

Estimating Evapotranspiration Values in River Basin Scale Using SWAT Model and SEBAL Algorithm

NADIA BABAIE¹, MOJTABA SHOURIAN^{1*}, ALI MORIDI¹

1. Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
(Received: Apr. 6, 2020- Revised: Dec. 28, 2020- Accepted: Dec. 29, 2020)

ABSTRACT

Estimating actual evapotranspiration in river basins is necessary to use water resources optimally and to improve river basin management. SWAT hydrologic model and SEBAL remote sensing algorithm are among the known methods which have addressed this issue. In the present study, in the first step, the actual evapotranspiration of Karkheh river basin was estimated in dry, normal, and wet years (2008, 2012, and 2015, respectively), using the SWAT model calibrated based on runoff and crop yield and SEBAL algorithm. SWAT model was calibrated and validated using six hydrometric stations for the periods of 1993-2009 and 2010-2013, respectively, in which the R^2 , NS and RMSE values were obtained between 0.45 to 0.7, 0.52 to 0.67 and 12.64 to 25.02 (m^3/s) for the calibration period and between 0.4 to 0.6, 0.3 to 0.56 and 11.08 to 23.17 (m^3/s) for the validation period, respectively. Further, the average observed and simulated yield of the strategic crop (wheat) in the basin were equal to 4.70 and 5.01 (ton/ha), respectively. In addition, the results of SEBAL algorithm and SWAT model were compared together based on the water year status, which the correlations between the results of those methods were equal to 0.74, 0.60, and 0.52 for normal, dry, and wet years, respectively. In the second step, based on the ground data and MODIS, which has a suitable temporal resolution, and OLI which has a suitable spatial resolution, the results of SEBAL algorithm and the variation ranges of main parameters are presented for Pole-dokhtar and Ravansar plains. Ravansar plain has more cultivation areas and lower topography changes compared to Pole-dokhtar plain. The simulation of crop yield by SWAT gave a better result in Pole-dokhtar plain. Based on the results of this study, the values of evapotranspiration obtained from SEBAL algorithm and SWAT model can be reliable and close to the actual values of evapotranspiration in the river basin.

Keywords: SWAT, SEBAL, Evapotranspiration, Runoff, Crop yield, MODIS, Landsat.

برآورد مقادیر تبخیر و تعرق در مقیاس حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم SEBAL

نادیا بابائی^۱، مجتبی شوریان^{۱*}، علی مریدی^۱

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۹)

چکیده

برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه‌های آبریز به منظور استفاده بهینه از منابع آب و بهبود مدیریت حوضه‌ها، امری ضروری است. از جمله روش‌های شناخته‌شده‌ای که به این مساله می‌پردازند، مدل هیدرولوژیکی SWAT و الگوریتم سنسج از دور SEBAL هستند. در این مطالعه، در گام اول، مقادیر تبخیر و تعرق حوضه آبریز کرخه، در سه سال خشک، نرمال و تر (به ترتیب: ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵)، با استفاده از مدل SWAT واسنجی شده براساس رواناب و عملکرد محصول و الگوریتم SEBAL به دست آمده است. مدل SWAT با استفاده از ۶ ایستگاه هیدرومتری برای دوره‌های ۲۰۰۹-۱۹۹۳ و ۲۰۱۳-۲۰۱۰، به ترتیب واسنجی و اعتبارسنجی شد که برای دوره واسنجی، مقادیر ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۴۵ تا ۰/۷۰، ضریب نش-ساتکلیف (NS) بین ۰/۵۲ تا ۰/۶۷ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۱۲/۶۴ تا ۲۵/۰۲ (m^3/s) و برای دوره اعتبارسنجی، مقادیر R^2 بین ۰/۴ تا ۰/۶۰، NS بین ۰/۳۰ تا ۰/۵۶ و RMSE بین ۱۱/۰۸ تا ۲۳/۱۷ (m^3/s) بوده است. همچنین متوسط عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده محصول استراتژیک حوضه که گندم است، به ترتیب برابر با ۴/۷۰ و ۵/۰۱ تن در هکتار بوده است. در ادامه، نتایج الگوریتم SEBAL و مدل SWAT براساس وضعیت سال آبی، با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند که همبستگی میان نتایج این دو روش، برای سه سال نرمال، خشک و تر به ترتیب برابر با ۰/۷۴، ۰/۶۰ و ۰/۵۲ بوده است. در گام دوم از این مطالعه، با توجه به داده‌های زمینی و با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS 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 پلدختر و روانسر، ارائه شد. دشت روانسر دارای سطح زیرکشت بالاتر و تغییرات توپوگرافی کم‌تر است. شبیه‌سازی عملکرد محصول توسط نرم‌افزار SWAT، در دشت پلدختر نتیجه بهتری به دست داده است. با توجه به یافته‌های این تحقیق، مقادیر تبخیر و تعرق مستخرج از الگوریتم SEBAL و مدل SWAT می‌توانند نزدیک به مقادیر واقعی تبخیر و تعرق در حوضه باشند.

واژه‌های کلیدی: SWAT، SEBAL، تبخیر و تعرق، رواناب، عملکرد محصول، MODIS، Landsat.

مقدمه

بررسی تبخیر و تعرق واقعی در حوضه‌های آبریز به منظور استفاده بهینه از منابع آب، از عمده مسائل مهم مدیریت منابع آب کشور محسوب می‌شود. 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. بنابراین، در سطح حوضه آبریز علاوه بر استفاده از روش‌های سنسج از دور، مدلی که بتواند حجم وسیع داده‌ها از جمله دما، بارش، شرایط توپوگرافی، خصوصیات خاک، کاربری اراضی، الگوی کشت و غیره را بکار گیرد، مورد نیاز است. بنابراین 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 (Mobasher and Khavarian, 2004; Mobasher *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) یا Landsat (Wei *et al.*, 2012) و 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-مانتیت، هارگریوز سامانی، الگوی مصرف آب کشاورزی، مقادیر

تبخیر و تعرق صحه گذاردند (Diwakar et al., 2001; Beven, 2001; Jayakrishnan et al., 2005; Abbaspour et al., 2007). به طور مثال، از SWAT برای شبیه سازی رواناب سطحی در حوضه آندرا پرادش هند استفاده و نتایج مثبتی از عملکرد آن گزارش شده است. تاثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و تغییر الگوی کشت توسط این مدل، بر روی منابع آب مورد ارزیابی قرار داده شده است (Li et al., 2007; Yan et al., 2006; Kamali et al., 2017; Bastiaanssen et al., 2005; Faramarzi et al., 2009; Singh et al., 2009). شبیه سازی عملکرد و تبخیر و تعرق واقعی از سه محصول نیشکر، سورگوم و ازن در حوضه رودخانه آپریما، انجام شده است (Immerzeel et al., 2008). عملکرد زراعی گندم و بهره‌وری آب کشاورزی آن در ایران با مدل SWAT بررسی شده است (Faramarzi et al., 2010). تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل و همچنین بهره‌وری آب گیاهی بر اساس سناریوهای مختلف مدیریتی، شبیه سازی شده است (Gosain et al., 2005; Jeimar et al., 2011).

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, 2014; Immerzeel and Droogers, 2008; Yavari et al., 2014; 2016; Mianabadi et al., 2016; Immerzeel et al., 2006; استفاده از ابزارهایی نظیر پکیج نرم‌افزاری بهینه‌سازی غیرخطی PEST (Moazenzadeh et al., 2016) و غیره، به منظور صحت-سنجی، انجام شده است.

لازم به ذکر است که در بیشتر تحقیقات انجام گرفته، بر کارایی الگوریتم SEBAL و مدل SWAT در برآورد تبخیر و تعرق، تاکید 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، کالیبره 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 در این تحقیق، حوضه آبریز کرخه است. حوضه آبریز رودخانه کرخه در محدوده مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۵ درجه طول شمالی قرار گرفته و از لحاظ تقسیمات کشوری عمدتاً دربرگیرنده استان‌های همدان، کرمانشاه، ایلام، لرستان و خوزستان بوده که بخش‌هایی از دو

تشتک تبخیر و غیره مقایسه شده است (Allen et al., 2003; Trezza and Allen, 2003; Mir Yaeghub Zadeh, 2014; Yang et al., 2012). 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 لندست ۸ 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).

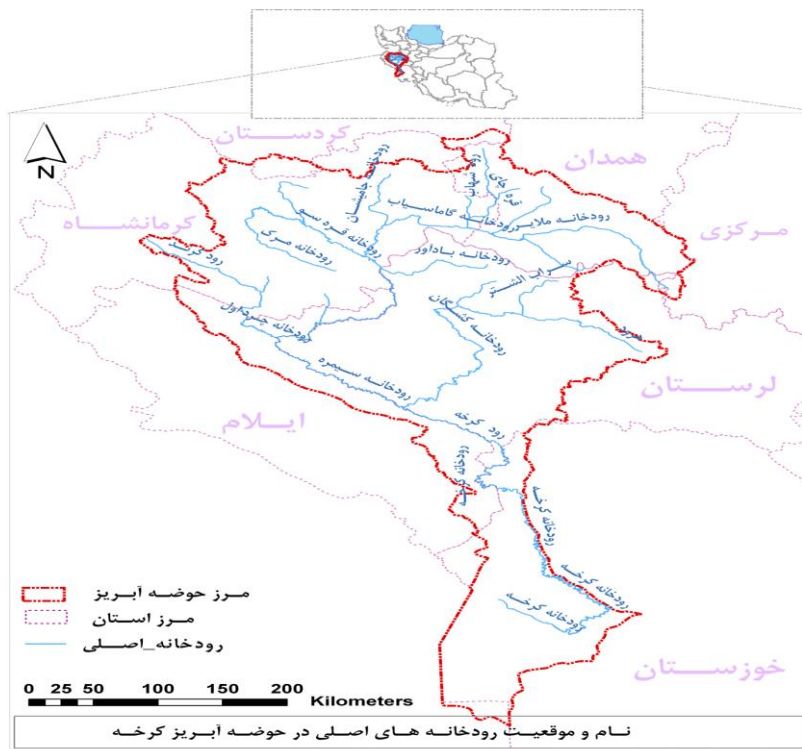
از طرفی، معمول‌ترین روش مستقیم، تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از اصل بیلان جرمی در یک حجم کنترل شده از خاک (لایسیمتر) می‌باشد، که نصب لایسیمتر مشکل و پرهزینه می‌باشد، این روش عمومیت ندارد و جهت برآورد تبخیر و تعرق از روش‌های غیرمستقیم (محاسباتی) استفاده می‌شود که از بین این روش‌ها، روش پنمن-مانتیث-فائو، 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-مانتیث-فائو، در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتر از دیگر روابط، بهتر می‌باشد و در شرایطی که داده‌های لایسیمتری در دسترس نباشند، به عنوان 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. اولین مدل هیدرولوژیکی مدل استفورد (Standford) 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. یکی از آن‌ها که در نقاط مختلف جهان مورد استفاده واقع شده، مدل هیدرولوژیکی SWAT (Soil and Water Assessment Tools) 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

مهم حوضه، رودخانه کرخه است که از بهم پیوستن دو رود مهم سیمره و کشکان تشکیل می‌شود. موقعیت حوضه و رودخانه‌های آن، مطابق با مستندات موجود، در شکل (۱)، قابل مشاهده است.

