

مقاله علمی-پژوهشی

محاسبه اجزای بیلان آب در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از مدل مفهومی بیلان آب توماس و محصولات ماهواره‌ای

مسعود باصری^۱، عماد محجوبی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷

چکیده

از مهم‌ترین مسائلی که در بحث مدیریت منابع آب و در نتیجه تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌ها برای مصرف آب در بخش‌های مختلف باید به آن توجه ویژه‌ای داشت، بیلان آب می‌باشد. در این مقاله با بهره‌گیری از محصولات سنجش‌ازدور به محاسبه و ارزیابی مدل مفهومی بیلان آب توماس (abcd) در حوضه‌ای با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک پرداخته شد. ابتدا محصولات ماهانه بارش ماهواره‌ای IMERG و دمای بازتحلیل شده ERA5 در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های زمینی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج ارزیابی این محصولات با استفاده از پنج شاخص آماری ضریب همبستگی پیرسون (R)، خطای مجذور میانگین مربعات (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS) و ضریب انحراف (BIAS) در زیرحوضه زرنده واقع در منطقه نیشابور، حاکی از دقت و همبستگی بالای آن‌ها با داده‌های ایستگاه‌های زمینی دارد. در ادامه با استفاده از این محصولات و سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدل مفهومی بیلان آب توماس برای این زیرحوضه در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد و عملکرد آن در شبیه‌سازی رواناب حوضه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور کاهش عدم قطعیت‌ها در پارامترهای مدل و برآورد آن‌ها، از اعداد فازی و روش مونت کارلو استفاده شد. بهینه‌سازی این مدل با دو تابع هدف مختلف ضریب کارایی نش-ساتکلیف و ضریب تعیین صورت گرفت. نتایج نشان از دقت بالای مدل بیلان آب abcd با استفاده از محصولات سنجش‌ازدور در منطقه مورد مطالعه دارد و به‌خوبی رفتار دبی خروجی از زیرحوضه زرنده را شبیه‌سازی کرده است.

واژه‌های کلیدی: اعداد فازی، مدل بیلان آب توماس، مونت‌کارلو، ERA5، IMERG

مقدمه

نیازمند رویکردی مناسب جهت برقراری تعادل بین میزان مصرف آب و منابع موجود می‌باشد (امینی و همکاران، ۱۳۹۷). از مهم‌ترین مسائلی که در بحث مدیریت منابع آب و در نتیجه تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های مصرف آب در بخش‌های مختلف مورد توجه ویژه است، بیلان آب می‌باشد (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۴). به بررسی تبادلات آب در یک محدوده که بر اصل بقا ماده در چرخه آب تأکید دارد، بیلان آب گفته می‌شود. این تعریف کلیه آب‌هایی که در یک زمان معین وارد یک محدوده خاص می‌گردد، یا به مصرف می‌رسد یا ذخیره شده و یا به صورت‌های مختلف از محدوده خارج می‌گردد را شامل می‌شود (امینی و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از مدل‌های مفهومی بیلان آب برای درک و شناخت منابع آب و مدیریت آن بسیار مفید است (رضوی کههنمویی و همکاران، ۱۳۹۸). این مدل‌ها نیاز به داده‌های میدانی دارند که معمولاً در بسیاری از حوضه‌ها و مناطق فاقد آمار، دسترسی به این داده‌ها امکان‌پذیر نیست. با استفاده از

اهمیت مدیریت منابع آب با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و تقاضای بیش‌تر برای مصرف آب و کاهش منابع آب شیرین بیش از پیش نمایان شده است. بشر برای توسعه کشاورزی، اقتصادی و صنعت نیازمند آب است و همین امر با توجه به کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان سبب گردیده تا انسان با رویکردی مدیریتی به مصرف آب توجه کند. این امر خود مستلزم برنامه‌ریزی دقیق و آینده‌نگرانه و

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(* نویسنده مسئول: Email: emahjoobi@shahroodut.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.2.7.6

برای کمینه‌سازی پارامترهای مدل جزیم استفاده کردند. همچنین از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) که نشان‌دهنده تفاوت بین مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی است، به‌عنوان تابع هدف بهره گرفتند. نتایج آن‌ها حاکی از عملکرد مناسب مدل بیلان آب جزیم است؛ البته عدم تفکیک باران و برف و در نظر نگرفتن بودجه برفی را به‌عنوان یک کمبود این مدل مطرح کردند. طایفه و همکاران سعی در ترکیب مدل بیلان آب جزیم که مناسب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، با ماژول‌های تجمع/ذوب برف و سایر مدل‌های ماهانه بیلان آب که برای حوضه‌های برفی مرطوب توسعه یافته بودند، نمودند. آن‌ها از مدل‌های مکیب و مارکستروم، راث و الوقدانی، وازمد و گو و همکاران برای ترکیب با مدل جزیم استفاده نمودند. این مدل‌ها بر اساس سازگاری ساختاری با مدل جزیم انتخاب شده‌اند. دقت مدل‌ها در حوضه آبریز کرج ارزیابی شد. نتایج آن‌ها نشان داد مدل ترکیبی جزیم-مکیب-مارکستروم تخمین بهتری از رواناب و برآورد جریان در حوضه کرج داشته است (Tayefeh Neskili et al., 2017). مارینو و همکاران بر روی شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل مفهومی بیلان آب توماس (abcd) در چهار زیرحوضه رودخانه Evrotas واقع در جنوب شرق یونان کار کردند. آن‌ها سه زیرحوضه را به‌صورت روزانه برای یک سال آبی و زیرحوضه چهارم را به‌صورت ماهانه برای یک دوره ۵ ساله مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ارزیابی آن‌ها حاکی از عملکرد مطلوب مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌ها بود. علاوه بر این، با آنالیز حساسیت نشان دادند که در همه موارد پارامترهای a و c بسیار مهم می‌باشد (Marinou et al., 2017). وانگ و همکاران اقدام به اصلاح مدل مفهومی بیلان آب توماس (abcd) با ترکیب فرآیندهای هیدرولوژیکی وابسته به دما و تبخیر-تعرق آب‌های زیرزمینی در مناطق سردسیر با چند پارامتر اضافی کردند. آن‌ها این مدل را برای بازسازی رواناب ماهانه حوضه آبریز رودخانه گلمود بکار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان گلمود با رواناب سالانه در حوضه آبریز رودخانه گلمود ارتباط مثبت دارد (Wang et al., 2020).

در بحث ارزیابی محصولات سنجش‌ازدور نیز مطالعات مختلفی صورت گرفته است. به‌عنوان مثال حسینی موعاری و تانگ، شش محصول بارشی IMERG شامل Early Run، Late Run و Final Run را برای نسخه‌های ۵ و ۶، با داده‌های بارش ۷۶ ایستگاه سینوپتیک در مقیاس روزانه در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ مقایسه کردند. مخصوصاً نسخه ۵ در Early Run و Late Run نسبت به نسخه ۶ عملکرد بهتری داشت. محصولات بارش IMERG، بارش بین ۵ تا ۳۵ میلی‌متر را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند. با این حال برآورد میزان بارش برای مناطق مرطوب کمتر از مقدار واقعی و برای مناطق خشک بیشتر از مقدار واقعی است (Hosseini Moghari and Tang, 2020). میری و همکاران (۱۳۹۸) با مقایسه

سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای که ابزاری مناسب برای دستیابی به این‌گونه داده‌ها می‌باشد، می‌توان با صرف هزینه کم، به داده‌های قابل اطمینان دست یافت (فرجی و کاویانی، ۱۳۹۸)؛ بنابراین تلفیق مدل‌های مفهومی بیلان آب و تکنیک‌های سنجش‌ازدور می‌تواند به‌عنوان رویکردی جهت کمک به اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی در بازه‌های مکانی و زمانی مختلف به‌ویژه در مناطق فاقد آمار مناسب مطرح شود. از طرفی تعیین پارامترهای بیلان آب با خطا و عدم قطعیت همراه است؛ بنابراین می‌بایست به دنبال راهکاری بود که ابهام و دقت پایین ناشی از عدم قطعیت را به حداقل برساند. فایبیشنکو عدم قطعیت استفاده از بیلان آب را با استفاده از رویکرد احتمالی-فازی در سایت هانفورد در ایالات‌متحده مطالعه کرد. وی تئوری‌های احتمال را برای مدل‌سازی بیلان آب-خاک ترکیب و عدم قطعیت موجود در مؤلفه‌های معادله بیلان آب را ارزیابی نمود. رویکرد احتمالی-فازی برای مدل‌سازی و تعیین مقدار عدم قطعیت سامانه‌های هیدروژئولوژیکی بر اساس ترکیبی از محاسبات آماری و فازی است. نتایج شبیه‌سازی برای سایت هانفورد نشان می‌دهد که عدم قطعیت داده‌های فازی با افزایش تعداد ورودی‌های فازی افزایش می‌یابد؛ زیرا عدم قطعیت اعداد فازی به‌طور کلی بیشتر از توابع چگالی احتمال مربوطه است. استفاده از محاسبات احتمالی-فازی تخمین‌های محافظه‌کارانه‌تر از عدم اطمینان، یعنی دامنه عدم قطعیت گسترده‌تر را نسبت به شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو فراهم می‌کند (Faybishenko, 2010). ناصری و همکاران برای ارزیابی عدم اطمینان مدل‌های بیلان آب، روش جدیدی را بر اساس اصل الحاق فازی پیشنهاد کردند. آن‌ها دو مدل بیلان آب غیرخطی ماهانه برای دو حوضه آبریز در ایران و فرانسه را واسنجی کردند (Nasseri et al., 2013). خزائی و حسینی نیز به محاسبه بیلان آب حوضه آبریز ازغند واقع در خراسان رضوی پرداختند. آن‌ها از روش‌های مختلف رگرسیون فازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و کاهش خطا در معادله بیلان آب استفاده نمودند. به این ترتیب که با اعمال مجموعه‌ای از ضرایب فازی بر اجزای معادله بیلان، خطای کلی معادله را در یک محدوده مطالعاتی و دوره‌ی زمانی مشخص با استفاده از رگرسیون فازی به حداقل رساندند. نتایج آن‌ها نشان داد عدم قطعیت بیشتری در حالتی که خروجی‌ها غیر فازی در نظر گرفته شوند، وجود دارد (Khazaei and Hosseini, 2015).

در زمینه بهره‌گیری از مدل‌های مفهومی بیلان آب در حوضه‌های مختلف مطالعات متعددی صورت گرفته است. صانع و ثقفیان (۱۳۹۴) تصمیم به مقایسه عملکرد مدل مفهومی بیلان آب جزیم با مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین رواناب حوضه رودخانه راوند واقع در استان کرمانشاه گرفتند. آن‌ها از الگوریتم تجمع ذرات (PSO)

هدف از انجام این مقاله، توسعه و ارزیابی مدل مفهومی بیلان آبی ماهانه توماس در منطقه‌ای نیمه‌خشک با استفاده از محصولات دما و بارش ماهواره‌ای و بهره‌گیری از رویکرد فازی-احتمالاتی جهت تعیین پارامترهای این مدل است.

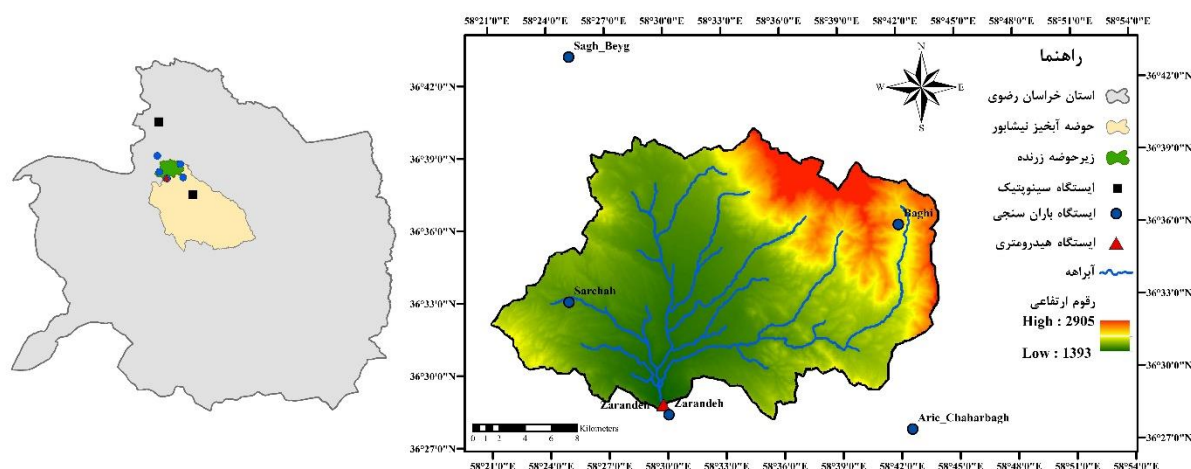
روش انجام کار

منطقه مطالعاتی

زیرحوضه زرنده با وسعتی معادل ۴۹۰ کیلومترمربع در شمال حوضه آبریز نیشابور در استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران قرار دارد. از نظر شرایط اقلیمی، دارای اقلیم نیمه‌خشک است. حداکثر و حداقل ارتفاع این زیرحوضه به ترتیب در حدود ۲۹۰۰ متر و ۱۴۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. دو ایستگاه باران‌سنجی درون زیرحوضه و یک ایستگاه هیدرومتری در خروجی آن قرار دارند (Regional Water Company of Khorasan Razavi, 2020). شکل ۱ موقعیت، رقوم ارتفاعی و شبکه آبراهه‌های این زیرحوضه به همراه ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. مشخصات ایستگاه‌های مختلف نیز در جدول ۱ آمده است.

دو ماهواره TRMM و GPM در کل ایران برای یک دوره دوساله در مقیاس روزانه نشان دادند که در حالت کلی مقادیر بارش روزانه سنجنده‌های نام‌برده شده از دقت مناسبی در سطح ایران برخوردار نیستند؛ ولی دقت داده‌های GPM نسبت به داده‌های TRMM بیشتر است. ضمن اینکه میزان خطای بارش برآوردی برای بیشتر ایستگاه‌ها قابل توجه بوده و از لحاظ مکانی بهترین دقت در غرب کشور به‌ویژه در امتداد رشته‌کوه زاگرس و کمترین دقت در نواحی ساحلی و به‌ویژه در سواحل دریای خزر مشاهده شده است. گلیکسور و همکاران نیز به مقایسه و ارزیابی داده‌های بازتحلیل ERA5 و ERA-Interim در آفریقا از سال ۱۹۸۱ الی ۲۰۱۷ پرداختند. آن‌ها داده‌های دمایی نزدیک سطح زمین و بارش را برای این ارزیابی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان از دقت بیشتر ERA5 نسبت به ERA-Interim می‌باشد (Gleixner et al., 2020).

بررسی مطالعات پیشین حاکی از آن است که محققین توجه کمتری به استفاده از محصولات ماهواره‌ای در توسعه مدل‌های مفهومی بیلان آب داشته‌اند. از طرفی تعیین پارامترهای این مدل‌ها همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است. علاوه بر این تجربه‌ای از پیاده‌سازی مدل توماس در ایران نیز دیده نمی‌شود. بر این اساس



شکل ۱- موقعیت، رقوم ارتفاعی و شبکه آبراهه زیرحوضه زرنده به همراه ایستگاه‌های سینوپتیک، باران‌سنجی و هیدرومتری

