Publisher: Agricultural Research, Education and Extension Organization

Journal of Water Research in Agriculture

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

Application of Remote Sensing Algorithms to Estimate Rice Actual Water Consumption under Various Planting and Irrigation Methods in Karkheh Watershed

A . Mokhtaran*, A. Gilani, M. Mohammady, and P. Varjavand

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

Associate Prof., Seed and Plant Improvement Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahwaz, Iran. **abdolali.gilani@yahoo.com**

M.Sc.in Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. **mohammady_maryam@yahoo.com**

Assistant Prof., Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, (AREEO), Ahwaz, Iran. **pvarjavand@yahoo.com**

Article Info

Research Article

Received: June 02, 2026
Accepted: November 04, 2026

Keywords: Real evapotranspiration, Rice cultivation, Intermittent irrigation management, SEBAL algorithm, ETLOOK algorithm

Corresponding author's email:
alimokhtaran@gmail.com

Abstract

The present study was conducted to estimate ET_a in the Karkheh Basin (Khuzestan Province) for the rice cultivation period in the 2023-24 crop year. Four rice farms were selected using the traditional method and 4 other farms using Khoshkeh-kari technology. In farm monitoring, important indicators such as irrigation water depth, biomass, crop yield, field water efficiency, ET_a, irrigation water productivity, and actual water use productivity (WP_{ET}) were measured and estimated. Then, using remote sensing technologies, ETLOOK and SEBAL algorithms in the Google Earth Engine (GEE) platform environment, ET_a was estimated for each of the 8 monitored farms. A rice crop map (RCM) was prepared using a machine learning model (MLM) and a random forest (RF) algorithm in the GEE for the study sub-basin to separate traditional and Khoshkeh-kari rice fields, and the spatial changes of ET_a and WP_{ET} at the basin level were determined. Based on the results of this study, the overall accuracy of rice field separation according to cultivation method was 99.65% and the Kappa coefficient was 0.87. In evaluating remote sensing technology, ET_a results showed that the SEBAL algorithm had a very consistent estimate with a difference of about 3% less than field data. Regarding ETLOOK, although this algorithm showed ETa rates 32% and 26% lower than the field data for Khoshkeh-kari technology and traditional method, respectively, it had a good agreement in estimating WP_{ET} with a difference of less than 5%. Accordingly, at the basin level, the Khoshkeh-kari method was able to reduce water resources withdrawal (about 40%) and increased ET_a and WP_{ET} by 13% and 19%, respectively, compared to the traditional method. In examining spatial maps, the results showed that the weighted average ET_a of rice in the Karkheh sub-basin was 8,500 cubic m^3/ha, which, with a cultivated area of over 34,000 hectares, the actual water consumption (ET_a) and withdrawal from water resources (with an average irrigation efficiency of 28%) were 300 and 1,071 Mm^3, respectively, for the rice cultivation period at the basin level. This study quantitatively demonstrated that remote sensing technology can provide accurate information about the spatial distribution of crops, planting area, production, and water resource consumption for decision-makers at different levels.

Cite this article: Mokhtaran, A., Gilani, A., Mohammady, M. and Varjavand, P., 2025. Application of Remote Sensing Algorithms to Estimate Rice Actual Water Consumption under Various Planting and Irrigation Methods in Karkheh Watershed. *Journal of Water Research in Agriculture*, 40(1), pp. 97-121.

DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2026.372930.1116

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه پژوهش آب در کشاورزی

https://wra.areeo.ac.ir

کاربرد الگوریتم‌های سنجش از دور در برآورد آب مصرفی واقعی برنج در روش‌های مدیریتی مختلف کاشت و آبیاری در حوضه کرخه

علی‌مختاران* ، عبدالعلی گیلانی، مریم محمدی و پیمان ورجاوند

استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی ومهندسی کشاورزی،سازمان تحقیقات،آموزش وترویج کشاورزی،کرج،ایران.**alimokhtaran@gmail.com**

دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج‌کشاورزی، اهواز، ایران. **gilani.abdolali@yahoo.com**

دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران .**mohammady_maryam@yahoo.com**

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان،سازمان تحقیقات،آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.**pvarjavand@yahoo.com**

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۳/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۸/۱۳

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق واقعی، کشت غرقاب برنج، مدیریت آبیاری متناوب، الگوریتم SEBAL ، الگوریتم ETLOOK

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:
alimokhtaran@gmail.com

چکیده

پژوهش حاضر به‌منظور تخمین ET_a در سطح حوضه کرخه (بخش خوزستان) برای دوره کشت برنج در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ انجام شد. چهار مزرعه برنج با روش سنتی و چهار مزرعه دیگر با فناوری خ شکه‌کاری انتخاب شد. در پایش مزارع، شاخص‌های مهمی همچون عمق آب آبیاری، زیست‌توده، عملکرد محصول، راندمان آب در مزرعه، ET_a، بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری مصرف واقعی آب (WP_{ET})، اندازه‌گیری و برآورد شد. سپس با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور، الگوریتم‌های ETLOOK و SEBAL درپلتفرم گوگل ارث انجین(GEE)، ET_aبرای هر هشت مزرعه تحت پایش، تخمین زده شد. در گام بعدی ، نقشه گیاهی برنج (RCM) با استفاده از مدل یادگیری ماشین (MLM) و الگوریتم جنگل تصادفی (RF) در سامانهGEE برای زیرحو ضه مطالعاتی و به‌طوری‌که مزارع برنج با ک شت سنتی و خ شکه‌کاری را از هم تفکیک کند، تهیه و تغییرات مکانی ET_a و WP_{ET} در سطح حوضه مشخص شد. برپایه نتایج این پژوهش، دقت‌کلی تفکیک مزارع برنج برحسب روش کشت ۹۹,۶۵٪ و ضریب کاپای۸۷٪ بود. در ارزیابی فناوری‌های سنجش از دور، نتایج ET_aنشان داد که الگوریتم SEBAL تخمینی بسیار سازگار با اختلافی حدود ۳٪ کمتر نسبت به داده‌های مزرعه‌ای دا شت. در خ صوص ETLOOK، هرچند این الگوریتم میزان ET_a را به‌ترتیب برای فناوری خشکه‌کاری و روش سنتی، ۳۲٪ و۲۶٪ کمتر نسبت به داده‌های صحرایی نشان داد، اما در تخمین WP_{ET}، سازگاری مناسبی با اختلافی کمتر از ۵٪ داشت. براین اساس در سطح حوضه، روش خشکه‌کاری توانسته علاوه برکاهش برداشت از منابع آب (حدود ۴۰٪)، میزان ET_a و WP_{ET} را نسبت به روش سنتی به‌ترتیب ۱۳٪ کاهش و ۱۹٪ ارتقا دهد. در بررسی نقشه‌های مکانی، نتایج نشان داد که میانگین وزنی ET_a برنج در سطح زیرحو ضه کرخه، ۸۵۰۰ مترمکعب بر هکتار بود، که با داشتن سطح زیرکشت بالغ بر ۳۴۰۰۰ هکتار، میزان مصرف واقعی آب (ET_a) و برداشت از منابع آب (با راندمان متوسط آبیاری ۲۸٪) به‌ترتیب، ۳۰۰ و ۱۰۷۱ میلیون مترمکعب برای دوره کشت برنج در سطح حوضه بود. این پژوهش به‌صورت کمی نشان داد که فناوری سنجش‌ازدور می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد توزیع مکانی محصول، سطح کاشت، تولید و میزان مصرف منابع آب برای تصمیم‌گیرندگان در سطوح مختلف فراهم کند.

استناد: مختاران، علی، گیلانی، عبدالعی، محمدی، مریم، و ورجاوند، پیمان، ۱۴۰۵. کاربرد الگوریتم‌های سنجش از دور در برآورد آب مصرفی واقعی برنج در روش‌های مدیریتی مختلف کاشت و آبیاری در حوضه کرخه. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۴۰ (۱)، صص. ۹۷-۱۲۱.

CC BY

DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2026.372930.1116

مقدمه

به‌منظور سازگاری با تغییر اقلیم، تضمین امنیت غذایی، تدوین سیاست‌های کشاورزی و مطالعات اکولوژیکی، دانستن توزیع مکانی و زمانی کشت محصولات، اطلاعات ضروری و پایه‌ای در اختیار ما قرار می‌دهد (جسنر و همکاران، ۲۰۲۵). بر این اساس تولید نقشه‌های دقیق و به‌روز الگوی کشت در هر منطقه، نقشی کلیدی در مدیریت و برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار ایفا می‌کند. در دهه‌های اخیر سنجش از دور پیشرفت‌های بسیاری در زمینه‌های مختلف داشته است. بعد از سال ۲۰۱۷، داده‌های ماهواره‌های سنتینل[1]۱ و سنتینل۲ به‌طور هم‌زمان در دسترس قرار گرفت، که این امر منجر به تولید سری‌های زمانی متراکم با تناوب پنج‌روزه و دقت مکانی ۱۰ تا ۲۰ متر شد. چنین داده‌هایی کمک شایانی به نقشه‌برداری دقیق اراضی کشاورزی کرده است (فیری و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از نخستین مدل‌های توسعه‌یافته برای شناسایی محصولات کشاورزی، بر پایه‌ی دوره رشد گیاه و ویژگی‌های طیفی متمایزکننده آن، از جمله میزان کلروفیل و الگوی بازتاب در باندهای مختلف طیفی، استوار است. مطالعات متعددی نشان داده که تغییرات فیزیولوژیکی و طیفی گیاه در طول دوره رشد، می‌تواند به‌طور مؤثری موجب تفکیک آن از سایر محصولات شود (آشورلو و همکاران، ۲۰۲۲؛ دانگ و همکاران،۲۰۲۰؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۲۴). از طرفی چالش‌های اصلی در روش‌های بررسی دوره رشد گیاه، نیاز به داده‌های زمینی دقیق جهت آموزش و ارزیابی مدل‌ها است. این در حالی است که مدل‌های یادگیری ماشین[2](MLM) می‌توانند با استفاده از داده‌های سنجش از دور و نیاز کمتر به داده‌های زمینی، عملکرد قابل قبولی داشته باشند (هالدر و همکاران، ۲۰۲۵). در مدل‌های یادگیری ماشین، روش‌های نظارت‌شده که از داده‌های چند زمانه و شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده می‌کنند، نتایج قابل‌توجهی را در تمایز انواع محصولات کشاورزی ارائه کرده است (یاداف و همکاران، ۲۰۲۴). از جمله تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به نتایج زاکا و سامات (۲۰۲۴) اشاره کرد، که نشان دادند استفاده از داده‌های سنجش از دور ترکیبی همراه با مدل‌های یادگیری ماشین مانند الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان[3](SVM) و جنگل تصادفی[4](RF)، دقت و کارایی بالایی در شناسایی و نقشه‌برداری محصولات ارائه می‌دهد. در تحقیقی دیگر، عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی پوشش گیاهی تالاب‌های مختلف در اروپا با استفاده از داده‌های چند زمانه سنتینل۲ نشان داد که روش‌های تجمیعی مانند RFو XGBoost[5] عموماً قدرت برآورد بالاتری دارند، درحالی‌که الگوریتم SVM بیشترین دقت کلی را برای تمامی کلاس‌ها کسب کرد (پی‌آسر و ویلا، ۲۰۲۳). در ایران بر اساس مطالعه‌ای با هدف ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل۱ و۲ برای دوره‌های کشت محصولات بهاره و پاییزه در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ برای دشت قزوین، نتایج نشان داد که الگوریتم تقویت گرادیان شدید هرچند با دقت کلی۹۳/۹۴ درصد عملکرد قابل‌قبولی داشت، اما برای کلاس‌هایی با شباهت طیفی، دقت کمتری نسبت به الگوریتم جنگل تصادفی نشان داد. در مقابل، روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) به‌دلیل حساسیت به هم‌پوشانی طیفی، در جداسازی کلاس‌ها، عملکرد ضعیف‌تری داشت و در نهایت روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی با دقت کلی[6] و ضریب کاپای[7] بیش از۰/۹۹ بهترین عملکرد را نشان داد (سلطانی و بهمن‌آبادی، ۲۰۲۵). از سوی دیگر در کاربرد فناوری‌های سنجش از دور می‌توان مطرح نمود که این فناوری‌ها بر اساس شاخص‌های تعریف‌شدهٔ گیاهی، دمای سطح زمین[8] (LST) و رطوبت، دیدگاه زمانی–مکانی را در سطح حوزه آبریز ارائه می‌دهند که می‌تواند علاوه بر تهیهٔ نقشهٔ گیاهی[9] (CM)، در تعیین میزان عملکرد محصول و برنامه‌ریزی آب از نظر

1 - Sentinel
2 - Machine Learning Models
3 -Support Vector Machine
4- Random Forest
5 - Extreme Gradient Boosting
6 - Overall Accuracy
7- Kappa Coefficient
8 - Land Surface Temperature
9 -Crop Mapping

