

Multipurpose Calibration of SWAT Model in Estimating Runoff, Evapotranspiration, and Crop Yield (A Case Study: Mahabad Plain)

O. Raja¹, M. Parsinejad^{2*}, and M. Tajrishi³

Abstract

In most studies, the SWAT model is calibrated based on surface runoff in hydrometric stations, and the evapotranspiration component, which has a great impact on the estimation of balance components, is not considered or less considered in the calibration process. Therefore, the aim of this study was to estimate the yield and evapotranspiration values of major crops in Mahabad plain in West Azerbaijan province, through multivariate calibration of SWAT model. Calibration and validation of the model based on the data of a hydrometric station (Gerdyaghoub station located at the exit of the plain), and crop yield and evapotranspiration of the major crops of the region including wheat, barley, corn, sugar beet, alfalfa, apple, and grape. A six year calibration period followed by a four-year validation period was used. In the multi-purpose calibration process, the coefficients of 1, 0.9, and 0.8, respectively, for hydrometric data, yield, and evapotranspiration were considered in the objective function of SWAT-CUP software and SUFI2 method. In general, the sensitivity analysis of the model led to the selection of 43 of the most sensitive parameters according to their sensitivity to river discharge, crop yield and evapotranspiration. Also, the heat unit potential required for full plant growth and Leaf area index (LAI) were the most important parameters to simulate the yield and evapotranspiration crops in the model calibration process. The results showed that the SWAT model was able to simulate the surface flow in the periods of calibration ($NSE = 0.85$; $R^2 = 0.87$), and validation ($NSE = 0.92$; $R^2 = 0.89$), as well. The model has high uncertainty in surface flow simulation, especially over-estimation in low flow during calibration period ($PBIAS = 4.5\%$). In evaluating the performance of the SWAT model in estimating actual evapotranspiration, these values were compared with the output of the WaPOR remote sensing model. The results showed that the RMSE criteria varies between 13.8 to 66.4 mm in the calibration period, and between 23.9 to 53.2 mm in the validation period. At the same time, the estimated actual evapotranspiration values of the SWAT model were compared with the estimated crop evapotranspiration of the CROPWAT model. In this study, RMSE criteria in the calibration period between 24.4 (3.6%) to 49.4 (6.5%) mm, and in the validation period between 21.7 (6.2%) to 4.4 53 (7.2%) mm were obtained for different crops. PBIAS values showed that the estimate of SWAT model evapotranspiration in both calibration and validation periods was lower than the estimate of CROPWAT crop evapotranspiration. In general, for most crops, the evapotranspiration values obtained from the SWAT and WAPOR models are far less than the evapotranspiration values estimated by the CROPWAT model that can indicate deficit-irrigation. Crops yield performance estimates were compared by SWAT model with crop yield performance values reported in the region. The results showed a relative estimate of the model for crop performance, while the SWAT model somewhat over-estimated crop performance. The present study showed that multifunctional calibration of large-scale hydrological model SWAT in an irrigated area in addition to using the usual river flow index, taking into account additional parameters such as evapotranspiration and crop yield can increase the accuracy of model results.

Keywords: Evaluation, Surface Flow, Actual Water-Use, Cultivation, WaPOR.

Received: September 21, 2021

Accepted: November 25, 2021

واسنجی چندمنظوره مدل SWAT در برآورد رواناب، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات (مطالعه موردی: دشت مهاباد)

امید رجا^۱، مسعود پارسینه‌زاد^{۲*} و مسعود تاجریشی^۳

چکیده

مدل SWAT به طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس با توجه به کاربری زمین و شیوه‌های مدیریت کشاورزی استفاده می‌شود. در اغلب مطالعات عملکرد این مدل بر اساس داده‌های میدانی رواناب سطحی و اسنجی می‌گردد و به دیگر مؤلفه‌های بیلان آب از جمله تبخیر و تعرق کمتر پرداخته شده است. هدف از این مطالعه واسنجی چندمنظوره مدل SWAT با شاخص‌های تکمیلی از جمله تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات غالب در دشت مهاباد در استان آذربایجان غربی بود. واسنجی و اعتبارسنجی مدل بر اساس داده‌های ایستگاه هیدرومتری گردیقوب واقع در خروجی محدوده مطالعه و داده‌های تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات غالب منطقه شامل گندم، جو، ذرت، چغندر، یونجه، سیب و انگور انجام شد. دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۶ و ۴ سال بود. با توجه به دقت داده‌ها در فرآیند واسنجی چندمنظوره، ضرایب ۱، ۰/۹ و ۰/۸ به ترتیب برای داده‌های هیدرومتری، عملکرد و تبخیر و تعرق در تابع هدف نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI2 در نظر گرفته شد. به طور کلی تحلیل حساسیت مدل منجر به انتخاب ۴۳ مورد از حساس‌ترین پارامترها با توجه به حساسیت آن‌ها به دبی رودخانه، تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه شد به طوری که پتانسیل واحد گرمایی لازم برای رشد گیاه و شاخص LAI از مهم‌ترین پارامترها برای شبیه‌سازی عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات در فرآیند واسنجی مدل به دست آمد. نتایج نشان داد مدل SWAT به خوبی توانسته است جریان سطحی را در دوره‌های واسنجی ($NSE = 0.85$; $R^2 = 0.87$) و اعتبارسنجی ($NSE = 0.92$; $R^2 = 0.89$) شبیه‌سازی کند. برآورد جریان سطحی دارای عدم قطعیت بالایی به خصوص در جریان کم در دوره واسنجی بود که منجر به بیش‌برآورد ($PBIAS = 4.5\%$) جریان سطحی شده است. در ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد تبخیر و تعرق واقعی، این مقادیر با خروجی مدل سنجش از دور WaPOR مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد معیار RMSE در دوره واسنجی بین ۱۳/۸ تا ۶۶/۴ میلی‌متر و در دوره اعتبارسنجی بین ۲۳/۹ تا ۵۳/۲ میلی‌متر متغیر است. در عین حال، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده مدل SWAT با برآورد نیاز آبی (پتانسیل) مدل CROPWAT مورد مقایسه قرار گرفت. در این بررسی معیار RMSE در دوره واسنجی بین ۲۴/۴ تا ۴۹/۴ (۳/۶٪) تا ۴۹/۴ (۶/۵٪) میلی‌متر و در دوره اعتبارسنجی بین ۲۱/۷ تا ۵۳/۴ (۶/۲٪) تا ۴/۴ (۷/۲٪) میلی‌متر برای محصولات مختلف به دست آمد. مقادیر معیار PBIAS نشان داد برآورد تبخیر و تعرق مدل SWAT در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی کمتر از برآورد نیاز آبی CROPWAT بوده است. به طور کلی برای اکثر محصولات، مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از مدل SWAT و WAPOR به مراتب کمتر از مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده توسط مدل CROPWAT است که می‌تواند نشان دهنده کم‌آبیاری باشد. برآورد عملکرد محصولات توسط مدل SWAT با مقادیر عملکرد محصولات گزارش شده در منطقه مقایسه شد. نتایج حاکی از برآورد نسبی مدل برای عملکرد محصول بود، در عین حال که مدل SWAT تا حدی عملکرد محصولات را بیش برآورد کرده است. بررسی حاضر نشان داد واسنجی چندمنظوره مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس SWAT در یک منطقه تحت آبیاری علاوه بر استفاده از شاخص متداول جریان رودخانه، با در نظر گرفتن پارامترهای تکمیلی از قبیل تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات می‌تواند منجر به افزایش دقت نتایج مدل شود.

کلمات کلیدی: ارزیابی، جریان سطحی، مصرف واقعی، ترکیب کشت، WaPOR.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲۵

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email:omid.raja@ut.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: parsinejad@ut.ac.ir

3- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: tajrishy@sharif.edu

*- Corresponding Author

Dor: 20.1001.1.17352347.1400.17.4.1.8



۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۱ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

استفاده از مدل‌های جامع و یکپارچه برای بررسی مسائل پیچیده مدیریت آب با بررسی رفتار هیدرولوژیک حوضه‌های آبریز می‌تواند در شبیه‌سازی بهتر مؤلفه‌های بیلان آب کمک شایانی کند. عدم دسترسی به آمار معتبر و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری میدانی داده از موانع اصلی در شبیه‌سازی تبدلات منابع آب مشخص می‌باشد (Pisinaras et al., 2010). از قابلیت‌های مدل‌های برتر امکان برآورد تأثیر مدیریت‌های آبیاری و کاربری اراضی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی است. در این راستا، از مدل‌های شبیه‌سازی عددی جامع با قابلیت به‌کارگیری در مقیاس‌های مکانی و زمانی کوچک و بزرگ برای مطالعه و برنامه‌ریزی جامع و مدیریت پایدار و همچنین پایش فرآیندهای مرتبط با چرخه آب استفاده می‌شود. مدل SWAT¹ نمونه‌ای از مدل‌های هیدرولوژیک با مبنای فیزیکی و نیمه‌توزیعی می‌باشد که توسط USDA-ARS برای شبیه‌سازی جریان آب، انتقال مواد مغذی و رسوب در مقیاس بزرگ و شرایط اقلیمی مختلف توسعه یافته است (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2011). از مدل SWAT به طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیک برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و مؤثر در مدیریت‌های جامع حوضه‌های آبریز در سطح پروژه‌های بزرگ ملی با توجه به کاربری زمین و شیوه‌های مدیریت کشاورزی استفاده شده است (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2005; Vazquez-Amabile and Engel, 2005; Gassman et al., 2007; Akhavana et al., 2010). به‌طور مشخص از مدل SWAT اثرات بلندمدت شیوه‌های مدیریت اراضی بر اجزای بیلان آب، رسوب در حوضه‌های آبریز بزرگ با شرایط متنوع مدیریتی، نوع خاک و کاربری اراضی توسعه داده شده است.

بررسی نتایج محققین در حوضه‌ها و دشت‌های مختلف در سراسر دنیا نشان داده است مدل SWAT و استفاده از روش SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت به‌خوبی توانسته است جریان سطحی را شبیه‌سازی کند (Peng and Xu, 2013; Naserabadi et al., 2016; Alami et al., 2018; Thavhana et al., 2018; Rezaei moghadam et al., 2019; Berihun et al., 2020; Hu et al., 2020; Eldho and Kanishka, 2020). در مطالعه‌ای (Rostamian, 2008) از مدل SWAT برای تخمین رواناب و رسوب در حوضه بهشت آباد در کارون شمالی استفاده کرد. نتایج مدل برای متوسط رواناب ماهانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی رضایت‌بخش بود. در عین اینکه، مدل در شبیه‌سازی رواناب بهتر از رسوب عمل کرده است.

در مطالعات دیگر به بررسی و ارزیابی توانایی مدل SWAT در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب و تأثیر سناریوهای مدیریتی کمی و کیفی بر منابع آب پرداخته شده است. به طور مثال، در مطالعه‌ای (Faramarzi et al., 2009) با استفاده از مدل SWAT اجزای بیلان آب در مقیاس زیرحوضه در سراسر ایران و در مقیاس زمانی ماهانه و مطالعه جیبا واقع در شمال نیجریه و مطالعه (Adeogun et al., 2014) در حوضه آبریز جیبا واقع در شمال نیجریه و مطالعه (Hosseini et al., 2016) در حوضه‌های منتهی به خلیج فارس با استفاده از مدل SWAT حاکی از پیش‌بینی مؤثر این مدل در مؤلفه‌های بیلان آب بود. Amini et al. (2018) نیز از مدل SWAT برای شبیه‌سازی و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده کردند. برای واسنجی مدل از الگوریتم SUFI2 در برنامه SWAT-CUP و با به‌کارگیری داده‌های ۶ ایستگاه هیدرومتری به صورت ماهانه استفاده شد. نتایج نشان داد این مدل در برآورد بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود از کارایی مناسبی برخوردار است و می‌تواند در حوضه‌های آبریز مشابه و تحلیل سناریوهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی بررسی‌ها نشان داده است مدل واسنجی و اعتبارسنجی شده SWAT، علاوه بر این که یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی رواناب بوده است، بلکه می‌تواند سایر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و بیلان آب از قبیل نفوذ عمقی و جریانات برگشتی را به‌خوبی رصد کند (Jolejolea et al., 2018; Anand et al., 2018; Näschen et al., 2019; Mo et al., 2020; de Oliveira Serrão et al., 2020; Patil and Nataraja, 2020). با این حال، مازول آب زیرزمینی مدل SWAT براساس مدل‌های سرجمع^۲ و مخزن خطی^۳ پایه‌گذاری شده است. با توجه به عدم در نظر گرفتن پارامترهای توزیعی هیدروژئولوژی آب‌های زیرزمینی همچون ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، فرآیندهای آب زیرزمینی را بیش از حد ساده می‌کند (Kim et al., 2008; Aliyari et al., 2019). علی‌رغم این کمبود، به طور کلی شبیه‌سازی‌ها نتایج رضایت بخشی از تخلیه آب زیرزمینی توسط SWAT داشته است (Aizen et al., 2005; Arnold and Fohrer, 2005). علاوه بر این، نمی‌توان تأثیر برداشت و پمپاژ از چاه‌ها را بر شیب سطح آب‌های زیرزمینی شبیه‌سازی کرد (Spruill et al., 2000; Chu and Shirmohammadi, 2004).

در اکثر مطالعات واسنجی مدل SWAT براساس مقادیر رواناب و جریانات سطحی انجام شده و دیگر پارامترهای مؤثر نظیر تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه در واسنجی مدل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. Ahmadzadeh et al. (2013) در حوضه نیشابور و Alizadeh et al. (2014) در حوضه زربنده‌رود نشان دادند واسنجی مدل SWAT براساس تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات می‌تواند بر دقت نتایج مدل

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی حوضه مهبادچای یکی از مناطق مرتفع واقع در شمال غربی ایران و جنوب غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه است و از نظر وسعت، هشتمین زیرحوضه با مساحتی برابر با ۱۵۱۶ کیلومتر مربع می‌باشد که حدود ۲/۹ درصد از مساحت کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه را در برمی‌گیرد (Dastjerdi et al., 2019). حداکثر ارتفاع محدوده حدود ۲۵۰۰ و حداقل ارتفاع حدود ۱۲۷۰ متر در حواشی دریاچه ارومیه است. دشت مهباد واقع در حوضه مهبادچای با وسعت ۲۷۵ کیلومترمربع در موقعیت طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲ دقیقه شمالی از استوا در جنوب غربی دریاچه ارومیه قرار گرفته و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۸۵ متر است. در این محدوده می‌توان به سد مهباد اشاره کرد که از سازه‌های مهم در منطقه است و شبکه آبیاری و زهکشی مهباد در پایین دست آن قرار دارد. به لحاظ اقلیمی مطابق با روش‌های دمارتن و آمبرژه دارای آب و هوای نیمه‌خشک تعیین شد و متوسط بارندگی براساس آمار بارندگی ایستگاه سینوپتیک مهباد در طول دوره آماری ۱۳۶۹-۱۳۶۸ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷، سالانه ۴۰۲ میلی‌متر گزارش شده است. در طول دوره آماری ذکر شده، متوسط تبخیر سالانه از تست براساس آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده برای ایستگاه سینوپتیک مهباد برابر با ۱۸۶۰ میلی‌متر می‌باشد. موقعیت زیرحوضه مهبادچای و دشت مهباد در حوزه آبریز دریاچه ارومیه و کشور در شکل ۱ نشان داده شده است.

ببفزاید. در مطالعه احمدزاده و همکاران مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و عملکرد محصولات کشاورزی عمده در سال‌های پرباران براساس سند ملی آب و اسنجی شد و نتایج ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۸ را نشان داد (Ahmadzadeh et al., 2014). همچنین، نتایج مطالعه Farokhnia et al. (2018) و Wei and Baiely (2019) با استفاده از مدل SWAT حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی سایر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی همچون تبخیر و تعرق و نیز برآورد عملکرد محصولات بود.

