Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی فضای جغرافیایی

سال بیستم، شماره‌ی ۷۲
زمستان ۱۳۹۹، صفحات ۱۵۷-۱۴۹

میثم مطهری[۱]
*عباس ستوده‌نیا[۲]
بیژن نظری[۳]
محمدرضا یزدانی[٤]

ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی محصول برنج در مقیاس حوضه‌ای براساس تبخیروتعرق واقعی در حوضه سفیدرود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱٤ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰٦/۰۵

چکیده

بهره‌وری آب کشاورزی از جمله معیارهای اصلی در سنجش کارایی و عملکرد مدیریت سامانه‌های آبی با مصرف بالای آب کشاورزی بوده و انتخاب شاخص‌های مناسب لازمه انجام ارزیابی واقعی از این معیار در یک حوضه می‌باشد. در این راستا استفاده از حجم تبخیروتعرق واقعی محصولات کشاورزی می‌تواند در محاسبه بهره‌وری آب مدنظر قرار گیرد. برای بررسی این مهم، حوضه سفیدرود به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب گردیده و علاوه بر حجم آب آبیاری، از حجم تبخیروتعرق واقعی صورت گرفته برای ارزیابی بهره‌وری آب در مقیاس حوضه‌ای استفاده گردید. برای این ارزیابی از دو شاخص CPD_{IP} (میزان محصول تولیدی به ازای واحد آب آبیاری و بارندگی موثر مصرفی) و CPD_{ET} (میزان محصول تولیدی به ازای واحد تبخیروتعرق واقعی) استفاده شد. برای برآورد تبخیروتعرق واقعی و عملکرد در مقیاس حوضه‌ای، از مدل جامع ارزیابی آب‌وخاک (SWAT) استفاده شد. بدین منظور ابتدا مدل مذکور با استفاده از ابزار SWAT-CUP و با توجه به داده‌های ایستگاه آب‌سنجی در سطح حوضه واسنجی و اعتبارسنجی گردید که مقادیر R^2 بین برای این دو مرحله به‌ترتیب بین ۰/٦۱ تا ۰/۷۵ و ۰/۵۱ تا ۰/۷۲ به‌دست آمد.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).
*۲- گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره). (نویسنده مسئول). E-mail: a.sotoodehnia@eng.ikiu.ac.ir
۳- گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).
٤- موسسه تحقیقات برنج کشور.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

در ادامه مقادیر شاخص‌های بهره‌وری آب، برای محصول برنج محاسبه گردید. براساس نتایج تحقیق حاضر، مقادیر متوسط شاخص‌های CPD_{IP} و CPD_{ET} برای دوره مورد مطالعه در حوضه سفیدرود به‌ترتیب ۰/۴۰ و ۰/۹۹ (کیلوگرم بر مترمکعب) به‌دست آمد. لذا مقادیر شاخص‌های بهره‌وری براساس تبخیروتعرق واقعی تقریبا ۲/۵ برابر مقادیر شاخص‌ها بر مبنای حجم آب آبیاری و بارندگی موثر می‌باشند. بر مبنای یافته‌های این پژوهش، شاخص CPD_{ET} به علت در نظر گرفتن استفاده چندین باره از تلفات نفوذ عمقی و سطحی آب در بخش‌های مختلف، معیار مناسبی برای ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی در سطح یک حوضه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: بهره‌وری آب کشاورزی، تبخیر و تعرق واقعی، آب آبیاری، مقیاس حوضه‌ای، SWAT.

مقدمه

در یک حوضه آبریز با اراضی کشاورزی آبی و دیم، بهره‌وری آب کشاورزی یک محصول به‌صورت مقدار عملکرد آن محصول و یا میزان سود خالص به‌دست آمده از آن به ازای واحد آب مصرفی تعریف می‌شود (Tuong & Bouman, 2003: 6). در کشورهای خشک و نیمه‌خشک همچون ایران با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی منابع آب در دسترس، افزایش بهره‌وری آب کشاورزی از راهکارهای مهم مطرح در تامین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد در آن‌ها محسوب می‌شود. تدوین سیاست‌ها و سناریوهای افزایش بهره‌وری آب بدون ارزیابی واقعی و درست از آن برای الگوی کشت موجود در منطقه مورد مطالعه امکان‌پذیر نخواهد بود. در حوضه‌هایی با سطح اراضی کشاورزی فاریاب قابل توجه که راندمان آبیاری در آن‌ها پایین می‌باشد، مقداری از آب آبیاری در مزرعه به‌صورت سطحی و یا نفوذ عمقی از دسترس خارج می‌شود که ممکن است به‌صورت برداشت از طریق چاه‌ها و یا رودخانه‌ها در پایین‌دست حوضه و یا قسمت‌های مختلف آن به مصرف دوباره کشاورزی و یا کاربری‌های دیگر برسد. در محاسبه شاخص‌های بهره‌وری آب براساس حجم آب آبیاری به‌ویژه در مقیاس مزرعه‌ای به دلیل عدم در نظر گرفتن استفاده چندین باره از تلفات عمقی و سطحی توسط کشاورزان در پایین‌دست حوضه و یا قسمت‌های مختلف آن، مقادیر به‌دست آمده برای این شاخص‌ها از مقادیر واقعی آن‌ها کم‌تر می‌باشد. استفاده از حجم تبخیروتعرق واقعی صورت گرفته از محصولات در طی فصل رشد آن‌ها بجای حجم آب آبیاری در محاسبه بهره‌وری آب تا حدودی می‌تواند این مشکل را برطرف سازد. برای بررسی این موضوع حوضه سفیدرود، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. برآورد حجم تبخیروتعرق واقعی در قسمت‌های مختلف حوضه مورد مطالعه برای محصولات موجود در الگوی کشت تقریبا غیرممکن بوده و یا با هزینه گزافی همراه است. همچنین ممکن است برای بسیاری از زیرحوضه‌های حوضه مورد مطالعه، آمار و اطلاعات مربوط به عملکرد محصولات موجود نباشد. لذا استفاده از رویکرد مدل‌سازی برای ارزیابی بهره‌وری آب در مقیاس حوضه‌ای براساس تبخیروتعرق واقعی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در این راستا استفاده از مدل‌های مفهومی می‌تواند راه‌گشا باشد. بررسی تحقیقات انجام شده نشان داد که مدل

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

جامع ارزیابی آب‌وخاک (SWAT[5])، به دلایلی مانند بدون هزینه بودن و قابلیت شبیه‌سازی همزمان اثرات متقابل متغیرهای هیدرولوژیک و مدیریت کشاورزی (مانند رواناب، تبخیروتعرق و آب‌های زیرزمینی) و متغیرهای گیاهی (مانند عملکرد) در حوضه‌های پیچیده با شرایط کاربری اراضی و نوع خاک متنوع، گزینه مناسبی می‌باشد (Arnold et al., 1998: 15). تاکنون تحقیقات زیادی برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از مدل SWAT انجام گرفته که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. Immerzeel et al (2008) در حوضه‌ی رودخانه‌ی آپر بیما[6] از مدل SWAT برای ارزیابی بهره‌وری آب نیشکر، سورگوم و ارزن و همچنین برای مشخص کردن اجزای معادله‌ی بیلان آب در مقیاس زمانی ماهانه برای سال آبی ۲۰۰٤ و ۲۰۰۵ استفاده کردند. در پژوهشی دیگر Faramarzi et al (2010) عملکرد زراعی گندم و بهره‌وری آب کشاورزی آن را در ایران با استفاده از این مدل مورد بررسی قرار دادند. Huang et al (2010) از SWAT برای ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب گیاهی (CWP)، آب سبز (GW)[7] و آب آبی (BW)[8] در مقیاس حوضه‌ای در حوضه‌های کشور چین استفاده نمودند.Bhuvaneswari et al (2013) نیز با استفاده از SWAT تاثیر تغییرات الگوهای آب‌وهوایی را بر روی عملکرد گیاهان مختلف در حوضه رودخانه کاوری[9] در کشور هند مورد ارزیابی قرار دادند. در تحقیق دیگری Kaushal et al (2011) نقشه مکانی WP[10] و EWP[11] را با استفاده از این مدل برای حوضه‌ی رودخانه آپر بیما واقع در کشور هند، برای سه گیاه نیشکر، ارزن و سورگوم به‌دست آوردند. همچنین Jeimar et al (2011) با استفاده از این مدل تغییرات تبخیروتعرق پتانسیل و همچنین عملکرد آب گیاهی را برای گیاه ذرت بر اساس سناریوهای مختلف مقدار آب قابل دسترس در آینده، در کشور پرو شبیه‌سازی کردند. با توجه به کارایی مدل SWAT، در سال‌های اخیر این مدل مورد توجه محققان زیادی قرار گرفت. به‌طور مثال، Ahmadzadeh et al (2016) با به‌کارگیری مدل SWAT به بررسی اثر تغییر سیستم آبیاری از سطحی به تحت‌فشار روی شاخص بهره‌وری پرداختند. در این مطالعه که برای حوضه زرینه‌رود انجام شد نشان داده شد که تغییر سیستم آبیاری به تحت‌فشار می‌تواند تا ۲۰ درصد در شاخص بهره‌وری محصول بهبود داشته باشد. همچنین، این روش به دلیل کاهش مصرف آب اقتصادی بوده و از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به روشی مشابه، Zaman et al (2016) استراتژی‌های تغییر اقلیم روی بهره‌وری در سیمینه‌رود را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که برای تعدیل اثرات اقلیمی آینده، الگوی کشت در حوضه مورد نظر باید تغییر یابد زیرا انتظار می‌رود ورودی آب به دریاچه ارومیه تحت سناریوهای اقلیمی در آینده کاهش چشم‌گیری داشته باشد. Ashraf Vaghefi et al (2017) با استفاده از مدل ترکیبی SWAT و MODSIM بهره‌وری آب کشاورزی برای گندم و ذرت را برای حوضه کرخه مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق حاکی از افزایش دقت مدل ترکیبی نسبت به مدل SWAT

