نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

سال هفدهم- شماره ٦١- تابستان ١٤٠٢

Vol. 17, No. 61, Summer 2023

شبیه سازی و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق حوزه دربند سملقان با استفاده از مدل SWAT و روش زمین آمار

احسان زاهدی[1] علی طالبی[2]، کامران داوری[3] و وحید موسوی[4]

تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۰۵/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

چکیده

تبخیر و تعرق (ET) یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه‌ی هیدرولوژیک و یک عامل مهم در تعیین نیاز آب می‌باشد که توزیع مکانی و برآورد دقیق آن برای بسیاری از مطالعات نظیر بیلان آب، شبیه‌سازی تولید گیاهی، برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب اهمیت بسیاری دارد. هم‌چنین استفاده از روش زمین آمار یکی از راه‌های تخمین تبخیر و تعرق در نقاط فاقد ایستگاه می‌باشد. در این تحقیق برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق حوزه آبخیز دربند سملقان از مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده شد. فرآیند واسنجی برای بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۱ و فرآیند اعتبارسنجی در بازه زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵ انجام شد. برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی از شاخص‌های R^2 (ضریب تبیین)، bR^2 (ضریب همبستگی وزنی)، NS (نش- ساتکلیف) استفاده گردید. در مرحله واسنجی ضرایب R^2، bR^2 و NS به ترتیب برابر ۰/۷۴، ۰/۷۱و ۰/۶۸ و در مرحله اعتبارسنجی برابر ۰/۶۹، ۰/۶۲ و ۰/۵۹ حاصل گردید. بعد از انجام آنالیز حساسیت، ١٤ پارامتر موثر بر بیلان آبی حوزه مشخص گردید که شماره منحنی (CN2) به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر شناخته شد. در ادامه با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز مکانی داده‌ها در این تحقیق مدل نمایی (Exponantial) با توجه به مقدار RMSe کم‌تر و همبستگی بیش‌تر به‌عنوان مناسب‌ترین مدل جهت پهنه‌بندی انتخاب گردید.

کلیدواژه‌ها: *تبخیر و تعرق پتانسیل، مدل SWAT، زمین آمار، مدل نمایی،حوزه آبخیز دربند*

مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه ی هیدرولوژیک و یک عامل مهم در تعیین نیاز آبی می‌باشد که توزیع مکانی و برآورد دقیق آن برای بسیاری از مطالعات نظیر بیلان آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، شبیه‌سازی تولید گیاهی، برنامه ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب اهمیت بسیاری دارد که به دلیل تغییرات مکانی آن باید از روش‌های درون یابی برای تخمین آن در سطح منطقه ای بهره گرفت. استفاده از روش‌های درون یابی یکی از راه‌های تخمین تبخیر و تعرق در نقاط فاقد ایستگاه می‌باشد. هدف این پژوهش شبیه سازی تبخیر و تعرق پتانسیل حوزه آبخیز دربند سملقان با استفاده از شبیه‌ساز بیلان آبی (مدل SWAT) و سپس پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با استفاده از زمین آمار می‌باشد.

SWAT یا مدل ارزیابی آب و خاک یک مدل جامع در مقیاس آبخیز می‌باشد که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده آمریکا تهیه شده است. این مدل برای شبیه‌سازی حرکت آب، رسوب و آلاینده‌های شیمیایی کشاورزی در سطح حوزه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی طراحی شده است [۱۳]، [۱۱].

درمطالعات زیادی از مدل SWAT جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بهره گرفته شده است. برعکس کاربرد مدل SWAT در شبیه‌سازی متغیرهای هیدرولوژیکی، تاکنون تحقیقات معدودی برای شبیه‌سازی عملکرد و تبخیر و تعرق واقعی و دیگر مؤلفه‌ها توسط آن صورت گرفته است. از معدود مطالعات در این خصوص تحقیقات ایمرزیل و همکاران[٤] ، در حوزه رودخانه آپربیما از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و تبخیر و تعرق واقعی از محصولات نیشکر، سورگو م و ارزن جهت ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی و همچنین برای مشخص کردن اجزای معادله‌ی بیلان آب استفاده کردند. به همین ترتیب جیمر و همکاران [٥] ، تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل و همچنین بهره‌وری آب گیاهی بر ای گیاه ذرت بر اساس سناریوهای مختلف مدیریتی را شبیه‌سازی کردند. با توجه به آنچه آمد، سوابقی از ارزیابی این مدل در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و عملکرد گیاهی ارائه گردید. لازم به ذکر است که بیشتر تحقیقات فوق عملکرد مناسب مدل SWAT را در مطالعات خود تأیید کرده‌اند. کانان و همکاران [٨]، مدل SWAT را در یک حوزه آبخیز کوچک در کشور انگلستان به کار بردند. آن‌ها دریافتند که در مدل‌سازی هیدرولوژیکی برای رسیدن به نتایج قابل قبول و منطقی شناخت روش درست ادغام

١- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشگاه یزد
٢-نویسنده مسئول و استاد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد، پست الکترونیک talebisf48@gmail.com
٣- استاد، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی، مشهد
٤- استادیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، نور

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]

تبخیر و تعرق و روش‌های محاسبه تولید رواناب بسیار تعیین کننده است. آوسی و همکاران [۱]، در ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از مدل SWAT در کشور تونس سه روش "پنمن مانتیث"، "هاروگریوز" و "پرینستلی تیلور" را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که روش پنمن مانتیث تبخیر و تعرق پتانسیل را به خوبی پیش بینی می‌کند.

مورتی و همکاران [۱۲]، در مطالعه‌ای به کاربرد مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی SWAT برای پیش بینی تعادل آب حوزه آبخیز کن هند پرداختند. این حوزه به ده زیرحوزه شامل ۱۰۷ HRU (واحد عکس العمل هیدرولوژیکی) بر اساس نقشه‌های شیب، خاک و پوشش زمین تقسیم شد. نتایج نشان داد که میانگین بارندگی سالانه حوزه کن حدود ۱۱۳۲ میلی متر است که حدود ۲۳ درصد آن به رواناب سطحی، ٤ درصد به جریان آب زیرزمینی و حدود ۷۳ درصد به تبخیر و تعرق تبدیل می‌شود.