استفاده از مدل‌های جامع شبیه‌سازی آب‌های سطحی بزرگ مقیاس نظیر SWAT برای مطالعات مدیریت در سطح حوضه آبریز ضروری است و برای تحلیل اثربخشی سناریوهای مختلف کاربرد دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد و اسنجی چندمنظوره برای افزایش دقت مکانی مدل توصیه شده است (Abbaspour et al., 2007). در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه در مناطق نیمه‌خشک مانند دشت مهباد از آن جهت حائز اهمیت است که در این منطقه در کنار منابع آب سطحی از آب‌های زیرزمینی برای مصارف مختلف به خصوص کشاورزی استفاده می‌شود. در عین حال در جهت افزایش دقت عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی تبادلات مؤلفه‌های آب در منطقه غیراشباع، و اسنجی مدل را علاوه بر استفاده از مقادیر جریان‌ات سطحی می‌توان براساس تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه به دلیل ارتباط مستقیم با ذخیره‌ی آب در خاک ارزیابی کرد. بر همین اساس، در تحقیق حاضر و اسنجی مدل SWAT علاوه بر استفاده از مقادیر جریان‌ات سطحی، از داده‌های تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات در دشت مهباد انجام شده است.

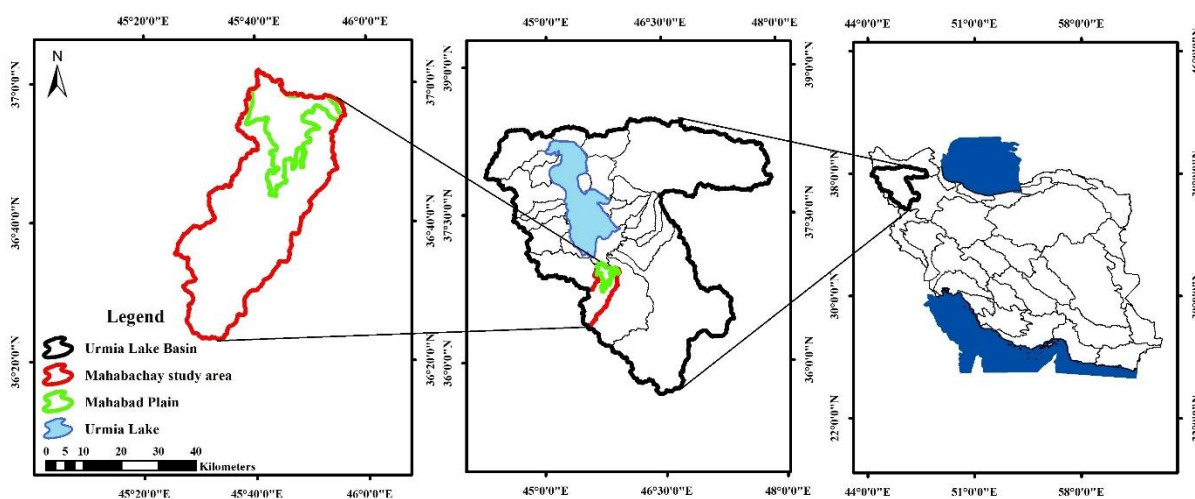


Fig. 1- Location of Mahabadchay Watershed and Mahabad Plain in the Urmia Lake Basin

شکل ۱- موقعیت حوضه مهبادچای و دشت مهباد در حوزه آبریز ارومیه

۲-۲- تنوری مدل SWAT

خاک، کاربری اراضی، مدیریت و تغییر شیب و همچنین نوسانات رطوبت خاک تغییر می‌کند.

در مدل SWAT تبخیر از خاک و پوشش گیاهی به طور مجزا محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق گیاه مرجع متناسب با اطلاعات در دسترس به سه روش پنمن-مانتیت (Monteith, 1965)، پرستلی-تیلور (Priestley and Taylor, 1972) و روش هارگریوز (Hargreaves and Samani, 1982) قابل محاسبه است (Neitsch et al., 2005). با تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل، مدل SWAT با فرضیات زیر قادر به محاسبه تبخیر و تعرق واقعی است. در مدل SWAT ابتدا تبخیر/تصعید ناشی از آب بارندگی یا برف بر روی سطح پوشش گیاهی و سپس مقدار تبخیر/تصعید واقعی را بر اساس حداکثر میزان تعرق و تبخیر از سطح خاک با استفاده از روشی مشابه روش Ritchie (1972) برآورد می‌شود. تعرق به عنوان یک تابع خطی از ET پتانسیل و شاخص سطح برگ (LAI) مطابق با معادلات (۳) و (۴) محاسبه می‌شود:

$$E_t = \frac{ET_0 \times LAI}{3} \quad 0 \leq LAI \leq 3 \quad (3)$$

$$E_t = ET_0 \quad LAI > 3 \quad (4)$$

که در آن E_t حداکثر تعرق در روز مورد نظر (میلی‌متر)، ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل و LAI شاخص سطح برگ می‌باشد. تبخیر واقعی خاک با استفاده از توابع نمای بین عمق خاک و مقدار آب مطابق با معادله (۵) تخمین زده می‌شود:

$$E_{soil,z} = E''_s \frac{Z}{Z + \exp(2.374 - 0.00713z)} \quad (5)$$

که در آن $E_{soil,z}$ تبخیر در عمق z (میلی‌متر)، E''_s حداکثر تبخیر آب خاک (میلی‌متر) و Z عمق خاک می‌باشد.

در مدل SWAT ابتدا پتانسیل عملکرد گیاه برای گیاهان مختلف محاسبه می‌شود. وقتی عمل برداشت انجام می‌شود قسمتی از زیست توده به عنوان عملکرد (yield) از هر HRU تحت عنوان شاخص برداشت نامیده می‌شود که این شاخص بین صفر تا یک می‌باشد. در مدل SWAT پس از محاسبه زیست توده و با استفاده از شاخص برداشت عملکرد گیاهی از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$Yield = HI \times bio_{ag} \quad HI \leq 1 \quad (6)$$

که در آن HI شاخص برداشت (بدون بعد)، $Yield$ میزان عملکرد محصول بر حسب $(Kg \cdot ha^{-1})$ و bio_{ag} مقدار زیست توده گیاهی بالای سطح زمین در روز برداشت $(Kg \cdot ha^{-1})$ می‌باشد. رابطه ارایه شده در بالا برای محاسبه عملکرد گیاه در شرایط ایده‌آل بوده و همواره مقدار عملکرد واقعی در نتیجه تأثیر تنش‌های آبی، دما، میزان کود نیتروژن و فسفر مصرفی کمتر از مقدار پتانسیل است.

از قابلیت‌های مدل SWAT علاوه بر امکان شبیه‌سازی جریانات سطحی می‌توان به امکان برآورد میزان ذخیره آب در منطقه غیراشباع خاک، تبخیر و تعرق واقعی و نهایتاً تغذیه آبخوان حاصل از تلفات اشاره کرد (Srinivasan et al., 2010; Nair et al., 2011; Dowlatabadi and Zomorodian, 2016). مدل SWAT فرآیندهای سطحی در مقیاس حوضه را در قالب زیرحوضه‌های یکسان از لحاظ کاربری اراضی، خاک و توپوگرافی (شیب) تحت عنوان واحدهای پاسخ هیدرولوژیک^۴ (HRU) تقسیم کرده و محاسبه توازن توزیع آب، مواد مغذی و رسوب را در این مقیاس انجام می‌دهد (Sadatpour et al., 2019). نهایتاً خروجی مدل براساس درصد سطح HRU در زیرحوضه تا خروجی حوضه توسعه می‌یابند. در این مدل برحسب مشخصات حوضه، مسیرهای مختلفی برای حرکت آب در حوضه پیش‌بینی شده است. مجموعه ورودی به حوضه شامل باران، برف ذوب شده و آب آبیاری نهایتاً به صورت رواناب سطحی یا نفوذ تخلیه می‌شود. چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT بر اساس معادله بیلان آب استوار است:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در آن مؤلفه‌های مختلف در روز t ام شامل SW_t ، مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارندگی (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار ورودی به پروفیل خاک (منطقه غیراشباع) وارد می‌شود (میلی‌متر) و Q_{gw} مقدار آب جریان برگشتی (میلی‌متر) است.

مدل SWAT از روش شماره منحنی اصلاح شده سازمان حفاظت خاک آمریکا (USDA Soil Conservation Service, 1972) به شرح زیر برای تخمین رواناب سطحی تحت کاربری‌های مختلف اراضی و انواع گوناگون خاک‌ها استفاده می‌کند. روندیابی جریان با استفاده از دو روش متغیر و ماسکینگ‌هام^۵ انجام می‌شود (Neitsch et al., 2005; Amini et al., 2018):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

که در آن R_{day} عمق بارش در روز مورد نظر (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار تجمع رواناب (میلی‌متر)، I_a نگه‌داشت اولیه شامل ذخیره سطحی، برگاب و نفوذ قبل از ایجاد رواناب (میلی‌متر) و S نگه‌داشت سطحی خاک (میلی‌متر) می‌باشد. پارامتر S از نظر مکانی به دلیل تغییر در بافت

اهداف مدل‌سازی، مسأله مدیریتی مرتبط با آن و داده‌های در دسترس، کار با آن آسان‌تر شود (Izady et al., 2010; Bear and Cheng, 2010). شکل ۲ یک روش گام به گام مرحله‌ای را برای تهیه مدل مفهومی SWAT در دشت مهاباد را نشان می‌دهد. اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی آب سطحی با مدل SWAT و رابط گرافیکی ArcSWAT در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 شامل منابع آب ورودی به محدوده، منابع آب خروجی از محدوده، مرزهای فیزیکی، نقشه رقوم، ارتفاع، نقشه کاربری اراضی، نقشه نوع خاک، داده‌های مدیریت کاشت (محصولات عمده، کاشت و برداشت، مراحل شخم‌زنی، کوددهی، آبیاری و غیره)، داده‌های هیدرومتری و داده‌های اقلیمی از ایستگاه‌های باران‌سنجی، تخیرسنجی و سینوپتیک (بارش، درجه حرارت حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی حداکثر و حداقل، تابش خورشیدی، تعداد ساعات روشنایی و سرعت باد) بود.

برای محاسبه عملکرد واقعی ابتدا باید مقدار واقعی تغییرات مقدار کل ماده گیاهی تولید شده (Δbio_{act}) در یک روز مشخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردد:

$$\Delta bio_{act} = \Delta bio \times \gamma_{reg} \quad (7)$$

که در آن Δbio بیانگر تغییرات مقدار کل توده گیاهی و γ_{reg} ضریب رشد گیاهی می‌باشد که از رابطه زیر در مدل قابل محاسبه است:

$$\gamma_{reg} = 1 - \max(w_{strs}, t_{strs}, n_{strs}, p_{strs}) \quad (8)$$

که در آن w_{strs} ، t_{strs} ، n_{strs} و p_{strs} به ترتیب تنش‌های آبی، دما، میزان نیتروژن و فسفر مصرفی وارد بر گیاه در یک روز مشخص است (Neitsch et al., 2009). مقدار γ_{reg} بین صفر تا یک متغیر است.

۳-۲- مدل مفهومی منطقه مورد مطالعه

مدل مفهومی یک تصویر ساده شده از شرایط واقعی در محدوده مورد مطالعه شامل خصوصیات هیدرولیکی، تغذیه و تخلیه است به طوری که محدوده و مسأله سامانه واقعی را ساده‌تر می‌کند تا از نقطه نظر

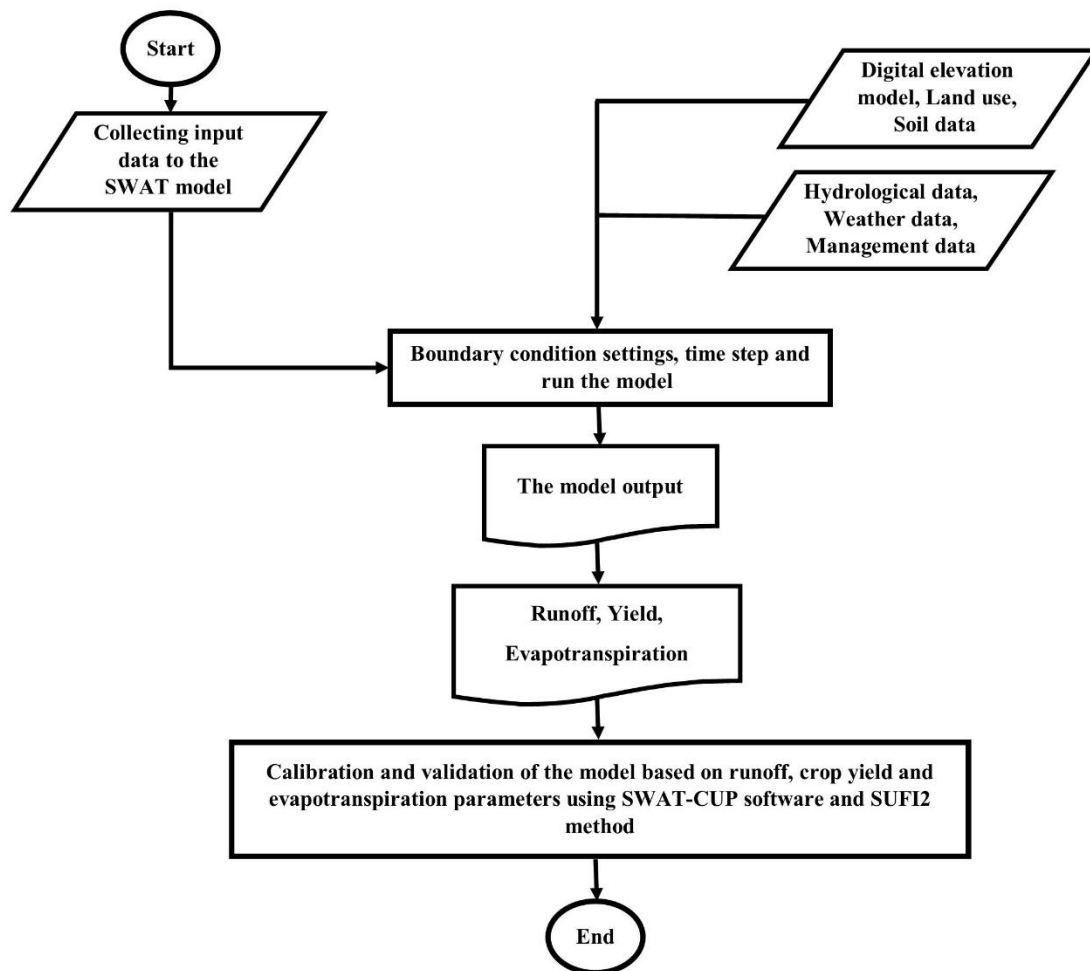


Fig. 2- Flowchart of study
شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام مطالعه

۲-۴- داده‌های مورد استفاده در مدل

منطقه به شمار می‌آیند که در فرآیند اعمال مدیریت آن‌ها شامل کاشت و برداشت، مراحل شخم‌زنی، کوددهی، آبیاری و غیره به مدل معرفی شد.

برای جمع‌آوری اطلاعات آب و هوایی مورد نیاز از آمار ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی منطقه استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه شامل ایستگاه سینوپتیک مهاباد، ایستگاه کليماتولوژی مهاباد، دو ایستگاه باران‌سنجی هواشناسی (یک ایستگاه واقع در محدوده و یک ایستگاه در نزدیکی و اطراف محدوده)، شش ایستگاه باران‌سنجی معمولی وزارت نیرو واقع در دشت و نزدیک آن در شکل (۳d) نشان داده شده است. علاوه بر داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک، کليماتولوژی، باران‌سنجی و تخیرسنجی سازمان هواشناسی و وزارت نیرو، از داده‌های چهار نقطه باز تحلیل شده $CFSR^A$ شامل بارندگی، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی نیز استفاده شد. در عین حال، مدل مولد آب و هوا WXGEN در SWAT گنجانیده شده است که برای تولید داده‌های آب و هوایی یا بازسازی داده‌های مفقوده ایستگاه سینوپتیک مهاباد استفاده شد.

