

مقاله علمی-پژوهشی

بکارگیری مدل SWAT و الگوریتم SEBAL در برآورد مقادیر واقعی تبخیر و تعرق حوضه آبریز کارون

حجت‌الله قاسمی^۱، امیر پویا صراف^{۲*} و بابک امین نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳

چکیده

برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه‌های آبریز به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب و بهبود مدیریت حوضه‌ها، امری ضروری است. از جمله روش‌های شناخته‌شده‌ای که به این مسئله می‌پردازند، مدل هیدرولوژیکی SWAT و الگوریتم SEBAL سنجش از دور هستند. در این پژوهش، در گام اول مقادیر تبخیر و تعرق حوضه آبریز کارون، در سه سال خشک، نرمال و تر به ترتیب (۲۰۱۵، ۲۰۱۹، ۲۰۲۲)، با استفاده از مدل SWAT واسنجی شده بر اساس رواناب و عملکرد محصول و الگوریتم SEBAL به دست آمده است. مدل SWAT با استفاده از ۶ ایستگاه هیدرومتری برای دوره‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۰ و ۲۰۲۰-۲۰۱۷، به ترتیب واسنجی و اعتبارسنجی شد که برای دوره واسنجی، مقادیر ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۵۴ تا ۰/۷۱، ضریب نش - ساتکلیف (NS) بین ۰/۵۲ تا ۰/۶۸ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۱۲/۵۰ تا ۳۲/۰۰ (m^3/s) و برای دوره اعتبارسنجی، مقادیر R^2 بین ۰/۵۱ تا ۰/۶۵، NS بین ۰/۵۰ تا ۰/۶۵ و RMSE بین ۱۲/۰۳ تا ۲۳/۲۳ (m^3/s) بوده است. همچنین متوسط عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده محصول استراتژیک حوضه آبریز که گندم است، به ترتیب برابر با ۴/۶۸ و ۴/۹۸ تن در هکتار بوده است. در ادامه، نتایج الگوریتم SEBAL و مدل SWAT بر اساس وضعیت سال آبی، با یکدیگر تحت مقایسه قرار گرفتند که همگرایی میان نتایج این دو روش، برای سه سال نرمال، خشک و تر به ترتیب برابر با ۰/۷۲، ۰/۵۸ و ۰/۴۹ بوده است. در مرحله دوم از این تحقیق، با توجه به داده‌های زمینی و با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS از ماهواره Terra که دارای قدرت تفکیک زمانی مناسب است و سنجنده OLI از ماهواره Landsat8 که دارای قدرت تفکیک مکانی مناسب است، نتایج الگوریتم SEBAL و محدوده تغییرات پارامترهای اصلی این الگوریتم در دشت‌های حوضه‌های اهواز ملاتانی و الباجی، ارائه شد. دشت اهواز ملاتانی دارای سطح زیر کشت بالاتر و تغییرات توپوگرافی کمتر است. شبیه‌سازی عملکرد محصول توسط نرم‌افزار SWAT، در دشت الباجی نتیجه بهتری به دست داده است. با توجه به نتایج این تحقیق، مقادیر تبخیر و تعرق استخراجی از الگوریتم SEBAL و مدل SWAT می‌توانند نزدیک به مقادیر واقعی تبخیر و تعرق در حوضه باشند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم، تبخیر و تعرق، رواناب، عملکرد محصول، مدل هیدرولوژیکی، MODIS، Landsat

مقدمه

تبخیر و تعرق در مدیریت آب در بخش کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در برخی از تحقیقات و پروژه‌های کاربردی از جمله مدیریت حوضه‌های رودخانه‌ها و سامانه‌های تأمین آب، استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق به‌صورت نقطه‌ای (با استفاده از لایسیمتر و دستگاه همبستگی پیچکی) کافی نبوده و نیاز به دانستن توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد. یکی از دلایلی که مدیریت منابع آبی کشور را با مشکل مواجه ساخته است، کمبود تجهیزات و ایستگاه‌های اندازه‌گیری در تعداد کافی و دوره آماری مناسب است که در جهت رفع این معضل، شبیه‌سازی‌های کامپیوتری برای مدیریت حوضه‌های آبریز، مورد استفاده واقع شده است. در نتیجه در سطح حوضه آبریز علاوه بر استفاده از روش‌های سنجش از دور، مدلی که بتواند حجم وسیع داده‌ها از جمله دما، بارش، شرایط توپوگرافی، خصوصیات خاک،

تبخیر و تعرق یکی از مؤلفه‌های مهم و اصلی توازن آب و انرژی در حوضه‌ها می‌باشد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل اینکه مقدار بارش کمتر از نیاز آبی گیاهان است، استفاده از آب‌های سطحی و زیرزمینی برای آبیاری غیرقابل اجتناب است؛ بنابراین تخمین دقیق

- ۱- کاندیدای دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
- ۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
- ۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: Sarraf@riau.ac.ir)

کاربری اراضی، الگوی کشت و غیره را بکار گیرد، مورد نیاز است. پس استفاده از روش‌ها و مدل‌های جامع در این رابطه، امری مهم تلقی می‌گردد.

در تحقیقات پیشین، چندین روش جهت برآورد تبخیر و تعرق در سطح حوضه آبریز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای معرفی شده و مشکلات اصلی الگوریتم‌های موجود برای استفاده، تبیین و راهکارهای رفع و یا کاهش آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است (Mobasheri and Khavarian, 2004; Mobasheri et al., 2005; Sanei Nejad et al., 2011; Karimi et al., 2012; Ganjizadeh et al., 2013). در اکثر این تحقیقات، تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر MODIS (Ruhoff et al., 2012) و یا Landsat (Wei et al., 2012) به کمک الگوریتم SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998a; Bastiaanssen et al., 1998b; Walters et al., 2002) برآورد و نتیجه با روش استاندارد FAO، مقادیر لایسیمتر، دستگاه همبستگی پیچکی، مدل‌های پنمن-مونتیث، هارگریوز سامانی، الگوی مصرف آب کشاورزی، مقادیر تشنگ تبخیر و غیره مقایسه شده است (Allen et al., 2003; Yang 2102; Trezza and Allen, 2003). طبق مطالعات ذکر شده، سنجنده MODIS به دلیل دوره مطلوب تکرار روزانه، مناسب برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه‌ای و مزارع کشاورزی می‌باشد و تصاویر Landsat8 هم اگرچه قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روزه دارند، اما با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در باندهای طیفی و ۶۰ متر در باندهای حرارتی، به جهت تفکیک بهتر مزارع کشاورزی، مناسب خواهند بود (Nosrati et al., 2014; Hong et al., 2009; Tasumi et al., 2008). از طرفی، معمول‌ترین روش مستقیم، تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از اصل بیلان جرمی در یک حجم کنترل شده از خاک (لایسیمتر) می‌باشد که نصب لایسیمتر مشکل و پرهزینه می‌باشد، این روش عمومیت ندارد و جهت برآورد تبخیر و تعرق از روش‌های غیرمستقیم (محاسباتی) استفاده می‌شود که از بین این روش‌ها، روش پنمن-مونتیث-فائو، معتبرترین روش غیرمستقیم، می‌باشد. تحقیقات انجام گرفته در نقاط مختلف جهان مبین این نکته است که دقت مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده با رابطه پنمن-مونتیث-فائو، در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتر از دیگر روابط، بهتر می‌باشد و در شرایطی که داده‌های لایسیمتری در دسترس نباشند، به‌عنوان یک رابطه استاندارد توصیه شده است (Abedi et al., 2008; Allen et al., 1998).

مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز نیز به دو گروه یکپارچه و توزیعی تقسیم می‌شوند که مدل‌های توزیعی غالباً به دلیل امکان اتصال به سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌توانند تغییرات مکانی را در شبیه‌سازی لحاظ کنند، اما اجرای آن‌ها بخصوص در حوضه‌های وسیع بسیار زمان‌بر است (صراف و قاسمی، ۱۴۰۰). اولین مدل هیدرولوژیکی مدل استنفورد

می‌باشد که توسط سینگ توسعه داده شده است (Singh, 1995). در سال‌های اخیر، مدل‌هایی با ماهیت نیمه توزیعی نیز بکار گرفته شده‌اند که در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع موفق عمل کرده‌اند (صراف و قاسمی، ۱۴۰۱). یکی از آن‌ها که در نقاط مختلف جهان مورد استفاده واقع شده، مدل هیدرولوژیکی SWAT می‌باشد.

مدل SWAT اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط جف آرنولد و همکارانش در موسسه تحقیقات کشاورزی آمریکا، طراحی و پایه‌گذاری شد (Arnold et al., 1990). محققان متعددی در نقاط مختلف دنیا و تحت شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی متفاوت به بررسی کارایی مدل SWAT و توانایی آن در شبیه‌سازی رواناب، کیفیت آب، رسوب و تبخیر و تعرق پرداخته‌اند (Beven, 2007; Diwakar Jayakrishnan et al., 2005; Abbaspour et al., 2008). عملکرد زراعی گندم و بهره‌وری آب کشاورزی آن در ایران با مدل SWAT بررسی شده است (Faramarzi et al., 2010). همچنین در مطالعات پیشین، مشخص کردن اجزای معادله بیلان آب با مقایسه نتایج مدل SWAT در برآورد پارامتر تبخیر و تعرق با الگوریتم توازن انرژی (Mir Yaeghub Zadeh, Yavari et al., 2014; Mianabadi et al., 2016; Immerzeel and Droogers, 2008; Immerzeel et al., 2016) و یا با استفاده از ابزارهایی نظیر پکیج نرم‌افزاری بهینه‌سازی غیرخطی PEST (Moazenzadeh et al., 2016) و غیره، به‌منظور اعتبارسنجی، انجام شده است (Babaei et al., 2022).

لازم به ذکر است که در بیشتر تحقیقات انجام گرفته، بر کارایی الگوریتم SEBAL و مدل SWAT در برآورد تبخیر و تعرق، تأکید شده است، اما تحقیقات محدودی به بررسی توأم عملکرد این دو روش در برآورد تبخیر و تعرق پرداخته‌اند. در تحقیق حاضر، مدل SWAT بر اساس رواناب و عملکرد محصول که ارتباط مستقیم با تبخیر و تعرق دارد، واسنجی شده و الگوریتم SEBAL هم با استفاده از تصاویر دو سنجنده متفاوت، توسعه داده شده و نتایج آن‌ها، مورد مقایسه قرار گرفته است که این مسائل از نقاط قوت تحقیق حاضر به شمار می‌روند.

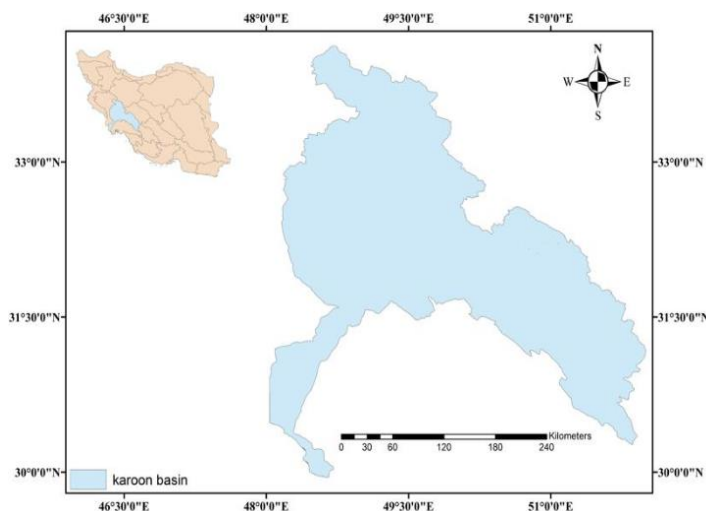
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کارون بزرگ بین طول‌های $51^{\circ}45'$ خاوری و 48° باختری و عرض‌های $29^{\circ}54'$ تا $33^{\circ}37'$ شمالی قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این حوضه در جنوب باختری ایران واقع شده و بخش‌های وسیعی از استان‌های چهارمحال و بختیاری، خوزستان، یاسوج، کهگیلویه و بویر احمد، اصفهان، لرستان و همدان را پوشش می‌دهد. (Khodabakhsh et al., 2016). کارون بزرگ رودخانه‌ای

کیلومتری باختر شمالی شهر کرد سرچشمه گرفته و با عبور از دهستان‌های این شهر در ادامه مسیر به دهستان‌های بروجن، لردگان، ایذه و مسجدسلیمان، وارد شده و پس از عبور از شهرهای شوشتر، اهواز و خرمشهر به خلیج فارس می‌ریزد. در شکل (۱) موقعیت شاخه حوضه آبریز کارون در استان خوزستان را مشاهده می‌کنید.

