Publisher: Agricultural Research, Education and Extension Organization

Journal of Water Research in Agriculture

https://wra.areeo.ac.ir/

Evaluation of Remote Sensing Models for Estimating Actual Evapotranspiration of Agricaltural Lands in the Urmia Lake Basin

M. Soltani, S. M. Mirlatifi *, and A. Mokhtaran

MSc Student, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. **soltani.maryam@modares.ac.ir**

Associate Prof., Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. **mirlat_m@modares.ac.ir**

Assistant Prof.; Agricultural Engineering Research Institute (AERI); Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Karaj; Iran. **alimokhtaran@gmail.com**

Article Info

Research Article

Received: June 16, 2026
Accepted: November 06, 2026

Keywords: Actual water consumption, water saving, actual water productivity, SEBAL, WaPOR

Corresponding author's email: mirlat_m@modares.ac.ir

Abstract

This study aimed to evaluate the performance of the SEBAL and WaPOR algorithms in estimating ET_a and WP_{ET} in agricultural lands of the Urmia Lake Basin and to compare their results with field measurements. In this study, 26 selected agricultural fields and orchards, including wheat, potato, alfalfa, sugar beet, sunflower, onion, squash, tomato, maize, apple, walnut, almond, grape, and plum, located in East Azerbaijan and West Azerbaijan provinces, were monitored during the 2022–2024 growing seasons. Field data, including irrigation water volume, soil moisture, crop yield, biomass, and other parameters required for calculating ET_a based on the water balance method, were collected. The outputs of both algorithms were then validated against field measurements using statistical indices, and their performance was evaluated for potential application at the basin scale. The statistical indices RMSE, R^2, MAE, EF, NRMSE, and MBE were used to evaluate the algorithms. The results showed that both algorithms underestimated ETa compared with field-measured ET_a. On average, SEBAL estimated ET_a 28.48% lower and WaPOR approximately 33.24% lower than the field-measured values. However, the WP_{ET} values obtained from SEBAL and WaPOR were 29.04% and 34.48% higher, respectively, than the corresponding field-measured values. The RMSE for ET_a estimation using SEBAL was approximately 10.40% lower than that obtained using WaPOR, indicating the higher accuracy of SEBAL under the conditions of the study area. The RMSE for WP_{ET} estimation using SEBAL was approximately 21.72% lower than that of WaPOR. Furthermore, the coefficients of determination (R^2) for ET_a and WP_{ET} were 0.97 and 0.98, respectively, for SEBAL, and 0.94 and 0.981, respectively, for WaPOR, indicating the greater ability of SEBAL to represent variations in these indicators compared with WaPOR. Overall, the results showed that SEBAL provided higher accuracy and reliability than WaPOR for monitoring actual evapotranspiration and actual water productivity at the field and orchard scales. .

Cite this article: Soltani, M., Mirlatifi, S. M. and Mokhtaran, A., 2026. Evaluation of Remote Sensing Models for Estimating Actual Evapotranspiration of Agricaltural Lands in the Urmia Lake Basin. *Journal of Water Research in Agriculture*, 40(1), pp.73-95.

CC BY

DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2026.373133.1119

نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۴۰ / شماره ۱/ ۱۴۰۵. ص۷۳-۹۵

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه پژوهش آب در کشاورزی

https://wra.areeo.ac.ir

ارزیابی مدل‌های سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی اراضی کشاورزی در حوزه دریاچه ارومیه

مریم سلطانی، سیدمجید میرلطیفی* و علی مختاران

دانشجو کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی و مدیریت آب ، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. **soltani.maryam@modares.ac.ir**

دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس. **mirlat_m@modares.ac.ir**

استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ کرج؛ ایران. **alimokhtaran@gmail.com**

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۳/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۵/۸/۱۵

واژه‌های کلیدی: آب مصرفی واقعی، صرفه‌جویی آب، بهره‌وری واقعی آب، SEBAL، WaPOR

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:
mirlat_m@modares.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی الگوریتم‌های SEBAL و WaPOR در برآورد ET_a و WP_{ET} اراضی کشاورزی حوزه دریاچه ارومیه و مقایسه نتایج آن‌ها با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای انجام شد در این تحقیق، ۲۶ مزرعه و باغ منتخب شامل محصولات گندم، سیب‌زمینی، یونجه، چغندرقند، آفتابگردان، پیاز، کدوآجیلی، گوجه‌فرنگی، ذرت، سیب، گردو، بادام، انگور و آلو در استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی طی سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۳ مورد پایش قرار گرفت. داده‌های مزرعه‌ای شامل حجم آب آبیاری، رطوبت خاک، عملکرد محصول، زیست‌توده و سایر پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ET_a براساس روش بیلان آب گردآوری شد. سپس خروجی‌های هر دو الگوریتم با داده‌های مزرعه‌ای براساس شاخص‌های آماری، صحت‌سنجی شده و عملکرد الگوریتم‌ها با هدف استفاده وسیع در سطح حوزه مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی الگوریتم‌ها از شاخص‌های آماری RMSE، R^2، MAE، EF، NRMSE و MBE استفاده شد. بر اساس نتایج، هر دو الگوریتم مقادیر ET_a را کمتر از مقدار ET_a اندازه‌گیری شده در مزرعه برآورد کردند. به‌طور متوسط، الگوریتم SEBAL میزان ET_a را ۲۸/۴۸٪ و WaPOR حدود ۳۳/۲۴٪ کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده مزرعه‌ای برآورد کرد. با این حال، مقادیر WP_{ET} حاصل از الگوریتم SEBAL نسبت به مقادیر مزرعه‌ای ۲۹/۰۴٪ و مقادیر برآوردشده با WaPOR، ۳۴/۴۸ ٪ بیشتر از مقادیر مزرعه‌ای بودند. مقدار RMSE در برآورد ET_a در الگوریتم SEBAL حدود ۱۰/۴۰٪ کمتر از WaPOR بود که بیانگر دقت بالاتر SEBAL در شرایط منطقه مورد مطالعه است. مقدار RMSE در برآورد WP_{ET} در الگوریتم SEBAL حدود ۲۱/۷۲٪ کمتر از WaPOR بود. همچنین مقدار ضریب تبیین (R^2) برای هر دو شاخص ET_a و WP_{ET} به ترتیب در الگوریتم SEBAL برابر ۰/۹۷ و ۰/۹۸ و در الگوریتم WaPOR برابر ۰/۹۴ و ۰/۹۸۱ محاسبه شد که بیانگر توان بیشتر SEBAL در بازنمایی تغییرات این شاخص‌ها نسبت به WaPOR است. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم SEBAL در مقایسه با WaPOR از دقت و قابلیت اطمینان بیشتری برای پایش تبخیر-تعرق واقعی و بهره‌وری واقعی آب در مقیاس مزرعه و باغ برخوردار است.

استناد: سلطانی، مریم، میرلطیفی، سیدمجید، مختاران، علی، ۱۴۰۵. ارزیابی مدل‌های سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی اراضی کشاورزی در حوزه دریاچه ارومیه. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۴۰(۱)، صص.۷۳-۹۵

DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2026.373133.1119

مقدمه

در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و توسعه نامتوازن منابع آب، موجب بروز بحران‌های جدی در بخش کشاورزی و منابع طبیعی ایران شده است. در این میان، کاهش بارندگی، افزایش دمای هوا و تبخیر بالا از مهم‌ترین عوامل افت سطح آب دریاچه‌ها و منابع زیرزمینی کشور به شمار می‌روند (اسمیس و همکاران، ۲۰۱۹). حوضه آبریز دریاچه ارومیه، یکی از بحرانی‌ترین مناطق کشور از نظر تعادل آبی است که در سال‌های اخیر با کاهش شدید سطح آب، افت آبخوان‌ها و افزایش شوری خاک روبه‌رو بوده است. این در حالی است که بخش عمده‌ای از منابع آبی این حوزه به مصرف کشاورزی می‌رسد و شیوه‌های آبیاری سنتی و مدیریت غیربهینهٔ در مزرعه، نقش قابل‌توجهی در تشدید این بحران دارند (ناصری، ۱۳۹۶).

در چنین شرایطی، ارتقای بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) و کاهش برداشت از منابع آبی، به‌ویژه در اراضی کشاورزی، ضرورتی انکارناپذیر است. کاهش تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) منجر به کاهش واقعی در مصرف آب می‌شود (حیدری و همکاران، ۲۰۱۸). در مقابل، صرفه‌جویی ظاهری، تنها کاهش برداشت از منبع بدون کاهش در مصرف واقعی است که عملاً به بهبود وضعیت آبی منطقه کمک نمی‌کند. ازاین‌رو، برای دستیابی به صرفه‌جویی واقعی آب، باید به شاخص‌های مرتبط با بهره‌وری واقعی آب و تبخیر–تعرق واقعی توجه ویژه شود (حیدری، ۱۳۹۸).

تبخیر-تعرق واقعی گیاه (ET_a) به‌عنوان شاخص کلیدی برای برآورد نیاز آبی محصولات، ارزیابی عملکرد زراعی و سنجش کارایی روش‌های آبیاری به کار می‌رود (جونز و واگان، ۲۰۱۰). در این راستا، فناوری‌های سنجش-از دور (RS) ابزاری کارآمد برای پایش مکانی و زمانی تبخیر–تعرق، بررسی سلامت گیاه و ارزیابی وضعیت رطوبتی خاک محسوب می‌شوند (هانگ و همکاران، ۲۰۲۵). این روش‌ها، نسبت به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، امکان پوشش وسیع‌تری از اراضی را بادقت بالا فراهم کرده و درک بهتری از فرایندهای هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد (باستیان سن و همکاران، ۱۹۹۸).

باتوجه‌به وضعیت بحرانی حوزه دریاچه ارومیه، کاربرد مدل‌های سنجش‌ازدور نظیر SEBAL و WaPOR در برآورد تبخیر–تعرق واقعی و تحلیل بهره‌وری واقعی آب، اهمیت ویژه‌ای دارد. این مدل‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و پارامترهای سطح زمین، امکان تخمین دقیق تبخیر–تعرق و ارزیابی عملکرد مدیریت آبیاری را فراهم می‌کنند. ازسوی‌دیگر، صحت‌سنجی نتایج این مدل‌ها با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای موجب افزایش اطمینان در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی می‌شود (تورنر و همکاران، ۲۰۰۴). مدل‌های مبتنی بر تعادل انرژی سطحی طی دو دهه اخیر به‌عنوان ابزارهای اصلی برای پایش تبخیر-تعرق واقعی در اراضی کشاورزی معرفی‌شده و در این میان الگوریتم SEBAL یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌هاست که با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و ورودی‌های هواشناسی شارهای انرژی سطحی را محاسبه کرده و تبخیر-تعرق واقعی را برآورد می‌کند. نتایج گردآوری‌شده از چند پژوهش نشان داده که SEBAL در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در مقایسه با سایر مدل‌های مبتنی بر یک منبع انرژی، عملکرد دقیق‌تری دارد، هرچند در ارتفاعات و زمین‌های غیریکنواخت نظیر ارتفاعات، کوهستان‌ها، شیب‌های تند، ناهمواری‌های زیاد، پوشش گیاهی متنوع با محدودیت‌هایی مواجه است (کومار و هامودا، ۲۰۲۵). نسخه‌های بهبودیافته این الگوریتم نیز ارائه شده که نسبت به نسخه کلاسیک و محصولات جهانی مانند MOD16 دقت بالاتری دارد (لی و همکاران، ۲۰۲۳).

در یک بررسی موردی در ارومیه، استفاده از SEBAL همراه با تصاویر Landsat توانست میانگین مصرف آب گندم آبی را حدود ۴۵۶۶ مترمکعب در هکتار و بهره‌وری آب را ۰/۹۴ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد کند که نشان‌دهنده قابلیت بالای این الگوریتم در مقیاس مزرعه‌ای است (احمدی و همکاران، ۲۰۲۴)

مدل WaPOR که به‌وسیله FAO توسعه‌یافته، داده‌های تبخیر–تعرق و بهره‌وری آب را در مقیاس منطقه‌ای و جهانی ارائه می‌دهد و به دلیل دسترسی آزاد و پوشش وسیع مکانی، کاربرد گسترده‌ای در پایش مصرف آب کشاورزی یافته است. مقایسه‌ی WaPOR با الگوریتم METRIC در حوزه دریاچه ارومیه نشان داد که مقادیر تبخیر–تعرق واقعی برآورد شده با WaPOR در سطح پیکسل‌های ۲۵۰ متری با نتایج METRIC اختلافی کمتر از ۱۰ درصد داشت و برای پایش منطقه‌ای مصرف آب آبیاری قابل اتکا است (فائو، ۲۰۲۴). در پژوهش حاضر، ضمن استفاده ازWaPOR ، عملکرد آن در کنار SEBAL و در مقایسه با داده‌های مزرعه‌ای مزارع و باغات ارزیابی شده است. همچنین، علاوه بر تبخیر–تعرق واقعی(ET_a) ، بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) نیز بررسی شده و عملکرد دو روش با شاخص‌های آماری مختلف مقایسه گردیده است؛ بنابراین، ارزش افزوده پژوهش حاضر در اعتبارسنجی میدانی و مقایسه مستقیم SEBAL و WaPOR در شرایط واقعی مزارع و باغات است. همچنین در یک مطالعه دیگر، WaPOR مقدار تبخیر–تعرق واقعی گندم را در طول فصل رشد حدود ۵۳۷/۷ میلی‌متر گزارش کرد و نتایج حاصل از این محصول با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های PySEBALو AquaCrop مقایسه شد (تسفای و همکاران، ۲۰۲۵). در سطح قاره آفریقا نیز WaPORبرای پایش مصرف آب آبیاری و بهره‌وری محصولات استفاده شده و به‌عنوان ابزار سیاست‌گذاری کلان معرفی شده است (فائو، ۲۰۲۳).