مصرف در پایین‌دست بسیار مؤثر باشد. مبنای این دسته از روش‌ها، برقراری ارتباط رگرسیونی بین شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای نظیر شاخص نرمال تفاوت پوشش گیاهی[10](NDVI) با شاخص‌های گیاهی که در بالا ذکر شد و یا شاخص‌های آبی نظیر شاخص سطح برگ[11](LAI) و یا زیست‌توده[12](Bio) سطوح گیاهی است. چنانچه بتوان ارتباطی بین شاخص‌های مورد اشاره با آب برداشت‌شده و محصول تولیدی برقرار نمود، امکان برآورد بهره‌وری واقعی مصرف آب[13](WP_{ET}) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با هزینه‌ای بسیار کمتر مالی و زمانی از شرایط مزرعه‌ای میسر می‌شود (آدامالا و همکاران، ۲۰۱۶). بر این اساس در سال‌های اخیر برآورد آب مصرفی واقعی[14](ET_a)، تعیین Bio و میزان WP_{ET} با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، با وضوح زمانی-مکانی بالا که می‌توانند در مقیاس‌های میدانی و همچنین مقیاس جهانی استفاده شوند، به‌طور گسترده مورد استفاده قرارگرفته است (بیسپو و همکاران، ۲۰۲۲). بر این اساس، الگوریتم‌های متعددی در استخراج ET_a با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسعه‌یافته که از آن جمله می‌توان به SEBAL[15] اشاره کرد. SEBAL با استفاده از معادله تراز انرژی سطح زمین و پارامترهای دمای سطح، بازتابندگی، تابش خالص و شاخص‌های پوشش گیاهی، شار حرارتی نهان تبخیر را محاسبه و از آن ET_a را برآورد می‌کند (باستیان‌سن و همکاران، ۲۰۱۲). امروزه سازمان FAO، سامانه دسترسی آزاد به بهره‌وری آب را با هدف پوشش دادن کشورهای دچار بحران آب در آفریقا و خاورمیانه ایجاد کرده که برآورد ETa در پایگاه داده‌ای Wapor[16] یکی از مهم‌ترین محصولات این سامانه است (جوادیان و همکاران، ۲۰۱۹). پایگاه Wapor، میزان تعرق (T) و تبخیر (E) را به‌صورت جداگانه بر اساس الگوریتم ETLook برای آفریقا و خاورمیانه به‌صورت ۱۰روزه، ماهانه، فصلی و سالانه با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متری برآورد می‌کند و مقدار آب‌مصرفی واقعی را به‌صورت مجموع مقادیر تبخیر-تعرق در نظر می‌گیرد (باستیانسن و همکاران، ۲۰۱۲؛ جوادیان و همکاران، ۲۰۱۹؛ سامین و همکاران، ۲۰۱۲؛ فائو، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰). الگوریتم ETLook در محاسبه بیلان انرژی به جای دمای سطح، از رطوبت خاک و از سنسور مایکروویو غیرفعال به‌دست آمده استفاده می‌کند. از مزایای این الگوریتم این است که در روزهای ابری کارایی خود را در محاسبه تبخیر-تعرق از دست نمی‌دهد (RSRC, 2017). (راتشیدانا و همکاران، ۲۰۲۴)، در مطالعه‌ای در جنوب آفریقا با بررسی عملکرد چند الگوریتم سنجش از دور از جمله SEBAL در مقایسه با داده‌های لایسیمتری، نشان دادند که این الگوریتم در برآورد ET_a بیشترین همبستگی ($R = 0.91–0.96$)و پایین‌ترین شاخص‌های خطا (RMSE) را در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری داشته که بیانگر قابلیت بالای این الگوریتم در مناطق خشک کشاورزی است. در مطالعه دیگری، نتایج مقایسه‌ای میزان تبخیر-تعرق بر اساس SEBAL در محیط گوگل ارث انجین[17](GEE) با داده‌های لایسیمتری نشان داد که این ابزار قادر به تولید ET_a با دقت بالا (۹۱٪) برای دوره‌های مختلف رشد گندم است، که بر استفاده این فناوری در برآوردET_a در مقیاس کشاورزی تأکید دارد (بابولی و همکاران، ۲۰۲۴). در به‌کارگیری پروداکت Wapor، بلاچفورد و همکاران (۲۰۲۰)، طی پژوهشی در مناطق کشاورزی کوچک و متوسط مقیاس، تأثیر مقیاس استفاده شده در ارزیابی‌های مکانی بر شاخص‌های عملکرد آبیاری را با روش‌های سنجش از دور از طریق پایگاه داده‌ای Wapor بررسی کردند. در مطالعهٔ یاد شده برای پنج دشت مجهز به شبکه آبیاری، سه شاخص زیست‌توده، آب مصرفی و بهره‌وری آب با تفکیک مکانی ۲۵۰، ۱۰۰ و ۳۰ متر ارزیابی شد. نتایج اهمیت انتخاب پیکسل مناسب توسط پایگاه داده‌ای Wapor را نشان داد.

استان خوزستان در جنوب غربی ایران واقع است، از چالش‌های مهم در این استان، کشت برنج است. کشت

10 - Normalized Difference Vegetation Index
11 - Leaf Area Index
12 - Biomass
13- Evapotranspiration Water Productivity
14 - Actual Evapotranspiration
15 - Surface Energy Balance Algorithm for Land
16 - FAO portal to monitor Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data
17 - Google Earth Engine

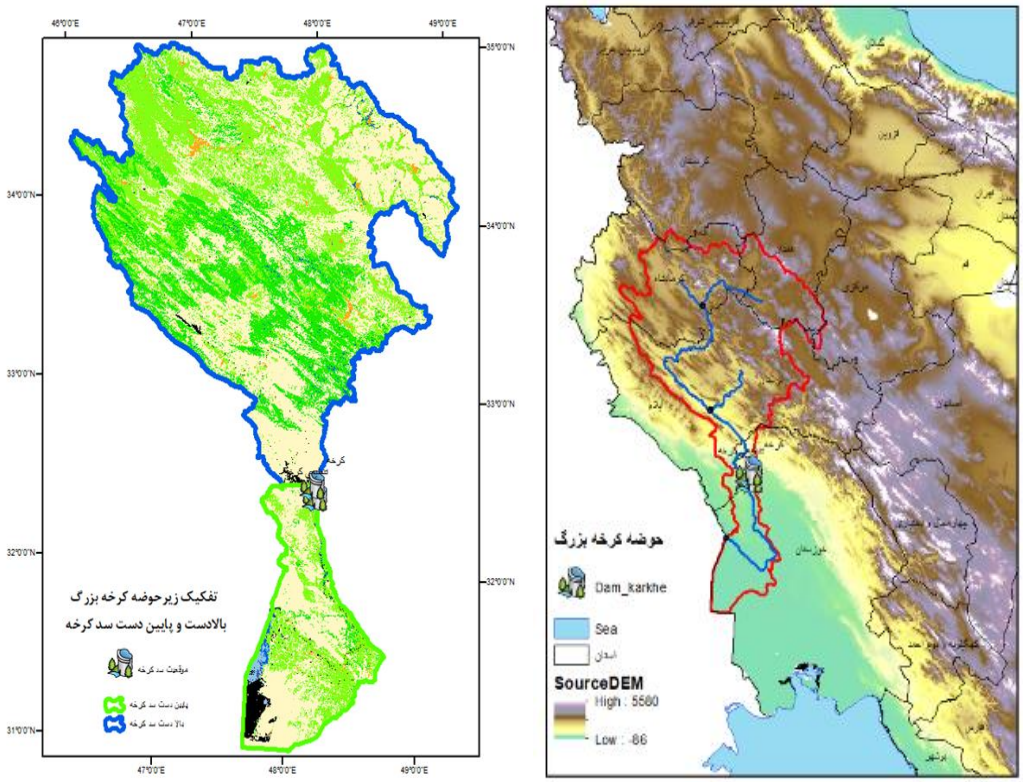
برنج در دشت‌های غربی و قسمت‌هایی از شمال استان که بخشی از حوزه آبریز کرخه بزرگ می‌باشند، آبرسانی به پایین‌دست این حوضه (تالاب هورالعظیم) را بسیار مشکل ساز کرده و عواقب محیط‌زیستی مانند آتش‌سوزی پراکنده در تالاب و ایجاد آلودگی‌های ناشی از آتش و گرد و غبار را برای بسیاری از مناطق استان به ارمغان آورده است. در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری توسط محققین در جهت کاهش حجم آب آبیاری برنج انجام شده است. استفاده از مدیریت آبیاری متناوب برای سامانه‌های مرسوم (نشاکاری با غرقاب دائم و یا کشت بذر جوانه‌دار در محیط مرطوب با غرقاب دائم) (لی، ۲۰۰۱، تابال و همکاران، ۲۰۰۲) و همچنین کشت مستقیم برنج هوازی یا خشکه‌کاری برنج (بومان و همکاران، ۲۰۰۲)، همگی به‌منظور جایگزینی با روش‌های کشت سنتی در دنیا ارائه شده است. این روش‌های مدیریتی اخیراً در استان خوزستان برای کاهش مصرف آب برنج استفاده گردیده و توانسته بر کاهش حجم آب آبیاری این محصول اثرگذار باشد. با وجود تمامی کارهای تحقیقاتی در این زمینه، در حال حاضر شاخص کارآیی مصرف آب برنج در مقایسه شیوه‌های مختلف کاشت و آبیاری در سطح یک دشت و یا زیرحوضه مشخص نیست. بر این اساس علاوه بر نظارت بر سطوح کشت برای محصولی با نیاز آبی بالا مانند برنج، تعیین آب مصرفی و بهره‌وری آب برای روش‌های مختلف کاشت با مدیریت‌های آبیاری متفاوت می‌تواند، جواب دقیق‌تری در بخش کشاورزی از نظر عرضه و تقاضا ارائه دهد. در همین زمینه، اینوی و همکاران (۲۰۲۰) برای شناسایی مزارع برنج با استفاده از تصاویر راداری ستینل ۱ و اپتیکی ستینل ۲، روش طبقه‌بندی جنگل‌های تصادفی (RF) را پیشنهاد دادند. در این پژوهش، نقشهٔ نهایی مزارع برنج با حذف مزارع غیر برنج و با استفاده از شاخص‌های تفاضلی پوشش گیاهی، حد آستانهٔ شاخص رطوبت خاک[18] (LSWI) و پوشش گیاهی بهبودیافته[19] (EVI) از تصاویر ستینل ۲ به دست آمد. بررسی سوابق تحقیقاتی فوق نشان می‌دهد که تدقیق‌سازی استفاده از روش‌های سنجش از دور در مدیریت آب کشاورزی (تعیین شاخص‌های آب مصرفی و بهره‌وری آب) با داده‌های صحرایی بر اساس بیلان آب در مزرعه، دچار کمبود و نقصان است، لذا این مهم باعث می‌شود که نتایج مقایسه‌ای برای انتخاب کاراترین روش‌های سنجش از دور به‌صورت تخمینی باشد. بر این اساس پژوهش حاضر با هدف انجام حسابداری آب برای برنامه‌ریزی دقیق توسط توزیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان آب بخش کشاورزی در محصول برنج به‌عنوان گیاهی پرآب بر و اثربخش در حوضه کرخه (بخش خوزستان) تعریف شد.

مواد و روش‌ها

ا ستان خوز ستان با م ساحت ۶۴۰۵۷ کیلومترمربع بین ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و صفر دقیقه عرض شمالی از خط اســـتوا و ۴۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه طول شـــرقی از نصـــف‌النهار گرینویچ قرار دارد. حوضـــه کرخه (بخش خوزســـتان)، منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضـــر (محدوده با کادر ســـبزرنگ در شـــکل ۱) در پایین‌دســـت ســـد کرخه قرار دارد و تا تالاب هورالعظیم در غرب استان خوزستان گسترده است. حوضه کر خه (بخش خوزســـتان) از شـــمال آن دارای اقلیمی گرم و نیمه‌خشک تا فراخشک در جنوب گسترده است. متوسط بارندگی طبق آمار بلندمدت در این زیر حوضـــه، ۲۲۰ میلی‌متر و متوســـط تبخیر – تعرق پتانسیل، ۲۱۹۰ میلی‌متر در سال است.