رودخانه مهاباد به عنوان اصلی‌ترین آبراهه طبیعی در محدوده دشت مهاباد به طول ۲۶ کیلومتر در جهت جنوب به شمال جریان دارد (Dastjerdi et al., 2019). سد مهاباد کنترل کننده اصلی جریان سرشاخه‌های این رودخانه است که در یک کیلومتری جنوب غربی شهر مهاباد واقع شده است. شبکه رودخانه مورد استفاده در فرآیند مدل‌سازی در شکل (۳e) نشان داده شده است. همچنین، در این مطالعه از ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب واقع در پایین دشت برای پایش جریان خروجی از دشت استفاده شد. لازم به ذکر است در تعیین زیرحوضه‌ها و زیرواحدهای هیدرولوژیکی (HRUها)، مرزهای زیرحوضه‌ها به منظور اعمال سناریوهای مدیریتی تا حد امکان متناسب با ۵۱ نقاط تحویل آب در سطح شبکه آبیاری مهاباد تطبیق داده شد. در شکل (۳e) موقعیت ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب، سد مهاباد و محدوده زیرحوضه‌ها آورده شده است.

برنامه آبیاری در مدل متناسب با زمان‌بندی و دفعات وقایع آبیاری و براساس نیاز آبی کشت با استفاده از دو منبع آب سطحی و زیرزمینی تعریف شده است. بیلان آب ورودی و خروجی سد با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده از سازمان آب منطقه‌ای به مدل معرفی شد. بخشی از جریان آب خروجی از سد برای تأمین آب آبیاری شبکه پایین دشت مصرف می‌شود و بخشی دیگر به منظور تأمین حقابه زیست‌محیطی به دریاچه ارومیه رهاسازی می‌شود. میزان تخصیص

در مدل SWAT کل محدوده مطالعه با استفاده از نقشه‌های DEM^4 ، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تبدیل شده و در نهایت با تکمیل داده‌های اقلیمی و مدیریت گیاهی شبیه‌سازی انجام می‌شود. دقت تقسیم حوضه به زیرحوضه‌های مختلف تابعی از دقت مکانی نقشه رقومی ارتفاع (DEM) مورد استفاده می‌باشد. در واقع، دقت نقشه DEM به طور قابل ملاحظه‌ای پیش‌بینی جریان آب سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه از نقشه DEM، STRM در مقیاس ۳۰ متر استفاده شد (شکل (۳a)). بررسی منابع و سوابق مطالعات خاکشناسی موجود، از طریق جمع‌آوری داده‌ها و گزارشات خاک از سازمان‌های آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، مهندسی مشاور فرازآب و همچنین داده‌های میدانی جمع‌آوری شده از ستاد احیاء دریاچه ارومیه انجام شد. عمده داده‌های خاک اخذ شده از منابع مختلف در اراضی زراعی و باغی در سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری بودند که براساس نیاز ورودی داده‌های خاک به مدل SWAT معرفی شدند. با توجه به این که در مدل SWAT خصوصیات فیزیکی تعداد معینی خاک با مشخصات معلوم تعریف شده، لذا برای تکمیل داده‌های ورودی مطابق با خصوصیات خاک‌های منطقه به مدل SWAT اطلاعات لازم با استفاده از مدل RETC⁵ و عملکرد انتقال پدري HYPRES استخراج و به مدل تعریف شد (Wösten et al., 2001). نقشه خاک مورد استفاده در این مطالعه در شکل (۳b) نشان داده شده است. نام‌گذاری رسته‌های خاک سطحی در نقشه خاک متناسب با بافت خاک با عنوان مهاباد (M)، یک خط تیره و عدد مربوط به تعداد لایه و نوع گروه هیدرولوژیکی خاک انجام شده است. در ادامه بعد از خط تیره، سه عدد که به ترتیب مربوط به درصد رس، سیلت و شن لایه سطحی خاک می‌باشند که به‌طور پیوسته آورده شده است.

از نقشه کاربری اراضی مستخرج از ستاد احیاء دریاچه ارومیه برای سال ۱۳۹۸ و دارای ۱۷ کلاس اصلی با مقیاس ۳۰ متر در ۳۰ متر در مدل SWAT استفاده شد (Water Engineering Research Institute, 2019). کلاس‌های موجود در نقشه کاربری اراضی مطابق با فرمت مدل SWAT شامل کشاورزی (AGRL)، یونجه (ALFA)، سیب (APPL)، زمین بایر (BARR)، کلزا (CANA)، ذرت (CORN)، دیم (CRDY)، اراضی آبی (CRIR)، انگور (GRAP)، پیاز (ONIO)، باغ (ORCD)، مرتع (PAST)، چغندر قند (SGBT)، گوجه‌فرنگی (TOMA)، زمین لخت (TUBG)، شهری (URBN) و پهنه آبی (WATB) در شکل (۳c) نشان داده شده است. گندم، جو، ذرت، چغندر قند، یونجه، سیب و انگور از عمده محصولات تحت کشت در

ارتفاع براساس نقشه شبکه رودخانه اصلاح شد. هر کدام از واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) از نظر نوع کاربری، گروه هیدرولوژیکی خاک و کلاس شیب تفکیک و مبنای محاسبات مدل قرار داده شد.

در تعیین زیرحوضه‌ها، ملاحظات و اقدامات لازم با توجه به محدودیت‌های مرز کوه و دشت، مرز محصولات باغی و زراعی، مرز دهستان‌ها، موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در سطح دشت و نیز نقاط تحویل آب در سطح شبکه آبیاری در نظر گرفته شد تا زیرحوضه‌های تولید شده با عوارض موجود در منطقه تطابق کافی داشته باشند. در ادامه داده‌های هواشناسی روزانه شامل بارندگی، دمای کمینه و بیشینه دما، سرعت باد و رطوبت نسبی به مدل تعریف شد. موقعیت ایستگاه هیدرومتری (ایستگاه گردیعقوب) واقع بر رودخانه مهاباد به مدل معرفی شد. داده‌های مدیریتی برای محصولات غالب زراعی و باغی منطقه شامل گندم، جو، ذرت، یونجه، چغندر، سیب و انگور با اعمال تغییرات در پرونده‌های مدیریتی (.mgt) برای هر زیر حوضه و HRU به مدل معرفی شد. برای روندیابی جریان‌ات سطحی از روش ذخیره متغیر و برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روش پنمن-ماتیت فائو در مدل SWAT استفاده شد. پس از معرفی کلیه داده‌ها به مدل، تعداد زیرحوضه‌ها و HRU به ترتیب ۱۱۷ و ۳۷۱۴ به دست آمد (شکل ۳). اجرای مدل با گام زمانی روزانه به مدت ۱۳ سال از ۱ مهر سال ۱۳۸۵ (۲۳ سپتامبر ۲۰۰۶) تا ۳۱ شهریور سال ۱۳۹۸ (۲۲ سپتامبر ۲۰۱۹) انجام شد.

۲-۶- واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این مطالعه به منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت خروجی‌های مدل SWAT و آنالیز حساسیت از روش SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد (Abbaspour, 2015). برای آنالیز حساسیت، میزان تغییرات در مقادیر خروجی مدل به ازای بازه‌های تغییرات در میزان ورودی‌های مدل محاسبه شده و پارامترهای حساس در اجرای مدل تعیین می‌گردد. در مطالعه حاضر آنالیز حساسیت از روش تحلیل موضعی انجام و نتایج حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی به دامنه تغییرات هر کدام از پارامترها وابسته می‌باشد (Abbaspour, 2009; White and Chaubey, 2005). در این نرم‌افزار فرض شده است هر پارامتر به طور یکنواخت در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. روش SUFI2 عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی شامل عدم قطعیت ورودی‌ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده را در نظر می‌گیرد. دامنه نهایی پارامترهای حساس تعیین شده در آخرین مرحله واسنجی به مدل SWAT اعمال شد.

آب آبیاری از منبع آب سطحی (از سد مهاباد) براساس موقعیت نقاط تحویل آب شبکه مهاباد و تطبیق آن با اراضی آبی زیرحوضه‌ها و HRUها در مدل مشخص شد. همچنین، تأمین آب آبیاری از منابع زیرزمینی در سطح زیرحوضه‌ها و HRUها نیز براساس داده‌های برداشت از آبخوان و نیاز آبیاری محصولات تحت کشت محاسبه شد. به منظور محاسبه عمق آب آبیاری از منابع آب زیرزمینی در ابتدا نقشه‌ی موقعیت چاه‌های کشاورزی بر روی نقشه‌ی زیرحوضه‌های مستخرج از مدل SWAT منطبق شد. با مشخص شدن تعداد چاه‌های واقع در هر زیرحوضه و آمار برداشت از چاه‌ها، حجم کل تأمین شده در هر زیرحوضه محاسبه شد. در نهایت، مقدار آبیاری در هر زیرحوضه از تقسیم کل آب تخصیصی بر مساحت زیرحوضه برآورد شد. همچنین، مقدار آبیاری در هر دور براساس نیاز آبیاری هر محصول به‌طور جداگانه محاسبه شد. به طور کلی با توجه به اینکه عملیات آبیاری در حوضه به طور سنتی و در فواصل زمانی خاص (دور آبیاری) انجام می‌شود و همچنین با در نظر گرفتن اینکه در این تحقیق شبیه‌سازی شرایط موجود در منطقه مدنظر می‌باشد، لذا برنامه‌ریزی آبیاری براساس تنظیم زمان بندی رهاسازی آب در شبکه آبیاری صورت گرفت. راندمان آبیاری یکی از عوامل اثرگذار در میزان آب برداشتی از منبع آبیاری می‌باشد. در این مطالعه راندمان کل آبیاری برای دفعات آبیاری که منابع سطحی (شبکه آبیاری) تأمین می‌شود برابر با ۴۰ درصد و برای دفعات آبیاری از منابع آب زیرزمینی ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. فرض بر این است که در آبیاری با منابع زیرزمینی، تلفات انتقال آب قابل اغماض می‌باشد. بنابراین به‌طور متوسط راندمان آبیاری در دشت برابر با ۴۵ درصد در نظر گرفته شد. این برآوردها با مقادیر گزارش شده راندمان آبیاری سطحی ۴۰ تا ۴۵ درصد در دشت مهاباد قابل مقایسه است (Sedighi, 2018).

۲-۵- اجرای مدل

در این مطالعه از مدل SWAT 2012 استفاده شد. پس از ورود اطلاعات مورد نیاز به مدل، محدوده و تعداد زیرحوضه‌ها و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) در دشت مهاباد براساس نقشه رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی مناسب، شیب و نقشه‌های خاک و کاربری اراضی معین شد. در عین حال با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از سازمان آب منطقه‌ای و ستاد احیا دریاچه ارومیه، دو نقشه از شبکه موجود رودخانه در محدوده مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Google Earth فراخوانی شد و بر این اساس، الگوی توزیع و قرارگیری شبکه آبراهه‌های طبیعی و زهکش‌ها با توجه به عوارض طبیعی اصلاح و به مدل SWAT معرفی شد. در نهایت نقشه رقومی

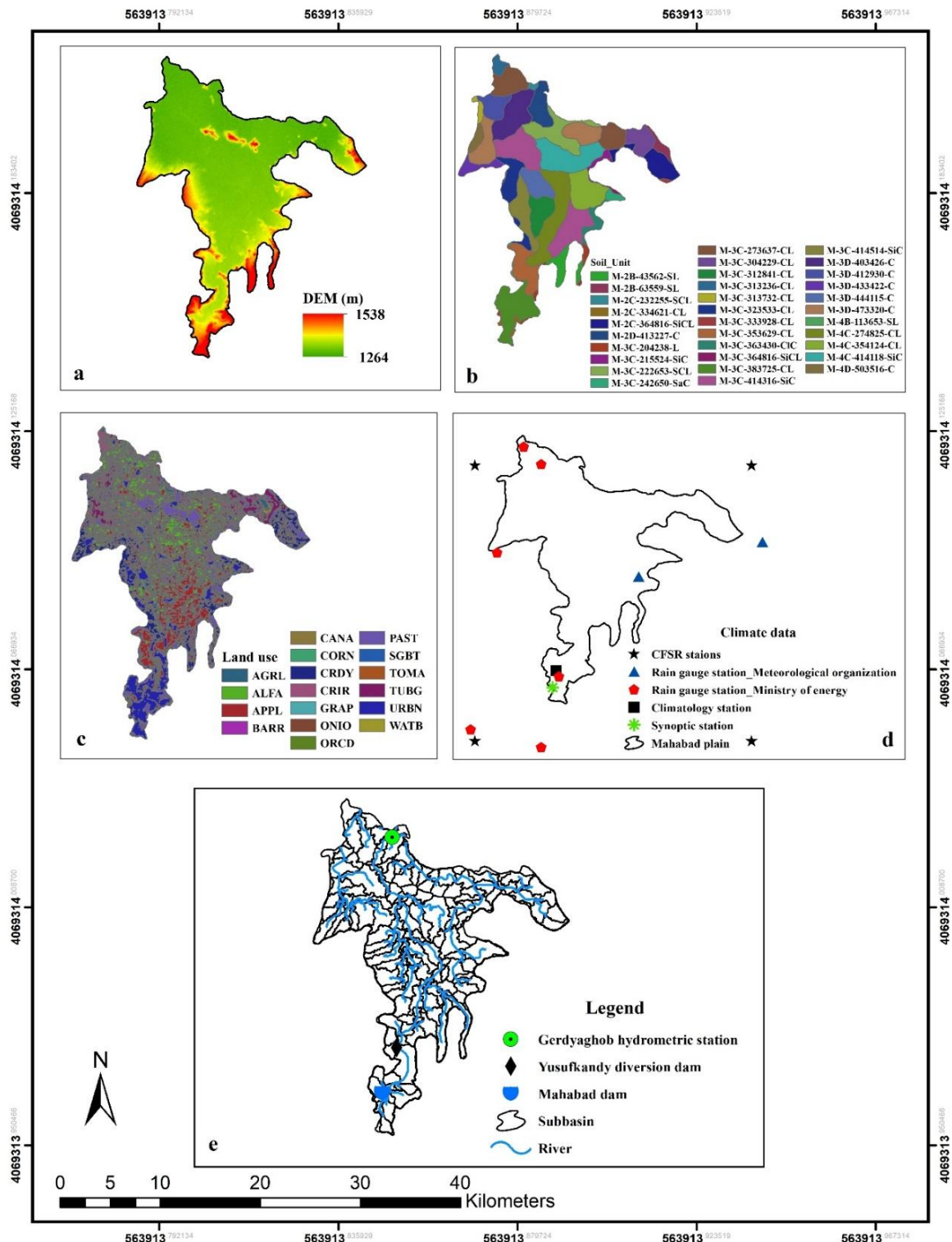


Fig. 3- a) Digital Elevation Model (DEM) with a scale of 30 meters, b) Soil map, c) Land use map, d) Location of meteorological, and rainfall stations and e) Location of Gerdyaghoub hydrometric station, Mahabad dam, Dam Yousef Kennedy diversion, network of rivers and sub-basins in Mahabad plain

شکل ۳- (a) مدل رقومی ارتفاع (DEM) با مقیاس ۳۰ متر، (b) نقشه خاک، (c) نقشه کاربری اراضی، (d) موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی و (e) موقعیت ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب، سد مه‌آباد، سد انحرافی یوسف‌کندی، شبکه رودخانه‌ها و زیرحوضه‌ها در دشت مه‌آباد

در بسیاری از مطالعات، واسنجی مدل SWAT تنها براساس داده‌های ایستگاه‌های آب‌سنجی انجام شده است. جهت افزایش دقت مکانی مدل واسنجی چند منظوره توصیه شده است (Abbaspour et al., 2007). در این مطالعه به دلیل رابطه مستقیم بین تبخیر و تعرق و عملکرد گیاه، علاوه بر واسنجی مدل براساس مقادیر دبی رودخانه (ایستگاه گردیعقوب)، از داده‌های تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات غالب زراعی و باغی شامل گندم، جو، ذرت، چغندر قند، یونجه، سیب و انگور در فرآیند واسنجی مدل استفاده شد. با توجه به دقت داده‌ها در واسنجی چندمنظوره ضرابی در تابع هدف مدل SWAT-CUP در نظر گرفته می‌شود. با توجه به دقت قابل قبول داده‌های هیدرومتری ضریب یک و دقت کمتر داده‌های عملکرد و تبخیر و تعرق ضرایب ۰/۹ و ۰/۸ در نظر گرفته شد. روند واسنجی مدل در ابتدا براساس داده‌های هیدرومتری و سپس با ثابت فرض کردن پارامترهای مربوط به هیدرولوژی، شاخص‌های تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات انجام شد. در نهایت، با استفاده از پارامترهای ثابت هیدرولوژی، تبخیر و تعرق و عملکرد، فرآیند واسنجی با در نظر گرفتن تمامی پارامترها به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفت.