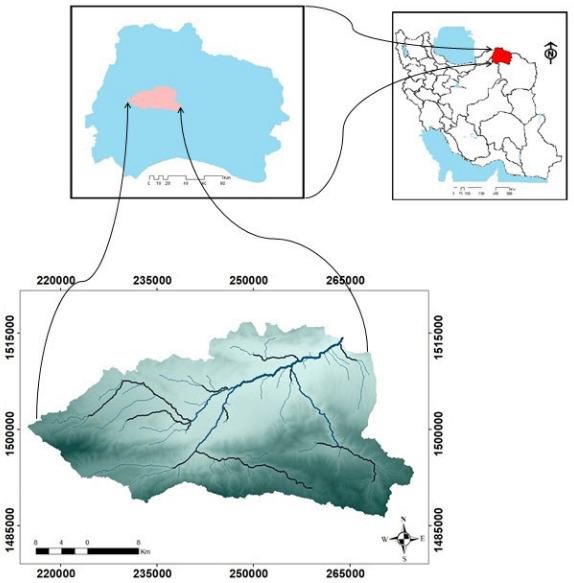
هم چنین می توان به پژوهش‌های وفاخواه و همکاران [۱۹]، در مورد مقایسه روش‌های مختلف زمین آماری در برآورد تبخیر تعرق پتانسیل در حوزه آبخیز دریاچه نمک، جامعی و حجام [۸]، در برآورد منطقه‌ای تبخیرو تعرق مرجع در استان خوزستان، گریت و همکاران [۳]، با استفاده از روش کریجینگ تهیه نقشه‌های تبخیر و تعرق برای تولید محصول کینوا در آلتیپلانو در بولیویاشاره کرد.

همچنین واندرلیندن و همکاران [۱۸]، براساس پژوهشی که در اندلس اسپانیا انجام دادند از میان روش‌های زمین آماری روش کریجینگ ساده را به عنوان مناسب‌ترین روش پهنه بندی ETo بیان کردند.

نتایج پژوهش‌های اشاره شده نشان داد که روش‌های درون یابی نتایج متفاوتی در مناطق مختلف داشته است، براین اساس هدف پژوهش حاضر بررسی و ارزیابی روش‌های مختلف زمین آماری و تعیین مناسب‌ترین روش زمین آماری برای تخمین مکانی تبخیر وتعرق مرجع و پهنه بندی آن در حوزه آبخیز دربند سملقان است. نوآوری این تحقیق استفاده همزمان از مدل SWAT برای شبیه‌سازی بیلان آب و تبخیر و تعرق منطقه و روش زمین آمار برای پهنه‌بندی نقشه تبخیر و تعرق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

حوزه‌ی آبخیز سملقان یکی از دشت‌های حاصلخیز استان خراسان شمالی می‌باشد و از زیرحوزه‌های جنوبی رودخانه اترک است. شیب عمومی این دشت از طرف جنوب، غرب به شمال شرق می‌باشد و کاهش ارتفاع در جهت شمال شرق باعث گردیده که شیب لازم جهت زهکش نمودن رواناب و سیلاب‌های حوزه را به وجود آورد. امتداد آبراهه‌های اصلی در ارتفاعات شمال، جنوب و غرب می‌باشد که باعث می‌شود رواناب و سیلاب‌های حوزه آبخیز سملقان را به سمت رودخانه اصلی دشت که دارای امتداد جنوب غرب- شمال شرق می‌باشد هدایت نماید. این منطقه به لحاظ شرایط خاص موروفولوژیکی و محیطی از یک طرف و هم‌جواری با ناحیه مرطوب هیرکانی از طرف دیگر، دارای تنوع خاصی می‌باشد. به طوری که میزان بارندگی آن از ۲۳۰ میلی متر در منطقه جیرانسو تا ٤۷۰ میلی متر در ارتفاعات سملقان و درکش متغییر بوده و دارای متوسط بارندگی ۳۱۸ میلی متر می‌باشد، همچنین دارای متوسط دمای هوای ۱۷ درجه سانتی گراد بوده و دارای اقلیم نیمه خشک است. ارتفاع حداکثر حوزه ۲۷۷۷ متر و ارتفاع حداقل ٦٦۸ متر می باشد (مطالعات بهنگام سازی حوزه آبخیز اترک ۱۳۸۸). در شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز دربند سملقان نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Location of the study area

شبیه‌سازی بیلان آبی

برای شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه از مدل SWAT استفاده گردید. مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز پیچیده و وسیع، با توجه به تغییرات خاک، کاربری اراضی و شرایط آب و هوایی در دوره‌های طولانی مدت کاربرد دارد. مدل SWAT یک مدل مفهومی- نیمه‌توزیعی در مقیاس حوزه آبخیز است که دارای بازده محاسباتی بالا می‌باشد.

معادله بیلان آب که در مدل استفاده می‌شود به صورت رابطه ۱ می‌باشد [۱۳]. (۱)

$$SWt = SWo + \sum (Rday - Qsurf - Ea - Wseep - Qgw) \quad (۱)$$

که در آن SWt محتوای آب نهایی در خاک، t زمان (روز)، SW_o مقدار آب اولیه موجود در خاک، R_{day} مقدار بارش در هر روز، Qsurf مقدار رواناب سطحی در هر روز، Ea مقدار تبخیر و تعرق روزانه، Wseep مقدار آب نفوذ کرده به منطقه زیرقشری و Qgw مقدار نفوذ به سفره زیرزمینی می‌باشد [۱۹].