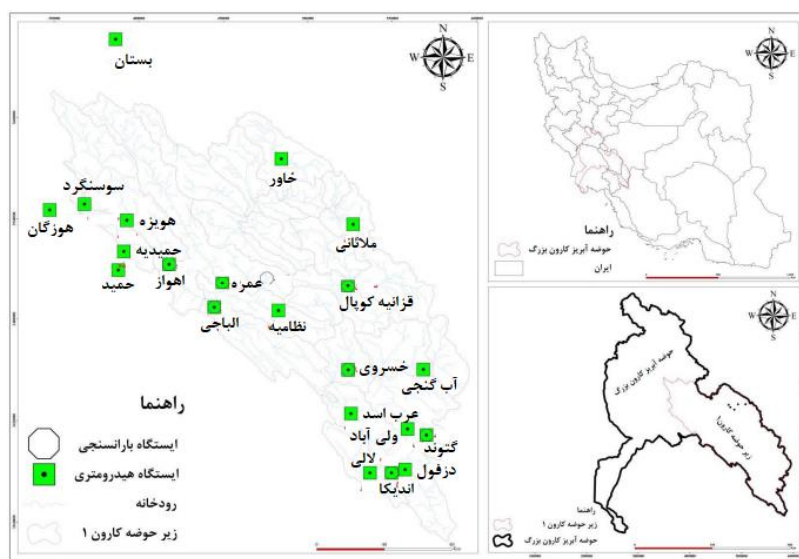
دائمی با ۸۹۰ کیلومتر طول، ۶۷۲۵۵ کیلومترمربع وسعت حوضه آبریز، حدود ۵ درصد از مساحت کل ایران را شامل می‌شود. همچنین شیب متوسط ۰/۳ درصد، میانگین آبدهی سالانه ۵۷۵ مترمکعب بر ثانیه و میانگین بارندگی سالانه ۶۰۰ میلی‌متر است. رودخانه کارون بزرگ که پرآب‌ترین و بلندترین رودخانه ایران به شمار می‌آید، از چشمه‌سارهای دامنه‌های کوه‌های ونگ و زرد کوه واقع در دهستان شورا، در ۹۱



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

استفاده در مدل SWAT از سازمان هواشناسی کشور و پایگاه داده‌های هواشناسی ناسا و ایستگاه‌های سینوپتیک و از سال ۱۹۷۹ الی ۲۰۲۲ و شامل بارش، دما، زاویه و جهت تابش، سرعت و جهت باد، رطوبت خاک و داده‌های ماهانه رواناب نیز از ایستگاه هیدرومتری و در سال‌های ذکر شده تأمین شده است.

در این پژوهش به منظور تولید شبکه آبراهه‌ها و زیر حوضه‌ها از نقشه مدل رقومی ارتفاعی ماهواره Aster خوزستان با دقت ۵ متر استفاده شده است و همچنین از نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی خصوصیات پوشش جهانی زمین با دقت ۱ کیلومتر و خاک با دقت ۵ کیلومتری استفاده شده است. داده‌های موردنیاز هواشناسی جهت



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری

جدول ۱- محصولات و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده برای مدل SEBAL

عنوان	شاخص قابل استخراج	شاخص قابل استخراج غیرمستقیم
MOD09A1 500m	Surface Reflectance Emissivity	Land Surface Temperature Leaf Area Index (LAI) Albedo
MCD64A1	Sun Elevation Sun Zenith Angle	Vegetation Indices
Aster - Dem	DEM	-
Landsat 8	Reflectance - Radiance	NDVI - LST - Albedo

داده‌های سنجنده MODIS کل حوضه کارون، با انتخاب نوع محصول، دوره زمانی و موقعیت مدنظر، داده‌ها استخراج می‌شوند و داده‌های ماهواره Aster GDEM هم با قدرت تفکیک مکانی ۵ متر، پس از انتخاب منطقه مورد مطالعه و انجام تنظیمات مربوطه، قابل دسترس هستند. داده‌های ماهواره‌ای تهیه شده، پس از استخراج و انجام تصحیحات لازم، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مرحله، برای هر دوازده ماه از هر سه سال مدنظر، تصاویر مربوط به روزی که در آن تبخیر ثبت شده در میان داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، بیشترین بوده (در مجموع برابر با ۳۶)، دانلود و با اجرای الگوریتم SEBAL (Bastiaanssen et al; 2002, Waltern et al; 1998a)، مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شدند. لازم به ذکر است که داده‌های هواشناسی مورد نیاز از ۴۶ ایستگاه و برای سه سال نرمال، خشک و تر مدنظر، تأمین شده است. در گام دوم، از تصاویر سنجنده OLI ماهواره Landsat 8 در دشت الباجی برای تاریخ ۲۰۲۰/۱۱/۰۷ و سنجنده MODIS از ماهواره Terra در دشت اهواز ملاثاتی برای تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۱۵ استفاده شده است. داده‌های زمینی مورد نیاز در این مرحله، به صورت جدول (۲) است.

همچنین با توجه به وسعت حوضه آبریز و کمبود ایستگاه در اطراف آن از ایستگاه‌های هم‌جوار منطقه که اطلاعات آن‌ها با توجه به سرشاخه‌ها در دسترس بوده استفاده شده است. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل (۲) آورده شده است. در این تحقیق، جهت اجرای الگوریتم SEBAL، مجموعه داده‌های ماهواره‌ای، رقوم ارتفاعی منطقه و داده‌های هواشناسی، مورد نیاز است. در گام اول، برای استخراج داده‌های ماهواره‌ای از داده‌های سنجنده MODIS که بر روی ماهواره Terra قرار دارد، استفاده شده است. تصاویر سنجنده MODIS به عنوان محصولات MODIS در دو سطح مختلف در دسترس هستند. داده‌های سطح اول، داده‌های خام ماهواره‌ای هستند و داده‌های سطح دوم این محصولات هم داده‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مانند LST، NDVI و ... هستند (Moazami Godarzi et al., 2022). همچنین، برای تهیه رقوم ارتفاعی مورد نیاز در الگوریتم SEBAL، از داده‌های Aster GDEM، استفاده می‌شود. در جدول (۱)، محصولات مورد نیاز از سنجنده MODIS و شاخص‌های قابل استخراج از آن‌ها برای اجرای مدل SEBAL، آورده شده است.

جدول ۲- داده‌های زمینی مورد استفاده در گام دوم

نوع تصویر	تاریخ مورد نظر	دما (°C)	سرعت باد (m)	میانگین ارتفاع (m)
Landsat 8	07/11/2020	۳۰	۵	۱۷۰۰
MADIS	15/11/2017	۳۴	۳	۸۵۰

مدل SWAT، یک مدل نیمه توزیعی و مفهومی است و یکی از محبوب‌ترین مدل‌های هیدرولوژیکی است که به طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی جریان در سری‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل با معرفی توپوگرافی حوضه و نقشه‌های کاربری اراضی و خاک، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یا HRUها ساخته شده و شبیه‌سازی رواناب و عملکرد محصول انجام خواهد شد (صراف و قاسمی، ۱۴۰۰). مدل SWAT در شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی از معادله توازن هیدرولوژیک زیر (رابطه (۲))، استفاده می‌کند:

$$\Delta SW = \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - \frac{4.08 \Delta(Rn(T) + \gamma \frac{900}{T+u_2}(e_s - e_a))}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}) \quad (1)$$

ET: ΔSW : آب ذخیره شده در خاک (میلی‌متر)

R_{day} : بارش روزانه (میلی‌متر)

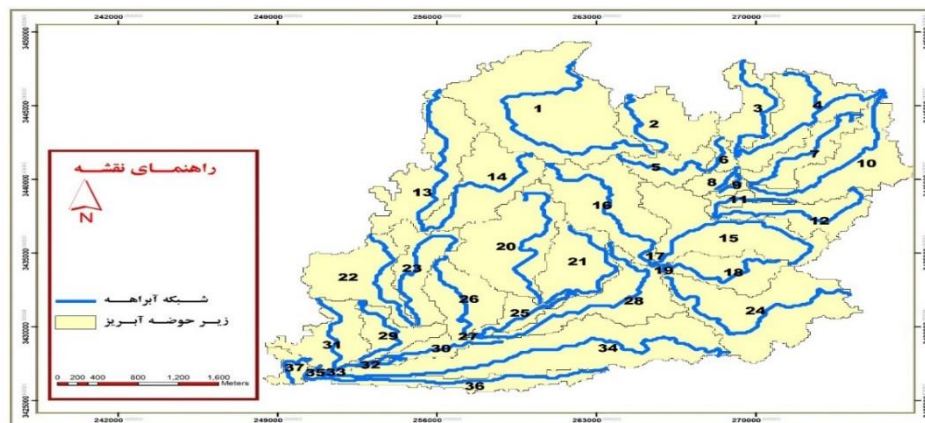
روش پنمن - موتیث فائو، با تعریف گیاه مرجع به عنوان یک گیاه فرضی با ارتفاع ۰/۱۲ متر و مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتابش (آلبیدو) ۰/۲۳ که تبخیر آن شباهت زیادی به تبخیر از سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و با دسترسی به آب کافی دارد، توسعه یافت. این روش کاستی‌های پیشین را رفع و مقادیر آب مصرفی گیاهان را به داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح جهان نزدیک‌تر کرد (Babaei et al., 2022). تبخیر و تعرق مرجع با روش پنمن - موتیث فائو به صورت رابطه (۱) برآورد می‌شود:

(۲)

ساختار مدل SWAT

Q_{gw} : جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه (میلی متر).
حوضه آبریز مورد مطالعه شامل ۳۷ زیر حوضه و ۲۸۵ پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) می باشد (شکل ۳).

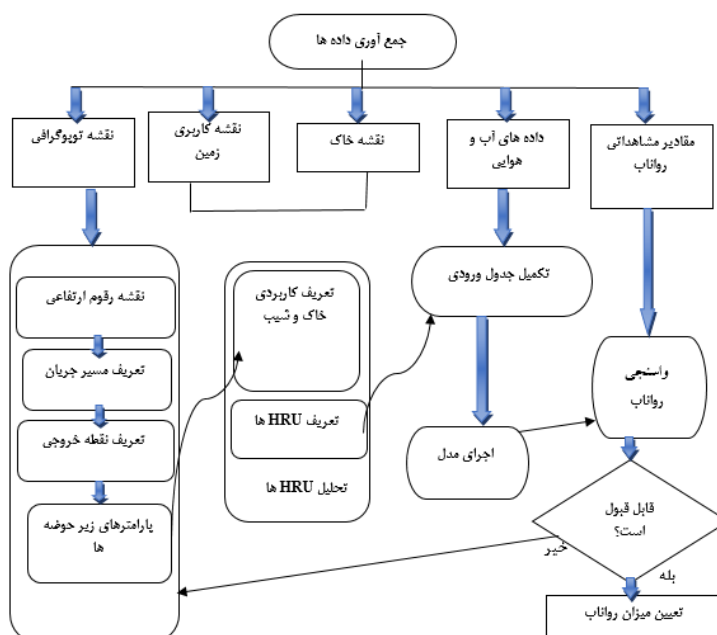
Q_{surf} : رواناب سطحی (میلی متر)
 E_a : تبخیر و تعرق واقعی (میلی متر)
 W_{seep} : آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیراشباع وارد می شود (میلی متر)



شکل ۳ - موقعیت زیر حوضه های مورد مطالعه

شبیه سازی عملکرد محصول، تأثیر طیف گسترده ای از عواملی مانند متغیرهای هواشناسی، گیاهی و کشاورزی را در نظر می گیرد. برای شبیه سازی تبخیر و تعرق واقعی هم مراحل رشد محصول به مدل معرفی می شوند و مدل قبل از برآورد تبخیر از خاک و تعرق از گیاه، میزان تبخیر از آب ذخیره شده در پوشش گیاهی را بر اساس شاخص سطح برگ (LAI) که تابعی از گرمای رسیده به محصول در طی دوره رشد آن است، محاسبه می کند (Neitsch et al., 2011). از آنجایی که فرآیند کاملی جهت محاسبه متغیرهای هیدرولوژیکی و گیاهی در مدل SWAT انجام می پذیرد، سعی شده تا در قالب نمودار به طور خلاصه، به آن ها پرداخته شود. ساختار و ترتیب مراحل محاسبه تبخیر و تعرق، شبیه سازی و واسنجی تبخیر و تعرق و عملکرد محصول در مدل SWAT به صورت جداگانه، در شکل (۵) قابل مشاهده است. به دلیل وابستگی متغیرهای گیاهی، عملکرد و تبخیر و تعرق، شبیه سازی و واسنجی آن ها، به طور هم زمان و مطابق با حلقه بخش سوم از شکل (۵) انجام می شود. این حلقه تا زمانی تکرار می شود که مقادیر شبیه سازی شده تبخیر و تعرق و عملکرد محصول با مقادیر مشاهداتی آن ها (ارقام موجود در سند ملی آب، گزارش های وزارت نیرو و جهاد کشاورزی، در شرایط نبود تنش آبی)، همخوانی مطلوب داشته باشد. در حوضه آبریز کارون، گندم محصول استراتژیک حوضه است که برای شبیه سازی عملکرد این محصول، اطلاعات مندرج در مستندات موجود به صورت جدول (۳) به SWAT اعمال می شود.