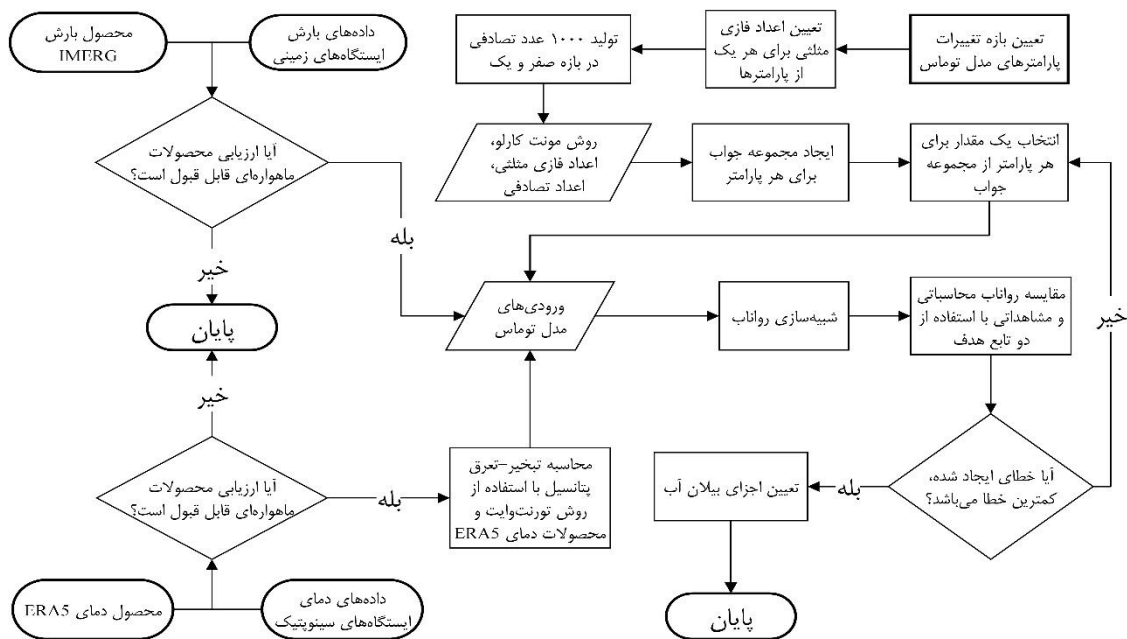
سپس به دمای متوسط ماهانه تبدیل شد. برای اطلاعات رواناب خروجی از حوضه نیز از داده‌های ایستگاه هیدرومتری زرنده که در خروجی مسیر آبراهه از حوضه قرار دارد، استفاده شد. این داده‌ها به صورت مترمکعب بر ثانیه (m^3/s) و در مقیاس ماهانه می‌باشد که با توجه به مساحت حوضه به واحد میلی‌متر در مقیاس ماهانه تبدیل گردید.

داده‌های مورد استفاده

فرآیند انجام تحقیق در شکل ۲ آمده است. بر این اساس داده‌های بارش، دما و دبی مربوط به ایستگاه‌های جدول ۱، برای یک دوره آماری ۱۶ ساله از سال ۱۳۸۰ الی ۱۳۹۵ جمع‌آوری شد. برای پوشش داده‌های مفقودی موجود در بعضی ایستگاه‌ها، از داده‌های ایستگاه‌های مجاور که بیش‌ترین همبستگی را با ایستگاه موردنظر داشت، استفاده شد. داده‌های بارش به صورت ماهانه دریافت گردید. داده‌های دما ابتدا به صورت روزانه از ایستگاه‌های سینوپتیک دریافت و

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی، هیدرومتری و سینوپتیک مورد استفاده

ردیف	کد ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	نوع ایستگاه
۱	۱۵۱۲۹۰	بقیع	۵۸/۷	۳۶/۶	۲۰۳۵	باران‌سنجی (سازمان هواشناسی)
۲	۱۵۱۳۱۰	سرچاه	۵۸/۴۱۷	۳۶/۵۵	۱۶۳۵	باران‌سنجی (سازمان هواشناسی)
۳	۵۱۰-۴۷	ساق بیگ	۵۸/۴۲	۳۶/۷۲	۱۵۱۰	باران‌سنجی (وزارت نیرو)
۴	۰۹۵-۴۷	زرنده	۵۸/۵۰۱	۳۶/۴۷	۱۴۳۴	باران‌سنجی (وزارت نیرو)
۵	۰۴۳-۴۷	اریه چهارباغ	۵۸/۷۱	۳۶/۴۶	۱۵۹۹	باران‌سنجی (وزارت نیرو)
۶	۰۹۵-۴۷	زرنده	۵۸/۴۹۶	۳۶/۴۸	۱۴۰۲	هیدرومتری (وزارت نیرو)
۷	۴۰۷۴۶	نیشابور	۵۸/۸	۳۶/۲۶۶۷	۱۲۱۳	سینوپتیک (سازمان هواشناسی)
۸	۴۰۷۴۰	قوچان	۵۸/۵	۳۷/۰۶۷	۱۲۸۷	سینوپتیک (سازمان هواشناسی)



شکل ۲- روندنمای روش انجام تحقیق

محصولات بارش ماهواره‌ای متعددی با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت وجود دارد. یکی از این محصولات مربوط به مأموریت اندازه‌گیری باران‌های گرمسیری (TRMM) می‌باشد که در نوامبر ۱۹۹۷ با هدف پایش و مطالعه بارش مناطق گرمسیری و چگونگی تأثیر این بارش بر آب و هوای عمومی به فضا پرتاب شد (Yong et al., 2012). بعد از موفقیت در مأموریت TRMM، پروژه دیگری به نام سنجش جهانی بارش (GPM) صورت گرفت و در فوریه ۲۰۱۴ از ژاپن به فضا پرتاب شد. GPM از جدیدترین و پیشرفته‌ترین تجهیزات و حس‌گرها بهره‌مندی می‌برد و توانایی پایش بارش هم به صورت باران و هم برف را دارا است. وضوح مکانی آن ۱/۱×۱/۱ درجه است و از عرض جغرافیایی ۹۰ درجه شمالی تا ۹۰ درجه جنوبی را پوشش می‌دهد (Skofronick-Jackson et al., 2018). در این پژوهش از محصولات ماهواره‌ای GPM با نام IMERG بهره‌گرفته شد.

محصولات بارش ماهواره‌ای متعددی با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت وجود دارد. یکی از این محصولات مربوط به مأموریت اندازه‌گیری باران‌های گرمسیری (TRMM) می‌باشد که در نوامبر ۱۹۹۷ با هدف پایش و مطالعه بارش مناطق گرمسیری و چگونگی تأثیر این بارش بر آب و هوای عمومی به فضا پرتاب شد (Yong et al., 2012). بعد از موفقیت در مأموریت TRMM، پروژه دیگری به نام سنجش جهانی بارش (GPM) صورت گرفت و در فوریه ۲۰۱۴ از ژاپن به فضا پرتاب شد. GPM از جدیدترین و پیشرفته‌ترین تجهیزات و حس‌گرها بهره‌مندی می‌برد و توانایی پایش بارش هم به صورت باران و هم برف را دارا است. وضوح مکانی آن ۱/۱×۱/۱ درجه است و از عرض جغرافیایی ۹۰ درجه شمالی تا ۹۰ درجه جنوبی را پوشش می‌دهد (Skofronick-Jackson et al., 2018). در این پژوهش از محصولات ماهواره‌ای GPM با نام IMERG بهره‌گرفته شد.

بسیاری از مدل‌های بیلان آب مورد توجه قرار گرفته است. از دلایل اصلی برای توسعه چنین مدل‌هایی، می‌توان به ارتباط دادن اجزاء فرآیند بارش-رواناب با مفاهیم فیزیکی حاکم بر حوضه به صورت مفهومی برای نمایش چرخه هیدرولوژی اشاره کرد (شفیعی و قراری، ۱۳۹۶). مدل‌های مفهومی بیلان آب، چگونگی تبدیل بارندگی به رواناب، تبخیر-تعرق و حرکت آب به سمت سیستم آب زیرزمینی با استفاده از چندین مخزن رطوبتی مرتبط به هم را ارائه می‌دهند. تغییرات حجم آب در مخازن، ورودی‌ها و خروجی‌های مدل توسط روابط ریاضی کنترل می‌شوند (رضوی کهمنوئی و همکاران، ۱۳۹۸).

