



Evaluation of the performance of SWAP model updated with satellite data in estimating of rice evapotranspiration and its crop coefficients

Hosein Pandi¹ | Safoora Asadi Kapourchal² | Majid Vazifedoust³ |
Mojtaba Rezaei⁴

1. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail:

olomekhak91@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

E-mail: safouraasadi@guilan.ac.ir

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail:

majid.vazifedoust@yahoo.com

4. Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. E-mail:

mrezaei@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 4, 2023

Revised: Sep. 15, 2023

Accepted: Sep. 17, 2023

Published online: Oct. 23, 2023

Keywords:

Crop Coefficient,
Remote Sensing,
Rice,
Simulation,
SWAP.

ABSTRACT

Due to the upcoming climate threats, challenge of water shortage and its impact on the food security of the growing population in Iran, the optimal use of soil and water resources is very important. With the development of remote sensing technologies, free access to a variety of field data has become widely available, which can be used to reduce the uncertainty of simulation models. The aim of this study was to simulate actual evapotranspiration (ETa) and rice crop coefficients (Kc) during its growth stages using the SWAP model updated with satellite data and evaluate the accuracy of the results with/without updating. This research was conducted at the National Rice Research Institute of Iran in Rasht in the year of 2017. Based on the obtained results, total ETa measured by lysimeter and simulated by SWAP model with and without updating were 395.4, 373.2 and 363.6 mm, respectively. The average crop coefficients during the growth stages of vegetative, reproductive and ripening were estimated as 1.13, 1.49, 1.21, respectively. The crop coefficients for the proposed stages estimated by SWAP model without using satellite data were 1.02, 1.39, 1.04, respectively. After updating with satellite data, the crop coefficients were modified as 1.05, 1.43 and 1.07, respectively. Finally, the statistical analysis indicated that the SWAP model has a reasonable performance in estimation of ETa (RMSE=0.89; EF=0.98; R²=0.74) and rice crop coefficients (RMSE=0.53; EF=0.96; R²=0.63). The results indicate that the SWAP model combined with satellite data improved the accuracy of ETa estimation (RMSE=0.75; EF=0.99; R²=0.86) and rice crop coefficient (RMSE=0.40; EF=0.99; R²=0.74) at field scale.

Cite this article: Pandi, H., Asadi Kapourchal, S., Vazifedoust, M., & Rezaei, M. (2023) Evaluation of the performance of SWAP model updated with satellite data in estimating of rice evapotranspiration and its crop coefficients, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (8), 1197-1213. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361733.669525>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361733.669525>



برآورد تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج با استفاده از مدل SWAP با و بدون تلفیق تصاویر ماهواره‌ای

حسین پندی^۱ | صفورا اسدی کپورچال^۲ | مجید وظیفه دوست^۳ | مجتبی رضایی^۴۱. گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: olomekhak91@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: safooraasadi@guilan.ac.ir۳. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، ایران. رایانامه: majid.vazifedoust@yahoo.com۴. مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. رایانامه: mrezaei@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	با افزایش جمعیت، نیاز روز افزون جامعه به غذا و کاهش بازده آبیاری در مزارع، استفاده بهینه از منابع خاک و آب حائز اهمیت است. با گسترش فناوری سنجش از دور، دسترسی به اطلاعات از منابع زمینی به گونه‌ای گسترده و سریع فراهم شده است. پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج رقم هاشمی اصلاح شده طی مراحل مختلف رشد با استفاده از مدل SWAP و تصاویر ماهواره‌ای و مقایسه کارایی این روش‌ها با یکدیگر در مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در شهر رشت در سال زراعی ۱۳۹۶ انجام شد. بر پایه نتایج مجموع تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر، و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP با و بدون بروزرسانی با داده‌های ماهواره‌ای به ترتیب ۳۹۵/۴، ۳۷۳/۲، ۳۶۳/۶ میلی‌متر بود. میانگین ضریب گیاهی محاسبه شده در دوره‌های رشد رویشی، زایشی و رسیدگی به ترتیب ۱/۱۳، ۱/۴۹، ۱/۲۱ به دست آمد. این ضرایب برای حالت شبیه‌سازی شده بدون بروزرسانی به ترتیب ۱/۰۲، ۱/۳۹، ۱/۰۴ و با بروزرسانی داده‌های ماهواره‌ای به ترتیب ۱/۰۵، ۱/۴۳، ۱/۰۷ به دست آمد. در نهایت، بر اساس آماره‌های محاسبه شده مدل SWAP در برآورد ضریب گیاهی ($EF=0/96$, $R^2=0/63$), ($RMSE=0/53$) و تبخیر-تعرق برنج ($RMSE=0/74$, $EF=0/98$, $R^2=0/74$) از دقتی مناسب برخوردار بوده، لیکن با اندک اختلافی مدل SWAP بروزرسانی شده با داده‌های ماهواره‌ای در برآورد ضریب گیاهی ($R^2=0/74$, $EF=0/99$, $RMSE=0/40$) و تبخیر-تعرق ($RMSE=0/75$, $EF=0/99$, $R^2=0/86$) بهتر عمل کرده و می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای به منظور بهبود کارایی مدل در برآورد تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج استفاده کرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۶/۲۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۲۶	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۸/۱	
واژه‌های کلیدی:	
برنج، سنجش از دور، شبیه‌سازی، ضریب گیاهی، SWAP.	

استناد: پندی؛ حسین، اسدی کپورچال؛ صفورا، وظیفه دوست؛ مجید، رضایی؛ مجتبی، (۱۴۰۲) برآورد تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج با استفاده از مدل SWAP با و بدون تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۸)، ۱۱۹۷-۱۲۱۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361733.669525>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361733.669525>

مقدمه

برنج با نام علمی *Oryza Sativa L.*، پس از گندم مهم‌ترین و عمده‌ترین محصول غذایی جهان است (FAO, 2018). برنج با تولید بیش از ۴۸۰ میلیون تن در اراضی شالیزاری جهان، یک سوم سطح زیر کشت غلات دنیا را به خود اختصاص داده است. بیش از ۸۰ درصد منابع آب شیرین قاره آسیا در کشاورزی و تقریباً نیمی از آن در تولید محصول برنج مورد استفاده قرار می‌گیرند (Barlow et al., 2015). تبخیر-تعرق^۱ (ET) جزء اصلی چرخه هیدرولوژی است و تعیین آن در مطالعات آبی و به‌ویژه جهت برآورد نیاز آبی گیاهان مهم است (Güçlü et al., 2017). تبخیر-تعرق نه تنها در چرخه آب و انرژی شرکت می‌کند، بلکه یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رشد محصول، تولید زیست توده خشک و عملکرد است. تعیین تبخیر-تعرق در طول فصل رشد برای دستیابی به برنامه‌ریزی کارآیی آبیاری، مدیریت منابع آب، ارزیابی و تعیین میزان تولید مواد غذایی، خوراک، فیبر و سوخت‌های زیستی بسیار مهم است (Blanka et al., 2017; Losgedaragh & Rahimzadegan., 2018; Zheng et al., 2018). در سال‌های اخیر به دلیل خشکسالی‌های مکرر و رقابت برای منابع آبی در بین مصرف‌کنندگان کشاورزی، دسترسی به آب برای آبیاری در سراسر جهان کاهش یافته است. روش‌های مستقیم و غیرمستقیم بسیار زیادی برای برآورد تبخیر-تعرق ارائه شده است که هر یک از این روش‌ها دارای حسن‌ها و محدودیت‌هایی هستند (فرسادنیا و همکاران، ۱۳۹۴)، لیکن انتخاب بهترین روش برای هر منطقه، مستلزم تحقیق، ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف با داده‌های اندازه‌گیری شده به روش مستقیم لایسیمتری است. روش مستقیم تعیین مقدار تبخیر-تعرق، با آزمایش‌های لایسیمتری انجام می‌شود. هرچند که این روش دارای هزینه‌های سنگین‌تری نسبت به سایر روش‌ها است؛ لیکن به دلیل اینکه تقریباً بیان‌گر تمام عوامل تأثیرگذار بر نیاز آبی گیاه مورد مطالعه است، روشی بسیار دقیق است (رستمی و رائینی سرجاز، ۱۳۹۵) و به دلیل تغییر ضریب گیاهی در شرایط مختلف، پژوهشگران زیادی به تعیین آن در مناطق مختلف پرداختند و افزون بر سایر روش‌های تجربی برای تعیین مقادیر تبخیر-تعرق، از روش لایسیمتر نیز استفاده کردند (مجنونی هریس و همکاران، ۱۳۹۴). برآورد دقیق تبخیر-تعرق، به‌ویژه در مقیاس منطقه‌ای، موضوعی است که به طور گسترده در زمینه روابط آب، خاک و گیاه و استفاده بهینه از منابع آب مورد بررسی قرار گرفته است (Dong et al., 2016).

مدل‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی، یکی از ره‌یافته‌های ابزاری مفید در تحقیقات علمی و مدیریت زراعی به‌شمار می‌رود. تلاش برای ارزیابی مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی از اواخر سال ۱۹۶۰ آغاز شد. دقت مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی به دقت داده‌های ورودی مدل مورد نظر بستگی دارد. اگر داده‌های ورودی با دقت بالا اندازه‌گیری شود، برآورد مدل‌سازی قابل اطمینان خواهد بود (van Lier et al., 2015; Marin et al., 2017). با ظهور کشاورزی جدید و بحث مدیریت آب، تغییرات مکانی پارامترهای اولیه مربوط به محیط و گیاه در مدل باید به طور مناسب منعکس شوند (Han et al., 2019). تخمین تبخیر-تعرق واقعی بر اساس مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی محاسبه شود و نتایج چنین برآوردهایی قادر به ارزیابی منابع آب و مدیریت آن هستند. در بین مدل‌های عددی، مدل SWAP^۲ (خاک، آب، اتمسفر و گیاه) بر مبنای معادله ریچاردز به‌ویژه در ارزیابی‌های آبیاری متمرکز شده است (Kroes & Van Dam., 2003). با وجود این که مدل SWAP و روش‌های محاسباتی آن، تنها امکان محاسبه تبخیر-تعرق به‌صورت ایستگاهی و نقطه‌ای را فراهم می‌نماید، وجود نقشه با تغییرات مکانی می‌تواند گام مفیدی در توانایی مدیریت مکانی آب و صرفه‌جویی و تخصیص بهینه منابع آب به هر نقطه از یک منطقه یا دشت باشد (یعقوب زاده و همکاران ۱۳۹۵). مدل SWAP در موارد مختلفی مانند شبیه‌سازی رطوبت در خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، تعیین تبخیر-تعرق و اجزای دیگر بیلان آبی و نیز در مقیاس‌های مختلف مانند مزرعه، شبکه آبیاری و حوضه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به اینکه فناوری سنجنش از دور^۳ (RS) نقش بسزایی در کاهش هزینه بازدیدهای صحرائی و افزایش دقت در محاسبات دارد، روز به روز بر اهمیت آن در راستای توسعه پایدار افزوده می‌شود. نظارت بر فرایندهای رشد محصول برای برداشت محصولات کشاورزی مهم است (Jin et al., 2018). داده‌های سنجنش از دور مجموعه‌ای از اطلاعات و پارامترهای سطح زمین را با تکرار زمانی منظم در کل کره زمین و در طیف وسیعی از مقیاس‌های مکانی فراهم می‌کند (Liang & Qin., 2008) و برای برآورد تبخیر-تعرق دارای مزایای بارز در دقت و تفکیک مکانی است (Rahimikhoob, 2016).