5- Soil and Water Assessment Tool
6- Upper Bhima
7- Green Water
8- Blue Water
9- Cauvery
10- Water productivity
11- Economic Water Productivity

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

بوده و همچنین نشان داده شد که مقدار آب مورد نیاز برای هریک از زیرحوضه‌ها با یکدیگر به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. Niu et al (2018) با استفاده از مدل SWAT بهره‌وری آب را با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی در شمال‌غربی چین بررسی کرده و نشان دادند که دمای بیشینه موثرترین پارامتر اقلیمی در ارزیابی بهره‌وری برای منطقه مورد مطالعه می‌باشد. Xu et al (2019) با ارزیابی زمانی و مکانی تغییرات شاخص بهره‌وری آب گیاهی، کمبود آب و آب آبیاری برای ۲۷۰ منطقه مختلف در شمال چین نتیجه گرفتند که مناطق زیادی درگیر مشکلات جدی ناشی از کمبود آب بوده در حالی که هم‌چنان در حال کشت و تولید محصول می‌باشند. محصول برنج یکی از محصولات پرمصرف به لحاظ آب در حوضه آبریز سفیدرود می‌باشد که اخیرا با کمبود آب مواجه شده است. با توجه با خشکسالی‌های اخیر و عدم امکان تامین آب بیش‌تر برای این محصول، افزایش بهره‌وری آب می‌تواند کارساز باشد؛ لذا در مرحله اول بررسی بهره‌وری آب این محصول ضروری به‌نظر می‌رسد. طی تحقیقی Cai & Rosegrant (2003) روند تغییرات بهره‌وری آب را برای زراعت برنج و دیگر غلات طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۵ میلادی در مقیاس بین‌المللی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه ابتدا میزان عملکرد و آب مصرفی با مدل IMPACT-WATER که توسط مؤسسه تحقیقات بین‌المللی سیاست غذا[12] (IFPRI) ارائه شده است، محاسبه و سپس بهره‌وری آب تعیین شد. روند افزایش بهره‌وری آب برنج در کشورهای در حال توسعه بیش از کشورهای توسعه‌یافته بوده و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۵ میلادی مقدار آن در هر دو سری کشورها یکسان باشد ولی در مجموع، روند افزایش بهره‌وری آب برنج بسیار کند است و پیش‌بینی می‌شود مقدار فعلی ۰/٤٤ به حداکثر مقدار ۰/۵۲ کیلوگرم بر مترمکعب آب در سال ۲۰۲۵ میلادی برسد. Zwart & Bastiaanssen (2004) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که بهره‌وری آب کشاورزی محصول برنج بر اساس تبخیروتعرق واقعی ۱/۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. آن‌ها محدوده بهره‌وری آب کشاورزی را برای محصول برنج بین ۰/٦–۱/٦ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آوردند. Amiri (2006) مقدار بهره‌وری آب کشاورزی براساس میزان آبیاری را برای محصول برنج رقم هاشمی در استان گیلان مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که مقدار بهره‌وری آب کشاورزی محصول برنج (براساس آب آبیاری انجام شده) بین ۰/۲۹ الی ۰/۹۲ کیلوگرم بر مترمکعب قرار دارد. باید به این نکته اساسی توجه داشت که به دلیل چرخه هیدرولوژیک، آن قسمت از آب آبیاری که از طریق محصول کشاورزی طی فرآیند رشد در طول فصل رشد به تبخیروتعرق واقعی می‌رسد و یا از طریق کانال‌های انتقال آب تبخیر می‌شود، در واقع از سیستم منابع آب حوضه خارج می‌گردد و بقیه آب آبیاری برداشت شده از منبع آب به‌عنوان ذخیره خاک و یا نفوذ عمقی به آبخوان در حوضه باقی می‌ماند و نمی‌توان آن را جز مصرف واقعی آب به ازای تولید مقدار خاص محصول و در نتیجه کاهش بهره‌وری به‌حساب آورد و حقیقت این موضوع با دید حوضه‌ای آشکار می‌گردد. بر این اساس در پژوهش حاضر نیز به محاسبه بهره‌وری آب کشاورزی محصول برنج با توجه تبخیروتعرق واقعی آن در مقیاس حوضه‌ای بیش‌تر تاکید شده است که می‌توان گفت از نوآوری‌های مهم این مطالعه بوده و شبیه‌سازی حجم تبخیروتعرق واقعی و عملکرد

12- International Food Policy Research Institute

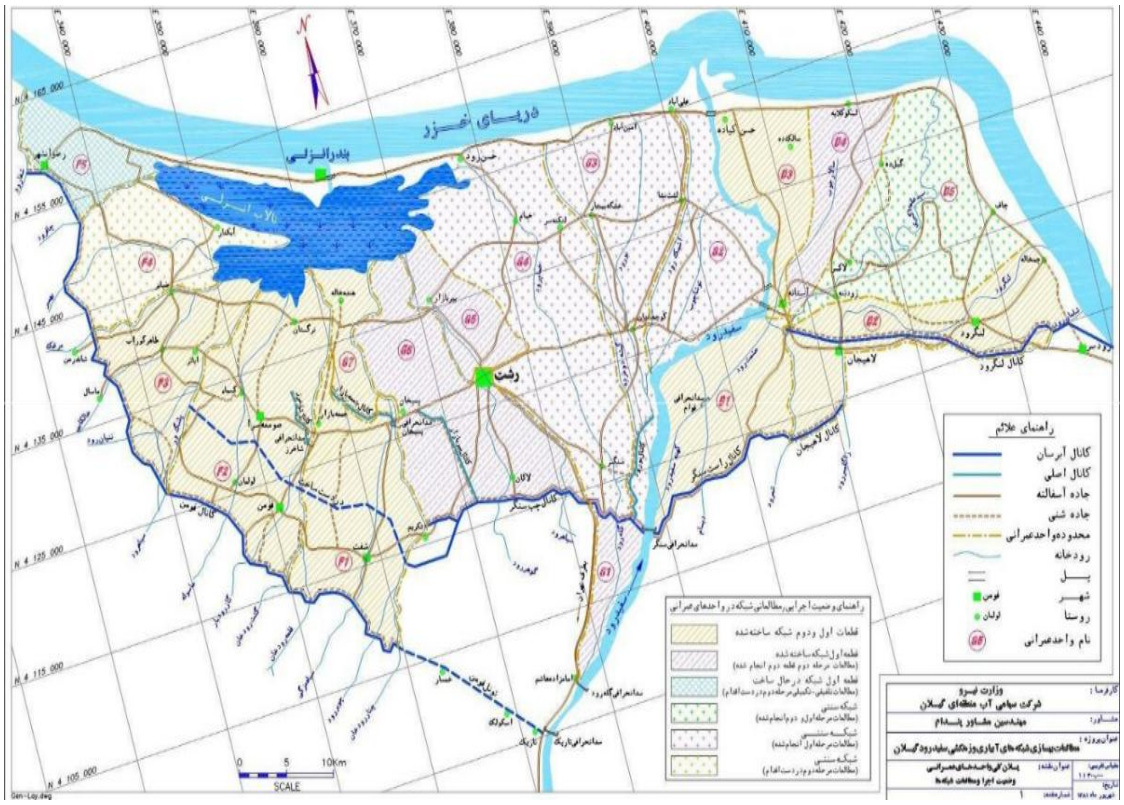
Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

محصول برنج و ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب براساس حجم تبخیروتعرق واقعی به همراه آب آبیاری و بارندگی موثر اهداف این تحقیق را رقم می‌زنند.