در این مطالعه از آمار عملکرد محصولات از گزارشات جهاد کشاورزی شهرستان مهاباد و استان آذربایجان غربی در طول دوره شبیه‌سازی استفاده شد. قاعدتاً عوامل متعدد جانبی علاوه بر سهم تأمین آب می‌تواند در عملکرد محصولات نقش داشته باشد. بررسی عملکرد محصولات در فرآیند مدل‌سازی براساس برآوردهای تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی (حاصل از مدل‌های CROPWAT و SWAT) و ضرایب کاهش عملکرد محصول مستخرج از فائو ۵۶ (Allen et al., 1998) با استفاده از تابع تولید (Doorenbos and Kassam, 1979) نشان داد در سال‌های آبی به طور متوسط کاهش عملکرد نسبی حدود ۱۰-۱ درصد به دست آمده است. در واقع مقادیر پتانسیل عملکرد محصولات به دست آمده نشان می‌دهد مقادیر مورد نظر در فرآیند مدل‌سازی و واسنجی غیرمتعارف نبوده است.

ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد تبخیر و تعرق واقعی بایستی با مقادیر میدانی نظیر اندازه‌گیری از طریق لایسیمترها یا برآوردهای حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای (که بیانگر مقادیر تبخیر و تعرق واقعی می‌باشند) انجام شود. با توجه به فقدان داده‌های میدانی تبخیر و تعرق برای کشت‌های مورد نظر در طول دوره شبیه‌سازی CROPWAT، صحت‌سنجی نتایج تبخیر و تعرق حاصل از مدل SWAT با نتایج تبخیر و تعرق حاصل از WaPOR^۹ مورد بررسی قرار گرفت.

سازمان جهانی غذا و خواربار (فائو) از طریق سامانه برخط WaPOR میزان تبخیر و تعرق واقعی نقاط مختلف جهان را به صورت ماهانه در مقیاس ۲۵۰ متر در ۲۵۰ متر با استفاده از الگوریتم ETLook را در دسترس عموم قرار داده است. به طور مختصر مدل ETLook، بر پایه معادله پنمن-مانتیث بنا گردیده که کاربرد عمومی این معادله برآورد میزان کل تبخیر و تعرق پتانسیل (شامل دو جزء تبخیر و تعرق) با استفاده از داده‌های هواشناسی معمول (مثل: تابش خورشیدی، دمای هوا، مقدار بخار و سرعت باد) است. از این معادله به عنوان معادله استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی از گیاه مرجع نیز یاد می‌گردد (Allen et al., 1998)، اما در الگوریتم ETLook، با اندکی تغییر از این معادله و با استفاده از ترکیبی از اطلاعات سنجش از دور (شامل NDVI، آلبدو سطحی، رطوبت خاک، تابش خورشیدی، پوشش سطح زمین و مدل رقمی ارتفاع) و داده‌های هواشناسی (شامل: دما، رطوبت، سرعت باد و بارش) برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی استفاده شده است. نتایج نشان داده است روش ETLook توانسته است بسیاری از ضعف‌های سایر الگوریتم‌ها را پوشش دهد. این روش دومینعی که پوشش گیاهی و خاک را به صورت جداگانه تحلیل می‌کند، با استفاده از تصاویر رطوبت خاک توانسته است حتی در روزهای ابری نیز کارایی لازم را برای برآورد تبخیر و تعرق داشته باشد (Bastiaanssen et al., 2012). معادلات و نحوه محاسبات میزان تبخیر و تعرق واقعی در این الگوریتم در تحقیقی توسط Bastiaanssen et al. (2012) به تفصیل مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. نتایج نشان داده است مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده توسط ETLook با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، تبخیر و تعرق لایسیمتر و مدل‌سازی شده در مناطق مختلف دنیا مطابقت خوبی دارد. این روش می‌تواند تحت هر شرایط آب و هوایی استفاده شود و برای آن نیاز به داده‌های ورودی پیچیده‌ای نیست.

برای استخراج نتایج تبخیر و تعرق حاصل از WaPOR، در ابتدا تصاویر تبخیر و تعرق ماهانه در طول دوره شبیه‌سازی ۲۰۱۸-۲۰۰۹ از پایگاه <https://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-/>

(/water-productivity/en) استخراج گردید. سپس با استفاده از نقشه‌های ماهانه برآورد مصرف واقعی کشت‌های مختلف برای طول دوره کشت محصولات به دست آمد. لازم به توضیح است پوشش گیاهی در تصاویر ارائه شده در سامانه WaPOR مشخص نیست. فلذا، در گام اول تفکیک نوع کشت در نقاط مختلف با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی سال ۲۰۱۹ تهیه شده توسط دانشگاه تربیت مدرس با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر (Water Engineering Research Institute, 2019) با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. بر همین اساس، مقادیر میانگین تبخیر و تعرق واقعی برای هر

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (12)$$

در این روابط، مقدار n تعداد مشاهدات، O_i و P_i به ترتیب مقادیر رواناب اندازه‌گیری شده و برآورد شده (متر مکعب بر ثانیه) و \bar{O} و \bar{P} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رواناب (متر مکعب بر ثانیه) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT

با توجه به ساختار پیچیده مدل SWAT، تعداد پارامترهای واسنجی مدل ترجیحاً باید محدود باشد. از این رو، برای کاهش زمان محاسبات، در ابتدا فرآیند آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مؤثر در مدل انجام شد. همچنین، روش واسنجی با بررسی مطالعات کتابخانه‌ای بر اساس تحقیقات قبلی با ارائه طیف وسیعی از متغیرها انجام شد. در مجموع ۳۰۰۰ مرحله شبیه‌سازی در ۶ تکرار ۱۰ انجام شد به طوری که هر تکرار شامل ۵۰۰ شبیه‌سازی بود. به طور کلی تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر منجر به انتخاب ۴۳ مورد از حساس‌ترین پارامترها در رابطه با دقت برآورد دبی رودخانه، عملکرد گیاه و تبخیر و تعرق شد که در فرآیند واسنجی و تحلیل عدم قطعیت خودکار مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI2 به‌عنوان یک تکنیک مدل‌سازی معکوس در نظر گرفته شد. پارامترهای نهایی انتخابی مؤثر بر دبی جریان و مدل SWAT در فرآیند واسنجی و آماره‌های حساسیت هر کدام در جدول ۱ نشان داده شده است. مقدار t معیار حساسیت را نشان می‌دهد (مقادیر بزرگتر نشان‌دهنده حساسیت بیشتری می‌باشند) و مقدار p معنی‌داری پارامترها را تعیین می‌کند (مقادیر کوچکتر نشان‌دهنده معنی‌داری بیشتری می‌باشند) (Abbaspour, 2009). به طور کلی مهم‌ترین پارامترها مربوط به آب زیرزمینی (gw)، حوضه (bsn)، زیرحوضه (sub)، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (hru) و خاک (sol) بود. پارامترهای شماره منحنی برای شرایط رطوبت II (CN2) و هدایت هیدرولیکی مؤثر آبراهه اصلی (CH_K2)، اتلاف آب از طریق انتقال جریان (TRNSRCH) حساس‌ترین پارامتر در دوره واسنجی هیدرولوژی بود. نتایج به‌دست آمده با نتایج سایر مطالعات مطابقت دارد (Sophocleous, 2005; Scanlon et al., 2006; Wheater, 2010; Yin et al., 2011).

۳-۲- واسنجی هیدرولوژی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT

پس از انجام فرآیند آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از الگوریتم SWAT-CUP و الگوریتم بهینه‌سازی SUFI-2 انجام شد. واسنجی مدل SWAT در دشت مهاباد یک چالش نسبتاً بزرگ برای یک محدوده کوچک با رودخانه فصلی بود. باتوجه به این

کشت با همپوشانی جداگانه کاربری اراضی هفت محصول مورد نظر روی نقشه‌های تبخیر و تعرق برای دوره‌های کشت متناظر (متناسب با دوره شبیه‌سازی مدل‌سازی) استخراج شد. در نهایت نتایج تبخیر و تعرق حاصل از مدل SWAT با تبخیر و تعرق حاصل از WaPOR مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

علاوه بر این، به منظور ارزیابی سطح تأمین آب آبیاری، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل بدست آمده از مدل CROPWAT با مقادیر تبخیر و تعرق واقعی از مدل SWAT برای محصولات مورد مطالعه در طول دوره شبیه‌سازی مقایسه شدند. به منظور بومی‌تر کردن برآوردهای مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از مدل CROPWAT برای همه محصولات در ابتدا ضرایب گیاهی به کار گرفته شده بر اساس دستورالعمل فائو ۵۶ (Allen et al., 1998) متناسب با پارامترهای هواشناسی و ارتفاع گیاه اصلاح شد. سپس مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاهی برآورد شد. فرض بر این است که تفاوت بین تبخیر و تعرق پتانسیل (CROPWAT) و تبخیر و تعرق واقعی (SWAT) می‌تواند بیانگر سطح تأمین آبیاری محصولات در نقاط مختلف دشت باشد.

مدل SWAT از یک مهر ۱۳۸۵ (۲۳ سپتامبر ۲۰۰۶) تا ۳۱ شهریور سال ۱۳۹۸ (۲۲ سپتامبر ۲۰۱۹) به‌صورت روزانه اجرا شد. سه سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ تا ۱۳۸۷-۱۳۸۸ دوره گرم کردن (Warm-up) در نظر گرفته شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل بر اساس داده‌های ایستگاه هیدرومتری گردی‌عقوب و داده‌های تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات به‌ترتیب به مدت ۶ سال آبی از یک مهر ۱۳۸۸ (۲۳ سپتامبر ۲۰۰۹) تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۴ (۲۲ سپتامبر ۲۰۱۵) و ۴ سال آبی از یک مهر ۱۳۹۴ (۲۳ سپتامبر ۲۰۱۵) تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۸ (۲۲ سپتامبر ۲۰۱۹) انجام شد.

۷-۲- معیارهای ارزیابی مدل

از معیارهای مختلفی برای ارزیابی اثربخشی مدل و قابلیت آن در پیش‌بینی‌های دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد. این معیارها عبارتند از ضریب تبیین (R^2) و ضریب نش-ساتکیف (NSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و PBIAS استفاده شد:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (11)$$

که در طول دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۹ منطقه مهاباد به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند تغییرات کاربری اراضی، استفاده بیش از حد از آب‌های سطحی و زیرزمینی، افزایش مصرف آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب قرار گرفته است؛ لذا دستیابی به نتایج مطلوب برای رودخانه فصلی مهابادچای تا حدی دشوار بود. به طوری که در اولین واسنجی، مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی جریان پایه نبود. همچنین، مقادیر اوج جریان رودخانه را با مقادیر بالایی برآورد می‌کرد. به دلیل این که جریان پایه در این ایستگاه عمدتاً از سد مهاباد در بالادست این ایستگاه تأمین می‌شود. لذا جریان پایه از کل جریان تفکیک و به مدل معرفی شد. البته عوامل دیگری همچون عدم وجود ایستگاه‌های باران‌سنجی با تعداد مناسب در گستره دشت یا عدم امکان تعریف دقیق کمی فعالیت‌های مختلف انسانی از قبیل برداشت‌های غیرمجاز از رودخانه مهاباد، ماهیت فیزیک روش SCS در برآورد رواناب حاصل از ذوب برف و آب یخ‌زده (Maidment, 1992) می‌تواند بر هیدرولوژی منطقه تأثیرگذار باشد. مدل‌های هیدرولوژی غالباً دارای عدم قطعیت می‌باشند به طوری که با توسعه فن‌آوری‌های مدیریت منابع آب و با توجه به دسترس بودن جزئیات فعالیت‌های مدیریتی، مدل‌سازی هیدرولوژی سخت‌تر و پیچیده‌تر می‌شود.

در این مطالعه، مدل SWAT تحت شرایط مختلف آب و هوایی (سال‌های متوسط، خشک و مرطوب) در طی یک دوره ده ساله در دشت مهاباد مورد ارزیابی قرار گرفت. معیارهای ارزیابی مدل SWAT برای ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب در جدول ۲ نشان داده شده است. P-factor و R-factor معیارهایی برای کمی کردن عدم قطعیت موجود، پارامترها و همچنین داده‌های ورودی در مدل مفهومی می‌باشند. R-factor کوچکتر از یک عموماً نتیجه واسنجی خوبی را نشان می‌دهد که این امر در ایستگاه گردیعقوب مشهود است. مقدار P-factor حداکثر برابر با یک می‌باشد که در آن تمامی داده‌های مشاهداتی در داخل بازه اطمینان ۹۵ درصد قرار می‌گیرند. همچنین، معیار R-factor برابر با صفر بیانگر بهترین نتیجه برای شبیه‌سازی می‌باشد. اما در اکثر مطالعات صورت گرفته دستیابی به این مقادیر دور از انتظار بوده و مقادیر بالای ۴۰ درصد برای P-factor و مقدار نزدیک به یک برای R-factor قابل قبول می‌باشد (Faramarzi et al., 2009). به طور کلی نتایج نشان داد معیارهای P-factor و R-factor بدست آمده در فرآیند بررسی عدم قطعیت مدل در ایستگاه گردیعقوب در محدوده قابل قبول می‌باشند.

نتایج نشان داد مدل SWAT توانست جریان سطحی در ایستگاه گردیعقوب را که در اکثر مواقع دارای جریان کم به خصوص در دوره واسنجی بود با توجه به معیارهای R^2 ، NS، RMSE و PBIAS

به خوبی شبیه‌سازی کند. در واقع مدل پس از مجزا کردن جریان پایه از کل دبی جریان توانست روند جریان رودخانه را به خوبی شبیه‌سازی کند. نتایج نشان می‌دهد، معیارهای آماری در دوره اعتبارسنجی بهتر از نتایج دوره واسنجی بود. میانگین دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری در طول دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۱/۱ و ۶/۲ مترمکعب در ثانیه گزارش شده است. بررسی‌ها نشان داد مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان سطحی دارای عدم قطعیت بالایی است، به خصوص در جریان‌ات کم رودخانه منجر به بیش‌برآورد می‌شود. در این مطالعه مدل در دوره واسنجی در شبیه‌سازی دبی جریان حدود ۴/۵ درصد بیش‌برآورد داشته است. از طرف دیگر مدل دبی جریان را در دوره اعتبارسنجی حدود ۶/۱ درصد کم‌برآورد داشته است. (Moriasi et al., 2007) گزارش داد که کارایی مدل در برآورد جریان سطحی وقتی که $PBIAS \leq 10\%$ باشد، بسیار خوب ارزیابی می‌شود. همچنین، (Moriasi et al., 2007) و (Tuppad et al., 2011) بیان داشتند که پارامترهای R^2 و NSE بزرگتر از ۰/۵ قابل قبول و بزرگتر از ۰/۷۵ بسیار خوب ارزیابی می‌شود. (Bejranonda et al., 2007) و (Walker and Leake, 2011) گزارش دادند میزان برداشت از آب‌زیرزمینی و تأثیر فعالیت‌های انسانی در امتداد رودخانه‌ها بر شبیه‌سازی جریان (بیش‌برآورد و کم‌برآورد) توسط مدل SWAT تأثیرگذار می‌باشد. به طور کلی، مدل‌های شبیه‌سازی در تخمین میزان دبی پایین در مقیاس حوضه آبریز عملکرد ضعیفی را نشان می‌دهند. این مسئله می‌تواند به فرض‌های متعدد ساده‌سازی در شبیه‌سازی مدل‌های سطحی و تعامل پیچیده بین رواناب و جریان‌ات زیرسطحی در مناطق با مقادیر باران کم ارتباط داشته باشد (Abbaspour, 2009). لازم به ذکر است که مدل‌سازی دبی جریان در نواحی خشک و نیمه‌خشک نسبت به مناطق مرطوب بسیار پیچیده‌تر است، به دلیل این که جریان در این مناطق کم و در اکثر مواقع گسسته می‌باشد و تنها برای بارش‌های با مقادیر زیاد پیوستگی جریان برقرار می‌باشد (Walker and Thoms, 1993; Barlow and Clark, 2011).