18 - Land Surface Water Index

19 - Enhanced Vegetation Index

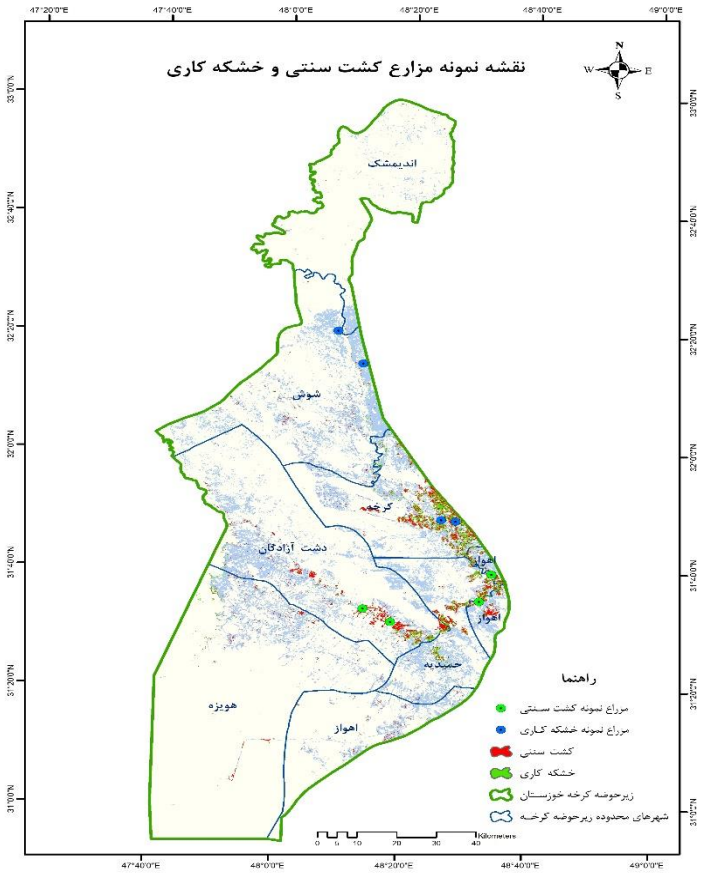


شکل ۱- موقعیت حوضه کرخه در کشور (عکس سمت راست) با مشخص شدن محدوده مورد مطالعه در پایین‌دست سد کرخه (عکس سمت چپ)

Figure 1 - Location of the Karkheh Basin within the country (image on the right), with the study area downstream of the Karkheh Dam indicated (image on the left)

در پژوهش حا ضر، ه شت مزرعه به‌عنوان پایلوت که چهار مزرعه با روش ستی (کشت مستقیم بذر جوانه‌دار در بستر مرطوب) همراه با غرقاب دائم و چهار مزرعه دیگر با فناوری نوین خشکه‌کاری همراه با تناوب آبیاری، انتخاب شد (شکل ۲). اندازه‌گیری‌های میدانی در فصل زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزارع انجام شد. در گام اول، اطلاعات اولیه مزارع پایلوت جمع‌آوری، سپس شاخص‌های مختلف کاربرد و مصرف آب در مزرعه شامل حجم و یا عمق آب آبیاری، زیست‌توده و عملکرد محصول، راندمان آب در مزرعه، آب مصرفی واقعی محصول (ET_a) و بهره‌وری م صرف واقعی آب (WP_{ET}) اندازه‌گیری و برآورد شد. در گام دوم، با هدف تهیه نق شه گیاهی برنج[20] (RCM) در سطح زیرحوضه، از تعداد بسیاری مزارع برنج به‌صورت زمینی مختصات برداشته شد، به‌طوری‌که شیوه‌های مختلف کاشت و مدیریت‌های متفاوت آبیاری را شامل می شد. سپس بر ا ساس مدل یادگیری ما شین و ا ستفاده از الگوریتم جنگل ت صادفی (RF) با تعیین نقاط آموزش[21] و ارزیابی[22] در پلتفرم GEE، نق شه گیاهی (CM) برای زیرحو ضه مطالعاتی که مزارع برنج با کشت ستی و خشکه‌کاری را از هم تفکیک کند، تهیه شد. در گام سوم، با استفاده از الگوریتم‌های ETLOOK (پایگاه داده‌ای Wapor) و SEBAL در محیط GEE، ET_a برای هر هشت مزر عه ت حت پایش، تخمین زده شد. سپس خروجی ET_a از هر دو الگوریتم با داده‌های صحرایی بر اساس بیلان آب در مزرعه مقایسه و صحت‌سنجی شد. درنهایت با هدف تشخیص مکان‌های بحرانی از منظر م صرف و بهره‌وری آب در سطح حو ضه کرخه (بخش خوزستان)، میزان و نقشه تغییرات مکانی ET_a و WP_{ET} برای کشت برنج و مدیریت‌های مختلف کاشت بر اساس الگوریتم‌های سنجش از دور مشخص شد.

20 - Rice Crop Mapping
21 - Train
22 - Test



شکل ۲- موقعیت مزارع پایلوت برنج با روش‌های کاشت و مدیریت آبیاری متفاوت در حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Figure 2 – Location of pilot rice fields with different planting methods and irrigation management practices in the Karkheh Basin (Khuzestan sector)

اندازه‌گیری‌های میدانی

در روش کشت سنتی برنج، آب در کرت‌های بسته به صورت غرقاب دائم ا ست. در این شرایط، برای برآورد ET_a، بیلان آب با اندازه‌گیری حجم آب ورودی تا پر شدن کرت‌ها و اندازه‌گیری دبی خروجی زهکش‌ها برحسب زمان تخلیه که نفوذ عمقی و جانبی را مشخص می‌کند، تعیین شد. اندازه‌گیری دبی ورودی و خروجی آب، برای قطعات به مساحت ۱/۲ هکتار (عرض ۶۰ متر و طول ۲۰۰ متر) بود. این قطعه شامل یک لوله زهکشی فرعی بوده و دارای ۶۰ کرت به ابعاد هر کرت ۲۰۰ متر مربع (عرض ۱۰ متر و طول ۲۰ متر) هست. در سا ما نه خشکه‌کاری برنج، ابعاد هر کرت یا نوار آبیاری به عرض ۱۰ متر و طول ۱۲۰ تا ۱۵۰ متر است (مانند کشت گندم). در سامانه خشکه‌کاری با توجه به تناوبی بودن آبیاری (دور آبیاری سه تا پنج روزه)، با اندازه‌گیری رطوبت خاک قبل آبیاری و تعیین عمق مورد نیاز منطقه ریشه، راندمان کاربرد محاسبه و ET_a برنج در مزرعه به دست آمد. همچنین با استفاده از اطلاعات روزانه داده های هواشناسی ایستگاه‌های نزدیک به مزارع پایلوت، میزان تبخیر- تعرق پتانسیل با روش پنمن-مانتیث-فائو محاسبه و با استفاده از ضرایب گیاهی اصلاح‌شده در منطقه، نیاز خالص مورد نیاز گیاه بدست آمد.

اندازه‌گیری حجم آب آبیاری در مزارع

در مزارع مجهز به سامانه آبیاری سطحی از فلوم‌های WSCتیپ ۴ برای اندازه‌گیری حجم آب آبیاری ورودی ا ستفاده می‌شود. معادله محاسبه دبی ورودی به فلوم WSC تیپ ۴ طبق رابطه (۱) است:

$$Q = 0.0294H^{2.102} \qquad (۱)$$

که در آن: Q، دبی عبوری از فلوم (Lit/S)، H ارتفاع آب در فلوم (cm).

بعد از اندازه‌گیری با اســتفاده از دبی جریان ورودی در مدت زمان آبیاری، حجم آب ورودی به مزارع در هر نوبت آبیاری مشــخص شد.

$$V = Q \times \mathrm{ti} \times 3.6 \qquad (۲)$$

که در آن: t_i، مدت زمان آبیاری (hr)، Q، دبی ورودی (Lit/S)، V، حجم آب ورودی به مزرعه (m^3).

برآورد راندمان کاربرد آب در مزرعه

راندمان کاربرد در مزارع بیانگر تلفات به‌صــورت نفوذ عمقی خواهد بود و در هر نوبت آبیاری، از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$AE = \frac{SMD}{D_{app}} \times 100 \qquad (۳)$$

که در آن: AE، راندمان کاربرد آب (%)، D_{app}، متوســط عمق آب وارد شــده به قطعه تحت آبیاری (mm) بوده که برابر با حجم جریان ورودی به قطعه تحت آبیاری (m^3) تقســیم بر مســاحت قطعه (m^2) و SMD، عمق آب مورد نیاز منطقه ریشــه (mm) است که از رابطه (۴) بدست می‌آید؛

$$SMD = (\theta_{fc} - \theta_i) \times \rho_b \times D_r \qquad (۴)$$

که در آن: θ_i و θ_{fc}، به‌ترتیب رطوبت خاک قبل از آبیاری و حد ظرفیت زراعی ($gr\ gr^{-1}$)، ρ_b، جرم مخصــوص ظاهری خاک ($gr\ cm^{-3}$) و D_r، عمق توسعه ریشه گیاه (mm) هست.

برآورد نمایه بهره‌وری واقعی مصرف آب

اصــطلاح بهره‌وری مصــرف واقعی آب (WP_{ET}) به نســبت مقدار عملکرد محصــول و یا زیســت‌توده بر میزان آب مصرفی واقعی اطلاق می‌شود (معادله ۶).

$$WP_{ET} = \frac{Y}{ET_a} \qquad (۶)$$

که در آن: Y، عملکرد و یا زیست‌توده (kg)، ET_a، آب مصرفی واقعی گیاه در کل فصل کشت (m^3)، WP_{ET}، بهره‌وری مصرف واقعی آب (kg/m^3).

روش شناسایی مزارع برنج در روش‌های مدیریتی مختلف کاشت و آبیاری

در این پژوهش، به‌منظور اجرای طبقه‌بندی برای تهیهٔ نقشهٔ گیاهی برنج (RCM) و دستیابی به سطح زیرکشت محصول از مدل یادگیری ماشین (MLM) با الگوریتم جنگل تصادفی (RF) استفاده شد. روند طبقه‌بندی، شناسایی و تفکیک مزارع برنج در زیرحوضه کرخه خوزستان با توجه به نوع مدیریت کاشت و آبیاری، در دو گام به انجام رسید. گام اول شامل تفکیک مزارع برنج به‌عنوان یک کلاس (طبقه) از محصولات زراعی غیربرنج (در کلاسی دیگر) و گام دوم تفکیک فقط مزارع برنج به دو کلاس برحسب سامانه (روش) کشت و مدیریت آبیاری (کشت ستتی برنج با غرقاب دائم و روش خشکه‌کاری با مدیریت آبیاری متناوب) بود. بر این اساس گام دوم، طبقه‌بندی روی خروجی کلاس برنج از گام اول، صورت گرفت. این بدین معنی است که از گام دوم، اجرای الگوریتم RF محدود به ناحیه‌ای بود که منحصراً برنج در آنجا موجود بود. تاریخ کشت برنج در این زیر حوضه از دههٔ اول خردادماه در شمال حوضه تا ۲۵ خردادماه در مناطق جنوبی برای روش کشت ستتی با غرقاب دائم است. روش خشکه‌کاری معمولاً از دههٔ سوم خردادماه تا دههٔ اول تیرماه است. در این پژوهش، از تصاویر "سنتینل ۲" و "لندست ۹" از سایت https://earthexplorer.usgs.gov و ترکیب کیفی تصاویر این دو ماهواره برای وارد کردن نمونه‌هایی از اراضی برنج و سایر محصولات زراعی[۲۳] (ذرت، یونجه، کنجد و محصولات جالیزی) استفاده شد. تاریخ دریافت تصاویر در یک بازه کشت برنج یعنی دههٔ اول خردادماه (ژوئن) تا اول آبان (اکتبر) بود. با نمایش RGB[۲۴] از باندهای 'B4', 'B8A', 'B12' به‌صورت ترکیب باندی، امکان تشخیص هر چه بهتر اراضی با حوضچه‌های پرورش ماهی و تالاب‌ها فراهم شد. با وارد کردن نمونه‌هایی از کشت‌های زراعی غیربرنج (ذرت، یونجه، کنجد و محصولات جالیزی) در دشت‌هایی که کشت برنج رواج ندارد، ۳۵۴ نمونه برداشت صحرایی انجام شد و کلاسی به نام محصولات غیربرنج در محیط نرم‌افزار ENVI به‌عنوان ROI ذخیره شد. در محیط Arc Map، این نمونه‌ها به فرمت شیپ فایل درآمد و در محیط GEE به‌عنوان نمونه‌های زمینی وارد شد. در مقابل، نمونه‌هایی هم از محصول برنج به همین روال برداشت و در سه کلاس خشکه‌کاری، کشت ستتی

23 - Other Crop

24 - Red-Green-Blue

و مجموع این دو کلاس به‌عنوان "کلاس برنج" تهیه شد. نمونه‌های زمینی کشت برنج، ۷۰۰ نقطه با مختصات مشخص بود که برای مزارع با روش کشت ستی با غرقاب دائم، ۵۰۰ نقطه و برای روش خشکه‌کاری، ۲۰۰ نقطه را شامل شد. در این پژوهش، از پروداکت داینامیک‌ورد[۲۵](DW) کلاس ۴ استفاده شد که مربوط به زراعت است. DW یک مجموعه داده از کاربری/ پوشش زمین[۲۶](LULC) با وضوح بالا در سطح جهانی است که از یادگیری یک سامانه پایه ابری در تصاویر ۱۰ متری ستینل ۲ بهره می‌برد. این پروداکت که از سال ۲۰۱۵ تا به حال استفاده می‌شود، با توجه به عرض جغرافیایی، بین دو تا پنج روزبه‌روز می‌شود (بروان و همکاران، ۲۰۲۲). کلاس‌هایی مانند باغ‌ها، پهنه‌های آبی، نواحی بایر، شهر و مواردی که نیاز نبودند حذف شد. در این شرایط، الگوریتم جنگل تصادفی به‌دقت بالایی از تفکیک مزارع برنج دست پیدا کرد. در این پژوهش برای تفکیک زمین‌های زراعی، تصویرهای ماهواره‌ای در برآورد میزان شاخص‌های گیاهی، رطوبت خاک، آب، میزان تراکم گیاهی، مقدار کلروفیل، زیست‌توده، شاخص سطح برگ و دیگر شاخص‌های مؤثر بررسی و تغییرات این شاخص‌ها برحسب نمونه‌های واقعی برداشت زمینی ارزیابی شد؛ بنابراین، در گام اول (تفکیک مزارع برنج از دیگر محصولات زراعی)، از بین ۱۵ شاخص مؤثر شش شاخص با توجه به ادغام آن‌ها و داشتن دقت کلی و ضریب کاپای بالا، انتخاب شد که در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- شاخص‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی و تشخیص محصول برنج از دیگر محصولات زراعی

Table 1 – Indicators used for the classification and identification of rice compared to other crops

شاخص‌ها Indices	نوع ماهواره Satellite Type	باندها Bands	تفکیک مکانی (متر) Spatial Resolution (meters)
LAI	Sentinel2	B8,B4,B2	10
EVI	Sentinel2	B8,B4,B2	10
LSWI	Sentinel2	B8A,B11	20
ST_B10	Landsat9	B10	30
SWIR2	Sentinel2	B12	20
Composite ‘VV’ &’VH’	Sentinel1	VV,VH	10

در گام دوم (تفکیک محصول برنج برحسب نوع کشت و مدیریت آبیاری)، از بین شاخص‌های تشخیص، پنج شاخص با دقت کلی و ضریب کاپای بالاتر برای اجرای الگوریتم جنگل تصادفی انتخاب شد (جدول ۲).