چهار سیستم فرعی جهت تشکیل فرآیندهای شبیه‌سازی در این

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]

مدل عبارت اند از : لایه‌های خاک (عمق صفر تا ۳/۵ متر)، منطقه میانی یا غیر اشباع در صورت وجود، سفره آب زیرزمینی کم عمق یا غیر محصور (عمق ۳/۵ تا ۲۵ متر)، سفره آب زیرزمینی عمیق یا محصور (عمق بیش از ۲۵ متر) و مسیل‌ها. در این مدل جریان رودخانه توسط سه منبع اصلی تأمین می‌گردد که عبارت اند از رواناب سطحی، جریان زیر سطحی و جریان پایه یا همان جریان آب زیرزمینی از سفره آب زیرزمینی غیر محصور. در این مدل هر حوزه به چند زیرحوزه و هر یک از زیرحوزه‌ها به چند واحد عکس‌العمل هیدرولوژیک[1] (HRU) که از نظر کاربری اراضی و خصوصیات خاک همگن هستند، تقسیم می‌شود [۲۰].

معادله بیلان آب که در مدل استفاده می‌شود به صورت رابطه ۲ می‌باشد [۱۹]. رابطه ۲:

$$SWt = SWo + \Sigma\,(Rday - Qsur - Ea - Wseep - Qgw) \quad (۲)$$

که در آن SWt محتوای آب نهایی در خاک، t زمان (روز)، SWo مقدار آب اولیه موجود در خاک، Rday مقدار بارش در هر روز، Qsur مقدار رواناب سطحی در هر روز، Ea مقدار تبخیر و تعرق روزانه، Wseep مقدار آب نفوذ کرده به منطقه زیرقشری و Qgw مقدار نفوذ به سفره زیرزمینی می‌باشد. در این مدل جریان رودخانه توسط سه منبع اصلی تأمین می‌گردد که عبارت‌اند از رواناب سطحی، جریان زیر سطحی و جریان پایه یا همان جریان آب زیرزمینی از سفره آب زیرزمینی غیر محصور. شکل ۲ محل قرارگیری ایستگاه‌های اقلیمی در محدوده مورد مطالعه را و جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در منطقه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است داده‌های اقلیمی بصورت روزانه به مدل وارد شده است.

واسنجی و اعتبارسنجی

واسنجی مدل SWAT به دو صورت دستی و همچنین استفاده از برنامه SUFI2 که در قالب نرم افزار SWAT_ CUP به مدل SWAT لینک شده است انجام گردید. جهت واسنجی مدل از آمار ۷ ساله اندازه‌گیری شده (1385 تا ۱۳۹۱)، بارندگی، دما و دبی روزانه استفاده شد. در این مرحله به دفعات مختلف اقدام به اجرای مدل نموده و هر بار با توجه به شاخص‌ها و معیارهای آماری، نتایج را مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا سعی شد مدل برای شبیه‌سازی در پایه زمانی سالانه واسنجی شود تا پس از دستیابی به نتیجه قابل قبول اقدام به واسنجی مدل برای پایه زمانی ماهانه شود. با اجرای الگوریتم SUFI2 مقادیر بهینه پارامترهای حساس مدل تعیین می‌گردد. برای واسنجی مدل، این الگوریتم چندین بار اجرا می‌شود و در هر بار اجرا در صورت قابل قبول بودن نتایج بهینه‌سازی، از مقادیر بهینه پارامترها در مرحله اعتبارسنجی استفاده می‌شود. در صورت غیرقابل بودن نتایج، بهینه‌سازی مجدداً تکرار می‌شود.

اعتبارسنجی مدل عبارت است از فرایندی پس از واسنجی مدل که در آن قابلیت یک مدل انتخاب شده برای یک منطقه برای پیش‌بینی صحیح دوره‌ای غیر از دوره واسنجی بررسی می‌شود. زمانی می‌توان گفت یک مدل اعتبارسنجی شده است که صحت و قابلیت پیش‌بینی آن در دوره اعتبارسنجی با مقدار خطای قابل قبول اثبات شده باشد. لازم به ذکر است که عبارت اعتبارسنجی یک مدل به یک منطقه خاص اشاره دارد و نباید این تصور غلط به وجود آید که مدل برای تمامی نقاط اعتبارسنجی شده است. انجام مرحله اعتبارسنجی با استفاده از مقادیر پارامترهای اصلاح شده در مرحله واسنجی و بر اساس آمار سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵ صورت گرفت. نتیجه این بخش میزان اعتبار مدل واسنجی شده را نشان می‌دهد.

روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی مدل

در این تحقیق برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی‌ها در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های R2 (ضریب تبیین[2])، bR2 (ضریب همبستگی وزنی)، NS (نش- ساتکلیف) استفاده گردید.

ضریب تبیین: (۳)

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(Simulated_i - Simulated_{avg})(Measured_i - Measur}{\sum_{i=1}^{n}(Simulated_i - Simulated_{avg})^2 \sum_{i=1}^{n}(Measured_i - Meas}$$

که در آن:

Simulatedavg = متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده

Measuredavg = متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

ضریب bR2

اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و همچنین پویایی بین آن‌ها با استفاده از تابع bR2 نشان داده می‌شود. این تابع حاصل‌ضرب ضریب تبیین در ضریب رگرسیون می‌باشد. ضریب رگرسیون (b)، اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و ضریب تبیین (R^2)، پویایی بین آن‌ها را نشان می‌دهد.

ضریب ناش-ساتکلیف[3]

این روش ابزار دیگری است که اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد (رابطه ٤).