مدل مفهومی بیلان آب توماس یک مدل هیدرولوژیکی ساده، یکپارچه و غیرخطی برای شبیه‌سازی رواناب در پاسخ به بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل است که توسط توماس در سال ۱۹۸۱ توسعه یافته است. این مدل از دو محفظه ذخیره‌سازی رطوبت خاک و آب‌های زیرزمینی تشکیل شده است. در قسمت محفظه رطوبت خاک، آب بارش دریافت و به صورت تبخیر-تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب‌های زیرزمینی از دست می‌رود. در قسمت محفظه آب زیرزمینی نیز از طریق تغذیه، آب دریافت شده و در صورت تخلیه، آب از دست می‌رود. ورودی‌های مدل، بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل است و خروجی نهایی مدل، رواناب کل حوضه مطالعاتی می‌باشد. این مدل نشان‌دهنده ذخیره رطوبت خاک، ذخیره آب‌های زیرزمینی، رواناب سطحی، تخلیه آب‌های زیرزمینی و تبخیر-تعرق واقعی است (Thomas, 1981; Al-Lafta et al., 2013). در شکل ۳ روندنمای مفهومی این مدل ارائه شده است. پارامتر a نشان‌دهنده گرایش و تمایل رواناب قبل از اشباع کامل خاک است که دامنه تغییرات آن بین صفر و یک می‌باشد. فرناندز و همکاران دریافتند که پارامتر a در مناطق وسیعی از آمریکا در محدوده $(0/95 - 0/99)$ قرار می‌گیرد و شهرنشینی و جنگل‌زدایی مقدار a را کاهش می‌دهد (Fernandez et al., 2000). با توجه به اینکه در زیرحوضه زنده توسعه شهری قابل توجهی مشاهده نمی‌شود، انتظار می‌رود مقدار این پارامتر به عدد یک نزدیک باشد. پارامتر b یک حد فوقانی برای مجموع میزان تبخیر-تعرق واقعی و ذخیره رطوبت خاک در یک ماه معین است که بستگی به توانایی حوضه برای نگه‌داری آب در منطقه فوقانی خاک دارد. دامنه تغییرات پارامتر b عمدتاً بین ۱۰۰ تا ۱۶۰۰ میلی‌متر متغیر است (Martinez and Gupta, 2010). پارامتر c ورودی آب به سفره‌های زیرزمینی را کنترل می‌کند و دامنه تغییرات آن بین صفر و یک است. پارامتر d نیز نرخ انتشار تخلیه آب سفره‌های زیرزمینی به جریان اصلی را کنترل می‌کند. وقتی این مقدار نزدیک صفر باشد، بیانگر مشارکت کم یا عدم مشارکت جریان پایه است (Martinez and Gupta, 2010; Al-Lafta et al., 2013).

سینوپتیک دریافت شد. با توجه به این که داده‌های دما در واحد کلون و به صورت ساعتی است، در محیط نرم‌افزار Excel ابتدا به درجه سانتی‌گراد و سپس به صورت ماهانه تبدیل شدند.

ارزیابی و تعمیم محصولات ماهواره‌ای

در ادامه برای ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای نسبت به داده‌های مشاهده‌ای از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی پیرسون (R)، خطای مجذور میانگین مربعات (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS) و ضریب انحراف (BIAS) در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. روابط مورد استفاده برای محاسبه این شاخص‌ها به صورت زیر می‌باشد که در آن‌ها x مقدار داده مشاهداتی از ایستگاه‌های زمینی، y مقدار داده ماهواره‌ای، \bar{x} و \bar{y} به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و ماهواره‌ای و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{N} \quad (3)$$

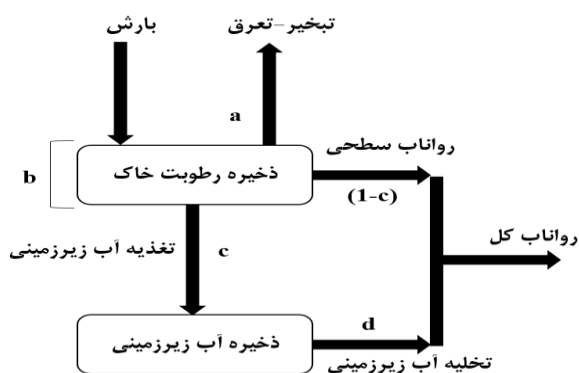
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{N} \quad (5)$$

برای تعمیم داده‌های دما و بارش نقطه‌ای به کل زیرحوضه از روش چندضلعی‌های تیسسن (علیزاده، ۱۳۹۶) استفاده شد. بر این اساس ابتدا سهم هر ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک از مساحت کل زیرحوضه در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 مشخص گردید. سپس از طریق میانگین‌گیری وزنی بر مبنای این مساحت‌های جزئی، مقادیر تعمیم‌یافته بارش و دمای ماهانه در طول دوره آماری برای محصولات ماهواره‌ای به دست آمد.

مدل مفهومی بیلان آب توماس (abcd)

مدل‌های مفهومی بیلان آب برای اولین بار توسط تورنت وایت (۱۹۴۸) ساخته شد. تورنت وایت از مقایسه تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش، اولین اسکلت‌بندی یک مدل مفهومی بیلان آب را طرح‌ریزی کرد (Thorntwaite, 1948). این مدل به عنوان ایده‌ی اصلی



شکل ۳- روندنمای مفهومی مدل بیلان آب توماس (abcd)

این مدل دو متغیر حالت را تعریف می‌کند: «آب در دسترس (W_i) » و «فرصت تبخیر (Y_i) ». آب در دسترس از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$R_i = c \times (W_i - Y_i) \quad (11)$$

که $Q_{u,i}$ رواناب لایه فوقانی در هر ماه و R_i تغذیه آب زیرزمینی در هر ماه می‌باشد. با استفاده از پارامتر d مقدار ذخیره رطوبت خاک در لایه تحتانی و رواناب لایه تحتانی در هر ماه محاسبه می‌شود:

$$W_i = P_i + SM_{u,(i-1)} \quad (6)$$

که در آن P_i مقدار بارش در هر ماه و $SM_{u,(i-1)}$ ذخیره رطوبت خاک در لایه فوقانی در ماه قبل می‌باشد. فرصت تبخیر نیز آبی است که در نهایت از حوضه به صورت تبخیر-تعرق خارج می‌شود که به کمک دو پارامتر a و b و به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$SM_{i,i} = \frac{R_i + SM_{i,i-1}}{1 + d} \quad (12)$$

$$Q_{l,i} = d \times SM_{i,i} \quad (13)$$

که در آن $SM_{i,i}$ ذخیره رطوبت خاک لایه تحتانی در هر ماه، $SM_{i,i-1}$ ذخیره رطوبت خاک لایه تحتانی در ماه قبل و $Q_{l,i}$ رواناب لایه تحتانی می‌باشد. در نهایت از مجموع رواناب لایه فوقانی و تحتانی مقدار رواناب کل در هر ماه (Q_t) به دست می‌آید (Thomas, 1981; Al-Lafta et al, 2013):

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_i + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_i \cdot b}{a}} \quad (7)$$

فرصت تبخیر با یک رابطه غیرخطی با آب در دسترس در ارتباط است. فرصت تبخیر در واقع مجموع تبخیر-تعرق واقعی و ذخیره رطوبت خاک در لایه فوقانی است. ذخیره رطوبت خاک در لایه فوقانی و تبخیر-تعرق واقعی در هر ماه از روابط ۸ و ۹ به دست می‌آید:

$$Q_t = Q_{u,i} + Q_{l,i} \quad (14)$$

از مزایای مدل مفهومی بیلان آب توماس می‌توان به سادگی و نیاز کم به داده‌های ورودی و در عین حال دقت بالا در شبیه‌سازی رفتار رواناب اشاره کرد. این مدل با در نظر گرفتن دو لایه ذخیره رطوبتی خاک امکان مطالعه تأثیر آب‌های زیرزمینی بر رواناب خروجی را فراهم می‌آورد. هر چند به نظر می‌رسد به دلیل عدم در نظر گرفتن بارش به صورت برف، در مناطق کوهستانی، شبیه‌سازی رواناب با خطای بیشتری همراه باشد.

$$SM_{u,i} = Y_i \times \exp\left(-\frac{PET_i}{b}\right) \quad (8)$$

$$AET_i = Y_i - SM_{u,i} = Y_i \left(1 - \exp\left(-\frac{PET_i}{b}\right)\right) \quad (9)$$

که در آن $SM_{u,i}$ ذخیره رطوبت خاک در لایه فوقانی در هر ماه، PET_i تبخیر-تعرق پتانسیل در هر ماه و AET_i تبخیر-تعرق واقعی در هر ماه می‌باشد. آب موجود برای رواناب $(W_i - Y_i)$ توسط پارامتر c به دو بخش رواناب لایه فوقانی و تغذیه آب زیرزمینی تقسیم می‌شود:

برای برآورد پارامترهای a ، b ، c و d ، از روش مونت کارلو و اعداد فازی مثلثی بهره گرفته شد. به این منظور ابتدا برای هر پارامتر، بازه‌ای که به آن تعلق دارد، مشخص شد. سپس یک عدد فازی مثلثی

$$Q_{u,i} = (1 - c) \times (W_i - Y_i) \quad (10)$$

انطباق محصول بارش ماهواره‌ای با مشاهدات زمینی افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کلیه ایستگاه‌ها همبستگی بالای ۰/۸۴ دارند و بیشترین همبستگی در موقعیت ایستگاه زرنده در جنوب زیرحوضه دیده می‌شود. بررسی مقدار RMSE و MAE نشان می‌دهد که بیشترین خطای تخمین بارش در شرق حوضه بوده و با حرکت به سمت غرب و جنوب کاهش می‌یابد؛ به طوری که در موقعیت ایستگاه زرنده کمترین مقدار RMSE و MAE حاصل شده است. مقادیر ضریب کارایی نش-ساتکلیف حاکی از عملکرد مطلوب محصول ماهواره‌ای در برآورد بارش می‌باشد. از طرفی بررسی ضریب انحراف نشان می‌دهد که محصول ماهواره‌ای در شرق زیرحوضه، بارش را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد کرده و با حرکت به سمت شمال غرب و جنوب غرب زیرحوضه، بارش برآورد شده بیشتر از مقدار مشاهداتی می‌باشد.

بررسی عملکرد محصول دمای بازتحلیل ERA5 نسبت به ایستگاه‌های سینوپتیک قوچان و نیشابور و مشاهده‌ی مقادیر بالای ضریب همبستگی و ضریب کارایی و خطای کم RMSE و MAE نیز بیانگر عملکرد مطلوب این محصول است (جدول ۳). البته با توجه به مقدار منفی ضریب انحراف، این محصول مقادیر دما را کمتر از مشاهدات تخمین می‌زند.

برای هر کدام از پارامترها با توجه به بازه تعیین شده، در نظر گرفته شد. این عدد فازی مثلثی جایگزین تابع چگالی احتمال در روش مونت‌کارلو گردید که با انتگرال‌گیری از این عدد، تابع توزیع تجمعی (CDF) به دست می‌آید. سپس با تولید تعداد زیادی اعداد تصادفی در بازه صفر و یک و اعمال آن بر تابع توزیع تجمعی، عددی برای پارامتر مورد نظر به دست آمد. با تکرار این فرایند برای هر پارامتر، مجموعه‌ای از اعداد برای هر پارامتر ایجاد می‌گردد که در کنار هم از عدد فازی مثلثی تبعیت می‌کنند. این مقادیر برای شبیه‌سازی رواناب در مدل abcd مورد استفاده قرار گرفت. برای مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، با استفاده از دو تابع هدف ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین، ضمن مقایسه این دو تابع هدف، اقدام به بهینه‌سازی و یافتن بهترین جواب از مجموعه جواب‌های موجود شد. کلیه مراحل اختصاص اعداد فازی به پارامترها، تولید اعداد تصادفی، استفاده از روش مونت‌کارلو و در ادامه شبیه‌سازی مدل و بهینه‌سازی آن در محیط نرم‌افزار MATLAB R2018b صورت گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۲ مقایسه عملکرد محصول بارش ماهواره‌ای IMERG را در انطباق با داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی نشان می‌دهد. بر این اساس با حرکت به سمت جنوب و جنوب غرب زیرحوضه، دقت و

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های آماری در ارزیابی محصول بارش ماهواره‌ای IMERG نسبت به ایستگاه‌های باران‌سنجی

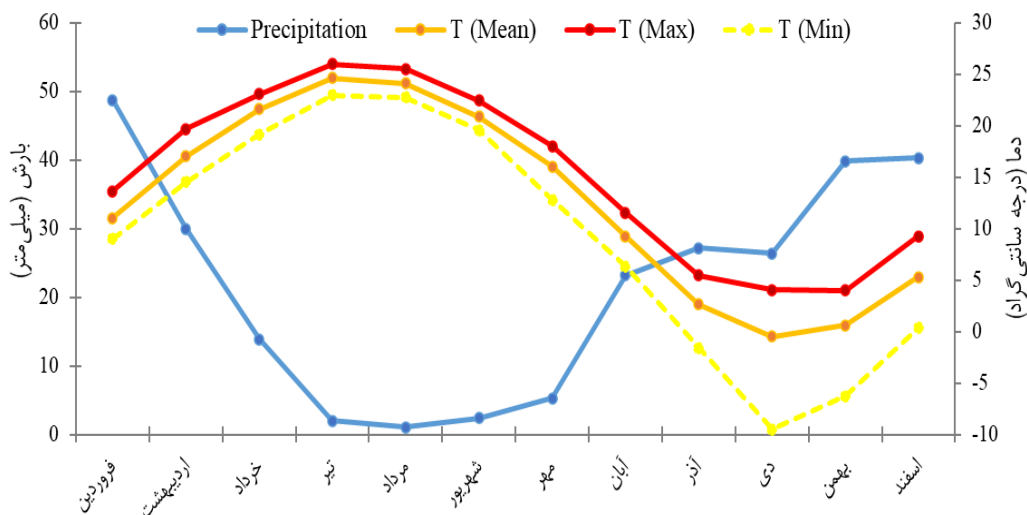
BIAS	NS	MAE	RMSE	R	ایستگاه باران‌سنجی
-۰/۰۶۶	۱۱/۳۹	۱۷/۸۱	۰/۸۳۹	۰/۸۳۹	بقیع
-۱/۱۳	۰/۷۸	۸	۱۲/۳۰	۰/۸۸۴	سرچاه
۲/۰۵	۰/۷۴	۸/۰۱	۱۱/۹۱	۰/۸۶۹	ساق بیگ
۳/۶۷	۰/۷۵	۷/۲۱	۱۰/۷۶	۰/۸۹۰	زرنده
-۴/۱۲	۰/۷۶	۸/۹۳	۱۳/۹۱	۰/۸۹۳	اریه چهارباغ

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری در ارزیابی دمای بازتحلیل شده ERA5 نسبت به ایستگاه‌های سینوپتیک

BIAS	NS	MAE	RMSE	R	ایستگاه سینوپتیک
-۳/۲۲۴	۰/۸۳۵	۳/۲۲۴	۳/۴۳۴	۰/۹۹۴	قوچان
-۱/۷۱۴	۰/۹۵۲	۱/۷۱۴	۱/۸۹۳	۰/۹۹۷	نیشابور

ماهانه بارش و متوسط دمای (به صورت حداقل، میانگین و حداکثر) این زیرحوضه را بر مبنای محصولات ماهواره‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمده بارش‌ها از آذرماه تا اردیبهشت‌ماه است. با توجه به مقادیر حداقل دما به نظر می‌رسد که ریزش برف مختص ماه‌های آذر، دی و بهمن باشد. بر این اساس انتظار می‌رود که اوج جریان رواناب در ماه‌های بهمن تا اردیبهشت رخ دهد.

پس از ارزیابی محصولات ماهواره‌ای و اطمینان از دقت قابل قبول آن‌ها در منطقه مطالعاتی، داده‌های نقطه‌ای بارش و دما با استفاده از روش چندضلعی‌های تیسن به کل زیرحوضه تعمیم داده شد. بر این اساس میانگین درازمدت بارش سالانه و متوسط دمای سالانه در این زیرحوضه برای محصولات ماهواره‌ای به ترتیب ۲۶۰/۱ میلی‌متر و ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۴ نیز تغییرات درازمدت