جدول ۲- شاخص‌های مورد استفاده در تفکیک محصول برنج برحسب روش کشت و مدیریت آبیاری

Table 2 – Indicators used for disaggregating rice products based on cultivation method and irrigation management

شاخص‌ها Indices	نوع ماهواره Satellite Type	باندها Bands	تفکیک مکانی (متر) Spatial Resolution (meters)
LSWI	Sentinel2	B8A,B11	20
AWEInsh[۲۷]	Sentinel2	B3,B8,B11,B12	10&20
ST_B10	Landsat9	B10	30
NPP[۲۸]	WAPOR	-	250
Composite ‘VV’ &’VH’	Sentinel1	VV,VH	10

بر طبق جدول‌های (۱) و (۲) م شاهده می شود که در محاسبهٔ شاخص‌ها از باندهای ماهواره ستینل ۲، لندست ۹ و Wapor ا ستفاده شده ا ست. در این را ستا، برای بالا بردن دقت طبقه‌بندی و کاهش تأثیر پوشش ابر در نتایج برآورد سطح زیر کشت برنج، از تصاویر راداری ماهواره ستینل ۱ نیز ا ستفاده شد. در جدول (۳)، تعاریف شاخص‌ها و مبانی آن‌ها ارائه شده است.

25 - Dynamic World
26 - Land Use Land Cover
27 - Automated Water Extraction Index no shadow
28 - Net Primary Production Index

جدول ۳- روابط توضیحات شاخص‌های منتخب

Table 3 – Explanatory Relationships for Selected Indicators

شاخص‌ها Indicators	روابط محاسباتی* Computational Relationships*		توضیحات Descriptions	منبع Source
سطح برگ **Leaf Area Index (LAI)**	$\text{LAI Index} = 3.618\left(\frac{2.5(\text{NIR}-\text{RED})}{(\text{NIR}+6\times\text{RED}-7.5\times\text{BLUE}+1)}\right)-0.118$	(8)	نمایانگر برگ‌هایی است که از نظر فتوسنتزی فعال هستند.	دلگیدو و همکاران، ۲۰۱۵
گیاهی بهبودیافته **Enhanced Vegetation Index (EVI)**	$\text{EVI Index} = \frac{2.5(\text{NIR}-\text{RED})}{(\text{NIR}+6\times\text{RED}-7.5\times\text{BLUE}+1)}$	(9)	برای تعیین کمیت سبزینگی پو شش گیاهی ا ستفاده می شود. برخی از شرایط جوی و اختلالات پس‌زمینه را ت صحیح می‌کند و در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم حساس‌تر است.	هیت و همکاران، ۲۰۰۲
رطوبت خاک **Land Surface Water Index (LSWI)**	$\text{LSWI Index} = \frac{B8A-B11}{B8A+B11}$	(10)	این شاخص شامل بازتاب موج کوتاه است. نوار فروسرخ، به رطوبت خاک و رطوبت پوشش گیاهی حساس است و می‌تواند برای پایش تغییرات رطوبت خاک استفاده شود.	ایـــنـــوی و همکاران،۲۰۲۰
دمای سطح زمین **Land Surface Temperature (LST)**	ST_B10	(11)	داده‌های LST بازیابی شده از تصاویر باند فروسرخ حرارتی (TIR) در تعیین د مای سطح محصولات و تفکیک برنج از دیگر محصولات استفاده شد. این موضوع با این فرضیه است که مزرعه برنج به‌دلیل وجود رطوبت بالا در سطح خاک در مقای سه با دیگر محصولات زراعی موجود در منطقه، دمای سطح کمتری دارد و تحت تأثیر رطوبت منطقه قرار می‌گیرد.	ا صغری و همکاران، ۲۰۲۳ رونگالی و همکاران، ۲۰۱۸
AWEInsh **Automated Water Extraction Index no shadow**	$\text{AWEINH Index} = 4\times(\text{Green}-\text{SWIR1})-(0.25\times\text{NIR})-(2.75\times\text{SWIR2})$	(12)	این شاخص نشان‌دهنده میزان آب در شرایط انواع مختلف اختلالات محیطی است. هدف استفاده از این شاخص در پژوهش حا ضر، بهبود دقت تفکیک سطح زیر ک شت برنج سنتی به صورت غرقاب دائم از سامانه کشت خشکه کاری با روش مدیریت آبیاری متناوب به‌دلیل تفاوت در میزان آب آبیاری و رطوبت خاک در مزرعه است.	کاپلان و همکاران، ۲۰۱۷ فیپیسا و همکاران، ۲۰۲۱
NPP **Net Primary Production Index**	پروداکت آماده روش Wapor از الگوریتم ETLOOK		این شاخص بیان‌کنندۀ ان است که فتوسنتز چگونه دی اکسیدکربن را به زیست‌توده (بیو ماس) تبد یل می‌کند. تولید اولیۀ خالص (NPP) تفاوت بین زیست‌توده ناشی از روش خشکه‌کاری و کشت سنتی برنج به‌علت تفاوت در تاریخ کاشت و مدیریت آبیاری باعث شد تا از این شاخص به‌عنوان یک فر ضیه مهم برای تفکیک این دو سامانۀ کشت استفاده شود.	https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1

* NIR: Band 8A Sentinel-2, RED: Band 4 Sentinel-2, BLUE: Band 2 Sentinel-2, Green: Band 3 Sentinel-2, SWIR1: Short-Wavelength Infrared (Band11 Sentinel-2, 1610 nm), SWIR2: Short-Wavelength Infrared (Band12 Sentinel-2, 2190 nm)

برای هریک از کلاس‌ها (برنج، غیر برنج و مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری در محصول برنج)، ۷۰ در صد داده‌های زمینی که در بالا مطرح شد، با هدف ارزیابی به‌عنوان نمونه‌های آموزشی و ۳۰ در صد دیگر به صورت تصادفی برای ارزیابی در نظر گرفته شد. دقت کلی و ضریب کاپا با کدنویسی در محیط GEE محاسبه شد.

تولید نقشه های تغییرات مکانی ET_a و WP_{ET} برای روش‌های مدیریتی مختلف کاشت و آبیاری برنج

در این مرحله برای تعیین ET_a و WP_{ET} در سطح مزارع پایلوت و در سطح زیرحوضه براساس نقشه گیاهی برنج (RCM) به تفکیک روش‌های کشت سنتی با غرقاب دائم و خشکه‌کاری با مدیریت آبیاری متناوب از الگوریتم SEBAL و پایگاه داده‌ای Wapor و در محیط پلتفرم GEE استفاده شد. در بهره‌گیری از الگوریتم SEBAL، از مجموعه داده های ماهواره‌ای مادیس[۲۹] و Landsat 8,9 استفاده گردید. برای تعیین دمای سطح زمین (LST) از MOD11A2، برای تعیین شاخص پوشش گیاهی (NDVI) از MOD13A2، برای بازتابندگی و پارامترهای طیفی از Landsat8SR و برای داده‌های تابش و پارامترهای هواشناسی از ERA5 استفاده شد. الگوریتم SEBAL با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی برای تخمین بیلان انرژی در سطح، ابتدا شارگرمای تبخیر برای هر پیکسل تصویر را به‌صورت لحظه‌ای (برای زمان دریافت تصویر) محاسبه می‌کند و سپس برای گام‌های زمانی روزانه و ماهانه تعمیم می‌دهد (RSRC, 2015). در ابتدا با استخراج NDVI، Albedo و LST، برآورد تابش خالص (Rn)، شار حرارتی خاک (G) و شار حرارتی محسوس (H) با استفاده از پیکسل‌های سرد (مکان‌هایی با پوشش گیاهی متراکم) و پیکسل های گرم (مکان هایی فاقد پوشش گیاهی) (Hot/Cold Pixel)، شار نهان تبخیر-تعرق (LE) (W/m^2) برآورد شد (رابطه ۱۳).

$$LE = Rn - G - H \qquad (۱۳)$$

R_n: شار تشعشع خالص در سطح زمین (W/m^2) که از تفاضل تشعشع ورودی- خروجی روزانه محاسبه می‌گردد.

G: شار گرمایی زمین (w/m^2)

H: شار گرمای محسوس به سمت جو (w/m^2)

ET_a با به‌کارگیری الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین و استفاده از تبخیر-تعرق مرجع روزانه و نسبت تبخیر-تعرق واقعی لحظه‌ای(ET_{inst}) آن برآورد می شود. نسبت تبخیر-تعرق واقعی لحظه‌ای (ET_{inst}) با استفاده از میزان تبخیر-تعرق لحظه‌ای و مقدار مرجع آن در زمان تصویربرداری از رابطه (۱۴) محاسبه شد (آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$ETinst = 3600\frac{LE}{\lambda\rho} \qquad (۱۴)$$

LE: شار گرمای نهان تبخیر-تعرق (W/m^2)

λ: گرمای نهان تبخیر آب (J/kg)

ρ: چگالی آب (kg/m^3)

λ در رابطه (۱۴) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 \times To \qquad (۱۵)$$

To: دمای هوا (°C)

با داشتن زمان‌هایی از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8,9، عکس‌های مربوطه از زیرحوضه جمع‌آوری شد. سپس برای ادامه محاسبات، هر تصویر در محیط ArcMap اجرا و اطلاعات مربوط به تصویر برای هر کدام از مزارع انتخابی خوانده و مقدار تبخیر-تعرق لحظه‌ای (ET_{inst}) برای آن‌ها در زمان تصویر که معمولاً بین ساعت‌های ۱۰:۲۸ تا ۱۰:۳۲ صبح بود، مشخص شد. آلن و همکاران (۲۰۰۶) برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع ساعتی، در معادله استاندارد پنمن-مانتیث فائو تغییراتی ایجاد کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از همان پارامترهای روزانه اما با مقیاس ساعتی، بین مجموع تبخیر-تعرق ساعتی با تبخیر-تعرق روزانه اختلاف ایجاد می‌کند. بر این اساس از بازه‌های زمانی کوتاه‌تر برای اصلاحات و استاندارد سازی محاسبات استفاده کردند. در این روش، برای ساعات روز

29 - MODIS

(R_n>0) مقاومت سطحی را (rs=50 m/s) و ضرایب C_n و C_d به‌ترتیب ۲۷ و ۰/۲۴ اعمال شد. برای ساعات شبانه (R_n<0) مقاومت سطحی (rs=200m/s) و ضرایب C_n و C_d به‌ترتیب ۳۷ و ۰/۹۶ در نظر گرفته شد. زمانی که معادلات پارامترها برای ρ، ra و λ ساده شوند و در معادله پنمن-مانتیث فائو جایگذاری شوند، نسخه‌ی کاهش‌یافته مدل پنمن-مانتیث فائو حاصل می‌شود که نتایج آن نیز توسط (ASCE-EWRI, 2005) تائید شده است (رابطه ۱۶).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (16)$$

در آن؛ ET_0 برحسب (mm/h) برای گام‌های ساعتی محاسبه می‌شود. C_n (K.mm.s^3/ mg.h) و C_d (s/m) ضرایبی هستند که بسته به گام زمانی محاسبه تغییر می کنند. با داشتن مقادیر پارامترهای معادله (۱۵) و با اخذ R_n در همان ساعت گذر ماهواره از اطلاعات هواشناسی، تبخیر-تعرق ساعتی حاصل شد. بر این اساس، ET_{ref} برای ساعت گذر ماهواره تخمین زده شد و $ET_{r\text{-}24}$ نیز با داشتن اطلاعات مورد نیاز از ایستگاه‌های هواشناسی مربوطه از معادله استاندارد پنمن-مانتیث محاسبه شد. برای محاسبه مقدار تبخیر-تعرق واقعی روزانه(ET_a)، مقادیر لحظه‌ای به‌دست آمده به مقیاس زمانی روزانه تعمیم داده شد. تبخیر-تعرق واقعی روزانه با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین به‌شرح رابطه (۱۷) محاسبه شد (واترز و همکاران، ۲۰۰۲):