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}(Measured_i - Simulated_i)^2}{1\left[Measured_i - 1/n \sum_{i=1}^{n} Measured_i\right]^2} \quad (٤)$$

تخمین مکانی تبخیر وتعرق مرجع با روش های زمین آماری

پس از اجرای مدل SWAT و شبیه‌سازی تبخیر و تعرق حوزه دربند

1. Hydrological Response Unit

2. Coefficient of determination

3. Nash - Sutcliffe

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]

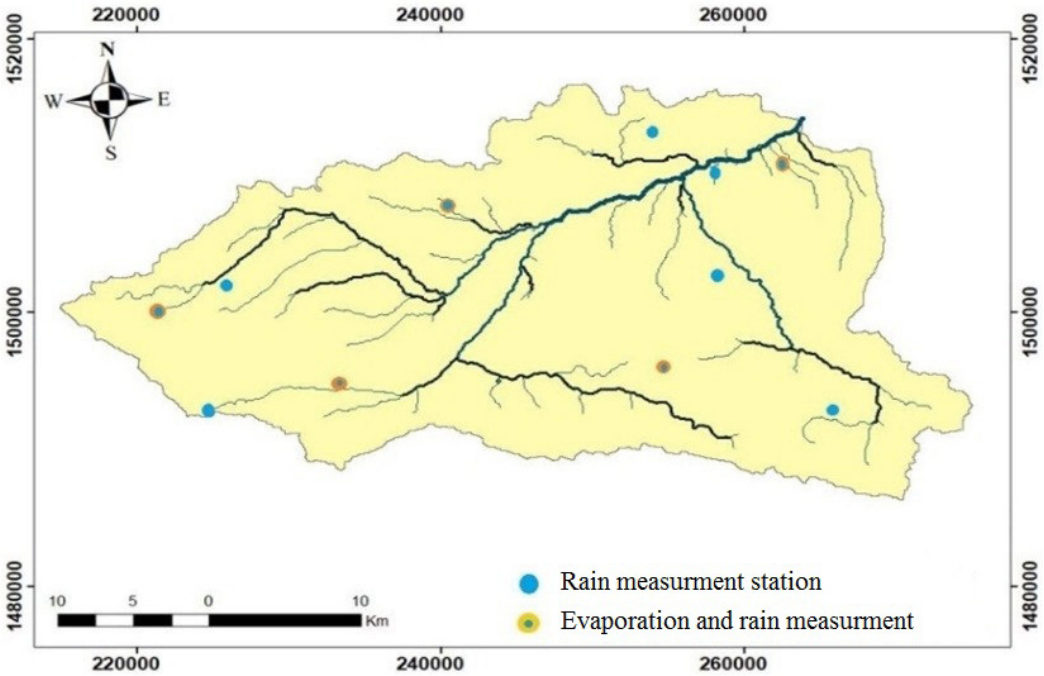
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]

سملقان، داده‌های مربوط به این پارامتر از نظر نرمال بودن به وسیله آزمون کلوموگروف اسمیرنوف در محیط نرم افزاری SPSSمحاسبه گردید. پس از نرمال‌سازی داده‌ها به منظور تبدیل داده‌های نقطه ای به داده‌های سطحی در محیط نرم افزار Arc GIS از روش‌های زمین آمار (کریجینگ ساده، معمولی، گسسته و کوکریجینگ) استفاده گردید. به منظور مقایسه روش‌های استفاده شده در این پژوهش و انتخاب مناسب‌ترین روش زمین آمار از تکنیک اعتبار سنجی متقابل استفاده شد. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط، آن نقطه برآورده می‌شود. این کار برای همه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود. به‌طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. با استفاده از مدل‌های به دست آمده، در تعدادی از نقاطی که اندازه گیری وجود نداشت، مقدار تخمینی محاسبه گردید جهت نشان دادن پیوستگی مکانی بین متغیر مورد بررسی، نیم تغییر نما یا واریوگرام داده‌ها در محیط نرم افزاری Arc GIS ترسیم گردید. سپس برای انتخاب بهترین ورش درونیابی به منظور تهیه نقشه تغییرات تبخیر و تعرق حوزه دربند سملقان از روش ارزیابی متقابل استفاده شد.

نتایج

واسنجی مدل SWAT

مهم‌ترین خطاهای نتایج اولیه در مرحله واسنجی عبارت بود از عدم هماهنگی نقاط اوج و شیب هیدروگراف‌ها و کم بودن حجم آب پایه. با استفاده از نتایج آنالیز حساسیت مدل، پارامترهای موثر در این بخش‌ها شناسایی شده و در بهینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است بیلان آبی که توسط مدلSWAT شبیه‌سازی می شود با کالیبره کردن میزان رواناب سطحی در محل



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و شبکه آبراهه‌ای

Fig2. Location of weather stations and stream network

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

Table 1. Characteristics of meteorological stations

Height (m)	Latitude	Longitude	Station type	station name	row
۱۱۰۰	۳۷/۴۵۵۲	۵۶/۷۶۶۷	Rain	Darkesh	۱
۸۲۶	۳۷/۵۲۰۰	۵۶/۷۷۱۸	Meteorology	Resalat	۲
۷۷۰	۳۷/۶۰۷۱	۵۶/۹۸۱۷	Rain, Meteorology	Darband	۳
۷۵۱	۳۷/۵۶۷	۵۶/۹۲۰۱	Rain, Meteorology	Ashkhane	۴
۱۵۲۸	۳۷/۴۳۰۳	۵۶/۵۵۷۴	Rain, Meteorology	Chamanbid	۵
۶۴۴	۳۷/۵۶۹۶	۵۶/۶۱۱۹	Rain, Meteorology	Pishghale	۶

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]

ایستگاه‌های هیدرومتری و با داشتن معیارهای ارزیابی مناسب، نتایج مدلسازی قابل بسط به سایر پارامترهای بیلان آب منطقه است و بعد از کالیبراسیون مدل می‌توان از سایر پارامترها که توسط مدل SWAT شبیه‌سازی شده است برای کارهای تحقیقاتی و اجرایی استفاده کرد. خلاصه نتایج در مرحله واسنجی به شرح جدول ۲ می‌باشد.