بازه عدم قطعیت و مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای متوسط ماهانه دبی جریان برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی برای ایستگاه گردیعقوب در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد مدل به خوبی توانسته نوسانات جریان آب رودخانه مهاباد (ایستگاه گردیعقوب) در طول دوره اعتبارسنجی در مقایسه با دوره واسنجی را شبیه‌سازی کند. به طور مشخص، مدل توانسته است دبی‌های اوج را که مقادیر حیاتی برای مطالعات رودخانه می‌باشند، شبیه‌سازی کند. دبی‌های اوج در دوره اعتبارسنجی اتفاق افتاده است که وقایع مشابه آن در دوره واسنجی وجود نداشته است. علیرغم این، مدل به خوبی توانسته است زمان‌بندی و مقدار وقوع جریان سیلابی را شبیه‌سازی

کند (شکل ۴). در واقع بخشی از دبی‌های اوج و جریانات سیلابی به‌طوری که مدل توانسته است به‌خوبی این جریانات سیلابی را شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی به دلیل رواناب ناشی از بارندگی شبیه‌سازی کند. زیاد و رهاسازی قابل توجه آب از سد مهاباد در رودخانه می‌باشد.

Table 1- Results of SWAT model sensitivity analysis and the best value of each parameter in the uncertainty range

جدول ۱- نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAT و بهترین مقدار هر پارامتر در محدوده عدم قطعیت

Parameter	Definition	t_value*	p_value**	Initial range	Final range	Best
r*_CN2.mgt	SCS runoff curve number for moisture condition II	18.2	0	[-0.5, 0.5]	[-0.21, 0.16]	0.03
v*_CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity of channel (mm/hr)	18.15	0	[0, 100]	[22, 35]	27.00
v_TRNSRCH.bsn	Water transfer losses	17.36	0	[0, 1]	[0.37, 0.62]	0.43
v_ALPHA_BF.gw	Base flow alpha factor (days)	-4.08	0	[0, 1]	[0.32, 0.58]	0.38
v_CH_N2.rte	Manning's n value for the main channel	3.82	0	[0, 0.3]	[0.10, 0.22]	0.17
v_PLAPS.sub	Precipitation change with increased elevation (mm/km)	3.75	0	[0, 50]	[5, 20]	6.4
v_TLAPS.sub	Temperature change with increased elevation (degrees C/km)	3.59	0	[-1, -10]	[-3.0, -8.0]	-6.5
v_REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap." (mm)	3.42	0.01	[0, 500]	[228, 375]	308.7
v_ALPHA_BNK.rte	Groundwater flow reaction coefficient for river bed	2.93	0.01	[0.1, 1]	[0.31, 0.72]	0.46
v_GW_REVAP.gw	Groundwater revap coefficient	2.27	0.03	[0.02, 0.2]	[0.03, 0.09]	0.05
v_GW_DELAY.gw	Groundwater delay time (days)	2.05	0.04	[0, 150]	[93, 137]	128.0
r_OV_N.hru	Manning's n value for overland flow	1.97	0.05	[0.01, 0.65]	[0.23, 0.44]	0.31
v_GW_SPYLD.gw	Special yield in shallow aquifer	1.81	0.07	[-0.5, 1]	[-0.27, -0.45]	-0.32
v_GWQMN.gw	Threshold depth of water in shallow aquifer for return flow	1.68	0.08	[0, 5000]	[187, 391]	253.0
v_CH_NI.sub	Manning's n value for the channel	1.65	0.08	[0, 0.3]	[0.14, 0.26]	0.20
r_SOL_BD (.sol)	Soil bulk density (g/cm ³)	1.53	0.10	[-0.5, 0.5]	[-0.35, 0.65]	0.21
r_SOL_Z.sol	Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	1.34	0.13	[-5, 1]	[-0.52, 0.08]	-0.32
v_SMTMP.bsn	Snow melt base temperature (°C)	1.13	0.16	[-5, 5]	[-2.28, 1.85]	0.67
v_EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	-1.05	0.23	[0, 1]	[0.23, 0.78]	0.49
r_SOL_K (.sol)	Soil saturated hydraulic conductivity (mm/h)	0.98	0.27	[-0.5, 0.5]	[-0.18, 0.29]	0.07
v_CH_k1.sub	Effective hydraulic conductivity of channel (mm/hr)	0.96	0.30	[0, 150]	[100, 128]	103.8
r_SOL_AWC (.sol)	Soil available water storage capacity (mm/mm)	0.85	0.31	[-0.5, 0.5]	[-0.38, 0.17]	-0.26
v_SLSUBBSN.hru	Average slope length (m)	0.82	0.35	[10, 150]	[28, 35]	32.0
v_RCHR_DP.gw	Fraction of deep water percolation from root Zone	0.65	0.38	[0, 1]	[0.56, 0.75]	0.63
v_SMFMX.bsn	Maximum melt rate for snow during the year (mm C ⁻¹ day ⁻¹)	0.62	0.43	[0, 10]	[2.00, 5.78]	3.54
v_SMFMN.bsn	Minimum melt rate for snow during the year (mm C ⁻¹ day ⁻¹)	1.19	0.59	[0, 10]	[0.32, 3.32]	1.58
v_SFTMP.bsn	Snowfall temperature (°C)	0.51	0.63	[-5, 5]	[-1.16, 2.48]	-0.37
v_ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	-0.44	0.70	[0, 1]	[0.52, 0.86]	0.76
v_SURLAG.bsn	Surface runoff lag time (days)	0.29	0.79	[1, 24]	[5.6, 17.2]	11.07
v_TIMP.bsn	Snow pack temperature lag factor	0.22	0.82	[0.01, 1]	[0.16, 0.73]	0.39

* r و v نشان دهنده تغییرات مطلق (جایگزین مقادیر پارامتر) و نسبی (ضرب در مقادیر پارامتر به صورت درصد) می‌باشند. در حالت نسبی مقدار اصلی پارامتر در محدوده نهایی پارامتر + ۱ ضرب می‌شود.

** مقدار t بیانگر حساسیت (هرچه مقدار آن بزرگتر، میزان حساسیت بیشتر) و مقدار p معنی‌داری (هرچه کوچکتر، میزان معنی‌داری بیشتر) پارامتر را نشان می‌دهد.

Table 2- Model performance criteria for calibration and validation periods

جدول ۲- مقادیر معیارهای عملکرد مدل برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

Station	Period	P-factor (-)	R-factor (-)	R ² (-)	NSE (-)	RMSE (m ³ s ⁻¹)	PBIAS (%)
Gerdyaghoub	Calibration	0.89	0.32	0.87	0.85	0.11	-4.5
	Validation	0.92	0.87	0.89	0.92	0.23	6.1

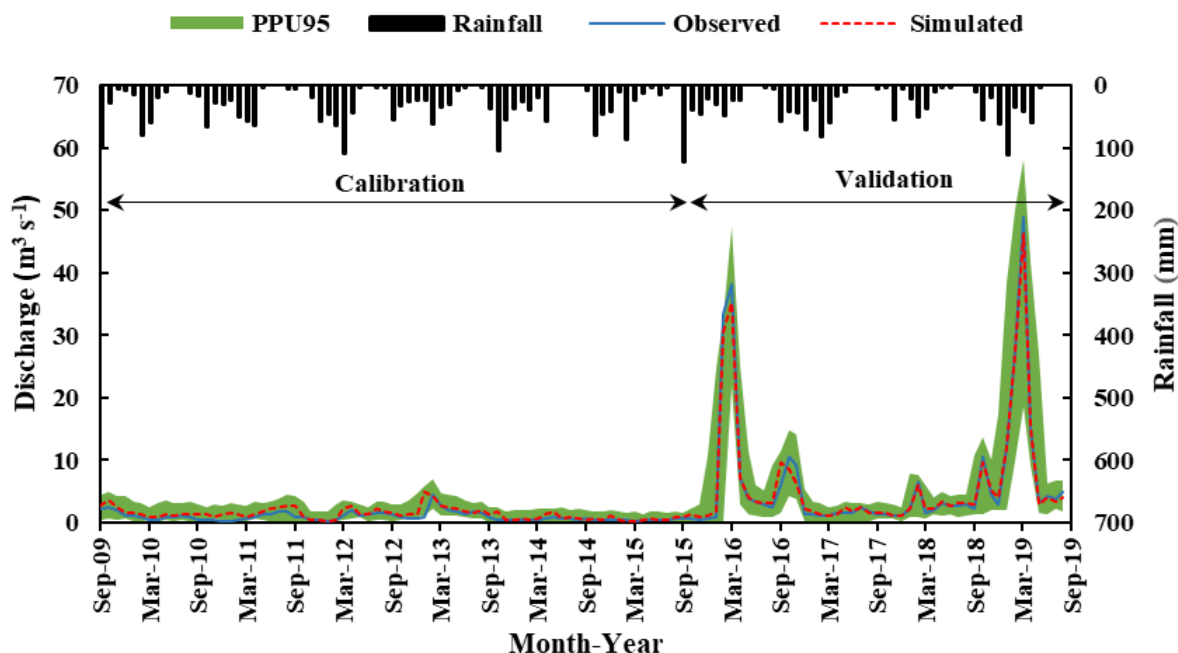


Fig. 4- Comparison of simulated and measured monthly river discharge values at Gerdyaghoub station in calibration and validation periods

شکل ۴- مقایسه مقادیر دبی ماهانه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده ایستگاه گردیعقوب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

به‌طور کلی در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفتن تمام یکایک عوامل تأثیرگذار بر جریان در طول زمان براساس داده‌های موجود میسر نیست. برآیند عوامل مختلفی در طول مسیر جریان رودخانه از قبیل برداشت‌های مستقیم غیرمجاز از رودخانه (از طریق پمپ‌های سیار یا باز کردن سردنه‌ها، تخلیه رواناب‌های سطحی به رودخانه، نشت دوجانبه رودخانه و آبخوان) بر شدت جریان خروجی تأثیر دارد.

ارزیابی مستقل یکایک این عوامل با توجه به عدم دسترسی به داده‌های میدانی عملاً امکان‌پذیر نیست. با این حال، مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی رواناب سطحی برای منطقه بود. مهم‌ترین دلیل دستیابی به این نتایج، در نظر گرفتن جریان پایه از کل جریان، مدیریت گیاهی، اعمال برداشت تلفیقی از منابع آب براساس الگوی تأمین نیاز آبیاری محصولات و جریانات برگشتی در محدوده بود.

جریانات سطحی در دوره اعتبارسنجی توسط مدل SWAT از طریق روندیابی بهتر جریان‌های اوج شبیه‌سازی شده است (شکل ۴). به‌طوری که برای کل دوره شبیه‌سازی، جریان رودخانه در طول فصل آبیاری به‌عنوان مثال، از اواخر مارس ۲۰۱۱ (اوایل فروردین ۱۳۸۹) تا اوایل جولای ۲۰۱۱ (اواخر شهریور ۱۳۹۰) و از اواخر فوریه ۲۰۱۳ (اواسط اسفند ۱۳۹۱) تا اواخر جولای ۲۰۱۳ (اواخر مهر ۱۳۹۱) به‌طور مناسبی تخمین زده شد. Wei et al. (2019) نشان دادند مقادیر دبی اوج را می‌توان به مداخلات فعالیت‌های انسانی در امتداد رودخانه (از قبیل الگوهای رهاسازی از سد) و یا موارد نشت از آبخوان به رودخانه باتوجه خصوصیات آبخوان و شیب‌های هیدرولیکی آب زیرزمینی نسبت داد. همچنین، دبی‌های اوج در فصول غیرآبیاری در طول دوره اعتبارسنجی به‌خوبی شبیه‌سازی شده است. در واقع مدل در دوره اعتبارسنجی علاوه بر در نظر گرفتن جریان پایه رودخانه توانسته است مقادیر اوج را باتوجه به رهاسازی آب از سد مهاباد جهت تأمین حقابه زیست‌محیطی دریاچه ارومیه در فصول غیرآبیاری شبیه‌سازی کند که این مقادیر اوج در دوره واسنجی دیده نمی‌شود.

۳-۳- تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر تبخیروتعرق و عملکرد محصولات مدل SWAT

می‌باشند که پارامترهای مؤثر به همراه دامنه آن‌ها براساس مروری بر مطالعات گذشته و بعد از انجام آنالیز حساسیت در جدول ۳ معرفی و دامنه نهایی آن‌ها پس از واسنجی در جدول ۴ ارائه شده است. به‌طور کلی واحد گرمایی پتانسیل لازم برای رشد کامل گیاه یکی از مهم‌ترین پارامترها برای شبیه‌سازی تبخیروتعرق و عملکرد محصولات بدست آمد. همچنین، پارامترهای مربوط به شاخص سطح برگ (LAI) نیز از عوامل مؤثر بر تبخیروتعرق و عملکرد محصولات و پارامترهای مربوط به شاخص برداشت (HI) نیز برای برآورد و تخمین مناسب عملکرد محصولات در فرآیند واسنجی مدل بدست آمد.

۳-۴- واسنجی مدل SWAT بر مبنای تبخیروتعرق

در این مطالعه علاوه بر جریان‌ات سطحی از تبخیروتعرق برای ارزیابی چندمنظوره مدل استفاده شد. به دلیل فقدان داده‌های میدانی تبخیروتعرق برای کشت‌های مورد نظر در طول دوره شبیه‌سازی، ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد تبخیروتعرق واقعی با نتایج تبخیروتعرق واقعی حاصل از WaPOR از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای بررسی شد. تبخیروتعرق واقعی حاصل از مدل WaPOR براساس تطبیق کشت‌های مورد بررسی با نقشه‌های کاربری اراضی به‌دست آمد.

واسنجی مدل هیدرولوژیکی در یک منطقه تحت آبیاری تنها با جریان رودخانه نمی‌تواند دارای دقت مناسبی برای برآورد مؤلفه‌های بیلان آب سطحی باشد (Abbaspour et al., 2007). پارامترهای گیاهی به‌طور مستقیم بر میزان تبخیروتعرق واقعی محصولات تأثیر گذاشته و این متغیر خود نیز بر مقدار عملکرد گیاهان مؤثر می‌باشد. در نتیجه با واسنجی عملکرد محصول، تبخیروتعرق واقعی نیز واسنجی می‌گردد. بنابراین، به دلیل رابطه مستقیم بین تبخیروتعرق و عملکرد گیاه (Jensen, 1968)، از داده‌های عملکرد محصولات گندم، جو، چغندرقد، ذرت، یونجه، سیب و انگور که جزء محصولات غالب منطقه می‌باشد نیز به‌منظور افزایش دقت نتایج استفاده شد. دلیل دیگر در نظر گرفتن واسنجی بر مبنای تبخیروتعرق و عملکرد محصولات، ناکافی بودن ایستگاه‌های هیدرومتری در سطح دشت مهاباد می‌باشد. درحقیقت، بیشتر فعالیت‌های کشاورزی در مرکز دشت صورت می‌گیرد. عملکرد محصولات شبیه‌سازی شده با مقادیر عملکرد گزارش شده توسط سازمان جهاد کشاورزی در منطقه مقایسه شدند. مدل SWAT عملکرد محصول را برحسب تن در هکتار گزارش می‌کند. پارامترهای مختلفی بر شبیه‌سازی عملکرد و تبخیروتعرق محصولات، مؤثر

Table 3- Parameters affecting crop yield, and evapotranspiration considered in the SWAT model
جدول ۳- پارامترهای مؤثر بر تبخیروتعرق و عملکرد در نظر گرفته شده در مدل SWAT

Parameter	Definition	Initial range
v_HEAT_UNITS.mgt	Potential heat units for plant growing at beginning of simulation (heat units)	[500, 5000]
v_HL_TARG.mgt	Target harvest index (kg/ha)/(kg/ha)	[0, 1]
r_IRR_AMT.mgt	Depth of irrigation water applied on HRU (mm)	[-0.5, 0.5]
r_SOL_ZMX.sol	Maximum rooting depth in soil (mm)	[-0.5, 0.5]
r_BLO_E (crop.dat)	Radiation use efficiency in ambient CO ₂ ((kg/ha)/(MJ/m ²))	[10, 60]
r_BLA1 (crop.dat)	Potential maximum leaf area index for the plant	[0, 10]
r_DLAI (crop.dat)	Fraction of the growing season at which senescence becomes the dominant process	[0, 1]
v_HVSTI (crop.dat)	Harvest index	[0.01, 1]
r_EXT_COEF (crop.dat)	Light extinction coefficient	[0, 2]
r_FRGRW1 (crop.dat)	Fraction of the growing season corresponding to the 1 st point on the optimal leaf area development curve	[0, 0.2]
r_FRGRW2 (crop.dat)	Fraction of the growing season corresponding to the 2 nd point on the optimal leaf area development curve	[0, 1]
r_LAIMX1 (crop.dat)	Fraction of the maximum plant leaf area index corresponding to the 1 st point on the optimal leaf area development curve	[0, 0.5]
r_LAIMX2 (crop.dat)	Fraction of the maximum plant leaf area index corresponding to the 2 nd point on the optimal leaf area development curve	[0, 1]