با وجود این مزایا، هر دو رویکرد محدودیت‌های مشخصی دارد. SEBAL نیازمند داده‌های محلی دقیق و حساس به انتخاب پیکسل‌های مرجع است و در مناطق مرتفع و زمین‌های غیریکنواخت دقت آن کاهش می‌یابد، ضمن آنکه پوشش ابری و تداوم زمانی نیز چالش‌هایی برای آن ایجاد می‌کند. WaPOR نیز به دلیل وضوح مکانی متوسط و وابستگی به فرضیات عمومی برای مطالعات مزرعه‌ای محدودیت دارد و نیازمند اعتبارسنجی میدانی است.

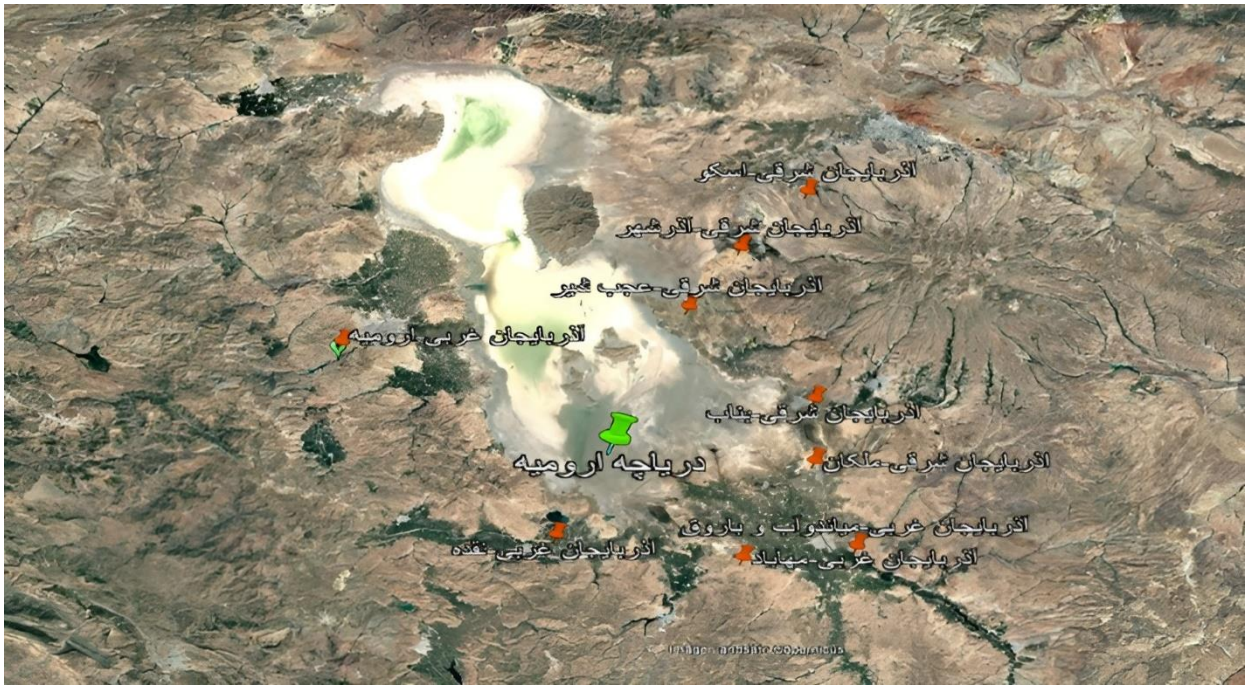
وجه متمایز این پژوهش، مقایسه مستقیم برآورد تبخیر–تعرق واقعی و بهره‌وری آب حاصل از دو رویکرد SEBAL و WaPOR با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در اراضی کشاورزی حوزه دریاچه ارومیه است. در این مطالعه، پردازش و استخراج داده‌های سنجش‌ازدور و اجرای الگوریتم SEBAL در محیط سامانه (GEE) Google Earth Engine انجام شد و امکان ارزیابی نتایج در مقیاس مزرعه و حوزه فراهم گردید. همچنین، اعتبارسنجی نتایج با استفاده از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و مقادیر مرجع حاصل از روشFAO-56 انجام شد تا عملکرد دو رویکرد در شرایط منطقه مورد مطالعه ارزیابی شود. در نهایت، چارچوب به‌کاررفته می‌تواند برای انتخاب رویکرد مناسب در پایش تبخیر–تعرق و بهره‌وری آب و نیز تولید سری‌های زمانی این متغیرها در شرایط حوزه دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در حوزه‌ی آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران قرار دارد که بخش‌هایی از دو استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی را دربر می‌گیرد. این حوزه دارای اقلیم نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه حدود ۳۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه بین ۱۰ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد است. مزارع/باغات مورد مطالعه در این پژوهش در شهرستان‌های مهاباد، میاندوآب، نقده و ارومیه از استان آذربایجان غربی و شهرستان‌های اسکو، آذرشهر، بناب، عجب شیر و ملکان از آذربایجان شرقی قرار دارد.

منابع اصلی تأمین آب مزارع/باغات این مناطق شامل آب‌های سطحی و عمدتاً زیرزمینی بوده که برداشت و مصرف آن‌ها بر زیست‌بوم دریاچه ارومیه اثربخش است. به‌منظور مقایسه‌ی داده‌ها، ۲۶ مزرعه/باغ به‌صورت هدفمند از میان محصولات غالب زیر حوزه دریاچه ارومیه انتخاب شد. مجموع مساحت مزارع/باغات ۸۵/۹۳ هکتار است.

انتخاب نمونه‌ها به‌گونه‌ای انجام شد که تنوع محصولات، پراکنش مکانی مناسب در سطح زیر حوزه و شرایط متفاوت مدیریتی و آبیاری را پوشش دهند؛ بنابراین هدف از انتخاب نمونه‌ها، ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در شرایط متنوع زراعی و باغی بوده است. محصولات زراعی مورد پایش شامل گندم، سیب‌زمینی، پیاز، کدو آجیلی، گوجه‌فرنگی، ذرت، کدو، چغندرقند، آفتابگردان و یونجه و محصولات باغی شامل سیب، گردو، انگور، آلو و بادام بود. موقعیت مکانی شهرستان‌های مورد مطالعه و مشخصات آن‌ها با در نظر گرفتن مساحت، نوع محصول، تاریخ کشت و روش آبیاری در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱-کاربری اراضی و دورنمای حوزه دریاچه ارومیه (JICA,2016)

Figure 1 – Land use and an overview of the Urmia Lake Basin (JICA, 2016)

جدول ۱- مشخصات مزارع/باغات مورد پایش در حوزه دریاچه ارومیه

Table 1 – Specifications of the monitored farms/orchards in the Urmia Lake Basin

کد Code	شهرستان/روستا Country/Village	محصول Crop	روش آبیاری Irrigation Method	مساحت (هکتار) Area(ha)	تاریخ کشت Planing Date	برداشت Harvest Date	مختصات جغرافیایی UTMx(m)	 UTMy(m)	روش سنجش از دور Remote Sensing Method
EAST1	اسکو/سرین دیزج Osku / Sarin Diza	گندم-پاییزه Autumn Wheat	کرت نواری Border Strip Irrigation	6.87	1401.08.15	1402.04.15	579518	4197114	SEBAL و WaPOR
EAST2	اسکو/اسکندان Osku / Eskandan	گردو-باغ Walnut (Orchard)	سطحی Surface Irrigation	0.3	1402.01.01	1402.07.01	607917	4190844	SEBAL
EAST3	آذرشهر/شیرامین Azarshahr / Shirin Amin	گندم-پاییزه Autumn Wheat	کرت نواری Border Strip Irrigation	6.51	1401.08.15	1402.04.15	574893	4167394	SEBAL و WaPOR
EAST4	بناب/چلقایی Bonab / Chelghayi	سیب زمینی-بهاره Spring Potato	کرت نواری Border Strip Irrigation	0.85	1401.02.25	1401.04.15	598610	4131745	SEBAL
EAST5	عجب شیر/دانالو Ajab Shir / Danalo	پیاز-بهاره Spring Onion	کرت نواری Border Strip Irrigation	0.8	1401.12.21	1402.05.15	577747	4149660	SEBAL
EAST6	عجب شیر/دانالو Ajab Shir / Danalo	کدوآجیلی-بهاره Spring Pumpkin Seed	قطره‌ای نواری Drip Tape Irrigation	1.15	1401.02.01	1402.06.26	577202	4149580	SEBAL
EAST7	عجب شیر/محمودآباد Ajab Shir / Mahmoudabad	بادام-باغ Almond (Orchard)	سطحی غرقابی Flood Irrigation	10.8	1402.01.01	1402.06.15	573738	4152299	SEBAL و WaPOR
EAST8	بناب/روشت بزرگ Bonab / Rosht-e Bozorg	گندم-پاییزه Autumn Wheat	کرت نواری Border Strip Irrigation	10.7	1401.08.16	1402.04.15	595110	4138090	SEBAL و WaPOR
EAST9	بناب/روشت بزرگ Bonab / Rosht-e Bozorg	انگور-باغ Grape (Orchard)	سطحی غرقابی Flood Irrigation	6.95	1402.02.01	1402.06.15	598709	4134633	SEBAL و WaPOR
EAST10	ملکان/یولقونلو Malekan / Yulghunlu	گندم-پاییزه Autumn Wheat	کرت نواری Border Strip Irrigation	1.19	1401.08.08	1402.04.10	590387	4113627	SEBAL
EAST11	ملکان/تازه قلعه Malekan / Tazeh Qaleh	انگور-باغ Grape (Orchard	سطحی Surface Irrigation	1.25	1402.02.01	1402.06.15	592483	4109987	SEBAL
EAST12	ملکان/ملاسراب Malekan / Mollasarab	گوجه فرنگی-بهاره Spring Tomato	قطره ای نواری Drip Tape Irrigation	0.62	1401.03.03	1401.05. 15	598547	4107863	SEBAL
EAST13	ملکان/تازه قلعه Malekan / Tazeh Qaleh	گوجه فرنگی-بهاره Spring Tomato	قطره ای نواری Drip Tape Irrigation	1.1	1401.03.01	1401.05.15	594478	4108825	SEBAL

ادامه جدول ۱- مشخصات مزارع/باغات مورد پایش در حوزه دریاچه ارومیه
Continuation of Table 1 – Characteristics of the Farms/Orchards Monitored in the Lake Urmia Basin

کد Code	شهرستان/روستا Country/Village	محصول Crop	روش آبیاری Irrigation Method	مساحت (هکتار) Area(ha)	تاریخ کشت Planting Dte	برداشت Harvest Date	مختصات جغرافیایی UTMx(m)	مختصات جغرافیایی UTMy(m)	روش سنجش از دور Remote Sensing Method
WEST1	میاندوآب/ملاکندی Miandoab / Mollakandi	ذرت- بهاره Spring Maize	قطره ای نواری Drip Tape Irrigation	1.61	1401.03.15	1401.06.15	594060	4086103	SEBAL
WEST2	میاندوآب/سوگلی تپه Miandoab / Sughli Tapeh	پیاز-بهاره Spring Onion	قطره ای نواری Drip Tape Irrigation	1	1402.12.20	1402.05.15	598375	4087561	SEBAL
WEST3	مهاباد/گزده رش Mahabad / Gazdeh Rash	یونجه-بهاره Spring Alfalfa	بارانی Sprinkler Irrigation	4.15	1401.01.01	1401.12.29	579854	4094065	SEBAL
WEST4	مهاباد/اگریقاش Mahabad / Agrighash	گندم-پاییزه Autumn Wheat	سطحی Surface Irrigation	11.6	1401.08.15	1402.04.15	569920	4079127	SEBAL و WaPOR
WEST5	مهاباد/اگریقاش Mahabad / Agrighash	سیب-باغ Apple (Orchard)	سطحی Surface Irrigation	2	1401.01.01	1402.07.01	569295	4077572	SEBAL
WEST6	مهاباد/کوسه کهریز Mahabad / Kuseh Kahriz	سیب-باغ Apple (Orchard)	قطره ای Drip Irrigation	7.66	1402.01.01	1402.07.01	561399	4087069	SEBAL و WaPOR
WEST7	نقده/دیزج Naqadeh / Dizaj	سیب-باغ Apple (Orchard)	سطحی Surface Irrigation	1.86	1401.01.01	1401.07.01	539110	4087170	SEBAL
WEST8	نقده/دیزج Naqadeh / Dizaj	چغندر-بهاره Spring Sugar Beet	بارانی Sprinkler Irrigation	2.48	1402.02.01	1401.07.01	538573	4088021	SEBAL
WEST9	نقده/قارنا Naqadeh / Qarna	کدو-بهاره Spring Pumpkin	بارانی Sprinkler Irrigation	1	1402.02.01	1402.06.26	528381	4087357	SEBAL
WEST10	ارومیه/باغستان Urmia / Baghestan	گوجه فرنگی-بهاره Spring Tomato	قطره ای نواری Drip Tape Irrigation	0.57	1402.02.01	1401.06.10	509077	4173427	SEBAL
WEST11	ارومیه/حصار حاجی لار Urmia / Hesar Haji Lar	انگور-باغ Grape (Orchard)	سطحی Surface Irrigation	0.81	1402.02.01	1402.06.15	522026	4154462	SEBAL
WEST12	ارومیه/ساری بیگلوی چراغ Urmia / Sari Biglu-ye Cheragh	آلو-باغ Plum (Orchard)	سطحی Surface Irrigation	1.1	1402.01.01	1402.07.01	510178	4176594	SEBAL
WEST13	ارومیه/باشلانبوشلو Urmia / Bashlan Bushlu	آفتابگردان-بهاره Spring Sunflower	سطحی Surface Irrigation	1	1402.02.20	1402.06.15	507212	4183625	SEBAL

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای همچون گام‌هایی دقیق در مسیر شناخت آب و زمین، با هدف برآورد میزان آب مصرفی واقعی و سنجش بهره‌وری آن در مزارع انجام گرفتند. در طول فصل رشد، داده‌هایی گردآوری شد که هر یک اطلاعاتی درباره رابطه گیاه با خاک و آب ترسیم می‌کرد. حجم آب ورودی به مزرعه، رطوبت خاک پیش از هر آبیاری، عمق نفوذ ریشه در هر نوبت آبیاری، راندمان کاربرد آب و در نهایت عملکرد و زیست‌توده محصول در هریک از مزارع اندازه‌گیری شد. این پارامترها به‌عنوان اجزای اصلی بیلان آب در ناحیه ریشه، برای تعیین تغییرات ذخیره رطوبت خاک و محاسبه تبخیر–تعرق واقعی (ET_a) مورد استفاده قرار گرفت.