اعتبارسنجی مدل

ارزیابی مدل نیز نتایج قابل قبولی را در پی داشت. در این مرحله با توجه به پارامترهای کالیبراسیون بهینه شده برای منطقه مطالعاتی، با استفاده از باقی‌مانده آمار (۱۳۹۵-1392) اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه شده و این نتایج به عنوان نتایج نهایی اعتبارسنجی مدل در ادامه ارائه شده است (جدول۳). در این تحقیق برای شبیه سازی تبخیر و تعرق ابتدا بیلان آبی حوزه با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی و کالیبره شد. برای کالیبره دقیق‌تر تبخیر و تعرق، پارامترهای اثرگذار در بحث تبخیر و تعرق از جمله Esco (فاکتور جبران تبخیر آب)، Epco (فاکتور جبران جذب گیاهی)، Soil awc، (میزان آب قابل دسترس، Soil k (هدایت هیدرولیکی خاک) و همینطور الگوی کشت منطقه طوری تنظیم شد که به واقعیت نزدیک باشد که در نتیجه آن تبخیر و تعرق دقیق‌تر شبیه‌سازی گردید.

جدول ۲- ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی

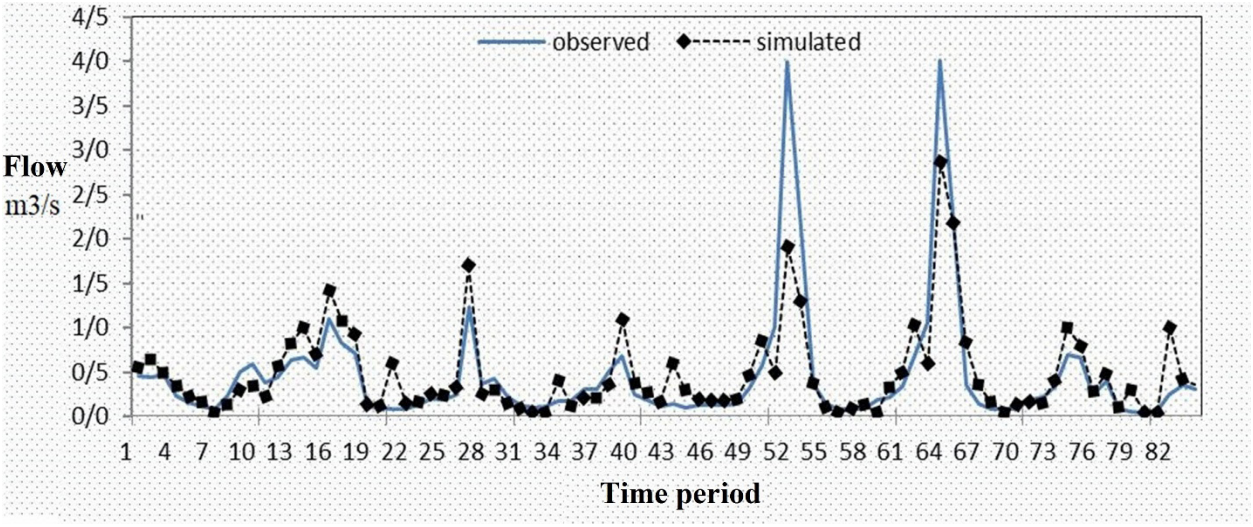
Table 2.Evaluation of models efficiency in the calibration stage.

Weighted coefficient of determination	Coefficient of determination	Coefficient of Nash Sutcliffe	Assessment parameter
Br2	R2	NS	parameter
۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۶۸	numerical value

جدول ۳- ارزیابی کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی

Table 3. Evaluation of models efficiency in the validation stage

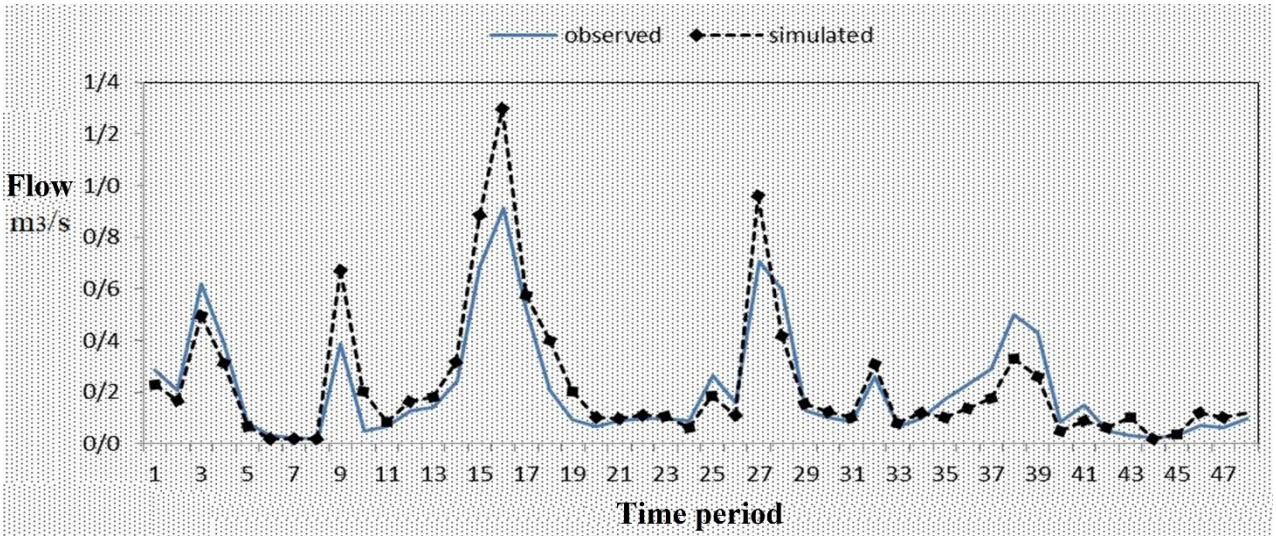
Weighted coefficient of determination	Coefficient of determination	Coefficient of Nash Sutcliffe	Assessment parameter
Br2	R2	NS	parameter
۰/۶۲	۰/۶۹	۰/۵۹	numerical value



شکل ۳- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی با پایه زمانی ماهانه.

Fig 3. Comparison of simulation and observations hydrographs in the calibration period with a monthly time base.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]



شکل ٤- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه سازی و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی با پایه زمانی ماهانه.