استان مرکزی و کردستان هم در این حوضه واقع شده‌اند. مساحت این حوضه مهم، ۵۱۰۰۰ کیلومترمربع است. در پایین دست حوضه، تالاب مهم بین‌المللی هورالعظیم قرار گرفته است. رودخانه



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

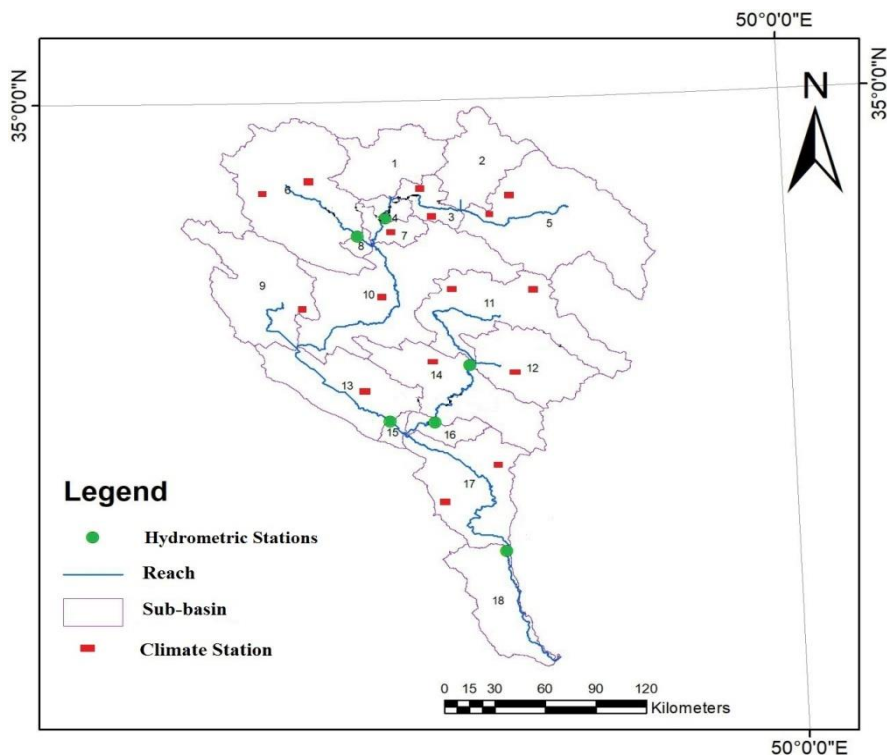
مورد نیاز است. در گام اول، برای استخراج داده‌های ماهواره‌ای از داده‌های سنجنده MODIS که بر روی ماهواره Terra قرار دارد، استفاده شده است. تصاویر سنجنده MODIS به عنوان محصولات MODIS در دو سطح مختلف در دسترس هستند. داده‌های سطح اول، داده‌های خام ماهواره‌ای هستند و داده‌های سطح دوم این محصولات هم داده‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مانند LST، NDVI و ... هستند. 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.

در این تحقیق، جهت تولید شبکه آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها در مدل SWAT از لایه رقومی ارتفاع (DEM) ۳۰ متری استفاده شده است. به منظور وارد کردن نقشه کاربری اراضی و طبقه‌بندی خاک به این مدل هم، از نقشه GLCC و نقشه جهانی خاک FAO استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز هواشناسی جهت استفاده در مدل SWAT از ۱۶ ایستگاه سینوپتیک و برای دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۰۱۷، داده‌های ماهانه رواناب نیز از ۶ ایستگاه هیدرومتری و برای دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۰۱۳، تامین شده‌اند. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل (۲) آورده شده است.

در این تحقیق، جهت اجرای الگوریتم SEBAL، مجموعه داده‌های ماهواره‌ای، رقوم ارتفاعی منطقه و داده‌های هواشناسی،

جدول ۱- محصولات و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده جهت اجرای مدل SEBAL

ردیف	عنوان	شاخص قابل استخراج مستقیم	شاخص قابل استخراج غیر مستقیم
۱	MOD021KM (داده‌های خام با قدرت تفکیک یک کیلومتر)	Radiance, Reflectance, Emissivity	LAI, SAVI, NDVI, LST, Albedo
۲	MOD03 (داده‌های جنولوکیشن تصاویر ماهواره‌ای)	Sun Zenith Angle	-
۳	MOD11	H	-
۴	Aster GDEM	DEM	-



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری

۳۶)، دانلود و با اجرای الگوریتم SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998a; Walters *et al.*, 2002)، مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شدند. لازم به ذکر است که داده‌های هواشناسی مورد نیاز از ۴۲ ایستگاه و برای سه سال نرمال، خشک و تر مدنظر، تامین شده است. در گام دوم، از تصاویر سنجنده OLI از ماهواره لندست ۴^۸ در دشت روانسر برای تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۰۶ و سنجنده MODIS از ماهواره Terra^۴ در دشت پل دختر برای تاریخ ۲۰۱۲/۰۵/۱۱ استفاده شده است. داده‌های زمینی مورد نیاز در این مرحله، به صورت جدول (۲) است.

داده‌های سنجنده MODIS^۱ کل حوضه کرخه، با انتخاب نوع محصول، دوره زمانی و موقعیت مدنظر، داده‌ها استخراج می‌شوند و داده‌های ماهواره Aster GDEM^۲ هم با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ 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

جدول ۲- داده‌های زمینی مورداستفاده در گام دوم

نوع تصویر	تاریخ موردنظر	داده		
		دما (درجه سانتی‌گراد)	سرعت باد	میانگین ارتفاعی (متر)
لندست ۸	۲۰۱۵/۰۵/۰۶	۲۳	۳	۱۳۹۱
مادیس	۲۰۱۲/۰۵/۱۱	۳۳	۵	۷۰۰

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 اندازه گیری شده در سطح جهان نزدیک تر کرد. تبخیر و تعرق مرجع با

روش پنمن - مانیتث فائو

روش پنمن - مونیتث 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 بسیاری به

3 <http://earthexplorer.usgs.gov/>

4 <http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/realtime.cgi>

1 ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov

۲ <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex>

روش پنمن - مونیت فائو به صورت رابطه (۱) برآورد می‌شود:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، ET_0 : تبخیر و تعرق مرجع (میلیمتر بر روز)، R_n : تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع بر روز)، G : شار گرمای خاک (مگاژول بر مترمربع بر روز)، T : میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (درجه سلسیوس)، u_2 : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، e_s : فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، e_a : فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، Δ : شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) و γ : ضریب ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) می‌باشد.

ساختار مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل نیمه توزیعی و مفهومی است. در این مدل با معرفی توپوگرافی حوضه و نقشه‌های کاربری اراضی و خاک، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یا HRU ها ساخته شده و شبیه‌سازی رواناب و عملکرد محصول انجام خواهد شد. مدل SWAT در شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی از معادله توازن هیدرولوژیکی زیر (رابطه ۲))، استفاده می‌کند:

(رابطه ۲)

$$\Delta SW = \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

که در آن:

$$\Delta SW = \text{آب ذخیره شده در خاک (میلی‌متر)،}$$

$$R_{day} = \text{بارش روزانه (میلی‌متر)،}$$

$$Q_{surf} = \text{رواناب سطحی (میلی‌متر)،}$$

$$E_a = \text{تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر)،}$$

$$W_{seep} = \text{آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیر اشباع وارد می‌شود. (میلی‌متر) و}$$

Q_{gw} = جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه (میلی‌متر).

حوضه آبریز مورد مطالعه، شامل ۱۸ زیرحوضه و ۱۴۷ HRU است. حجم رواناب سطحی ناشی از بارندگی، یکی از متغیرهای اصلی جریان رودخانه است و مدل SWAT از روش SCS، براساس وضعیت بارش، توپوگرافی زمین، نوع کاربری اراضی، خاک و رطوبت پیشین خاک، برای شبیه‌سازی آن، استفاده می‌کند. همچنین از معادلات بیلان برای تعیین میزان مشارکت آب