اطلاعات پایه مزارع شامل بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، نقطه پژمردگی و ظرفیت زراعی نیز به‌دقت تعیین شد. داده‌های هواشناسی روزانه از ایستگاه‌های نزدیک به مزارع مورد مطالعه دریافت شد. بر پایه این داده‌ها، تبخیر–تعرق گیاه با روش پنمن–مانتیث فائو محاسبه و با اصلاح ضرایب گیاهی متناسب با شرایط منطقه، نیاز خالص آبیاری در بازه‌های ده‌روزه و ماهانه برآورد شد. ضرایب گیاهی اولیه از فائو ۵۶ (مرجع) استخراج شد و سپس براساس میزان رطوبت نسبی و سرعت باد منطقه، این ضرایب در ماه‌های مختلف رشد اصلاح شد.

در مزارع مجهز به سامانه آبیاری سطحی، از فلوم‌های WSC تیپ چهار برای اندازه‌گیری آب ورودی استفاده شد. همچنین در صورت وجود سامانه کم فشار یا تحت فشار، حجم آب آبیاری در طول فصل رشد از طریق کنتور حجمی قرائت شد.

معادله بیلان آب در محیط ریشه به صورت زیر است (هیل، ۱۹۹۰):

$$\Delta S+\Delta V=R+I+U-(ru+dp+ET) \qquad (۱)$$

که در آن:

ΔS تغییرات رطوبت در خاک، ΔV رطوبت تثبیت شده در بافت گیاهی، R بارش بر حسب سانتی‌متر، I عمق آبیاری برحسب سانتی‌متر، U میزان رطوبتی که از طریق صعود شعریه به محیط ریشه باز می‌گردد برحسب سانتی‌متر، ru رواناب سطحی برحسب سانتی‌متر، dp نفوذ عمقی برحسب سانتی‌متر و ET تبخیر–تعرق واقعی پوشش سطحی برحسب سانتی‌متر است.

راندمان کاربرد آب با توجه به نوع سامانه آبیاری (سطحی، بارانی و قطره‌ای) براساس روش‌های استاندارد برآورد شد. در سامانه آبیاری سطحی راندمان کاربرد طبق رابطه ۲ (واکر و اسکوگربو، ۱۹۸۷) محاسبه شد:

$$AE = 100 \times \left(1 - \frac{dp}{I}\right) \qquad (۲)$$

که در آن:

AE درصد راندمان کاربرد، dp نفوذ عمقی برحسب سانتی‌متر و I عمق آب آبیاری برحسب سانتی‌متر است.

به‌منظور برآورد ET_o از نرم‌افزار CROPWAT نسخه ۸/۰ استفاده گردید. این نرم‌افزار بر پایه معادله استاندارد فائو–پنمن–مانتیث عمل می‌کند. معادله پنمن–مانتیث به صورت زیر است:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \qquad (۳)$$

که در آن:

ET_0 تبخیر–تعرق گیاه مرجع (چمن) برحسب میلی‌متر بر روز، R_n شار تشعشعات خالص برحسب مگاژول برمترمربع بر روز، G شار حرارت خاک برحسب مگاژول بر متر مربع بر روز، T دمای میانگین هوا در ارتفاع دومتری برحسب درجه سانتی‌گراد، u_2 سرعت باد در ارتفاع دومتری برحسب متربرثانیه، e_s فشاربخار اشباع برحسب کیلوپاسکال، e_a فشار بخار واقعی برحسب کیلوپاسکال، Δ شیب منحنی فشاربخار اشباع و γ ثابت سایکرومتر است. تبخیر–تعرق گیاه برای پوشش گیاهی با استفاده از معادله (۴) بدست آمد (دورنبوس، ۱۹۷۷):

$$ET_c = K_c \times ET_0 \qquad (۴)$$

که در آن:

ET_c تبخیر–تعرق گیاه برحسب میلی‌متر بر روز، K_c ضریب گیاهی و ET_0 تبخیر–تعرق گیاه مرجع (چمن) برحسب میلی‌متر برروز است.

پس از محاسبه مؤلفه‌های بیلان آب و اعمال اصلاحات مربوط به آبیاری، بارندگی و نفوذ عمقی، تبخیر-تعرق واقعی روزانه از تغییرات رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه بین دو قرائت متوالی برآورد شد (معادله ۵). تبخیر-تعرق تجمعی در طول فصل کشت نیز از معادله (۶) محاسبه شد:

$$ET_{A-D} = \frac{\theta_{n-1} - \theta_n}{\Delta T} \quad (۵)$$

$$ET_{A-S} = \sum_{i=\text{روز کشت}}^{\text{برداشت روز محصول}} (ET_{A-D})_i \quad (۶)$$

ET_{A-D} تبخیر-تعرق روزانه گیاه برحسب سانتی‌متر، Θn رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه در قرائت n ام برحسب سانتی‌متر، $\Theta n\text{-}1$ رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه در قرائت n-1ام برحسب سانتی‌متر، ΔT بازه زمانی بین دو قرائت n-1 و n برحسب روز و ET_{A-S} تبخیر-تعرق تجمعی گیاه در طول فصل کشت برحسب میلی‌متر است.

به‌منظور محاسبه مؤلفه‌های بیلان آب، حجم آب آبیاری در هر نوبت با استفاده از فلوم WSC اندازه‌گیری و عمق آب آبیاری محاسبه شد. پس از هر آبیاری یا بارندگی، در صورت تجاوز مجموع آب موجود در ناحیه ریشه از ظرفیت زراعی، مقدار مازاد به عنوان نفوذ عمقی (dp) در نظر گرفته شد و رطوبت خاک پس از کسر این مقدار برای محاسبات بعدی مورد استفاده قرار گرفت. بارش مؤثر نیز با استفاده از روش SCS-USDA محاسبه شد. با توجه به شرایط اجرای آزمایش، عمق سطح ایستابی، رواناب سطحی (ru) و صعود مویینگی (U) ناچیز فرض شد؛ بنابراین، معادلات (۵) و (۶) صرفاً برای محاسبه تبخیر - تعرق از تغییرات رطوبت خاک اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفت و به معنای حذف سایر مؤلفه‌های بیلان آب نیست.

اصطلاح بهره‌وری آب مصرفی در این پژوهش به نسبت مقدار زیست‌توده بر میزان آب مصرفی واقعی اطلاق می‌شود (معادله ۷) (فرحزا و همکاران،۱۳۹۸)

$$WP_{ET} = \frac{Y}{ET_{A-S}} \quad (۷)$$

که در آن:

Y زیست توده برحسب کیلوگرم بر هکتار، ET_{A-S} تبخیر-تعرق واقعی گیاه در طول فصل کشت برحسب مترمکعب بر هکتار و WP_{ET} بهره‌وری آب مصرفی برحسب کیلوگرم بر مترمکعب است.

انتخاب و پایش مزارع و باغات مورد مطالعه با هدف انعکاس تنوع شرایط واقعی کشاورزی در حوزه دریاچه ارومیه، از نظر نوع محصول، روش آبیاری، اندازه اراضی و شیوه‌های مدیریتی انجام گرفت. داده‌های حاصل از این مزارع، اگرچه در چارچوب هدف اولیه مطالعه مزرعه‌ای گردآوری شده بودند، با توجه به ثبت منظم مؤلفه‌های اصلی بیلان آب و امکان محاسبه تبخیر-تعرق واقعی بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری‌شده، به‌عنوان داده مرجع مستقل برای ارزیابی عملکرد روش‌های سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از تعداد بیشتری از واحدهای مورد مطالعه، امکان بررسی عملکرد مدل‌ها را در دامنه گسترده‌تری از شرایط واقعی فراهم می‌سازد و قابلیت تعمیم نتایج را افزایش می‌دهد. با این حال، افزایش تعداد مزارع موجب افزایش ناهمگنی شرایط محیطی و مدیریتی و در نتیجه دشوارتر شدن کنترل تمامی عوامل مؤثر بر اندازه‌گیری نیز می‌شود. از سوی دیگر، ارزیابی مدل در یک مزرعه با اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق و کنترل‌شده می‌تواند برای اعتبارسنجی نقطه‌ای مناسب باشد، اما نتایج آن لزوماً بیانگر عملکرد مدل در شرایط متنوع اراضی کشاورزی حوزه نخواهد بود. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر تلاش شد با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای حاصل از چندین واحد با شرایط متفاوت، ضمن بهره‌گیری از اندازه‌گیری‌های مبتنی بر بیلان آب، عملکرد روش‌های SEBAL و WaPOR در شرایط واقعی و متنوع کشاورزی ارزیابی شود.

نرم‌افزار ArcGIS 10.8 (ArcMap) به‌عنوان بستر اصلی برای مدیریت داده‌های مکانی و آماده‌سازی لایه‌های مورد نیاز به کار گرفته شد. چند مرحله مهم با بهره‌گیری از این نرم‌افزار انجام شد؛ ابتدا برای تعیین مرزها و محدوده‌های مطالعاتی و مشخص‌سازی دقیق مرز زیرحوزه دریاچه ارومیه، داده‌های ارتفاعی (DEM) و

ابزارهای هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت و پس از پردازش، محدوده‌ها در قالب فایل‌های Shapefile ذخیره شد تا در محیط (GEE) قابل بهره‌برداری باشد. سپس به منظور هم‌ترازی داده‌ها با مرزهای جغرافیایی و تطبیق خروجی الگوریتم‌های SEBAL و WaPOR با محدوده‌های واقعی، داده‌های مکانی در ArcMap با ابزار Clip برش داده شد که این کار موجب شد محاسبات آماری تنها در محدوده‌های معتبر زیرحوزه انجام گیرد. در ادامه نیز برای استخراج شاخص‌های آماری مکانی و محاسبه میانگین مکانی پارامترهایی مانند تبخیر-تعرق واقعی (ETa) و زیست‌توده(Biomass)، از ابزار Zonal Statistics as Tableاستفاده شد؛ ابزاری که امکان محاسبه شاخص‌های آماری مختلف نظیر میانگین، بیشینه، کمینه و انحراف معیار را برای هر زیرحوزه فراهم نمود.

برای تعیین آب مصرفی واقعی و بهره‌وری مصرف آب در محیط Google Earth Engine (GEE)، از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1، Sentinel-2 و سنجنده MODIS و محصول WaPOR با تفکیک مکانی ۲۴۸/۲ متر استفاده شد. به منظور انجام محاسبات با استفاده از الگوریتم WaPOR، ابتدا نقشه‌های مزارع منتخب در نرم‌افزارGoogle Earth Pro تهیه و به فرمت شیپ‌فایل تبدیل شد و سپس به محیط (GEE) منتقل شد. در ادامه، کدهای مربوط به اجرای الگوریتم و محاسبات موردنظر در Google Earth Engine اجرا شد. به‌منظور کاهش اثر محدودیت تفکیک مکانی WaPOR ، تنها مزارعی با مساحت بیش از ۶/۲ هکتار برای مقایسه انتخاب شد. همچنین، برای هر مزرعه مقادیر تبخیر- تعرق از چندین نقطه واقع در داخل محدوده مزرعه استخراج و میانگین آن‌ها به‌عنوان مقدار نماینده مزرعه در نظر گرفته شد. درنهایت خروجی‌هایی شامل نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) ، تبخیر (E) ، تعرق (T) و زیست توده (Biomass) برای هر یک از مزارع بدست آمد.

الگوریتم SEBAL طی دوره رشد محصولات در حوزه آبریز دریاچه ارومیه در محیط Google Earth Engine(GEE) اجرا شد. پلتفرم Google Earth Engine با فراهم‌سازی یک کاتالوگ چند پتابایتی از داده‌های مکانی و تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس سیاره‌ای، امکان تحلیل‌های جامع و یکپارچه را فراهم می‌سازد. الگوریتم SEBAL با استفاده از داده‌های هواشناسی و ماهواره‌ای و معادله (۸) ابتدا شار گرمای تبخیر برای هرپیکسل تصویر را به صورت لحظه‌ای (برای زمان دریافت تصویر) برآورد می‌کند و برای گام‌های زمانی روزانه و ماهانه تعمیم می‌دهد (مرکز تحقیقات سنجش از دور، ۲۰۱۵).

$$LE = R_n - G - H \qquad (۸)$$

که در آن: R_n شار تشعشع خالص در سطح زمین (تفاضل تشعشع ورودی و خروجی)، G شار گرمایی زمین و H شار گرمای محسوس است که همه برحسب وات بر مترمربع است.