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET}{ET_{ref}} \quad (17)$$

$ET_{act\text{-}24}$: تبخیر- تعرق واقعی روزانه (mm/day)

ET: تبخیر-تعرق در لحظه تصویر (mm/hr)

$ET_{r\text{-}24}$: تبخیر-تعرق مرجع روزانه (mm/day)

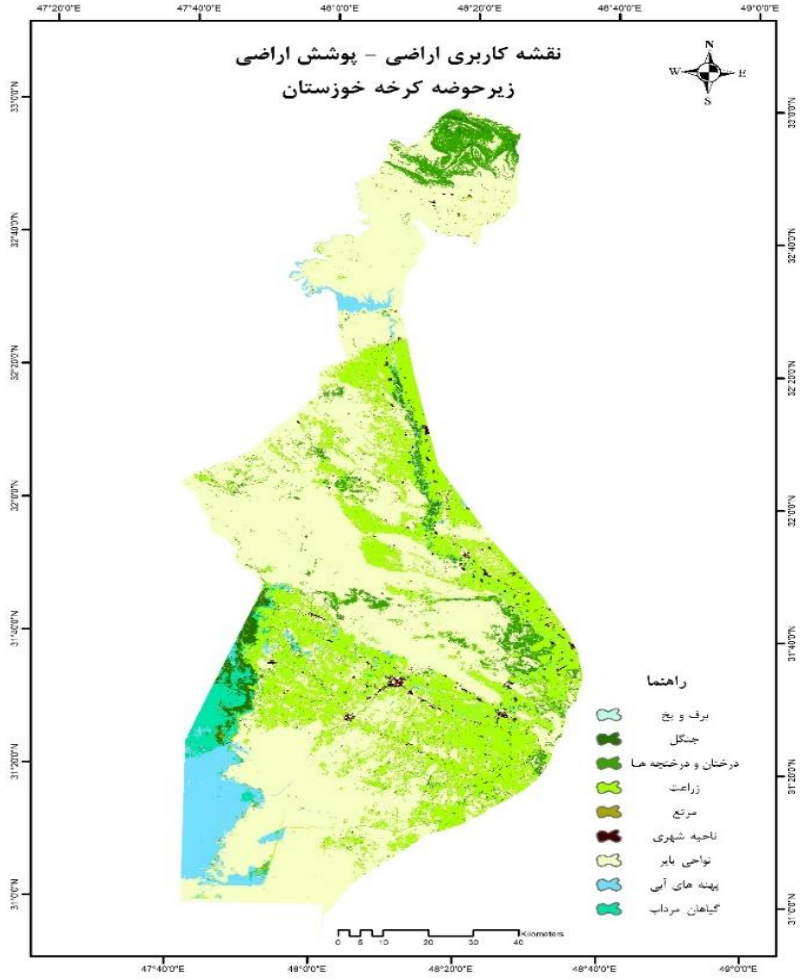
ET_{ref}: تبخیر-تعرق گیاه مرجع در لحظه‌ی عبور ماهواره (mm/hr)

در استفاده از الگوریتم ETLOOK، پروداکت Wapor در کشور از پشتیبانی داده‌های همچون مادیس، سنتینل ۲، لندست، ERA5 برخوردار بوده و دارای تفکیک مکانی ۲۴۸/۲ متر است. نسخه Wapor2.0در ژوئن ۲۰۱۹ راه‌اندازی شد و برای ایران در سطح ۱ ارائه شده است. بر این اساس خروجی‌ها شامل تهیه نقشه‌های ET_a ، Bio و WP_{ET} بود. روش Wapor، داده‌های ET_a وWP_{ET} را بر اساس میانگین ده روزه ارائه می‌دهند که می‌توان به صورت میانگین ماهانه و در نهایت فصلی برآورد کرد. در این پژوهش نقشه‌های تغییرات مکانیWP_{ET} بر پایه زیست‌توده با کدنویسی در محیط GEE با استفاده ازپروداکت Wapor و فرمول‌نویسی در محیط نرم‌افزارArc Map انجام شد. در این پژوهش، هنگام استفاده از روش Wapor و الگوریتم SEBAL در مقیاس مزرعه به‌دلیل تفاوت در تفکیک مکانی این روش‌ها در محاسبه ET_a ، مزارع بزرگ مورد پایش قرار گرفتند که بتوان هر دو روش/ الگوریتم در مزارع سنجش شود. در این شرایط از میان پیکسل‌های موجودی که روی مزارع بر اساس مختصات قرار می‌گیرند، مناسب‌ترین پیکسل (و یا پیکسل‌ها) از نظر حذف اثرات مرزی مزرعه، مورد استفاده قرار گرفت و متوسط‌گیری شد. پیکسل و یا پیکسل‌های مناسب، منظور پیکسلی که در چارچوب مزرعه مورد پایش قرار گیرند. بعد از نتایج خروجی داده های سنجش از دور برای تطبیق و تدقیق داده‌های این روش/ الگوریتم ها، نتایج را با داده‌های مزارع پایش شده مقایسه و تحلیل شد.

نتایج و بحث

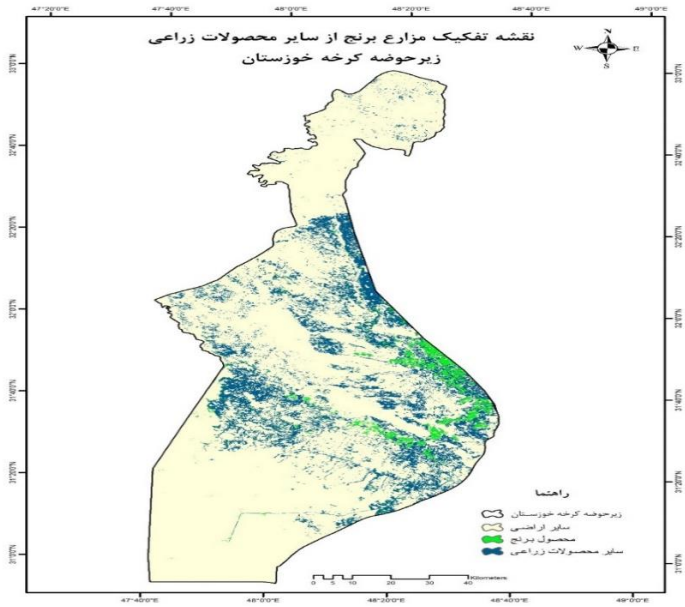
نقشه گیاهی برنج (RCM) و سطح زیرکشت به تفکیک روش کاشت و مدیریت آبیاری

نقشهٔ کاربری / پوشش زمین (LULC) حوضه کرخه (بخش خوزستان) با استفاده از پروداکت DW برحسب طبقه‌بندی‌های مختلف با دقت تقریبی ۹۳ درصد در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- نقشه کاربری/ پوشش زمین در حوضه کرخه (بخش خوزستان)
Figure 3 - Land use/land cover map of the Karkheh Basin (Khuzestan section)

در گام اول تهیه RCM در سطح حوضه که شامل تفکیک مزارع برنج از محصولات زراعی غیربرنج بود (محصولاتی که دارای تاریخ کشت یا دوره رشد هم‌زمان با برنج داشتند)، با استفاده از شاخص‌های جدول (۱)، نتیجهٔ طبقه‌بندی به‌صورت تفکیک مکانی حدود ۱۰ متر با پیکسل‌هایی با مساحت ۰/۰۰۸۵ هکتار به‌دست آمد. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای برآورد بود، به‌طوری‌که با دقت کلی ۹۴/۹۲ درصد در تفکیک برنج از دیگر محصولات زراعی و ضریب کاپای ۰/۸۵، سطح زیر کشت برنج در حوضه کرخه (بخش خوزستان) به‌میزان ۳۴۷۴۵ هکتار برآورد شد (شکل ۴). در گام دوم با هدف تفکیک و تشخیص مزارع برنج برحسب سامانه کشت و مدیریت آبیاری (شاخص‌های جدول ۲)، سطح زیر کشت برنج با روش سنتی و مدیریت آبیاری غرقاب دائم، ۲۴۱۳۲ هکتار و برای فناوری خشک‌کاری با مدیریت آبیاری متناوب، ۱۰۶۱۳ هکتار به دست آمد (جدول ۴). در این شرایط، دقت کلی تفکیک مزارع برنج برحسب نوع کشت در حدود ۹۹/۶۵ درصد و ضریب کاپای ۰/۸۷ بود (شکل ۵).



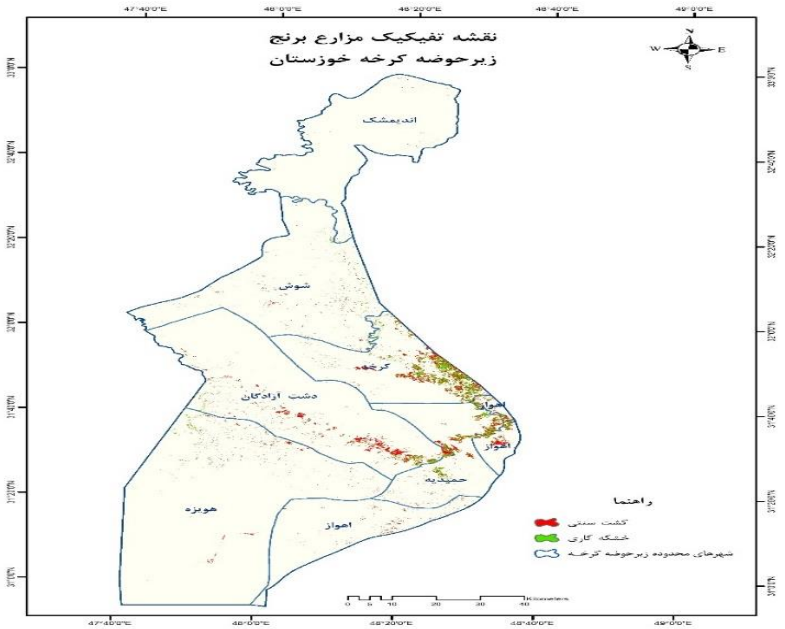
شکل ۴- نقشهٔ موقعیت کشت برنج به‌تفکیک از سایر محصولات زراعی در حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Figure 4 – Map showing the location of rice cultivation, distinguished from other crops, in the Karkheh Basin (Khuzestan sector)

جدول ۴- سطح زیر کشت برنج (هکتار) با توجه به سامانهٔ کشت و مدیریت آبیاری

Table 4 – Rice cultivation area (hectares) by cultivation system and irrigation management

حوضه Basin	سامانه کشت و مدیریت آبیاری Cultivation and Irrigation Management System		سطح زیرکشت Cultivated Area
	کشت سنتی با غرقاب دائم Traditional Cultivation with Continuous Flooding	خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری Dry Seeding with Intermittent Irrigation Management	مجموع سطوح با روش کشت‌های مختلف Total Area under Various Cultivation Methods
کرخه خوزستان Karkheh (Khuzestan)	24132	10613	34745



شکل ۵- نقشهٔ موقعیت مزارع برنج برحسب سامانهٔ کاشت و مدیریت آبیاری در حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Figure 5 – Map showing the location of rice fields based on cultivation system and irrigation management in the Karkheh Basin (Khuzestan sector)

نتایج پایش نشـــان می‌دهد که میزان ســـطح کشـــت با فناوری خ شکه‌کاری برنج با مدیریت متناوب آبیاری ، ۳۰ در صد از میزان سطح کشت برنج را در حوضه کرخه (بخش خوزستان) در برمی‌گیرد. با توجه به شـــکل (۵)، تمرکز کشـــت برنج در این زیرحو ضهٔ در شهر ستان کرخه تا ارا ضی اطراف شهر ستان اهواز بود. در اراضی پایین‌دست محدوده شهرستان‌های حمیدیه، دشت آزادگان و هویزه با وجود این‌که در انتهای حوضـــهٔ کرخه بزرگ قرار دارند، متأسفانه بیشترین سطح زیر کشت برنج با روش سنتی (کشت بذر جوانه‌دار در بستر مرطوب) همراه با غرقاب دائم را در این زیر حوضـــه به خود اختصـــاص داده‌اند (۸۶۲۳ هکتار کشـــت ســـنتی در مقابل ۶۰۶ هکتار خشـــک‌کاری). این موضـــوع از نظر راهبردی می‌تواند تأثیر منفی بســـیاری بر تالاب هورالعظیم به‌عنوان زیست‌بوم منطقه، تأمین آب برای کشت‌های پاییزه و مسائل شرب منطقه داشته باشد.

نتایج تخمین ET_a و WP_{ET} بر اساس الگوریتم‌های SEBAL , ETLOOK در سطح مزارع

اســـاس الگوریتم SEBAL در تخمین ET_a، برآورد ET_0 بر اســاس روش پنمن–مانتیث فائو بر پایه پارامترهای اقلیمی از ایســتگاه‌های هواشــناســی موجود منطقه (جدول ۵) و همچنین زمان دریافت تصـــاویر ماهواره‌ای (۱۸ تصـــویر از ۱۴۰۲/۰۲/۳۱ لغایت ۱۴۰۲/۰۸/۱۵) با هدف تعیین تبخیر–تعرق لحظه‌ای هست.

