

Preparation of Rice Water Productivity Maps Using Remote Sensing Methods in Khuzestan Watersheds

A. Mokhtaran*^{ID}, M. Mohammady, and H. Dehghanisani

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

MSc in Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. mohammady_maryam@yahoo.com

Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), (AREEO), Karaj, Iran. dehghanisani@yahoo.com

Received: November 2024 and Accepted: December 2024

Abstract


This research aimed to determine rice cultivation map (RCM) for different managements of planting and irrigation (traditional cultivation with permanent flooding and Khoshkeh-kari" with intermittent irrigation) from June to November 2023 in Khuzestan, using vegetation-, temperature- and soil-indicators and remote sensing data. In this research, the temporal-spatial variations of rice water consumption were evaluated and analyzed based on the value of actual water consumption (ET_a) and water productivity (WP_{ET}). The Random Forest algorithm with Machine Learning technique was used to classify and achieve the rice cultivated area in the province. Sentinel 2, Landsat 9 and WAPOR product bands were used to calculate the indices and WAPOR database was used in the GEE platform environment to determine ET_a and WP_{ET}. The results showed that the area under rice cultivation for the traditional system in the entire province is 136,770 ha and 43,172 ha for Khoshkeh-kari method. In these conditions, the overall accuracy of rice field separation according to the type of cultivation was around 99.65% and the Kappa coefficient was 0.87. The total ET_a of rice in 2023 for Khuzestan Province was 1.62 BCM, with 1.27 BCM for the total ET_a of the traditional cultivation and 354 MCM in Khoshkeh-kari. The results showed that, although the farmers tried to avoid crop yield reduction by daily irrigation in the last 45 days of the growth period, the weighted average of ET_a reduction and WP_{ET} improvement in this technology compared to the traditional method was, respectively, 13% and 8%. Meanwhile, as long as the periodicity of irrigation (Irrigation interval of 2 to 4 days) was observed in the Khoshkeh-kari, the rate of ET_a reduction and WP_{ET} improvement in this technology was 24% and 16%, respectively. The results of this research, compared to the field data resulting from the applied research works in the province, estimated the efficiency of water use in rice fields with traditional cultivation at 27% and for Khoshkeh-kari at 34%. This shows that if necessary, rice cultivation should be done by Khoshkeh-kari with intermittent irrigation management and in areas that are in good condition in terms of soil, water, underground water level and drainage engineering.

Keyword: Actual water consumption, Khoshkeh-kari, Permanent flood irrigation, intermittent irrigation

* - Corresponding author's email: alimokhtaran@gmail.com
<https://doi.org/10.22092/jwra.2024.367168.1057>

تهیه نقشه‌های بهره‌وری آب مصرفی برنج با روش‌های سنجش از دور در حوضه‌های

آبریز خوزستان

علی مختاران* , مریم محمدی و حسین دهقانی سانج

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. alimokhtaran@gmail.com

دانش آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

mohammady_maryam@yahoo.com

استاد پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. dehghanisanij@yahoo.com