از فرمول فوق می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که انرژی تابشی خالص موجود در سطح زمین، حاصل تفاوت شارهای تابشی ورودی و خروجی در طول موج‌های کوتاه و بلند است و به سه بخش مجزا تقسیم می‌شود. نخست، بخشی از این انرژی به گرم کردن زمین یا خاک اختصاص می‌یابد؛ دوم، بخش دیگری به گرم کردن هوای مجاور کره زمین تعلق دارد؛ و در نهایت، انرژی باقی‌مانده منجر به تبخیر-تعرق می‌شود. هدف اصلی الگوریتم SEBAL در وهله اول برآورد شار گرمای محسوس (H) و در نهایت تعیین شار گرمای نهان (LE) هست (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۸۸). دقت نتایج به‌دست‌آمده برای تبخیر-تعرق تحت تأثیر دقت باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک و همچنین باند حرارتی ماهواره قرار دارد (اصغرزاده و ثنایی‌نژاد، ۱۳۸۳). در این الگوریتم، شاخص‌هایی مانند NDVI (شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده)، LAI (شاخص سطح برگ)، EVI (شاخص گیاهی پیشرفته) با تفکیک مکانی ۳۰ متری برآورد و از باند حرارتی با تفکیک مکانی ۱۰۰ متری در ماهواره لندست ۸ برای تعیین LST (دمای سطح زمین) استفاده شد. برای اجرای

الگوریتم SEBAL در محیط گوگل ارث انجین (GEE)، اطلاعات هواشناسی به‌روز براساس ایستگاه‌های موجود منطقه‌ای در بازه زمانی داده‌برداری‌های مزرعه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم به ازای هر پیکسل، میزان آب مصرفی واقعی و شاخص‌های گیاهی را بین ۸ تا ۱۶ روز ارائه می‌دهد. در SEBAL برای مشخص کردن شرایط مرزی در معادله بیلان انرژی از پیکسل‌های شاخصی تحت عنوان پیکسل گرم و سرد استفاده می شود. پیکسل سرد از میان مزارع با پوشش گیاهی کامل و آبیاری شده و پیکسل گرم از میان مزارع بدون پوشش گیاهی و خشک انتخاب می‌شود. در این مدل میزان دقت برآوردهای ET به انتخاب صحیح دو پیکسل مذکور وابسته است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۷). انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد در الگوریتم SEBAL به‌صورت خودکار در محیط GEE انجام شد. بدین منظور، پیکسل سرد از اراضی زراعی با NDVI>۰/۷۰ و LST <۳۰۵(K) و پیکسل گرم از اراضی بایر با ۰<NDVI<۰/۱۵ و LST>۳۳۰ (K) استخراج شد. سپس میانگین مقادیر این پیکسل‌های مرجع در محاسبات شار گرمای محسوس و برآورد تبخیر و تعرق در الگوریتم SEBAL مورد استفاده قرار گرفت.

تبخیر-تعرق واقعی لحظه‌ای (ET_{inst}) که همان ET_a محاسبه شده در زمان تصویر ماهواره‌ای (میلی متر برساعت) است، با استفاده رابطه (۹) محاسبه شد (واترز و همکاران، ۲۰۰۲).

$$ET_{inst} = 1000(3600\frac{LE}{\lambda\rho_w}) \qquad (۹)$$

که در آن:

LE شارگرمای نهان تبخیر برحسب وات بر مترمربع ، ρ_w چگالی آب برحسب کیلوگرم بر متر مکعب، λ گرمای نهان تبخیر آب برحسب ژول بر کیلوگرم و ۳۶۰۰ ضریب تبدیل ثانیه به ساعت، ۱۰۰۰ ضریب تبدیل متر به میلی‌متر است.

λ در رابطه (۹) طبق معادله (۱۰) محاسبه شد:

$$\lambda = [2.501 \times 10^6 - 2360(T_s)] \qquad (۱۰)$$

که در آن:

عدد ثابت $۲/۵۰۱ \times ۱۰^۶$ گرمای نهان تبخیر در دمای صفر درجه سانتی‌گراد، T_s دمای آب یا هوا برحسب درجه سلسیوس (در صورت نداشتن دمای آب از دمای هوا استفاده می‌شود و اگر دما مشخص نباشد T_s صفر در نظر گرفته می‌شود).

مدل SEBAL تبخیر-تعرق واقعی از هر پیکسل را در مقیاس لحظه‌ای (ET_{inst}) و در زمان عبور ماهواره محاسبه می‌نماید؛ بنابراین برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی روزانه (ET_a) ، لازم است مقادیر لحظه‌ای حاصل از مدل به مقیاس زمانی روزانه تعمیم داده شود. بدین منظور، ابتدا تبخیر-تعرق گیاه مرجع (چمن) (ET_{ref}) در بازه زمانی ساعتی منطبق با زمان عبور ماهواره و همچنین تبخیر-تعرق گیاه مرجع روزانه (چمن) ($ET_{r\text{-}24}$) با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه معرف منطقه و به‌کمک معادله فائو-پنمن-مانتیث برآورد شد.

تبخیر-تعرق گیاه مرجع (چمن) ساعتی براساس معادله پنمن–مانتیث با مقاومت سطحی ثابت معادل r_s =۷۰m/s محاسبه شد. مطالعات متعدد نشان دادند که به‌کارگیری همان پارامترهای روزانه در مقیاس ساعتی، باعث اختلاف بین مجموع تبخیر–تعرق ساعتی و مقدار برآوردشده در بازه زمانی ۲۴ ساعته می‌شود. به همین دلیل، آلن و همکاران (۲۰۰۶) اصلاحاتی را برای استانداردسازی محاسبات در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر از ۲۴ ساعته پیشنهاد کردند. در این روش، برای ساعات روز (زمانی که تشعشع خالص سطح مثبت است) مقاومت سطحی برابر r_s=۵۰ (متر بر ثانیه) و ضرایب معادله پنمن–مانتیث به‌صورت C_n =۲۷ و C_d=۰/۲۴ است (ضرایب C_d و C_n بسته به گام زمانی محاسبه (نوع گیاه مرجع) و برخی موارد دیگر تغییر می-کنند). باتوجه به آنکه تصویر حاصل گذر ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ از منطقه مورد مطالعه تقریبا در ساعت ۱۰:۳۰ صبح است، از ضریب تصحیح ویژه ساعات روز استفاده شد. بر این اساس، معادله پنمن–مانتیث برای برآورد تبخیر–تعرق ساعتی طبق معادله (۱۱) بازنویسی شد که در آن ET_{ref} برحسب میلی‌متر بر ساعت است:

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{C_n}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+C_d u_2)} \quad (۱۱)$$

که در آن: واحد C_n، کلوین در میلی‌متر در ثانیه به توان سه بر مگاگرم و برساعت، واحد C_d، ثانیه بر متر است.

با توجه به داده‌های موجود در فرمول (۱۱) مقدار ET_{ref} حاصل شد. مقدار $ET_{r\text{-}24}$ با داشتن اطلاعات موردنیاز از ایستگاه‌های هواشناسی مربوطه با معادله پنمن-مانتیث محاسبه شد. تبخیر-تعرق واقعی روزانه (ET_a) با استفاده از مقادیر لحظه‌ای به‌دست آمده به مقیاس زمانی روزانه تعمیم داده شد (معادله ۱۲) (واترز و همکاران، ۲۰۰۲).

$$ET_a = ET_{r-24}\frac{ET_{inst}}{ET_{ref}} \quad (۱۲)$$

که در آن: ET_{inst} تبخیر-تعرق واقعی حاصل از سنجش از دور و ET_{ref} تبخیر-تعرق گیاه مرجع (چمن) در لحظه‌ی عبور ماهواره به‌صورت ساعتی برحسب میلی‌متر برساعت و $ET_{r\text{-}24}$ تبخیر- تعرق مرجع (چمن) روزانه و ET_a تبخیر- تعرق واقعی روزانه برآورد شده سنجش از دور برحسب میلی‌متر بر روز است.

برای ارزیابی دقت الگوریتم‌ها، از شاخص‌های آماری زیر استفاده شد (میان آبادی، ۱۳۹۵):

- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(P_i-O_i)^2}{n}} \quad (۱۳)$$

- ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (۱۴)$$

- ضریب تبیین (R^2)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2}}\right)^2 \quad (۱۵)$$

- میانگین خطای مطلق(MAE)

$$MAE = \sum_{i=1}^{n}\frac{|O_i-P_i|}{n} \quad (۱۶)$$

- میانگین انحراف مطلق (MBE)

$$MBE = \sum_{i=1}^{n}\frac{(O_i-P_i)}{n} \quad (۱۷)$$

- ضریب کارایی (EF)

$$EF = 1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \quad (۱۸)$$

که در آنها: O_i آب مصرفی واقعی اندازه‌گیری شده در مزارع/باغات، P_i آب مصرفی واقعی اندازه‌گیری شده با استفاده از الگوریتم‌های سنجش از دور، n تعداد داده‌ها و $\bar{O}$ میانگین آب مصرفی واقعی اندازه‌گیری شده در مزارع/باغات، $\bar{P}$ میانگین آب مصرفی واقعی اندازه‌گیری شده با الگوریتم‌های سنجش از دور است.

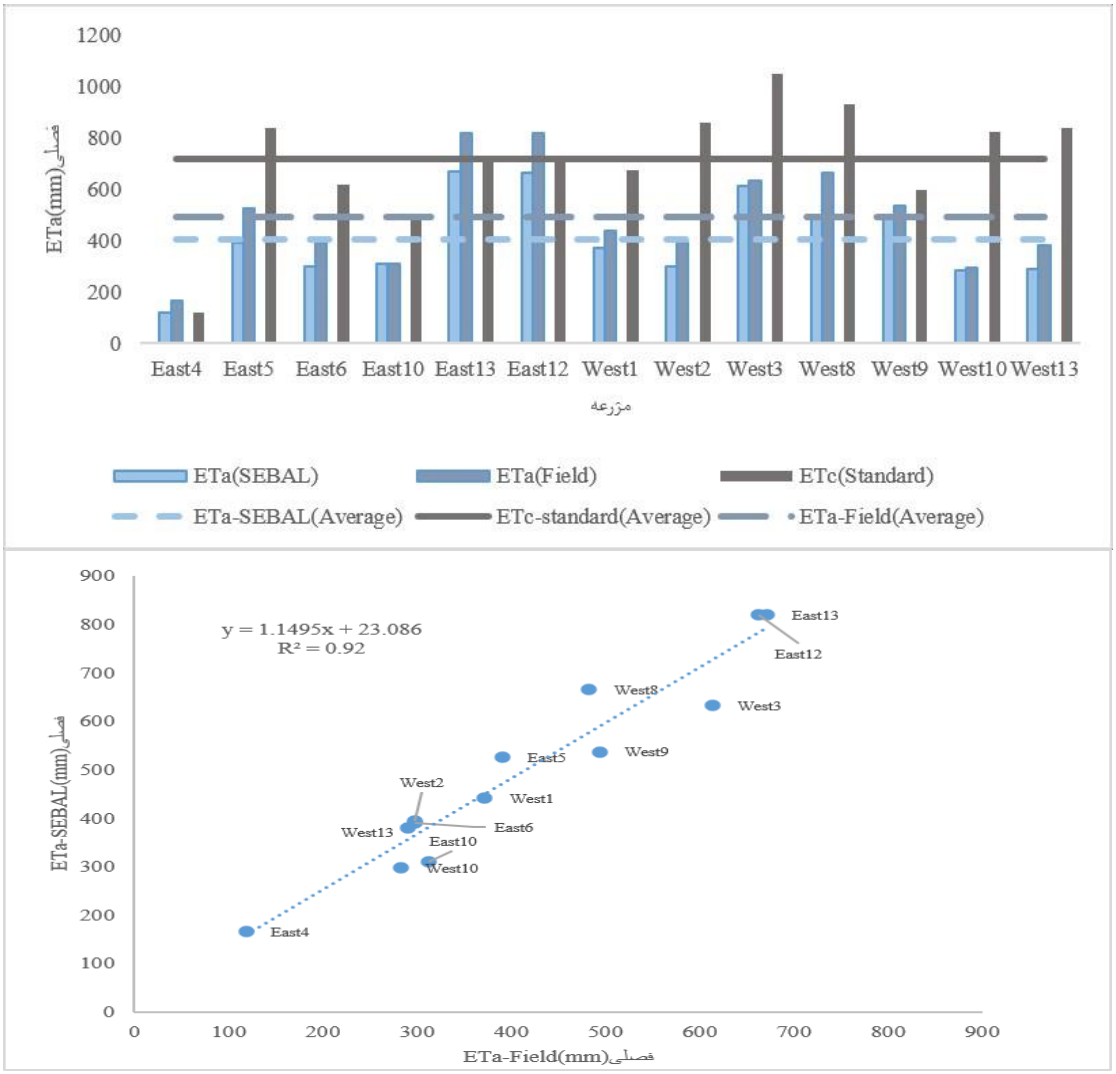
نتایج و بحث

در راستای ارزیابی عملکرد الگوریتم SEBAL، تعداد ۱۳ مزرعه زراعی و شش باغ مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های حاصل از این الگوریتم با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مقایسه شد (شکل ۲ و ۳). میانگین مساحت مزارع و باغات مورد مطالعه به‌ترتیب ۱/۳ و ۱/۲۲ هکتار بود.