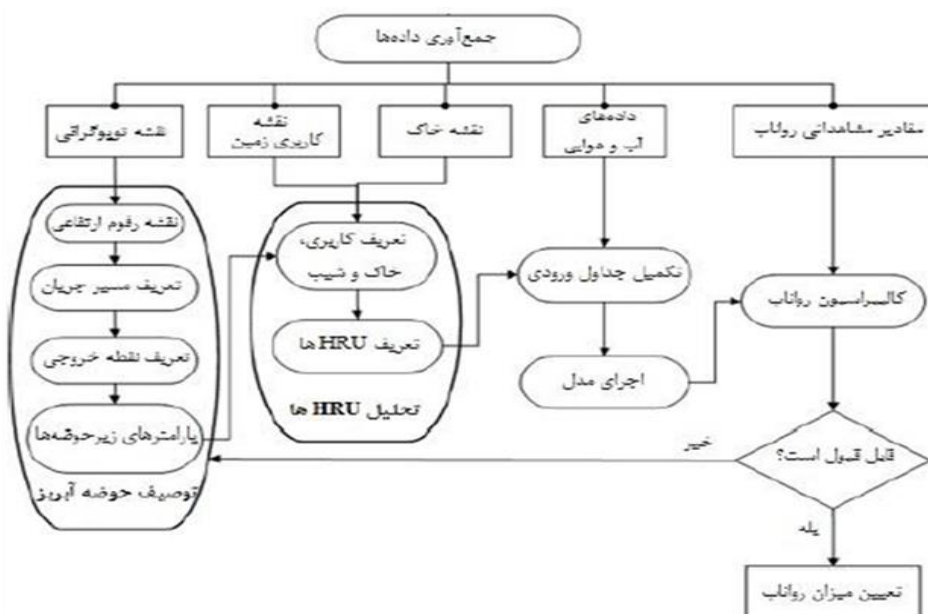
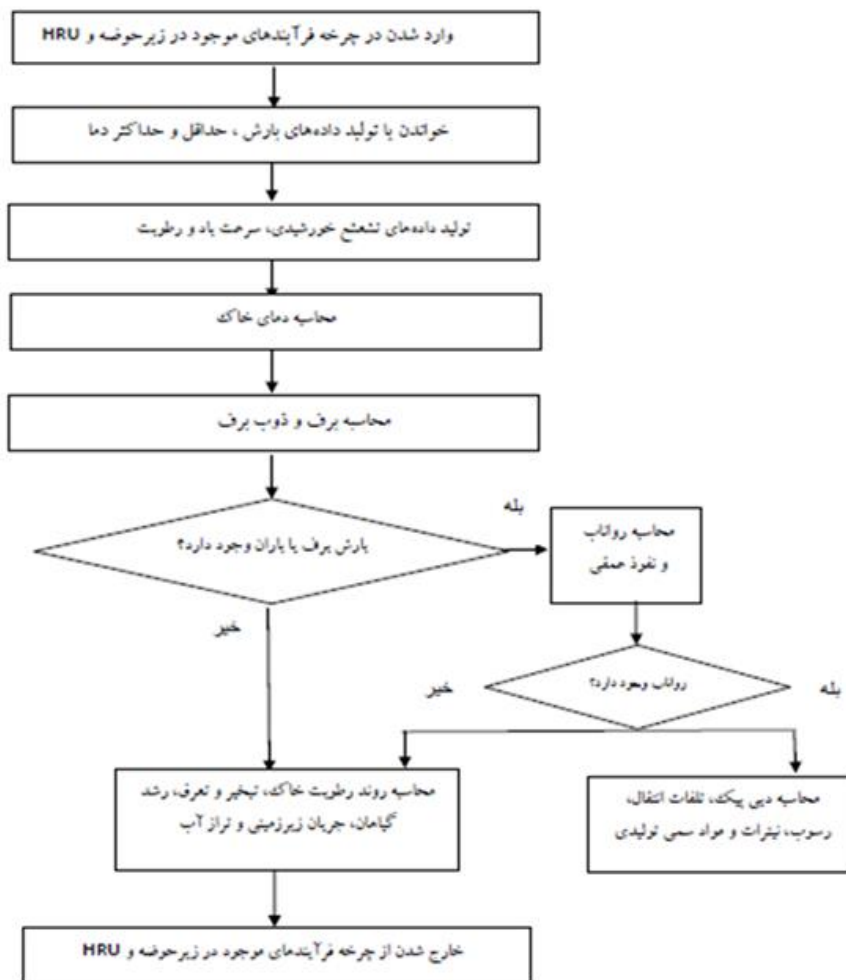
زیرزمینی و روابط تجربی برای برآورد ذوب برف، استفاده و میزان کل رواناب را محاسبه می‌کند (Hooghoudt, 1940). مراحل شبیه‌سازی و واسنجی رواناب در مدل SWAT در شکل (۳) در دو بخش قابل مشاهده هستند.

شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی و محاسبه آن، براساس حالت ساده‌شده از مدل رشد گیاهی EPIC^۱ و پس از تنظیم تقویم زراعی و پارامترهای موثر، مطابق با مستندات موجود، انجام می‌گیرد که در آن، رشد گیاه براساس گرمای روزانه تجمعی دریافتی، شبیه‌سازی می‌شود (Easterling et al., 1992). در EPIC، پتانسیل مقدار ماده تولیدی براساس روش مانیت، محاسبه شده و شاخص برداشت هم برای محصول، محاسبه می‌شود. در این مدل، رشد گیاه براساس کمبود دما، آب و کود، محدود می‌شود. SWAT در شبیه‌سازی عملکرد محصول، تاثیر طیف گسترده‌ای از عواملی مانند متغیرهای هواشناسی، گیاهی و کشاورزی را در نظر می‌گیرد. برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی هم، مراحل رشد محصول به مدل معرفی می‌شوند و مدل قبل از برآورد تبخیر از خاک و تعرق از گیاه، میزان تبخیر از آب ذخیره شده در پوشش گیاهی را براساس شاخص سطح برگ (LAI) که تابعی از گرمای رسیده به محصول در طی دوره رشد آن است، محاسبه می‌کند و مقدار تبخیر و تعرق براساس بخش اول از شکل (۴))، به دست می‌آید (Neitsch et al., 2011). از آنجایی که فرآیند کاملی جهت محاسبه متغیرهای هیدرولوژیکی و گیاهی در مدل SWAT انجام می‌پذیرد، سعی شده تا در قالب نمودار به‌طور خلاصه، به آن‌ها پرداخته شود. ساختار و ترتیب مراحل محاسبه تبخیر و تعرق، شبیه‌سازی و واسنجی تبخیر و تعرق و عملکرد محصول در مدل SWAT به صورت جداگانه، در شکل (۴) قابل مشاهده است.

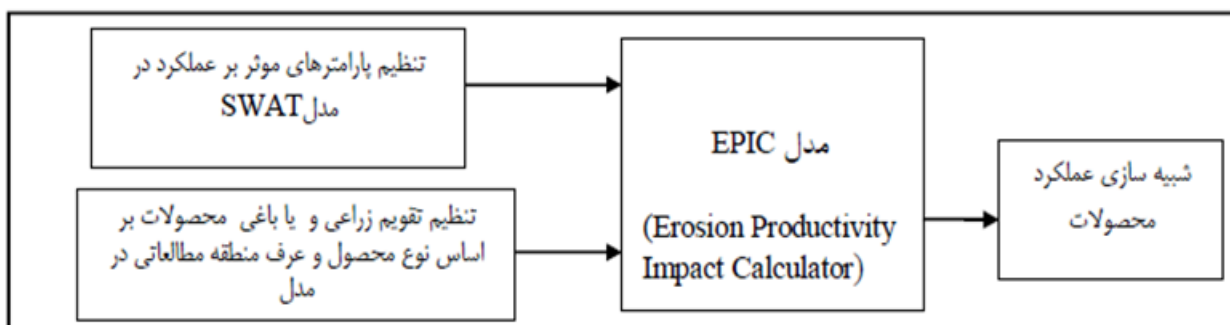
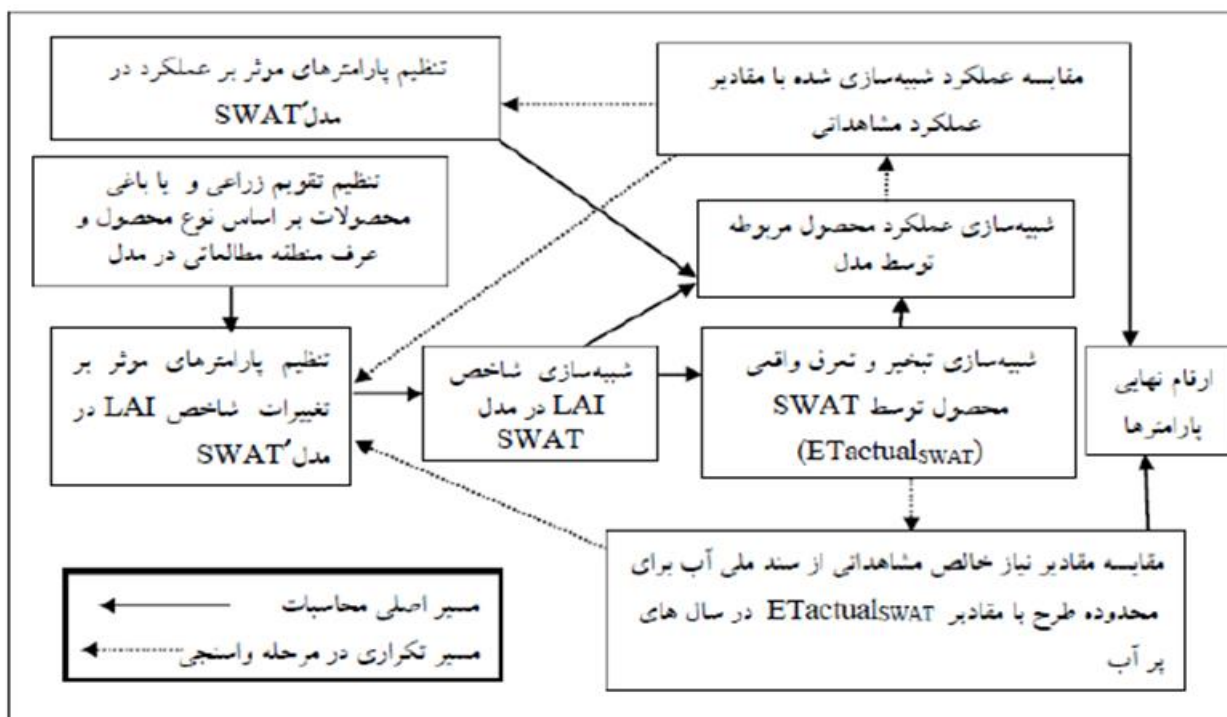
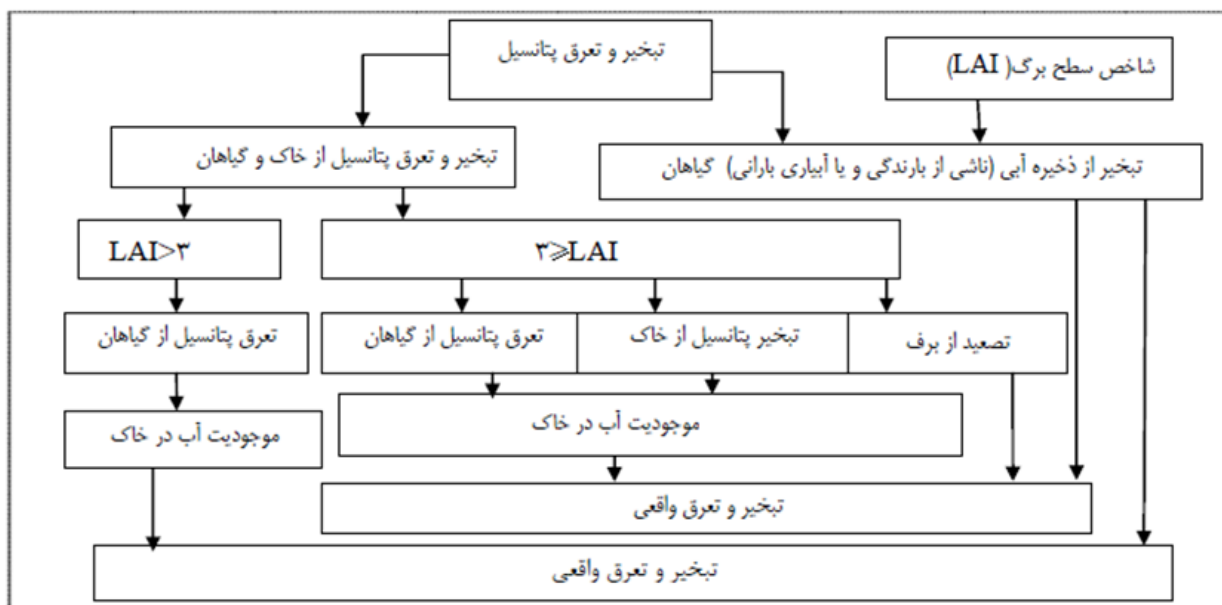
به دلیل وابستگی متغیرهای گیاهی، عملکرد و تبخیر و تعرق، شبیه‌سازی و واسنجی آن‌ها، به طور همزمان و مطابق با حلقه بخش سوم از شکل (۴) انجام می‌شود. این حلقه تا زمانی تکرار می‌شود که مقادیر شبیه‌سازی شده تبخیر و تعرق و عملکرد محصول با مقادیر مشاهداتی آن‌ها (ارقام موجود در سند ملی آب، گزارشات وزارت نیرو و جهاد کشاورزی، در شرایط نبود تنش آبی)، همخوانی مطلوب داشته باشد.