براین ا ساس نتایج اندازه‌گیری‌های صحرایی در مزارع پایلوت و تخمین ET_a با ا ستفاده از روش/الگوریتم‌های سنجش از دور برای سامانه ک شت و مدیریت‌های مختلف آبیاری برنج به تفکیک در جدول‌های (۶ و ۷) ارائه شده است.

جدول ۵- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Table 5 - Location of meteorological stations in the Karkheh Basin (Khuzestan section)

ایستگاه هواشناسی Weather Station	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	محدوده تحت کشت ایستگاه Cultivated area of the station
دزفول Dezful	48.38	32.4	قسمت‌های شمالی شهرستان شوش The northern parts of Shush County
شوش Shush	48.24	32.19	قسمت‌های مرکزی شوش تا شهرستان کرخه The central parts of Shush, extending to Karkheh County
اهواز کشاورزی Ahvaz Agriculture	48.6	31.3	شهرستان‌های اهواز و حمیدیه Ahvaz and Hamidieh Counties
بستان Bostan	48.01	31.7	شهرستان‌های دشت‌آزادگان و هویزه Dasht-e Azadegan and Hoveyzeh Counties

جدول ۶- ET_a حاصل از داده‌های واقعی و تخمین روش‌های سنجش از دور در مزارع پایلوت کشت برنج با فناوری خشکه‌کاری و مدیریت آبیاری متناوب- حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Table 6 – ETa derived from actual data and estimated via remote sensing methods in pilot rice fields utilizing dry-seeding technology and alternate wetting and drying (AWD) irrigation management –Karkheh Basin (Khuzestan region)

ET_a Wapor (میلی‌متر) (mm)	ET_a SEBAL (میلی‌متر) (mm)	ET_a بیلان آب در مزرعه (میلی‌متر) Water Balance in the Field(mm)	راندمان کاربرد (٪) Application (٪) Efficiency	عمق آب آبیاری (میلی‌متر) Irrigation Water Depth (mm)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	مساحت مزرعه (هکتار) Farm Area (hec)	روستا Village	شهرستان County	کد مزرعه Farm Code
510	780	798	42	1900	48.06	32.38	5.5	بهرام Bahram	شوش Shush	1
530	781	809	33	2450	48.08	32.33	10	شهید رجایی Shahid Rajai	شوش Shush	2
576	815	874	38	2300	48.26	31.83	10	سیدحمادی Seyyed Hammadi	کرخه Karkheh	3
637	820	845	33	2560	48.47	31.84	20	سید خلف Seyyed Khalaf	کرخه Karkheh	4
558	**800**	**832**	**36.5**	**2303**			میانگین Average			

جدول ۷- ET_a حاصل از داده‌های واقعی و تخمین روش‌های سنجش از دور در مزارع پایلوت کشت برنج به روش سنتی با غرقاب دائم- حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Table 7 – ETa derived from actual data and estimated via remote sensing methods in pilot rice fields cultivated using the traditional method of continuous flooding – Karkheh Basin (Khuzestan region)

ET_a Wapor (میلی‌متر) (mm)	ET_a SEBAL (میلی‌متر) (mm)	ET_a بیلان آب در مزرعه (میلی‌متر) Water Balance in the Field(mm)	راندمان کاربرد (٪) Application (٪) Efficiency	عمق آب آبیاری (میلی‌متر) Irrigation Water Depth (mm)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	مساحت مزرعه (هکتار) Farm Area (hec)	روستا Village	شهرستان County	کد مزرعه Farm Code
670	987	950	25	3800	48.42	31.68	30	شیخ طعمه Sheikh Tu'ma	حمیدیه Hamidieh	5
710	884	910	26	3500	48.38	31.6	15	البوعید Al-Bu'ayd	حمیدیه Hamidieh	6
637	892	936	24	3900	48.11	31.54	5	سعیدیه Sa'idiyya	دشت آزادگان Dasht-e Azadegan	7
710	888	882	21	4200	48.03	31.58	10	بستان Bostan	دشت آزادگان Dasht-e Azadegan	8
682	**890**	**919**	**24**	**3850**			میانگین Average			

بر اساس جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، عمق آب آبیاری (حجم برحسب مترمکعب بر هکتار) در مزارع برنج با فناوری خشکه‌کاری همراه با مدیریت آبیاری متناوب به‌میزان ۴۰ درصد نسبت به روش کشت سنتی با غرقاب دائم، کاهش پیدا کرده است. این مهم توسط مسکینی‌ویشکایی و همکاران، (۱۴۰۰) و مختاران و همکاران، (۱۴۰۲)، گزارش شده است. همچنین وانگ و همکاران (۲۰۰۲)، نشان دادند که شیوه کشت خشکه‌کاری در مقایسه با روش کشت مرسوم گلخرابی، بسته به نوع خاک ۳۰ تا ۵۱ درصد، آب کمتری برای تهیهٔ زمین نیاز دارد. دلیل این مهم تفاوت اساسی در فرآیند بستر سازی از جمله حذف گلخرابی، مدیریت کاشت، آبیاری پس از آن به‌خصوص از زمان کاشت تا پایان مرحلهٔ گیاهچه‌ای (۳۰–۲۵ روز)، تناوب آبیاری و دورهٔ رشد کوتاه‌تر است (گوپال و همکاران، ۲۰۱۰؛ گیلانی، ۱۳۹۸؛ یعقوبی و رجبیان، ۱۳۹۸). بر همین اساس راندمان کاربرد در مزارع با فناوری خشکه‌کاری به‌میزان ۵۲ در صد نسبت به روش کشت سنتی با غرقاب دائم ارتقا داشته است. تغییرات محسوس این دو پارامتر (راندمان و حجم آب آبیاری) در سطح مزارع با استفاده از فناوری خشکه‌کاری باعث کاهش میزان برداشت از منابع آبی در سطح زیرحوضه و رهاسازی آن به پایین‌دست با هدف احیا تالاب هور العظیم خواهد شد و می‌تواند اثربخشی محسوسی بر وضعیت کمی و کیفی آب در حوضه کرخه (بخش خوزستان) داشته باشد. همچنین نتایج پایش مزرعه‌ای نشان داد که فناوری خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری توانسته علاوه بر کاهش برداشت از منابع آب، میزان آب مصرفی واقعی (ET_a) را نسبت به روش سنتی با غرقاب دائم به‌میزان ۱۰ درصد کاهش دهد (جداول ۶ و ۷). این مهم به‌دلیل کاهش میزان تبخیر ناشی از تغییر در مدیریت آبیاری از غرقاب کامل مزرعه در روش سنتی به تناوب سه تا پنج روزه در فناوری خشکه‌کاری بر اساس قطع آب در لحظه رسیدن جبهه آب به انتهای کرت های نواری یا حداکثر ارتفاع آب تا پنج سانتی‌متری دیواره کرت‌ها است. بررسی روش/ الگوریتم‌های سنجش از دور در تخمین میزان ET_a برای سامانه کاشت و مدیریت آبیاری متفاوت برنج و مقایسه آن با نتایج بیلان آب در مزارع نشان داد که SEBAL تخمینی بسیار سازگار با اختلافی حدود سه درصد کمتر نسبت به داده‌های صحرایی داشت. این در حالی است که Wapor، ET_a را به‌ترتیب برای فناوری خشکه‌کاری و روش سنتی به‌میزان ۳۲ درصد و ۲۶ درصد کمتر نسبت به داده‌های واقعی نشان داد (جداول ۶ و ۷). این مسئله می‌تواند به‌دلیل ماهیت SEBAL در تعیین ET_a با استفاده از داده های هواشناسی منتج از ایستگاه‌های زمینی در منطقه باشد. این در حالی است که Wapor محاسبات تبخیر– تعرق پتانسیل برای تعیین ET_a را از ماهواره‌های ERA5, MODIS برآورد می‌کند. جوادیان و همکاران (۲۰۱۹)، در بررسی کارایی مزایا و معایب روش های تخمین ET_a در حوزه آبریز دریاچه ارومیه گزارش کرده‌اند، هرچند که محصول جهانی Wapor با بهره‌گیری از جدیدترین روش‌های برآورد توانسته بسیاری از ضعف‌های سایر الگوریتم ها را پوشش دهد، اما نتایج آن با داده های زمینی در حوضه دریاچه ارومیه، اختلاف محسوسی داشت. این در حالی است که SEBAL با توجه به داشتن پایه فیزیکی مناسب و سهولت در اجرا در مقایسه با داده‌های زمینی مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر–تعرق واقعی در این حوضه بود. همچنین آیولا و همکاران (۲۰۱۸)، از همبستگی بالای SEBAL در نتایج تخمین تبخیر–تعرق واقعی در غرب آفریقا با داده های زمینی اندازه‌گیری شده، اشاره می‌کنند. در همین زمینه یوسفی و همکاران (۱۴۰۰)، در بررسی دقت Wapor، مقادیر ET_a بخش کشاورزی را برای یک دوره آماری هفت‌ساله (۲۰۱۶–۲۰۱۰)، منتج از این پروداکت با تبخیر–تعرق حاصل از الگوریتم SEBAL و آمار ایستگاه لایسیمتری در دشت میاندوآب مقایسه کردند. نتایج بیانگر آن بود که در غالب مناطق، مقادیر ET_a حاصل از SEBAL نسبت به Wapor بیشتر بود که با حرکت به سمت ارتفاع دو متر، این اختلاف به بیشترین مقدار خود رسید. در این پژوهش برای تخمین زیست‌توده (Bio) و بهره‌وری واقعی مصرف آب (WP_{ET})، خروجی Wapor در مقایسه با داده‌های پایش مزارع پایلوت نشان داد که نتایج سازگاری مناسبی با داده‌های صحرایی برای سامانه‌های مختلف کشت و مدیریت آبیاری برنج داشت، به‌طوری‌که میانگین داده‌ها اختلاف معنی‌داری نداشتند (جداول ۸ و ۹). بر اساس نتایج این پژوهش، میزان زیست‌توده تولیدی در فناوری خشکه‌کاری نسبت به روش سنتی برای داده‌های مزرعه‌ای به‌میزان سه درصد و بر اساس تخمین Wapor به‌میزان پنج درصد

کمتر بود. این مسئله به‌دلیل تأخیر در تاریخ کاشت فناوری خشکه‌کاری نسبت به روش کشت سنتی است. عامل تفاوت تاریخ کاشت یکی از عوامل تمایز در تشخیص مزارع برنج با روش‌های متفاوت کاشت و مدیریت آبیاری در استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بود. با این‌حال WP_{ET} در فناوری خشکه‌کاری به‌میزان هشت درصد بر اساس نتایج پایش مزرعه‌ای و به‌میزان پنج درصد بر اساس تخمین Wapor نسبت به روش کشت سنتی بیشتر بود. کابانگون و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که روش کشت مستقیم هوازی (خشکه‌کاری) هرچند آب آبیاری را کاهش می‌دهد، اما نسبت به روش نشاکاری سنتی، میزان عملکرد را نیز کاهش می‌دهد. با این همه میزان بهره‌وری فیزیکی در این فناوری روندی افزایشی دارد.

جدول ۸- زیست‌توده و بهره‌وری واقعی مصرف آب (WP_{ET}) حاصل از داده‌های واقعی و تخمین روش WaPOR در مزارع پایلوت کشت برنج با فناوری خشکه‌کاری و مدیریت آبیاری متناوب- حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Table 8 – Biomass and actual water productivity (WP_{ET}) derived from observed data and WaPOR-based estimates in pilot rice fields utilizing dry-seeding technology and alternate wetting and drying (AWD) irrigation management –Karkheh Basin (Khuzestan region)

کد مزرعه Farm Code	شهرستان County	روستا Village	مساحت مزرعه (هکتار) Farm Area (hec)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	عملکرد دانه سفید (کیلوگرم بر هکتار) White Rice Grain Yield (kg/ha)	زیست‌توده شلتوک (کیلوگرم بر هکتار) Paddy biomass (kg/ha)	WP_{ET} بر اساس داده‌های مزرعه‌ای (کیلوگرم بر مترمکعب) WP_{ET} based on field data (kg/m^3)	زیست‌توده از روش Wapor (کیلوگرم بر هکتار) Biomass from the WaPOR method (kg/ha)	WP_{ET} بر اساس روش Wapor (کیلوگرم برمترمکعب) WP_{ET} based on the WaPOR method (kg/m^3)
1	شوش Shush	بهرام Bahram	5.5	32.38	48.06	4300	9550	1.19	9516	1.22
2	شوش Shush	شهید رجایی Shahid Rajai	10	32.33	48.08	4500	9700	1.2	9406	1.2
3	کرخه Karkheh	سیدحمادی Seyyed Hammadi	10	31.83	48.26	4600	10400	1.19	10898	1.33
4	کرخه Karkheh	سید خلف Seyyed Khalaf	20	31.84	48.47	5100	9860	1.17	9602	1.17
		میانگین Average				**4625**	**9878**	**1.19**	**9856**	**1.23**