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، تبخیر–تعرق واقعی کل فصل کشت ($ET_{a\text{-}Sebal}$) خروجی از الگوریتم SEBAL در مزارع به‌طور متوسط ۱۲ درصد و در باغات ۹/۸۶ درصد کمتر از مقادیر مزرعه‌ای ($ET_{a\text{-}field}$) بود. این اختلاف می‌تواند ناشی از ناهمگنی مکانی اراضی کشاورزی، کوچک بودن برخی قطعات زراعی و باغی و اثر پیکسل‌های مختلط در تصاویر ماهواره‌ای باشد. همچنین محدودیت تفکیک مکانی داده‌های ورودی و تفاوت شرایط واقعی مزرعه با فرضیات مدل بیلان انرژی می‌تواند بخشی از این اختلاف را توضیح دهد. همچنین براساس اشکال یاد شده، اندازه-گیری‌های مزرعه‌ای ($ET_{a\text{-}Field}$) ۳۶ درصد کمتر از نیاز استاندارد گیاه ($ET_{c\text{-}Standard}$) در مزارع و ۲۲ درصد در باغات بود. منظور از$ET_{c\text{-}Standard}$ ، نیاز آبی استاندارد هر محصول بر اساس مقادیر استخراج‌شده از سامانه نیاز آبی گیاهان کشور (موسسه تحقیقات آب و خاک)، متناسب با سال زراعی اجرای پژوهش است. این اختلاف معنادار، می-تواند تحت تاثیر عواملی چون کم‌آبیاری، بروز تنش‌های

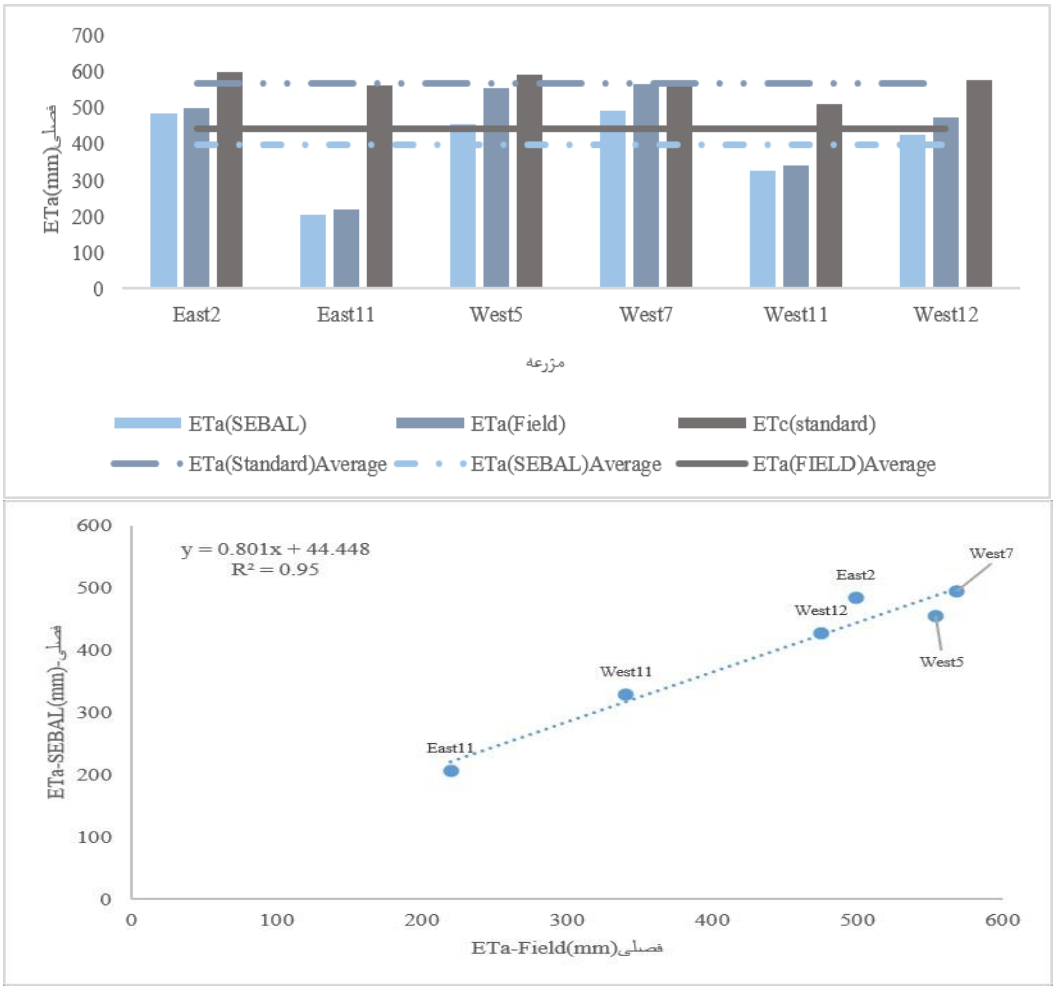
ناشی از بیماری‌ها و آفات، برنامه‌ریزی نامناسب آبیاری و عدم یکنواختی در توزیع آب در سطح مزارع باشد.

انطباق بیشتر نتایج الگوریتم SEBAL با اندازه-گیری‌های مزرعه‌ای در باغات می‌تواند ناشی از تفاوت در ساختار تاج درختان در این اراضی نسبت داد. در الگوریتم SEBAL، دمای سطح زمین از باندهای حرارتی Landsat 8با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر و شاخص‌های گیاهی نظیر NDVI، LAI و EVI با تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج می‌شود؛ بنابراین، یکنواختی بیشتر پوشش گیاهی در باغات موجب افزایش دقت برآورد این پارامترها و در نتیجه بهبود تخمین تبخیر-تعرق می‌شود.



شکل ۲- مقایسه ET_a فصلی در مزارع مستخرج از الگوریتم SEBAL ($ET_{a\text{-}SEBAL}$)، اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای ($ET_{a\text{-}Field}$) و نیازآبی استاندارد ($ET_{C\text{-}Standard}$)

Figure 2 – Seasonal comparison of ET_a in farms derived from the SEBAL algorithm ($ET_{a\text{-}SEBAL}$), field measurements ($ET_{a\text{-}Field}$), and standard water requirement ($ET_{C\text{-}Standard}$)



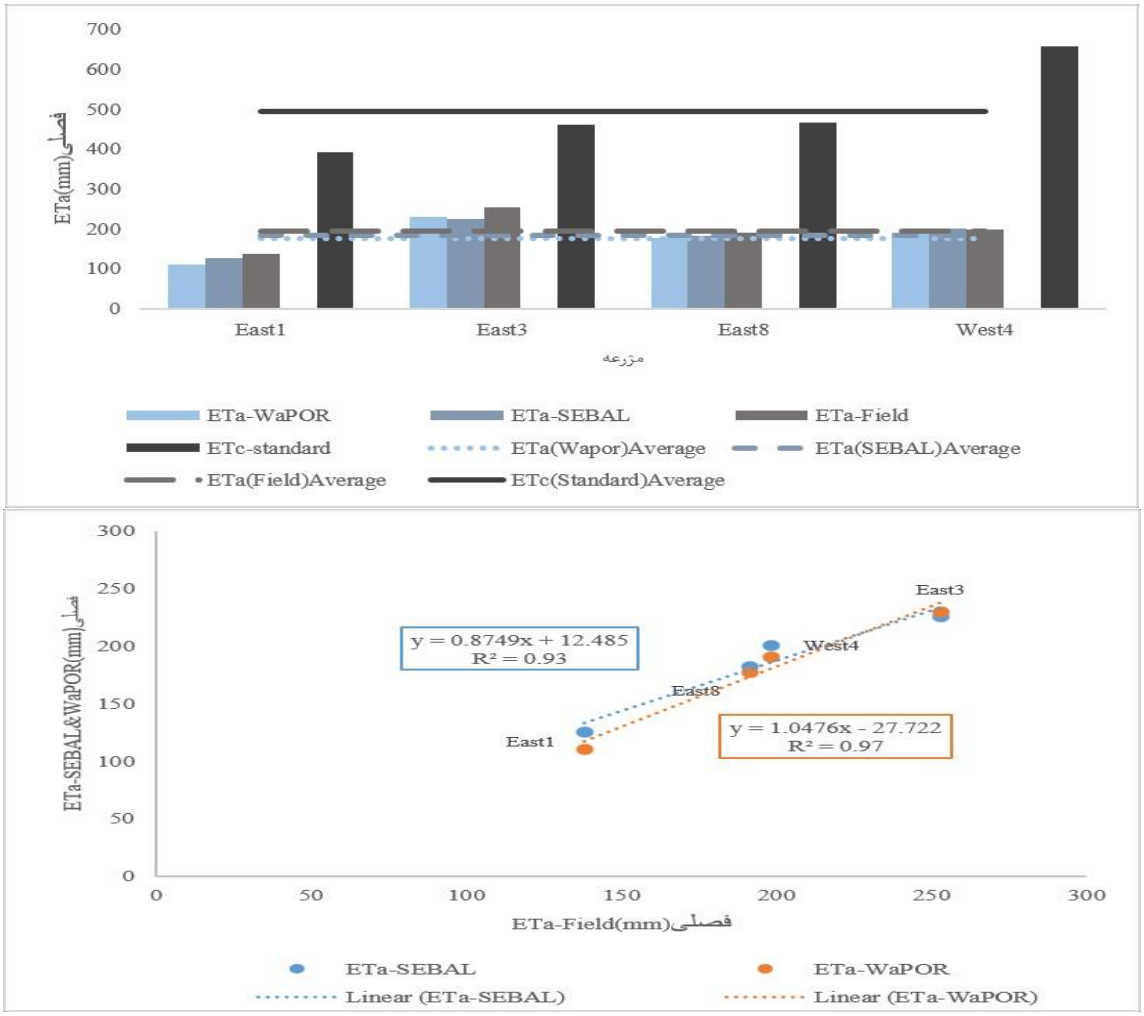
شکل ۳- مقایسه ET_a فصلی در باغات مستخرج از الگوریتم SEBAL ($ET_{a\text{-}SEBAL}$) با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای ($ET_{a\text{-}Field}$) و نیازآبی استاندارد ($ET_{C\text{-}Standard}$)

Figure 3 – Seasonal comparison of ET_a in orchards derived from the SEBAL algorithm ($ET_{a\text{-}SEBAL}$), field measurements ($ET_{a\text{-}Field}$), and standard water requirement ($ET_{C\text{-}Standard}$)

در ادامه، به‌منظور مقایسه عملکرد دو الگوریتم سنجش از دور، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) برآوردشده با SEBAL و WaPOR با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به تفکیک مکانی داده‌های WaPOR (۲۴۸/۲ متر)، این مقایسه تنها برای مزارع و باغات با ابعاد مناسب (مساحت بیش از ۶/۲ هکتار) انجام شد. بر این اساس، چهار مزرعه زراعی و سه باغ منتخب با میانگین مساحت ۸/۹۲ و ۸/۴۷ هکتار به‌ترتیب برای اراضی زراعی و باغی انتخاب شد.

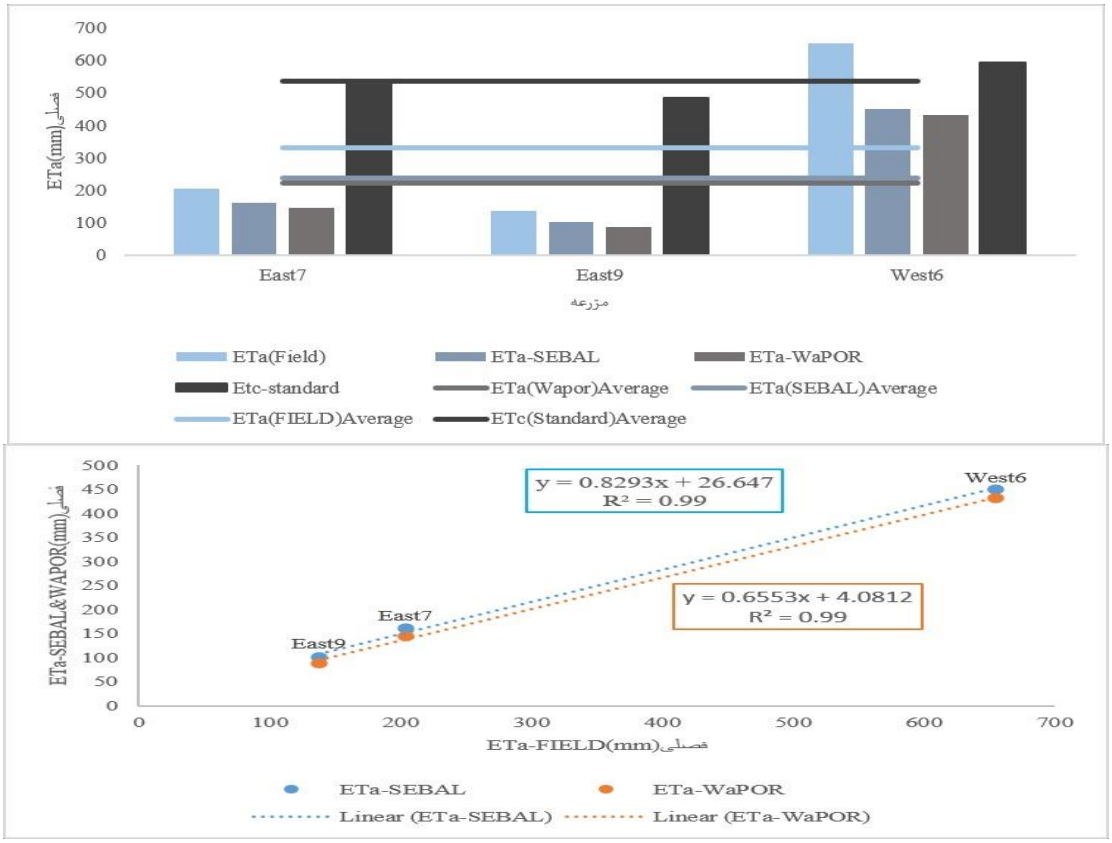
بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۴ و ۵، مقادیر ET_a حاصل از هر دو الگوریتم از انطباق مناسبی با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای برخوردار بود. با توجه به شکل ۴ به طور متوسط، مقادیر ET_a حاصل از الگوریتم SEBAL ($ET_{a\text{-}SEBAL}$) و WaPOR ($ET_{a\text{-}WaPOR}$) در مزارع به ترتیب ۶/۱ و ۹/۴۴ درصد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای ($ET_{a\text{-}Field}$) بود. همچنین نیاز آبی استاندارد گیاه ($ET_{C\text{-}Standard}$)در مقایسه با مقادیرET_a مزرعه‌ای در مزارع به‌طور متوسط ۶۰/۴۵ درصد کمتر بود. نتایج مربوط به باغات نیز روندی مشابه مزارع را نشان داد (شکل ۵). به‌طور متوسط، مقادیر ET_a حاصل از الگوریتم SEBAL ($ET_{a\text{-}SEBAL}$) و WaPOR ($ET_{a\text{-}WaPOR}$) به‌ترتیب ۲۸/۴۸ و ۳۳/۲۴ درصد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده مزرعه‌ای ($ET_{a\text{-}Field}$) بود. همچنین مقادیر ET_a مزرعه‌ای در باغات در مقایسه با نیاز آبی استاندارد گیاه ($ET_{C\text{-}Standard}$) به‌طور متوسط ۳۸٪ کمتر بود. در اغلب مزارع و باغات، مقادیر حاصل از SEBAL به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای نزدیک‌تر

بود، در حالی که مقادیر WaPOR اختلاف بیشتری با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای نشان داد. اختلاف بیشتر مقادیر WaPORبا اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای را می‌توان تا حدی به تفکیک مکانی بزرگتر این سامانه نسبت به الگوریتم SEBALنسبت داد که موجب کاهش دقت برآورد در اراضی با تنوع بالای پوشش گیاهی و مدیریت آبیاری می‌شود. همچنین در برخی موارد، از جمله مزرعه EAST3، اختلاف بین مقدار SEBAL و اندازه‌گیری مزرعه‌ای نسبت به سایر نقاط بیشتر مشاهده شد. این اختلاف را می‌توان به تفاوت شرایط مزارع، مدیریت آبیاری و محدودیت‌های تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای نسبت داد.