در حوضه آبریز کرخه، گندم محصول استراتژیک حوضه است که برای شبیه‌سازی عملکرد این محصول، اطلاعات مندرج در

مستندات موجود بصورت جدول (۳) به SWAT اعمال می‌شود.



شکل ۳- مراحل شبیه‌سازی و واسنجی رواناب در مدل SWAT



شکل ۴- مراحل شبیه‌سازی و واسنجی تبخیر و تعرق و عملکرد محصول در SWAT

جدول ۳- اطلاعات زراعی در محدوده‌های مورد مطالعه

میزان کود مصرفی سالانه (kg/ha)		تاریخ برداشت	تاریخ کشت	سطح زیرکشت (هکتار)	محدوده
ازته	فسفات				
۱۵۰	۱۵۰	۱۵ خرداد تا ۳۰ تیر	۱ آبان تا ۱۵ آذر	۱۱۵۱۹	پل دختر
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۱۵ آذر	۴۳۸۲۱	تویسرکان
۱۵۰	۱۵۰	۱۵ خرداد تا ۳۰ تیر	۱ آبان تا ۱۵ آذر	۷۵۴۳۷	شیروان
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۳۰ آبان	۵۱۸۶۱	اسلام آباد
۱۵۰	۱۵۰	۱۵ خرداد تا ۳۰ تیر	۱ آبان تا ۱۵ آذر	۲۵۲۱۵	چرداول
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۳۰ آبان	۵۸۰۸۲	روانسر سنجایی
۱۵۰	۱۵۰	۱۵ خرداد تا ۳۰ تیر	۱ آبان تا ۱۵ آذر	۸۱۶۷	الشر
۱۵۰	۱۵۰	۱۵ خرداد تا ۳۰ تیر	۱ آبان تا ۱۵ آذر	۶۱۷۵	خرم آباد
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۳۰ آبان	۳۰۶۴۳	کنگاور
۱۵۰	۱۵۰	۱۵ خرداد تا ۳۰ تیر	۱ آبان تا ۱۵ آذر	۱۵۴۰	دره شهر
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۱۵ آذر	۳۳۶۲۰	اسدآباد
۱۵۰	۱۵۰	۱۵ خرداد تا ۳۰ تیر	۱ آبان تا ۱۵ آذر	۴۶۴۲۷	شیراوند
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۳۰ آبان	۱۰۲۲۷	حسن آباد- قلعه شیان
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۳۰ آبان	۵۰۸۶	صحنه
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۳۰ آبان	۳۳۲۶	کامیاران
۱۵۰	۱۵۰	۱۵ خرداد تا ۳۰ تیر	۱ آبان تا ۱۵ آذر	۶۳۹۷۱	رومشکان
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۳۰ آبان	۱۵۸۰۹۸	دیناور
۱۵۰	۲۰۰	۱۵ تیر تا ۱۵ مرداد	۱۵ مهر تا ۳۰ آبان	۶۵۰۲	کرمانشاه

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در این روابط، n تعداد مشاهدات، Q_m و Q_s به ترتیب مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده، \bar{Q}_m و \bar{Q}_s به ترتیب میانگین مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده هستند.

الگوریتم SEBAL

در الگوریتم SEBAL، شار گرمای نهان که به مصرف تبخیر و تعرق می‌رسد، براساس مقدار باقیمانده انرژی تعیین می‌شود. معادله بیلان انرژی را می‌توان بصورت رابطه ۶، بیان کرد.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن: R_n = شار تابشی کل (w/m^2)، G = شار گرمای خاک (w/m^2)، H = شار گرمای محسوس هوا (w/m^2)، λET = شار گرمای نهان تبخیر (w/m^2) هستند. شار تابشی کل از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین بدست می‌آید که عبارتند از تابش طول موج کوتاه ورودی، بازتابش طول موج کوتاه خروجی، تشعشعات طول موج بلند ورودی از اتمسفر، تشعشعات طول موج بلند گسیل شده از سطح. شار گرمای خاک هم از روابط تجربی که تابعی از شاخص پوشش گیاهی، آلبیدوی سطح و دمای سطح می‌باشند، محاسبه می‌شود. شار گرمای محسوس هوا با استفاده از سرعت باد، ضریب زبری و اختلاف دمای سطح و هوا، به‌دست

نحوه انجام آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت سنجی 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 مطالعه، از روش SUFI_2 در برنامه 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). پس از واسنجی مدل، نوبت به صحت-سنجی آن می‌رسد. در صحت‌سنجی، 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 NS ، R^2 و RMSE استفاده شده است (روابط (۳)، (۴) و (۵)) (Abbaspour, 2011).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [|Q_m - Q_s|_i]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ به منظور تعیین صحت کارایی مدل استفاده شده است. پس از واسنجی رواناب، مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول، مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصول، به نرم‌افزار معرفی و محدوده تغییرات استاندارد برای هر کدام تعیین شده است. بعد از اجرای مدل، بازه پارامترهای مؤثر بر دبی بدون تغییر بوده و فقط محدوده پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصول، کوچک‌تر شد تا محدوده و مقدار واسنجی شده این پارامترها به دست آید. در واقع، در این مرحله از تحقیق، با توجه به مطالعات گذشته که بر روی مدل SWAT انجام شده (از جمله: Abbaspour, 2011; Beven, 2001; Memarian et al., 2019; Hadria et al., 2006; Ziaei and Sepaskhah, 2003)، پارامترهایی که بر رواناب و عملکرد محصول تأثیر بیشتری داشتند، انتخاب شده‌اند. پس از آنالیز حساسیت، پارامترهایی که حساسیت بیش‌تری نشان دادند، در جدول شماره (۴ و ۵) به ترتیب حساسیت آورده شده‌اند. میزان تأثیر این پارامترهای مهم دخیل در شبیه‌سازی‌ها، با مقدار p-value و t-stat مشخص شده است. هر پارامتری که قدر مطلق t-stat بیشتر و p-value کمتری داشته باشد، از مؤثرترین پارامترها به شمار می‌رود. تغییرات سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT در ایستگاه‌های هیدرومتری هم به صورت شکل (۵) است.

می‌آید و در نهایت، شار گرمای نهان تبخیر هم از معادله توازن انرژی، قابل محاسبه 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 تعرق، محاسبه شده است.

نتایج و بحث

بازه زمانی شبیه‌سازی مدل SWAT از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۳ در نظر گرفته شده است. از سال ۱۹۹۰ تا سال ۱۹۹۳ به عنوان دوره گرم شدن (WarmUp) مدل در نظر گرفته شده است و پس از اجرا، خروجی مدل برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۳ 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، بدست آید. در ابتدا، مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۹ و پارامترهای مؤثر بر دبی به نرم‌افزار، معرفی و محدوده تغییرات استاندارد برای هر کدام تعیین می‌شوند. پس از اجرای مدل، مقادیر مطلوب پارامترهای آماری به دست آمده و مدل واسنجی شده است. در مرحله اعتبارسنجی از مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی

جدول ۴- پارامترهای مؤثر بر رواناب

نام پارامتر	مفهوم پارامتر	t-Stat	P-Value	محدوده نهایی و مقادیر واسنجی شده
SOL_AWC1.sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک در لایه سطحی (میلی‌متر در متر)	۲/۰۸	۰/۱۷	-۰/۵۵-۰/۵۵
SLSUBBSN.hru	متوسط طول شیب (متر)	۱/۵۰	۰/۲۷	۱۴-۵۲
OV_N.hru	مقدار ضریب مانینگ برای جریان سطحی	۱/۲۷	۰/۳۳	۳/۸۰-۲۲
PLAPS.sub	نرخ ریزش بارش (میلی‌متر بر کیلومتر)	۱/۰۳	۰/۴۳	-۲/۱۹-۶/۰۲
LAT_TTIME.hru	بازه زمانی جریان جانبی (روز)	۰/۹۸	۰/۴۴	-۲/۶۱-۱۰۷/۸۵
HRU_SLP.hru	متوسط شیب (متر بر متر)	۰/۸۸	۰/۴۶	۰/۲۹-۰/۷۸
ALPHA_BF.gw	ضریب پاسخ جریان پایه برای آب زیرزمینی (بر روز)	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۲۴-۰/۷۹
CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در رودخانه اصلی (میلی‌متر در ساعت)	۰/۷۳	۰/۵۳	۱/۴۶-۷/۱۷
REVAPMN.gw	عمق آستانه آب در آبخوان کم عمق برای پوشش یا نفوذ به آبخوان عمیق (میلی‌متر)	۰/۶۴	۰/۵۸	۱۳۹/۷۸
GWQMN.gw	حداقل ارتفاع سطح ایستابی لازم برای خروج آب زیرزمینی (میلی‌متر)	۰/۶۱	۰/۶۰	۱۸۲۶-۲۰۴۲
CN2.mgt	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی (بی بعد)	۰/۵۰	۰/۶۶	۶۹/۴۵
SOL_K1.sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی (میلی‌متر در ساعت)	۰/۴۳	۰/۷۰	-۱/۱۹-۰/۳۳
SOL_BD1.sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی (گرم در سانتی‌متر مکعب)	۰/۴۱	۰/۷۱	۰/۲۸
ESCO.hru	ضریب جریان تبخیر خاک (بی بعد)	۰/۳۱	۰/۷۸	۰/۳۷-۱/۰۶
CH_N2.rte	ضریب مانینگ رودخانه اصلی (بی بعد)	۰/۳۰	۰/۷۹	۰/۰۱-۰/۰۱
RCHRG_DP.gw	کسر نفوذ آبخوان عمیق	۰/۲۴	۰/۸۳	۰/۱۰-۰/۵۲
GW_DELAY.gw	زمان تأخیر نفوذ آب به سطح ایستابی (روز)	۰/۰۱	۰/۹۰	۲۰/۸۸