Table 4- The final range of values of the parameters affecting crop yield and evapotranspiration considered in the SWAT model

جدول ۴- مقادیر دامنه نهایی پارامترهای مؤثر بر تبخیر و تعرق و عملکرد در نظر گرفته شده در مدل SWAT

Parameter	Crop						
	Wheat	Barley	Sugar beet	Corn	Alfalfa	Apple	Grape
v_HEAT_UNITS.mgt	[1256,1349]	[1268,1291]	[2438, 2670]	[2857, 3051]	[1326,1457]	[2153,2227]	[1847,1962]
v_HI_TARG.mgt	[0.42, 0.55]	[0.31, 0.39]	[0.53, 0.68]	[0.47, 0.60]	[0.62, 0.77]	[0.73, 0.89]	[0.78, 0.90]
r_IRR_AMT.mgt	[-0.22, 0.17]	[-0.17, 0.11]	[-0.23, 0.24]	[- 0.15, 0.21]	[-0.13, 0.32]	[-0.22, 0.29]	[-0.19, 0.18]
r_SOL_ZMX.sol	[-0.17, 0.19]	[- 0.12, 0.14]	[- 0.01, 0.18]	[-0.13,0.15]	[- 0.27, 0.36]	[- 0.20, 0.35]	[-0.26, 0.33]
r_BLO_E (crop.dat)	[28.2, 37.4]	[27.4, 35.5]	[0.64, 0.83]	[0.57,0.71]	[0.37, 0.55]	[0.53, 0.69]	[0.62, 0.71]
r_BLAI (crop.dat)	[2.7, 5.6]	[3.9, 6.4]	[5.8, 7.1]	[5.2, 7.6]	[3.2, 6.1]	[5.2, 6.3]	[5.0, 5.9]
r_DLAI (crop.dat)	[0.62, 0.81]	[0.54, 0.67]	[0.65, 0.78]	[0.81, 0.92]	[0.39, 0.53]	[0.69, 0.84]	[0.71, 0.81]
v_HVSTI (crop.dat)	[0.47, 0.59]	[0.37, 0.44]	[0.35,0.49]	[0.42, 0.55]	[0.65, 0.76]	[0.56, 0.67]	[0.52, 0.61]
r_EXT_COEF (crop.dat)	[0.73, 0.90]	[0.82, 0.96]	[0.79, 0.93]	[1.02, 1.27]	[1.38, 1.60]	[1.13, 1.31]	[0.97, 1.16]
r_FRGRW1 (crop.dat)	[0.01, 0.04]	[0.04, 0.07]	[0.02, 0.05]	[0.03, 0.05]	[0.06, 0.08]	[0.01, 0.03]	[0.00, 0.03]
r_FRGRW2 (crop.dat)	[0.62, 0.71]	[0.50, 0.60]	[0.53, 0.64]	[0.41, 0.58]	[0.52, 0.60]	[0.72, 0.81]	[0.67, 0.77]
r_LAIMX1 (crop.dat)	[0.32, 0.45]	[0.15, 0.27]	[0.33, 0.41]	[0.05, 0.12]	[0.13, 0.25]	[0.29, 0.35]	[0.23, 0.31]
r_LAIMX2 (crop.dat)	[0.64, 0.74]	[0.61, 0.72]	[0.58, 0.67]	[0.52, 0.61]	[0.57, 0.69]	[0.47, 0.59]	[0.43, 0.54]

مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SWAT و تبخیر و تعرق پتانسیل مدل CROPWAT نشان داد، معیار RMSE دوره واسنجی بین ۲۴/۴ (محصول چغندر قند) تا ۴۹/۴ (محصول ذرت) میلی متر و در دوره اعتبارسنجی بین ۲۱/۷ (محصول جو) تا ۵۳/۴ (محصول چغندر قند) میلی متر متغیر بود. مقادیر خطای به دست آمده در مقایسه با میزان مصرف فصلی در دوره واسنجی بین ۳/۶ تا ۶/۵ درصد به ترتیب برای محصولات چغندر قند و ذرت و در دوره اعتبارسنجی بین ۶/۲ تا ۷/۲ درصد به ترتیب برای محصولات جو و چغندر قند به دست آمد. معیار PBIAS نشان داد مدل SWAT تبخیر و تعرق را در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی برای کلیه محصولات کم برآورد داشته است. به طوری که تبخیر و تعرق را در دوره واسنجی بین ۲ تا ۱۰ درصد و در دوره اعتبارسنجی بین ۲ تا ۷ درصد کم برآورد داشته است (جدول ۵). به طور کلی نتایج نشان داد مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SWAT و WaPOR به مراتب کمتر از مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد شده توسط مدل CROPWAT است. در واقع مقادیر کمتر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SWAT و WaPOR در مقایسه با مقادیر برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مدل CROPWAT در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی می‌تواند نشان دهنده کم‌آبیاری باشد. به طوری که در دوره واسنجی بین ۲/۶ تا ۹/۶ درصد کم‌آبیاری به ترتیب برای محصولات چغندر قند و گندم و در دوره اعتبارسنجی بین ۲/۳ تا ۷/۰ درصد کم‌آبیاری به ترتیب برای محصولات ذرت و انگور به دست آمده است.

در عین حال، جهت ارزیابی سطح تأمین آب آبیاری، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی مدل SWAT با تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد شده از مدل CROPWAT برای محصولات مورد مطالعه در طول دوره شبیه‌سازی مقایسه شدند.

ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد تبخیر و تعرق واقعی بر اساس معیارهای عملکرد RMSE و PBIAS برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SWAT و WaPOR نشان داد مدل SWAT توانسته است تبخیر و تعرق محصولات مورد مطالعه را به خوبی شبیه‌سازی کند. نتایج نشان داد معیار RMSE در دوره واسنجی بین ۱۳/۸ تا ۶۶/۴ میلی متر و در دوره اعتبارسنجی بین ۲۳/۹ تا ۵۳/۲ میلی متر متغیر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل SWAT تبخیر و تعرق واقعی را در دوره واسنجی بین ۰/۵ تا ۸ درصد (به جز محصول ذرت) و در دوره اعتبارسنجی بین ۰/۱ تا ۸ درصد (به جز محصول جو) کم برآورد داشته است که نشان از شبیه‌سازی مناسب تبخیر و تعرق واقعی توسط مدل SWAT می‌باشد. به طور کلی مقایسه نتایج حاصل از مدل SWAT و WaPOR نشان می‌دهد برای اکثر محصولات، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از WaPOR به نتایج حاصل از مدل SWAT نزدیک است؛ اما در اکثر موارد، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی WaPOR بیشتر از مقادیر تبخیر و تعرق واقعی مدل SWAT به دست آمده است.

Table 5- Values of model performance criteria for the actual evapotranspiration (ET_a) from SWAT and WaPOR models and crop evapotranspiration (ET_c) of different crops in the period of calibration (validation)
جدول ۵- مقادیر معیارهای عملکرد مدل برای مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده (ET_a) مدل‌های SWAT و WaPOR و مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_c) محصولات مختلف در دوره واسنجی (اعتبارسنجی)

Crop	Parameter			
	SWAT-WaPOR		SWAT- CROPWAT	
	Calibration (Validation)		Calibration (Validation)	
	RMSE (mm)	PBIAS (%)	RMSE (mm)	PBIAS (%)
Wheat	38.72 (37.31)	7.61 (8.32)	34.2 (26.40)	9.60 (5.57)
Barley	13.75 (23.93)	0.5 (-3.60)	30.08 (21.7)	5.27 (5.36)
Corn	29.74 (36.05)	-1.97 (4.44)	49.42(31.04)	6.36 (2.23)
Sugar beet	48.37 (24.16)	6.57 (0.10)	24.46 (53.36)	2.61 (6.37)
Alfalfa	66.42 (53.20)	6.34 (5.31)	46.90 (27.80)	8.33 (2.33)
Apple	35.70 (45.10)	2.43 (-2.88)	24.51 (47.9)	2.30 (6.31)
Grape	33.86 (33.21)	1.15 (2.95)	30.03 (47.44)	3.29 (7.02)

چغندر قند، یونجه، سیب و انگور را با عملکرد متوسط سالانه ۳/۲۴، ۲/۴۵، ۷/۶۸، ۵۴/۴۳، ۱۰/۱۸، ۱۸/۰۱ و ۱۱/۰۳ تن در هکتار تخمین بزند. نتایج نشان می‌دهد مدل توانسته است نوسانات عملکرد محصولات را متناسب با سطح تأمین آبیاری در سال‌های آبی مختلف برآورد کند. به عنوان مثال میزان عملکرد کمتری در سال خشک (۲۰۱۶) نسبت به سال مرطوب (۲۰۱۸) برای کلیه محصولات بدست آمده است. به طور کلی مقادیر عملکرد برآورد شده توسط مدل SWAT در سال‌های مختلف به مقادیر عملکرد محصولات گزارش شده توسط جهاد کشاورزی نزدیک می‌باشد.

با این حال، صحت‌سنجی عملکرد محصولات استفاده شده در فرآیند واسنجی مدل با استفاده از تابع تولید (Doorenbos and Kassam, 1979) براساس مقادیر تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) حاصل از مدل SWAT، تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_c) به دست آمده از مدل CROPWAT و ضرایب کاهش عملکرد محصول (K_y) مستخرج از فائو ۵۶ (Allen, et al., 1998) مورد بررسی قرار گرفت. $\frac{ET_c - ET_a}{ET_c}$ بیانگر کم‌آبیاری نسبی و $\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}$ نیز بیانگر کاهش عملکرد نسبی می‌باشد. مقادیر کاهش عملکرد نسبی تحت جایگذاری مقادیر مذکور برآورد شد. در نهایت مقادیر عملکرد پتانسیل با حاصلضرب مقادیر عملکرد مشاهداتی مورد استفاده در فرآیند مدل‌سازی (جمع‌آوری شده از جهاد کشاورزی) در مقادیر کاهش عملکرد نسبی برآورد شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در سال‌های آبی متفاوت برای محصولات گندم، جو، ذرت، چغندر قند، یونجه، سیب و انگور به ترتیب کاهش عملکرد نسبی معادل ۱۱-۳ درصد، ۱۱-۴ درصد، ۱۰-۳ درصد، ۱۵-۱ درصد، ۸-۱ درصد، ۱۳-۱ درصد، ۱۰-۱ درصد به دست آمده است.

مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده (ET_a) توسط مدل SWAT و WaPOR و مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_c) حاصل از مدل CROPWAT در شکل ۵ نشان داده شده است. میله‌های نشان داده شده بر روی نمودارها، میله‌های خطا^{۱۳} می‌باشند که بیانگر مقادیر انحراف معیار^{۱۴} بین کلیه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده در هر سال توسط مدل SWAT در مقایسه با مقادیر تبخیر و تعرق واقعی WaPOR و تبخیر و تعرق پتانسیل CROPWAT می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌گردد همبستگی خوبی بین مقادیر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT با مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده توسط WaPOR وجود دارد. نتایج مطالعات (Alizadeh et al. (2013) و Ahmadzadeh et al. (2014) نیز به توانایی مدل SWAT در برآورد تبخیر و تعرق واقعی اشاره دارد. بررسی‌ها نشان داده است از تبخیر و تعرق برآورد شده توسط مدل SWAT می‌توان به عنوان مرجعی برای ارزیابی نتایج حاصل از تکنیک سنجش از راه دور استفاده کرد (Gao and Long, 2008; Alizadeh et al., 2013).

۳-۶- واسنجی مدل SWAT بر مبنای عملکرد گیاه

در این مطالعه از آمار عملکرد محصولات از گزارشات جهاد کشاورزی شهرستان مهاباد و استان آذربایجان غربی برای ارزیابی عملکرد محصولات برآورد شده توسط مدل SWAT در طول دوره شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای هفت محصول مورد بررسی در این مطالعه بر حسب تن بر هکتار به همراه محدوده عدم قطعیت برای هر محصول در طول دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد مدل SWAT به خوبی توانست مقادیر عملکرد محصولات گندم، جو، ذرت،