شکل ۴- مقایسه ET_a فصلی در مزارع مستخرج از الگوریتم‌های WaPOR ($ET_{a\text{-}WaPOR}$) و SEBAL ($ET_{a\text{-}SEBAL}$) با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای ($ET_{a\text{-}Field}$) و نیازآبی استاندارد ($ET_{C\text{-}Standard}$)

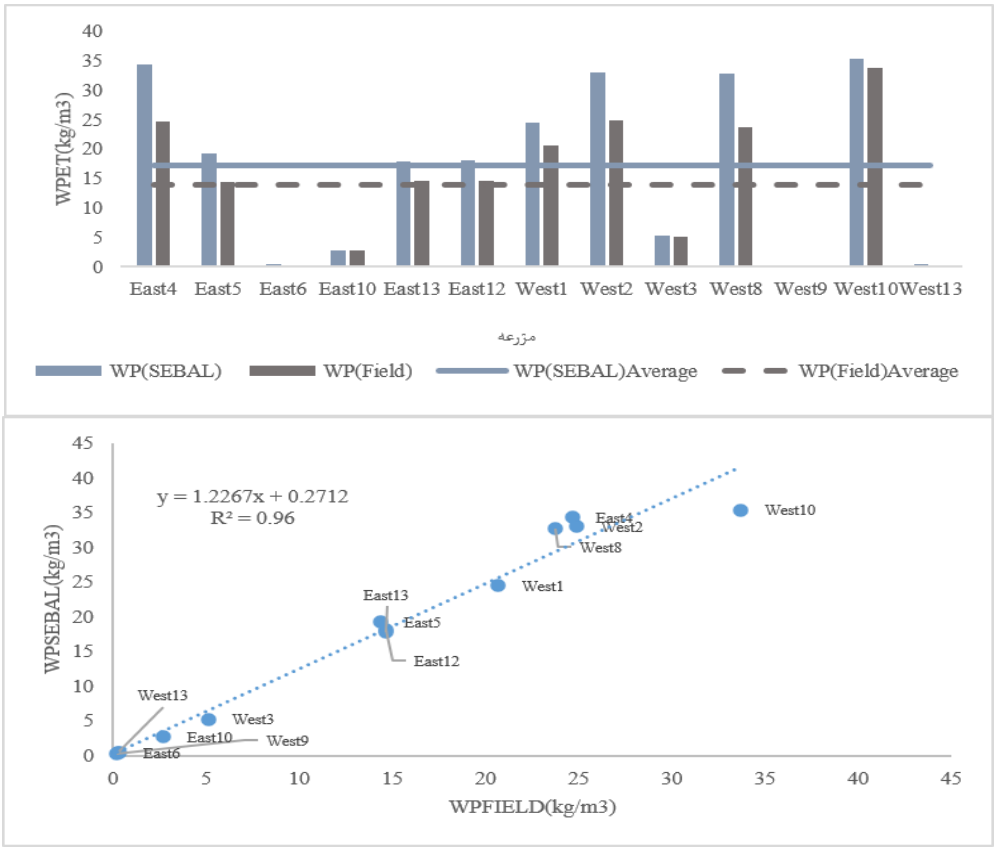
Figure 4 – Seasonal comparison of ET_a in farms derived from the WaPOR algorithm ($ET_{a\text{-}WaPOR}$) and the SEBAL algorithm ($ET_{a\text{-}SEBAL}$), compared with field measurements ($ET_{a\text{-}Field}$) and standard water requirement ($ET_{c\text{-}Standard}$)



شکل ۵- مقایسه ET_a فصلی در باغات مستخرج از الگوریتم‌های WaPOR ($ET_{a\text{-}WaPOR}$) و SEBAL ($ET_{a\text{-}SEBAL}$) با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای ($ET_{a\text{-}Field}$) و نیازآبی استاندارد ($ET_{C\text{-}Standard}$)

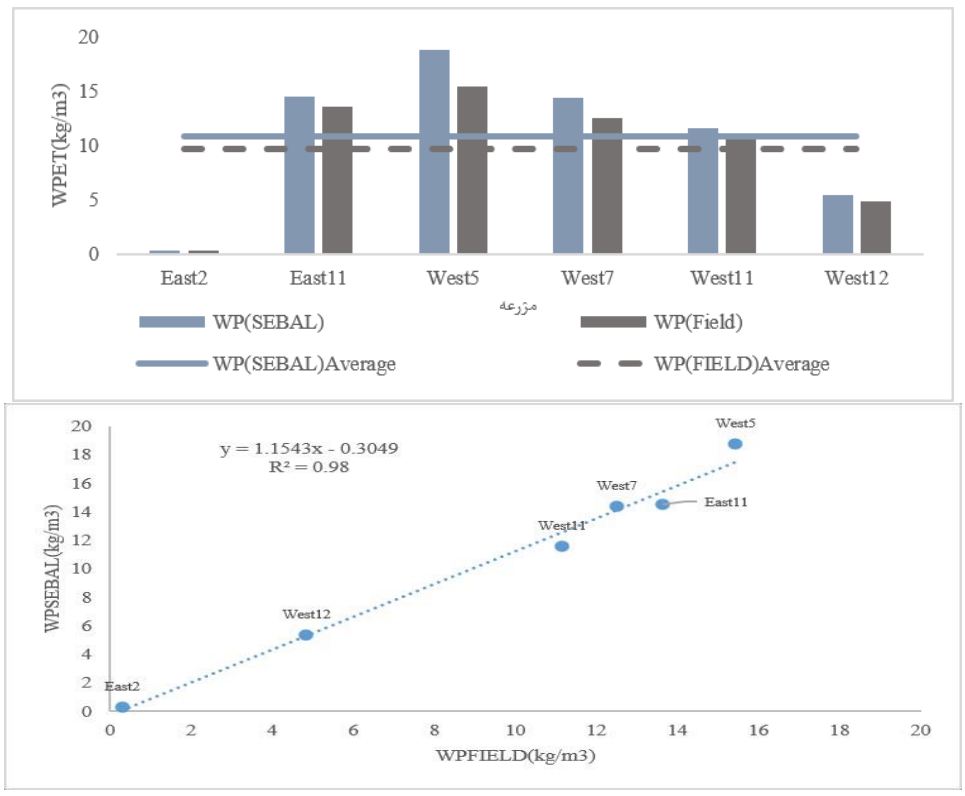
Figure 5 – Seasonal comparison of ET_a in orchards derived from the WaPOR algorithm ($ET_{a\text{-}WaPOR}$) and the SEBAL algorithm ($ET_{a\text{-}SEBAL}$), compared with field measurements ($ET_{a\text{-}Field}$) and standard water requirement ($ET_{c\text{-}Standard}$)

پس از بررسی عملکرد الگوریتم‌ها در برآورد تبخیر-تعرق واقعی(ET_a) ، در ادامه بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET})حاصل از این الگوریتم‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور بر اساس اطلاعات جداول ۲ و ۳ و شکل‌های ۶ و ۷، مقادیر WP_{ET} برآوردشده با الگوریتم SEBALبا اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مقایسه تا میزان انطباق این الگوریتم در برآورد بهره‌وری واقعی آب بررسی شود. از آنجا که الگوریتمSEBAL به‌طور مستقیم شاخص بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) را ارائه نمی‌کند، این شاخص از ترکیب مقادیر زیست‌توده مزارع و باغات با ET_a برآوردشده با الگوریتمSEBAL محاسبه شد (فرمول ۷). با توجه به اینکه بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) نسبت معکوس با تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) دارد و زیست‌توده در محاسبات ثابت در نظر گرفته شده است، بیشتر بودن مقادیر WP_{ET} حاصل از SEBAL با نتایج بخش تبخیر-تعرق واقعی سازگار است؛ به‌طوری‌که در اغلب مزارع و باغات، مقادیر ET_a برآوردشده با SEBAL کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده مزرعه‌ای بود. به‌طور متوسط، مقادیر WP_{ET}حاصل از الگوریتم SEBAL (WP_{SEBAL}) در مزارع و باغات به‌ترتیب ۱۸/۲۲ درصد و ۱۰/۹۲ درصد بیشتر از مقادیر مزرعه‌ای (WP_{Field}) بود. این موضوع با نتایج بخش ET_a مطابقت داشته و عمدتاً ناشی از اختلاف مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده است.



شکل ۶- مقایسه WP_{ET} در مزارع مستخرج از الگوریتم SEBAL (WP_{SEBAL}) با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای (WP_{Field})

Figure 6 – Comparison of WP_{ET} in farms derived from the SEBAL algorithm (WP_{SEBAL}) with field measurements (WP_{Field})

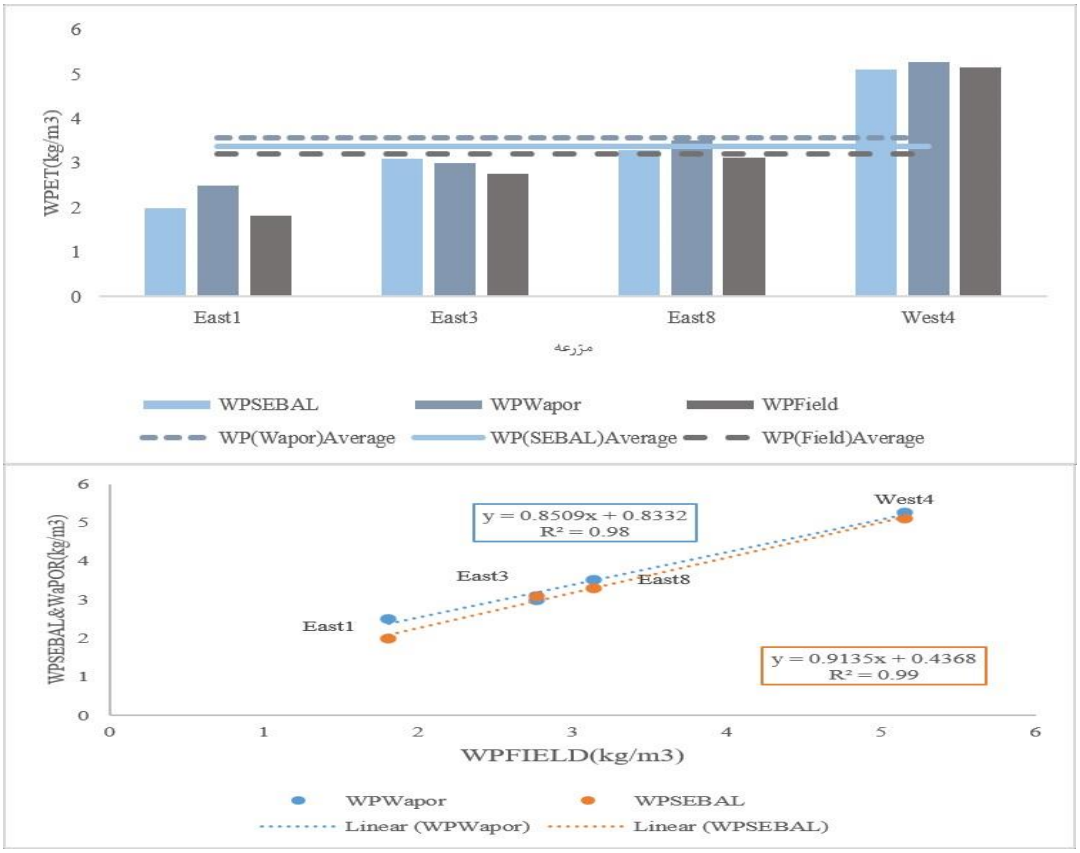


شکل ۷- مقایسه WP_{ET} در باغات مستخرج از الگوریتم SEBAL (WP_{SEBAL}) با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای (WP_{Field})

Figure 7 – Comparison of WP_{ET} in orchards derived from the SEBAL algorithm (WP_{sebal}) with field measurements (WP_{Field})