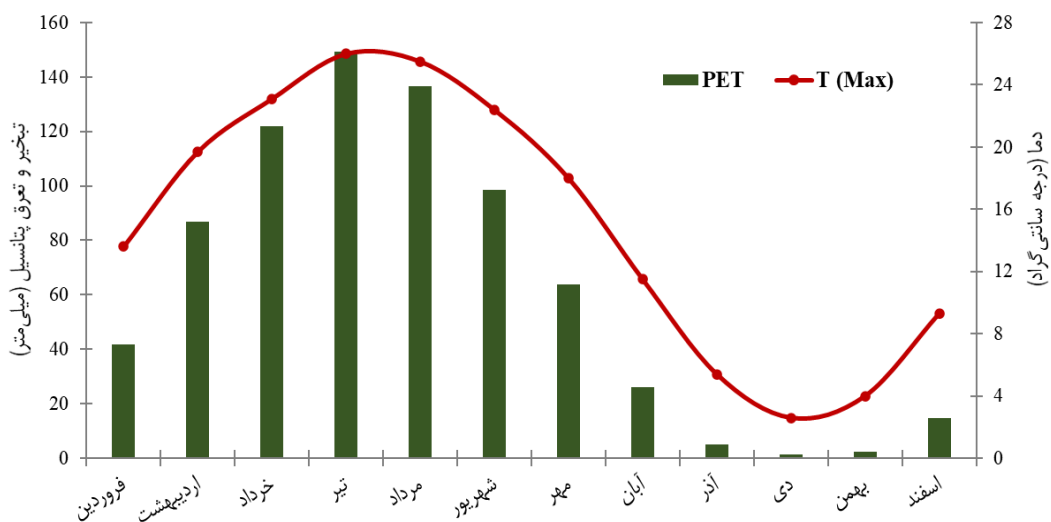


شکل ۴- نوسانات میانگین درازمدت ماهانه دما و بارش زیرحوضه زرنده

به کمک محصولات دمای متوسط ماهانه ERA5 محاسبه گردید (شکل ۵). مطابق انتظار با توجه به حداکثر دمای درازمدت ماهانه که مربوط به ماه‌های خرداد تا شهریور است، بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل نیز مربوط به همین بازه زمانی می‌باشد. بر این اساس میانگین درازمدت سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل در این زیرحوضه برابر با ۷۴۸/۵ میلی‌متر است. این مقدار پتانسیل تبخیری در حدود ۲/۸۸ برابر بارش در این زیرحوضه است؛ بنابراین انتظار می‌رود بخش قابل توجهی از بارش در این زیرحوضه در طول سال به واسطه تبخیر از دسترس خارج شود.

شبیه‌سازی و ارزیابی مدل بیلان آب توماس (abcd)

برای محاسبه اجزای بیلان آب زیرحوضه زرنده با استفاده از داده‌های بارش و دمای مستخرج از محصولات ماهواره‌ای، اقدام به پیاده‌سازی الگوریتم مدل بیلان آب ماهانه abcd در محیط نرم‌افزار MATLAB R2018b شد. مدل توسعه داده شده با استفاده از داده‌های حاصل از محصولات ماهواره‌ای برای یک دوره آماری ۱۶ ساله از سال ۱۳۸۰ الی ۱۳۹۵ اجرا و رواناب خروجی زیرحوضه شبیه‌سازی شد. ورودی‌های مدل abcd، بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل می‌باشد؛ لذا مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل با روش تورنت‌وایت



شکل ۵- میانگین درازمدت دما و تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه زیرحوضه زرنده

and Gupta, 2010; Al-Lafta et al., 2013) تعیین شد. به این ترتیب که قاعده عدد مثلثی بر روی ابتدا و انتهای بازه تغییرات منطبق

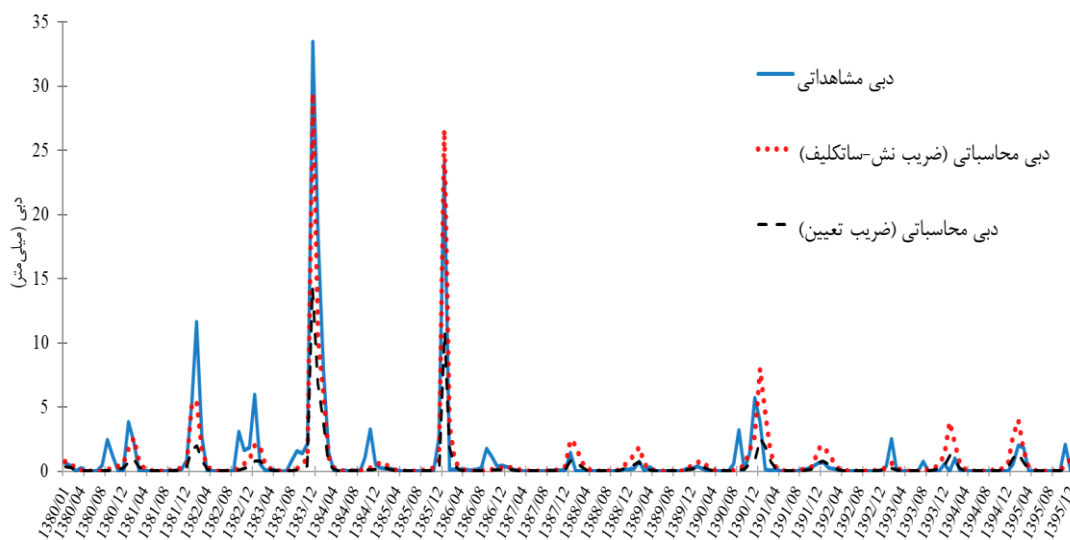
در ادامه اعداد فازی مثلثی متقارن برای چهار پارامتر مدل abcd (Martinez با توجه به اطلاعات موجود از بازه تغییرات متداول آن‌ها

تعرق پتانسیل، رواناب‌های خروجی مختلفی برای زیرحوضه زرنده شبیه‌سازی شد. برای بهینه‌سازی، نتایج حاصله با مقادیر دبی مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری زرنده بر مبنای بیشینه کردن دو تابع هدف ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین (R^2) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. بهترین رواناب شبیه‌سازی شده بر اساس هر یک از توابع هدف ذکر شده، در شکل ۶ نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز مقادیر پارامترهای خطا برای هر یک از دو تابع هدف مشاهده می‌شود.

گردید. ارتفاع رأس عدد مثلثی، متناظر با وسط بازه تغییرات به گونه‌ای تعیین شد تا مساحت این اعداد فازی برابر با یک باشد:

$$\begin{aligned} \bar{F}_a &= (0.95, 0.975, 1), & \bar{F}_b &= (0.500, 1.000), \\ \bar{F}_c &= (0, 0.5, 1), & \bar{F}_d &= (0, 0.5, 1) \end{aligned}$$

با انتگرال‌گیری از اعداد فوق، تابع توزیع تجمعی مربوط به هر پارامتر مشخص گردید. سپس با تولید تعداد زیادی اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ (به عنوان مثال ۱۰۰۰ عدد) برای هر پارامتر با بهره‌گیری از تابع rand() در محیط MATLAB و اعمال آن بر تابع توزیع تجمعی، مقادیر مختلفی برای چهار پارامتر مذکور به دست آمد. با اعمال این مقادیر در مدل abcd به همراه داده‌های بارش و تبخیر-



شکل ۶- سری زمانی رواناب ماهانه مشاهداتی و محاسبه شده زیرحوضه زرنده

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری در ارزیابی رواناب شبیه‌سازی شده

BIAS	NS	MAE	RMSE	R^2	تابع هدف
-۰/۰۵	۰/۸۶	۰/۶۰	۱/۲۷	۰/۸۷	ضریب نش-ساتکلیف (NS)
-۰/۵۶	۰/۵۹	۰/۶۹	۲/۲۲	۰/۹۰	ضریب تعیین (R^2)

آب‌های زیرزمینی در رواناب شبیه‌سازی شده برای زیرحوضه زرنده می‌باشد.