محدوده مورد مطالعه

استان گیلان محدوده ساحل غربی دریای خزر را شامل می‌شود که دارای آب‌وهوای معتدل با بارندگی (حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر در سال) بوده و اکثر بارش‌ها در نیمه دوم سال اتفاق می‌افتد که خارج از فصل کشت محصول اصلی استان یعنی برنج می‌باشد. رودخانه سفیدرود با آورد متوسط سالانه ٤٥٠٠ میلیون مترمکعب اصلی‌ترین منبع تامین آب اراضی می‌باشد و این مقدار روندی نزولی دارد.

با احداث سد مخزنی سفیدرود با گنجایش اولیه ۱۷٦۰ میلیون مترمکعب و اجرای شبکه‌های آبیاری و زهکشی سفیدرود موجود، ۱۸۹۸۳۳ هکتار ناخالص، تحت کشت برنج می‌باشد که در مقایسه با سطح زیرکشت برنج در مطالعات ساماندهی مشاور گید–سوگراه، ۲٦۵۰۰ هکتار افزایش یافته است. در شکل (۱) جانمایی واحدهای عمرانی در شبکه آبیاری و زهکشی گیلان با مساحت جغرافیایی ۲۸٤۱۸۰ هکتار در قالب ۱۷ واحد عمرانی شکل گرفته است.



شکل ۱: موقعیت واحدهای عمرانی در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود

Figure 1: Location of the study area in the Sefidrood irrigation and drainage network

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

مواد و روش‌ها

- ساختار مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی است که برای اجرای مدل و شبیه‌سازی، تعریف متغیرهای مورد نظر (متغیرهای هیدرولوژیک، عملکرد، بهره‌وری و غیره) بسیار اهمیت دارد و این کار با تعریف توپوگرافی حوضه (با استفاده از نقشه DEM) و معرفی نقشه‌های کاربری اراضی و خاک به مدل صورت می‌گیرد. بعد از تشکیل واحدهای هیدرولوژیک، در ادامه پارامترهای مربوط به هر کدام از اجزای اصلی مدل شامل پارامترهای گیاهی (Dat.)، خاکشناسی (Sol.)، آب زیرزمینی (Gw.)، مدیریتی (Mgt.)، رودخانه (Rte.) بر اساس آمار و داده‌های موجود به مدل معرفی می‌شوند. در ادامه به‌طور بسیار مختصر به نحوه شبیه‌سازی رواناب، تبخیروتعرق واقعی و عملکرد محصول در مدل SWAT اشاره می‌گردد.

- شبیه‌سازی جریان رودخانه

حجم رواناب سطحی ناشی از بارندگی یکی از متغیرهای اصلی جریان رودخانه است که مدل SWAT از روش شماره منحنی SCS برای شبیه‌سازی آن استفاده می‌کند. همچنین در این مدل از معادلات هوخهات[13] (1940) برای تعیین میزان مشارکت آب زیرزمینی و از روابط تجربی برای برآورد ذوب برف استفاده شده و مقدار کل رواناب خروجی از حوضه شبیه‌سازی می‌گردد (Neitsch et al., 2011: 173).

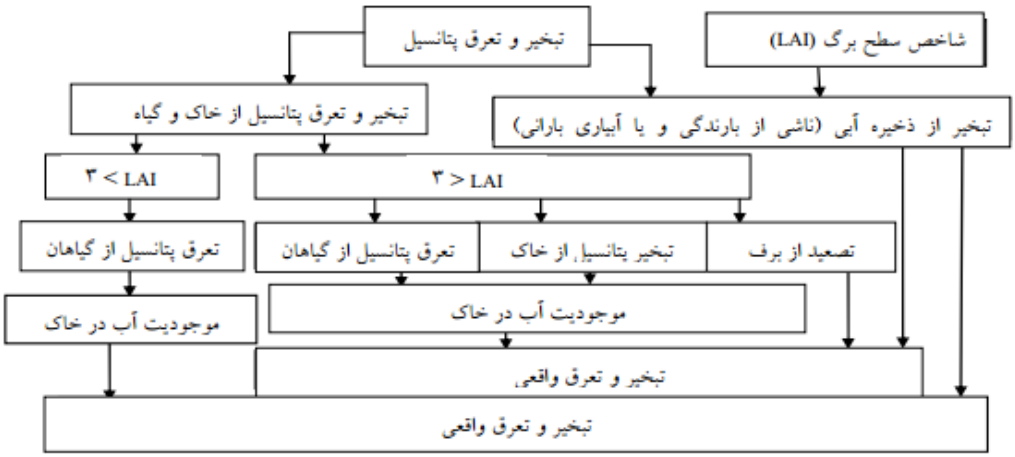
- شبیه‌سازی تبخیروتعرق واقعی در مدل

برای شبیه‌سازی تبخیروتعرق واقعی در مدل SWAT لازم است ابتدا مراحل مختلف رشد محصولات کشت شده در حوضه به‌خوبی معرفی شوند، به‌طوری که تغییرات زمانی شاخص سطح برگ (LAI[14]) شبیه‌سازی شده با واقعیت هم‌خوانی کافی داشته باشد. در این مدل قبل از برآورد تبخیر از خاک و تعرق از گیاه، میزان تبخیر از آب ذخیره شده در پوشش گیاهی منطقه بر اساس وضعیت شاخص فوق محاسبه می‌گردد. در صورتی که مقدار شاخص LAI بیش‌تر از ۳ باشد، کل میزان تبخیروتعرق پتانسیل از خاک و گیاهان با مقدار تعرق پتانسیل از گیاهان برابر می‌شود. در غیر این صورت، این مقدار با جمع سه جزء تصعید از برف، تبخیر پتانسیل از خاک و تعرق پتانسیل از گیاه برابر خواهد شد (Neitsch et al., 2011: 158). در حالت کلی شاخص LAI پتانسیل تابعی از مقدار گرمای رسیده به محصول طی دوره رشد آن می‌باشد. بنابراین برای شبیه‌سازی این شاخص برای یک محصول، ابتدا براساس تقویم زراعی و دمای پایه (حداقل دمای لازم برای رشد محصول) مقدار گرمای لازم برای رشد آن (PHU[15]) محاسبه می‌گردد. سپس با داشتن دو مقدار معلوم از این دو متغیر (شامل حداکثر شاخص سطح برگ محصول طی دوره رشد و مقدار PHU مربوط و مقدار شاخص LAI مربوط به ۹۵ درصد PHU دریافتی) مقدار آن برای دوره رشد محصول

13- Hooghoudt
14- Leaf Area Index
15- Potential Heat Unit

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

به‌صورت روزانه شبیه‌سازی می‌گردد. همانند عملکرد، تنش‌های چهارگانه دما، آب، نیتروژن و فسفر باعث کاهش مقدار پتانسیل آن در طول فرآیند رشد می‌گردند. در شکل (۲) ترتیب مراحل محاسباتی تبخیروتعرق واقعی به‌طور خلاصه نشان داده شده است (Neitsch et al., 2011: 31).