مزیت تکنیک‌های سنجنش از دور این است که می‌تواند به طور مداوم اطلاعات مهمی را برای انواع مختلف محصولات در مقیاس‌های

¹Evapotranspiration

²Soil-Water-Atmosphere-Plant

³Remote sensing



مختلف مکانی ارائه دهد. در دهه‌های اخیر، با پیشرفت در سنسورهای ماهواره‌ای و روش‌های سنجش از دور، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توجه زیادی را برای تخمین تبخیر-تعرق به خود جلب کرده است و محققین در تحقیقات زیادی برای تخمین و استخراج تبخیر-تعرق واقعی و توزیع مکانی و زمانی آن از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های مختلف استفاده کرده‌اند (Tang & Li., 2014 Ramezani Khojeen et al., 2016; Lv et al., 2018).

نیاز آبی هر گیاه (ETc) تابعی از نیاز آبی گیاه مرجع (ET₀)^۲ بوده که در قالب ضریب گیاهی (Kc)^۳ بیان می‌شود. به عبارت دیگر، تبخیر-تعرق هر محصولی، نسبتی از تبخیر-تعرق گیاه مرجع است که این نسبت را عاملی به نام ضریب گیاهی تعیین می‌کند (Allen et al., 1998). نیاز آبی گیاه برنج با مقدار تبخیر-تعرق رابطه کاملاً مستقیم دارد و مقدار آن نیز به شرایط جوی، بافت خاک، دوره رشد گیاه و روش کاشت بستگی دارد. بنابراین، تعیین میزان تبخیر-تعرق گیاه برنج در طول مراحل رشد، بستگی به میزان آب مورد نیاز گیاه و مدیریت آب مزرعه دارد (مدبری و همکاران، ۱۳۹۳). بر اساس پیشنهاد فائو، ضریب گیاهی برنج برای مرحله‌ی ابتدایی رشد ۱/۰۵، مرحله میانی ۱/۲ و مرحله پایانی رشد گیاه، ۰/۶ تا ۰/۹، تحت عنوان ضرایب گیاهی جدولی فائو، ارائه و توصیه شده است (Allen et al., 1998; Doorenbos & Pruitt, 1977).

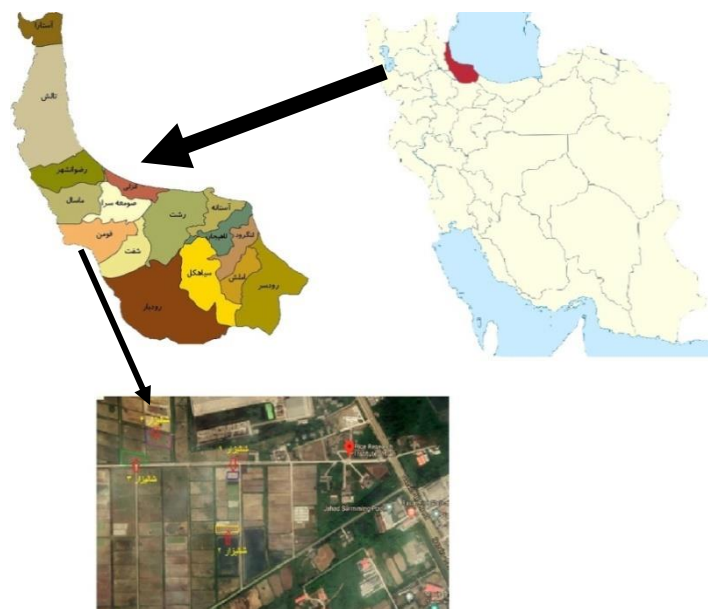
در تحقیقی در منطقه برخوار اصفهان که توسط Vazifedoust et al. (2008) انجام شد شبیه‌سازی مقادیر بیلان آبی با مدل SWAP ارزیابی و واسنجی شد. نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی حرکت آب در خاک و شبیه‌سازی اجزای بیلان آب در مزرعه مورد استفاده قرار گیرد. روش‌های مختلفی برای تخمین تبخیر-تعرق بر اساس ترکیب مدل‌سازی و داده‌های سنجش از دور از جمله استفاده از شاخص‌های گیاهی، توسعه یافته است. Singh et al. (2010) اذعان کردند که با استفاده از مدل شبیه‌ساز SWAP و تکنیک سنجش از دور، می‌توان اجزای بیلان آبی و حرکت آب در خاک را به خوبی شبیه‌سازی کرد. نتایج به دست آمده از مطالعه‌ای در کشور اسلونی بر روی بیلان آبی و تخمین ضریب گیاهی به کمک تصاویر ماهواره‌ای و داده‌برداری زمینی برای دو دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و ۲۰۰۰-۱۹۷۱، نشان‌دهنده انطباق خوبی بین روش‌های زمینی و ماهواره‌ای بوده است (Frantar et al., 2006). در پژوهشی در هند، Tyagi et al. (2000) با به کار بردن لایسیمتر، مقدار ضریب گیاهی برنج را بر اساس نتایج تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیت برای چهار مرحله رشد اولیه، رشد سریع، رسیدن اولیه و رسیدن نهایی، ۱/۱۵، ۱/۲۳، ۱/۱۴، ۱/۰۲ به دست آوردند. در پژوهش دیگری، Yoo et al. (2008)، مقدار ضریب گیاهی برنج را در سه دوره رشد ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب ۱/۱۲، ۱/۴۹ و ۱/۲۳ به دست آوردند. در پژوهش‌های انجام شده در شمال کشور چین، میانگین ضریب گیاهی در مرحله ابتدایی رشد ۱/۰۷، مرحله میانی ۱/۲ و مرحله برداشت آن، ۰/۸۷ اندازه‌گیری شد (Yang et al., 2006). در پژوهشی دیگر (Tomar & O'toole, 1980)، ضریب گیاهی در مرحله نشا برنج را برابر با ۱، در مرحله حداکثر پنجه‌زنی ۱/۱۵ و در مرحله خوشه‌زنی حدود ۱/۳ به دست آوردند. ضریب گیاهی سه نوع برنج مختلف در توکیو از ۱/۰۹ تا ۱/۲۸ در مراحل اولیه رشد و ۱/۰۲ تا ۱/۴۶ در اواسط فصل رشد متفاوت بوده است (Vu et al., 2005). ضریب گیاهی برنج در هند در مراحل اولیه، میانی و پایان فصل رشد به ترتیب ۱/۰۶، ۱/۷۳ و ۱/۳۶ در سال ۲۰۰۱ و ۱/۲، ۱/۸۸، ۱/۴۵ در سال ۲۰۰۲ بود (Choudhury & Singh., 2016). در پژوهشی میدانی با استفاده از لایسیمتر در منطقه‌ای از گیلان، میانگین ضریب گیاهی برای برنج رقم بی‌نام، ۱/۱۱ و برای رقم خزر ۱/۱۴ به دست آمد (Razavipor & Yazdani., 1999).

بسیاری از مطالعات، مدل‌هایی را برای برآورد متغیرهای وضعیت گیاه و ویژگی‌های خاک بر مبنای داده‌های سنجش از دور و یکسان‌سازی این متغیرهای تخمین زده شده در مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی پیشنهاد کرده‌اند. مطالعات نشان می‌دهند که داده‌های سنجش از دور می‌توانند برای بهینه‌سازی پارامترهای مورد نیاز مدل‌سازی و تکمیل شبیه‌سازی با ادغام در ورودی مدل، تحت شرایط خاص استفاده شوند و جزء روش‌های جدید مطالعاتی هستند (Xu et al., 2014; Yin et al., 2017; Jin et al., 2018). به‌طور خلاصه، دریافت اطلاعات از سنجش از دور و مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی، دارای پتانسیل خوبی در تخمین متغیرهای وضعیت گیاه و ویژگی‌های خاک بوده و جزء روش‌های جدید مطالعاتی است (Jin et al., 2018). سنجش از دور و مدل‌سازی هیدرولوژیکی دو ابزار و روش اصلی برای تخمین تبخیر-تعرق هستند (Dong et al., 2016). فناوری سنجش از دور، به دلیل توانایی در ارائه مشاهدات توزیع شده در سطح وسیع، فرصت‌های جدیدی را برای توسعه مدل‌های هیدرولوژیکی ایجاد کرده است. عدم تعیین دقیق تبخیر-تعرق گیاهان سبب آبیاری بیش از حد و یا کمتر از حد مورد نیاز می‌شود. آبیاری بیشتر افزون بر هدر رفت

آب، زه‌دار شدن اراضی (به‌ویژه در زمین‌های با زهکشی ضعیف یا بدون زهکش) را به دنبال دارد و آبیاری کمتر سبب کاهش عملکرد محصول خواهد شد. تعیین تبخیر-تعرق و نیاز آبی گیاه برنج به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب و رایج‌ترین کشت زراعی در منطقه شمال کشور (استان‌های گیلان و مازندران) که بیش از ۵۰ درصد سطح زیر کشت برنج کشور را شامل می‌شوند (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۰)، امری کاملاً ضروری است. با توجه به متغیر بودن مقدار تبخیر-تعرق برنج در شرایط اقلیمی متفاوت و اهمیت کشت گیاه برنج در استان گیلان، مطالعه حاضر با هدف تعیین تبخیر-تعرق و ضرایب گیاهی برنج رقم هاشمی اصلاح شده طی مراحل چندگانه رشد (رویشی، زایشی و رسیدگی) و شبیه‌سازی تبخیر-تعرق با استفاده از مدل SWAP و بروزرسانی آن با داده‌های ماهواره‌ای و مقایسه کارایی آنها با روش اندازه‌گیری صحرائی انجام شد.