دریافت: مهر ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

کشت گسترده برنج در استان خوزستان تأثیر بسیاری بر ایجاد تنش آبی در زیرحوضه‌های آبریز استان دارد. برای برنامه‌ریزی دقیق مدیریت آب در سطح کلان برای ایجاد فرصت‌های صرفه‌جویی واقعی آب، این پژوهش با هدف تعیین نقشه پراکنش کشت برنج (RCM) برای روش‌های مختلف مدیریتی کاشت و آبیاری (کشت سنتی با غرقاب دائم و خشکه‌کاری با تناوب آبیاری) از خرداد تا آبان ماه ۱۴۰۲ با استفاده از شاخص‌های گیاهی، دما، خاک و داده‌های سنجش از دور در خوزستان انجام شد. در این پژوهش، تغییرات زمانی-مکانی مصارف آب برنج براساس میزان آب مصرفی واقعی (ETA) و بهره‌وری واقعی آب (WPET) ارزیابی و تحلیل شد. به‌منظور اجرای طبقه‌بندی برای تهیه نقشه پراکنش کشت برنج و دستیابی به سطح زیرکشت محصول، از الگوریتم جنگل تصادفی با تکنیک یادگیری ماشین استفاده شد. در محاسبه شاخص‌ها از باندهای ماهواره سنتینل ۲، لندست ۹ و پروداکت WAPOR بهره‌برداری گردید و برای تعیین ETA و WPET از پایگاه داده‌ای WAPOR در محیط GEE استفاده گردید. بر پایه نتایج، سطح زیرکشت برنج برای سامانه سنتی در کل استان، ۱۳۶۷۷۰ هکتار و برای روش خشکه‌کاری، ۴۳۱۷۲ هکتار بود. در این شرایط، دقت کلی تفکیک مزارع برنج برحسب نوع کشت ۹۹/۶۵٪ و ضریب کاپای ۰/۸۷٪ بود. در سال زراعی ۱۴۰۲، مجموع ETA برنج برای استان خوزستان بالغ بر ۱/۶۲ میلیارد مترمکعب برآورد شد، به طوری که میزان ETA کل برای کشت سنتی ۱/۲۷ میلیارد مترمکعب و در خشکه‌کاری حدود ۳۵۴ میلیون مترمکعب بدست آمد. نتایج نشان داد که با این که کشاورزان با مدیریت آبیاری روزانه در روش خشکه‌کاری تلاش کردند که عملکرد کاهش نیابد، با این حال میزان میانگین وزنی کاهش ETA و ارتقا WPET در این فناوری نسبت به روش سنتی به ترتیب ۱۳٪ و ۸٪ برآورد شد. این در حالی است که تا زمانی که تناوب آبیاری (دور آبیاری دو تا چهار روزه) در روش خشکه‌کاری رعایت می‌شد، میزان کاهش ETA و ارتقا WPET در این فناوری به ترتیب ۲۴٪ و ۱۶٪ بود. نتایج حاصل از این پژوهش در مقایسه با داده‌های صحرایی منتج از کارهای تحقیقات کاربردی استان، راندمان کاربرد آب در مزارع برنج با کشت سنتی را ۲۷٪ و برای روش خشکه‌کاری ۳۴٪ برآورد کرد. بنابراین، در صورت ضرورت، کشت برنج باید به روش خشکه‌کاری با مدیریت تناوب آبیاری و در مناطقی که از نظر خاک، آب، سطح آب زیرزمینی و مهندسی زهکشی در وضعیت مناسبی باشند، انجام گردد.

واژه‌های کلیدی: آب مصرفی واقعی برنج (ETA)، خشکه‌کاری برنج، کشت غرقاب برنج، مدیریت تناوب آبیاری

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: alimokhtaran@gmail.com



و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس تعاریف حسابداری آب، تبخیر-تعرق واقعی (آب مصرفی واقعی) بخشی از آب برداشتی برای بخش کشاورزی است که به صورت سودمند مصرف و البته از دسترس خارج شده و دیگر قابل بازیافت نیست (کریمی و همکاران، ۲۰۱۲). برآورد تبخیر-تعرق با روش سنجش از دور در مناطق کم‌آب می‌تواند به تصمیم‌گیری در مورد بهبود مدیریت آب آبیاری و افزایش بهره‌وری اقتصادی آب کمک کند (فائو و بانک جهانی، ۲۰۲۲). در ایران، تعیین سطح زیر کشت محصولات معمولاً با سه روش کارشناسی، فهرست‌برداری و استفاده از فناوری‌های نوین چون سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی است (ضیاییان فیروزآبادی و همکاران، ۲۰۰۹). فناوری‌های سنجش از دور دقت بالایی از اطلاعات زمانی-مکانی در مورد سطح زیر کشت وسیع و انواع محصولات کشاورزی فراهم می‌کند. همچنین فناوری سنجش از دور، یک سامانه پایش واقعی برای محصول و مراحل توسعه آن در طول فصل رشد، از طریق شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی است. مبنای این دسته از روش‌ها، برقراری ارتباط رگرسیونی بین شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای نظیر شاخص نرمال تفاوت پوشش گیاهی^۲ (NDVI) با شاخص‌های گیاهی و یا آبی نظیر شاخص سطح برگ و یا زیست‌توده سطوح گیاهی است. چنانچه بتوان ارتباطی بین شاخص‌های مورد اشاره با آب برداشت‌شده و محصول تولیدی برقرار نمود، امکان برآورد بهره‌وری آب 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 ETa، تعیین زیست‌توده^۳ (Bio) و میزان بهره‌وری واقعی آب^۴ (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 قرار گرفته است (بیسپو و همکاران، ۲۰۲۲). مزارع برنج قبل از زمان کاشت، غرقابی می‌شوند و مقادیر شاخص پوشش گیاهی