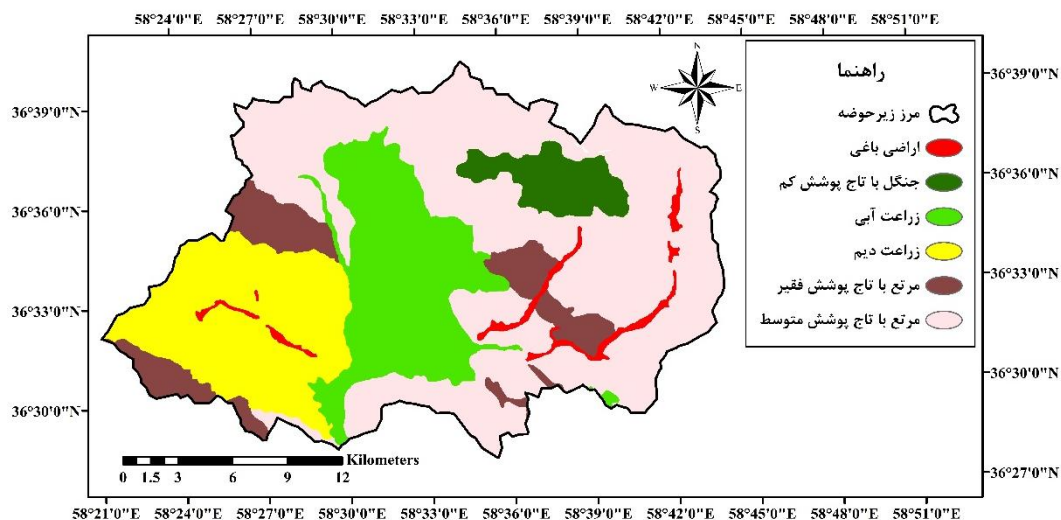
با توجه به عملکرد بهتر مدل توسعه داده شده با تابع هدف NS، نتایج این مدل مبنای تحلیل اجزای بیلان آب قرار گرفتند. شکل ۸ مقایسه میانگین درازمدت دبی ماهانه بین داده‌های محاسباتی از مدل abcd و داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نیمه اول سال که متوسط دمای هوا و در نتیجه مقدار تبخیر-تعرق بیشتر است، مدل نسبت به دبی مشاهداتی، بیش‌برآورد و در نیمه دوم سال که میانگین دمای هوا و تبخیر-تعرق کمتر است، کم‌برآوردی نسبت به دبی مشاهداتی دارد.

نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مدل با لحاظ ضریب کارایی نش-ساتکلیف به عنوان تابع هدف، از کارایی و دقت بیشتری برخوردار است. ضمن اینکه مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی دبی‌های پیک می‌باشد.

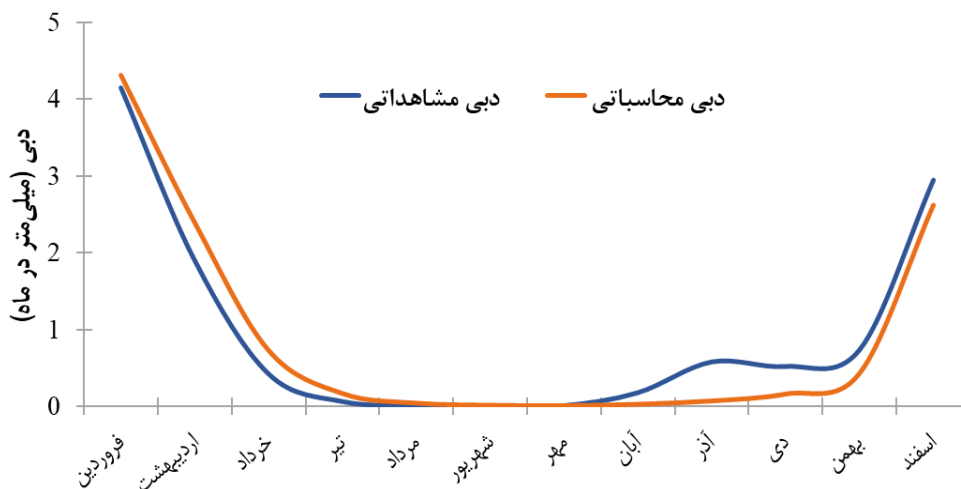
مقادیر بهینه پارامترهای a، b، c و d در جدول ۵ نشان داده شده است. بر این اساس مقدار پارامتر a که به عدد یک بسیار نزدیک است، بیانگر آن است که در منطقه مطالعاتی به علت وجود زمین‌های کشاورزی و مراتع و کم بودن مناطق شهری (شکل ۷)، گرایش به ایجاد رواناب قبل از اشباع خاک بسیار کم است. پارامتر b حد فوقانی مجموع تبخیر-تعرق و ذخیره رطوبت خاک را تعیین کرده است. مقادیر صفر به دست آمده برای پارامترهای c و d، بیانگر عدم تأثیر

جدول ۵- مقادیر بهینه پارامترهای مدل abcd

تابع هدف	a	b	c	d
ضریب نش-ساتکلیف	۰/۹۹۷۷	۲۶۲/۹	۰	۰
ضریب تعیین	۰/۹۹۹	۲۸۶	۰	۰



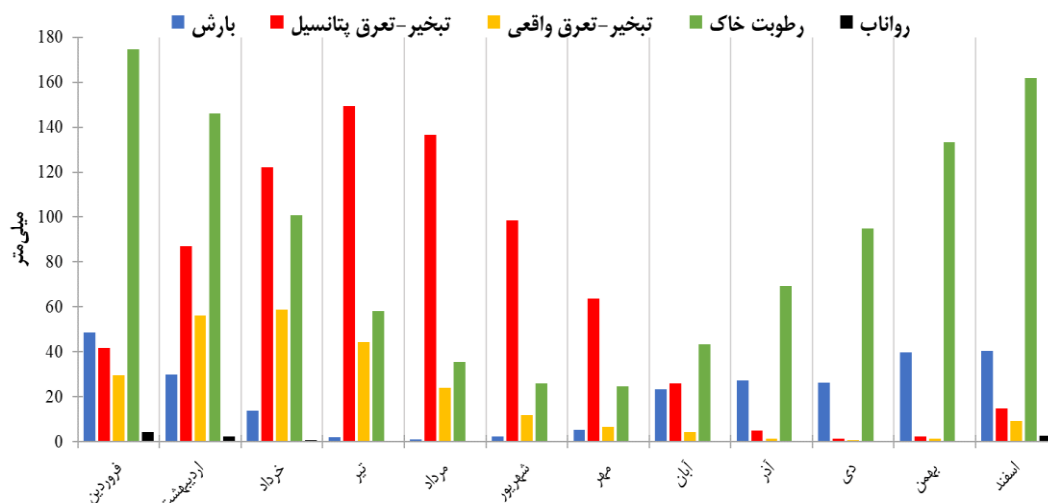
شکل ۷- نقشه کاربری اراضی زیرحوضه زرنده



شکل ۸- مقایسه میانگین درازمدت رواناب ماهانه محاسباتی و مشاهداتی در زیرحوضه زرنده

مقدار آب موجود در پروفیل خاک است که توسط بارش تأمین شده و در دسترس گیاه بوده و در نهایت توسط تبخیر-تعرق از دسترس خارج می‌شود (Schoul et al., 2008)؛ بنابراین از ظرفیت این آب می‌توان با انتخاب محصول مناسب برای کشت دیم پاییزه در منطقه استفاده کرد.

با توجه به صفر شدن پارامترهای c و d مقدار رطوبت خاک در لایه زیرین و همچنین جریان در این لایه صفر می‌باشد. در شکل ۹ میانگین درازمدت ماهانه اجزای بیلان آب محاسبه شده با مدل abcd نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشتر بارش در این حوضه صرف ذخیره رطوبت خاک می‌شود. این ذخیره رطوبت خاک به عنوان ذخیره آب سبز در نظر گرفته می‌شود. طبق تعریف، ذخیره آب سبز



شکل ۹- میانگین درازمدت ماهانه اجزای بیلان آب در زیرحوضه زرنده

نتیجه گیری

محاسبه اجزای بیلان آب نقش مهمی در اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی برای استفاده یا صرفه‌جویی و در مجموع مدیریت منابع آبی در یک منطقه دارد. از طرفی در بسیاری از مناطق ایران به دلیل کمبود تجهیزات یا خرابی آن‌ها و یا هزینه‌های زیاد ساخت ایستگاه‌ها در بعضی مناطق، امکان دسترسی آسان به داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی میسر نیست که این امر باعث ناتوانی یا کاهش دقت در محاسبه بیلان آب برای این مناطق می‌شود. ضمن اینکه تعیین پارامترها و ضرایب مدل‌های بیلان آب نیز با عدم قطعیت‌هایی مواجه است. از این رو برای پوشش موارد ذکر شده، در این پژوهش با استفاده از ابزارها و فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور و رویکرد فازی-احتمالاتی در قالب یک مدل مفهومی بیلان آب، اجزای بیلان آب برای زیرحوضه زرنده واقع در شمال حوضه نیشابور در خراسان رضوی محاسبه گردید.