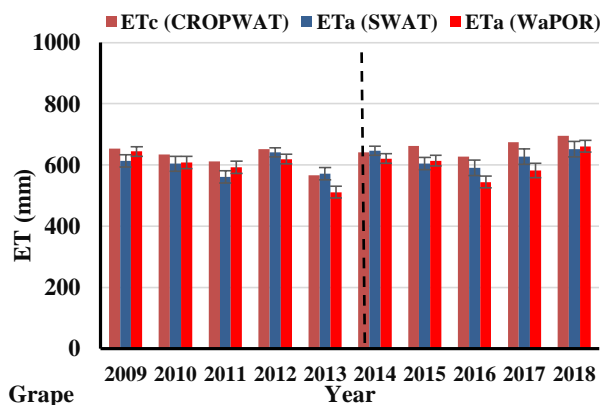
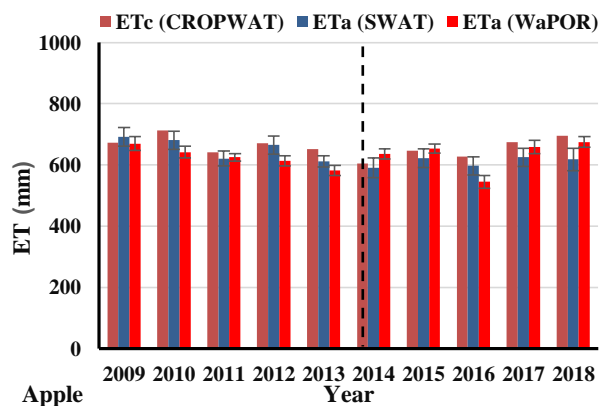
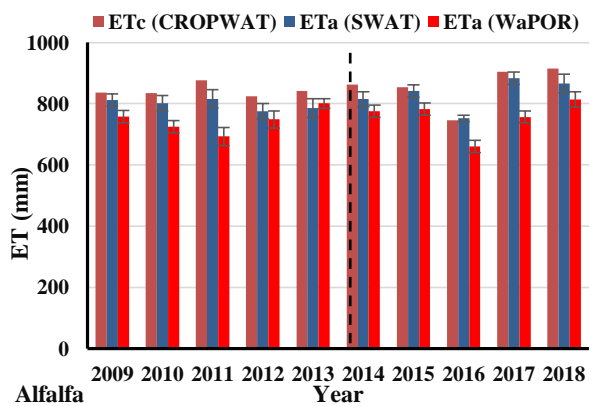
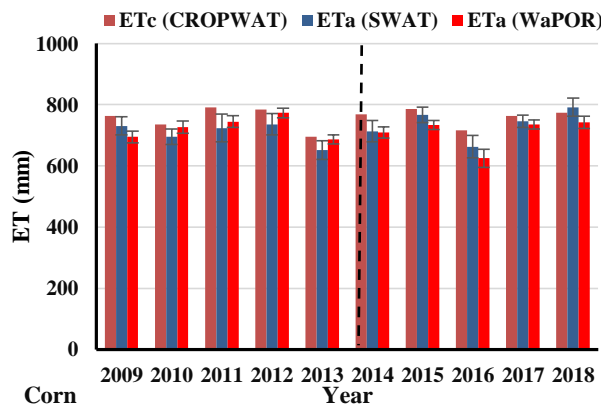
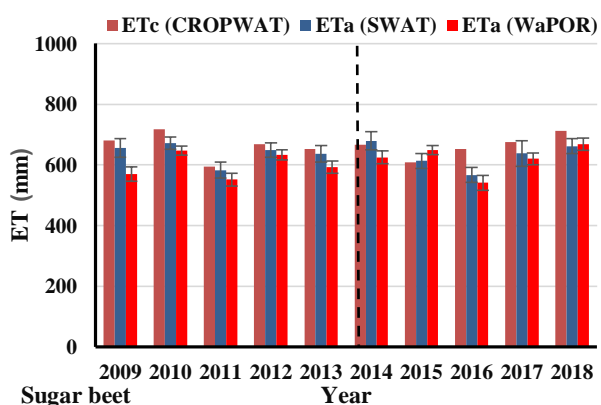
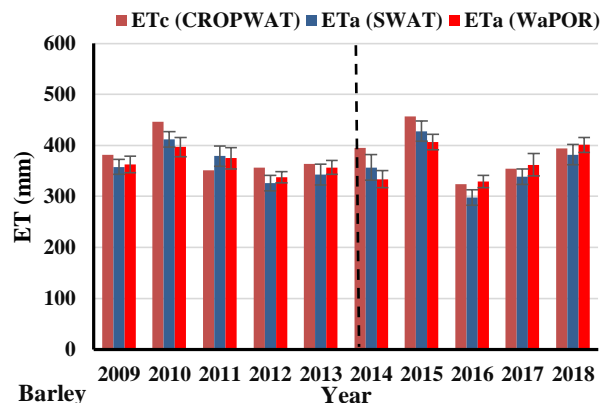
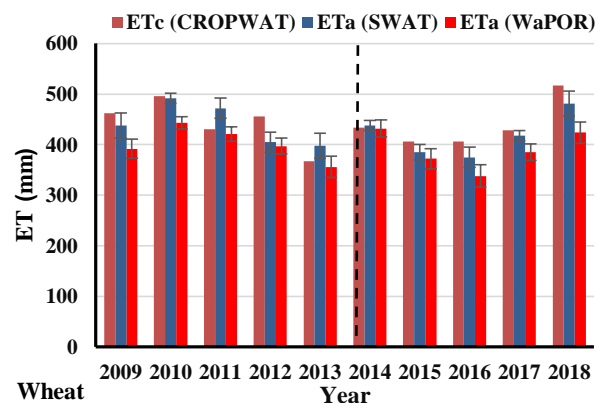
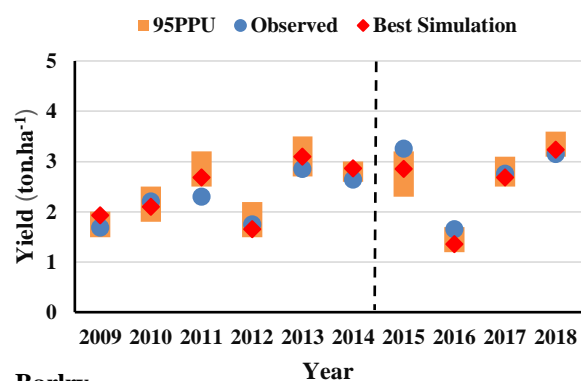
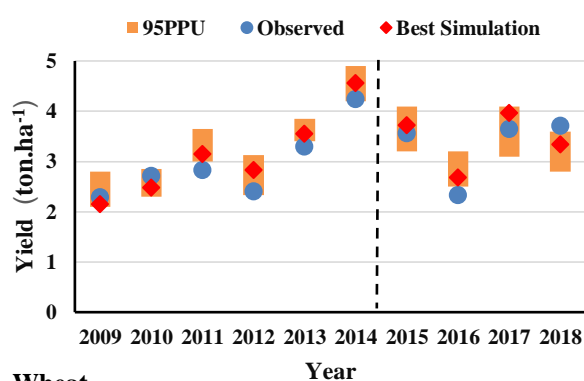


Fig. 5- values of the actual evapotranspiration (ET_a) from SWAT and WaPOR models and crop evapotranspiration (ET_c) in the calibration period (September 23, 2009 to September 22, 2015), and validation period (September 23, 2015 to September 22, 2019)

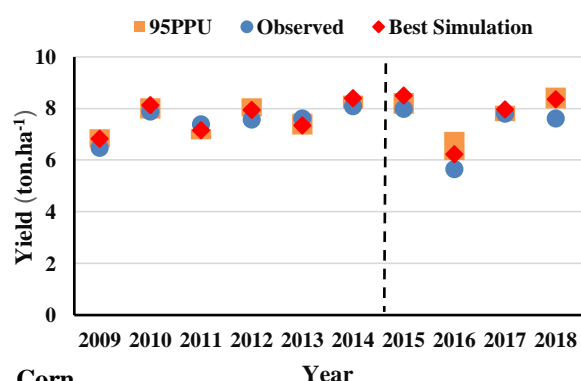
شکل ۵- مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده (ET_a) مدل‌های SWAT و WaPOR و مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_c) برای محصولات در دوره واسنجی (اول مهر ۱۳۸۸ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۴) و اعتبارسنجی (اول مهر ۱۳۹۴ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۸)



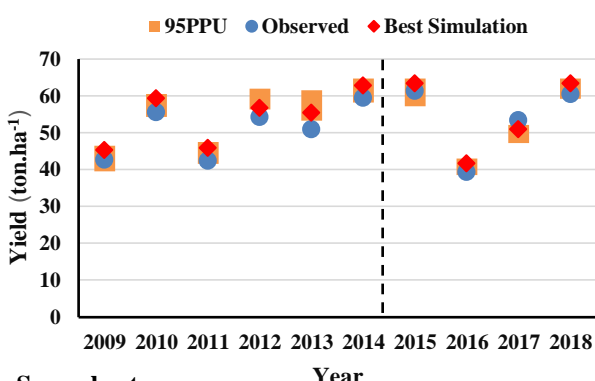
Barlry



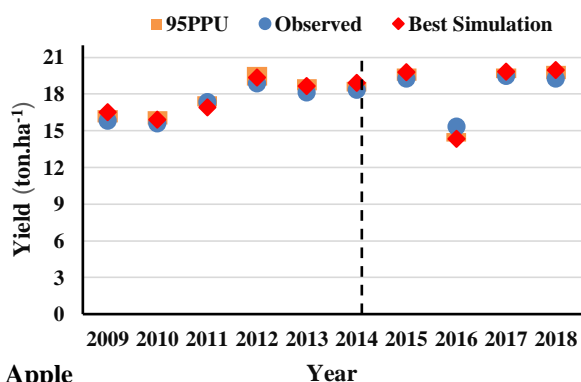
Wheat



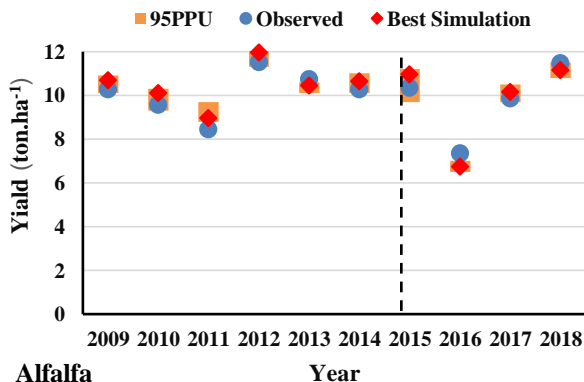
Corn



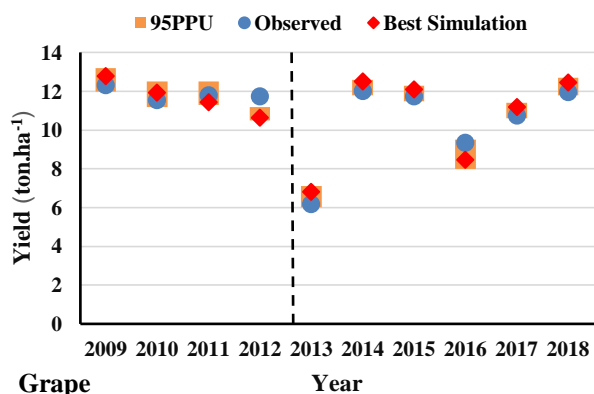
Sugar beet



Apple



Alfalfa



Grape

Fig. 6- Comparison of simulated and observed values of the yield crops in the calibration period (September 23, 2009 to September 22, 2015), and validation period (September 23, 2015 to September 22, 2019)

شکل ۶- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده عملکرد محصولات در دوره واسنجی (اول مهر ۱۳۸۸ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۴) و اعتبارسنجی (اول مهر ۱۳۹۴ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۸)

درواقع مقادیر پتانسیل عملکرد به دست آمده نشان می‌دهد مقادیر عملکرد مورد استفاده در فرآیند مدل‌سازی و واسنجی معرف بوده است. به عبارت دیگر، نتایج حاکی از برآورد نسبی مدل برای عملکرد محصول بود.

مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در برآورد عملکرد محصولات در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۶ ارائه شده است. شاخص‌های P-factor و R-factor برای بررسی عدم قطعیت مدل و شاخص‌های RMSE و PBIAS برای بیان مقایسه بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی عملکرد هر محصول استفاده شد. نتایج نشان داد مدل SWAT توانسته است به صورت رضایت‌بخشی عملکرد کلیه محصولات را در مقایسه با آمار عملکرد محصولات جهاد کشاورزی شبیه‌سازی کند. مقادیر P-factor به دست آمده بیان‌کننده واسنجی و اعتبارسنجی خوب و عدم قطعیت کم عملکرد شبیه‌سازی شده می‌باشند. از طرفی مقادیر R-factor به نسبت کوچک به دست آمده نیز نشان دهنده واسنجی خوب عملکرد شبیه‌سازی شده می‌باشند. با این حال عدم قطعیت مدل (عامل R) برای محصولات جو و گندم به ترتیب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی بیشتر از سایر محصولات بود. همچنین، عدم قطعیت مدل برای محصول سیب در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی کمتر از سایر محصولات بود. معیار RMSE بین مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای نشان از کارایی بالای مدل بود. به طور کلی نتایج بدست آمده مدل نشان دهنده بیش‌برآورد عملکرد محصولات است. با این حال، کمترین و بیش‌ترین مقادیر PBIAS به ترتیب ۰/۰۳ و ۶/۹۲- درصد برای عملکرد محصولات یونجه و ذرت در مرحله اعتبارسنجی به دست آمد. بررسی‌ها نشان داده است $PBIAS \leq 10\%$ بیانگر برآورد بسیار خوب مدل در نتایج شبیه‌سازی می‌باشد (Moriasi et al., 2007; Yan et al., 2013).

اگرچه عملکرد این مدل منجر به کم‌برآورد یا بیش‌برآورد عملکرد محصولات (به طور مثال بیش‌برآورد برای محصولات گندم و جو در سال ۲۰۱۱ یا کم‌برآورد برای محصولات یونجه، سیب و انگور در سال ۲۰۱۶ دارد)؛ اما به طور کلی هدف این است که شرایط منطقه براساس عملکرد محصولات در مدل در نظر گرفته شود. یک دلیل عمده نتایج خوب برای واسنجی عملکرد، گردآوری مناسب داده و اطلاعات شیوه‌های مدیریتی (از قبیل تاریخ کاشت و برداشت محصول، مقادیر آبیاری، کوددهی و خاک‌ورزی) با توجه به شرایط واقعی منطقه می‌باشد که در زیرحوضه‌های تحت کشت محصولات زراعی و باغی با دقت مناسبی به مدل تعریف شد. به طوری که این امر به بهبود عملکرد مدل کمک کرد.

۴- نتیجه‌گیری

مدل‌های هیدرولوژیکی برای شناخت و بررسی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و بیلان آب ضروری می‌باشند. در مطالعات نیز انتظار می‌رود از این مدل‌ها به عنوان ابزاری در مدیریت منابع آب استفاده شود. در این مطالعه یک روش واسنجی چندمنظوره دبی رودخانه، تبخیر و تعرق و عملکرد محصول در دشت مهاباد مورد توجه قرار گرفت. علاوه بر واسنجی براساس جریان سطحی، واسنجی تبخیر و تعرق واقعی و عملکرد محصول باعث می‌شود تبادلات مؤلفه‌های آب در منطقه غیراشباع به دلیل تنوع الگوی کشت و استفاده توأمان از آب سطحی و زیرزمینی در تأمین آبیاری در دشت مهاباد با دقت بیشتری به دلیل ارتباط مستقیم تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات با ذخیره‌ی آب در خاک برآورد گردد.

از ملاحظات اساسی دیگر در این مطالعه می‌توان به تعریف الگوی کشت، برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت‌های مختلف زراعی و آبیاری در مدل اشاره کرد.

Table 6- Values of model performance criteria for the yield of different crops in the period of calibration (validation)

جدول ۶- مقادیر معیارهای عملکرد مدل برای عملکرد محصولات مختلف در دوره واسنجی (اعتبارسنجی)

Crop	Index			
	R-factor	P-factor	RMSE (ton/ha)	PBIAS (%)
Wheat	0.97 (1.49)	0.83 (0.75)	0.29 (0.31)	-5.28 (-3.47)
Barley	1.48 (0.98)	0.83 (0.5)	0.24 (0.26)	-6.27 (6.34)
Corn	1.26 (0.87)	0.67 (0.5)	0.30 (0.54)	-1.72 (-6.92)
Sugar beet	1.03 (0.64)	0.83 (0.75)	3.31 (2.41)	-6.47 (-2.13)
Alfalfa	0.85 (0.58)	0.67 (0.75)	0.43 (0.48)	-3.23 (0.03)
Apple	0.81 (0.52)	1.00 (0.75)	0.51 (0.69)	-2.01 (-0.80)
Grape	0.49 (0.97)	0.83 (1.00)	0.62 (0.58)	-0.81 (-0.95)

این امر سبب می‌شود بتوان الگوی کشت موجود در دشت را برای پهنه‌های مختلف (زیرحوضه‌ها) اعمال کرد و در نتیجه مدیریت‌های آبیاری (تأمین توامان آب آبیاری از جریان‌ات سطحی و زیرزمینی) و زراعی (تاریخ کاشت، برداشت، شخم‌زنی، کوددهی و غیره) را با دقت بیشتری به مدل معرفی کرد.

به طور کلی نتایج مدل SWAT حاکی از توانایی قابل قبول آن در شبیه‌سازی جریان سطحی بود. البته مدل در شبیه‌سازی جریان سطحی عدم قطعیت بالایی داشت، به‌خصوص در جریان کم رودخانه منجر به بیش‌برآورد داشته است. مدل‌های شبیه‌سازی حوضه آبریز در تخمین میزان دبی پایین، عملکرد ضعیفی را نشان می‌دهند. این مسأله می‌تواند به ساده‌سازی مدل‌های سطحی در شبیه‌سازی و تعامل پیچیده بین رواناب و جریان‌ات زیرسطحی در مناطق با مقادیر باران کم ارتباط داشته باشد. البته مدل توانست دبی‌های اوج به‌عنوان مقادیر حیاتی برای مطالعات رودخانه را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. لازم به ذکر است مدل‌سازی دبی جریان در نواحی خشک و نیمه‌خشک نسبت به مناطق مرطوب به دلیل جریان کم و در اکثر مواقع گسسته و تنها برقراری جریان پیوسته برای بارش‌های با مقادیر زیاد بسیار پیچیده‌تر می‌باشد. همچنین، در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفتن تمام یکایک عوامل تأثیرگذار بر جریان در طول زمان براساس داده‌های موجود میسر نیست. برآیند عوامل مختلفی در طول مسیر جریان رودخانه از قبیل برداشت‌های مستقیم غیرمجاز از رودخانه (از طریق پمپ‌های سیار یا باز کردن سردهنه‌ها، تخلیه رواناب‌های سطحی به رودخانه، نشت دوجانبه رودخانه و آبخوان) بر شدت جریان خروجی تأثیر دارد. ارزیابی مستقل یکایک این عوامل با توجه به عدم دسترسی به داده‌های میدانی عملاً امکان‌پذیر نیست.

با این حال، مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی رواناب سطحی برای منطقه را داشت به طوری که مهم‌ترین دلیل دستیابی به نتایج این مطالعه در نظر گرفتن جریان پایه از کل جریان، مدیریت گیاهی و اعمال برداشت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی براساس الگوی تأمین نیاز آبیاری محصولات در محدوده بود.