شکل ۲: ساختار و ترتیب مراحل محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در SWAT

Figure 2: Structure and arrangement of actual evapotranspiration computation process in SWAT

- شبیه‌سازی عملکرد گیاهی

بخش شبیه‌سازی رشد گیاه در مدل SWAT حالتی ساده شده از مدل رشد گیاهی EPIC[16] است که در آن رشد گیاهان بر اساس گرمای روزانه تجمعی دریافتی مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد (Easterling et al., 1992: 11). در EPIC پتانسیل مقدار ماده تولیدی بر اساس روش مونتیث[17] محاسبه گردیده و شاخص برداشت[18] نیز برای محاسبه محصول قابل عرضه به بازار استفاده می‌شود. در این مدل رشد گیاهی بر اساس کمبودهای دما، آب، نیتروژن و فسفر محدود می‌گردد. مدل SWAT در شبیه‌سازی عملکرد محصولات تاثیر طیف وسیعی از عوامل مانند متغیرهای هواشناسی (متوسط دمای روزانه، تابش خورشیدی[19])، گیاهی (شاخص سطح برگ)، مدیریت‌های کشاورزی (میزان کوددهی، تاریخ کاشت و برداشت) و مدیریت‌های آبی (میزان عمق آبیاری و دور آن) را در نظر می‌گیرد.

- پیاده کردن الگوی کشت و برنامه‌ریزی آبیاری حوضه در مدل SWAT

نکته‌ای که متناسب با اهداف تحقیق اهمیت بسیاری دارد، تعریف الگوی کشت، برنامه‌ریزی و مدیریت‌های مختلف آبیاری در مدل است. برای این منظور و همچنین برای این‌که شرایط شبیه‌سازی به شرایط واقعی نزدیک باشد، آن قسمت از کاربری اراضی که مربوط به کشاورزی آبی است، به اراضی کوچک‌تر تقسیم شدند. این کار موجب گردید

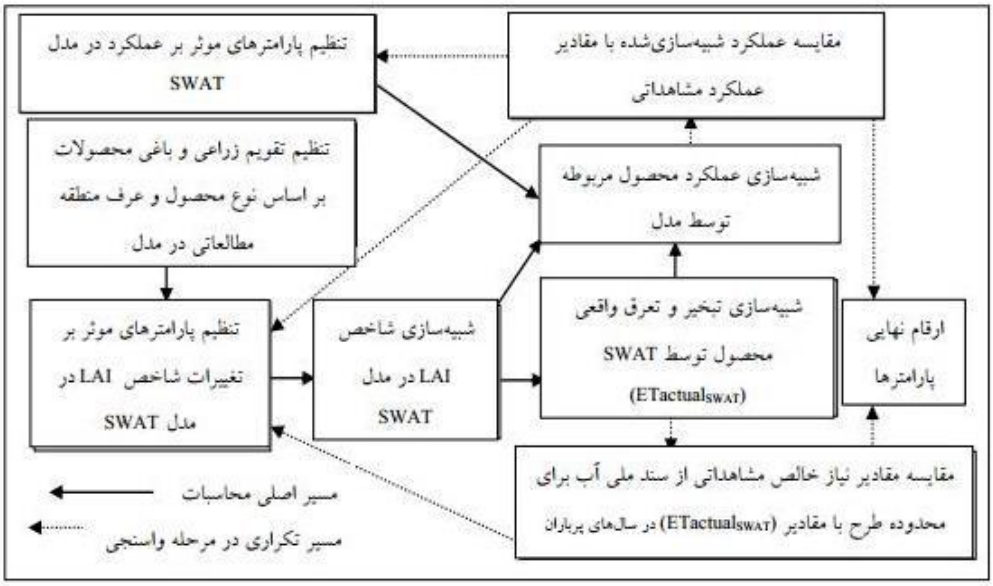
16- Erosion Productivity Impact Calculator
17- Monteith
18- Harvest Index
19- Solar Radiation

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

که اولا بتوان الگوی کشت موجود در حوضه را برای هر کدام از زیرحوضه‌ها اعمال کرد و ثانیا شرایط شبیه‌سازی را به شرایط طبیعی هیدرولوژیک حوضه (مقدار آب برداشتی روزانه از رودخانه‌ها، سد و...) نزدیک‌تر نمود. مقادیر عمق آب آبیاری نیز براساس سند ملی آب کشور و نرم‌افزار مربوط (AgWat) می‌باشد. لازم به ذکر است که متوسط راندمان آبیاری در حوضه سفیدرود ٤٠ درصد می‌باشد. همان‌گونه که قبلا تشریح شد، واحدهای هیدرولوژیک در مدل SWAT از تلفیق لایه‌های کاربری اراضی و خاک به‌دست می‌آید. البته در این فرآیند می‌توان هزینه‌های محاسباتی و اهداف تحقیق را مدنظر قرار داد و نسبت به تعیین تعداد واحدهای هیدرولوژیک تصمیم گرفت. با توجه به نیاز این تحقیق تلاش شد برای تعریف بهتر الگوی کشت در حوضه و اعمال مدیریت‌های مختلف، از تعداد نسبتا بالایی واحد هیدرولوژیک استفاده شود.

- نحوه واسنجی همزمان متغیرهای گیاهی، عملکرد و تبخیر و تعرق واقعی

از آنجا که این متغیرها به هم وابسته بوده لذا برای شبیه‌سازی و واسنجی آن‌ها باید به‌طور همزمان تغییرات آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار در تحقیق حاضر از ساختار ارائه شده در شکل (۳) استفاده گردید. مراحل موجود در این حلقه آن قدر تکرار گردیدند که مقادیر شبیه‌سازی شده تبخیروتعرق واقعی و عملکرد محصولات در سال‌های پرباران با مقادیر مشاهداتی آن‌ها همخوانی مطلوبی داشته باشد.



شکل ۳: مراحل شبیه‌سازی و واسنجی متغیرهای تبخیروتعرق واقعی و عملکرد محصولات

Figure 3: Phases of simulation and validation in actual evapotranspiration variables and crops yield

برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات و تبخیروتعرق واقعی در SWAT پارامترهای مختلفی موثر می‌باشند که در جدول (۱) مهم‌ترین آن‌ها معرفی شده است. از آن‌جا که متغیرهای گیاهی (به‌ویژه LAI) به‌طور مستقیم بر میزان تبخیروتعرق واقعی از محصولات تأثیر گذاشته و این متغیر خود نیز بر عملکرد گیاهان مؤثر است، بنابراین سعی

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

گردید که شبیه‌سازی و واسنجی این سه متغیر به‌طور همزمان و مطابق با آنچه در شکل (۳) نشان داده شده است، صورت پذیرد. در این شکل خطوط پررنگ نشان‌دهنده مسیر اصلی شبیه‌سازی عملکرد و تبخیروتعرق واقعی بوده و خطوط نقطه‌چین مراحل تکرار شده برای واسنجی این دو متغیر را نشان می‌دهند. بنابراین ترتیب مراحل طی شده برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات به‌صورت زیر می‌باشد: ۱) تنظیم تقویم زراعی محصولات باغی و زراعی در مدل، ۲) تنظیم پارامترهای مؤثر بر شاخص LAI و عملکرد گیاهی ۳) شبیه‌سازی شاخص LAI و تبخیروتعرق واقعی و ٤) شبیه‌سازی عملکرد محصولات.

جدول ۱- معرفی برخی پارامترهای موثر بر عملکرد و تبخیروتعرق واقعی در مدل SWAT

Table 1- Determination of some effective variables on yield and actual evapotranspiration in SWAT

پارامتر	توضیحات	واحد
BLAI	حداکثر شاخص سطح برگ پتانسیل در طول دوره رشد گیاه	مترمربع بر مترمربع (m^2/m^2)
HVSTI	شاخص برداشت	بدون بعد
DLAI	کسری از دوره رشد که در آن روند رو به کاهش شاخص سطح برگ شروع می‌شود	بدون بعد
FRGRW1	نسبتی از طول دوره رشد گیاه که مربوط به نقطه اول در منحنی رشد شاخص سطح برگ است.	بدون بعد
LAIMX1	شاخص سطح برگ متناظر با FRGRW1 در منحنی رشد شاخص سطح برگ	مترمربع بر مترمربع (m^2/m^2)
FRGRW2	نسبتی از طول دوره رشد گیاه که مربوط به نقطه دوم در منحنی رشد شاخص سطح برگ است.	بدون بعد
LAIMX2	شاخص سطح برگ متناظر با FRGRW2 در منحنی رشد شاخص سطح برگ	مترمربع بر مترمربع (m^2/m^2)
T_{base}	حداقل دمای لازم برای رشد گیاهان مختلف	درجه سانتی‌گراد (^0c)
Topt	دمای بهینه برای رشد گیاهان مختلف	درجه سانتی‌گراد (^0c)
EXT_COEF	ضریب جذب نور برای گیاهان مختلف	بدون بعد
BIO_E	راندمان استفاده گیاه از تابش خورشیدی	($kg.m^2$) /(ha.MJ)