برنج چهارمین غله پرمصرف جهان و غذای بیشتر از نصف مردم، به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه است (فائو، ۲۰۱۹؛ درویش‌زاده و همکاران، ۲۰۱۱؛ توربیک و همکاران، ۲۰۱۷). تولید پایدار برنج، چالشی بزرگ برای سیاست‌گذاران به حساب می‌آید (روی و همکاران، ۲۰۱۶)، از این رو نظارت بر تغییرات فصلی سطوح کشت در مناطق اختصاص داده شده به اکوسیستم‌های محصول برنج برای تضمین امنیت غذایی و توسعه پایدار ضروری است (تورهی و همکاران، ۲۰۲۱). در ایران بیشتر زمین‌های زیر کشت برنج در استان‌های شمالی قرار دارند. به طوری که استان مازندران، ۳۸/۵ درصد، استان گیلان، ۳۱/۹ درصد و استان گلستان، ۹/۹ درصد از کل اراضی شالیزار را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین خوزستان با ۹/۲ درصد و فارس با ۳/۹ درصد در رده‌های بعدی قرار دارند (ایزد دوست و همکاران، ۲۰۱۳)؛ اما شرایط خاص اقلیمی، خشکی و پراکنش نامناسب زمانی-مکانی بارندگی کشورمان ایران، واقعیت‌گریزناپذیری است که هرگونه تولید پایدار مواد غذایی و کشاورزی را منوط به استفاده صحیح و منطقی از منابع محدود آب کشور نموده است (دهقانی‌سانج، ۲۰۱۲). بر این اساس علاوه بر نظارت بر سطوح کشت برای محصولی با نیاز آبی بالا مانند برنج، تعیین آب مصرفی و بهره‌وری آب این محصول، جواب دقیق‌تری در بخش کشاورزی آن‌هم در سطح یک زیر حوضه و یا حوضه آبریز از نظر عرضه و تقاضا خواهد داد. این گام، راهنمایی برای تصمیم‌گیران و مدیران آب بخش کشاورزی خواهد بود که با استفاده صحیح و اقدامات پایدار برای تعیین الگوی کشت بهینه، تطبیق عرضه و تقاضا، حفظ زیست‌بوم و تعادل بخشی به آب‌های زیرزمینی و سطحی در یک منطقه با هدف تأمین امنیت غذایی حرکت کنند. برنامه‌ریزی و مدیریت مصرف آب در سطح یک حوضه، مستلزم آگاهی از رفتار هیدرولوژیکی از جمله تغییرات زمانی-مکانی مؤلفه‌های مهم آن مانند تبخیر-تعرق واقعی^۱ (ETa) است (جوادیان