ارزیابی محصولات بارش IMERG و دمای ERA5 در مقیاس ماهانه و در یک دوره آماری ۱۶ ساله بر مبنای داده‌های ایستگاه‌های زمینی باران‌سنجی و سینوپتیک و با استفاده از پنج شاخص آماری R، RMSE، MAE، NS و BIAS انجام شد. نتایج حاکی از عملکرد مطلوب محصول بارش IMERG در منطقه است. البته با توجه به میزان همبستگی در ایستگاه بقیع که در بخش کوهستانی زیرحوضه زرنده واقع شده، به نظر می‌رسد عملکرد این محصول در ارتفاعات از دقت کمتری برخوردار است. خطای اندک و ضریب همبستگی بالای ۰/۹۹ محصول دمای بازتحلیل ERA5 نسبت به داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک نیز نشان از عملکرد بسیار مطلوب این محصول در این حوضه دارد.

در ادامه مدل بیلان آب abcd با استفاده از محصولات بارش

IMERG و دمای ERA5 توسعه داده شد و مقادیر بهینه پارامترهای مدل با استفاده از تلفیق اعداد فازی با روش مونت کارلو و همچنین لحاظ توابع هدف ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین بر مبنای دبی مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری زرنده تعیین گردید. با توجه به تحلیل‌ها و ارزیابی‌های انجام شده، بهترین عملکرد مدل با لحاظ ضریب کارایی نش-ساتکلیف به عنوان تابع هدف به دست آمد. مدل توسعه داده شده از عملکرد بسیار خوبی (ضریب کارایی ۰/۸۶) در محاسبه اجزای بیلان آب برخوردار می‌باشد. همان‌طور که در نتایج مشاهده شد، بیشتر بارش منطقه صرف ذخیره رطوبت خاک می‌شود. با توجه به پارامترهای c و d مدل که مقادیر صفر برای آن‌ها برآورد شده است و همچنین تحلیل نتایج تبخیر-تعرق که پتانسیل بالایی در منطقه دارد، ذخیره رطوبت خاک توانایی تغذیه آب‌های زیرزمینی را نداشته و در صورت عدم برنامه‌ریزی برای استفاده از این ذخیره رطوبتی، به صورت تبخیر از دسترس خارج می‌شود. حال آن‌که با مدیریت صحیح و شناخت روش‌های مناسب برای بهره‌برداری از ذخیره آب سبز از جمله کشت دیم می‌توان برای استفاده مناسب از این منابع آبی برنامه‌ریزی کرد. در مجموع با توجه به نتایج و دقت بالای مدل abcd در شبیه‌سازی رواناب و دبی‌های اوج و همچنین ساختار مدل که در آن از رویکردی فازی-احتمالاتی برای کاهش عدم قطعیت پارامترها و یافتن مقادیر بهینه آن‌ها استفاده شده است، این مدل گزینه مناسبی برای استفاده در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. نتایج ارزیابی محصولات ماهواره‌ای IMERG و ERA5 نیز نشان از عملکرد مطلوب آن‌ها دارد که می‌توان در مناطق مشابه و فاقد ایستگاه‌های زمینی از آن‌ها استفاده کرد.

- reanalysis over East Africa?. Atmosphere. 11(9): 996.
- Hosseini-Moghari, S. M. and Tang, Q. 2020. Validation of GPM Imerg v05 and v06 precipitation products over Iran. J. of Hydrometeorol. 21(5): 1011-1037.
http://wrs.wrm.ir/amar/
- Khazaei, B. and Hosseini, S. M. 2015. Improving the performance of water balance equation using fuzzy logic approach. Journal of Hydrology. 524: 538-548.
- Marinou, P. G., Feloni, E. G., Tzoraki, O. and Baltas, E. A. 2017. An implementation of a water balance model in the Evrotas basin. Eur. Water. 57: 147-154.
- Martinez, G. F. and Gupta, H. V. 2010. Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the "abcd" monthly water balance model for the conterminous United States. Water Resources Research. 46(8).
- Nasseri, M., Zahraie, B., Ansari, A. and Solomatine, D. P. 2013. Uncertainty assessment of monthly water balance models based on Incremental Modified Fuzzy Extension Principle method. Journal of Hydroinformatics. 15(4): 1340-1360.
- Tayefeh Neskili, N., Zahraie, B. and Saghafian, B. 2017. Coupling snow accumulation and melt rate modules of monthly water balance models with the Jazim monthly water balance model. Hydrological Sciences Journal. 62(14): 2348-2368.
- Thomas, H. A. 1981. Improved methods for national water assessment: Final report. US Geol. Surv. Water Resour. Contract WR. 44.
- Thorntwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical review. 38(1): 55-94.
- Wang, X., Gao, B. and Wang, X. 2020. A Modified ABCD Model with Temperature-Dependent Parameters for Cold Regions: Application to Reconstruct the Changing Runoff in the Headwater Catchment of the Golmud River, China. Water. 12(6): 1812.
- امینی، م.، ترکان، غ.، اسلامیان، س.، زارعیان، م. و بسالت‌پور، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل هیدرولوژیک SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه‌های آبریز مناطق نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود). نشریه آب و خاک. ۳۲ (۵): ۸۶۳-۸۴۹.
- پورمحمدی، س.، دستورانی، م.، مساح‌بوانی، ع.، جعفری، ه. و رحیمیان، م. ۱۳۹۴. مدلی برای تعیین اجزای بیلان آب سطحی و زیرزمینی دشت تویسرکان. نشریه دانش آب و خاک. ۲۵ (۳): ۲۸۱-۲۹۶.
- رضوی کهنمویی، س.س.، داوری، ک.، قهرمان، ب. و جودوی، ع. ۱۳۹۸. مروری بر مدل‌های بیلان آب: بررسی مدل‌های ریاضی مفهومی برای حوضه آبریز. مجله پژوهش آب ایران. ۱۳ (۴): ۱۲۵-۱۳۶.
- شفیعی، م. و قراری، ش. ۱۳۹۶. مروری بر مفاهیم مدل‌سازی هیدرولوژی: بخش اول، معرفی فرآیند مدل‌سازی. نشریه آب و توسعه پایدار. ۴ (۲): ۹۵-۱۰۲.
- علیزاده، ا. ۱۳۹۶. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ چهل و دوم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
- فرجی، ز. و کاویانی، ع. ۱۳۹۸. ارزیابی اجزای بیلان آب حاصل از مدل سطح زمین GLDAS-2 و GLDAS-2.1 در استان قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۲): ۴۶۲-۴۷۴.
- Al-Lafta, H. S., Al-Tawash, B. S. and Al-Baldawi, B. A. 2013. Applying the "abcd" monthly water balance model for some regions in the United States. Advances in Physics Theories and Applications. 25(1): 36-47.
- Fernandez, W., Vogel, R. M. and Sankarasubramanian, A. 2000. Regional calibration of a watershed model. Hydrological sciences journal. 45(5): 689-707.
- Gleixner, S., Demissie, T. and Diro, G. T. 2020. Did ERA5 improve temperature and precipitation

Calculation of Water Balance Components in Ungauged Watersheds Using the Conceptual Model of Thomas Water Balance and Satellite Products

M. Baseri¹, E. Mahjoobi^{2*}

Received: Dec.24, 2021

Accepted: Jan.17, 2021

Abstract

Water balance is one of the most important issues that should be paid special attention in the discussion of water resources management and as a result of decisions and plans for water consumption in different sectors. In this paper, using remote sensing products, the conceptual model of Thomas water balance (abcd) in a basin with semi-arid climatic conditions was calculated and evaluated. First, the monthly output of IMERG satellites and the re-analysed temperature of ERA5 were compared with ground-based measurements. Evaluation results of these products using five statistical indicators including Pearson correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS) and deviation coefficient (BIAS) in the Zarandeh sub-basin located in Neishabour region shows their high accuracy and correlation with observations. Then, using these products and GIS, the conceptual model of Thomas for this sub-basin was developed in MATLAB software and its performance in basin runoff simulation was investigated. Fuzzy numbers and the Monte Carlo method were also used to reduce uncertainties in model parameters. This model was optimized with two different objective functions of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and determination coefficient. The results show the high accuracy of the abcd water balance model using remote sensing products in the study area and well simulation of the discharge behavior.

Keywords: ERA5, Fuzzy numbers, IMERG, Monte Carlo, Thomas water balance model

1- M.Sc. in Water Resource Management and Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(*- Corresponding Author Email: emahjoobi@shahroodut.ac.ir)