Fig 4. Comparison of simulation and observations hydrographs in the validation period with a monthly time base.

جدول ٤- نتایج آنالیز عددی

Table 4. Results of numerical analysis

parameter	Max	Min	Median	Variance	Skewness
PET	٣٤١/٢٣	١٣٣/٢٠٧	٢٩٧/٠٩	٢٤١/٥٢	١/٧٥٣

جدول ٥- انتخاب بهترین مدل واریوگرام تجربی بر حسب RMSE

Table 5. Selection of the best experimental variogram model according to RMSE

parameter	Spherical	Exponential	circular
PET	٧٤١٩	٨/٧٤١	٣١٩

جدول ٦- بهترین مدل برازش یافته بر پارامتر تبخیر و تعرق

Table 6. The best fitted model on evaporation and transpiration

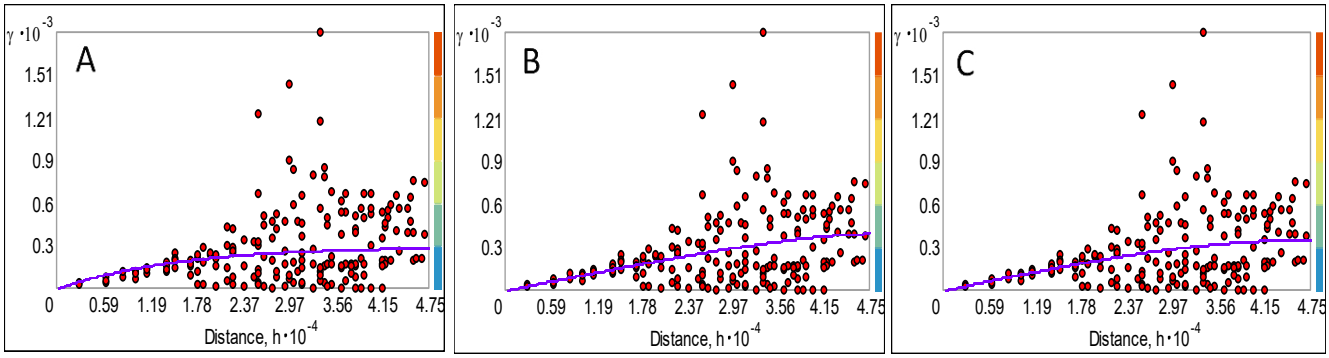
Model	Range(km)	Nugget	Sill
Exponential	٤٧٧٢٨	٠/٠٢	٠/٣

نتایج روش های میان یابی برای داده های تبخیر و تعرق مرجع

مهم‌ترین اقدام قبل از استفاده از روش زمین آمار نرمال‌سازی داده‌ها می‌باشد. در جدول٤ ، آمار توصیفی داده‌ها پس از نرمال‌سازی که با نرم افزار SPSS انجام شد نشان داده شده است. طبق جدول ٤ بیشترین مقدار تبخیر و تعرق ٣٤١,٢٣ میلی متر و کمترین مقدار ١٣٣,٢ میلی متر می باشد. لازم به ذکر است که در میان مدل‌های وار یوگرامی مختلف، بهترین مدل، مدلی است که دارای RMSe کمتر باشد . لذا در بین روش‌هایی که بر روی داده‌های موجود اعمال گردید مدل Exponential که دارای کمترین مقدار RMSe با رقم 8.741 هست انتخاب شد (جدول٥). همچنین ویژگی‌های واریوگرام مدل Exponential که به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید در جدول ٦ نشان داده شده است.پارامترهای واریوگرام‌های تبخیر و تعرق برای سه روش نمایی، دایره‌ای و کروی در شکل ٥ و ٦ نشان داده شده است.

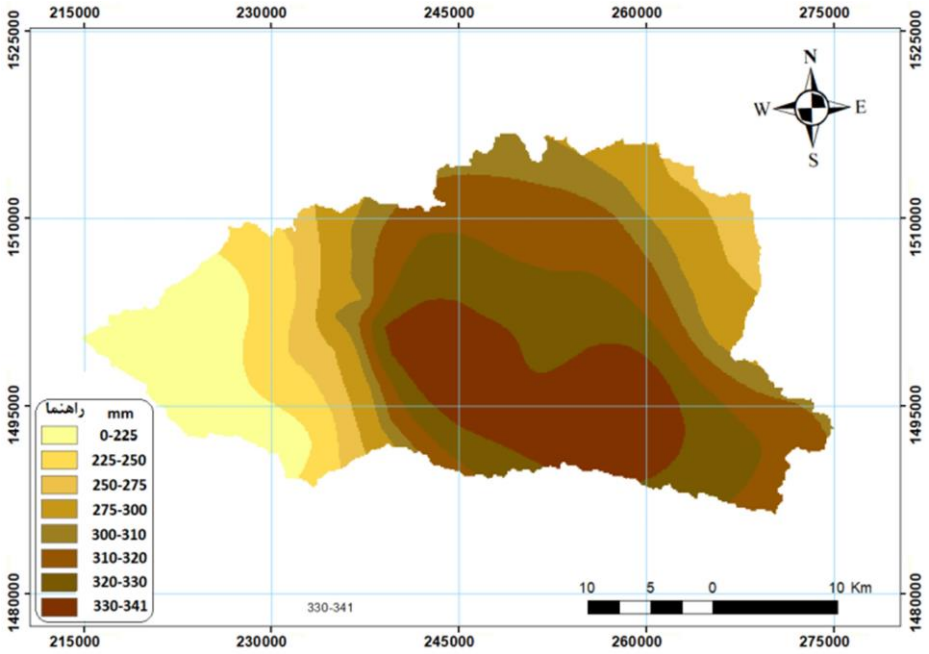
این واریوگرام‌ها بر اساس میانگین سالانه تبخیر و تعرق شبیه سازی شده توسط مدل SWAT در بازه زمانی ١٣٩٢ تا ١٣٩٥ تهیه گردیده است. همچنین واریوگرام‌های متقابل نیز در شکل ٧ نشان داده شده است. نسبت اثر قطعه ای به سقف، معیاری برای بیان استحکام یک ساختار مکانی می‌باشد. اگر این نسبت کمتر از ٢٥ درصد باشد، نشان دهنده وابستگی قوی متغیر مکانی می‌باشد. اگر این نسبت بین ٢٥ تا ٧٥ درصد باشد نشان دهنده وابستگی معمولی (میانه) متغیر مکانی است و اگر بزرگتر از ٧٥ درصد باشد وابستگی متغیر مکانی بسیار ضعیف می‌باشد. در انتها بعد از اجرای مدل SWAT و شبیه سازی بیلان آب حوزه آبخیز دربند سملقان و محاسبه تبخیر و تعرق حوزه، با استفاده از مقادیر مختلف تبخیر و تعرق در تمامی سطح حوزه و همچنین با استفاده از بهترین مدل میان‌یابی که با استفاده از زمین آمار انتخاب شد نقشه پهنه‌بندی تبخیر و تعرق حوزه با استفاده از نرم افزار Arc GIS تهیه شد (شکل 7).