3 -Biomass

4 -Evapotranspiration Water Productivity

1 -Actual Evapotranspiration

2 -Normalized Difference Vegetation Index

کارآیی پایین الگوریتم درخت تصمیم‌گیری را در شناسایی لبه‌های مزارع برنج را نشان داد. در مطالعه‌ای دیگر در چین، از طبقه‌بندی جنگل تصادفی (RF) و طبقه‌بندی DCC^{۱۱} (شاخص‌های طیفی مشتق‌شده از ماهواره مادیس^{۱۲}، متغیرهای آب و هوایی و توپوگرافی) برای تولید نقشه‌های آبیاری هر استان در محیط گوگل ارث انجین^{۱۳} (GEE) استفاده شد. نتایج نشان داد که نقشه حاصل از دیگر نقشه‌های آبیاری فعلی با دقت کلی ۷۹/۲ درصد بهتر عمل کرد (ژانگ و همکاران ۲۰۲۲). الگوریتم‌های سنجش‌ازدور بر اساس شاخص‌های تعریف‌شده گیاهی، دما و رطوبت، دیدگاه زمانی-مکانی را در سطح حوضه آبریز و یا منطقه ارائه می‌دهند که می‌تواند علاوه بر تهیه نقشه گیاهی^{۱۴}، در تعیین میزان عملکرد محصول و برنامه‌ریزی آب از نظر مصرف در پایین‌دست بسیار مؤثر باشد. بر همین اساس، الگوریتم‌های متعددی برای استخراج تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) سطوح گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسعه‌یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به SEBAL (باستیانسن و همکاران، ۲۰۱۲)، SEBS و METRIC (آلن و همکاران، ۲۰۰۷) اشاره کرد. امروزه سازمان FAO، سامانه دسترسی آزاد به بهره‌وری آب را با هدف پوشش دادن کشورهای دچار بحران آب در آفریقا و خاورمیانه ایجاد کرده است که برآورد ET_a در پایگاه داده‌ای WAPOR 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 ۱۰ روزه، ماهانه، فصلی و سالانه با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متری برآورد می‌کند و مقدار آب مصرفی واقعی را به-صورت مجموع مقادیر تبخیر و تعرق در نظر می‌گیرد (باستیانسن و همکاران، ۲۰۱۲؛ جوادیان و همکاران، ۲۰۱۹؛

در این زمان در کمترین مقدار خود قرار دارند. با رشد و افزایش ارتفاع محصول، مقادیر شاخص پوشش گیاهی افزایش می‌یابند. در این شرایط، با توجه به فنولوژی (طول زمان مدت رشد) و بیشترین مقدار شاخص پوشش گیاهی به کمک نقشه‌های سری زمانی، مقادیر استخراج‌شده از تصاویر اپتیکی تخمین زده می‌شوند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). اینوی و همکاران (۲۰۲۰) برای شناسایی مزارع برنج با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱^۱ و اپتیکی سنتینل ۲، روش طبقه‌بندی جنگل‌های تصادفی (RF)^۲ را پیشنهاد دادند. در ابتدا نقشه اولیه مزارع برنج به کمک طبقه‌بندی تصاویر سنتینل ۱ با الگوریتم جنگل‌های تصادفی تهیه گردید. پس از آن تولید نقشه نهایی مزارع برنج با حذف مزارع غیر برنج از نقشه اولیه و با استفاده از شاخص‌های تفاضلی پوشش گیاهی، حد آستانه شاخص رطوبت خاک^۳ (LSWI) و پوشش گیاهی بهبودیافته^۴ (EVI) از تصاویر سنتینل ۲ به‌دست آمد. در مطالعه‌ای دیگر، لی‌یو و همکاران (۲۰۲۰) برای شناسایی مزارع برنج ضمن استفاده از فنولوژی محصول، از شاخص LSWI، شاخص EVI، شاخص زرد^۵ (YI) و شیب منطقه استفاده کردند. در همین زمینه، ژان و همکاران (۲۰۲۱) برای شناسایی مزارع برنج، استفاده از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری^۶ (DTA) را به کمک ویژگی‌های فنولوژیکی استخراج‌شده از تصاویر سنتینل ۱ پیشنهاد دادند. در مطالعه‌ای توسط (فتحی و شاه‌حسینی، ۱۴۰۲) با بررسی قابلیت‌های نقشه‌های سری زمانی شاخص دمای سطح زمین^۷ (LST) در کنار نقشه‌های سری زمانی شاخص NDVI با استفاده از الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان^۸ (SVM) در ایالت کالیفرنیا آمریکا، مزارع برنج با بالاترین دقت کلی^۹، ۹۴/۲۸ درصد و ضریب کاپای^{۱۰}، ۸۸/۲۹ درصد نسبت به سایر مزارع کشاورزی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها شناسایی شدند. نتایج این تحقیق،