در این مطالعه علاوه بر جریان‌ات سطحی از تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات برای ارزیابی چندمنظوره مدل استفاده شد. به دلیل عدم وجود داده‌های میدانی تبخیر و تعرق برای کشت‌های مورد نظر در طول دوره شبیه‌سازی، ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد تبخیر و تعرق واقعی با نتایج حاصل از WaPOR بررسی شد. در عین حال، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی از مدل SWAT با تبخیر و تعرق پتانسیل به‌دست آمده از مدل CROPWAT در جهت ارزیابی سطح تأمین آب آبیاری

برای محصولات مورد مطالعه مقایسه شدند. به طور کلی مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SWAT و WaPOR نشان می‌دهد برای اکثر محصولات، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از WaPOR به نتایج حاصل از مدل SWAT نزدیک است که نشان از شبیه‌سازی مناسب تبخیر و تعرق واقعی توسط مدل SWAT می‌باشد. نتایج نشان داد مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SWAT و WaPOR به مراتب کمتر از مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد شده توسط مدل CROPWAT است. به عبارت دیگر، مقادیر کمتر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SWAT و WaPOR در مقایسه با مقادیر برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مدل CROPWAT می‌تواند نشان دهنده کم‌آبیاری باشد که برای اکثر محصولات در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی بدست آمده است.

برای ارزیابی عملکرد محصولات برآورد شده توسط مدل SWAT از آمار عملکرد محصولات از گزارشات جهاد کشاورزی استان آذربایجان غربی در طول دوره شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد مدل توانسته است نوسانات عملکرد محصولات در سال‌های آبی مختلف را برآورد کند. به طوری که مقادیر عملکرد برآورد شده توسط مدل SWAT در سال‌های مختلف به مقادیر عملکرد محصولات گزارش شده توسط جهاد کشاورزی نزدیک است. از طرفی صحت‌سنجی عملکرد محصولات استفاده شده در فرآیند واسنجی مدل SWAT با استفاده از تابع تولید مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر پتانسیل عملکرد به دست آمده نشان می‌دهد مقادیر عملکرد مورد استفاده در فرآیند مدل‌سازی و واسنجی متعارف است. همچنین، نتایج حاکی از برآورد نسبی مدل برای عملکرد محصول بود، در عین این که مدل SWAT تا حدی عملکرد محصولات را بیش برآورد داشته است. به‌طور کلی تبخیر و تعرق به‌عنوان یک مؤلفه اصلی بیلان آب سطحی در حوضه‌های کشاورزی واقع در نواحی خشک و نیمه‌خشک می‌باشد به طوری که در نظر گرفتن آن در فرآیند واسنجی به‌طور قابل توجهی نتایج مدل را بهبود بخشید. به‌طور کلی واسنجی چندمنظوره مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس علاوه بر رودخانه، براساس پارامترهای تکمیلی از قبیل تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات باعث شد تا مقادیر شبیه‌سازی شده واقع بینانه و نماینده منطقه مورد مطالعه باشد به طوری که در نهایت منجر به افزایش دقت مدل‌سازی شد.

۵- تشکر و قدردانی

مؤلفین از مدیریت و کارشناسان ستاد احیای دریاچه ارومیه که امکان دسترسی به اطلاعات مورد نیاز تنظیم این مقاله را فراهم آوردند مراتب قدردانی و سپاس خود را اعلام می‌دارند.

بی نوشتها

- 1- Soil and Water Assessment Tool
- 2- Models Lumped
- 3- Linear Reservoir Approach
- 4- Hydrologic Response Unit
- 5- Muskingum
- 6- Digital Elevation Model
- 7- Retention Curve
- 8- Climate Forecast System Reanalysis
- 9- Water Productivity
- 10- Iterations
- 11- SCS Runoff Curve Number for Moisture Condition II
- 12- Effective Hydraulic Conductivity of Channel
- 13- Error Bar
- 14- Standard Deviation

۶- مراجع

- Aalami MT, Abbasi H, Niksokhan MH (2018) Comparison of two calibration-uncertainty methods for soil and water assessment tool in stream flow and total suspended solids modeling. *Water and Soil Science* 28(3):53-64 (In Persian)
- Abbaspour K C (2009) User manual for SWAT-CUP SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland
- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333(2-4):413-430
- Adeogun AG, Sule BF, Salami AW (2014) Validation of SWAT model for prediction of water yield and water balance: case study of upstream catchment of Jebba dam in Nigeria. *International Journal Computer and Mathematical Science* 8(2):264-270
- Ahmadzadeh H, Morid S, Delavar M (2014) Assessment of changes in agricultural crop yields and inflows to Lake Urmia in Zarrinehrud River Basin due to changing irrigation systems from surface to pressure using SWAT model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 8(1):1-15 (In Persian)
- Aizen V, Aizen E, Glazirin G, Loaiciga HA (2000) Simulation of daily runoff in Central Asian alpine watersheds. *Journal Hydrology* 238:15-34
- Akhavana S, Abedi-Koupaia J, Mousavia SF, Eslamiana SS, Abbaspour KC (2010) Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139(4):675-688
- Aliyari F, Bailey RT, Tasdighi A, Dozier A, Arabi M, Zeiler K (2019) Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins. *Environmental Modelling and Software* 115:200-210
- Alizadeh A, Izady K, Davari K, Ziaei A N, Akhavan S, Hamidi Z (2013) Estimation of actual evapotranspiration at the basin year scale using SWAT. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 2(7):258-243 (In Persian)
- Allen RG, Periera LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
- Amini MA, Torkan GH, Eslamian SS, Zareian MJ, Besalatpour AA (2019) Assessment of SWAT hydrological model in catchments' water balance simulation located in semi-arid regions (Case study: Zayandeh-Rud River Basin). *Journal of Water and Soil* 32(5):849-863 (In Persian)
- Anand J, Gosain AK, Khosa R (2018) Prediction of land use changes based on land change modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. *Science of the Total Environment* 644:503-519
- Arnold JG, Fohrer N (2005) SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrology Process* 19:563-572
- Arnold JG, Srinivasan R, Mutiah RS, Williams JR (1998) Large area hydrologic modeling and assessment-Part 1. Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1):73-89
- Barlow JR, Clark BR (2011) Water use conservation scenarios for the Mississippi Delta using an existing regional groundwater flow model. In AGU Fall Meeting Abstracts, 14-56
- Barlow PM, Leake SA (2012) Streamflow depletion by wells: Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow (p. 84). Reston, VA: US Geological Survey. Bear, J. and Cheng, A. H. D. 2010. Modeling groundwater flow and contaminant transport (Vol. 23). Springer Science & Business Media
- Bastiaanssen W, Cheema M, Immerzeel W, Miltenburg, I Pelgrum H (2012) Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Resources Research* 48:100-120

- Bejranonda W, Koontanakulvong S, Koch M (2007) Surface and groundwater dynamic interactions in the upper great Chao Phraya Plain of Thailand: Semi-Coupling of SWAT and MODFLOW. *Groundwater and Ecosystems, IAH Selected Papers on Hydrogeology; International Association of Hydrology: Goring, UK*, 17–21
- Berihun ML, Tsunekawa A, Haregeweyn N, Dile YT, Tsubo M, Fenta AA, ... Srinivasan R (2020) Evaluating runoff and sediment responses to soil and water conservation practices by employing alternative modeling approaches. *Science of The Total Environment* 747:141118
- Chu TW, Shirmohammadi A (2004) Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Transactions of the ASAE* 47(4):1057
- Chunn D, Faramarzi M, Smerdon B, Alessi DS (2019) Application of an integrated SWAT–MODFLOW Model to evaluate potential impacts of climate change and water withdrawals on groundwater–surface water interactions in west-central Alberta. *Water* 11(1):110
- Dastjerdi E, Mojaradi B, Alizadeh H (2019) GIS-based identification and preparation of suitable climatological data sources for simulation using semi-distributed hydrological models. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(7):1781-1791 (In Persian)
- de Oliveira Serrão EA, Silva MT, Ferreira TR, da Silva VDPR, de Sousa FDS, de Lima AMM, ... Wanzeler RT S (2020) Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon. *Science of The Total Environment* 744:140981
- Doorenbos J, Kassam AH (1979) *Yield response to water*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
- Dowlatabadi S, Zomorodian SA (2016) Conjunctive simulation of surface water and groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad watershed. *KSCE Journal of Civil Engineering* 20(1):485-496
- Faramarzi M, Abbaspour KC, Schulin R, Yang H (2009) Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrology Proceedings* 23(3):486-501
- Farokhnia A, Morid S, Delavar M, Abbaspour K (2018) Development of SWAT-LU model for simulation of urmia lake water level decrease and assessment of the proposed actions for its restoration; (Role of anthropogenic and climatic factors on hydrological change of the basin and lake). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 12(5):1041-1058 (In persian)
- Gao Y, Long D (2008) Intercomparison of remote sensing-based models for estimation of evapotranspiration and accuracy assessment based on SWAT. *Hydrological Processes* 22(25):4850-4869
- Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG (2007) The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE* 50(4):1211-1250
- Green WH, Ampt GA (1911) Studies on soil physics 1: The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4(1):1-24
- Hargreaves GH, Samani ZA (1982) Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 108(3):225-230
- Hosseini M, Ghafouri M, Tabatabaei Z, Mokarian MR (2017) Estimation of water balance in watersheds led to west-south frontiers and Persian Gulf by semi distributed SWAT Model. *Journal of Hydrology and Soil Science* 20(4):183-194 (In Persian)
- Hosseini SH, Memarian 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). *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems* 7(2):35-44 (In Persian)
- Hu J, Ma J, Nie C, Xue L, Zhang Y, Ni F, ... Wang Z (2020) Attribution analysis of runoff change in min-tuo river basin based on SWAT model simulations, China. *Scientific Reports* 10(1):1-16
- Izady A, Davary K, Alizadeh A, Ghahraman B, Sadeghi M, Moghaddamnia A (2012) Application of "panel-data" modeling to predict groundwater levels in the Neishaboor Plain, Iran". *Hydrogeology Journal* 20(3):435-447
- Jolejolea ME, Kimb BJ, Jeonb DJ, Cayetanoa M, Kimb JH (2018) Scenario study of the effect of different land use to a sub-basin in Yeongsan River basin using SWAT model. *Desalination and Water Treatment* 120:198-204
- Kanishka G, Eldho TI (2020) Streamflow estimation in ungauged basins using watershed classification and regionalization techniques. *Journal of Earth System Science* 129(1):1-18
- Kim NW, Chung IM, Won YS, Arnold JG (2008) Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *Journal of Hydrology* 356(1-2):1-16

- Mo G, Zhang Y, Huang Y, Mo C, Yang Q (2020) Evaluation and hydrological impact of land-use changes in the Longtan basin. *Journal of Earth System Science* 129(1):1-11
- Monteith JL (1965) Evaporation and environment. In the state and movement of water in living organisms, XIXth Symposium Society for Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press
- Moriassi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900
- Nair SS, King KW, Witter JD, Sohngen BL, Fausey NR (2011) Importance of crop yield in calibrating watershed water quality simulation tools. *Journal American Water Resource Associate (JAWRA)* 47(6):1285-1297
- Näschen K, Dieckkrüger B, Evers M, Höllermann B, Steinbach S, Thonfeld F (2019) The impact of Land Use/Land Cover Change (LULCC) on water resources in a tropical catchment in Tanzania under different climate change scenarios. *Sustainability* 11(24):7083
- Naserabadi F, Esmali Ouri A, Akbari H, Rostamian R (2016) River flow Simulation using SWAT Model (Case study: Ghareh Su River in Ardabil Province-Iran). *Journal of Watershed Management Research* 7(13):50-59 (In Persian)
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3):282-290
- Neitsch S, Arnold J, Kiniry J, Williams J (2011) Soil and water assessment tool: Theoretical documentation, version 2009, Texas Water Resource Institute, USA
- Neitsch S, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR, King KW (2009) Soil and water assessment tool. in: theoretical documentation: version 2009. TWRI TR-191, College Station, TX
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR (2005) Soil and water assessment tool theoretical documentation: Version 2005. Temple, TX: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. Available at: www.brc.tamus.edu/swat/doc.html. Accessed 1 November 2006
- Patil NS, Nataraja M (2020) Effect of land use land cover changes on runoff using hydrological model: A case study in Hiranyakeshi watershed. *Modeling Earth Systems and Environment* 6(4):2345-2357
- Payam Ebrahimi P, Salimi Kochi J, Mohseni Saravi M (2018) Calibration and validation of SWAT Model in runoff simulation, case study: Neka Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management* 10(3):266-279 (In Persian)
- Pisinaras V, Petalas C, Gikas GD, Gemtzi A, Tsihrintzis, VA (2010) Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination* 250(1):274-286
- Priestley CHB Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2):81-92
- Rezaei Moghaddam MH, Hejazi MA, Behbody A (2019) Estimation of runoff catchment in east Azerbaijan Province: Comparative application of calibration methods and uncertainty analysis of SWAT Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 8(31):59-75 (In Persian)
- Ritchie JT (1972) A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8(5):1204-1213
- Rostamian R, Jaleh A, Afyuni M, Mousavi SF, Heidarpour M, Jalalian A, Abbaspour KC (2008) Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal* 53(5):977-988
- Saadatpour A, Alizadeh A, Ziaei A N, Izady A (2019) Estimation and comparison of blue and green water using SWAT and SWAT-MODFLOW models in the neishabour watershed. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 13(4):1113-1129 (In Persian)
- Scanlon BR, Keese KE, Flint AL, Flint LE, Gaye CB, Edmunds WM, Simmers I (2006) Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes* 20(15):3335-3370
- Sedighi Hamidi P (2018) Investigating the effect of expansion of pressurized irrigation systems on water resources of Urmia Lake basin (Mahabad sub-basin). M.Sc. Thesis in Irrigation and Drainage Engineering, 131 p (In Persian)
- Sophocleous MA (2005) Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal* 13(2):351-365
- Spruill CA, Workman SR, Taraba JL (2000) Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Transactions of the ASAE* 43(6):1431
- Srivastava P, McNair JN, Johnson TE (2006) Comparison of process-based and artificial neural network approaches for streamflow modeling in an agricultural watershed. *Journal of the American Water Resources Association* 42(3):545-563

- Thavhana MP, Savage MJ, Moeletsi ME (2018) SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 105:115-124
- Tuppad P, Douglas-Mankin KR, Lee T, Srinivasan R, Arnold JG (2011) Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: Extended capability and wider adoption. *Transactions of the ASABE* 54(5):1677-1684
- USDA Soil Conservation Service (1972) National engineering handbook. Section 4: Hydrology, Chapters 4-10
- Vazquez-Amabile GG, Engel BA (2005) Use of SWAT to compute groundwater table depth and stream flow in the Muscatatuck River watershed. *American Society of Agricultural Engineers* 48(3):991-1003
- Walker K, Thoms MC (1993) Environmental effects of flow regulation on the lower river Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research and Management* 8:103-19
- Water Consulting Engineers and Sustainable Development (2014) Update studies of water resources balance study areas of Urmia Lake catchment area leading to the water year of 2009-2010. Mahabad Study Area Water Balance Report 81p (In Persian)
- Water Engineering Research Institute (2019) Collaborative land cover mapping of the Lake Urmia Basin, Iran. Tarbiat Modares University, GCP/IRA/066/JPN-18-003, 61p
- Wei X, Bailey RT (2019) Assessment of system responses in intensively irrigated stream-aquifer systems using SWAT-MODFLOW. *Water* 11(8):1576
- Wheater HS (2010) Hydrological processes, groundwater recharge and surface-water/groundwater interactions in arid and semi-arid areas. *Groundwater Modeling in Arid and Semi-Arid Areas*, 1st ed, Howard S. Wheeler, Simon A. Mathias and Xin Li. Published by Cambridge University Press 5-37
- White KL, Chaubey I (2005) Sensitivity analysis, calibration and validation for a malt sit and multivariable SWAT model. *Journal of the American Water Resources Association* 41(5):1077-1089
- Wösten JHM, Pachepsky YA, Rawls WJ (2001) Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251(3-4):123-150
- Xu K, Peng HQ (2013) Estimating runoff and environment protection in Tao River Basin based on SWAT Model. In *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd. 340:942-946
- Yin I, Hu G, Huang J, Wen D, Dong J, Wang X, Li H (2011) Groundwater-recharge estimation in the Ordos Plateau, China: Comparison of methods. *Hydrogeology Journal* 19:1563-1575