حجم رواناب سطحی ناشی از بارندگی، یکی از متغیرهای اصلی جریان رودخانه است و مدل SWAT از روش SCS، بر اساس وضعیت بارش، توپوگرافی زمین، نوع کاربری اراضی، خاک و رطوبت پیشین خاک، برای شبیه سازی آن، استفاده می کند. همچنین از معادلات بیلان برای تعیین میزان مشارکت آب زیرزمینی و روابط تجربی برای برآورد ذوب برف، استفاده و میزان کل رواناب را محاسبه می کند (Hooghoudt, 1940). به دلیل ملموس بودن نتایج شبیه سازی تبخیر و تعرق و کاربردی نمودن نتایج این پژوهش جهت استفاده مسئولین متولی موضوع در سطح استان، داده های بازه زمانی سال های ۱۹۷۹-۲۰۲۲ که نزدیک به زمان حال نیز می باشند و به جهت اثربخشی بیشتر این نتایج در رویکردهای تصمیم گیری، انتخاب شدند. مراحل شبیه سازی و واسنجی رواناب در مدل SWAT در شکل (۴) در دو بخش قابل مشاهده هستند. شبیه سازی تبخیر و تعرق پتانسیل در مدل SWAT، مطابق روش هارگریوز سامانی انجام خواهد شد. تبخیر و تعرق واقعی هم ارتباط مستقیمی با عملکرد محصول داشته و اساس و مراحل شبیه سازی و محاسبه آن، بر اساس حالت ساده شده از مدل رشد گیاهی EPIC و پس از تنظیم تقویم زراعی و پارامترهای مؤثر، مطابق با مستندات موجود، انجام می گیرد که در آن، رشد گیاه بر اساس گرمای روزانه تجمعی دریافتی، شبیه سازی می شود (Easterling et al., 1992). در EPIC، پتانسیل مقدار ماده تولیدی بر اساس روش مونتیت، محاسبه شده و شاخص برداشت هم برای محصول، محاسبه می شود. در این مدل، رشد گیاه بر اساس کمبود دما، آب و کود، محدود می شود. مدل SWAT در



شکل ۴- مراحل شبیه‌سازی و واسنجی رواناب در مدل SWAT

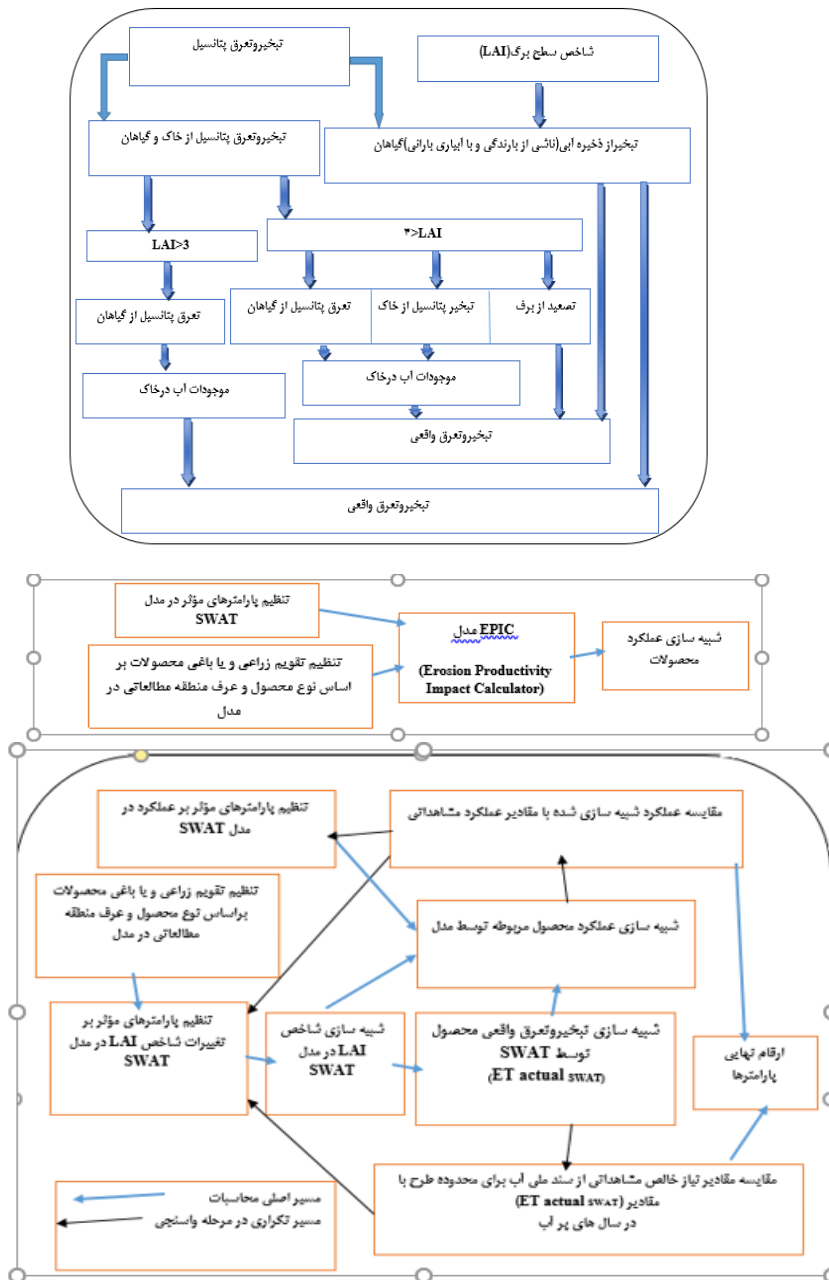
جدول ۳- اطلاعات زراعی در محدوده‌های مورد مطالعه

محدوده	سطح زیر کشت (هکتار)	تاریخ کشت	تاریخ برداشت	میزان کود مصرفی سالانه (kg/ha)	
				از ته	فسفاته
آب گنجی	۱۲۳۷۸	۱۰ مهر تا ۱۵ آبان	۱۰ اردیبهشت تا ۱۵ خرداد	۲۰۰	۲۰۰
الباجی	۷۵۸۰۰	۵ مهر تا ۱۰ آبان	۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۲۰۰	۱۵۰
اهواز	۵۴۸۶۳	۱۰ مهر تا ۱۵ آبان	۱۰ اردیبهشت تا ۱۵ خرداد	۱۵۰	۲۰۰
اهواز ملاتانی	۸۳۲۹۷	۵ مهر تا ۱۰ آبان	۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۱۵۰	۱۵۰
بستان	۱۱۲۸۵	۱۰ مهر تا ۱۵ آبان	۱۰ اردیبهشت تا ۱۵ خرداد	۲۰۰	۲۰۰
حمید	۱۳۶۵۸	۱۰ مهر تا ۱۵ آبان	۱۰ اردیبهشت تا ۱۵ خرداد	۲۰۰	۲۰۰
حمیدیه	۴۲۳۳۱	۵ مهر تا ۱۰ آبان	۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۱۵۰	۱۵۰
خاور	۱۵۴۰	۵ مهر تا ۱۰ آبان	۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۱۵۰	۱۵۰
خسروی	۸۷۵۶۹	۵ مهر تا ۱۰ آبان	۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۱۵۰	۱۵۰
خفر شرقی	۱۵۸۶۹	۱۰ مهر تا ۱۵ آبان	۱۰ اردیبهشت تا ۱۵ خرداد	۲۰۰	۲۰۰
سوسنگرد	۱۰۲۸۹	۱۰ مهر تا ۱۵ آبان	۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۲۰۰	۲۰۰
نظامیه	۳۶۹۲۴	۵ مهر تا ۱۰ آبان	۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۱۵۰	۱۵۰
هوزگان	۳۰۶۴۳	۵ مهر تا ۱۰ آبان	۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۱۵۰	۱۵۰
هویزه	۶۵۰۹	۱۰ مهر تا ۱۵ آبان	۱۰ اردیبهشت تا ۱۵ خرداد	۲۰۰	۲۰۰

مطالعه از روش SUFI-2 در برنامه از روش SWAT-CUP استفاده شده که این روش، تمام عدم قطعیت‌ها شامل عدم قطعیت ورودی‌ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده در مدل‌سازی را در نظر می‌گیرد (Abbaspour, 2011).

فرایند انجام آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

عمل واسنجی شامل تصحیح پارامترهای حساس در مدل به شکلی است که نتایج خروجی به داده‌های مشاهداتی نزدیک شود که این امر از طریق تغییر مکرر پارامترها حاصل می‌شود؛ اما از آنجائی که این عمل بسیار زمان‌بر است، نیاز به یک برنامه واسط ضروری است. بدین منظور، برنامه SWAT-CUP توسعه داده شده است. در این



شکل ۵- مراحل شبیه‌سازی و واسنجی تبخیر و تعرق و عملکرد محصول در SWAT

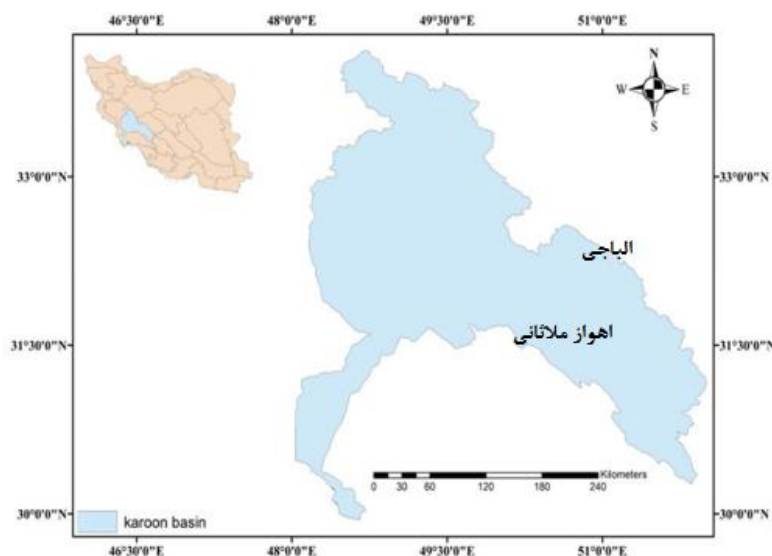
$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \overline{Q_m})(Q_{s,i} - \overline{Q_s})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \overline{Q_s})^2} \quad (3)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{N}} \quad (5)$$

که در این روابط، n تعداد مشاهدات، Q_m و Q_s به ترتیب مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآوردشده، $\overline{Q_m}$ و $\overline{Q_s}$ ترتیب میانگین مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآوردشده هستند.

پس از واسنجی مدل، نوبت به اعتبارسنجی آن می‌رسد. در اعتبارسنجی، داده‌های شبیه‌سازی شده بعد از واسنجی، در بازه زمانی متفاوتی با داده‌های مشاهداتی مقایسه می‌شوند تا قابلیت اطمینان و اعتمادپذیری به مدل مشخص گردد. برای تعیین دقت مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های آماری مختلفی همچون R^2 ، NS و RMSE استفاده شده است. (روابط (۳)، (۴) و (۵)). (Abbaspour, 2011).