مواد و روش

این پژوهش در مزارع برنج مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در استان گیلان در حومه شهر رشت با مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 12'$ عرض شمالی، $49^{\circ} 38'$ طول شرقی و در ارتفاع تقریبی ۲۴ متر از سطح دریا و در سال زراعی ۱۳۹۶ انجام شد. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی شالیزارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به موقعیت اراضی تحت کشت برنج در منطقه مورد مطالعه، ابتدا چهار قطعه زمین مورد نظر جهت انجام پژوهش انتخاب و با روش‌های معمول آماده‌سازی زمین، شخم زده شدند. به‌منظور تعیین تبخیر-تعرق برنج به صورت مستقیم، از لایسیمترهای پلاستیکی با قطر ۷۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. لایسیمترها با رنگ سفید انتخاب شد تا نور خورشید در تبخیر آب لایسیمتر و ایجاد خطا کمترین تاثیر را داشته باشد. با گل اندود کردن اطراف لایسیمترها از بالا رفتن دمای آب لایسیمتر و تبخیر آب آن تا حد ممکن جلوگیری شد. پس از کار گذاشتن لایسیمترها در داخل شالیزار، درون آنها را از خاک شالیزار پر کرده و در هر کدام از لایسیمترها با توجه به ابعاد و فاصله کاشت نشا در مزرعه و تراکم ۱۶ بوته در متر مربع، ۷ دسته نشا برنج کشت شد. لایسیمترها طوری مستقر شد که سطح خاک درون هر لایسیمتر هم سطح با سطح خاک مزرعه بود. داخل لایسیمترها هم مانند مزارع برنج تحت شرایط غرقاب دائم قرار گرفت و سعی شد ارتفاع آب مزرعه با لایسیمتر به مقدار برابر باشند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزارع برنج مورد مطالعه

برای تعیین ویژگی‌های خاک محل آزمایش، چند نمونه خاک همگن به صورت تصادفی از شالیزارهای مورد مطالعه تا عمق نفوذ ریشه گیاه برنج (۳۰ سانتی‌متری) در سه لایه (۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰) تهیه شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، جرم ویژه ظاهری خاک به روش کلوخه و پارافین (Grossman & Reinsch, 2002)، درصد مواد آلی به روش والکی و بلک (Walkly, 1934) و pH و EC خاک به ترتیب با استفاده از دستگاه پ-هاش متر و هدایت سنج (Page et al., 1982) در عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شالیزارهای مورد مطالعه

عمق (cm)	واکنش خاک (-)	قابلیت هدایت الکتریکی (ds/m)	کربن آلی (%)	جرم ویژه ظاهری (gr/cm ³)	رس (%)	شن (%)	سیلت (%)	بافت
۰-۱۰	۷/۱۵	۰/۷۱	۱/۷۲	۱/۱۰	۴۷	۱۴	۳۹	رسی
۱۰-۲۰	۷/۲۳	۰/۶	۱/۵۴	۱/۲۰	۴۴	۱۷	۳۹	رسی
۲۰-۳۰	۷/۲۶	۰/۵۶	۱/۲۵	۱/۳۲	۴۷	۹	۴۴	رس سیلتی

ورودی و خروجی‌های مدل SWAP

داده‌های مورد نیاز در این مدل شبیه‌ساز شامل اطلاعات خاک، آبیاری، پارامترهای گیاهی و داده‌های هواشناسی است. ویژگی‌های هیدرولیکی مورد نیاز زیر مدل خاکی مدل SWAP شامل میزان رطوبت اشباع و باقی‌مانده، هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامترهای n و α ون‌گونختن^۱ بوده که با استفاده از اطلاعات داده‌های جرم ویژه ظاهری و درصد رس، سیلت و شن در نرم‌افزار RETC^۲ محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی خاک مزرعه مورد مطالعه

لایه	عمق (cm)	رطوبت باقی‌مانده (cm ³ cm ⁻³)	رطوبت اشباع (cm ³ cm ⁻³)	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm.d ⁻¹)	پارامتر n در مدل ون‌گونختن	پارامتر α در مدل ون‌گونختن (cm ⁻¹)
۱	۰-۱۰	۰/۱۰۴۵	۰/۵۶۰۶	۵۱/۲۲	۱/۳۵۰۲	۰/۰۱۶۸
۲	۱۰-۲۰	۰/۰۹۹۸	۰/۵۲۲۶	۳۰/۴۱	۱/۳۸۰۸	۰/۰۱۴۴
۳	۲۰-۳۰	۰/۰۹۹۲	۰/۴۹۸۳	۱۳/۲۵	۱/۳۶۵۲	۰/۰۱۳۷

داده‌های مورد نیاز در زیر مدل هواشناسی شامل تابش خورشیدی، کمینه و بیشینه دمای هوا، کمینه و بیشینه رطوبت نسبی، بارندگی و میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و تبخیر-تعرق مرجع با گام زمانی روزانه از ایستگاه همدیدی مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی رشت که در مجاور موسسه تحقیقات برنج کشور قرار دارد، به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه دریافت شد. میانگین ماهانه پارامترهای هواشناسی برای دوره رشد گیاه برنج در سال زراعی ۱۳۹۶ در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر میانگین ماهانه پارامترهای هواشناسی در ایستگاه سینوپتیک مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی رشت برای دوره رشد برنج در منطقه مورد مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۶

ماه	تابش خورشیدی (KJ/m ² /day)	دمای حداقل (°C)	دمای حداکثر (°C)	رطوبت نسبی حداقل (%)	رطوبت نسبی حداکثر (%)	میانگین سرعت باد (m/s)	بارندگی (mm)	تبخیر-تعرق مرجع (mm)
خرداد	۱۹۸۶۰/۷	۱۸/۸	۲۸/۳	۵۷/۰	۹۳/۰	۲/۳	۱۸/۶	۳/۴
تیر	۱۹۸۵۷/۷	۲۰/۷	۳۱/۲	۵۳/۹	۹۳/۷	۲/۰	۱۳/۸	۳/۵
مرداد	۲۱۳۵۸/۴	۲۱/۸	۳۳/۹	۴۶/۷	۹۰/۱	۲/۴	۰/۰	۴/۵

نتایج تحقیق ایرماک و همکاران در سال ۲۰۰۲ گویای این بود که تبخیر از تشت نیز می‌تواند به عنوان شاخصی مناسب برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع و در نهایت گیاه استفاده شود. تشت تبخیر به دلیل سادگی، سهولت تفسیر داده‌های آن و داشتن دقت خوب در مناطق مرطوب، جهت تعیین تبخیر-تعرق استفاده می‌شود (Irmak et al., 2002). بدین جهت، تبخیر-تعرق مرجع روزانه (ET₀) از معادله فائو-پنمن-مانتیت مرجع (FPM^۳) از رابطه ۱ محاسبه شده است (Allen et al., 1998).

$$ET = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} + U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن ET تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، Rn تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگاژول بر متر مربع بر روز)، G شار

گرمای خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری (درجه سلسیوس)، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، γ ضریب سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، Δ شیب منحنی فشار بخار هوا (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال) و $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) است. برای محاسبه ET_0 با روش‌های تجربی و فائو-پنمن-مانتیت از نرم افزار REF-ET استفاده شد. الگوریتم استفاده شده در این نرم‌افزار برگرفته از دستورالعمل ASCE و نشریه فائو ۵۶ (Allen et al., 1998) می‌باشد.

زیر مدل آبیاری در برگرفته پارامترهای مدیریتی آبیاری شامل روش آبیاری، شوری و کیفیت آب آبیاری و عمق آب آبیاری (مقدار آب به کار برده شده در هر آبیاری) است (Kroes et al., 2008). روش آبیاری مزارع به صورت سطحی و غرقاب دائم بوده و عمق آب (پیش و پس از آبیاری، میزان کاهش توسط تبخیر-تعرق و افزایش ارتفاع آب توسط باران) با خط‌کش به صورت روزانه اندازه‌گیری شد.

پارامترهای گیاهی از مهم‌ترین پارامترهای مورد نیاز شبیه‌سازی در مدل به شمار می‌آیند. در این پژوهش پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده شامل عمق توسعه ریشه، تراکم کاشت، شاخص سطح برگ، وزن تر و خشک اجزای گیاه (ساقه، برگ، ریشه و خوشه) و ارتفاع گیاه در فواصل زمانی ۶ روزه در مراحل مختلف رشد گیاه بود. با کشت نشا برنج در زمین در تاریخ ۱۳۹۶/۳/۱، دوره رویشی آغاز و تا ۱۳۹۶/۳/۲۷ ادامه یافت. مرحله بعدی رشد گیاه (دوره زایشی) از تاریخ ۱۳۹۶/۳/۲۸ با ظهور خوشه، شروع و با گل‌دهی برنج در تاریخ ۱۳۹۶/۵/۱ به پایان رسید. مرحله آخر (دوره رسیدگی) از تاریخ ۱۳۹۶/۵/۲ شروع و با برداشت برنج در تاریخ ۱۳۹۶/۵/۲۵ به پایان رسید. مراحل توسعه یافتگی گیاه برنج بر اساس روزهای سپری شده از نشا کردن و مراحل مختلف رشد گیاهی تعیین شد. طول دوره رشد گیاه برنج رقم هاشمی اصلاح شده نیز ۸۷ روز بود.

در پژوهش حاضر از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با گام زمانی ۵ روزه و لندست ۷ و ۸ در طول دوره رشد گیاه برنج استفاده شد و تلاش گردید تا از تصاویر با کمترین پوشش ابر استفاده شود و در نتیجه برخی تصاویر دانلود شده در بازه زمانی مرحله رشد گیاه که دارای پوشش ابر بر روی مزارع تحقیقاتی بودند، حذف شدند. اطلاعات تصاویر دانلود شده برای شالیزارهای مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و لندست ۷ و ۸ برداشت شده برای منطقه مورد مطالعه