جدول ۵- پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصول

نام پارامتر	مفهوم پارامتر	t-Stat	P-Value	مقادیر واسنجی شده
BLAI.plant.dat	حداکثر شاخص سطح برگ پتانسیل در طول دوره رشد گیاه (مترمربع بر مترمربع)	-۴/۲۶	۰/۰۰۱	۹
HVSTI.plant.dat	شاخص برداشت (بی بعد)	-۴/۰۲	۰/۰۰۶	۱
DLAI.plant.dat	کسری از دوره رشد که در آن روند رو به کاهش شاخص سطح برگ شروع میشود (بی بعد)	۲/۷۶	۰/۰۰۹	۱
FRGRW1.plant.dat	نسبتی از طول دوره رشد گیاه که مربوط به نقطه اول در منحنی رشد شاخص سطح برگ است (بی بعد)	۱/۷۰	۰/۱۳	۰/۱۰
LAIMX1.plant.dat	در منحنی رشد شاخص سطح برگ شاخص سطح برگ متناظر با FRGRW1 (مترمربع بر مترمربع)	-۱/۵۱	۰/۱۴	۰/۱۰
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	۰/۱۶	۰/۴۵
LAIMX2.plant.dat	در منحنی رشد شاخص سطح برگ شاخص سطح برگ متناظر با FRGRW2 (مترمربع بر مترمربع)	۱/۳۶	۰/۱۸	۰/۹۵
T_BASE.plant.dat	حداقل دمای لازم برای رشد گیاهان مختلف (سانتی گراد)	۱/۳۱	۰/۲۲	۳
T_OPT.plant.dat	دمای بهینه برای رشد گیاهان مختلف (سانتی گراد)	-۱/۲۲	۰/۲۷	۲۲
EXT_COEF.plant.dat	ضریب جذب نور برای گیاهان مختلف (بی بعد)	-۱/۲۰	۰/۳۰	۳
BIO_E.plant.dat	راندمان استفاده گیاه از تابش خورشیدی ((کیلوگرم بر هکتار) بر (مگاژول بر مترمربع)	-۱/۰۷	۰/۳۴	۷۵
GSI.plant.dat	حداکثر هدایت روزنه‌ای در تابش بالای خورشید و کمبود فشار بخار (متر بر ثانیه)	۱/۰۱	۰/۳۸	۵
VPDFR.plant.dat	کمبود فشار بخار مرتبط با دومین نقطه روی منحنی هدایت روزنه‌ای (کیلوپاسکال)	۰/۷۲	۰/۶۷	۴
BIO_LEAF.plant.dat	کسری تبدیل شده از زیست توده تجمعی در هر سال به باقیمانده در زمان نهفتگی	۰/۵۲	۰/۷۱	۰/۹۰

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

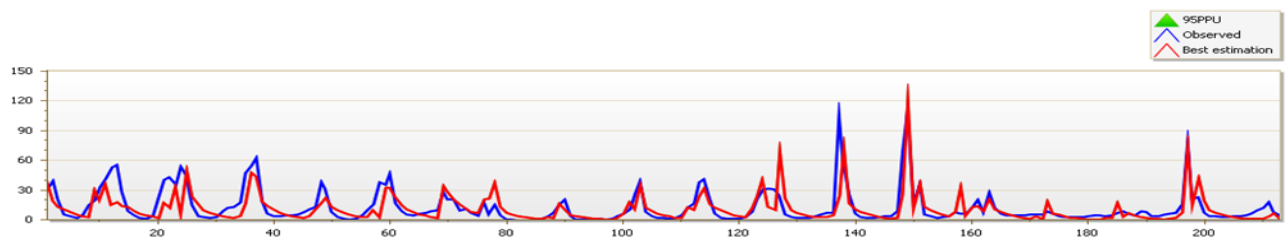
نوع مرحله	عنوان شاخص	مقادیر به دست آمده در هر ایستگاه					
		پلچهر (رودخانه گاماسیاب)	قورباغستان (رودخانه قره سو)	دوآب ویسان (رودخانه کشکان)	سیمره (رودخانه سیمره)	پل دختر (رودخانه کشکان)	پای پل (رودخانه کرخه)
واسنجی	R ²	۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۴۵
	NS	۰/۶۰	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۵۳
صحت‌سنجی	RMSE (m ³ /s)	۱۷/۳۲	۱۲/۶۴	۱۲/۶۴	۳۱/۴۶	۱۶/۱۲	۲۵/۰۲
	R ²	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۵۲	۰/۶۰	۰/۴۰
	NS	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۵۶	۰/۳۰
	RMSE (m ³ /s)	۱۲/۶۴	۱۲/۶۴	۱۱/۰۸	۱۳/۱۵	۱۵/۵۷	۲۳/۱۷

مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، اختلافاتی وجود دارد اما نکته مهم اینست که انحراف به سمت خاصی رخ ندهد (unbiased) و معیارهای آماری، بر درستی نتایج، صحت بگذارند. بررسی نتایج جدول (۷)، حاکی از کارایی خوب مدل است.

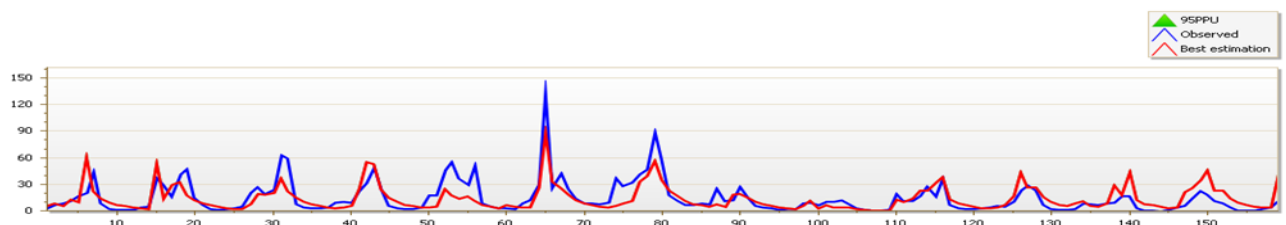
بررسی نمودارها و مقادیر ارائه شده شاخص‌ها، نشان می‌دهد که مدل مقادیر رواناب را به خوبی شبیه‌سازی نموده است. دقت مدل در برآورد عملکرد محصول نیز در جدول (۷) ارائه شده است. مشابه هر شبیه‌سازی‌ای که انجام می‌شود، بین مقادیر



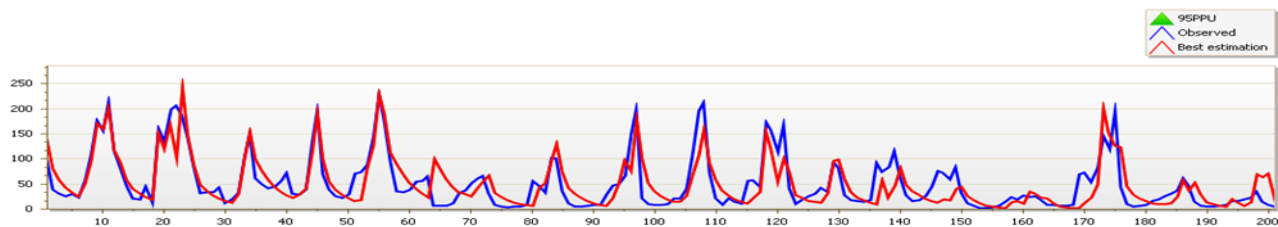
رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه پلچهر (محور افقی نمودارها: ماه از ژانویه ۱۹۹۲ تا دسامبر ۲۰۱۲، محور عمودی نمودارها: رواناب (m3/s))



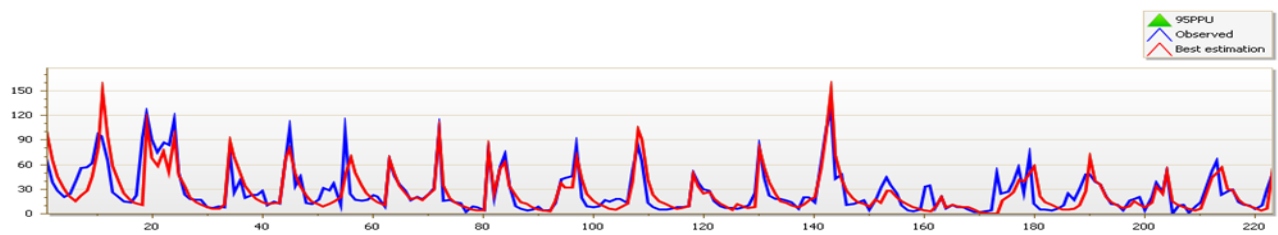
رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه قورباغستان (محور افقی نمودارها: ماه از ژانویه ۱۹۹۲ تا دسامبر ۲۰۱۲، محور عمودی نمودارها: رواناب (m3/s))



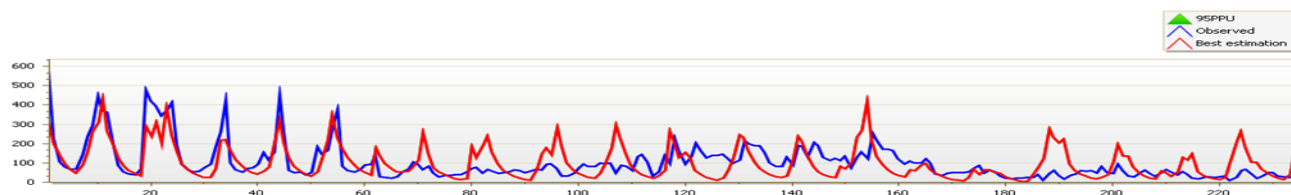
رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه دوآب ویسان (محور افقی نمودارها: ماه از ژانویه ۱۹۹۲ تا دسامبر ۲۰۱۲، محور عمودی نمودارها: رواناب (m3/s))



رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه سیمره (محور افقی نمودارها: ماه از ژانویه ۱۹۹۲ تا دسامبر ۲۰۱۲، محور عمودی نمودارها: رواناب (m3/s))



رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه پل دختر (محور افقی نمودارها: ماه از ژانویه ۱۹۹۲ تا دسامبر ۲۰۱۲، محور عمودی نمودارها: رواناب (m3/s))



رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه پای پل (محور افقی نمودارها: ماه از ژانویه ۱۹۹۲ تا دسامبر ۲۰۱۲، محور عمودی نمودارها: رواناب (m3/s))