شکل ۶- محدوده دو دشت اصلی (الباجی و اهواز ملاتانی)

کلاسیک بیلان انرژی به دست می‌آید. جزئیات بیشتر این مدل توسط باستیانس و همکارانش ارائه شده است، اما معادله کلی مورد استفاده سیال به صورت زیر است (Sanea et al., 2019).

$$\Delta ET = R_n - H - G \quad (۶)$$

که در این فرمول ET شار گرمای نهان برحسب (w/m^2) است. R_n تابش خالص خورشیدی است (w/m^2) ، H شار گرمای محسوس (w/m^2) و G شار گرمای زمین یا خاک (w/m^2) می‌باشد. از این فرمول این چنین استنباط می‌گردد که تابشی که از جو به سطح زمین می‌رسد به سه قسمت مجزا تقسیم می‌شود: بخشی صرف گرم کردن زمین یا خاک شده بخش دیگری صرف گرم کردن هوای مجاور سطح زمین و بقیه مقدار انرژی باقیمانده منجر به تبخیر و تفرق می‌گردد. در واقع هدف سیال، محاسبه شار گرمای نهان (ET) که همان ET واقعی محسوب می‌گردد. لازم به ذکر است که دقت واقعی نتایج حاصله برای LE یا ET است. در معادله زیر تشعشع خالص از معادله توازن انرژی سطحی زمین به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + (L_{in} - L_{out}) \quad (۷)$$

شار گرمایی خاک یا G نیز به صورت تجربی و با استفاده از معادله باستیانس و همکاران قابل برآورد است. جزئیات نحوه محاسبه پارامترها در راهنمای SEBAL آمده است که پس از تهیه داده‌های موردنیاز الگوریتم SEBAL و استفاده از روابط موجود در راهنمای SEBAL، در نرم‌افزار Erdas و Envi، میزان تبخیر و تفرق، محاسبه شده است.

الگوریتم SEBAL

سیال یک مدل پردازش تصویر است که تبخیر - تفرق و دیگر تبدیلات انرژی در سطح زمین را با استفاده از داده‌های تصاویر رقومی که توسط ماهواره‌های سنجنش از دور که تشعشعات مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی را اندازه می‌گیرند، محاسبه می‌کند. (Zare Khormizi et al., 2022). این مدل، تبخیر و تفرق گیاه را، بر اساس توازن لحظه‌ای انرژی در سطح هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای محاسبه می‌نماید که به عنوان یک روش قابل اطمینان برای تخمین تبخیر و تفرق در سطح مزرعه و منطقه به کار برده می‌شود. اساس مدل سیال، بیلان انرژی می‌باشد (Vorvani et al., 2019). سیال مدلی مبتنی بر پردازش تصویر بوده که مشتمل برای بیست و پنج مدل جهت محاسبه تبخیر و تفرق (ET) به عنوان باقیمانده بیلان انرژی سطحی زمین است. این مدل توسط باستین سن در کشور هلند معرفی و همچنین برای منطقه کوهستانی آیداهو با تکیه بر مقادیر تبخیر و تفرق اندازه‌گیری شده در سطح زمین توسعه یافته است. مدل سیال از اطلاعات تصاویر رقومی اخذ شده توسط ماهواره Landsat یا سایر سنجنده‌های سنجنش از دور که قادر به ثبت تشعشعات مادون قرمز حرارتی و همچنین تشعشعات مرئی و مادون قرمز نزدیک استفاده می‌نماید. مقدار ET در هر پیکسل (به عنوان مثال ۳۰ در ۳۰ مترمربع تصاویر TM و ETM تصاویر لندست) برای لحظه‌ای خاص که همان زمان تصویر اخذ می‌شود محاسبه می‌گردد (Sahragard et al., 2019). فرآیند محاسبه بر اساس توازن کامل انرژی استوار است که در آن مقدار ET از کسر نمودن مقدار انرژی باقیمانده معادله

نتایج و بحث

ارزیابی مدل SWAT

از مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ به منظور تعیین صحت کارایی مدل استفاده شده است. در اعتبارسنجی داده‌های اولیه با داده‌های شبیه‌سازی شده مقایسه می‌شوند تا میزان اعتبارسنجی مدل مشخص گردد. در مرحله بعد تمامی پارامترهای تأثیرگذار در اعتبارسنجی وارد شده و نتایج خروجی ذخیره شده است. یکی از این متغیرهای واسنجی شده رواناب می‌باشد که مقادیر مؤثر در آن شناسایی و اعتبارسنجی شده و بر اساس میزان وزن و اعتبارسنجی طبقه‌بندی و مشخص شده است. پس از واسنجی رواناب مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول (گندم) و تبخیر و تعرق واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت میزان تأثیرات پارامترهای مهم در شبیه‌سازی با مقادیر p-value و t-stat مشخص و امتیازبندی شده است. هر پارامتری که قدر مطلق بیشتر و کمتری داشته باشد، از مؤثرترین پارامترها به شمار می‌رود. در جدول (۴) و (۵) پارامترهای تأثیرگذار در رواناب و عملکرد محصول به ترتیب میزان حساسیت آورده شد است. تغییرات سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT در ایستگاه‌های هیدرومتری هم به صورت شکل (۶) است.

داده‌های مورد استفاده مدل SWAT از سال ۱۹۷۹ الی ۲۰۲۲ و شامل مقادیر بارش، دما، زاویه و جهت تابش، سرعت و جهت باد، رطوبت خاک تهیه و تأمین، شده است. از سال ۱۹۷۶ تا سال ۱۹۷۹ به عنوان دوره گرم شدن (Warm Up) مدل در نظر گرفته شده است و پس از اجراء مدل خروجی آن برای سال مورد مطالعه ذخیره شده تا برای انجام عملیات واسنجی و اعتبارسنجی به نرم‌افزار SWAT-CUP انتقال داده شود و با استفاده از الگوریتم SUFI_2، مقادیر پارامترها به دست آید. عمل واسنجی شامل تصحیح پارامترهای حساس در مدل به شکلی است که نتایج مدل به داده‌های مشاهداتی و اولیه شبیه‌تر باشد. به منظور جلوگیری از غیریکنواختی پارامترها از برنامه SWAT-CUP استفاده شده است. با استفاده از برنامه SWAT-CUP مدل مفهومی داده‌ها، داده‌های اندازه‌گیری، میانگین-گیری وزن دار و اعتبارسنجی و اعتبارسنجی پارامترها محاسبه می‌شود. در ابتدا، مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۷ و پارامترهای مؤثر بر دبی به نرم‌افزار، معرفی و محدوده تغییرات استاندارد برای هر کدام تعیین می‌شوند. در مرحله اعتبارسنجی

جدول ۴ - پارامترهای تأثیرگذار در رواناب

نام پارامتر	مفهوم پارامتر	P-Value	t-State	محدوده نهایی و مقدار واسنجی شده
OV_N. hru	مقدار ضریب مانینگ برای جریان سطحی (بی‌بعد)	۱,۳۰	-۰/۳۵	۴-۲۵
RCHR_ DP.gw	کسر نفوذ آبخوان عمیق	۰,۲۵	-۰/۷۶	۰/۱۰-۰/۴۹
ALPHA_BF.gw	ضریب پاسخ جریان پایه برای آب زیرزمینی (در روز)	۰,۷۴	-۰/۵۰	۰/۲۵-۰/۸۲
LAT_TTIMF.hru	بازده زمانی جریان جانبی (روز)	-۰/۹۳	-۰/۳۹	-۲/۵۹-۱۰۵/۶۵
GWQMN.gw	حداقل ارتفاع سطح ایستابی لازم برای خروج آب (میلی‌متر)	-۰/۵۹	-۰/۵۸	۱۸۰۴-۲۰۳۸
SOL_K (1) sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی (میلی متر در ساعت)	-۰/۴۵	-۰/۷۵	-۱/۱۵-۰/۲۹
SOL_AWC (1).sol	ضریب آب قابل دسترس خاک در لایه سطحی (میلی‌متر در متر)	۲/۱۱	-۰/۱۹	-۰/۶-۰/۶۰
PLAPS.sub	نرخ ریزش بارش (میلی‌متر بر کیلومتر)	۱	-۰/۴	-۲۲۷-۶۵
ESCO.hru	ضریب جبران تبخیر خاک (بدون بعد)	-۰/۲۹	-۰/۷۵	-۰/۴۳-۱/۲
SLSUBBSN.hru	متوسط طول شیب (متر)	۱/۴۵	-۰/۲۲	۱۱-۴۹
HRU_SLP.hru	متوسط شیب (متر بر متر)	-۰/۸۳	-۰/۴۱	۰/۲۶-۰/۷۵
GW_DELAY.gw	زمان تأخیر نفوذ آب به سطح ایستابی (روز)	-۰/۰۳	-۰/۹۳	۰/۲۶-۰/۷۵
CH_N2.rte	ضریب مانینگ رودخانه اصلی (بی‌بعد)	-۰/۳۵	-۰/۸۴	۰/۰۴-۰/۱۳
CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در رودخانه اصلی (میلی‌متر در ساعت)	-۰/۶۹	-۰/۴۹	۱/۵۲-۷/۲۳
REVAPMN.gw	عمق آستانه آب در آبخوان کم‌عمق برای پوشش یا نفوذ به آبخوان عمیق (میلی‌متر)	-۰/۶	-۰/۵۴	۱۳۵/۵۲
SOL_BD (1).sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی (گرم در سانتی‌متر مکعب)	-۰/۳۹	-۰/۵۴	-۰/۲۴
CN2.mgt	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی (بی‌بعد)	-۰/۵۳	-۰/۶۹	۷۲/۳۳

جدول ۵ - پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصول

نام پارامتر	مفهوم پارامتر	t-State	P-value	مقدار واسنجی شده
BIO_LEAF.plant.dat	کسری تبدیل شده از زیست توده تجمعی در هر سال به باقیمانده در زمان نهفتگی	۰/۴۹	۰/۶۸	۰/۸۵
VPDFR.plant.dat	کمبود فشار بخار مرتبط با دومین نقطه روی منحنی هدایت روزنه‌ای (کیلو پاسکال)	۰/۶	۰/۶۴	۵
GSI (19).plant.dat	حداکثر هدایت روزنه‌ای در تابش بالای خورشید و کمبود فشار بخار (متر)	۱/۰۶	۰/۳۵	۶
BIO_E.plant.dat	راندمان استفاده از تابش خورشیدی (کیلوگرم بر هکتار)	-۱/۰۸	۰/۳۲	۷۲
EXT_COEF.plant.dat	ضریب جذب نور برای گیاهان مختلف (بی بعد)	-۱/۳۰	۰/۳۷	۴
T_OPT.plant.dat	دمای بهینه برای رشد گیاهان مختلف (سانتی‌گراد)	-۱/۱۶	۰/۲۵	۲۳
T_BASE.plant.dat	حداقل دمای لازم برای رشد گیاهان مختلف (سانتی‌گراد)	۱/۳۱	۰/۲۴	۲
LAIMX2.plant.dat	در منحنی رشد شاخص سطح برگ شاخص سطح برگ متناظر با FRGRWI (مترمربع در مترمربع)	۱/۳۸	۰/۱۵	۰/۹۳
FRGRW2.plant.dat	نسبتی از طول دوره رشد گیاه که مربوط به نقطه دوم در منحنی رشد شاخص سطح برگ است (بی بعد)	-۱/۴۷	۰/۱۸	۰/۴۸
LAIMX1.plant.dat	در منحنی رشد شاخص سطح برگ شاخص سطح برگ متناظر با FRGRWI (مترمربع در مترمربع)	-۱/۴۱	۰/۱۶	۰/۲۲
FRGRW1.plant.dat	نسبتی از طول دوره رشد گیاه که مربوط به نقطه اول در منحنی رشد شاخص سطح برگ است (بی بعد)	۰/۷۸	۱/۱۲	۰/۲۰
DLAL.plant.dat	کسری از دوره رشد که در آن روند رو به کاهش شاخص سطح برگ شروع می‌شود (بی بعد)	۱/۸۹	۰/۰۶	۱
HVSTI.plant.dat	شاخص برداشت (بی بعد)	-۴/۰۹	۰/۰۰۷	۱
BLAL.plant.dat	حداکثر شاخص سطح برگ پتانسیل در طول دوره رشد گیاه (مترمربع/مترمربع)	-۳/۷۸	۰/۰۰۲	۸

جدول ۶ - مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحله اعتبارسنجی و اعتبارسنجی