- محاسبه بارندگی موثر

بارندگی موثر یکی از مولفه‌های اثرگذار در محاسبه بهره‌وری آب بوده و برای بارندگی‌های کم‌تر از ۲۵۰ میلی‌متر در ماه از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Farshi, 2003: 114).

$$P_{eff} = \left[\frac{125-(0.2\times PT)}{125}\right]\times PT$$ رابطه (۱)

در این رابطه‌ها P_{eff} بارندگی موثر (میلی‌متر) و PT بارندگی کل ماهانه (میلی‌متر) می‌باشد.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

قابل ذکر است که این متغیر برای بارندگی‌های بیش‌تر از ۲۵۰ میلی‌متر در ماه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{eff} = 125 + (0.1 \times PT)$$ رابطه (۲)

- بهره‌وری آب کشاورزی و شاخص‌های آن

به مقدار ارزش (معمولا ماده خشک، عملکرد قابل تجاری و یا واحد پول) محصولی که یک گیاه به ازای واحد مصرف آب (آب تبخیروتعرق شده و یا کل آب مصرف شده (جمع بارندگی و آبیاری)) تولید می‌کند، بهره‌وری آب گیاهی (CWP[۲۰]) اطلاق می‌گردد (Tuong & Bouman, 2003: 6). بهره‌وری آب یک شاخص موثر به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم مدیریت کشاورزی و منابع آب در مقیاس حوضه‌ای می‌باشد (Loeve et al., 2004: 9).

برای ارزیابی بهره‌وری آب برای یک محصول و یا الگوی کشت موجود در یک منطقه (معمولا در مقیاس حوضه‌ای) دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد. از معمول‌ترین آن‌ها، می‌توان به دیدگاه‌های بهره‌وری بر اساس عملکرد محصول به ازای واحد آب مصرفی (CPD[۲۱])، درآمد خالص اقتصادی به ازای واحد آب مصرفی (NBPD[۲۲]) و اشتغال اشاره کرد (Ehsani et al., 2003: 14). میزان بهره‌وری از آب بر اساس دیدگاه اول برای یک الگوی کشت از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$CPD = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i \times A_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i \times A_i}$$ رابطه (۳)

در این رابطه i شماره محصول، n تعداد محصولات کشت شده در الگوی کشت منطقه، Y_i عملکرد محصول iام در هر هکتار (کیلوگرم)، A_i مساحت محصول iام (هکتار) و V_i حجم آب مصرفی گیاه iام در هر هکتار (مترمکعب) می‌باشند. واحد شاخص CPD معمولا به‌صورت کیلوگرم بر مترمکعب بیان می‌شود. در این تحقیق با توجه به این‌که هر زیرحوضه به تعدادی بخش‌های همگن هیدرولوژیک (HRU) تقسیم شده است، بنابراین برای محاسبه این شاخص برای هر یک از زیرحوضه‌ها از رابطه (٤) استفاده گردید:

$$CPD = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} Y_{ij} \times A_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} V_{ij} \times A_{ij}}$$ رابطه (٤)

در این رابطه m_i تعداد HRU اختصاص یافته به محصول iام، j شمارنده HRU برای هر کدام از محصولات، Y_{ij} مقدار عملکرد محصول iام در هر هکتار از HRU با شماره j (کیلوگرم)، A_{ij} مساحت سطح زیرکشت محصول iام در HRU jام (هکتار) و V_{ij} حجم آب مصرف شده توسط گیاه iام در هر هکتار از HRU jام (مترمکعب) می‌باشند. لازم

20- Crop Water Productivity
21- Crop Per Drop
22- Net Benefit Per Drop

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

به ذکر است که V_{ij} می‌تواند بر اساس مجموع آب آبیاری و بارندگی موثر (CPD_{IP}) و یا بر اساس حجم تبخیروتعرق واقعی (CPD_{ET}) بیان گردد. باید به این نکته توجه داشت که بالا بودن مقدار این شاخص برای یک محصول در یک منطقه لزوما به معنای سود اقتصادی بیش‌تر نیست (Seckler et al., 2003: 10).

- مشخصات زیرحوضه‌ها

زیرحوضه ۱ از کوه‌های گیاه‌ور، تماشاکوه و جیردشتان شروع شده و به چابکسر منتهی می‌شود، زیرحوضه ۲ از بلندی‌های جیردشتان آبگیری نموده و به اوشیان ختم می‌گردد. زیرحوضه ۳ همجوار با زیرحوضه ۲ بوده و همانند آن از کوه‌های جیردشتان آبگیری نموده و به قاسم‌آباد سفلی ختم می‌شود. زیرحوضه ٤ از کوه‌های جواهردشت آبگیری نموده و به سیاهکل‌رود و رضامحله منتهی می‌شود. زیرحوضه ۵ منطقه نسبتا وسیعی را از منطقه مورد مطالعه در بر می‌گیرد؛ این حوضه از کوه‌های سپرده، نیاسان، لاسبو، سورتاله، گردکول و علیوای شروع شده و نهایتا به رحیم‌آباد ختم می‌شود. زیرحوضه ٦ از کوه‌های سنگ‌بن آغاز شده و به املش ختم می‌شود. زیرحوضه ۷ از کوه‌های اسپیلی آغاز شده و در سیاهکل به دشت کشاورزی می‌رسد. زیرحوضه ۸ از کوه‌های نزدیک آروشکی شروع شده و در محل شهربیجار خاتمه می‌یابد. زیرحوضه ۹ که بزرگ‌ترین زیرحوضه منطقه مورد مطالعه می‌باشد از کوه‌های الوند آغاز می‌گردد و در این حوضه از محل دیزکوه دشت کشاورزی شروع می‌گردد. زیرحوضه ۱۰ از کوه‌های امام-زاده ابراهیم آغاز می‌شود. لازم بذکر است که دشت کشاورزی این زیر حوضه از شفت شروع می‌گردد. زیرحوضه ۱۱ از کوه‌های اندرق آغاز می‌گردد. دشت کشاورزی این زیرحوضه از خانوانه شروع می‌شود.

یافته‌ها و بحث

- شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه

قبل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، ابتدا با انجام تحلیل حساسیت (با استفاده از نرم‌افزار SWAT CUP) پارامترهایی که تاثیر بیش‌تری بر دبی خروجی از حوضه داشتند، مشخص شدند. نتایج این تحلیل در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول درجه تاثیر بعضی از پارامترهای مهم دخیل در شبیه‌سازی دبی خروجی از زیرحوضه‌ها با رتبه و همچنین مقدار p-value و t-stat آن‌ها مشخص شده است. هر پارامتری که مقدار قدرمطلق t-stat بیش‌تری داشته و همچنین مقدار p-value آن نزدیک به صفر باشد، تاثیر بیش‌تری بر روی دبی داشته است. برای شبیه‌سازی رواناب در سطح حوضه، در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار SWAT CUP واسنجی و اعتبارسنجی صورت گرفت و مقادیر پارامترهای موثر در رواناب استخراج شدند که نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است. مدل با توجه به آمار ماهانه چهار ایستگاه هیدرومتری واسنجی و اعتبارسنجی شد. به منظور ارزیابی مدل از دو شاخص ضریب تبیین R^2 و ضریب نش–ساتکلیف (NS) استفاده گردید. نتایج این بخش در جدول (۳) ارائه شده است.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