جدول ۷- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول

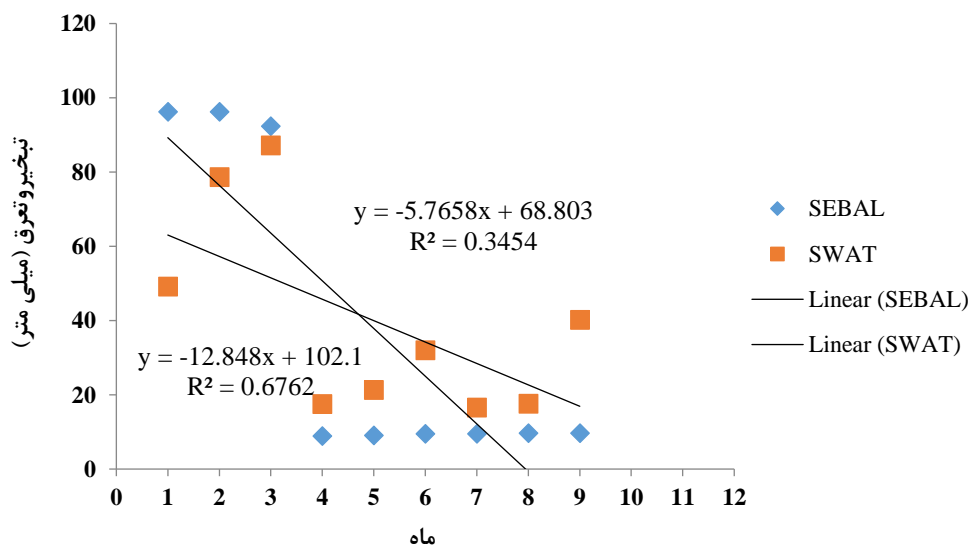
نام محدوده	مقادیر مشاهداتی (تن در هکتار)	مقادیر شبیه‌سازی شده (تن در هکتار)	نام محدوده	مقادیر مشاهداتی (تن در هکتار)	مقادیر شبیه‌سازی شده (تن در هکتار)
پل دختر	۴/۶۰	۴/۷۷	دره شهر	۳/۸۶	۲/۰۸
تویسرکان	۳/۹۶	۳/۴۲	اسد آباد	۴/۱۷	۵/۷۶
شیروان	۳/۱۵	۳/۴۶	شیراوند	۳/۳۸	۴/۱۹
اسلام آباد	۵/۱۰	۵/۷۳	حسن آباد- قلعه شیان	۵/۱۰	۶/۶۹
چرداول	۳/۱۵	۳/۸۷	صحنه	۴/۸۳	۳/۹۱
روانسر سنجابی	۵/۷۲	۵/۲۰	کامیاران	۳/۲۳	۴/۰۹
الشتر	۴/۷۸	۳/۴۷	رومیشکان	۴/۳۰	۶/۶۰
خرم آباد	۲/۳۶	۳/۵۶	دیناور	۷/۷۳	۹
کنگاور	۹/۴۸	۱۱/۳۸	کرمانشاه	۵/۷۰	۳

متوسط عملکرد

مشاهداتی (تن در هکتار): ۴/۷۰	شبیه‌سازی شده (تن در هکتار): ۵/۰۱
------------------------------	-----------------------------------

همبستگی نتایج حاصل از دو روش در این دشت، برابر با ۰/۷۷ می‌باشد که همخوانی مطلوب نتایج دو روش با یکدیگر را نشان می‌دهد.

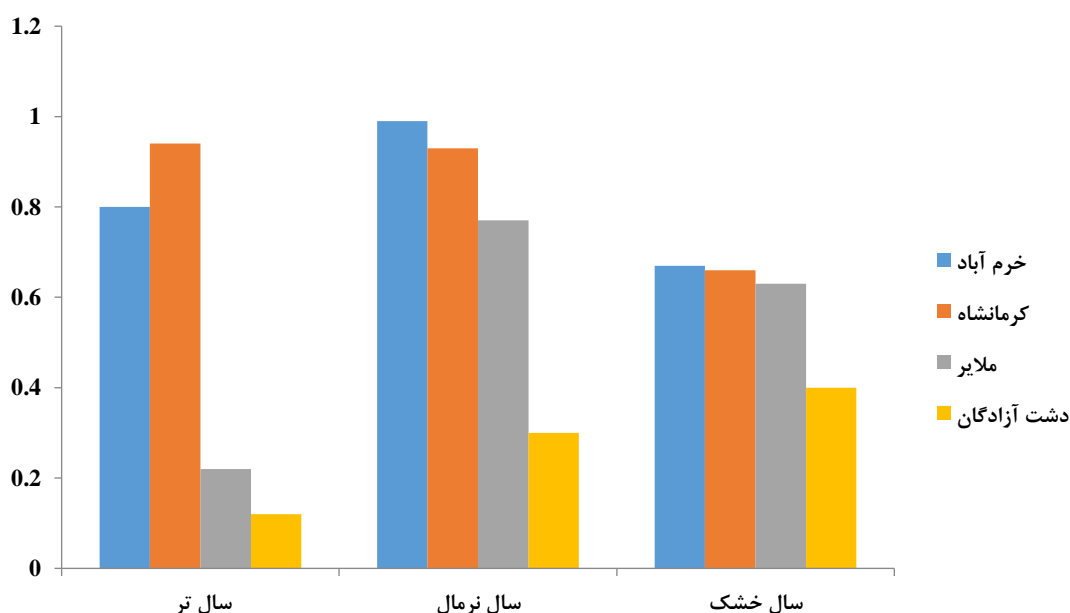
برای مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL و مدل SWAT، مقادیر بدست آمده ماه‌های مختلف از سه سال مدنظر با یکدیگر، مقایسه شده است. یک نمونه از این روند برای دشت ایلام در شکل (۶) قابل مشاهده است.



شکل ۶- مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از مدل SWAT و الگوریتم SEBAL در دشت ایلام (سال نرمال آبی)

که از روش‌های SEBAL و SWAT بدست آمده، براساس دشت و وضعیت سال آبی، در شکل (۷) با یکدیگر مقایسه شده است.

در گام بعدی از این تحقیق، چهار دشت که در شمال غربی (کرمانشاه)، شرق (خرم آباد)، شمال شرقی (ملایر) و جنوب حوضه (دشت آزادگان) واقع شده‌اند، انتخاب و مقادیر تبخیر و تعرق آن‌ها



شکل ۷- مقایسه همبستگی مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از مدل SWAT و الگوریتم SEBAL در دشت‌های حوضه آبریز

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.

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.

دامنه تغییرات شار خالص تابش سطحی، بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات متغیر است. مقادیر منفی ایجاد شده در شکل (۱۰)، به دلیل خطای مدل در برخی از پیکسل‌های تصویر است که این خطا در زمین‌های کشاورزی دیده نمی‌شود.

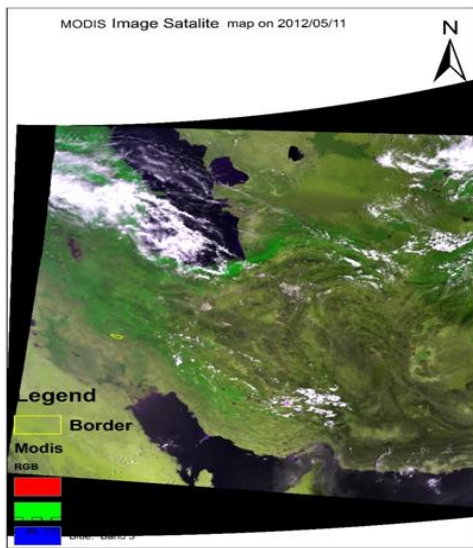
شار گرمای خاک (G)

بخشی از انرژی رسیده به سطح زمین، بازتاب داده نمی‌شود و سبب گرم شدن عوارض سطح زمین می‌شود. این گرما، متأثر از پوشش گیاهی سطح زمین و رطوبت سطح خاک است. شار گرمای خاک که در واقع بیانگر هدایت مولکولی حرارت به داخل زمین است، در مزارع زراعی، دارای مقدار کمتر از مناطق بدون پوشش گیاهی است. شار گرمای خاک براساس راهنمای الگوریتم SEBAL به دست می‌آید.

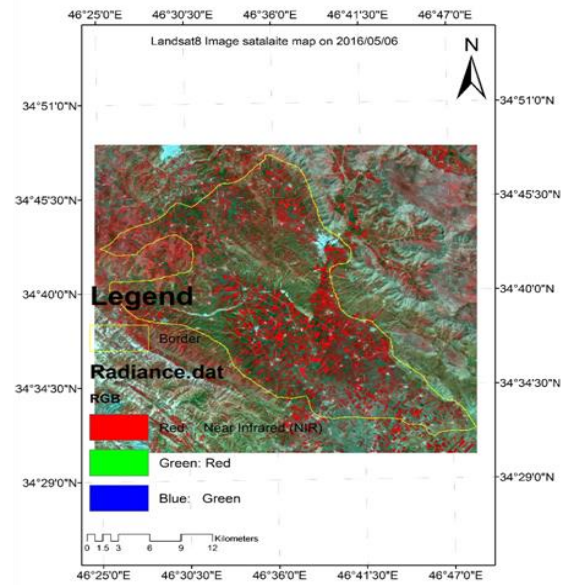
با توجه به شکل (۱۱)، مقادیر بیشینه شار گرمای خاک در تصویر لندست و مادیس به ترتیب ۸۶/۷۱ و ۶۸/۹۷۱ است.

با توجه به شکل (۷)، همبستگی میان نتایج حاصل از مدل SWAT و الگوریتم SEBAL، براساس وضعیت سال آبی، در سال‌های نرمال، تر و خشک، به ترتیب، ۰/۷۴، ۰/۵۲ و ۰/۶۰ می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل SWAT و الگوریتم SEBAL در سال نرمال آبی، نسبت به سال تر و خشک، به یکدیگر نزدیک‌تر بوده و می‌توانند، نزدیک به مقدار واقعی، باشند.

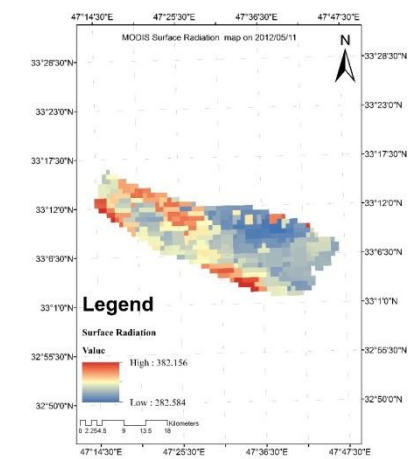
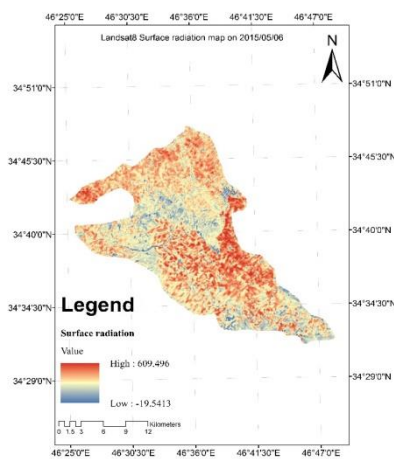
در مرحله پایانی این پژوهش، پس از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در بخش قبل، دقت نتایج الگوریتم SEBAL، با به-کارگیری تصاویر سنجنده OLI از ماهواره لندست ۱۸ در دشت روانسر برای تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۰۶ (شکل ۸) و سنجنده MODIS از ماهواره Terra^۲ در دشت پلدختر برای تاریخ ۲۰۱۲/۰۵/۱۱ (شکل ۹)، بررسی شده است. تصاویر مادیس، به دلیل قدرت تفکیک زمانی مناسب روزانه، برای بررسی وضعیت تبخیر و تعرق روزانه مزارع کشاورزی مناسب می‌باشند و تصاویر Landsat 8 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، مناسب خواهند بود. دشت روانسر دارای سطح زیر کشت بالاتر و تغییرات توپوگرافی کم‌تر است و شبیه‌سازی عملکرد محصول توسط نرم-افزار SWAT، در دشت پلدختر هم نتیجه بهتری به‌دست 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.