نوع مرحله	عنوان شاخص	مقادیر به دست آمده در هر ایستگاه					
		آب گنجی	اهواز	حمید	خسروی	دانشگاه شهید چمران اهواز	عمره
پیش واسنجی	R ²	-۰/۰۶	-۰/۰۷	-۰/۰۵	-۰/۰۸	-۰/۱۲	-۰/۰۶
	NS	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۶۰	۰/۵۴
	RMSE(m ³ /s)	۲۲/۲۶	۱۹/۵۰	۲۰/۰۷	۴۱	۳۵/۰۳	۴۵
واسنجی	R ²	۰/۶۴	۰/۶۷	۰/۵۴	۰/۶۰	۰/۷۱	۰/۵۵
	NS	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۵۴	۰/۵۷	۰/۶۸	۰/۵۲
	RMSE(m ³ /s)	۱۷/۲۶	۱۲/۵۰	۱۲/۵۰	۳۲	۱۶/۰۸	۲۴/۹۶
اعتبارسنجی	R ²	۰/۶۰	۰/۶۳	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۶۵	۰/۵۱
	NS	۰/۵۸	۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۶۵	۰/۵۰
	RMSE(m ³ /s)	۱۲/۶۳	۱۲/۶۳	۱۲/۰۳	۱۳/۱۱	۱۶/۰۳	۲۳/۲۳

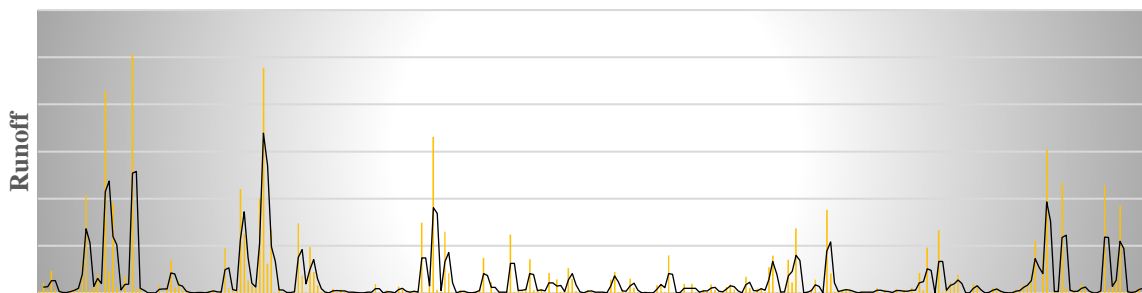
بر درستی نتایج، صحنه بگذارند. در شکل شماره ۷، محدوده‌ی هیدرو گراف‌های خروجی متناظر با جواب‌های بهینه موجود، برای کل دوره واسنجی نشان داده شده است؛ به این صورت که به ازای هر زمان، مقادیر حداقل و حداکثر دبی شبیه‌سازی شده متناظر با مجموعه‌ی نقاط تعریف شده، محاسبه شده و فاصله آن‌ها به صورت کاملاً ملموس در شکل ۶ ارائه شده است. لازم به توضیح است که هر نقطه از رویه

بررسی نمودارها و مقادیر ارائه شده شاخص‌ها، نشان می‌دهد که مدل مقادیر رواناب را به خوبی شبیه‌سازی نموده است. دقت مدل در برآورد عملکرد محصول نیز در جدول (۷) ارائه شده است. مشابه هر شبیه‌سازی‌ای که انجام می‌شود، بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، اختلافاتی وجود دارد اما نکته مهم این است که انحراف به سمت خاصی رخ ندهد (Unbiased) و معیارهای آماری،

الگوریتم SEBAL و مدل SWAT، مقادیر به‌دست‌آمده ماه‌های مختلف از سه سال مدنظر با یکدیگر مقایسه شده است. یک نمونه از این روند برای دشت اهواز در شکل (۸) قابل مشاهده است. لذا همبستگی نتایج حاصل از دو روش در این دشت، برابر با ۰/۷۸ می‌باشد که همخوانی مطلوب نتایج دو روش با یکدیگر را نشان می‌دهد.

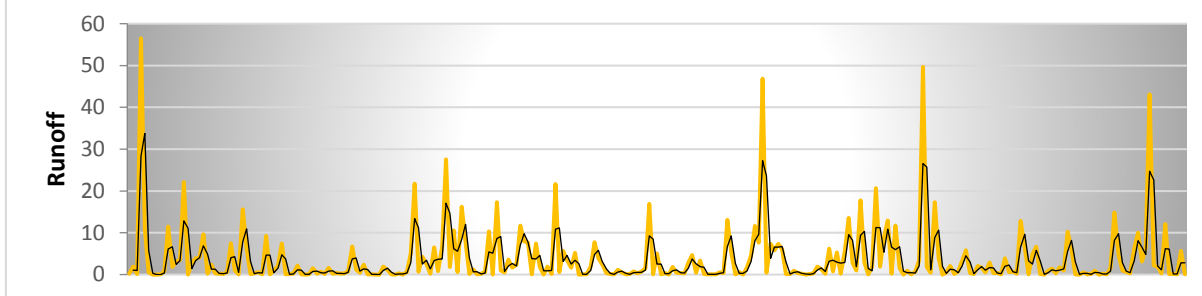
تعریف شده متناظر با یک سری از متغیرهای تصمیم مسئله (۶ پارامتر سراسری مدل) SWAT و یک مقدار دبی جریان در خروجی حوضه است. بررسی نتایج شکل (۷) و جدول (۷) حاکی از کارایی خوب مدل است. برای مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده توسط

ایستگاه اهواز



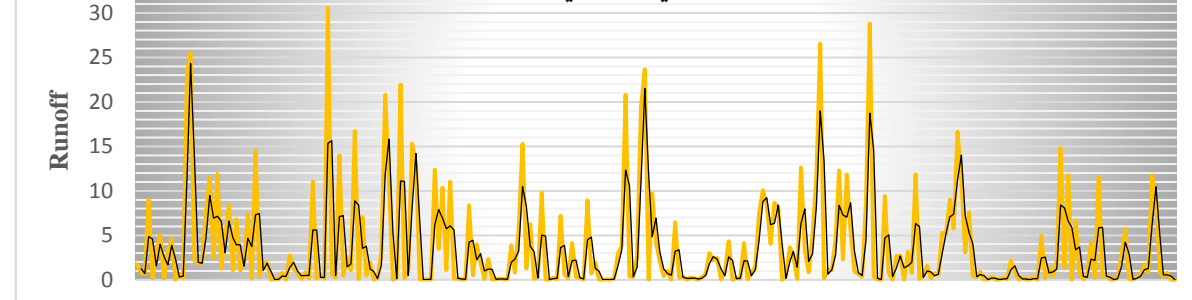
رواناب مشاهداتی شبیه‌سازی شده ایستگاه اهواز (محور افقی از ژانویه ۱۹۸۰ تا دسامبر ۲۰۲۱ و محور عمودی: رواناب (مترمکعب بر ثانیه))

ایستگاه آب گنجی

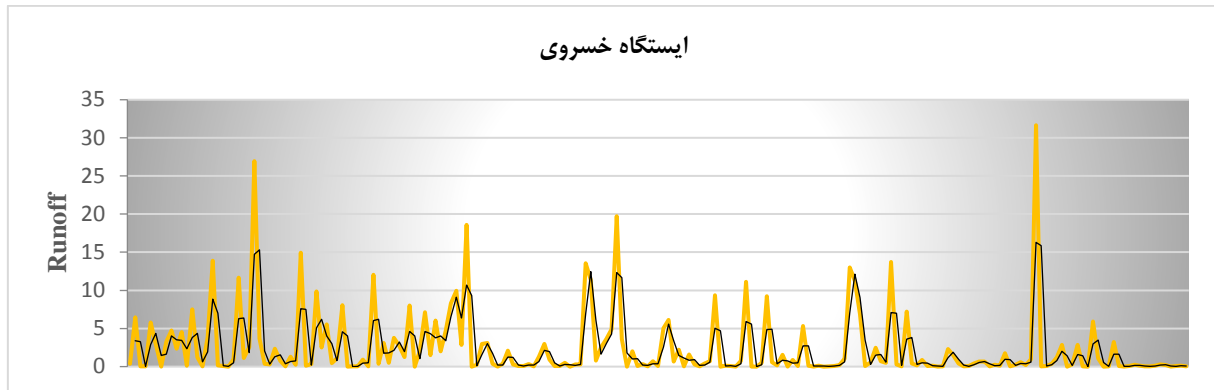


رواناب مشاهداتی شبیه‌سازی شده ایستگاه آب گنجی (محور افقی از ژانویه ۱۹۸۰ تا دسامبر ۲۰۲۱ و محور عمودی: رواناب (مترمکعب بر ثانیه))

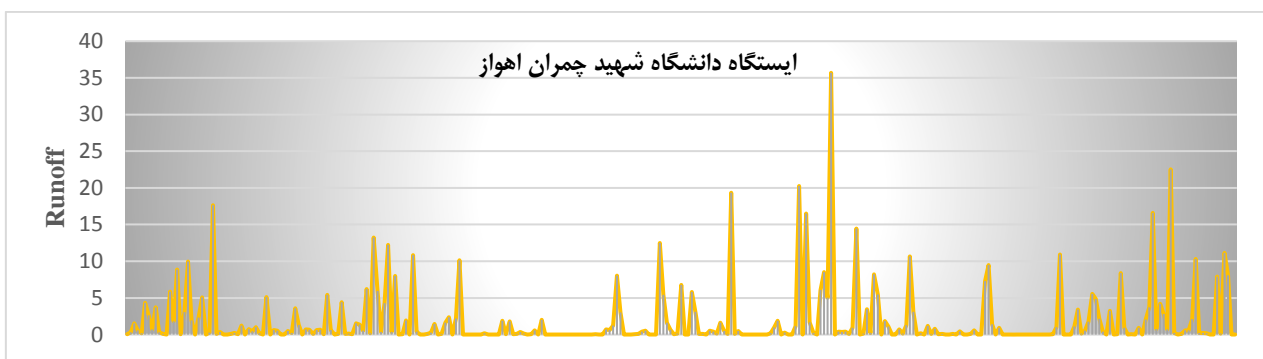
ایستگاه حمید



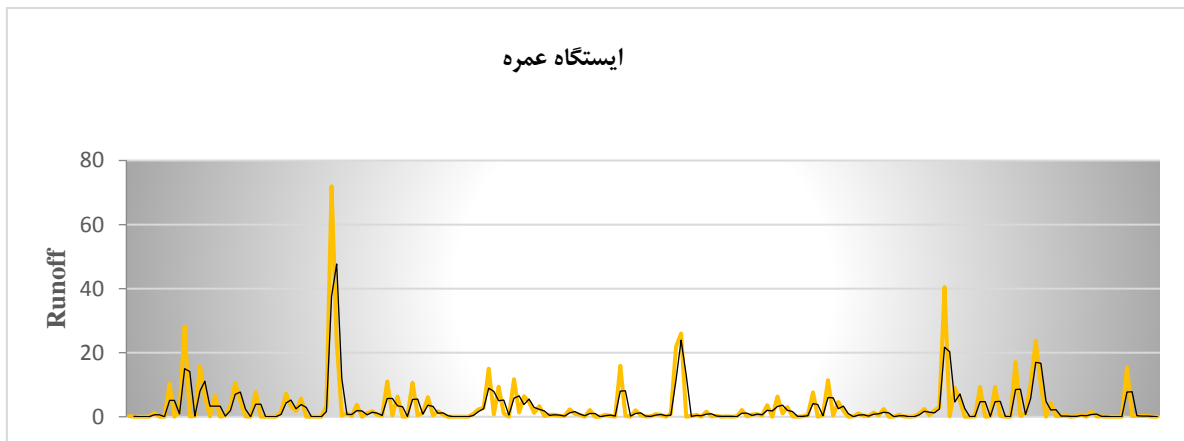
رواناب مشاهداتی شبیه‌سازی شده ایستگاه حمید (محور افقی از ژانویه ۱۹۸۰ تا دسامبر ۲۰۲۱ و محور عمودی: رواناب (مترمکعب بر ثانیه))



رواناب مشاهداتی شبیه‌سازی شده ایستگاه خسروی (محور افقی از ژانویه ۱۹۸۰ تا دسامبر ۲۰۲۱ و محور عمودی: رواناب (مترمکعب بر ثانیه))



رواناب مشاهداتی شبیه‌سازی شده دانشگاه شهید چمران اهواز (محور افقی از ژانویه ۱۹۸۰ تا دسامبر ۲۰۲۱ و محور عمودی: رواناب (مترمکعب بر ثانیه))



رواناب مشاهداتی شبیه‌سازی شده ایستگاه عمره (محور افقی از ژانویه ۱۹۸۰ تا دسامبر ۲۰۲۱ و محور عمودی: رواناب (مترمکعب بر ثانیه))
شکل ۷- رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه‌های هیدرومتری (مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در مراحل واسنجی و صحت سنجی رواناب، در جدول (۶) آمده است)

روش‌های SEBAL و SWAT به‌دست آمده، بر اساس دشت و وضعیت سال آبی، در شکل (۹) با یکدیگر مقایسه شده است.