جدول ۲- محدوده نهایی پارامترها بعد از واسنجی مدل SWAT

Table 2- Final range of parameters after SWAT validation

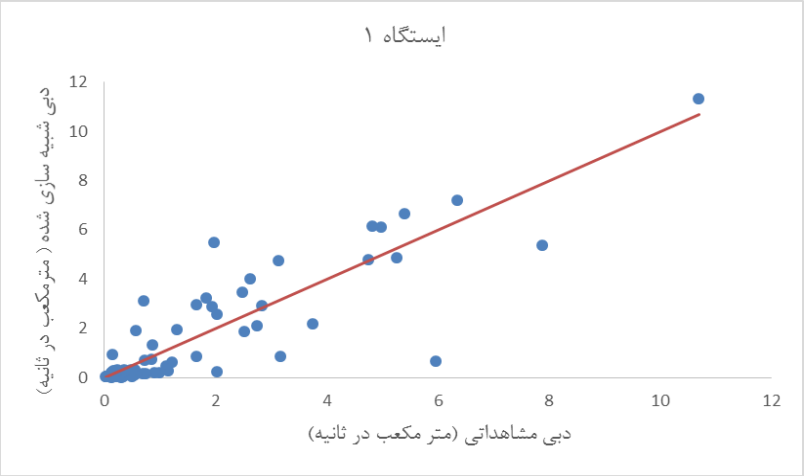
نام پارامتر	توضیحات	واحد	محدوده نهایی پارامترها
CN2	شماره منحنی نفوذ خاک	بدون بعد	۸۵-۴۳
SOL-K(1)	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه اول خاک	میلیمتر در ساعت	۲۵/۲-۱/۴
SOL-AWC(1)	ظرفیت آب قابل نگهداری در لایه اول خاک	میلیمتر در متر	۰/۲۶-۰/۱۱
SMFMN	فاکتور ذوب برف برای روز۲۱ ماه سپتامبر	میلی‌متر بر درجه در روز	۲/۵
CH-N2	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	بدون بعد	۰/۰۱۴-۰/۰۱۱
CH-N2	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	بدون بعد	۰/۰۱۵-۰/۰۱۱
GW-DELAY	زمان تأخیر نفوذ آب به سطح ایستابی	روز	۲۲-۷

جدول ۳- ارزیابی مدل با شاخص‌های ضریب تبیین R^2، ضریب نش-ساتکلیف (NS)

Table 3- Evaluation of the model by R2 and NS

شماره ایستگاه	واسنجی			اعتبار سنجی		
	دوره آماری	R^2	NS	دوره آماری	R^2	NS
۱	۲۰۰۷-۱۹۸۷	۰/۶۶	۰/۵۳	۲۰۱۵-۲۰۰۷	۰/۷۲	۰/۶۳
۲	۲۰۰۷-۱۹۸۷	۰/۷۳	۰/۵۸	۲۰۱۵-۲۰۰۷	۰/۷۰	۰/۶۶
۳	۲۰۰۷-۱۹۸۷	۰/۶۱	۰/۴۵	۲۰۱۵-۲۰۰۷	۰/۵۱	۰/۶۹
۴						

در شکل‌های (۴ الی ۷) پراکنش دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره صحت‌سنجی در ۴ ایستگاه ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این شکل‌ها خط رسم شده همان خط y=x می‌باشد.

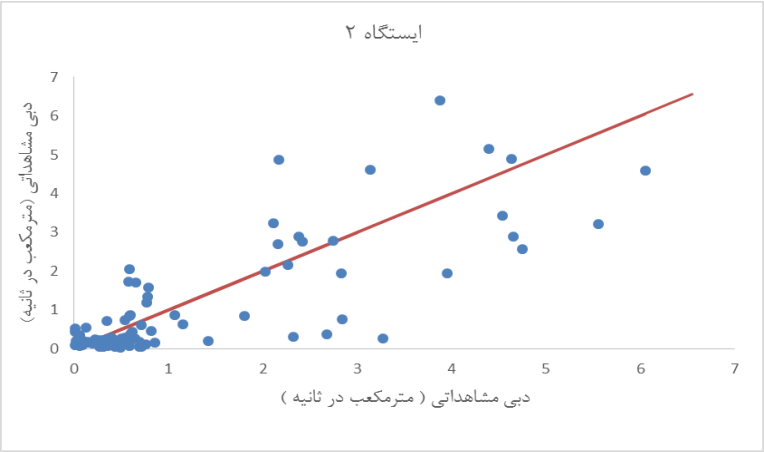


شکل۴: دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره صحت‌سنجی در ایستگاه یک

Figure 4: Observed and simulated flow in validation period in Station

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

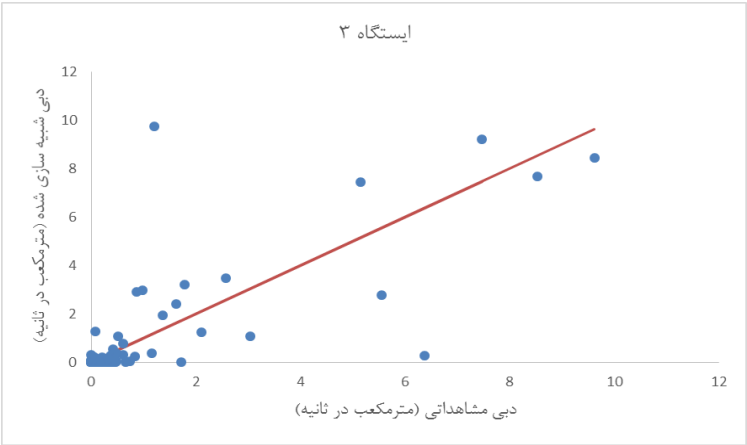
مطابق با شکل (٤) مدل در اکثر مواقع دبی‌های متوسط و زیاد در ایستگاه ۱ را بطور نااریب تخمین زده است در حالی که تخمین‌های دبی برای مقادیر کم‌تر از ۱ و بیش‌تر از ۰/۵ مترمکعب در ثانیه نسبت به مقادیر جریان واقعی پایین می‌باشد.



شکل ۵: دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره صحت‌سنجی در ایستگاه دو

Figure 5: Observed and simulated flow in validation period in Station 2

همان‌طور که در شکل (۵) نیز نشان داده شده است در ایستگاه آب‌سنجی شماره ۲ برای جریانات بیش‌تر از ۰/۷ مترمکعب در ثانیه برآوردهای دبی توسط مدل دارای اریب کم‌تر بوده است. برای جریانات بین ۰/٤ و ۰/۷ مدل برآوردهای پایینی از جریان داشته است.

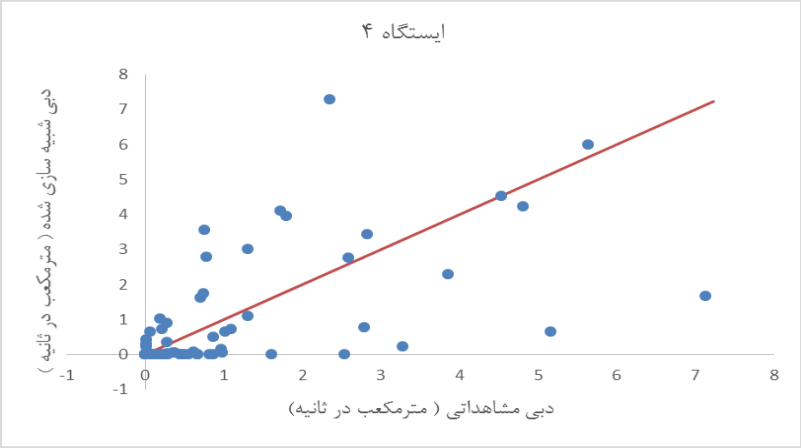


شکل ٦: دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره صحت‌سنجی در ایستگاه سه

Figure 6: Observed and simulated flow in validation period in Station 3

مطابق با شکل (٦) می‌توان گفت که مدل در ایستگاه ۳ در بیش‌تر محدوده‌های جریان (به غیر از ۰/۲ الی ۰/۵ مترمکعب در ثانیه) برآوردهای نااریب از جریان دارد که نشان از عملکرد خوب مدل با توجه به شرایط و پیچیدگی‌های مساله دارد.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025



شکل۷: دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره صحت‌سنجی در ایستگاه چهار

Figure 7: Observed and simulated flow in validation period in Station 4

همان‌طور که در شکل (۷) آورده شده است مدل توانسته است در ایستگاه ٤ در جریانات متوسط و کم (کم‌تر از ٤ مترمکعب در ثانیه) تخمین‌های نارایب از جریان داشته باشد. در جریان‌های بیش‌تر از ٤ مترمکعب در ثانیه در تعداد معدودی از مواقع تخمین‌ها از میزان جریانات واقعی کم‌تر است. لازم بذکر است که این برآوردهای اریب معدود در اکثر مدل‌سازی هیدرولوژیک با توجه به پیچیدگی‌های مساله و عوامل ناشناخته موثر بر جریان امری طبیعی است.