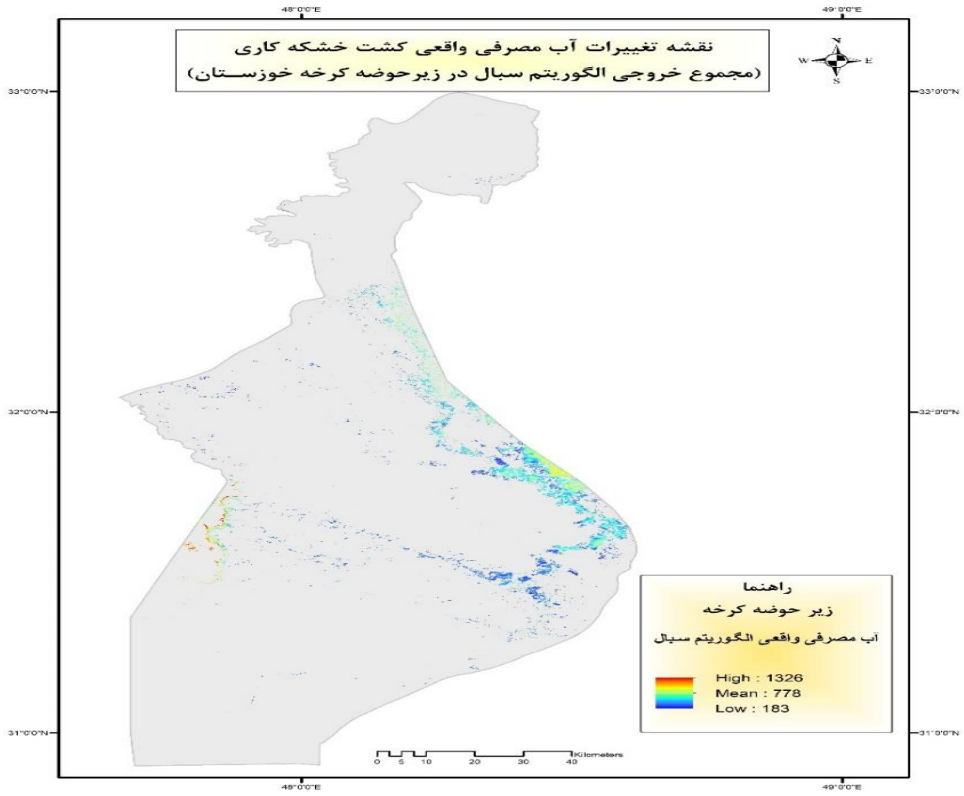
جدول ۹- زیست‌توده و بهره‌وری واقعی مصرف آب (WP_{ET}) حاصل از داده‌های واقعی و تخمین روش WaPOR در مزارع پایلوت کشت برنج به روش سنتی با غرقاب دائم - حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Table 9 – Biomass and actual water productivity (WP_{ET}) derived from observed data and WaPOR-based estimates in pilot rice fields cultivated using the traditional method of continuous flooding – Karkheh Basin (Khuzestan sector)

کد مزرعه Farm Code	شهرستان County	روستا Village	مساحت مزرعه (هکتار) Farm Area (hec)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	عملکرد دانه سفید (کیلوگرم بر هکتار) White Rice Grain Yield (kg/ha)	زیست‌توده شلتوک (کیلوگرم بر هکتار) Paddy biomass (kg/ha)	WP_{ET} بر اساس داده‌های مزرعه‌ای (کیلوگرم بر مترمکعب) WP_{ET} based on field data (kg/m^3)	زیست‌توده از روش Wapor (کیلوگرم بر هکتار) Biomass from the WaPOR method (kg/ha)	WP_{ET} بر اساس روش Wapor (کیلوگرم برمترمکعب) WP_{ET} based on the WaPOR method (kg/m^3)
5	حمیدیه Hamidieh	شیخ طعمه Sheikh Tu'ma	30	31.68	48.42	4250	9400	0.98	9568	1.07
6	حمیدیه Hamidieh	البوعید Al-Bu'ayd	15	31.6	48.38	3700	9600	1.05	9997	1.13
7	دشت آزادگان Dasht-e Azadegan	سعیدیه Sa'idiyya	5	31.54	48.11	4860	10550	1.13	11268	1.26
8	دشت آزادگان Dasht-e Azadegan	بستان Bostan	10	31.58	48.03	5400	11000	1.25	10731	1.21
		میانگین Average				**4553**	**10138**	**1.1**	**10391**	**1.17**

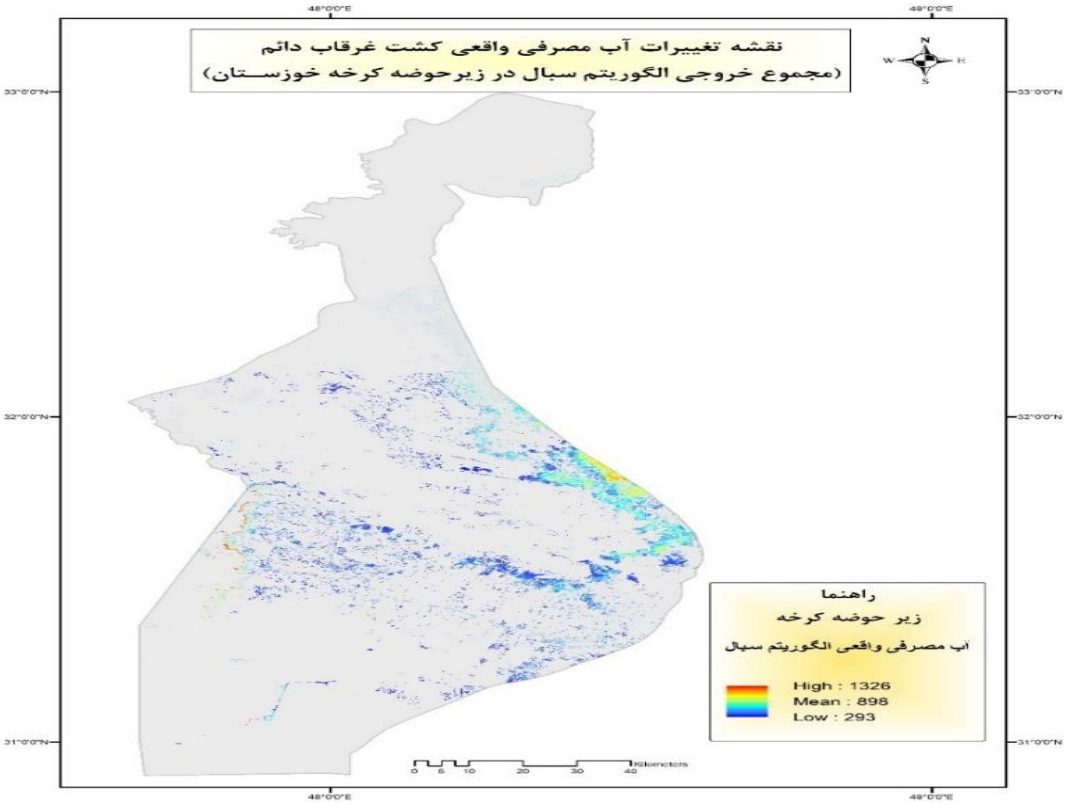
تغییرات مکانی ET_a و WP_{ET} بر اساس الگوریتم بهینه در سطح حوضه

با توجه به کم برآورد بودن Wapor و سازگار بودن نتایج الگوریتم SEBAL با داده‌های صحرایی در تخمین ET_a ، لذا SEBAL، مبنای سنجش مصرف واقعی آب در سطح حوضه خواهد بود (شکل‌های ۶ و ۷). بر اساس شکل‌های یاد شده، بیشترین مصرف آب در قسمت‌های شمال و شمال شرق حوضه کرخه (بخش خوزستان) که دسترسی به برداشت از منابع آب بیشتر هست، اتفاق افتاده است. این مهم در اراضی نزدیک رودخانه کرخه به‌عنوان منبع تأمین آب اراضی و یا میانه دو حوضه آبریز (اراضی شرق شهرستان کرخه که مرز بین دو زیر حوضه کرخه و دز)، بسیار محسوس‌تر است. با حرکت به انتهای حوضه (اراضی پایین‌دست شهرستان‌های دشت آزادگان و هویزه)، مصرف آب ناشی از کاهش شدید آورد رودخانه، کمتر می‌شود. این مسئله عدم توزیع عادلانه آب در سطح حوضه و مدیریت نادرست مصرف آب در بالادست را نشان می‌دهد. برداشت ناعادلانه آب در بالادست حوضه نسبت به مناطق پایین‌دستی برای کشت‌های سنتی با غرقاب دائم برنج به‌دلیل مصرف بی‌رویه آب که افزایش ET_a را به همراه خواهد داشت، بیشتر محسوس است. این مسئله بر تغییرات مکانی WP_{ET} با هر روش کشت و مدیریت آبیاری، اثربخش بود. مناطقی که بهره‌وری بیشتری داشتند، به‌دلیل بالا بودن زیست‌توده محصول ناشی از مصرف آب بیشتر بود که نمی‌تواند نتیجه‌ای اثربخش در سطح حوضه داشته باشد. به‌طوری‌که تغییرات WP_{ET} در کشت سنتی با غرقاب دائم از حداقل ۰/۱ (در انتهای حوضه) تا ۱/۲۳ کیلوگرم به ازای مترمکعب (مناطق بالادست حوضه) متغیر بود (خروجی الگوریتم ETLOOK مبتنی بر پروداکت Wapor). دقت در تغییرات مکانی ET_a (شکل‌های ۶ و ۷)، نشان می‌دهد که فناوری خشکه‌کاری با تناوب آبیاری توانسته مصرف واقعی آب را در سطح حوضه به‌میزان ۱۳ درصد نسبت به روش کاشت سنتی با غرقاب دائم کاهش داده است. بر این اساس با در نظر گرفتن میانگین وزنی مصرف واقعی آب برنج (ET_a) در سطح زیرحوضه کرخه به میزان ۸۵۰ میلی‌متر معادل حدود ۸۵۰۰ مترمکعب به ازای هر هکتار و سطح زیرکشت بالغ بر ۳۴۰۰۰ هکتار (جدول ۴)، نتایج نشان می‌دهد که ۳۰۰ میلیون مترمکعب در دوره کشت از اوایل خرداد تا اوایل آبان، آب از سطح حوضه خارج می‌شود؛ بنابراین با در نظرگرفتن راندمان متوسط وزنی مزارع به‌میزان ۲۸ درصد (جدول‌های ۵ و ۶)، مقدار برداشت از منابع آبی برای کشت برنج در این زیرحوضه، ۱/۰۷ میلیارد مترمکعب بود. این میزان برداشت و مصرف آب را با شرایط وخیم تالاب هورالعظیم که خشک شدن آن اثرات مخرب محیط‌زیستی بسیاری بر شهرهای مرکزی و جنوب غربی خوزستان ایجاد کرده است، می‌توان گره زد. در نهایت می‌توان مطرح نمود که پایش حوضه‌ای WP_{ET} برنج بر اساس پروداکت بهینه Wapor نشان داد که فناوری خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری WP_{ET} (۰/۸۱ کیلوگرم بر متر مکعب) را تا ٪۱۹ نسبت به روش کشت سنتی با غرقاب دائم (۰/۶۸ کیلوگرم بر متر مکعب) ارتقا داده است.



شکل ۶- نقشهٔ تغییرات مکانی ET_a در فناوری خشکه‌کاری برنج با استفاده از الگوریتم SEBAL در سطح حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Figure 6 - Map of spatial variations in ETa for dry-seeded rice cultivation, using the SEBAL algorithm, across the Karkheh River Basin (Khuzestan region)



شکل ۷- نقشهٔ تغییرات مکانی ET_a در روش کشت سنتی برنج با استفاده از الگوریتم SEBAL در سطح حوضه کرخه (بخش خوزستان)

Figure 7 - Map of spatial variations in ETa for the traditional rice cultivation method, using the SEBAL algorithm, across the Karkheh Basin (Khuzestan region)

نتیجه‌گیری

برنج در حوضه کرخه (بخش خوزستان) از مهم‌ترین محصولات تابستانه است که کشت گستردهٔ آن تأثیر بسیاری بر ایجاد تنش آبی در این زیرحوضه و عدم آبرسانی به هورالعظیم و اثرات مخرب محیط‌زیستی ناشی از آن دارد. در این منطقه، برنج به‌صورت سنتی (کشت مستقیم بذر جوانه‌دار در محیط مرطوب) با غرقاب دائم کشت می‌شود، اما در سال‌های اخیر سامانه خشکه‌کاری با مدیریت آبیاری متناوب (دور آبیاری سه تا پنج روزه) ازجمله فناوری‌هایی است که متداول گردیده و توانسته بر کاهش مصرف آب برنج اثرگذار باشد. با این حال تفاوت بین روش‌های کاشت و مدیریت آبیاری برنج از نظر آب مصرفی و بهره‌وری آب در سطح حوضه برای مدیران آب و بهره‌برداران محسوس نیست. لذا پژوهش حاضر به‌منظور تخمین میزان آب مصرفی در مناطق کم‌آب با هدف مدیریت آب کشاورزی در سطح زیرحوضه کرخه خوزستان برای دوره کشت برنج در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فناوری های نوین در کاشت و مدیریت آبیاری برنج مانند خشکه کاری به‌دلیل کاهش حجم آب آبیاری (کاهش میزان برداشت از منابع آب) و کاهش مصرف غیر سودمند آب (تبخیر) برای مناطقی که تلفات عمقی آب آبیاری به منابع شور زیرزمینی پیوسته و قابل استفاده نمی‌باشند، منجر به صرفه‌جویی واقعی آب می‌شود. این پژوهش به‌صورت کمی نشان داد که فناوری سنجش از دور می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد توزیع مکانی محصول، سطح کاشت، تولید و میزان مصرف منابع آب برای تصمیم‌گیرندگان در سطوح مختلف فراهم کند. به‌طوری‌که بر پایه اطلاعات ماهواره‌ای و مدل یادگیری ماشین با الگوریتم جنگل تصادفی، نقشه پراکندگی محصول برنج با تفکیک روش‌های مختلف کاشت و مدیریت آبیاری با دقت ۹۹/۶۵ درصد و ضریب کاپای ۰/۸۷ انجام شد. همچنین الگوریتم SEBAL و پروداکت Wapor بر اساس میانگین وزنی به‌ترتیب در میزان آب مصرفی و بهره‌وری مصرف واقعی آب، با اختلافی کمتر از سه درصد و پنج در صد نسبت به داده‌های صحرایی، توانستند تخمین مناسبی از تغییرات مکانی این دو نمایه مهم آب را در سطح حوضه برای روش‌های مختلف کاشت و مدیریت آبیاری نشان دهند. این گام، راهنمایی مهم برای تصمیم‌گیران و مدیران آب بخش کشاورزی خواهد بود که با کمی سازی مصرف در سطح دشت و یا حوضه در تعیین الگوی کشت بهینه، تطبیق عرضه و تقاضای آب و تعادل بخشی به آب‌های زیرزمینی و سطحی در یک منطقه با هدف حفظ زیست‌بوم و تأمین امنیت غذایی حرکت کنند.