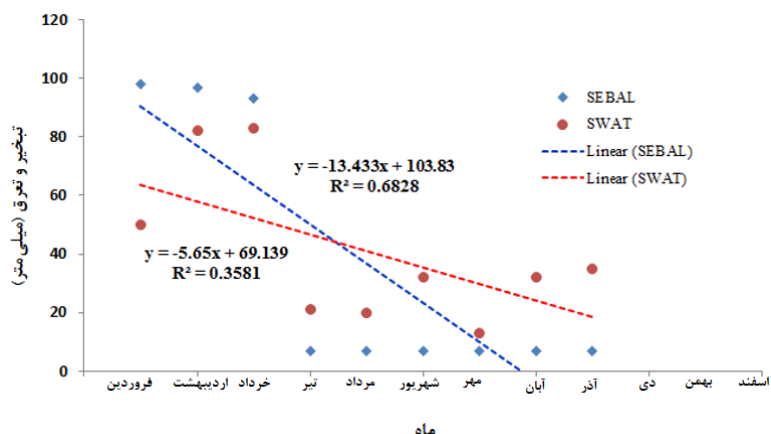
در گام بعدی از این تحقیق، چهار دشت که در شمال غربی (اهواز)، شرق (اهواز ملاثانی)، شمال شرقی (حمیدیه) و جنوب حوضه (سوسنگرد) واقع شده‌اند، انتخاب و مقادیر تبخیر و تعرق آن‌ها که از

جدول ۷ - مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول

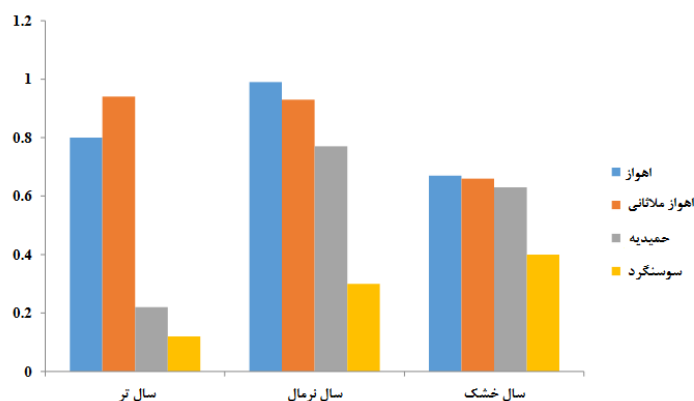
نام محدوده	مقادیر مشاهداتی (تن در هکتار)	مقادیر شبیه‌سازی شده (تن در هکتار)	نام محدوده	مقادیر مشاهداتی (تن در هکتار)	مقادیر شبیه‌سازی شده (تن در هکتار)
آب گنجی	۴/۵۰	۴/۸۰	خاور	۳/۸۵	۲/۵۵
الباجی	۳/۹۸	۳/۵۴	خسروی	۴/۱۷	۵/۷۶
اهواز	۳/۴۰	۳/۲۲	خفر شرقی	۳/۵۰	۴/۵۰
اهواز ملاتانی	۵/۴۰	۵/۷۳	سوسنگرد	۵/۲۰	۶/۷۰
بستان	۳/۱۵	۳/۸۰	نظامیه	۴/۸۵	۳/۵۰
حمید	۵/۶۵	۵/۲۳	هوزگان	۳/۲۰	۴/۷۰
حمیدیه	۴/۴۵	۳/۵۵	غزال کوپال	۴/۳۰	۶/۷۰
عمره	۸/۳۵	۱۰/۴۵	هویزه	۷/۸۰	۹/۲۰

متوسط عملکرد

مشاهداتی (تن در هکتار): ۵,۴۱ شبیه‌سازی شده (تن در هکتار): ۵,۹۹



شکل ۸ - مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از مدل SWAT و الگوریتم SEBAL در دشت اهواز (سال آبی نرمال)



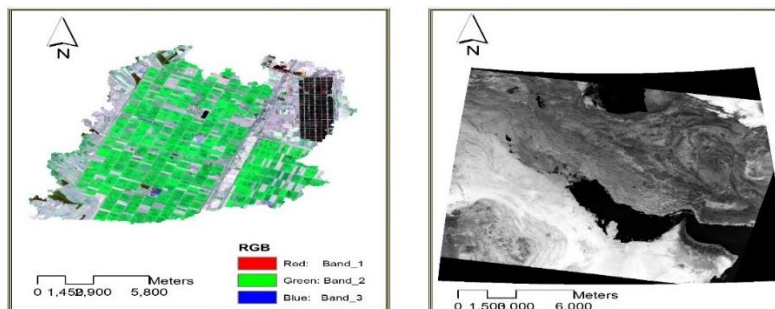
شکل ۹ - مقایسه همبستگی مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از مدل SWAT و الگوریتم SEBAL در دشت‌های حوضه آبریز

می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل SWAT و الگوریتم SEBAL در سال نرمال آبی، نسبت به سال تر و خشک، به یکدیگر نزدیک تر بوده و می‌توانند، نزدیک به مقدار واقعی، باشند.

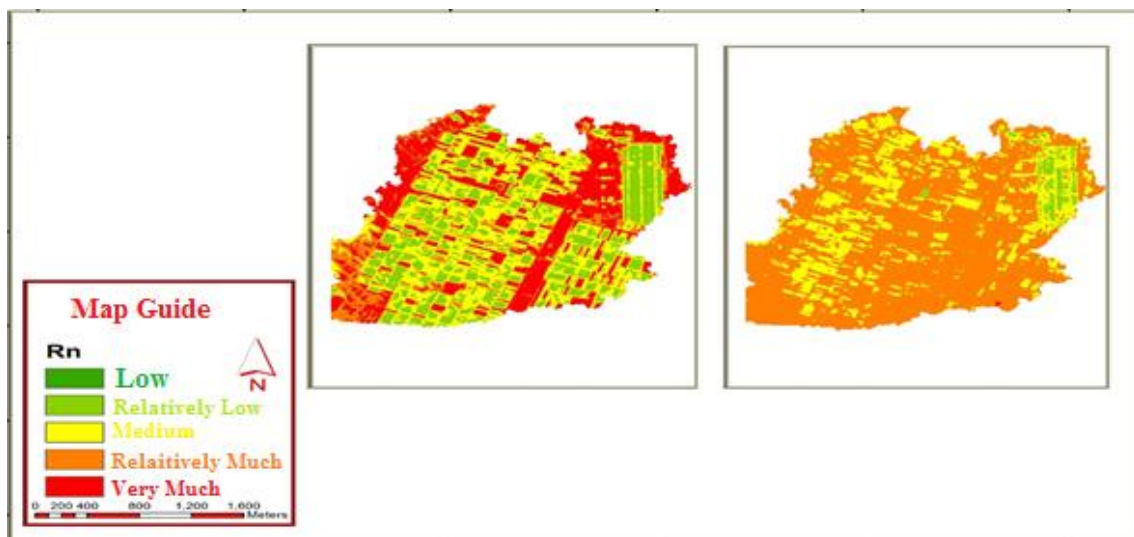
با توجه به شکل (۹)، همبستگی میان نتایج حاصل از مدل SWAT و الگوریتم SEBAL، بر اساس وضعیت سال آبی، در سال نرمال، تر و خشک، به ترتیب، ۰/۷۲، ۰/۵۸ و ۰/۴۹ می‌باشد؛ بنابراین،

مناسب خواهند بود. دشت الباجی دارای سطح زیر کشت بالاتر و تغییرات توپوگرافی کمتر است و شبیه‌سازی عملکرد محصول توسط نرم‌افزار SWAT، در دشت اهواز ملاثاتی هم نتیجه بهتری به دست داده است. همچنین، دلیل انتخاب زمان‌های فوق‌الذکر، عدم وجود ابر در تصاویر، رشد حداکثر محصول و همچنین وجود داده‌های زمینی از منطقه مورد مطالعه در تاریخ‌های مورد نظر می‌باشد. برای انجام عملیات مربوط به رابطه SEBAL، پارامترهای مختلفی استفاده می‌شود. در ادامه، به ارائه نقشه‌های مربوط به پارامترهای اصلی در معادله SEBAL، پرداخته شده است. روابط مربوط به پارامترها هم در راهنمای فوق‌الذکر، آورده شده است.

در مرحله پایانی این پژوهش، پس از مقایسه نتایج به دست آمده در بخش قبل، دقت نتایج الگوریتم SEBAL، به کارگیری تصاویر سنجنده OLI از ماهواره لندست ۸ در دشت الباجی برای سال ۲۰۲۰ (شکل ۱۰) و سنجنده MODIS در دشت اهواز ملاثاتی برای همان سال (شکل شماره ۱۱) بررسی شده است. تصاویر مادیس، به دلیل قدرت تفکیک زمانی مناسب روزانه، برای بررسی وضعیت تبخیر و تعرق روزانه مزارع کشاورزی مناسب می‌باشند و تصاویر Landsat ۸ هم اگرچه قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روزه دارند، اما با قدرت تفکیک مکانی مناسب ۳۰ متر در باندهای طیفی و ۶۰ متر در باندهای حرارتی، به جهت تفکیک بهتر مزارع کشاورزی،



شکل ۱۰ و ۱۱- تصویر مادیس (سمت راست) و لندست (سمت چپ) در تاریخ ۲۰۲۰ (نرمال)



شکل ۱۲- شار تابش خالص سطحی تصویر مادیس (سمت راست) و تصویر لندست (سمت چپ)

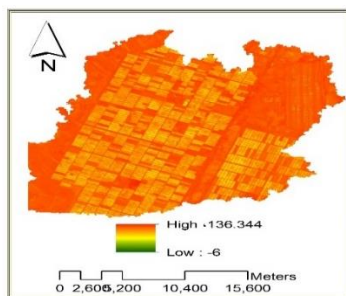
زمین‌های کشاورزی دیده نمی‌شود. این اولین مرحله از روش SEBAL را تکمیل می‌کند. در مرحله دوم روش SEBAL برای اینکه بتوانیم میزان انرژی باقی مانده برای تبخیر و تعرق را محاسبه کنیم باید معادلات G و H را به دست آوریم. شار تابش خالص (R_n) در رابطه (۸) مقدار خالص انرژی تابشی در سطح است که برای گرم کردن خاک، گرم کردن هوا یا تبخیر رطوبت خاک در دسترس

محاسبه شار تابشی کل (R_n)

اختلاف تابش ورودی و بازتابی از سطح زمین، شار تابشی کل نامیده می‌شود و میزان آن، به عوامل زیادی بستگی دارد. در ادامه نقشه آن، آورده شده است. مقادیر R_n بسته به سطح می‌تواند از ۱۰۰ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع متغیر باشد. مقادیر منفی ایجاد شده در شکل (۱۲)، به دلیل خطای مدل در برخی از پیکسل‌های تصویر است که این خطا در

$$G/R_n = T_s/\alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - .98NDVI^4) \quad (10)$$

مقادیر G باید با اندازه‌گیری‌های واقعی روی زمین بررسی شوند. طبقه‌بندی زمین و نوع خاک بر مقدار G تأثیر می‌گذارد و یک نقشه کاربری زمین برای شناسایی انواع سطوح مختلف ارزشمند است. تخمین G/R_n برای سطوح مختلف متفاوت می‌باشد به طوری که برای آب عمیق، زلال، برف مقدار ۰/۵، بیابان‌ها و خاک برهنه، بین ۰/۲-۰/۴ کشاورزی بین ۰/۵-۰/۱۵، یونجه پوشش کامل مقدار ۰/۴-۰/۶ و برای آب‌های کدر به دلیل جذب بیشتر تشعشعات موج کوتاه در نزدیکی سطح آب کمتر از ۰/۵ خواهد بود (Tasumi, M. Allen, R., Trezza, R. 2008). در این پژوهش مقادیر G/R_n محاسبه شده بین ۰/۰۵ تا ۰/۵ قرار گرفته است. در شکل (۱۳) نقشه پهنه‌بندی شار حرارتی خاک (G) برای سال‌های مورد مطالعه با استفاده از مدل سیال محاسبه و ذخیره شده است که مشاهده می‌کنید.