- شبیه‌سازی شاخص سطح برگ (LAI) و تبخیروتعرق واقعی (ETa)

همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز به آن اشاره شد، شاخص LAI یکی از متغیرهای کنترل‌کننده مقدار تبخیر و تعرق واقعی از گیاه به‌ویژه در اراضی کشاورزی آبی بوده و در واقع به شکلی هم‌عرض ضریب گیاهی (K_c) در محاسبه تبخیر و تعرق عمل می‌کند. Lui & Kang (2007) نشان دادند که تا مرحله به بلوغ رسیدن گیاه Kc و LAI به صورت خطی نسبت به هم افزایش یافته و در مرحله بلوغ و بعد از آن مقدار Kc به همراه LAI کاهش می‌یابد. همچنین در مراجع مختلف (Kang et al, 2003, De Medeiros et al, 2001, Williams & Ayars, 2005) به روابط بالای بین این دو متغیر اشاره شده است. به علت نبود داده‌های مشاهداتی شاخص LAI در حوضه، از داده‌های موجود ضریب گیاهی (Kc) برای محصولات مختلف حوضه برای کنترل مقادیر شبیه‌سازی شده این شاخص توسط مدل استفاده گردید. لازم به ذکر است که در این تحقیق داده‌های ضریب گیاهی (Kc) برای محصولات مختلف حوضه با توجه به مقادیر گزارش شده در نرم‌افزار سند ملی آب (NDW) (Vazifeh doost et al, 2007) به‌دست آمدند.

- ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب کشاورزی

پس از شبیه‌سازی متغیرهای دخیل در ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب (تبخیر و تعرق واقعی و عملکرد گیاهی) برای برنج مقادیر هر دو شاخص CPD_{IP}، CPD_{ET} محاسبه گردید که نتایج ارزیابی‌ها در جدول (٤) ارائه شده است

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

و متوسط مقادیر شاخص‌های CPD_{IP} و CPD_{ET} در دوره شبیه‌سازی برای الگوی کشت هر کدام از زیرحوضه‌ها ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست آمده شاخص CPD_{ET}، نسبت به CPD_{IP} به‌مراتب مقادیر بیش‌تری دارند. دلیل این موضوع استفاده شاخص CPD_{ET} از تبخیروتعرق واقعی به‌عنوان حجم آب مصرفی است. به عبارت دیگر به علت آن‌که در محاسبه این شاخص‌ها، حجمی از مجموع آب آبیاری و بارندگی موثر که به طور واقعی به مصرف گیاه رسیده و همچنین از طریق تلفات تبخیر به هنگام آبیاری از سیستم حوضه خارج شده است، در نظر گرفته می‌شود؛ لذا مقادیر آن‌ها یک ارزیابی واقعی از بهره‌وری آب به‌ویژه در مقیاس حوضه‌ای نتیجه می‌دهد.

جدول ٤- متوسط مقادیر شاخص‌های CPD_{IP} و CPD_{ET} در کل دوره شبیه‌سازی برای هر کدام از زیرحوضه‌ها

Table 4- Average CPD_{IP} and CPD_{ET} in the whole of simulation period for each of sub_basin

زیرحوضه‌ها	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١
CPD_{IP} (kg/m^3)	٠/٣٩	٠/٤١	٠/٤٦	٠/٤٦	٠/٤٥	٠/٤٠	٠/٣٧	٠/٣٥	٠/٣٣	٠/٣٦	٠/٣٧
CPD_{ET} (kg/m^3)	٠/٩٧	١/٠١	١/٠٠	١/٠٤	١/٠٠	٠/٩٧	١/٠٢	٠/٩٧	٠/٩٣	١/٠٣	٠/٩٩

در جدول (٥) ارزیابی عملکرد مدل تحقیق حاضر با تحقیقات انجام شده در سایر نقاط جهان مقایسه شده است. همانطور که در این جدول اشاره شده است در کشور چین بهره‌وری آب کشاورزی بر اساس میزان آب آبیاری و بارندگی موثر بین ٠/٥ الی ١/٣ می‌باشد که بیش از مقادیر به‌دست آمده در تحقیق حاضر جدول (٤) است که دلیل این امر کشت ارقام پرمحصول با تولید زیاد می باشد. همچنین با توجه به جدول (٥) مقادیر بهره‌وری آب کشاورزی محصول برنج براساس تبخیروتعرق واقعی با توجه به تحقیقات بین‌المللی در کشورهای مختلف، خصوصا کشورهای مجاور مطابقت دارد. طبق بررسی‌های انجام شده Arabi yazdi et al (2009) در ایران بهره‌وری آب کشاورزی براساس تبخیروتعرق ٠/٩٥ ذکر شده است که با متوسط مقدار به‌دست آمده در تحقیق مطابقت دارد. اختلاف بهره‌وری آب برنج در مناطق مختلف دنیا به دلایلی همچون اقلیم، سطح مکانیزاسیون، سامانه آبیاری و نوع رقم بستگی دارد.

جدول ٥- مقادیر برآورد شده بهره‌وری آب محصول برنج توسط تحقیقات بین‌المللی

Table 5- Measured water productivity for rice in international research

کشور	بهره‌وری (کیلوگرم بر مترمکعب)	شاخص بهره‌وری	مرجع
چین	٠/٥-١/٣	Y/IP	Tuong (1999)
	١/٤١	Y/ET	Dong et al (2001)
هند	٠/٨٤	Y/I	Singh et al (2006)
	٠/٨٩	Y/ET	Mishra et al (1990)
	٠/٤٦	Y/ET	Sastri et al (1985)
	٠/٦٧	Y/ET	Singh et al (2002)
	١/١٥	Y/ET	Singh et al (2001)
آمریکا	١/٤	Y/ET	Roel et al (1999)

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

جدول ۵- مقادیر برآورد شده بهره‌وری آب محصول برنج توسط تحقیقات بین‌المللی

Table 5- Measured water productivity for rice in international research

کشور	بهره‌وری (کیلوگرم بر مترمکعب)	شاخص بهره‌وری	مرجع
پاکستان	۰/٤٥	Y/I	Water Watch (2003)
مصر	۰/٥٥	Y/I	FAO (2003)
ایران	۰/۹٦۹	Y/I	Arabi yazdi et al (2009)
	۰/۳۲	Y/I	FAO (2003)
میانگین جهانی	۰/۱٥-۱/٦	Y/I	Molden et al (2007)

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل SWAT به ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی براساس حجم آب آبیاری و تبخیروتعرق واقعی در حوضه آبریز سفیدرود پرداخته شد. برای این منظور در ابتدا مدل SWAT برای حوضه مذکور تنظیم گردیده و با استفاده از ایستگاه‌های آب‌سنجی، واسنجی و صحت‌سنجی گردید. سپس میزان تبخیروتعرق واقعی شبیه‌سازی گردیده و نهایتا شاخص‌های بهره‌وری آب محاسبه گردید. براساس شبیه‌سازی‌های تحقیق حاضر، مقادیر متوسط شاخص‌های CPD_{IP} و CPD_{ET} برای کل دوره مورد مطالعه در حوضه سفیدرود به‌ترتیب ۰/٤۰ و ۰/۹۹ (کیلوگرم بر مترمکعب) به‌دست آمد. لذا مقادیر شاخص‌های بهره‌وری براساس تبخیروتعرق واقعی تقریبا ۲/۵ برابر مقادیر شاخص‌ها برمبنای حجم آب آبیاری و بارندگی موثر می‌باشند. براساس نتایج این تحقیق در حالت کلی شاخص CPD_{ET} به علت در نظرگرفتن استفاده چندین‌باره از تلفات نفوذ عمقی و سطحی آب آبیاری در بخش‌های مختلف حوضه معیارهای مناسبی نسبت به شاخص CPD_{IP} و برای ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی در یک حوضه می‌باشند.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