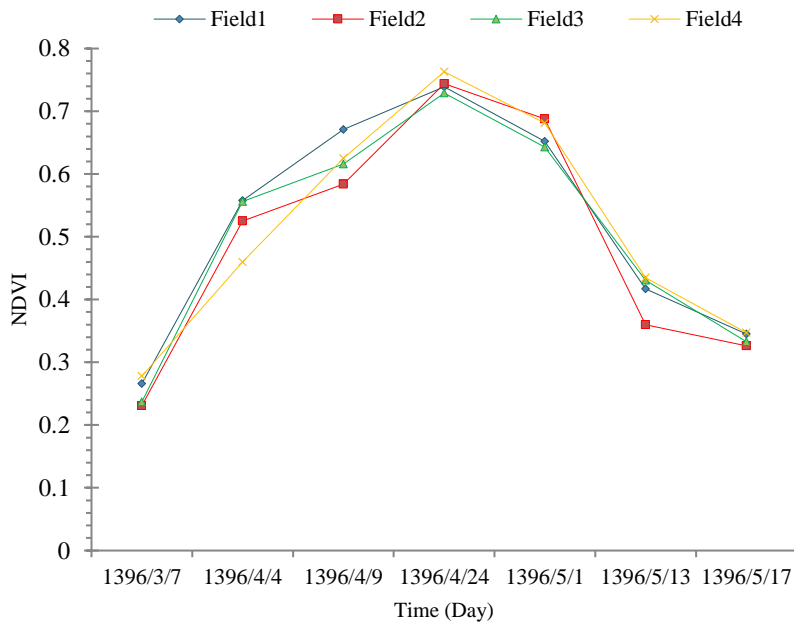
سنجنده	ماهواره	دوره رشد گیاهی	تاریخ اخذ تصویر (میلادی)	تاریخ اخذ تصویر (شمسی)
ETM+	Landsat7	رویشی	۲۸ می ۲۰۱۷	۷ خرداد ۱۳۹۶
MSI	Sentinel2A	زایشی	۲۵ جون ۲۰۱۷	۴ تیر ۱۳۹۶
MSI	Sentinel2B	زایشی	۳۰ جون ۲۰۱۷	۹ تیر ۱۳۹۶
MSI	Sentinel2A	زایشی	۱۵ جولای ۲۰۱۷	۲۴ تیر ۱۳۹۶
OLI	Landsat8	زایشی	۲۳ جولای ۲۰۱۷	۱ مرداد ۱۳۹۶
MSI	Sentinel2A	رسیدگی	۴ اگوست ۲۰۱۷	۱۳ مرداد ۱۳۹۶
OLI	Landsat8	رسیدگی	۸ اگوست ۲۰۱۷	۱۷ مرداد ۱۳۹۶

پیش پردازش و استخراج شاخص گیاهی NDVI از تصاویر سنتینل ۲ در محیط نرم‌افزار QGIS 2.18.27 و تصحیحات مربوط به تصاویر لندست ۷ و ۸ در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شدند. شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی (NDVI) طبق رابطه ۲ محاسبه و در شکل ۲ ارائه شده است.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

رابطه ۲)

که در آن، NIR و R به ترتیب بازتاب طیفی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز هستند.



شکل ۲. مقدار شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی (NDVI) در شالیزارهای مورد مطالعه طی دوره رشد

همچنین ضریب گیاهی محاسبه شده از شاخص NDVI تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از معادلات واسنجی شده (روابط ۳، ۴ و ۵) تحقیقات جعفری صیادی [۱۳۹۷] در طی دوره رشد گیاه محاسبه شد.

$$\text{رابطه ۳} \quad 0.9365 (\text{NDVI}) + 0.6963 = \text{ضریب گیاهی دوره رویشی}$$

$$\text{رابطه ۴} \quad 0.8766 (\text{NDVI}) + 0.6615 = \text{ضریب گیاهی دوره زایشی}$$

$$\text{رابطه ۵} \quad 1.9665 (\text{NDVI}) + 0.3788 = \text{ضریب گیاهی دوره رسیدگی}$$

به منظور واسنجی مدل SWAP، از مدل غیرخطی تخمین پارامتر PEST استفاده شد. همچنین با درج ضریب‌های گیاهی (Kc) به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای در مدل SWAP، شبیه‌سازی مجدد انجام شد و سپس مشاهدات صحرایی پارامتر تبخیر-تعرق و ضریب‌های گیاهی به دست آمده با مدل SWAP (با و بدون بروزرسانی با داده‌های ماهواره‌ای) مقایسه شدند. در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی دقت، اعتبار و کارایی مدل از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده یا درصد خطا (nRMSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل (EF) و ضریب مقدار باقی‌مانده (CRM) استفاده شد. ضریب تبیین روند برآوردها، ریشه میانگین مربعات خطا تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده وضعیت مدل‌سازی را بیان می‌کند. هرچه مقدار RMSE به صفر و مقدار R^2 و EF به یک نزدیک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی بهتری داشته است. مقدار nRMSE کمتر از ۱۰٪ وضعیت ایده‌آل، مقادیر ۱۰ تا ۲۰٪ و ۲۰ تا ۳۰٪ به ترتیب وضعیت مناسب و متوسط مدل در برآورد و مقدار بیش از ۳۰٪ عدم اطمینان به مدل را نشان می‌دهد (باریده و همکاران، ۱۴۰۰). شاخص CRM، میل مدل به بیش برآوردی یا کم برآوردی را نشان می‌دهد. مقدار CRM منفی یعنی مدل مقادیر را بیشتر و CRM مثبت یعنی مدل مقادیر را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده پیش‌بینی کرده است. اگر مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مدل برابر باشند، $\text{RMSE}=0$ ، $\text{EF}=1$ ، $\text{R}^2=1$ و $\text{CRM}=0$ است. بیان ریاضی آماره‌های فوق به شرح روابط ۶ تا ۱۰ است (عبدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ عبدی و همکاران ۱۳۹۹).

$$\text{رابطه ۶} \quad R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$$

$$\text{رابطه ۷} \quad \text{RMSE} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5}$$

$$\text{رابطه ۸} \quad \text{nRMSE} = \frac{100 \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \right)}{\bar{O}}$$

$$\text{رابطه ۹} \quad \text{EF} = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - (\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2))}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

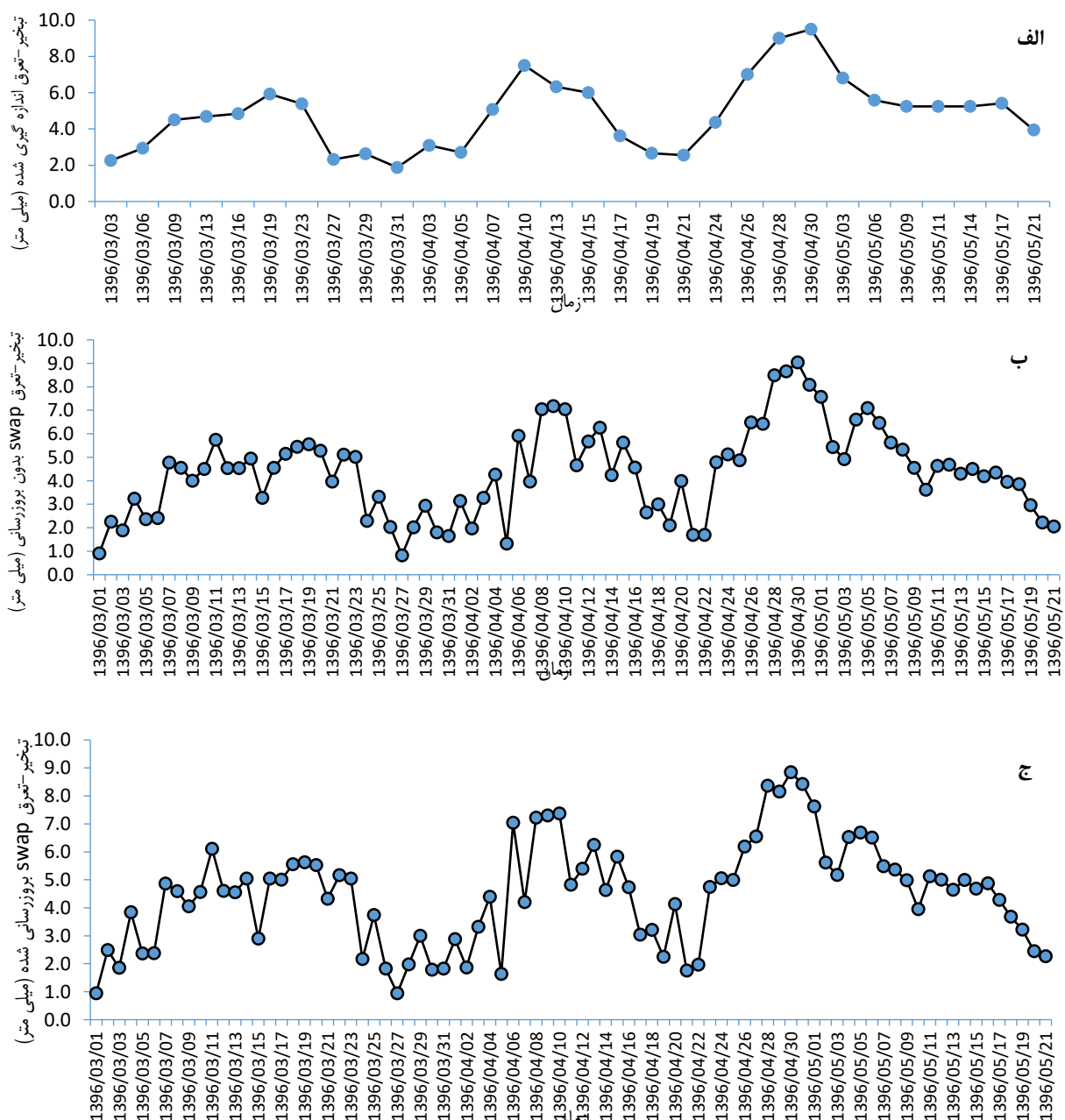
که در آنها O_i و P_i به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌ها و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