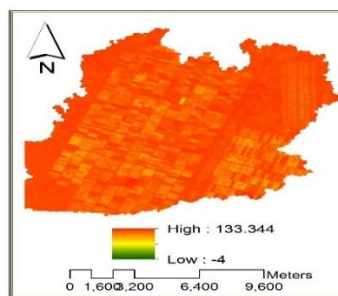
می‌باشد. این به‌عنوان معادله بودجه انرژی سطح به شرح زیر نوشته می‌شود:

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad (8)$$

دامنه تغییرات تابش خالص سطحی بین ۲۰۰-۱۰۰۰ مگاوات متغیر می‌باشد. این مقدار برای زمین‌های کشاورزی نسبت به کاربری‌های دیگر کمتر می‌باشد (فلوچارت محاسباتی تابش خالص خورشیدی، باستیانس، ۱۹۹۸).

محاسبه معادلات شار حرارتی خاک (G)

شار حرارتی خاک میزان ذخیره گرما در خاک و پوشش گیاهی به دلیل هدایت گرمایی را نشان می‌دهد. SEBAL ابتدا نسبت G/R_n را با استفاده از معادله تجربی زیر که توسط Bastiaanssen (۲۰۰۰) ارائه شده است محاسبه می‌کند که مقادیر نزدیک به ظاهر را نشان می‌دهد:



شکل ۱۳ - نقشه پهنه‌بندی شار حرارتی خاک تصویر مادیس (سمت راست) و تصویر لندست (سمت چپ)

۱۲۰ متر × ۱۲۰ متر برای لندست ۴ و ۵). کیفیت محاسبات ET در SEBAL به انتخاب دقیق این دو پیکسل بستگی دارد.

با توجه به شکل (۱۳) مقادیر بیشینه شار حرارتی خاک برای تصویر مادیس و لندست به ترتیب ۱۳۳ و ۱۳۶ می‌باشد.

محاسبه معادلات شار حرارتی محسوس (H)

شار حرارتی محسوس میزان اتلاف حرارت به هوا توسط همرفت و هدایت به دلیل اختلاف دما را نشان می‌دهد. برای انتقال حرارت از معادله زیر استفاده می‌شود:

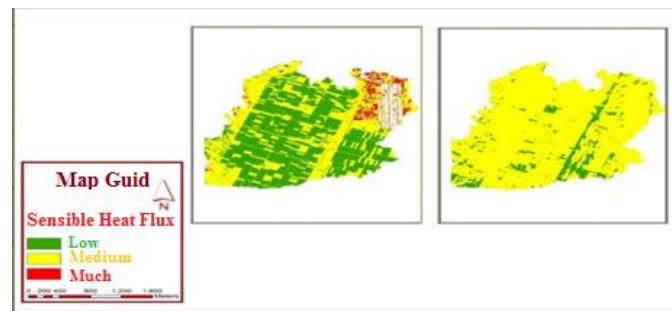
$$H = (\rho \times c_p \times dT) / r_{ah} \quad (11)$$

الگوریتم SEBAL از دو پیکسل "لنگر" برای تثبیت شرایط مرزی برای تعادل انرژی استفاده می‌کند. این‌ها پیکسل‌های "گرم" و "سرد" هستند و در ناحیه موردنظر قرار دارند. پیکسل "سرد" به‌عنوان یک بخش مرطوب برای سطح محصول آبیاری شده با پوشش کامل زمین توسط پوشش گیاهی انتخاب می‌شود. دمای سطح و دمای هوای نزدیک به سطح در این پیکسل مشابه فرض می‌شود. پیکسل "گرم" به‌عنوان یک پیکسل خشک انتخاب می‌شود، زمین‌های کشاورزی هستند که ET در آن‌ها صفر فرض می‌شود. این دو پیکسل "لنگر" باید در مناطق بزرگ و همگنی قرار گیرند که بیش از یک باند ۶ پیکسلی دارند. (یعنی ۶۰ متر × ۶۰ متر برای لندست ۷ و

تبخیر و تعرق واقعی

تبخیر و تعرق واقعی در لحظه گذر ماهواره و پس از محاسبه مقادیر مجهول در معادله توازن انرژی، به دست می‌آید. مقادیر مجهول همان‌طور که قبلاً اشاره شد شامل $R_n = G + H + \lambda ET$ می‌باشد. در ادامه با استفاده از مدل سیال میزان تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه محاسبه شده است.

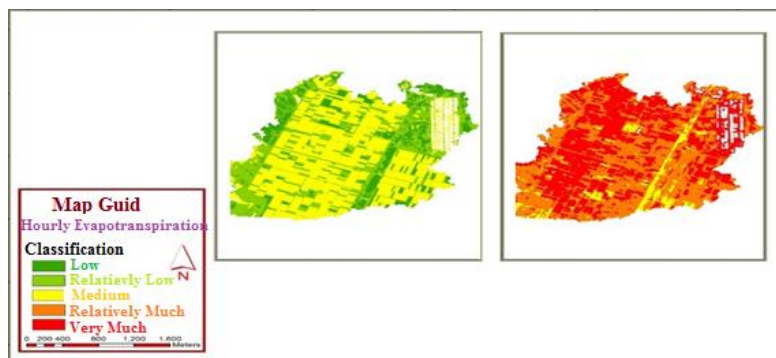
بر اساس شکل (۱۵)، تبخیر و تعرق ساعتی به‌دست‌آمده در دشت اهواز ملاثانی و الباجی تقریباً نزدیک به هم می‌باشند. میزان بیشینه و کمینه تبخیر تعرق واقعی ساعتی به‌دست‌آمده بر اساس تصویر مادیس در دشت اهواز ملاثانی به ترتیب ۰/۷۵- و ۱/۶۳۱ و بر اساس تصویر لندست در دشت الباجی به ترتیب ۰/۴۶- و ۱/۴۲۳ می‌باشد که نزدیک به هم می‌باشند. بر اساس الگوریتم SEBAL، مقادیر منفی به دلیل خطای مدل در برخی از پیکسل‌های تصویر بوده و مقادیر بالاتر از ۱ می‌توانند مربوط به محصولات دشت باشند.



شکل ۱۴- نقشه شار گرمای محسوس تصویر مادیس (سمت راست) و تصویر لندست (سمت چپ)

جدول ۸- مشخصات پیکسل‌های سرد و گرم

Landsat	
پیکسل سرد	پیکسل گرم
شار گرمای خاک = ۵۹/۳۸	شار گرمای خاک = ۱۲۰,۳۳
شار گرمای نهان = ۵۱۰/۴۹	شار گرمای نهان = ۴۴۰/۴۲۳
LST = ۳۰۱	LST = ۳۱۸
NDVI = 0.78	NDVI = ۰/۲۲
۴۸۵۳۵۷/۲۳X =	۴۸۳۲۲۵/۲۳X =
۳۶۶۳۳۷/۲۳Y =	۳۶۴۴۲۹/۳۱ Y =
MODIS	
پیکسل سرد	پیکسل گرم
شار گرمای خاک = ۸۳/۴۵	شار گرمای خاک = ۸۴/۳۲
شار گرمای نهان = ۵۴۰/۲۳	شار گرمای نهان = ۴۲۰/۱۲
LST = 302	LST = ۲۹۹
NDVI = ۰/۴۲	NDVI = ۰/۱۵
۴۹۶۲۵۷/۱۳X =	۴۳۲۳۷/۵۳X =
۳۵۷۴۲/۳۱ Y =	۳۵۲۴۲/۳۱ Y =



شکل ۱۵- نقشه تبخیر تعرق واقعی ساعتی تصویر مادیس (سمت راست) و تصویر لندست (سمت چپ)

تبخیر و تعرق روزانه

همان‌طور که گفته شد میزان تبخیر و تعرق واقعی پس محاسبه مقادیر مجهول در معادله توازن انرژی، محاسبه می‌شود؛ که مقادیر مجهول در معادلات الگوریتم سیال، شار تابش خالص (R_n) و شار

تابش محسوس (H) و شار گرمای خاک (G) و شار گرمای نهان تبخیر لحظه‌ای می‌باشد. در ادامه تبخیر و تعرق روزانه محاسبه می‌شود. مقادیر تبخیر و تعرق روزانه (ET_{24}) معمولاً از تبخیر و تعرق ساعتی (ET_h) مفیدتر و کارآمدتر می‌باشد. تبخیر و تعرق روزانه

(ET₂₄) از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$ET_{24} = ETRF \times ET_{r-24} \quad (12)$$

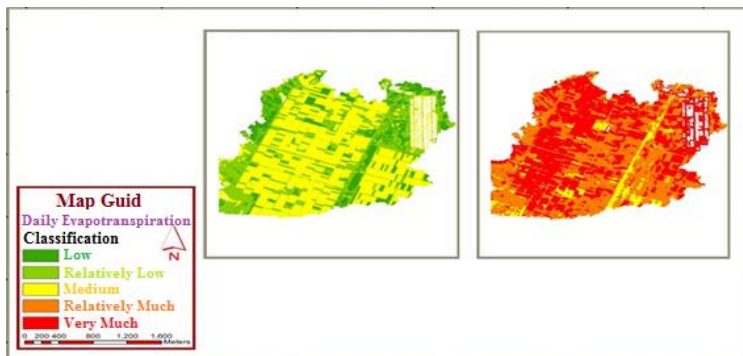
در شکل (۱۶) اطلاعات خروجی تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته در سال مورد مطالعه آورده شده است.

با توجه به شکل (۱۶) میزان بیشینه و کمینه تبخیر تعرق واقعی روزانه به دست آمده بر اساس تصویر مادیس ۳/۱۷ و لندست ۱۴/۲۶ می‌باشد. در محاسبات، تبخیر و تعرق روزانه نسبت به تبخیر و تعرق

لحظه‌ای، کاربرد بیشتری دارد.

مقایسه نتایج الگوریتم SEBAL و مدل SWAT:

در این بخش نتایج تبخیر و تعرق واقعی مدل SEBAL و SWAT با همدیگر مقایسه شده‌اند. این مقایسه بر مبنای مقادیر کمی و نقشه‌های پهنه‌بندی بوده است.



شکل ۱۶- نقشه تبخیر تعرق واقعی روزانه

جدول ۹- مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی مدل SEBAL و SWAT

سال	فصل	ماه	نتایج مدل SEBAL	نتایج مدل SWAT	مقایسه
سال‌های ۲۰۱۹ ۲۰۲۰ ۲۰۲۱	فصل بهار	ماه اول	تبخیر و تعرق در ماه دوم نسبت به دو ماه دیگر، بیشتر است.	تبخیر و تعرق در ماه دوم نسبت به دو ماه دیگر، بیشتر، اما بیشینه تبخیر و تعرق در ماه سوم نسبت به اول و دوم، بیشتر بوده است.	هر دو مدل عملکرد مشابهی داشته‌اند
		ماه دوم			
		ماه سوم			
سال‌های ۲۰۱۹ ۲۰۲۰ ۲۰۲۱	فصل تابستان	ماه اول	میزان تبخیر و تعرق در ماه اول از ماه‌های دوم و سوم بیشتر بوده است	میزان تبخیر و تعرق در ماه اول از ماه‌های دوم و سوم بیشتر بوده است	هر دو مدل عملکرد مشابهی داشته‌اند
		ماه دوم			
		ماه سوم			
سال‌های ۲۰۱۹ ۲۰۲۰ ۲۰۲۱	فصل پاییز	ماه اول	میزان تبخیر و تعرق در ماه اول و دوم از ماه سوم بیشتر بوده است	میزان تبخیر و تعرق در ماه سوم از ماه‌های اول و دوم بیشتر بوده است	هر دو مدل عملکرد نسبتاً مشابهی داشته‌اند
		ماه دوم			
		ماه سوم			
سال‌های ۲۰۱۹ ۲۰۲۰ ۲۰۲۱	فصل زمستان	ماه اول	میزان تبخیر و تعرق در ماه اول از ماه‌های دوم و سوم بیشتر بوده است	میزان تبخیر و تعرق در ماه اول از ماه‌های دوم و سوم بیشتر بوده است	هر دو مدل عملکرد مشابهی داشته‌اند
		ماه دوم			
		ماه سوم			
میانگین تبخیر و تعرق در سال ۲۰۱۹ مدل SEBAL، مقدار ۱۳/۱۵۸ و کمینه، ۰/۰۰۴ و بیشینه، ۳۰/۳۶۷ و در سال ۲۰۲۰، میانگین تبخیر و تعرق مقدار، ۲۳/۰۹۷۳ و کمینه، ۰/۰۰۶ و بیشینه، ۶۸/۲۲۳ و در سال ۲۰۲۱ میانگین تبخیر و تعرق مقدار ۱۹/۱۴۰ و کمینه، ۰/۰۶۸ و بیشینه، ۸۱/۹۴۸ بوده است.					
و همچنین میانگین تبخیر و تعرق در سال ۲۰۱۹ مدل SWAT مقدار ۱۰/۲۵ و کمینه، ۰ و بیشینه ۳۳/۹۳۲ و در سال ۲۰۲۰ میانگین تبخیر و تعرق مقدار، ۷/۴۵۰ و کمینه، ۰ و بیشینه ۲۵/۱۲۱ و در سال ۲۰۲۱ میانگین تبخیر و تعرق مقدار، ۱۲/۶۱۹ و کمینه، ۰ و بیشینه ۳۱/۰۰۷ بوده است					
نتیجه‌گیری: میزان تبخیر و تعرق در فصول و ماه‌ها متغیر بوده و به عوامل و پارامترهای مختلفی بستگی دارد و با توجه به اینکه مدل SWAT به منظور برآورد تبخیر و تعرق پارامترها و عوامل مختلفی از جمله پارامترهای هواشناسی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی و خاک‌شناسی و کاربری و ... را در نظر می‌گیرد به نظر می‌رسد نسبت به مدل SEBAL از کارایی و توانمندی بیشتری برخوردار می‌باشد. ولی هر دو مدل به منظور برآورد تبخیر و تعرق مناسب بوده و از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.					