8- Support Vector Machine
9- Overall Accuracy
10 - Kappa Coefficient
11 - Data Cubes Classification
12 - Modis
13 - Google Earth Engine
14 -Crop Mapping

1- Sentinel
2 - Random Forest Classification
3 - Land Surface Water Index
4 -Enhanced Vegetation Index
5 - Yellowness Index
6 - Decision Tree Algorithm
7 - Land Surface Temperature

سامین و همکاران، ۲۰۱۲؛ فائو، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰). بلاچفورد و همکاران (۲۰۲۰b)، طی پژوهشی در مناطق کشاورزی کوچک و متوسط مقیاس، تأثیر مقیاس استفاده شده در ارزیابی‌های مکانی بر شاخص‌های عملکرد آبیاری را با روش‌های سنجش‌ازدور را از طریق پایگاه داده‌ای WAPOR بررسی کردند. در مطالعه مذکور 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. بلاچفورد و همکاران (۲۰۲۰a) در تحقیقی دیگر، مقادیر ETa حاصل از پایگاه داده‌ای WAPOR را با تبخیر-تعرق حاصل از ۱۴ ایستگاه هواشناسی برای مناطق کشت آبی و دیم در منطقه آفریقا مقایسه کردند. همبستگی کلی ETa حاصل از WAPOR با مقیاس نقطه‌ای در مقایسه با اطلاعات حاصل از ایستگاه ها، ۰/۷۱ و میانگین ریشه مربع خطا، ۱/۲ میلی‌متر در روز گزارش شد. کائونه و اوپستال (۲۰۲۰)، گزارشی در مورد بهره‌وری آب کشاورزی برای محصولات ذرت، سورگوم، لوبیا، برنج، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، کلم و پیاز در سه مکان مختلف در موزامبیک (نماتاندا، مواتیزه و بارو) صورت گرفت. در این پژوهش، مدل رشد محصول FAO AquaCrop برای مناطق مورد نظر کالیبره و نتایج شبیه‌سازی بهره‌وری آب برای هر محصول در هر مکان به‌دست آمد. همچنین، در مقیاس زیر حوضه و حوضه برای محاسبه مقادیر پایه بهره‌وری آب با توجه به زیست‌توده از داده‌های پایگاه WAPOR استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مطالعه‌ی انجام‌شده با داده‌های WAPOR در استفاده از داده‌های میدانی برای بدست آوردن میزان بهره‌وری در یک زیر حوضه و یا حوضه برای هر محصول یا محصولات مختلف می‌تواند قابل‌تعمیم و استفاده باشد. یوسفی و همکاران (۱۴۰۰)، پژوهشی را تحت عنوان برآورد آب مصرفی واقعی (ETa) بخش کشاورزی کشور ایران و ارزیابی نتایج به‌دست آمده از سامانه WAPOR با داده‌های زمینی انجام دادند. نتایج بررسی دوره آماری هفت‌ساله