نتایج و بحث

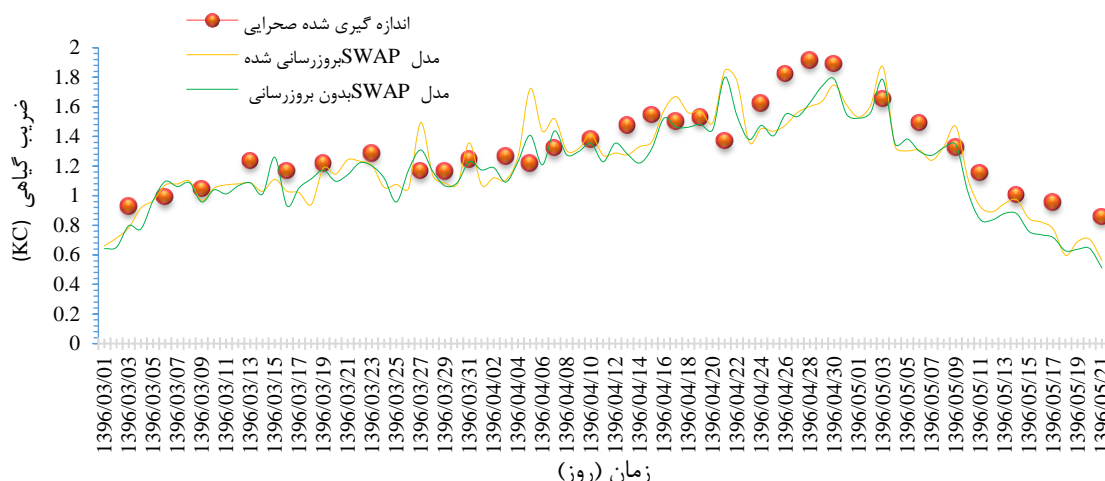
تغییرات میانگین تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی روزانه با روش‌های اندازه‌گیری صحرایی (لایسیمتر) و برآورد شده (شبیه‌سازی شده) با مدل SWAP (با و بدون بروزرسانی با داده‌های ماهواره‌ای) به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات مقادیر ضریب گیاهی به دست آمده از روش‌های ذکر شده طی فصل رشد یکسان بوده، به گونه‌ای که در ابتدای فصل رشد برنج، مقدار ضریب گیاهی کم بوده و در اواسط رشد زیادتر شده و سپس در پایان فصل رشد مجدد کاهش یافته است و به کمترین مقدار خود در دوره رشد گیاه رسیده است. مقادیر تبخیر-تعرق گیاه در طول دوره رشد افزایش یافته، به طوری که در مرحله توسعه به سرعت افزایش یافته و در مرحله زایشی به حداکثر میزان ممکن می‌رسد و پس از آن و با نزدیک شدن به زمان برداشت محصول رو به کاهش می‌رود. علت این تغییرات این است که در ابتدای فصل رشد چون گیاه هنوز رشد کاملی نداشته و متابولیسم گیاه و تعداد پنجه و ارتفاع آن کم است، میزان تبخیر-تعرق حاصل از آن کم بوده، لیکن در اواسط فصل رشد که گیاه به حداکثر رشد خود رسیده و تعداد پنجه‌ها و ارتفاع گیاه بیشتر شده، میزان تبخیر-تعرق حاصل از آن هم بیشتر شده است. عوامل دیگری مانند حداکثر درجه حرارت هوا و ورود به مرحله رشد زایشی نیز می‌تواند تاثیر زیادی بر افزایش تبخیر-تعرق در اواسط دوره رشد داشته باشد. در پایان فصل رشد، مجدداً میزان تبخیر-تعرق برنج کم شده و همانطور که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به زمان برداشت برنج، میزان تبخیر-تعرق کاهش یافته است. با توجه به شکل ۵، کمترین مقدار ضریب گیاهی اندازه‌گیری شده در دوره انتهایی رسیدگی (۰/۸۶) و بیشترین آن در دوره زایشی (۱/۹۱) اتفاق افتاده است. همچنین، کمترین مقدار تبخیر-تعرق گیاه برنج در لایسیمترهای اندازه‌گیری شده در ابتدای دوره زایشی به مقدار ۱/۸۸ میلی‌متر و بیشترین آن در انتهایی دوره زایشی به مقدار ۹/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد، که نشان دهنده تطابق نتایج با مطالعه (Pirmoradian et al., 2002) که بازه مقادیر تبخیر-تعرق آن از حدود ۱/۶ تا ۸/۴ بوده است نیز دارد. باید خاطر نشان کرد در زمان‌هایی که بارش باران اتفاق افتاده، از میزان تبخیر-تعرق به طور چشم‌گیری کاسته شده است، که این اتفاق در دو برهه زمانی در تاریخ‌های ۹۶/۳/۲۷ الی ۹۶/۴/۵ و ۹۶/۴/۱۶ الی ۹۶/۴/۲۲ محسوس‌تر بوده است و کمترین میزان تبخیر-تعرق روزانه در این دو برهه زمانی و نیز در زمان کاشت نشا (ابتدای دوره رویشی) در طول فصل رشد اتفاق افتاده است. در پژوهش حاضر، بیشترین مقدار تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی به دست آمده از روش‌های اندازه‌گیری صحرایی (لایسیمتر) و برآورد با مدل SWAP (با و بدون بروزرسانی با داده‌های ماهواره‌ای) در انتهایی دوره زایشی، زمانی که دمای هوا بالا بوده و گیاه دارای بیشترین نیاز آبی نسبت به سایر دوره‌ها بوده و کمترین مقدار تبخیر-تعرق در هر سه روش در دوره رویشی، زمانی که بارش باران صورت گرفت و دمای هوا و نیاز آبی گیاه کاهش یافت اتفاق افتاده است. طبق نتایج تحقیقات اکثر پژوهشگران در زمینه تعیین تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج، روند تغییرات ضریب گیاهی در رقم‌های مختلف تقریباً یکسان است که با مطالعه انجام شده تطابق دارد (Yang et al., 2006; Yoo et al., 2008; Ghamarniya et al., 2011).

میانگین و مجموع روزانه تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی در هر دوره رشد برنج طی فصل رشد گیاه به روش اندازه‌گیری مستقیم و برآورد با مدل SWAP (با و بدون بروزرسانی داده‌های ماهواره‌ای) در جدول ۵ آورده شده است. بیشترین مجموع تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده گیاه با لایسیمتر به ترتیب در دوره رشد زایشی، رسیدگی و رویشی اتفاق افتاده است. در روش برآورد با مدل SWAP (با و بدون بروزرسانی با تصاویر ماهواره‌ای) نیز بیشترین مقدار به ترتیب در دوره زایشی، رسیدگی و رویشی اتفاق افتاده است. میانگین ضریب‌های گیاهی در هر سه روش ذکر شده دارای روند یکسانی است و بیشترین مقدار میانگین آن به ترتیب در دوره‌های زایشی، رسیدگی و رویشی اتفاق افتاده است. شایان ذکر است که بیشترین مقدار تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی در دوره رشد گیاه در روش اندازه‌گیری صحرایی و کمترین آن در روش شبیه‌سازی مدل SWAP بدون بروزرسانی با تصاویر ماهواره‌ای اتفاق افتاده است. این موضوع نشان‌دهنده این است که مدل SWAP تبخیر-تعرق را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده اندکی کمتر برآورد می‌کند، که با نتایج مطالعه کیانی و همایی (۱۳۸۶) هم‌راستا است. Yoo et al. (2008) مطالعه‌ای تحت عنوان تخمین نیاز آبی گیاه برنج در منطقه سئول کره جنوبی انجام داده و متوسط تبخیر-تعرق فصلی گیاه برنج را در کل دوره رشد ۴۲۵ میلی‌متر گزارش کردند. Pirmoradian et al. (2002) مطالعه‌ای را در منطقه رشت برای تعیین ضریب گیاهی رقم هاشمی توسط لایسیمتر انجام دادند و ضریب گیاهی به دست آمده با استفاده از روش تبخیر مرجع تحت تبخیر در مرحله رشد رویشی ۱/۰۹، مرحله میانی ۱/۳۸ و در مرحله رسیدگی ۱/۲۱ به دست آوردند. میزان ضریب گیاهی برآورد شده با تبخیر مرجع تحت تبخیر،

از ضرایب پیشنهادی فائو و سایر روش‌های مورد بررسی در این مطالعه بیشتر بود. در مطالعه Kumari et al. (2022) نیز مقدار ضریب گیاهی مراحل مختلف رشد برنج بیشتر از ضرایب پیشنهادی فائو به دست آمد. با توجه به مقادیر ضرایب گیاهی اشاره شده در جدول ۴، بالاتر بودن ضرایب گیاهی این مطالعه نسبت به سایر مطالعه‌ها را می‌توان به استفاده از روش تشت تبخیر برای به دست آوردن تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) نسبت داد. این اختلاف را می‌توان به عوامل تاثیرگذاری مانند پارامترهای هواشناسی در سال زراعی، نوع خاک، زمان کاشت نشاء، خشک کردن زمین و برداشت محصول برنج نسبت داد. ضریب گیاهی هر گیاه باید بر اساس شرایط اقلیمی آن منطقه محاسبه شود، زیرا ضریب گیاهی وابسته به نوع و رقم گیاه، نوع خاک، شرایط اقلیمی و سایر عوامل آن منطقه است. با این وجود تفاوت در ضریب‌های گیاهی در مطالعات مختلف، ناشی از وجود عوامل تاثیرگذار بر این ضرایب نیز می‌باشند (پوریزدان‌خواه و همکاران، ۱۳۹۳). در پژوهش غلامی سفیدکوهی و همکاران (۱۳۹۹)، ضریب گیاهی بر پایه روش‌های محاسباتی تبخیر-تعرق مرجع طی دوره‌های ابتدایی، میانی و انتهایی رشد به ترتیب بین ۰/۸ تا ۱/۲، ۰/۹ تا ۱/۴ و ۰/۶۹ تا ۰/۹۹ برای رقم هاشمی و ۰/۷۳ تا ۱/۱۲، ۰/۷۶ تا ۱/۲ و ۰/۷۳ تا ۱/۱۵ برای رقم شیرودی بدست آمد



شکل ۳. مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل SWAP با و بدون برورسانی با داده‌های ماهواره‌ای در مزرعه برنج در منطقه رشت در سال زراعی ۱۳۹۶



شکل ۴. مقادیر ضریب گیاهی محاسبه شده و برآورد شده با مدل SWAP با و بدون برورسانی با داده‌های ماهواره‌ای در مزرعه برنج در منطقه رشت در سال زراعی ۱۳۹۶

جدول ۵. تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل SWAP (با و بدون برورسانی داده‌های ماهواره‌ای) در مراحل مختلف رشد برنج در منطقه رشت در سال زراعی ۱۳۹۶