فهرست منابع

۱. گیلانی، عبدالعلی، ۱۳۹۸. مدیریت تولید برنج در روش خشکه‌کاری، موسسه تحقیقات برنج کشور، نشریه فنی، ش ۴۱، ۲۳ صص.

۲. مختاران، علی، گیلانی، عبدالعلی، جلالی، سامی، بهبهانی، لیلا، رضایی، مجتبی، و تجددی‌طلب، کبری، ۱۴۰۲. بررسی تأثیر دور آبیاری در سامانه قطره‌ای نواری بر عملکرد برنج و تغییرات شوری خاک با روش کشت مستقیم در بستر خشک در دشت خوزستان، *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*،۳۷ (۲) ، صص.۱۳۹-۱۵۸. **doi:10.22092/jwra.2023.359561.935**

۳. مسکینی ویشکایی، فاطمه، گیلانی، عبدالعلی، و مختاران، علی، ۱۴۰۰. بررسی تأثیر شیوه کاشت برنج بر روی پشته‌های بلند بر مصرف آب و شوری خاک سطحی در روش خشکه‌کاری، هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، کرج، ایران.

۴. یعقوبی، بیژن، و رجبیان، مریم، ۱۳۹۸. مروری برکشت مستقیم برنج با تأکید بر مدیریت علف‌های هرز، موسسه تحقیقات برنج کشور، *نشریه فنی*، ش ۳۷، ۵۱ صص.

۵. یو سفی، ح سین، کردی، فاطمه، محبتی، فرهاد، و قا سمی، لیلا، ۱۴۰۰. برآورد آب م صرفی بخش ک شاورزی کشـــور ایران و ارزیابی نتایج به‌دســـت آمده از ســـامانه WaPOR با داده‌های زمینی، اکوهیدرولوژی، ۸ (۳)، صص. ۸۳۹-۸۲۵۹. **doi: 10.22059/ije.2021.324474.1512**

6. Adamala, S., Rajwade, Y.A. and Reddy, Y.V.K., 2016. Estimation of wheat crop evapotranspiration using NDVI vegetation index. Journal of Applied and Natural Science, 8(1), PP. 159–166.
7. Allen, R. G., Morse, A., tasumi, M. and Trezza, R., 2002. Evapotranspiration from a satellite-based surface energy balance for the Snake Plain Aquifer in Idaho.Pp. 167-178. Proc USCID Conference. San Luis Obispo.
8. Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L. and Howell, T.A., 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_o by the FAO56 Penman-Monteith method. Agricultural Water Management 81 (2006) 1–22. **doi:10.1016/j.agwat.2005.03.007**.
9. ASCE-EWRI., 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental andWater Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 pp.
10. Asghari Saraskanrood, S., Asadi, B. and Ghale, E., 2023. Caspian Journal of Environmental Sciences, 21(3), PP.725-735. **doi: 10.22124/CJES.2023.6959**.
11. Ashourloo, D., Nematollahi, H., Huete, A., Aghighi, H., Azadbakht, M., Shahrabi, H. S. and Goodarzdashti, S., 2022. A new phenology-based method for mapping wheat and barley using time-series of Sentinel-2 images. Remote Sensing of Environment, 280, 113206.
12. Ayoola, O., Emmanuel, O., Harald, K., Frank, A., Joel, A., Salisu, T., Luitpold, H. and Jan, B., 2018. Comparison of sebal estimated heat fluxes and evapotranspiration using field and remote sensing data in the sudanian savanna in West Africa. International journal of agriculture and Environmental Research. 22:2455-6939.
13. Baboli, N., Ghamarnia, H. and Hafezparast Mavaddat, M., 2024. Estimating wheat evapotranspiration through remote sensing utilizing GeeSEBAL and comparing with lysimetric data. Appl Water Sci 14, 193 (2024). **https://doi.org/10.1007/s13201-024-02248-6.**
14. Bastiaanssen, W.G.M., Cheema, M.J.M., Immerzeel, W.W., Miltenburg, I.J. and Pelgrum, H., 2012. Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. Water Resources Research, 48, W11512.
15. Bispo. R.C., Hernandez. F.B.T., Gonçalves. I. Z., Neale. C.M.U. and Teixeira. A.H.C., 2022. Remote sensing based evapotranspiration modeling for sugarcane in Brazil using a hybrid approach. Agricultural Water Management. 271.107763. **doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107763.**
16. Blatchford, M., M Mannaerts, C., Zeng, Y., Nouri, H. and Karimi, P., 2020. Influence of spatial resolution on remote sensing-based irrigation performance assessment using WaPOR data. Remote Sensing, 12(18), 2949.
17. Bouman, B. A. M., Wang, H., Yang, X., Zhao, J. F. and Wang, C. G., 2002. Aerobic rice (Han Dao): a new way of growing rice in water-short areas, in Proceedings of the 12th InternationalSoil ConservationOrganization Conference (Beijing), PP. 175–181.
18. Brown, C. F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T. and 2022. Dynamic World, near real-time global 10 m land use land cover mapping. Scientific Data. (2022)9:251/ **https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4.**
19. Cabangon, R. J. and Abdullah, N.B., 2002. Comparing water input and water productivity of transplanted and direct-seeded rice production systems.Agricultural Water Management, 57, PP. 11–31.

20. Delegido, J., Verrelst, J., Rivera, J.P., Ruiz-Verdú, A. and Moreno, J., 2015. Brown and green LAI mapping through spectral indices. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 35, PP. 350–358. **doi: 10.1016/j.jag.2014.10.001.**
21. Dong, J., Fu, Y., Wang, J., Tian, H., Fu, S., Niu, Z. and Yuan, W., 2020. Early season mapping of winter wheat in China based on Landsat and Sentinel images. Earth System Science Data Discussions, 1-26.
22. FAO. 2018. WaPOR Database Methodology: Level 1. Remote Sensing for Water Productivity Technical Report: Methodology Series. Rome, FAO. 72 P.
23. FAO. 2020. WaPOR database methodology: Version2 release, Rome.
24. Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. and Proud, S.R., 2014. AutomatedWater Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 140, PP. 23–35. **doi:10.1016/j.rse.2013.08.029.**
25. Gessner, U., Hirner, A., Asam, S., Wenzl, M. and Kuenzer, C., 2025. Combining Machine Learning and Spatio-Temporal Filtering to Map Crop Types of Germany for 7 Years. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.
26. Gopal, R., Jat, R.K., Kumar, V., Alam, M.M., Jat, M.L., Mazid, M.A., Saharawat, Y.S., Mcdonald, A. and Gupta, R., 2010. Direct dry seeded rice production technology and weed management in rice-based systems.
27. Halder, K., Srivastava, A. K., Zheng, W., Alsafadi, K., Zhao, G., Maerker, M. and Ewert, F., 2025. A robust and scalable crop mapping framework using advanced machine learning and optical and SAR imageries. Smart Agricultural Technology, 101354. **https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101354.**
28. Huete, A., Didan, k., Miura, t., Rodriguez, E.P., Gao, X. and Ferreira. L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices.
29. Javadian, M., Behrangi, A., Gholizadeh, M. and Tajrishy, M., 2019. METRIC and WaPOR estimates of evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: comparative analysis and composite assessment. Water, 11(8), 1647.
30. Inoue, S., Ito, A. and Yonezawa, C., 2020. Mapping Paddy fields in Japan by using Sentinel 1 SAR time series supplemented by Sentinel 2 images on Google Earth Engine, Remote Sensing. 12(10):1622.
31. Kaplan, G. and Avdan, U., 2017. Water extraction technique in mountainous areas from satellite images, Journal of Applied Remote Sensing, 11(4), 046002. **doi: 10.1117/1.JRS.11.046002.**
32. Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y. and Ranagalage, M., 2020. Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. Remote Sensing, 12(14), 2291. **https://www.mdpi.com/2072-4292/12/14/2291** .
33. Piaser, E., & Villa, P., 2023. Evaluating capabilities of machine learning algorithms for aquatic vegetation classification in temperate wetlands using multi-temporal Sentinel-2 data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 117, 103202. **https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103202.**
34. Ratshiedana, P, E., Abd Elbasit, M, A, M., Adam, E. and Chirima, J, G., 2024. 'Evaluation of remote sensing algorithms for estimating actual evapotranspiration in arid agricultural environments'. 10.5194/hess-2024-351.
35. Remote Sensing Research Center (RSRC). 2017. Introducing and comparing the FAO Portal and the activities of the Remote Sensing Center in estimating productivity in agriculture sector. Sharif University of Technology.
36. 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), EWRC in Sharif university of Technology.

37. Rongali, G., Keshari, A.K., Gosain, A.K. and Khosa, R., 2018. SplitWindow Algorithm for Retrieval of Land Surface Temperature Using Landsat8 Ther mal Infrared Data. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis. 14(2), PP. 1-19. **doi:10.1007/s41651-018-0021-y.**
38. Li, Y.H., 2001. Research and practiceof water-saving irrigation forrice in China, in Proceedings of an International Workshop, Water-Saving Irrigation for Rice, (Wuhan; Colombo: International Water Management Institute), 135–144.
39. Liang, S., Chen, Y., Liu, J., Ma, H., Li, W., Sucharitakul, P. and Zhang, F., 2024. Mapping paddy rice cropping intensity and calendar in monsoon Asia at 20 m resolution between 2018 and 2021 from multi-source satellite data using a sample-free algorithm. Available at SSRN 4948283 .
40. Samain, B., Simons, G. W., Voogt, M. P., Defloor, W., Bink, N. J. and Pauwels, V. R. N., 2012. Consistency between hydrological model, large aperture scintillometer and remote sensing based evapotranspiration estimates for a heterogeneous catchment. Hydrology and Earth System Sciences, 16(7), pp. 2095-2107.
41. Soltani, M. and Bahmanabadi, B., 2025. Analysis of Machine Learning Algorithms' Performance in Multitemporal Image Classification for Agricultural Management (Case Study: Qazvin Plain). Water and Soil Management and Modelling, 5(3), pp. 54-73. https://doi.org/10.22098/mmws. 2025.16425.1532.
42. Tabbal, D. F., Bouman, B. A. M., Bhuiyan, S. I., Sibayan, E. B. and Sattar, M. A., 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice: case studies in the Philippines. Agric. Water Manag. 56, pp.93–112. **doi: 10.1016/S0378-3774(02)00007-0.**
43. Wang, H., Boumam, B. A. M., Zhao, D., Wang, C. and Moya, P. F., 2002. "Aerobic rice in northern China: opportunities and challenges," in Proceedings of the International Workshop on Water-Wise Rice Production, Water-Wise Rice Production, 8-11 April, eds B. A. M. Bouman, H. Hengsdijk, B. Hardy, P. S. Bindraban, T. P. Tuong, and J. K. Ladha (Los Baños: International Rice Research Institute), PP. 143–154.
44. Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. and Bastiaanssen, W., 2002. SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land – Idaho Implementation. Advanced training and users manual, Version 1.0. Kimberly, Idaho: University of Idaho.
45. Yadav, S., Sharma, S., and Chaudhary, P., 2024. Review on Advancement in Machine Learning and Deep Learning Techniques for Crop Classification. pp. 593-610. **https://doi.org/10.56155/978-81-955020-7-3-53**.
46. Zaka, M. M. and Samat, A., 2024. Advances in Remote Sensing and Machine Learning Methods for Invasive Plants Study: A Comprehensive Review. Remote Sensing, 16(20), 3781. **https://www.mdpi.com/2072-4292/16/20/3781.**