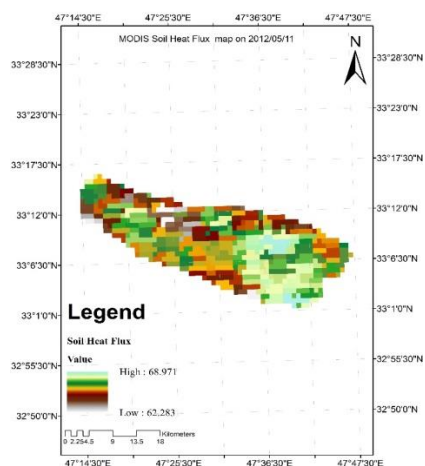
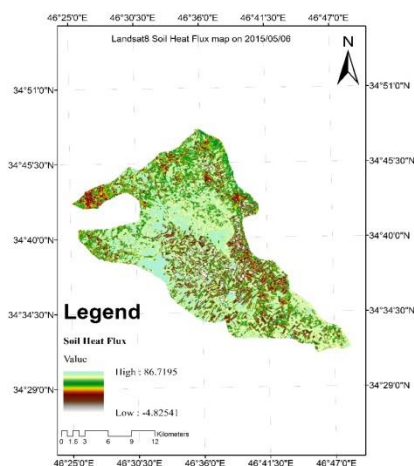
شکل ۹- تصویر مادیس استفاده شده در تاریخ ۲۰۱۲/۰۵/۱۱



شکل ۸- تصویر لندست استفاده شده در تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۰۶



شکل ۱۰ شار تابش خالص سطحی تصویر مادیس تاریخ ۲۰۱۲/۰۵/۱۱ (سمت راست) و لندست تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۰۶ (سمت چپ)



شکل ۱۱- شار گرمای خاک تصویر مادیس تاریخ ۲۰۱۲/۰۵/۱۱ (سمت راست) و لندست تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۰۶ (سمت چپ)

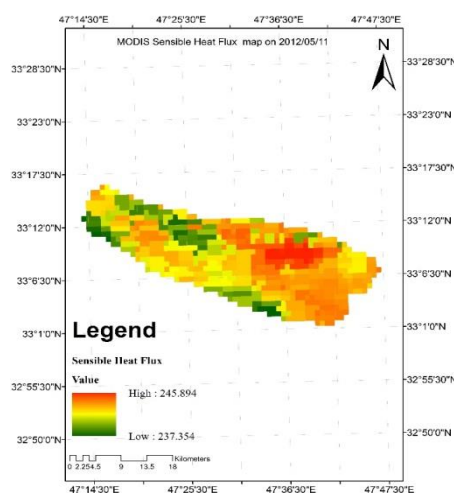
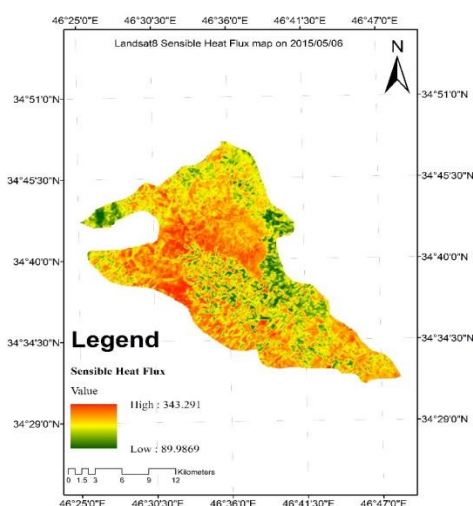
شار گرمای محسوس (H)

اساس، پیکسل سرد دارای دمای سطحی پایین و پوشش گیاهی بالا است و پیکسل گرم دارای دمای بالا و پوشش گیاهی پایین است. با انتخاب پیکسل سرد و گرم، شار گرمای محسوس، براساس راهنمای الگوریتم SEBAL محاسبه می‌شود. این محاسبات تا زمانی که تغییرات مقاومت آئرو دینامیکی ثابت شود، ادامه خواهد یافت و در صورتی که نتیجه مناسب حاصل نشود، باید پیکسل سرد و گرم را تغییر داد. در جدول (۸)، مشخصات پیکسل‌های سرد و گرم انتخاب شده در این مرحله، آورده شده است.

تفاوت دمای سطح اجسام و هوای محیط از طریق سه حالت هدایت، همرفت و تابش، جابجا شده و شار گرمای محسوس را ایجاد می‌کند. میزان گرمای محسوس به سرعت هوا و میزان زبری اجسام بستگی دارد. یکی از مراحل مهم و اساسی در محاسبه شار گرمای محسوس انتخاب پیکسل سرد و گرم است. مبنای صحت انجام محاسبات و نتایج به انتخاب صحیح این دو عامل وابسته است. در این تحقیق، مبنای انتخاب پیکسل سرد و گرم، دمای سطحی و میزان شاخص NDVI قرار داده شده است. بر این

جدول ۸- مشخصات پیکسل‌های سرد و گرم انتخاب شده

Landsat	
پیکسل سرد	پیکسل گرم
شار گرمای خاک (W/m ²) = ۳۴/۴۹	شار گرمای خاک (W/m ²) = ۸۴/۸۲
شار گرمای نهان (W/m ²) = ۵۱۴/۴۱	شار گرمای نهان (W/m ²) = ۴۴۹/۲۵
LST = ۲۹۴/۹۷ (درجه کلونین)	LST = ۳۱۲/۰۹ (درجه کلونین)
NDVI = ۰/۸	NDVI = ۰/۱۵
x = ۴۶ ۳۹ ۸۹,۲۹	x = ۴۶ ۳۱ ۵۲,۲۷
y = ۳۴ ۳۹ ۱۹,۱۵	y = ۳۴ ۴۴ ۳۶,۲۳
MODIS	
پیکسل سرد	پیکسل گرم
شار گرمای خاک (W/m ²) = ۶۴/۹۶	شار گرمای خاک (W/m ²) = ۶۷/۵۳
شار گرمای نهان (W/m ²) = ۳۵۴/۵۸	شار گرمای نهان (W/m ²) = ۳۰۹/۱۶
LST = ۳۰۱/۶۲۳ (درجه کلونین)	LST = ۳۰۶/۱۲ (درجه کلونین)
NDVI = ۰/۱۹۸	NDVI = ۰/۱۴
x = ۴۷ ۳۹ ۸۶,۲۱	x = ۴۷ ۴۳ ۵۳,۸۳
y = ۳۳ ۱۰ ۴۴,۶۴	y = ۳۳ ۵ ۵۳,۸۳



شکل ۱۲- شار گرمای محسوس تصویر مادیس تاریخ ۲۰۱۲/۰۵/۱۱ (سمت راست) و لندست تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۰۶ (سمت چپ)

تبخیر و تعرق واقعی

تبخیر و تعرق واقعی لحظه‌ای (ET_{inst})، پس از محاسبه مقادیر مجهول در معادله توازن انرژی، محاسبه می‌شود. همان‌طور که در

مقادیر شار گرمای محسوس در مناطق دارای پوشش

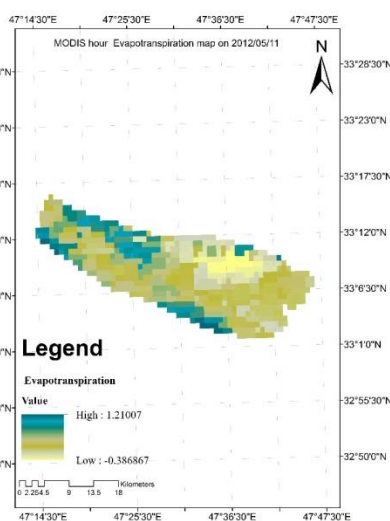
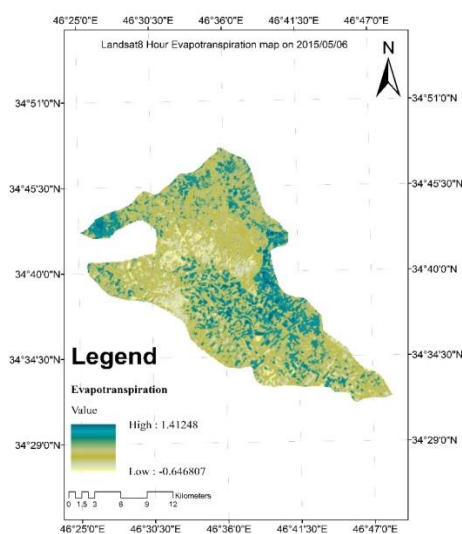
گیاهی به رنگ سبز و با مقادیری بالاتر در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود.

برای دشت پل دختر و تصویر مادیس به ترتیب ۰/۳۸- و ۱/۲۱ می باشد. براساس الگوریتم SEBAL، مقادیر منفی به دلیل خطای مدل در برخی از پیکسل های تصویر بوده و مقادیر بالاتر از ۱ می توانند مربوط به محصولات ذرت یا یونجه باشند.

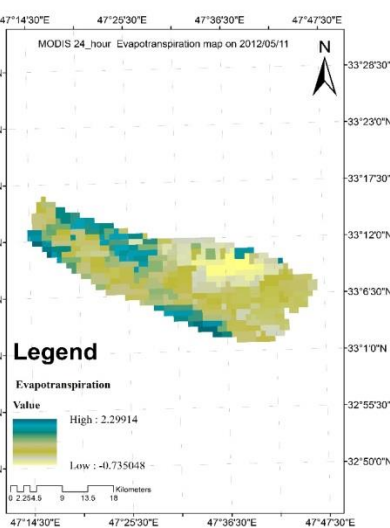
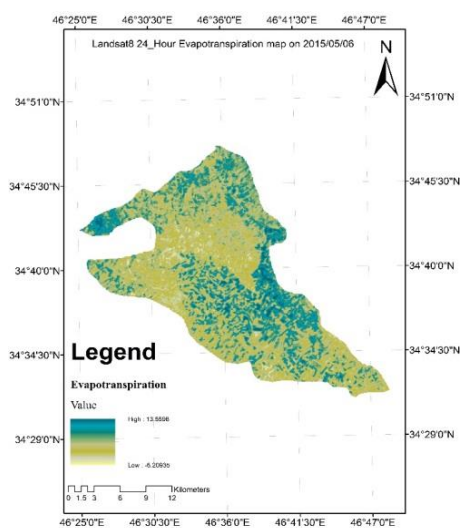
براساس شکل (۱۴)، میزان بیشینه تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته (روزانه) در دشت روانسر و تصویر لندست ۱۳/۵۴ و در دشت پل دختر و تصویر مادیس ۲/۲۹ میلی متر می باشد. در محاسبات، تبخیر و تعرق روزانه نسبت به تبخیر و تعرق لحظه ای، کاربرد بیشتری دارد.