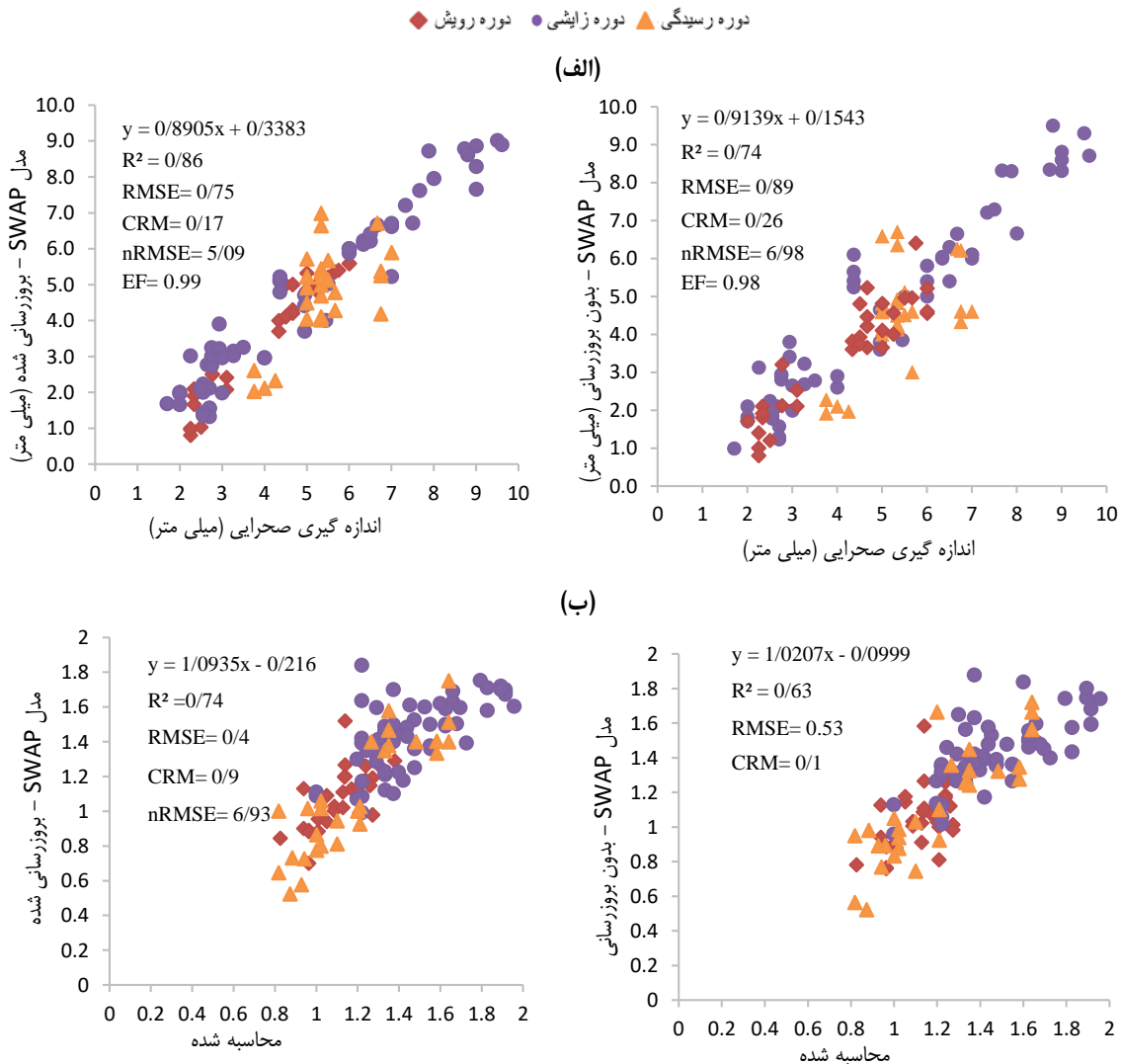
نوع روش	تبخیر-تعرق (میلی‌متر)							
	دوره رویشی	دوره زایشی	دوره رسیدگی	دوره کل	دوره رویشی	دوره زایشی	دوره رسیدگی	دوره کل
اندازه‌گیری صحرائی	۴/۱۰	۴/۹۳	۵/۳۶	۴/۸۱	۱/۱۳	۱/۴۹	۱/۲۱	۱/۳۳
	مجموع	۱۰۷/۲۰	۱۷۷/۴۸	۱۱۰/۷	۳۹۵/۳۸			
مدل SWAP (بدون به‌روزرسانی)	۳/۸۰	۴/۷۱	۴/۵۸	۴/۳۸	۱/۰۲	۱/۳۹	۱/۰۴	۱/۱۸
	مجموع	۹۱/۵۱	۱۶۹/۴۵	۱۰۲/۶۸	۳۶۳/۶۴			
مدل SWAP (به‌روزرسانی با داده‌های ماهواره‌ای)	۳/۸۹	۴/۸۰	۴/۷۷	۴/۵۰	۱/۰۵	۱/۴۳	۱/۰۷	۱/۲۲
	مجموع	۹۵/۴۶	۱۷۲/۶۸	۱۰۵/۰۷	۳۷۳/۲۱			

مقادیر ارزیابی متغیرهای آماری تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی طی دوره رشد گیاه برنج در جدول ۶ و برای کل فصل زراعی آن در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج مقایسه در تمام لایسیمترها نشان‌دهنده آن است که تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برآورد شده با مدل SWAP (با و بدون برورسانی با داده‌های ماهواره‌ای) نسبت به تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده، کمی کمتر برآورد شده است. مقایسه آماری مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با میزان EF (کارایی مدل) بالاتر از ۰/۹ و نوسان R^2 بین ۰/۴۶ تا ۰/۹، نشان از برآورد مناسب، همبستگی و کارایی مطلوب شبیه‌سازی مدل SWAP و برورسانی آن با فناوری سنجش از دور برای برآورد تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج دارد. با توجه به اینکه درصد خطای (nRMSE) کمتر از ۱۰ درصد نشان‌دهنده شبیه‌سازی بسیار خوب و بین ۱۰ الی ۲۰ درصد بیانگر کارکرد خوب توسط مدل می‌باشد، از مدل SWAP می‌توان به عنوان ابزاری مفید بدون صرف وقت و هزینه زیاد به منظور مدیریت بهینه منابع آب و برآورد مقدار آب مصرفی گیاه طی دوره رشد استفاده کرد که با نتایج تحقیقات (Abdi et al, 2022)، کیانی و همایی (۱۳۸۶)، دهقان و همکاران (۱۳۸۹)، Ma et al. (2011) و Amiri (2017) مطابقت دارد. بر اساس نتایج به‌دست آمده میانگین درصد خطای مدل در حالت بدون برورسانی بیشتر از حالت برآورد مدل با برورسانی تصاویر ماهواره‌ای است، که این موضوع نشان‌دهنده بهبود شبیه‌سازی در حالت برورسانی با تصاویر ماهواره‌ای است که با مطالعات عبدی و همکاران (۱۴۰۱)، یعقوب زاده و همکاران (۱۳۹۵)، Kamble & Irmak (2008)، Irmak & Kamble (2009)، Xu et al. (2014) و Yin et al. (2017) هم‌راستا است. این پژوهشگران طی تحقیقات خود نشان دادند که بهینه‌سازی مدل خاک-آب-اتمسفر-گیاه (SWAP) با برورسانی داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند تقاضای آبیاری را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کند و روند تغییرات تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی را در گیاه برنج به خوبی بهبود ببخشد.



جدول ۶. مقایسه متغیرهای آماری تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج اندازه‌گیری شده صحرایی با مدل SWAP (با و بدون برورسانی داده‌های ماهواره‌ای)

صفت	برآورد با مدل	دوره رشد گیاه	معادله	متغیرهای آماری			
				RMSE	nRMSE	CRM	EF
بدون SWAP برورسانی	تبخیر-	رویشی	$y = 1/1582x - 1/1441$	۰/۶۳	۵/۴۳	۰/۱۲	۰/۹۹
	تعرق	زایشی	$y = 0/9909x - 0/3652$	۰/۶۸	۳/۵۴	۰/۱۳	۰/۹۹
	ضریب گیاهی	رسیدگی	$y = 0/8987x - 0/3669$	۱/۱۷	۹/۹۹	۰/۲۷	۰/۹۹
		رویشی	$y = 0/8212x + 0/1388$	۰/۱۳	۵/۲۰	۰/۰۶	۰/۹۹
		زایشی	$y = 0/5693x + 0/5784$	۰/۴۹	۸/۳۵	۰/۱۴	۰/۹۵
		رسیدگی	$y = 1/379x - 0/6134$	۰/۴۶	۱۱/۱۹	۰/۱۰	۰/۹۲
مدل SWAP با برورسانی	تبخیر-	رویشی	$y = 1/1855x - 1/1755$	۰/۶۵	۴/۲۹	۰/۱۵	۰/۹۹
	تعرق	زایشی	$y = 0/9531x - 0/1043$	۰/۵۱	۴/۷۰	۰/۱۱	۰/۹۸
	ضریب گیاهی	رسیدگی	$y = 0/9693x - 0/4329$	۰/۸۹	۶/۵۲	۰/۱۹	۰/۹۷
		رویشی	$y = 0/8621x + 0/1269$	۰/۱۲	۳/۹۶	۰/۰۴	۰/۹۹
		زایشی	$y = 0/5676x + 0/6073$	۰/۲۹	۷/۰۳	۰/۱۱	۰/۹۸
		رسیدگی	$y = 1/3978x - 0/5635$	۰/۴۰	۷/۳۲	۰/۰۷	۰/۹۶



با و بدون SWAP شکل ۵. ارزیابی تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده (الف) و ضریب گیاهی محاسبه شده (ب) با مقادیر برآورد شده با مدل برورسانی با داده‌های ماهواره‌ای