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]



شکل ۵- واریوگرام‌های پارامتر تبخیر و تعرق (A: Exponential, B: Circular, C: Spherical)

Fig 5. Variograms of evaporation and transpiration (A: Exponential, B: Circular, C: Spherical)



شکل ٦- واریوگرام‌های متقابل پارامتر تبخیر و تعرق (A: Exponential, B: Circular, C: Spherical)

Fig 6. Inverse of evapotranspiration variograms (A: Exponential, B: Circular, C: Spherical)

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی شاخص‌ها و نمودارهای بدست آمده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی بیلان آبی، نشان می‌دهد که مدل در مرحله واسنجی موفق‌تر عمل کرده است. به دلیل بدست آمدن مقادیر بالای شاخص‌های ارزیابی، مدل‌سازی بسیار خوب زمان وقوع دبی‌های اوج و دبی‌های پایه و علی‌رغم بیشتر برآورد نمودن مقادیر دبی‌های اوج، نتایج مدل‌سازی مطلوب می‌باشد. به طور کلی نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده توانایی و دقت قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز دربند سملقان می‌باشد. یافته‌های این تحقیق، نتایج مطالعات، چانگ باین و همکاران [۲]، شیمیلیس و همکاران [۱۵]، تایبیب و بوکت [۱٦]، اکس یو و همکاران [۱۹]، کنیز و ماروین [۹]، اندومبا و بیرهانو [۱٤]، که به طور کلی توانایی مدلSWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوزه‌های مورد مطالعه را رضایت‌بخش اعلام کردند، تایید می‌کند. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت ۱۳ پارامتر موثر بر رواناب در مدل SWAT که با استفاده از نرم افزار SWAT CUP انجام شد، سه پارامتر شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط (CN2)، ضریب α آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال (ALPHA_BNK) و ثابت تخلیه آب زیرزمینی ALPHA_BF از پارامترهای بسیار مهم در تعین میزان دبی رواناب خروجی از حوزه شناخته شد.

تهیه نقشه مناسب جهت بررسی میزان تبخیر و تعرق در سطح حوزه اقدامی مهم در مدیریت منابع آب و سایر فعالیت‌های مربوط می‌باشد. در این راستا استفاده از روش‌های مناسب جهت پهنه‌بندی امری ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین با ارزیابی روش‌های زمین

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]

آمار انتخابی در این تحقیق در نهایت نقشه‌ی پهنه‌بندی تبخیر و تعرق بدست آمد. نرمال بودن داده‌های متغیر شرط استفاده از روش‌های زمین آمار برای محاسبه داده‌های مکانی می‌باشد که در غیر این صورت نیاز است که داده‌ها با روش دیگری مثل پایه لگاریتمی نرمال شوند. با توجه به متفاوت بودن نتایج روش‌های زمین آمار در مناطق مختلف پیشنهاد می‌گردد که برای هر منطقه انواع روش‌های زمین آمار مورد آزمون قرار بگیرند و روش‌هایی که دارای خطای کمتری می باشند جهت آنالیز و بررسی داده‌ها مورد استفاده قرار بگیرند. با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز مکانی داده‌ها در این تحقیق مدل نمایی (Exponantial) با توجه به مقدار RMSe کمتر و همبستگی بیشتر بعنوان مناسب‌ترین مدل جهت پهنه‌بندی انتخاب گردید.

متغیرهای هواشناسی ازجمله دمای حداکثر و حداقل ،تابش خورشیدی، سرعت باد و دمای نقطه شبنم بیشترین تاثیر را در دقت شبیه‌سازی مربوط به اقلیم نیمه خشک (مانه و سملقان) دارد. همچنین باید ذکر گردد که مدل SWAT تمامی تلفات بیلان آب را در نظر نمی‌گیرد. از این رو با تجزیه و تحلیل پارامترهای مختلف مدل بخصوص پارمترهای مربوط به خاک، حوزه با کیفیت بالاتری شبیه‌سازی گردید که این امر نقش اساسی در تعیین دقیق‌تر تبخیر و تعرق واقعی دارد. مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، با مقادیر مشاهداتی آن در منطقه نشان داد که مدل SWAT از قابلیت بالا جهت شبیه‌سازی عملکرد گیاهی با توجه به شرایط مختلف مدیریت کشاورزی و منابع آبی برخوردار می‌باشد.

با توجه به قابلیت‌های که از مدل SWAT در این تحقیق نشان داده شد، می‌توان از آن برای شبیه‌سازی تغییر الگوی کشت و دیگر اقدامات مدیریتی در سطح حوزه استفاده نمود و اثرات آن را بر ارتقاء بهره‌وری آب کشاورزی مورد ارزیابی قرار داد. همچنین با توجه به نقشه‌ی بدست آمده از تغییرات تبخیر و تعرق که در شکل ۷ نشان داده شده است میزان تبخیر و تعرق در مناطق جنگلی بیشتر می‌باشد.