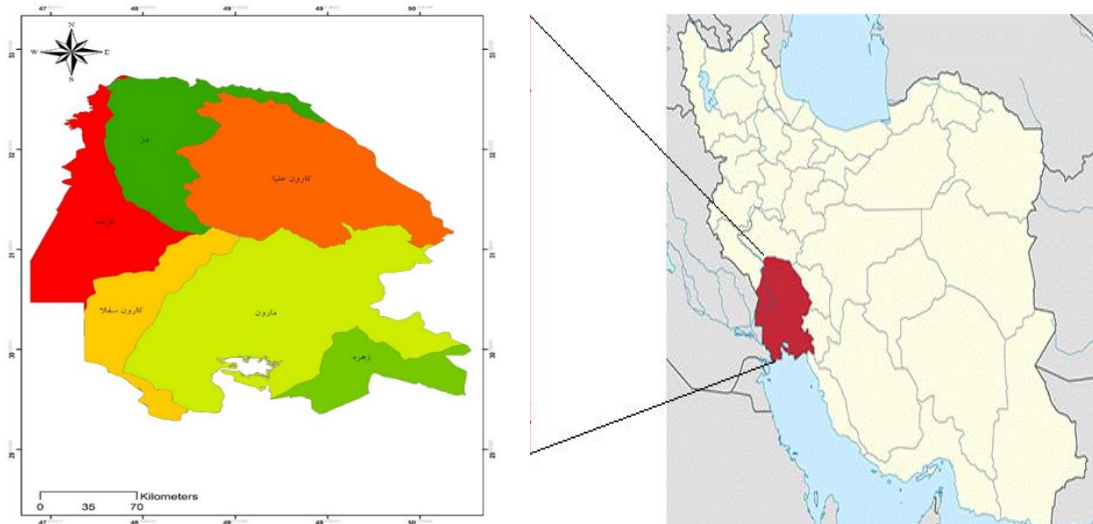
(۲۰۱۶-۲۰۱۰)، بیانگر آن بود که مصرف واقعی آب کشاورزی در سطح کشور و حجم آب آبیاری از سال‌های ۲۰۱۳ به بعد روند افزایشی داشته است. به‌طوری‌که حجم آب مصرفی واقعی بخش کشاورزی در استان‌های خوزستان، تهران، گیلان به‌ترتیب در این دوره آماری بیشترین روند افزایشی را داشتند. برای بررسی دقت سامانه WAPOR، مقادیر آن با تبخیر-تعرق حاصل از الگوریتم SEBAL و آمار ایستگاه لایسیمتری در دشت میاندوآب مقایسه شد. نتایج بیانگر آن بود که در غالب مناطق، مقادیر تبخیر-تعرق الگوریتم SEBAL نسبت به سامانه WAPOR بیشتر بود که با حرکت به‌سمت ارتفاع ۲ هزار متر، این اختلاف به بیشترین مقدار خود می‌رسد. افشاری‌پور و همکاران (۱۳۹۸)، تحقیقی را تحت عنوان ارزیابی میزان بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی و مدل WATPRO برای حوضه آبریز دشت جیرفت به انجام رساندند. در این پژوهش ابتدا تصاویر ماهواره‌ی Landsat 8 در زمان کشت تا برداشت گندم برای سال زراعی (۱۳۹۶-۱۳۹۵) دریافت و پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، مدل WATPRO اجرا شد. زمان استقرار، اوج رشد و برداشت محصول از طریق سری زمانی NDVI در ۶ منطقه تقسیم‌بندی شده، مشخص گردید و بهره‌وری آب گندم محاسبه و نتایج با نقاط کنترل زمینی ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین کمترین میانگین بهره‌وری به‌ترتیب ۰/۸، ۰/۴ و ۰/۵ کیلوگرم در مترمکعب بود. همچنین ضریب تعیین ۷۶/۵ درصد در بررسی رابطه بین میانگین NDVI و بهره‌وری آب به‌دست آمد. در استان خوزستان ۹۱ درصد از آب مورد نیاز کشاورزی توسط آب‌های سطحی تأمین شده و باقیمانده آن از منابع آب زیرزمینی برداشت می‌شود (مختاران و همکاران، ۱۴۰۳). وقوع خشک‌سالی در سال‌های اخیر و لزوم افزایش حق‌آبه محیط‌زیست، باعث شده که شناخت از شرایط فعلی نمایه بهره‌وری آب کشاورزی و چالش‌های موجود در آن بسیار مهم و حائز اهمیت باشد. یکی از این چالش‌ها در استان خوزستان کشت برنج است. در