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر مقادیر ضریب گیاهی در دوره رشد به روش اندازه گیری مستقیم (لایسیمتر) و برآورد شده با مدل SWAP (با و بدون برورسانی داده های ماهواره ای) محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. مقدار ضریب گیاهی در روش های اندازه گیری مستقیم و برآورد با مدل SWAP (با و بدون برورسانی داده های ماهواره ای)، در دوره ابتدایی کم و در دوره میانی افزایش یافت، لیکن مقدار این ضریب در دوره پایانی به کمترین مقدار خود در دوره رشد رسید. مقایسه متغیرهای آماری ضریب گیاهی و تبخیر-تعرق برنج بیانگر آن است که مدل SWAP در برآورد ضریب گیاهی ($R^2=0/63$, $EF=0/96$, $RMSE=0/53$) و تبخیر-تعرق ($R^2=0/74$, $EF=0/98$, $RMSE=0/89$) بسیار موفق عمل کرده است، لیکن با اندک اختلافی مدل SWAP با برورسانی داده های ماهواره ای در برآورد ضریب گیاهی ($R^2=0/74$, $EF=0/99$)، و تبخیر-تعرق ($R^2=0/86$, $EF=0/99$, $RMSE=0/75$) نسبت به برآورد آن بدون برورسانی بهتر عمل کرده است. در واقع تلفیق فناوری سنجش از دور با مدل SWAP، سبب بهبود شبیه سازی مدل SWAP شد و چنانچه پارامترهای ورودی مدل به نحو مطلوبی اندازه گیری شوند، نتایج حاصل از عملیات شبیه سازی، گویای اطلاعات کاربردی مطلوبی از مزرعه است. همچنین پس از واسنجی مدل در یک منطقه، پیش بینی عوامل مشاهده شده در مزارع مشابه نیز قابل استفاده است. در شرایط حاضر که معضل بحران خشک سالی وجود دارد، بهره برداری بهینه از واحد حجم آب با هدف تدوین الگوی مدیریت کارآمد آبیاری گیاهان و شناسایی ارتباط بین پارامترهای هیدرولوژیکی، ضروری به نظر می رسد. با توجه به اینکه بارندگی در ماه های اردیبهشت تا مرداد که کشت برنج انجام می شود، بسیار کم و به مقدار ناکافی رخ می افتد، برنامه ریزان کلان کشاورزی می توانند از نتایج تحقیق های تعیین ضریب گیاهی برنج در مدیریت، برنامه ریزی، تعیین الگوی مصرف آب و تخصیص میزان آب لازم برای مزارع مناطق مورد بررسی به گونه ای بهره ببرند که زمان اوج مصرف آب در گیاه و افزایش تعرق با زمان تنش و کمبود آبی منطبق نگردد و در نتیجه از کاهش عملکرد محصول جلوگیری شود.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- باریده، رحمان، بشارت، سینا و خداوردیلو، حبیب (۱۴۰۰). اشتقاق و ارزیابی توابع انتقالی ضرایب معادلات نفوذ آب به خاک در مناطق مختلف. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۴)، ۷۶۹-۷۷۹.
- پوریزدان خواه، هدیه، رضوی پور، تیمور، خالدیان، محمد رضا و رضایی، مجتبی (۱۳۹۳). تعیین ضریب گیاهی برنج رقم های بینام و خزر با استفاده از لایسیمتر و کرت های کنترل شده در منطقه رشت. نشریه بوم شناسی کشاورزی، ۶(۲)، ۲۳۸-۲۴۹.
- جعفری صیادی، فاطمه، غلامی سفیدکوهی، محمدعلی و ضیابار احمدی، میرخالق (۱۳۹۷). برآورد شاخص سطح برگ و ضریب گیاهی برنج با استفاده از داده های سنجنده OL. نشریه پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)، ۳۲(۳)، ۳۹۵-۴۰۴.
- دهقان، هادی، علیزاده، امین و حقایقی مقدم، سید ابوالقاسم (۱۳۸۹). تخمین اجزای بیلان آب در مقیاس مزرعه با استفاده از مدل شبیه سازی SWAP (مطالعه موردی: منطقه نیشابور). نشریه آب و خاک، ۲۴(۶)، ۱۲۶۵-۱۲۷۵.
- رستمی، امین و رائینی سرجاز، محمود (۱۳۹۵). دورسنجی تبخیر-تعرق واقعی و ضریب گیاهی سیب با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و مدل سبال (مطالعه موردی: دشت اهر، ایران). نشریه هواشناسی کشاورزی، ۴(۱)، ۳۲-۴۳.
- فرسنادیا، فرهاد، زحمتی، سعیده، قهرمان، بیژن و مقدم نیا علیرضا (۱۳۹۴). ارایه تکنیک پیش بینی غیر نظارت شونده در برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۱(۳)، ۳۱-۴۲.
- عبدی، آدینه، اسدی کپورچال، ص.، وظیفه دوست، مجید و رضایی، مجتبی (۱۳۹۹). بررسی اثر بروز رسانی ماده خشک حاصل از مشاهدات زمینی و ماهواره ای بر دقت شبیه سازی عملکرد برنج رقم هاشمی با استفاده از مدل SWAP. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۷(۲)، ۱۰۲-۱۱۸.
- عبدی، آدینه، اسدی کپورچال، ص.، وظیفه دوست، مجید، رضایی، مجتبی و اگدرنژاد، اصلان (۱۴۰۰). کارایی مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره ای و مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد برنج رقم هاشمی در استان گیلان. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۸(۱)، ۸۹-۱۰۲.
- غلامی سفیدکوهی، محمد علی، باقری خلیلی، زهرا و قلعه نوی، امین (۱۳۹۹). بررسی تبخیر-تعرق واقعی و ضرایب گیاهی برنج رقم هاشمی و شبرودی در شهرستان ساری. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۴(۴)، ۵۰۵-۵۱۶.
- کیانی، علیرضا، و همایی. مهدی (۱۳۸۶). ارزیابی مدل SWAP در شبیه سازی انتقال آب و املاح در نیمرخ خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۸(۱)، ۱۳-۳۰.



مجنونی هریس، ابوالفضل، ناظمی، امیرحسین، صدرالدینی، علی اشرف، نیشابوری، محمدرضا و شکیبیا، محمدرضا (۱۳۹۴). تعیین تبخیر-تعرق، ضریب گیاهی و مراحل رشد کلزا با استفاده از داده‌های لایسیمیتری. نشریه دانش آب و خاک، ۲۵(۱)، ۱۵۳-۱۶۳.

مدبری، هادی، میرلطیفی، مجید و غلامی، محمدعلی (۱۳۹۳). تعیین تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی ارقام هاشمی و خزر برنج در دشت مرداب (گیلان). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۸(۶۷)، ۹۵-۱۰۶.

وزارت جهاد کشاورزی (۱۴۰۰). آمارنامه کشاورزی. تهران: وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، دفتر آمار و فناوری اطلاعات.

یعقوب زاده، مصطفی، برومندنسب، سعید، ایزدپناه، زهرا و سید کابلی، حسام (۱۳۹۵). تخمین تبخیر و تعرق واقعی بوسیله مدل اگروهیدرولوژیکی و تکنیک سنجش از دور. آب و خاک، ۳۰(۴)، ۹۹۷-۲۰۰۸.

REFERENCES

- Abdi, A., Asadi Kapourchal, S., Vazifedoust, M. & Rezaei, M. (2022). A novel satellite-based methodology for retrieving specific leaf area of rice (Hashemi cultivar) at field scale. *Environmental Engineering and Management Journal*, 21(12), 2093-2102.
- Abdi, A., Asadi Kapourchal, S., Vazifedoust, M. & Rezaei, M. (2021). Investigation the Effect of Observed and Estimated Dry Matter from Satellite Imagery on the Accuracy of Hashemi Rice Yield Simulation Using SWAP Model. *Water Management in Agriculture*, 7(2), 103-118. (In Persian)
- Abdi, A., Asadi Kapourchal, S., Vazifedoust, M., Rezaei, M. & Egdernejad, A. (2021). Capability of Updated SWAP Model with Satellite Images and AquaCrop Model in Simulating the Hashemi Rice Yield in Guilan Province. *Water Management in Agriculture*, 8(1), 89-102. (In Persian)
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D & Martin, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, 300 pp.
- Amiri, E. (2017). Evaluation of water schemes for maize under arid area in Iran using the SWAP Model. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(16), 1963-1976.
- Barideh, R., Besharat, S. & Khodaverdiloo, H. (2021). Derivation and Validation of Parametric Pedotransfer Functions of Soil Water Infiltration in Different Regions. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 15(4), 769-779. (In Persian).
- Barlow, K., Christy, B., O'leary, G., Riffkin, P. & Nuttall, J. (2015). Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: A review. *Field Crops Research*, 171: 109-119.
- Blanka, V., Ladányi, Z., Szilassi, P., Sipos, G., Rácz, A., & Szatmári, J. (2017). Public perception on hydro-climatic extremes and water management related to environmental exposure, SE Hungary. *Water Resources Management*, 31(5), 1619-1634.
- Choudhury, B.U. & Singh, A.K. (2016). Estimation of crop coefficient of irrigatedtransplanted puddled rice by field scale water balance in the semi-aridIndo-gangetic Plains, India. *Agricultural Water Management*, 176, 142-150.
- Dehghan, H., Alizadeh, A. & Haghayeghi, S.A. (2011). Water Balance Components Estimating in Farm Scale Using Simulation Model SWAP (Case Study: Neyshabur Region). *Journal of Water and Soil*, 24(6), 1265-1275. (In Persian)
- Dong, Q., Zhan, C., Wang, H., Wang, F. & Zhu, M. (2016). A review on evapotranspiration data assimilation based on hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 26(2), 230-242.
- Doorenbos, J & Pruitt, W.O. (1977). Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24. Rome, Italy. 144 p.
- FAO, (2018). FAOSTAT Database Collections. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food outlook biannual report on global food markets, Rome. Nov. 2018. URL: <http://www.fao.org/faostat>.
- Farsadnia, F., Zahmati, S., Ghahremani, B. & Moghaddam Nia, A. (2016). Using Unsupervised Estimator Technique to Predict Reference Crop Evapotranspiration. *Iran-Water Resources Research*, 11(3), 31-42. (In Persian)
- Frantar, P., Dolinar, M. & Kurnik, B. (2006). GIS based water balance of Slovenia, environmental agency of the republic of Slovenia. Geophysical Research Abstracts, pp 8-13.
- Gee, G.W. & Bauder, J.W. (1986). Particle size analysis. In: Klute A (Ed.), Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods, Agron, 2nd (ed.), Madison, WI, pp 404-408.
- Ghamarniya, H., Jafarizadeh, M., Miri, E. & Gobadi, M. (2011). Coriandrum sativum L. crop coefficient determination in a semi-arid climate, *Journal of Water and Irrigation Management*, 25(2): 73-83.
- Gholami Sefidkouhi, M.A., Bagheri khalili, Z. & ghalenovi, A. (2021). Investigation of Rice Actual Evapotranspiration and Crop Coefficients for Shiroudi and Hashemi Cultivars in Sari. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sci.)*, 34(4), 505-516. (In Persian).
- Grossman, R. and Reinsch, B.T.G. (2002). Bulk Density. In: J.H. Dane and G.C. Topp, Methods of soil