نتیجه گیری

هدف این پژوهش طراحی و پیاده‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی به‌منظور برآورد دقیق تبخیر و تعرق واقعی در یکی از شاخه‌های رودخانه کارون بزرگ با استفاده از مدل‌های کاربردی SWAT و SEBAL و تکنولوژی سنسور از دور می‌باشد. به‌منظور پیاده‌سازی مدل SWAT داده‌های هواشناسی، هیدرولوژی و کاربری شامل بارش، رطوبت، دما، ساعت آفتابی، سرعت باد و طبقه‌بندی خاک در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور تعیین زیر حوضه‌ها، از نقشه مدل رقومی ارتفاعی استان خوزستان (DEM) با دقت ۵ متر استفاده شده است. بدین منظور با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و داده‌های هواشناسی، هیدرولوژی تعداد ۳۷ زیر حوضه استخراج شد. در مرحله بعد نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با استفاده از نرم‌افزار GIS و مدل IDW در سال‌های مورد مطالعه (خشک، نرمال، تر) شامل (۲۰۱۹) (۲۰۲۰) (۲۰۲۱) به ترتیب ماه‌های فصل به دست آورده شد. همچنین میزان رواناب و عملکرد محصول در برآورد تبخیر و تعرق حوضه آبریز کارون بررسی شد به‌طوری‌که شبیه‌سازی رواناب برای حوضه مورد مطالعه در ۶ ایستگاه هیدرومتری از سال ۱۹۸۰ الی ۲۰۲۱ به ترتیب واسنجی و اعتبار سنجی شد. این در حالی است که برای دوره واسنجی، مقادیر ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۵۴ تا ۰/۷۱، ضریب نش-ساتکلیف (NS) بین ۰/۵۲ تا ۰/۶۸ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۱۲/۵۰ تا ۳۲/۰۰ (m^3/s) و برای دوره اعتبارسنجی، مقادیر R^2 بین ۰/۵۱ تا ۰/۶۵، NS بین ۰/۵۰ تا ۰/۶۵ و RMSE بین ۱۲/۰۳ تا ۲۳/۲۳ (m^3/s) بوده است. همچنین متوسط عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده محصول استراتژیک حوضه آبریز یعنی گندم، به ترتیب برابر با ۴/۶۸ و ۴/۹۸ تن در هکتار و متوسط تبخیر و تعرق حاصل از سند ملی آب و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۵۳۲،۸۸ و ۵۸۹ میلی‌متر بوده است. در ادامه، نتایج الگوریتم SEBAL و مدل SWAT بر اساس وضعیت سال آبی، با یکدیگر تحت مقایسه قرار گرفتند که همگرایی میان نتایج این دو روش، برای سه سال نرمال، خشک و تر به ترتیب برابر با ۰/۷۲، ۰/۵۸ و ۰/۴۹ بوده است.

در بررسی نتایج الگوریتم SEBAL در فاز اول، به علت عدم وجود اطلاعات لایسیمیتری از حوضه آبریز، نتایج این روش در ابتدا، با محصول ماهواره‌های تبخیر و تعرق ناسا مقایسه شده که همبستگی میان آن‌ها، بالا بوده است. در فاز دوم از این مطالعه، با توجه به داده‌های زمینی و با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS از ماهواره Terra که دارای قدرت تفکیک زمانی مناسب است و سنجنده OLI و TIRS از ماهواره Landsat8 که دارای قدرت تفکیک مکانی مناسب است، نتایج الگوریتم SEBAL و محدوده تغییرات پارامترهای اصلی

این الگوریتم در دشت‌های الباجی و اهواز ملائانی، ارائه شده است. دلیل انتخاب این دو دشت مساحت بالا و تغییرات توپوگرافی کمتر است. در گام بعدی هم نتایج الگوریتم SEBAL و مدل SWAT بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی کل حوضه آبریز و همچنین در مقیاس-های زمانی متفاوت، با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند که مشاهده شد مقادیر برآورد شده توسط مدل SWAT و الگوریتم SEBAL، به یکدیگر نزدیک هستند و در کاربری کشت آبی و دیم، نسبت به مرتع و چمنزار، نزدیکی بیشتری نسبت به یکدیگر داشته‌اند. به‌طور کلی نتایج حاصل از اجرای رویکردهای فوق، در قالب نمودارها و شاخص-های مختلف ارائه شده، نشان‌دهنده دقت و عملکرد خوب مدل‌ها در شبیه‌سازی مقدار تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز مدنظر است. لذا با توجه به قابلیت‌های آن‌ها می‌توانند برای اقدامات مدیریتی در سطح حوضه‌های آبریز، استفاده شوند. همان‌طور که نشان داده شده نتایج دو روش الگوریتم SEBAL و مدل SWAT، نزدیک به هم هستند و بنابراین می‌توان این‌گونه استنباط نمود که نتایج آن‌ها می‌تواند صحیح و نزدیک به واقعیت باشند. از جمله مشکلات تحقیق حاضر، نبود اطلاعات لایسیمیتری حوضه آبریز کارون، عدم قطعیت در ثبت داده-های هواشناسی، محدودیت‌های موجود در مطالعات حاصل از نرم‌افزار NETWAT (سند ملی آب)، عدم تطابق زمان برداشت داده‌های هواشناسی با زمان تصویربرداری ماهواره‌ها و غیره اس؛ اما به‌طور کلی چنانچه امکان دسترسی به اطلاعات کافی و صحیح لایسیمیتری در سطح حوضه‌های مختلف کشور فراهم باشد، داده‌های مورد نیاز با ابزارها و دقت کافی جمع‌آوری شوند، می‌توان انتظار داشت که دقت مطالعات افزایش یابد.

منابع

صراف، ا. و قاسمی، ح. ۱۴۰۰. واسنجی مدل هیدرولوژیکی IHACRES با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه عنکبوت اجتماعی و جستجو و نجات. هیدروژئومورفولوژی. ۸(۲۸): ۱۰۵-۸۱.

صراف، ا. و قاسمی، ح. ۱۴۰۱. واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه عنکبوت اجتماعی و عنکبوت بیوه سیاه. پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۱۲(۲): ۲۰۵-۲۲۹.

Abbaspour, K. C. 2011. User Manual for SWAT-CUP4. SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Eawag, Duebendorf. Switzerland, from <http://www.eawag.ch>.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M.

- for monthly stream flow simulation in Maharlu Lake Basin. *Water Supply*. 21 (8): 4219-4238.
- Ruhoff, A., Paz, A., Collischonn, W., Aragao, L., Rocha, H. and Malhi, Y. 2012. A MODIS-based energybalance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing* 4: 703- 725.
- Singh R., Kumar S., Nangare D. and Meena M. 2009. Drip irrigation and black polyethylene mulch influence on growth, yield and water-use efficiency of tomato. *African Journal of Agricultural Research*. 4: 1427-1430.
- Tasumi, M. Allen, R. and Trezza, R. 2008. At-surface albedo from Landsat and MODIS satellites for use in energy balance studies of evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. 13: 51- 63.
- Trezza, R. & Allen, R. 2003. Crop water requirements from a remote sensing model for thr Snake plain area in Idaho Geosenanza, año/vol. 8, número 001 Universidad de los Andes San Cristobal, Venezuela. *Geosenanza*. 8: 83-90.
- Walters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. and Bastiaanssen, W. 2002. SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms for Land. *Advanced Training and User Manual*. Version 1.
- Wei, X., Sritharan, S., Kandiah, R., Osterberg, J., Neale, C. and farrow, K., et al. 2012. Implication of SEBAL algorithm with landsat thematic mapper 5 in lower Colorado River basin. *Remote Sensing and Hydrology*. 98- 101.
1998. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. *FAO irrigation and drainage Paper* 56. 11.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks, A.D. and Sammons, N.B. 1990. SWRRB: Abasin scale simulation model for soil and water resources management. *Texas A&M Univ. Press, College Station, TX*.
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A. and Holtslag, A. A. 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1, Formulation. *Journal of Hydrology*. 212: 198-212.
- Satarzadeh, E., Sarraf, A.P., Hajikandi. H. and Sadeghian. M.S. 2022. Flood hazard mapping in western Iran: assessment of deep learning vis-à-vis machine learning models. *Natural Hazards*. 111 (2): 1355-1373.
- Hong, S., Hendrickx, J.M.H. and Borchers, B. 2009. Up-scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from Landsat (30 m) to MODIS (250 m) scale. *Journal of Hydrology*. 370: 122-138.
- Hooghoudt, S.B. 1940. Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 46: 515-707.
- Immerzeel, W. and Droogers, P. 2008. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. 349 (3-4): 411- 424.
- Moazami Goudarzi F., Sarraf A.P., Ahmadi H., 2021. Calibration of SWAT and three data-driven models

Application of SWAT Model and SEBAL Algorithm in Order to Estimate the Actual Evapotranspiration Values in Karoon Basin

A.P.Sarrafi¹, H.A.Ghasemi², B. Aminnejad³

Received: Sep.05, 2023

Accepted: Nov.14, 2023

Abstract

In this research, in the first step, the evaporation and transpiration values of the Karun catchment area, in three dry, normal and wet years (2015, 2019 and 2022 respectively) were obtained using the SWAT model recalibrated based on runoff and crop yield and the SEBAL algorithm. Come. The SWAT model was calibrated and validated using 6 hydrometric stations for the periods of 2000-2016 and 2017-2020, respectively, and for the calibration period, the coefficient of explanation (R^2) values were between 0.54 and 0.71, the Nash-Sutcliffe coefficient (NS) between 0.52 and 0.68 and the root mean square error (RMSE) between 12.50 and (m^3/s) 32.00 and for the validation period, R^2 values between 0.51 and 0.65, NS between 0.50 to 0.65 and RMSE was between 12.03 and 23.23 (m^3/s). Also, the average observed and simulated yields of the strategic crop of the catchment wheat were 4.68 and 4.98 tons per hectare, respectively. Next, the results of the SEBAL algorithm and SWAT model were compared with each other based on the condition of the wet year, and the convergence between the results of these two methods for three normal, dry and wet years was 0.72, 0.58 and 0.49 respectively. It has been 0. In the second stage of this research, according to the ground data and using the images of the MODIS sensor from the Terra satellite, which has a suitable temporal resolution, and the OLI sensor from the Landsat8 satellite, which has a suitable spatial resolution, the results of the SEBAL algorithm and the range The changes of the main parameters of this algorithm were presented in the plains of Ahvaz-Mlathani and Al-Baji basins. Ahvazmalathani plain has a higher cultivated area and fewer topographical changes. Simulation of product performance by SWAT software has given better results in Dasht al-Baji. According to the results of this research, the values of evaporation and transpiration extracted from the SEBAL algorithm and SWAT model can be close to the actual values of evaporation and transpiration in the basin.

Key words: Evapotranspiration, SWAT, SEBAL, Product performance, Landsat, MODIS

1- Assistant Professor of Civil Engineering Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

2- Ph.D. Candidate in Water Resources Management and Engineering, Civil Engineering Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

3- Assistant Professor of Civil Engineering Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

(*- Corresponding Author Email: Sarraf@riau.ac.ir)