References

- Ahmadzadeh, H., (2012), "Agricultural water productivity with SWAT model; Case study, Zarrinehroud basin", Master's degree in the water management engineering, agricultural faculty, Tarbiat Modares University. [In Persian].
- Ahmadzadeh, H., Morid, S., Delavar, M., Srinivasan, R., (2016), "Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment", ***Agricultural water management***, 175 (c): 15-28.
- Amiri, E., (2006), "Assessment of water balance and rice yield in irrigation management in paddy field with model", Master's degree in the water engineering, agricultural faculty, Islamic Azad University. [In Persian].
- Arabi Yazdi, A., Aminzadeh, A., Mohamadian, F., (2009), "Assessment of ecological water footprint in the agricultural sector of Iran", ***Water and soil (agricultural sciences and industries)***, 23 (4): 1-15. [In Persian].
- Ashraf Vaghefi, S., Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Srinivasan, R., Arnold, J. G., (2017), "Modeling crop water productivity using a coupled SWAT–MODSIM model", ***Water***, 9 (3): 1-15.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., (1998), "Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements", ***FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome***, pp 1-15.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R., (1998), "Large area hydrologic modeling and assessment, Part I. Model development", ***Journal of the American Water Resources Association***, 34 (1): 73-89.
- Bhuvaneswari, K., Geethalakshmi, V., Lakshmanan, A., Srinivasan, R., Nagothu Udaya Sekhar., (2013) "The Impact of El Niño/Southern Oscillation on Hydrology and Rice Productivity in the Cauvery Basin, India: Application of the Soil and Water Assessment Tool", ***Weather and Climate Extreme***, 2 (1): 39-47.
- Bouman, B. A. M., Toung, TP., (2001) "Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice", ***Agricultural Water Management***, 49 (1): 11-30
- Cai, X., McKinney, D. C., Rosegrant, M. W., (2003), "Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region" ***Agricultural Systems***, 76 (3): 1043-1066.
- De Medeiros, G. A., Arruda, F. B., Sakai, E., Fujiwars, M., (2001), "The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (Phaseolus vulgaris L.)", ***Agricultural Water Management***, 49 (3): 211-224.
- Dong, B., Loeve, R., Li, Y. H., Chen, C. D., Deng, L., Molden, D., (2001), "Water productivity in Zhanghe Irrigation System: issues of scale", ***Water Management Institute***, pp 97-115.
- Easterling, W. E., Rosenburg, N. J., Mckenney, M. S., Jones, C. A., Dyke, P. T., Williams, J. R., (1992), "Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO_2", ***Agricultural and forest Meteorology***, 59 (1): 17-34.
- FAO., (2003), "Rice Irrigation in the Near East: Current Situation and Prospects for Improvement", FAO Regional Office for the Near East, Cairo, Egypt, pp 1-36.
- Faramarzi, M., Yang, H., Schulin, R., Abbaspour, K. C., (2010), "Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production", ***Agricultural Water Management***, 97 (11): 1861-1875.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

- Farshi, A., (2003), "Irrigation water requirements in farm", ***Iranian National Committee on Irrigation and Drainage***, Tehran, pp 1-200. [In Persian].
- Ehsani, M., Khaledi, H., (2003), "Agricultural water productivity", ***Iranian National Committee on Irrigation and Drainage Conference***, Tehran, 657-674. [In Persian].
- Huang, F., Li, B., (2010), "Assessing grain crop water productivity of China using a hydro-model-coupled-statistics approach: Part I: Method development and validation", ***Agricultural Water Management***, 97 (7): 1077-1092.
- Immerzeel, W., Gaur, A., Zwart, S., (2008), "Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment", ***Agricultural water management***, 95 (1): 11-24.
- Jeimar, P.P., Marcela, Q., Natalia, E., (2011), "Application of crop growth modeling for the economic valuation of water in agriculture", The 3rd international forum on water and food Tshwane, South Africa, November 14-17.
- Kang, S., Gu, B., Du, T., Zhang, J., (2003), "Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region", ***Agricultural water management***, 59 (1): 239-254.
- Kaushal, K., Luna, B., Anju, G., Biju, G., Sreedhar, A., Kiran, J., Narasimhan, B., (2011), "Spatial mapping of agricultural water productivity using SWAT model in Upper Bhima Catchment, India", ***Irrigation and Drainage***, 61 (1): 60-79.
- Liu, HJ, Kang, Y., (2006), "Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the north China Plain", ***Agricultural water management***, 84 (1): 3-19.
- Liu, HJ., Kang, Y., (2007), "Sprinkler irrigation scheduling of winter wheat in the North China Plain using a 20 cm standard pan", ***Irrigation Science***, 25 (2): 149-159.
- Mishra, H. S., Rathore, T. R., Pant., R. C., (1990), "Effect of intermittent irrigation on groundwater table contribution, irrigation requirementand yield of rice in Mollisols of the Tarai Region" ***Agricultural water management***, 18 (3): 231-241.
- Molden, D., Sakthivadivel, R., (1999), "Water accounting to assess use and productivity of water", ***International Journal of Water Resources Development***, 15(1): 55-71.
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Kijne, J., (2007), "Pathways for increasing agricultural water productivity" ***International Water Management Institute***, pp 278-310
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., (2011), "Soil and water assessment tool theoretical document (version 2009)", ***Texas water resource institute technical report***, pp 1-647.
- Niu, J., Liu, Q., Kang, S. and Zhang, X., (2018), "The response of crop water productivity to climatic variation in the upper-middle reaches of the Heihe River basin, Northwest China", ***Journal of Hydrology***, 563 (1): 909-926.
- Palanisami, K., Senthilvel, S., Ramesh, T., (2009), "Water productivity at different scales under canal, tank and well irrigation systems", ***International Water Management Institute***, pp 217-226.
- Loeve, R., Dong, B., Molden, D., Li, Y. H., Chen, C. D., Wang, J. Z., (2004), "Issues of scale in water productivity in the Zhanghe irrigation system: implications for irrigation in the basin context", ***Paddy and Water Environment***, 2 (1): 227-236.
- Roel, A., Heilman, J. H., McCauley, G. N., (1999), "Water use and plant response in two rice irrigation methods", ***Agricultural water management***, 39 (1): 35-46.
- Roshani, M., Saligheh, M., Alijani, B., Beygum Hejazi Zade, Z., (2020), "Best Probability Model and Generalized Linear Mixed Model of wet and Dry Spells of the Southern Coast of the Caspian Sea", ***Geographical Space***, 20 (69): 17-37. [In Persian].

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 13:52 IRST on Tuesday December 2nd 2025

- Roshun, S. H., Habibnejadroshan, M., Shahedi, K., (2019), "Investigation of the trend of groundwater level changes and drought indicators GRI and SWI in Sari-Neka plain", ***Geographical Space***, 19 (67): 131-146. [In Persian].
- Seckler, D., Molden, D., Sakthivadivel, R., (2003), "The concept of efficiency in waterresources management and policy", ***International Water Management Institute***, pp 37-51.
- Sastri, A. S., Chandrakar, B. L., Chandrawanshi, B. R., (1985), "Evapotranspiration and water use of rice in central India", ***International rice resource, Newsletter***, 10 (1): 30-31.
- Singh, A. K., Choudhury, B. U., Bouman, B. A. M., (2002), "Effects of rice establishments methods on crop performance, water use and mineral nitrogen", ***International Rice Research Institute***, pp 237-246.
- Singh, K. B., Gajri, P. R., Arora, V. K., (2001), "Modelling the effects of soil and water management practices on the water balance and performance of rice", ***Agricultural water management***. 49 (2): 77-95.
- Singh, R., Van Dam, J. C., Feddes, R. A., (2006), "Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa District, India", ***Agricultural water management***, 82 (3): 253-278.
- Statistics Center of Iran (2016), "Detailed results of the population and housing census in the cities of Gilan province", Tehran: Statistics Center of Iran. [In Persian].
- Tuong, T. P., (1999), "Productive water use in rice production: opportunities and limitations", ***Journal of Crop Production***, 2 (2): 241-264.
- Tuong, T., Bouman, B., (2003), "Rice production in water-scarce environments. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement", ***Wallingford (UK): CABI Publishing***, pp 53-67.
- Vazifeh doost, M., Kamali, G., Dehghani, M., Hamzenoori, A., Alizadeh, A., Keshavarz, A., Mohamadian, A., (2007), "Crop water requirement in Iran", ***Iman Reza University***, Mashhad, pp 228. [In Persian].
- Williams, L., Ayars, J., (2005), "Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy", ***Agricultural and forest meteorology***, 132 (3): 201-211.
- Xu, Z., Chen, X., Wu, S. R., Gong, M., Du, Y., Wang, J., Li, Y., Liu, J., (2019), "Spatial-temporal assessment of water footprint, water scarcity and crop water productivity in a major crop production region", ***Journal of Cleaner Production***, 224 (1): 375-383.
- Zaman, M. R., Morid, S., Delavar, M., (2016), "Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the Siminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework", ***Agricultural Systems***, 147 (1): 98-110.
- Zwart, S. J., Bastiaanssen, G. M., (2004), "Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize", ***Agricultural water management***, 69 (2): 115-133.