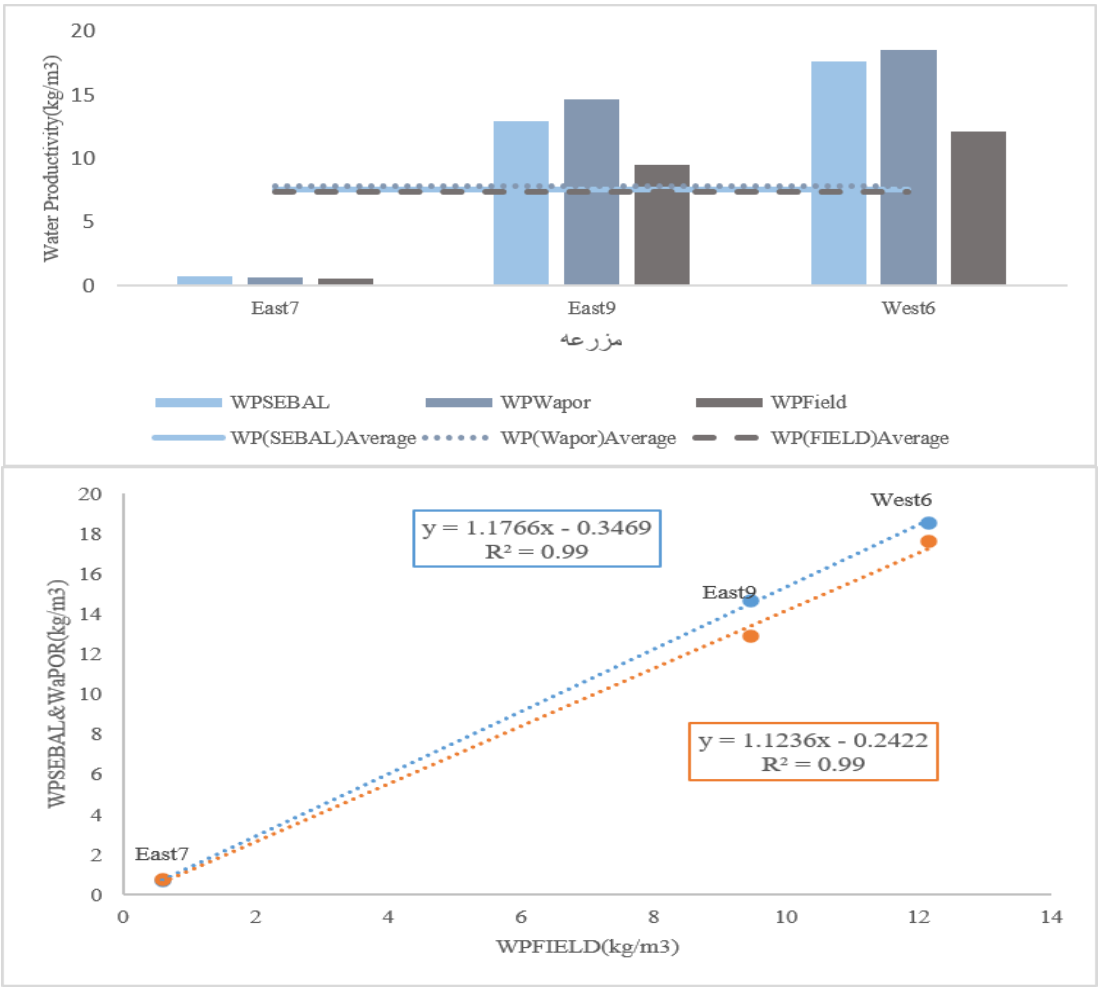
پس از ارزیابی بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) حاصل از الگوریتم SEBAL در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، در گام بعدی عملکرد دو الگوریتم SEBAL و WaPORدر برآورد این شاخص مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس اطلاعات جداول ۴ و ۵ و شکل‌های ۸ و ۹، مقادیر WP_{ET}حاصل از دو الگوریتم با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در مزارع و باغات منتخب مقایسه شد. در الگوریتم WaPOR، زیست‌توده (Biomass) به‌طور مستقیم از طریق کدنویسی در محیط (GEE) محاسبه و سپس برای استخراج شاخص WP_{ET} مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که در الگوریتم SEBAL ، این شاخص از ترکیب زیست‌توده و مقادیر ET_a برآوردشده محاسبه شد.

نتایج نشان داد که در مزارع، مقادیر WP_{ET} حاصل از الگوریتم‌های SEBAL و WaPOR به‌ترتیب ۴/۷ و ۹/۹ درصد بیشتر از مقادیر مزرعه‌ای بود. همچنین در باغات، مقادیر WP_{ET} حاصل از الگوریتم‌های SEBAL (WP_{SEBAL}) و WaPOR (WP_{WaPOR}) به‌ترتیب ۲۹/۰۴ و ۳۴/۴۸ درصد بالاتر از مقادیر مزرعه‌ای (WP_{Field}) مشاهده شد. به‌طور کلی، هر دو الگوریتم روند تغییرات بهره‌وری واقعی آب را به‌خوبی بازنمایی کرد، اما مقادیر حاصل از الگوریتم SEBAL در اغلب موارد به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای نزدیک‌تر بود. این موضوع با نتایج حاصل از مقایسه تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) نیز همخوانی داشته و نشان می‌دهد اختلاف در برآورد WP_{ET} تا حد زیادی تحت تأثیر تفاوت مقادیر ET_a برآوردشده با دو الگوریتم قرار دارد. با این حال، نزدیکی مقادیر WP_{ET} حاصل از WaPORبه اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بیانگر آن است که زیست‌توده محاسبه‌شده در این سامانه از دقت مناسبی برخوردار بوده و توانسته است تا حدودی اثر اختلاف موجود در برآورد ET_a را جبران کند.



شکل ۸- مقایسه WP_{ET} در مزارع مستخرج از الگوریتم‌های WaPOR (WP_{WaPOR}) و SEBAL (WP_{SEBAL}) با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای (WP_{Field})

Figure 8 – Comparison of WP_{ET} in farms derived from the WaPOR algorithm (WP_{WaPOR}) and the SEBAL algorithm (WP_{SEBAL}) with field measurements (WP_{Field})



شکل ۹- مقایسه WP_{ET} در باغات ازالگوریتم‌های WaPOR (WP_{WaPOR}) و SEBAL (WP_{SEBAL}) با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای (WP_{Field})

Figure 9 – Comparison of WP_{ET} in orchards derived from the WaPOR algorithm (WP_{WaPOR}) and the SEBAL algorithm (WP_{SEBAL}) with field measurements (WP_{Field})

به‌منظور ارزیابی کمی عملکرد الگوریتم‌های SEBALو WaPOR در برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ET_a)و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) ، شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین انحراف مطلق(MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه شد (جدول ۲). این شاخص‌ها برای مزارع و باغات مشترک مورد استفاده در هر دو الگوریتم محاسبه شد تا امکان مقایسه مستقیم دقت و عملکرد آن‌ها فراهم شود. شاخص‌های آماری ارائه‌شده برای مقادیر تجمعی تبخیر–تعرق واقعی در طول فصل رشد محاسبه شده؛ بنابراین، مقادیرMAE ، RMSEو MBE بیانگر خطای برآورد ET_a در مقیاس فصل رشد (میلی‌متر) است.

جدول ۲-نتایج ارزیابی الگوریتم‌های سنجش از دور

Table 2 –Estimated for remote-sensing algorithms compared with field measurements

شاخص آماری Statistical Indicator	ET_a (SEBAL) تبخیر-تعرق واقعی(الگوریتمSEBAL)	ET_a (WaPOR) تبخیر-تعرق واقعی(الگوریتمWaPOR)	WP_{ET}(SEBAL) بهره‌وری واقعی آب(الگوریتمSEBAL)	WP_{ET}(WaPOR) بهره‌وری واقعی آب(الگوریتمWaPOR)
MAE (میانگین خطای مطلق)	47.72(mm)	57.80 (mm)	1.40(Kg/m3)	1.87(Kg/m3)
MBE (میانگین انحراف مطلق)	-47.72(mm)	57.80(mm)	1.38 (Kg/m3)	1.87(Kg/m3)
RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)	80.87(mm)	90.26(mm)	2.45(Kg/m3)	3.13 (Kg/m3)
NRMSE (ریشه میانگین مربعات نرمال شده)	0.32	0.36	0.49	0.62
R^2(ضریب تبیین)	0.97	0.94	0.98	0.98
EF (ضریب کارایی)	0.77	0.71	0.61	0.37

نتایج ارزیابی نشان داد که الگوریتم SEBAL در مقایسه با WaPOR، مقادیر کمتری از شاخص‌های خطای MAE، RMSE و NRMSE و مقادیر بیشتری از شاخص‌های EF و R^2 را در برآورد تبخیر–تعرق واقعی (ET_a)و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) به دست آورد. در برآورد ET_a، مقدار MAE در الگوریتم SEBAL برابر ۴۷/۷۲ میلی‌متر و در WaPOR برابر ۵۷/۸۰ میلی‌متر بود که بیانگر ۱۷/۴۳ درصد کاهش خطا در SEBAL نسبت به WaPORاست. همچنین مقدار RMSE در SEBAL برابر ۸۰/۸۷ میلی‌متر و در WaPOR برابر ۹۰/۲۶ میلی‌متر محاسبه شد که نشان می‌دهد خطای برآورد ET_a در SEBALحدود ۱۰/۴۰ درصد کمتر از WaPOR بوده است. مقدار NRMSE نیز در الگوریتم SEBAL ۱۱/۱۱ درصد کمتر از WaPOR بدست آمد که بیانگر خطای نسبی کمتر الگوریتم SEBAL است. همچنین مقدار ضریب کارایی (EF) و ضریب تبیین (R^2) به ترتیب برای SEBALبرابر ۰/۷۷ و ۰/۹۷ و برای WaPOR برابر ۰/۷۱ و ۰/۹۴ بود که نشان می‌دهد ضریب تبیین (R^2) برای ET_a در SEBAL حدود ۳/۱ درصد بیشتر از WaPOR بوده است.

در برآورد بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) نیز شاخص‌های ارزیابی، مقادیر خطای کمتری را برای SEBAL در مقایسه با WaPOR نشان دادند. مقدار MAEدر SEBAL برابر ۱/۴۰ و در WaPOR برابر ۱/۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود که بیانگر ۲۵/۱۳ درصد کاهش خطا در SEBAL است. همچنین مقدار RMSE در SEBAL برابر ۲/۴۵ و در WaPOR برابر ۳/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد که نشان می‌دهد خطای برآورد WP_{ET}در SEBAL حدود ۲۱/۷۲ درصد کمتر از WaPORبوده است. از سوی دیگر، مقادیر WP_{ET} حاصل از الگوریتم‌های SEBAL و WaPOR به‌ترتیب ۲۱/۷۰ و ۲۷/۲۰ درصد بیشتر از مقادیر مزرعه‌ای بودند که نشان می‌دهد میزان انحراف برآوردهای SEBAL از مقادیر واقعی حدود ۲۰/۲۲ درصد کمتر از WaPOR بوده است. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های مطالعات پیشین در مناطق خشک و نیمه‌خشک همخوانی دارد. Ahmadi و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای Landsat8 در حوزه دریاچه ارومیه نشان دادند که این الگوریتم از توانایی مناسبی در برآورد تبخیر–تعرق واقعی، زیست‌توده و بهره‌وری آب برخوردار بوده و می‌تواند شرایط واقعی مزارع کشاورزی منطقه را با دقت قابل قبولی بازنمایی کند. همچنین Biradar و همکاران (۲۰۲۱) در مقایسه مدل‌های SEBAL ، METRIC و WaPOR با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در چند منطقه خشک و نیمه‌خشک گزارش کردند که الگوریتم SEBAL در بسیاری از مناطق مورد مطالعه از دقت بالاتری برخوردار بوده و در اغلب موارد عملکرد بهتری نسبت به WaPOR در برآورد تبخیر–تعرق واقعی ارائه داده است. در پژوهش حاضر نیز الگوریتم SEBAL مقادیر ET_a را با خطای کمتر، RMSE پایین‌تر و ضریب تبیین بالاتر در مقایسه با WaPOR برآورد نمود که مؤید کارایی مناسب این الگوریتم در شرایط حوز دریاچه ارومیه است.

تفاوت مشاهده‌شده در نتایج الگوریتم SEBAL را می‌توان تا حدی به ماهیت فیزیکی این مدل و استفاده از مؤلفه‌های بیلان انرژی سطح زمین نسبت داد. این الگوریتم با بهره‌گیری از داده‌های تابش، دمای سطح زمین و خصوصیات پوشش گیاهی، قادر است تغییرات مکانی و زمانی تبخیر–تعرق را با جزئیات بیشتری بازنمایی کند. از سوی دیگر، اراضی کشاورزی حوزه دریاچه ارومیه عمدتاً دارای الگوی کشت متنوع، اندازه قطعات متفاوت و مدیریت‌های آبیاری گوناگون هستند که سبب ناهمگنی مکانی بالایی در منطقه می‌شود. در چنین شرایطی، مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی نظیر SEBAL توانایی بیشتری در بازتاب شرایط واقعی مزرعه دارند. از سوی دیگر، اختلاف مشاهده شده بین مقادیر برآوردی WaPOR و اندازه-گیری‌های مزرعه‌ای احتمالاً تا حدودی ناشی از مقیاس مکانی بزرگتر داده‌های ورودی و استفاده از پارامترهای منطقه‌ای و جهانی در فرآیند برآورد است. با توجه به اینکه تفکیک مکانی محصول WaPOR حدود ۲۴۸/۲ متر (معادل تقریباً ۶/۲ هکتار) است، به‌منظور کاهش اثر محدودیت تفکیک مکانی، تنها مزارعی با مساحت بیش از ۶/۲ هکتار برای مقایسه انتخاب شد. همچنین، مقادیر ET_a از چندین نقطه واقع در داخل محدوده هر مزرعه استخراج و میانگین آن‌ها به‌عنوان مقدار نماینده هر مزرعه در نظر گرفته شد .با وجود این، احتمال بروز پیکسل‌های مختلط و اثرات حاشیه‌ای، به‌ویژه در نواحی مرزی مزارع، به‌طور کامل قابل حذف نیست؛ زیرا بخشی از پیکسل‌های WaPOR ممکن است ترکیبی از پوشش گیاهی، خاک و کاربری‌های مجاور را شامل شوند. این موضوع می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در اختلاف بین مقادیر برآوردی WaPOR و داده‌های اندازه‌گیری‌شده مزرعه‌ای باشد و در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. این مسئله به‌ویژه در مزارع و باغات کوچک‌مقیاس حوزه دریاچه ارومیه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا بخشی از پیکسل‌های ماهواره‌ای ممکن است شامل ترکیبی از پوشش گیاهی، خاک و کاربری‌های مجاور باشند که دقت برآورد ET_a را کاهش می‌دهد.