مراحل قبل توضیح داده شد، مقادیر مجهول در معادله تبخیر و تعرق، شار تابش خالص (R_n)، شار تابش محسوس (H) و شار گرمای خاک (G)، مقدار شار گرمای نهان تبخیر لحظه ای می باشند. در ادامه، تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه محاسبه شده است.

بر اساس شکل (۱۳)، تبخیر و تعرق ساعتی به دست آمده در دشت روانسر و پل دختر تقریباً نزدیک به هم می باشند. مقادیر کمینه و بیشینه تبخیر و تعرق ساعتی در دشت روانسر براساس تصویر لندست، به ترتیب ۰/۶۴- و ۱/۴۱۲ بوده که این مقدار



شکل ۱۳- تبخیر و تعرق ساعتی تصویر مادیس تاریخ ۲۰۱۲/۰۵/۱۱ (سمت راست) و لندست تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۰۶ (سمت چپ)



شکل ۱۴- تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته تصویر مادیس تاریخ ۲۰۱۲/۰۵/۱۱ (سمت راست) و لندست تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۰۶ (سمت چپ)

SWAT، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز کرخه محاسبه شود. الگوریتم SEBAL در اکثر نقاط دنیا به منظور برآورد تبخیر و تعرق در سطح، با استفاده از داده های سنجنش از دور (RS)،

نتیجه گیری

در این تحقیق تلاش شد تا توسط الگوریتم SEBAL و مدل

برای اقدامات مدیریتی در سطح حوضه‌های آبریز، استفاده شوند. همانطور که نشان داده شد نتایج دو روش، به‌ویژه در شرایط نرمال آبی، نزدیک به هم هستند و لذا می‌توان اینگونه استنباط نمود که نتایج آن‌ها می‌تواند صحیح و نزدیک به واقعیت باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- 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>.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333 2-4., 413-430.
- Abedi, G., Eslamian, S., Amiri, M., (2008). Comparison of the four approaches of evapotranspiration estimation with micro lysimeter data in the Isfahan region, In: *Proceedings of 2nd National Congress on Irrigation network management*, Ahvaz (In farsi).
- Allen, R., Morse, A., Tasumi, M. (2003). Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. *ICID workshop on remote sensing of ET for large regions*.
- 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. 11.
- Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, and N.B. Sammons. (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., Holtslag, A. A. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1, Formulation. *Journal of Hydrology*, 198-212.
- Bastiaanssen, W. G., Noordman, E. J., Pelgrum, H., Davids, G. (2005). SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Bastiaanssen, W., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G., et al. (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 213- 229.
- Beven, K.J., (2001). *Rainfall-runoff modeling*. the primer. Wiley. Chichester. UK. 361p.
- Diwakar, S., Kaur, S., Patel, N. (2015). Hydrological modeling in the middle Narmada river basin, india using SWAT model Thesis.
- Easterling, W.E., Rosenburg, N.J., Mckenney, M.S., Jones, C.A., Dyke, P.T. and Williams, J.R. (1992). Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂. *Agricultural and forest Meteorology*, 59:17-34.
- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R. Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23, 486-501.
- 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*, 97:1861-1875.
- Ganjizadeh, R., Boroumand Nasab, S., Soltani Mohammadi, A., Mirzaei, S. (2013). Evapotranspiration zonation and vegetation factor using satellite images (Case study: Birjand Plain). *12th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction, Kerman* (In farsi).
- Gosain A., Rao S., Srinivasan R. Reddy N.G. (2005). Return flow assessment for irrigation command in the Palleru River basin using SWAT model. *Hydrological processes*, 19: 673-682.
- Hadria R., Duchemin B., Lahrouni A., Khabba S., Er-Raki S., Dedieu G., Chehbouni A. and Olioso A. (2006). Monitoring of irrigated wheat in a semi-arid climate using crop modelling and remote sensing data: Impact of satellite revisit time frequency. *International Journal of Remote Sensing*, 27: 1093-1117.
- Hong, S., Hendrickx, J.M.H. 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., Droogers, P. (2008). Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 411-424.
- Immerzeel, W., Gaur, A., Droogers, P. (2006). *Remote Sensing and hydrological modelling of the Upper Bhima catchment*. IWMI Research 3 , International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- 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: 11-24.
- Jayakrishnan, R., Srinivasan, R., Santhi, C. Arnold, J. G. (2005). Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological Processes*. 19, 749-762.
- 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*.
- Karimi, A., Farhadi Bansouleh, B., Hesadi, H. (2012). The estimation of actual evapotranspiration on a regional scale using SEBAL algorithm and Landsat images. *Iran Irrigation and Drainage Journal*, 353-364 (In farsi).
- Kamali, B., Kouchi, D. H., Yang, H., Abbaspour, K. C., (2017). Multilevel Drought Hazard Assessment under Climate Change Scenarios in Semi-Arid Regions—A Case Study of the Karkheh River Basin in Iran. *Water* 2017, 9(4), 241.
- Li, K.Y., Coe, M.T., Ramankutty, N. De Jong, R. (2007). Modeling the hydrological impact of land-change in West Africa, *Journal of Hydrology*, 337: 258-268.
- Memarian, H., Hoseini, H., Memarian. H., (2019). Using SWAT and SWAT-CUP for hydrological simulation and uncertainty analysis in arid and semi-arid watersheds (Case study: Zoshk Watershed, Shandiz, Iran). *Journal of Rainwater*, 7 (2): 35-44.
- Mianabadi, A., Alizadeh, A., Sanaeinejad, S.H., Ghahraman, B., Davary, K. (2016). Assessment of the SEBAL Algorithm to Estimate Actual Evapotranspiration in Neishaboore-Rokh Watershed Using SWAT Model. *Journal of Water Research in Agriculture*. 30(4), 525-541 (In farsi).
- Mir Yaeghub Zadeh, M. (2014). Developing the semi-distributed SWAT model in the evapotranspiration parameter using the energy balance algorithm (SEBAL) Thesis (In farsi).
- Mir Yaeghub Zadeh, M., Soleimani K., Habibnejad Roshan. M., Shahedi, K., Abbaspour. K., Akhavan. S. (2014). Determination and evaluation of actual evapotranspiration using remote sensing data; Case study: Tamer Watershed, Golestan. *Quarterly Journal of Irrigation and Water Engineering*, 89-102 (In farsi).
- Moazenzadeh, R., Ghahreman, B., Arshad, P., Davari, K., (2016). Improving the watershed modeling by integrating main hydrological components in the SWAT model. *Iran Water Resources Research*, 12(3) 65-79 (In farsi).
- Mobasheri, M., Khavarian, H. (2004). The analysis of satellite using methods in determining the evapotranspiration amount. *Geographic Sciences Journal*, 83-98 (In farsi).
- Mobasheri, M., Khavarian, H., Ziaeiian, P., Kamali, Gh. (2005). Estimating actual evapotranspiration using MODIS images and SEBAL algorithms. *Geomatics Conference. Tehran: National Mapping Organization* (In farsi).
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. and Williams J.R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical document (version 2009)*, Texas water resource institute technical report.
- Nosrati, K., Mohseni Saravi, M., Ahmadi, H., Aghighi, H. (2014). The estimation of evapotranspiration in Taleghan watershed using MODIS images and SEBAL model. *Iranian Natural Resources Magazine*, 385-398 (In farsi).
- Output and Results of the "Requirements of the Irrigation of Agricultural and Garden Crop" Design, Ministry of Agriculture and Organization of Meteorology (In farsi).
- Report of Agricultural Studies (2013). Agricultural Consumption and Needs and Production Drainage, Ministry of Energy (In farsi).
- Reporting the System Design of Karkheh River Basin (2013). Iran Water and Power Resources Development Company (In farsi).
- Ruhoff, A., Paz, A., Collischonn, W., Aragao, L., Rocha, H., Malhi, Y. (2012). A MODIS-based energybalance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. *Remote Sens.4* , 703- 725.
- Sanei Nejad, S., Nouri, S., HashemiNia, S.M. (2011). The estimation of actual evapotranspiration using satellite images in Mashhad region. *Water and Soil Journal (Agricultural Science and Technology)*, 540-547 (In farsi).
- SEBAL Advanced Training and Users Manual. (2002). Waters Consulting, University of Idaho, WaterWatch Inc.
- Singh, V.P. (1995). "Watershed Modeling" In: Computer Models of Watershed Hydrology. Singh, V.P (ed.). Chapter 1, Water Resources Publications. Colorado, 1-22.
- Singh R., Kumar S., Nangare D. 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., Trezza, R. (2008). At-surface albedo from Landsat and MODIS satellites for use in energy balance studies of evapotranspiration. *Journal of Hydrology* , 51- 63.
- Trezza, R. & Allen, R. (2003). *Crop water requirements from a remote sensing model for thr Snake plain area in Idaho Geoenseñanza*, año/vol. 8, número 001 Universidad de los Andes San Cristobal, Venezuela. *Geoenseñanza*, 8: 83-90.
- Walters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W. (2002). SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advanced Training and User Manual. Version 1.
- Wei, X., Sriharan, S., Kandiah, R., Osterberg, J., Neale, C., 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.
- Yaeghub Zadeh, M., Boroumand Nasab, S., Izadpanah, Z., Seyyed Kaboli, H. (2014). Studying the spatial

- and temporal changes of Taleghan basin by using the remote sensing in semi-arid regions. *Water Research in Agriculture*, 221-234 (In farsi).
- Yavari, M., Omidvar, J., Davari, K., Farid Hosseini, A., Inanlou M. (2014). Evaluating the empirical estimation methods of actual evapotranspiration (annual) on a large scale using the evapotranspiration estimated from the SEBAL method in Nishabur plain. *Quarterly Journal of Irrigation and Water Engineering*, 44-55 (In farsi).
- Yan Y., Guoqiang W., Jingsha Y. (2006). *Groundwater depth simulation based on beijing county-level SWAT application tool*. Unpublished manuscript, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing, China.
- Yang, Y., Shang, S., Jiang, L (2012). Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agric. For. Meteorol.* 164: 122-112
- Ziaei A.N. and Sepaskhah A. (2003). Model for simulation of winter wheat yield under dryland and irrigated conditions. *Agricultural water management*, 58: 1-17.