and Methods: In this research, water balance components including evapotranspiration, interception, runoff, and groundwater recharge for the Arazkouse Watershed during the years 2001-2015 on a monthly basis at spatial resolution of 100×100 m were simulated using the WetSpss model and rainfall, temperature, evaporation, wind velocity, groundwater depth data and soil texture, topography and land use maps of the area.

Results: The findings in this research are based on evaluation criteria used in calibration and validation periods of flow hydrograph components including direct runoff, base flow, and total flow simulated by WetSpss model and hydrographs separated by WHAT software. The WetSpss model had a relatively satisfactory performance for simulating groundwater recharge and other hydrologic components of the Arazakouse watershed. It should be noted that the Nash-Sutcliffe coefficient values for the calibration and validation periods as standard criteria of evaluation in the hydrological simulations for direct runoff are 0.6 and 0.51, respectively. In addition, considering the base flow, the Nash-Sutcliffe criteria for the calibration and validation periods were 0.55 and 0.50, respectively. The values for total runoff for calibration and validation periods were 0.63 and 0.53, respectively. After investigating the efficiency of the model, the temporal-spatial distribution of water balance components for different land use types and slope classes was investigated. The analysis shows that the variability of the

* Corresponding Author; Email: abdolreza.bahremand@gmail.com

hydrologic components is significantly affected by climate and its seasonal changes, and also by characteristics of physiography, vegetation and land use. The annual volume of recharge and runoff in the forest areas are 23115791m^3 and 1776217m^3 respectively. The highest proportion of groundwater recharge in forest lands belongs to slopes above 0-10%. The highest proportion of runoff in this land use belongs to slopes above 30%. The highest volume of annual runoff in the Arazkouse watershed is in the residential areas in medium and high slopes with 156300m^3 .

Conclusion: According to the research, it can be stated that the amount of water balance components, especially the amount of recharge as an important factor in the investigation of surface and groundwater interaction are influenced by climatic, physiographic and land use/land cover factors. Therefore proper estimation of water balance components can play an important role in sustainable management and development of surface and groundwater resources.

Keywords: Base flow, Direct runoff, Spatially distributed groundwater recharge

Arch