- analysis. Physical methods, Soil science society of America, Inc, Madison, Wisconsin, USA, Part 4.
- Güçlü, Y. S., Subyani, A. M. & Şen, Z. (2017). Regional fuzzy chain model for evapotranspiration estimation. *Journal of hydrology*, 544, 233-241.
- Han, C., Zhang, B., Chen, H., Wei, Z. & Liu, Y. (2019). Spatially distributed crop model based on remote sensing. *Agricultural Water Management*, 218, 165-173.
- Irmak, A. & Kamble, B. (2009). Evapotranspiration data assimilation with genetic algorithms and SWAP model for on-demand irrigation. *Irrigation science*, 28(1), 101-112.
- Irmak, S., Haman, D.Z., & Jones, J.W. (2002). Valuation of Class Pans Coefficients for Estimating Reference Evapotranspiration in Humid Location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(3), 153-159.
- Jafari Sayadi, F., Gholami Sefidhouhi, M.A. & Ziatabar Ahmadi M. (2018). Leaf area index and crop coefficient estimation from operational land imager (OLI) sensor data. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture (Formerly soil and Water Sciences)*, 32(3), 395-404. (In Persian)
- Jin, X., Kumar, L., Li, Z., Feng, H., Xu, X., Yang, G., & Wang, J. (2018). A review of data assimilation of remote sensing and crop models. *European Journal of Agronomy*, 92, 141-152.
- Kamble, B & Irmak, A. (2008). Assimilating remote sensing-based ET into SWAP model for improved estimation of hydrological predictions. IGARSS 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 3: 1036-1039.
- Kroes, J. G., & Van Dam, J. C. (2003). Reference manual SWAP version 3.03, Alterra Green World Research, Alterra Report 773, Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. & Jacobs, C.M.J. (2008). SWAP version 3.2. Theory description and user manual, Alterra, Wageningen university.
- Kumari, A., Upadhyaya, A., Jeet, P., Al-Ansari, N., Rajput, J., Sundaram, P.K., Saurabh, K., Prakash, V., Singh, A. K., Raman, R. K., Gaddikeri, V. & Kuriqi, A. (2022). Estimation of actual evapotranspiration and crop coefficient of transplanted puddled rice using a modified non-weighting paddy lysimeter. *Agronomy*, 12, 1-20.
- Kunnath-Poovakka, A., Ryu, D., Renzullo, L. J., & George, B. (2016). The efficacy of calibrating hydrologic model using remotely sensed evapotranspiration and soil moisture for streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 535, 509-524.
- Li, Z. L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G & Zhang, X. (2009). A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9(5), 3801-3853.
- Liang, S. & Qin, J. (2008). Data assimilation methods for land surface variable estimation. *Advances in Land Remote Sensing*, 313-339.
- Losgedaragh, S. Z. & Rahimzadegan, M. (2018). Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). *Journal of hydrology*, 561, 523-531.
- Lv, Y., Xu, J., Yang, S., Liu, X., Zhang, J. & Wang, Y. (2018). Inter-seasonal and cross-treatment variability in single-crop coefficients for rice evapotranspiration estimation and their validation under drying-wetting cycle conditions. *Agricultural Water Management*, 196, 154-161.
- Ma, Y., Feng, S., Huo, Z. & Song, X. (2011). Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54 (3-4):1044-52.
- Majnooni Heris, A., Nazemi, A.H., Sadraddini, A.A., Neyshapouri, M.R. & Shakiba, M.R. (2015). Determination of evapotranspiration, crop coefficient and growth stages of Canola by lysimetric data. *Water and Soil Science*, 25(1), 153-163. (In Persian)
- Marin, F., Jones, J.W. & Boote, K.J. (2017). A stochastic method for crop models: including uncertainty in a sugarcane model. *Agronomy Journal*, 109(2): 483-495.
- Ministry of Jihad in Agriculture (2021). Agricultural statistics. Tehran: Ministry of Jihad in Agriculture. Planning and Economical Division. Bureau for Statistics and Information Technology. (In Persian)
- Modabberi, H., Mirlatifi, M. & Gholami M.A. (2014). Determination of evapotranspiration and crop coefficient of two rice cultivars in Mordab Plain (Guilan Province). *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 18 (67), 95-106. (In Persian)
- Page, A. L., Miller, R. H. & Keeney, D. R. (Ed., 1982): Methods of soil analysis; 2. Chemical and microbiological properties, 2. Aufl. 1184 S., American Soc. of Agronomy (Publ.), Madison, Wisconsin, USA.
- Pirmoradian, N., Kamgar-Haghighi, A.A. & Sepaskhah, A.R. (2002). Crop coefficient and water requirement of rice in Kooshkak region, Fars province. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources* 6 (3): 15-23. (In Persian)



- Pouryazdankhah, H., Razavipour, T., Khaledian, M.R. & Rezaei, M. (2014). Determining crop coefficient of Binam and Khazar cultivars of rice by lysimeter and controlled basins in Rasht region. *Journal of Agroecology*, 6(2), 238-249. (In Persian)
- Rahimikhoob, A. (2016). Comparison of M5 model tree and artificial neural network's methodologies in modelling daily reference evapotranspiration from NOAA satellite images. *Water Resources Management*, 30, 3063-3075.
- Ramezani Khojeen, A., Kheirkhah Zarkesh, M. M., Daneshkar Arasteh, P., Moridi, A. & Ali Mohammadi R. (2016). Sensitivity analysis of calculated evapotranspiration using daily energy balance model and comparing it with SEBAL model. *Iran-Water Resources Research* 12(1), 18-28. (In Persian)
- Rostami, A. & Raeini-Sarjaz, M. (2016). Remotely sensed measurements of apple orchard actual evapotranspiration and plant coefficient using MODIS images and SEBAL algorithm (Case study: Ahar plain, Iran). *Journal of Agricultural Meteorology*, 4(1), 32-43. (In Persian)
- Razavipour, T & M.R. Yazdani. (1999). Coefficient and Coefficient of Rice Basin Region of Gilan (Rasht), Sixth Congress of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Agriculture, pp 621-692.
- Singh U.K., Ren L., & Kang S. (2010). Simulation of soil water in space and time using an agrohydrological model and remote sensing techniques, *Agricultural Water Management*, 97 (8), 1210-1220.
- Tang, H. & Li, Z. L. (2014). Estimation and validation of evapotranspiration from thermal infrared remote sensing data. In: *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared*. Berlin and Heidelberg: Springer, 145-201.
- Tomar, V.S. & O'Toole, J.C. (1980). Water use in lowland rice cultivation in asia: a review of evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 3: 83-106.
- Tyagi, N.K., Sharma, D.K. & Iuthra, S.K. (2000). Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. *Agricultural Water Management*, 45: 41-54.
- van Lier, Q. J., Wendroth, O., & van Dam, J. C. (2015). Prediction of winter wheat yield with the SWAP model using pedotransfer functions: An evaluation of sensitivity, parameterization and prediction accuracy. *Agricultural Water Management*, 154, 29-42.
- Vazifedoust M., Van Dam J.C., Feddes R.A., & Feizi M. (2008). Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management*, 95: 89-102.
- Vazifedoust, M., Van Dam, J.C., Bastiaanssen, W.G.M and Feddes, R.A. (2009). Assimilation of satellite data into agrohydrological models to improve crop yield forecasts. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2523-2545.
- Vu, S. H., Watanabe, H., & Takagi, K. (2005). Application of FAO-56 for evaluating evapotranspiration in simulation of pollutant runoff from paddy rice field in Japan. *Agricultural Water Management*, 76(3), 195-210.
- Walkley, A & Black, J.A. (1934). An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Xu, X., Li, J. & Tolson, B.A. (2014). Progress in integrating remote sensing data and hydrologic modeling. *Progress in Physical Geography*, 38(4), 464-498.
- Yaghoobzadeh, M., Boroomand Nasab, S., Izadpanah, Z. & Seyyed Kaboli, H. (2016). Estimation of Actual Evapotranspiration Using an Agro-Hydrological Model and Remote Sensing Techniques. *Journal of Water and Soil*, 30(4), 997-1008. (In Persian)
- Yang, X., Bouman, B.A.M., Zhang, Q., Xue, C., Zhang, T., Xu, J. & Wang, H. (2006). Crop Coefficient of Aerobic Rice in North China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 22(2): 37-41.
- Yin, J., Zhan, C., Wang, H. & Wang, F. (2017). Integration of remote sensing evapotranspiration (ET) model and hydrologic model for mapping daily ET time series at river basin scale. *Hydrology Research*, 48(2), 311-325.
- Yoo, S.H., Choi, J.H. & Jang, M.W. (2008). Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea. *Agricultural Water Management*, 95: 845-853.
- Zheng, J., Fan, J., Zhang, F., Yan, S., Guo, J., Chen, D. & Li, Z. (2018). Mulching mode and planting density affect canopy interception loss of rainfall and water use efficiency of dryland maize on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 5, 794-808.
- Zhou, Y., Zhang, Y., Vaze, J., Lane, P. & Xu, S. (2013). Improving runoff estimates using remote sensing vegetation data for bushfire impacted catchments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182-183, 332-341.

Evaluation of the performance of SWAP model updated with satellite data in estimating rice evapotranspiration and its crop coefficients

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Determining evapotranspiration during the growing season is very important for estimating water consumption and crop production. Both the remote sensing and crop growth simulation models provide a variety of field data including actual evapotranspiration (ETa) and crop biomass production. The water requirement of rice has direct relationship with the quantity of ETa which is depends on the weather conditions, soil texture, crop growth period and farm management. Considering the variability of rice evapotranspiration in different climatic conditions and the importance of rice cultivation in Guilan province, this study was conducted to determine the crop coefficient of rice (modified Hashemi variety) during the different growth stages, to measure ETa by direct method (lysimeter), to simulate ETa with and without updating the SWAP model with satellite data, and to analyze the accuracy of outcomes.

Material and Methods

This research was conducted in a paddy field located at the Rice Research Institute of Iran in Rasht in 2017. The field is located at 37°12 N, 49°38 E, with an altitude of 24 m below the sea level. The rice variety used in this study was the modified Hashemi with growth period of 83 days. In order to directly determine the rice evapotranspiration, mini lysimeters with 75 cm diameter and 40 cm height were used. The experimental lysimeters were installed in the center of the farms with 20 m distance from each other and then filled with paddy soil. A number of 7 groups of rice seedlings were planted in each lysimeter based on the dimensions and spacing of the seedlings in the field. The required input data for SWAP model including soil data, irrigation, plant parameters and meteorological data was set from related sources. In the next step, Sentinel2 satellite images with a time step of 5 days and Landsat 7 and 8 were used to calculate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) during the rice growth period. Then, the crop coefficients were derived using the calibrated NDVI-based equations recommended for rice crop coefficients in the similar climate. In order to evaluate the accuracy and efficiency of the results with and without updating, statistical indices including coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (nRMSE), model efficiency (EF) and residual mass coefficient (CRM) were used.

Results and Discussion

Based on the obtained results, total ETa measured by the lysimeter and simulated by SWAP model with and without updating were 395.4, 373.2 and 363.6 mm, respectively. The average crop coefficients during the growth stages of vegetative, reproductive and ripening were estimated as 1.13, 1.49, 1.21, respectively. The crop coefficients for the proposed stages estimated by SWAP model without using satellite data were 1.02, 1.39, 1.04, respectively. After updating with satellite data, the crop coefficients were modified as 1.05, 1.43 and 1.07, respectively. Finally, the statistical analysis indicated that the SWAP model has a reasonable performance in estimation of ETa (RMSE=0.89; EF=0.98; R^2 =0.74) and rice crop coefficients (RMSE=0.53; EF=0.96; R^2 =0.63). The results indicate that the SWAP model combined with satellite data improved the accuracy of ETa estimation (RMSE=0.75; EF=0.99; R^2 =0.86) and rice crop coefficient (RMSE=0.40; EF=0.99; R^2 =0.74) at field scale.

Conclusion

The integration of remote sensing with SWAP model has improved the accuracy of simulation. In the current situation with upcoming water crisis, it is necessary to improve the water efficiency in consumption of limited water resources. Since the rainfall in the rice growing season is not sufficient to meet the rice water requirements, the irrigation authorities can use the results of this research to calculate the irrigation water requirements with higher accuracy and allocate the limited water resources with more efficiently.

Keywords: Crop Coefficient, Remote Sensing, Rice, Simulation, SWAP.