منابع

1. Aouissi, J. Benabdallah, S. Chabaane, Z. L. Cudennec, C. 2016. Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—Application in data-scarce rural Tunisia. Agricultural Water Management, 174, 39-51.

2. Changbin, Li. Jiaguo, Qi. Zhaodong, Feng. Runsheng, Yin. Songbing, Zou and Feng, Zhang. 2010. Parameters optimization based on the combination of localization and auto-calibration of SWAT model in a small watershed in Chinese Loess Plateau. Front. Earth Sci. China 2010, 4(3): 296–310.

3. Geerts, S. Raes, D. Garcia, M. Del Castillo, C. and Buytaert, W. 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. Agricultural and forest meteorology, 139, 3: 399-412.

4. Immerzeel, W. Gaur, A. and 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: 11-24.

5. Jeimar P.P. Marcela, Q. and 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.

6. Jameei, M, and Hejam, S. 2010. Evaluation of geostatistical methods in regional estimation of evapotranspiration. (Case study: Khuzestan province). Third Iranian Water Resources Management Conference, Tabriz.

7. Jiang, R. Wang, Y. Li, Q. Kuramochi ,K. Hayakawa, A., Woli, K, P. Hatano, R. 2011 Modeling the water balance processes for underestanding the components of river discharge in a non-conservative watershed. Journal of Transactions of the ASABE. Vol 54. PP: 2171-2180

8. Kannan, N. White, S. M. Worrall, F. & Whelan, M. J.2007. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. Journal of Hydrology, 332(3), 456-466.

9. Kenneth J. Tobin and Marvin E. Bennett. 2009. Using SWAT to model Stream Flow in Two River Basins With Ground and Satellite Precipitation Data. Journal of The American Water Resources Association. Vol. 45, No. 1. February 2009.

10. Kumar, T. Ranta, M. J. Praveen, T.V. & Kumar, V.2010. Analysis of the Run off for Watershed Using SCS-CN Method and Geographic Information Systems. International Journal of Engineering Science and Technology. 2, 3947-3654;

11. Memarian, H. Balasundram, S,k. Abbaspour, K, C. Talib, J, B. Sung, C, T, B. Sood, A, C. 2014. SWAT-based Hydrological Modelling of Tropical Land UseScenarios. Hydrological Sciences Journal. DOI: 10.1080/02626667.2014.892598

12. Murty, P, S. Pandey, A. Suryavanshi, P. 2013. Application of semi-distributed hydrological model for basin level water balance of the Ken basin of Central India. Article first published online: 19 JUL 2013. DOI: 10.1002/hyp.9950

13. Neitsch, S.L. Arnold, J.G. Kiniry, J.R. and Williams, J.R. 2011. Soil and waterassessment tool, theoretical documentation, version 2009. Texas Water Research Institute,Technical Report 406

14. Ndomba P.M. and Birhanu B.Z., 2008, Problems and Prospects of SWAT Model Applications in NILOTIC Catchments,

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]

Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine, 1, 41-52.

15. Shimelis, G. Setegn, Ragahavan. and Bijan, D. 2008. Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model. The Open Hydrology Journal, 2008, 2, 49-62.

16. Tibebe, D. and Bewket, W. 2010. Surface Runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta watershed, Ethiopia. land degradation & development. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ldr.1034.

17. Vafakhah. M. Saravi. M. Owagh. M. 2011. Comparison of Geostatistical Methods in Estimating Potential Evapotranspiration (Case Study: Salt Lake Watershed). Journal of Watershed Management Research. No. 30, pp. 38 and 3

18. Vanderlinden, K. Giraldez, V. and Meirvenne,M. 2008. Spatial Estimation of Reference Evapotranspiration in Andalusia, Spain. Journal of Hydrometeorology.9, pp: 242–255.

19. Xu, Z. X. Pang, J. P. Liu, C. M., and Li, J. Y. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. Hydrological Processes. Hydrol. Process. 23, 3619–3630 (2009).

20. Zahedi, E. 2013. Determining the Suitable Sites for Groundwater Dams Construction Using the Water Balance Simulation (SWAT model) and Analytical Network Process (ANP), (Case Study: Dorungar Watershed, Dargaz, M.Sc. Thesis, Yazd University, 160 pp (In Persian).

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]

نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 17, No. 61, Summer 2023
سال هفدهم- شماره ٦١- تابستان ١٤٠٢

Simulation and Zoning of Evapotranspiration in Samalghan Darband Watershed Using SWAT Model and Geostatistical Method

E. Zahedi[1], A. Talebi[2], K. Davari[3] and V. Mousavi[4]
Received: 24-07-2022 Accepted: 08-01-2023

Abstract

Evapotranspiration (ET) is one of the most important components of the hydrological cycle and an important factor in determining water demand, its spatial distribution and accurate estimation for many studies such as water balance, crop production simulation, program Irrigation planning and water resources management are very important. Also, using of geostatistical methods is one of the ways to estimate evapotranspiration in places without stations. In this study, SWAT hydrological model was used to simulate evapotranspiration of Samalghan watershed . To evaluate the simulation results, indices R2 , bR2 , NS was used. In the calibration stage, the coefficients of R2, bR2 and NS were equal to 0.74, 0.71 and 0.68, respectively, and in the validation stage, they was equal to 0.69, 0.62 and 0.59. .Then, using the results of spatial analysis of data in this study, the exponantial model was selected as the most appropriate model for zoning due to the lower RMSe value and higher correlation.

Keywords: Evapotranspiration, SWAT model, Geostatistics, Exponential model, Darband watershed

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-08-02]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.3.7]

1. Ph.d student , Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd University, Yazd, Iran
2. Corresponding Author and Professor., Faculty of Natural Resources, Yazd University, , Yazd, Iran. Talebisf48@gmail.com
3. Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
4. Assoc Professor, Faculty of Natural Resources, Tarbiat modarres University, Noor, Iran