از منظر مدیریت منابع آب، دستیابی به برآوردهای قابل اعتماد ET_a و WP_{ET} در حوزه دریاچه ارومیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب در این حوزه بوده و موفقیت برنامه‌های احیای دریاچه مستلزم شناخت دقیق الگوی مصرف واقعی آب در مزارع و باغات است. نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم SEBAL می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش مستمر مصرف آب، شناسایی نواحی با مصرف بالای آب و ارزیابی اثربخشی برنامه‌های افزایش بهره‌وری آب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین عملکرد مناسب هر دو الگوریتم در برآورد WP_{ET} بیانگر ظرفیت بالای فناوری‌های سنجش از دور در ارزیابی همزمان تولید محصول و مصرف واقعی آب است. این موضوع می‌تواند در اصلاح الگوی کشت، افزایش بهره‌وری آب و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در راستای مدیریت پایدار منابع آب حوزه دریاچه ارومیه نقش مؤثری ایفا کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به کاهش منابع آب تجدیدپذیر، افت تراز آب زیرزمینی و تداوم چالش‌های زیست‌محیطی در حوزه دریاچه ارومیه، دستیابی به اطلاعات دقیق از میزان مصرف واقعی آب در بخش کشاورزی یکی از پیش‌نیازهای اساسی برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود. از آنجا که صرفه‌جویی واقعی آب در مقیاس مزرعه و حوزه تنها از طریق کاهش تبخیر–تعرق واقعی محصول (ET_a) امکان‌پذیر است، استفاده از شاخص‌هایی نظیر ET_a و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) می‌تواند تصویر واقع‌بینانه‌تری از وضعیت مصرف آب و کارایی تولید در سامانه‌های کشاورزی ارائه دهد. در این میان، فناوری‌های سنجش از دور با قابلیت پایش گسترده مکانی و زمانی، ابزار مناسبی برای ارزیابی مصرف آب، شناسایی مناطق بحرانی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطح حوزه به شمار می‌روند.

بر این اساس، پژوهش حاضر در ۲۶ مزرعه/ باغ واقع در حوزه آبریز دریاچه ارومیه انجام شد. محصولات غالب مورد بررسی شامل گندم، سیب‌زمینی، یونجه، چغندرقند، آفتابگردان، پیاز، کدو آجیلی، گوجه‌فرنگی، ذرت، سیب، گردو، بادام، انگور و آلو بودند که به دلیل سهم قابل‌توجه آن‌ها در مصرف آب کشاورزی منطقه، نقش مهمی در برنامه‌های احیای دریاچه ارومیه دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو الگوریتم SEBAL و WaPORقابلیت برآورد تبخیر–تعرق واقعی و بهره‌وری واقعی آب را در اراضی کشاورزی حوزه دریاچه ارومیه دارند، اما عملکرد آن‌ها یکسان نیست. مقایسه نتایج با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بیانگر آن بود که الگوریتم SEBALدر بازنمایی شرایط واقعی مزارع و باغات منطقه از دقت بیشتری برخوردار بوده و برآوردهای آن به مقادیر اندازه‌گیری‌شده نزدیک‌تر است؛ به‌طوری‌که در برآورد تبخیر–تعرق واقعی، مقادیر ET_a حاصل ازSEBAL به‌طور متوسط ۱۸/۶۵ درصد کمتر از مقادیر مزرعه‌ای بودند، در حالی که این میزان برای WaPOR حدود ۲۲/۷۸ بود. این برتری را می‌توان به ماهیت فیزیکی مدل و بهره‌گیری از مؤلفه‌های بیلان انرژی سطح زمین نسبت داد که امکان بازتاب بهتر ناهمگنی فضایی اراضی کشاورزی و شرایط واقعی مدیریت آب را فراهم می‌کند.

همچنین نتایج نشان داد که هر دو الگوریتم، با وجود تفاوت در برآورد تبخیر–تعرق واقعی (ET_a)، قابلیت مناسبی برای برآورد بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) در شرایط مورد مطالعه دارند. شاخص (WP_{ET}) با بیان مقدار زیست توده تولید شده به ازای واحد تبخیر–تعرق واقعی، امکان ارزیابی همزمان عملکرد تولیدی و میزان آب واقعی مصرف شده توسط پوشش گیاهی را فراهم می‌کند و از این نظر، در مقایسه با شاخص‌های متداول بهره‌وری آب که معمولا براساس آب آبیاری یا آب ورودی به مزرعه محاسبه می‌شوند، ارتباط مستقیم‌تری با مصرف واقعی آب توسط گیاه دارد. با این حال، اختلاف در مقادیر ET_a برآوردشده توسط دو الگوریتم، به دلیل قرار گرفتن ET_a در مخرج رابطه محاسبه WP_{ET} ، موجب تفاوت در مقادیر بهره‌وری آب نیز می‌شود. بر این اساس، انطباق بیشتر نتایج SEBAL با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، بیانگر عملکرد مناسب‌تر این الگوریتم در برآورد WP_{ET} تحت شرایط مورد مطالعه است؛ به‌گونه‌ای که اختلاف برآورد WP_{ET} این الگوریتم با مقادیر مزرعه‌ای ۲۱/۷۰ درصد بود، در حالی که این اختلاف برای WaPORبه ۲۷/۲۰ درصد رسید. در عین حال، قابلیت WaPORدر ارائه همزمان اطلاعات مربوط به ET_a و زیست‌توده، استفاده از این سامانه را برای پایش منطقه‌ای بهره‌وری آب و ارزیابی ارتباط میان مصرف واقعی آب و تولید زیست‌توده در مقیاس‌های بزرگ امکان‌پذیر می‌سازد.

با توجه به نتایج و محدودیت‌های پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و WaPOR در تعداد بیشتری از مزارع و باغات و طی سال‌های مختلف بررسی شود تا قابلیت تعمیم نتایج به شرایط متنوع اقلیمی و مدیریتی حوزه افزایش یابد. همچنین، با توجه به تفکیک مکانی ۲۴۸/۲ متر محصول WaPOR و احتمال ایجاد پیکسل‌های مختلط در مزارع و باغات کوچک، بررسی اثر اندازه قطعات و استفاده از داده‌های سنجش از دور با تفکیک مکانی بالاتر می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در مورد الگوریتم SEBAL نیز بررسی حساسیت نتایج نسبت به انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد و استفاده از داده‌های مزرعه‌ای برای اعتبارسنجی نتایج در شرایط مختلف منطقه پیشنهاد می‌شود.

فهرست منابع

۱. اسلامی، امیر، ۱۳۹۵. ابزار اندازه‌گیری آب آبیاری در روش‌های آبیاری سطحی. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی.

۲. اصغرزاده، حسن و ثنایی‌نژاد، حسین، ۱۳۸۳. برآورد تبخیر-تعرق گیاهان با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز تنگ کنشت کرمانشاه. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی.

۳. پورمحمدی، سمانه، دستورانی، محمدتقی، و مختاری، محمدحسین، ۱۳۸۸. تعیین و پهنه‌بندی تبخیر-تعرق با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور در حوزه آبریز منشاد یزد. *مجله علمی پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۴(۲)، صص. ۲۱-۳۰.

۴. حیدری، نادر، ۱۳۹۸. تشریح و بررسی شاخص بهره‌وری آب کشاورزی مبتنی بر تبخیر-تعرق (مطالعه موردی حوزه آبخیز کرخه). *نشریه مدیریت اراضی*، ۷(۲).

۵. فرحزا، محمدنوید، نظری، بیژن، لیاقت، عبدالمجید، و علیزاده، حمزه‌علی، ۱۳۹۸. بهره‌وری آب آبیاری محصولات کشاورزی در استان بوشهر. *نشریه مدیریت آب در کشاورزی*. ۶(۱)، صص. ۹۵-۱۰۴.

۶. میان آبادی، آمنه، علیزاده، امین، ثنایی‌نژاد، سیدحسین، قهرمان، بیژن، و داوری، کامران، ۱۳۹۵. ارزیابی الگوریتم سبال برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی حوضه نیشابور-رخ با استفاده از مدل SWAT .*نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۰(۴).

۷. میرزایی، فرهاد، کشاورز، محمدرضا، و وظیفه‌دوست، مجید، ۱۳۹۷. توسعه الگوریتم SEBAL-SM به منظور محاسبه تبخیر-تعرق واقعی به کمک سنجش از دور. *مجله مهندسی منابع آب*، ۱۱(۳۸)، صص. ۱۰۷-۱۲۸.

8. Ahmadi, M., Karimi, P. and Bastiaanssen, W.G.M., 2024. Assessment of wheat water use, biomass and water productivity using SEBAL and Landsat data in Urmia basin, Iran. *Agricultural Water Management*, 290, pp. 106–118.
9. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*.Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 300 p.
10. Bala, A., Rawat, K., Misra, A.K. and Srivastava, A., 2016. Assessment and validation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and lysimeter data of IARI agricultural farm. *Geocarto International*, 31(7) , pp.1–26. doi: **10.1080/10106049.2015.1076062**
11. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, 212–213, pp.198–212. **doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4**
12. Biradar, C., Govind, A., Nangia, V., Mostafa, R.G.I., Zaitouna, R., Jomaa, I., Mazahrih, N., Mosaad, A., El Meknassi, E., Mansouri, A., Haddad, M. and Swelam, A., 2021. Output 9: Comparison between field data and remote sensing data analyzed: Comparing evapotranspiration retrieved through various remote sensing-based models with ground measured data. *ICARDA Technical Report*, 23 December 2021.
13. Doorenbos, J., and Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 24*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
14. FAO, 2024. Comparison of WaPOR and METRIC evapotranspiration estimates in Urmia Lake basin. *Food and Agriculture Organization Technical Report*, Rome.
15. FAO, 2023. *WaPOR database: Monitoring water productivity in Africa. Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome.
16. Heidari, H., 2018. Improving water productivity in agriculture. *Agricultural Water Management*, 200, pp.45–56.
17. Hillel, D., 1990. Role of irrigation in agricultural systems. *Irrigation of Agricultural Crops*, Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, pp.5–29.
18. Huang, J., Sehgal, V., Alvarez, L.V., Brocca, L., Cai, S., Cheng, R., Cheng, X., Du, J., El Masri, B., Endsley, K.A., Fang, Y., Hu, J., Jampani, M., Kibria, M.G., Koren, G., Li, L., Liu, L., Mao, J., Moreno, H.A., Rigden, A., Shi, M., Shi, X., Wang, Y., Zhang, X. and

Fisher, J.B., 2025. Remotely sensed high-resolution soil moisture and evapotranspiration: Bridging the gap between science and society. *Water Resources Research*, 61(5), Article e2024WR037929. **doi: 10.1029/2024WR037929**

19. JICA, 2016. *Data collection survey on hydrological cycle of Lake Urmia Basin in the Islamic Republic of Iran: Final report*. Tokyo: Japan International Cooperation Agency and CTI Engineering International Co., Ltd.
20. Jones, H. and Vaughan, R., 2010. *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford: Oxford University Press.
21. Kumar, N. and Hamouda, M.A., 2025. Utility of single-source surface energy balance models in estimation of daily actual evapotranspiration in arid regions. *Hydrological Sciences Journal*, 70(4), pp.664–686. **doi: 10.1080/02626667.2024.2446266**
22. Li, J., Zhang, Y. and Chen, H., 2023. Estimation of regional actual evapotranspiration based on the improved SEBAL model. *Journal of Hydrology*, 619. **doi:10.1016/j.jhydrol.2023.129283**
23. Smith, J., Brown, A. and Johnson, P., 2019. Impact of climate change on lake levels. *Journal of Environmental Studies*. 45(2), pp.123–135.
24. Remote Sensing Research Center (RSRC), 2015. *Estimation of evapotranspiration, costs and the amount of water saving in agriculture (case study: Urmia Lake basin for 2010)*. Tehran: EWRC, Sharif University of Technology.
25. Tesfaye, T., Alemu, B. and Gebremedhin, G., 2025. Comparison of PySEBAL, WaPOR and AquaCrop for wheat evapotranspiration estimation in Middle Awash, Ethiopia, *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 14(2), pp.45–56.
26. Turner, N.C., Rao, M.V. and Black, R., 2004. Water management and agricultural productivity. *Irrigation Science*, 23(3), pp.95–105.
27. Walker, W.R. and Skogerboe, G.V., 1987. *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
28. Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. and Bastiaanssen, W., 2002. *SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land – Idaho Implementation*. *Advanced training and user's manual*, Version 1.0. Kimberly, Idaho: University of Idaho