خوزستان، "برنج" یکی از مهم‌ترین محصولات تابستانه است که کشت گسترده آن (از ۸۰ هزار هکتار در سال‌هایی با محدودیت آبی تا ۲۰۰ هزار هکتار در سال‌های پرآبی)، به‌خصوص در مناطق مرکزی و جنوبی این استان تأثیر بسیاری در ایجاد تنش آبی بر زیر حوضه‌های آبریز جلگه خوزستان دارد (مختاران و همکاران، ۱۴۰۲). در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری توسط محققین در جهت کاهش آب آبیاری و آب مصرفی برنج شده است. استفاده از روش آبیاری متناوب به‌صورت خشک و مرطوب کردن در روش کشت مستقیم برنج هوازی یا خشکه‌کاری برنج (بومان و همکاران، ۲۰۰۲) که به‌منظور جایگزینی با سامانه مرسوم (نشاکاری با غرقاب دائم در محیط گلخراپی) در دنیا ارائه شده، از جمله فناوری‌هایی است که اخیراً در استان خوزستان استفاده گردیده و توانسته بر کاهش مصرف آب برنج اثرگذار باشد (گیلانی و همکاران، ۱۳۹۵). در این راستا به‌نظر می‌رسد روش کشت مستقیم بذر در بستر خشک (خشکه‌کاری) نسبت به دو شیوه رایج در استان خوزستان (کشت نشاء و کشت مستقیم بذر در محیط مرطوب) می‌تواند به‌عنوان یکی از راهبردهای بالقوه برای کاهش و مصرف بهینه آب مورد استفاده قرار گیرد. با این حال تفاوت بین این روش‌های کاشت و مدیریت آبیاری برنج از نظر آب مصرفی و بهره‌وری آب در سطح یک زیرحوضه برای مدیران آب و بهره‌برداران محسوس

نیست. لذا این پژوهش با هدف تعیین نقشه پراکنش کشت محصول برنج^۱ (RCM) برای شیوه‌های مختلف مدیریتی کاشت و آبیاری در زیرحوضه‌های آبریز استان خوزستان با استفاده از شاخص‌های گیاهی، دما، خاک و داده‌های سنجش‌ازدور، از خرداد تا آبان ماه ۱۴۰۲ انجام شد. در این پژوهش، میزان آب مصرفی واقعی، زیست‌توده و بهره‌وری واقعی آب و در نهایت تعیین الگوی تغییرات زمانی-مکانی مصارف آب برنج، نیز ارزیابی و تحلیل خواهد شد. انجام این پروژه می‌تواند گامی مفید برای برنامه‌ریزی دقیق در جهت مدیریت صحیح آب توسط توزیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان آب کشاورزی باشد.

مواد و روش‌ها

استان خوزستان با مساحت ۶۴۰۵۷ کیلومتر مربع بین ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و صفر دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۴۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و در جنوب غربی ایران قرار دارد. زیرحوضه‌های پنج حوضه آبریز (کارون، کرخه، دز، زهره و مارون-جراحی) و ۳۰ دشت در استان خوزستان قرار دارد (شکل ۱). انطباق محدوده اراضی آبی و دیم با دشت‌های خوزستان نشان می‌دهد که بیشتر اراضی آبی در نیمه غربی، جنوب و جنوب شرق استان واقع شده است (مختاران و همکاران، ۱۴۰۳).



شکل ۱- موقعیت استان خوزستان در کشور و نقشه زیرحوضه‌های آبریز استان

روش شناسایی مزارع برنج در مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

در این پژوهش، به منظور اجرای طبقه‌بندی برای تهیه نقشه گیاهی برنج (RCM) و دستیابی به سطح زیر کشت محصول از الگوریتم جنگل تصادفی (RF) با تکنیک یادگیری ماشین^۱ (MLT) استفاده شد. تکنیک MLT زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی بوده که در کاربرد آن از الگوریتم‌های مختلفی برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در مورد طبقه‌بندی در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی، الگوریتم RF، عملکرد خوبی از خود نشان داده است که می‌تواند مقادیر از دست‌رفته و داده‌های با اختلال‌های زیاد را مدیریت کند (مختاران و همکاران، ۱۴۰۳). الگوریتم RF ترکیبی از پیش‌بینی‌کننده‌های درختی هستند به طوری که هر درخت به مقادیر یک بردار تصادفی بستگی دارد که به طور مستقل و با توزیع یکسان برای همه درختان جنگل، نمونه‌برداری شده است (مجیدی و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، با ادغام الگوریتم RF و پلتفرم‌های مدیریت‌شده داده‌های بزرگ مانند گوگل ارث انجین (GEE)، پردازش مجموعه داده‌ها با متغیرهای متعدد در مدت‌زمانی کوتاه تسهیل می‌شود (اشمیت و همکاران، ۲۰۱۹). کاتالوگ دیتاهای عمومی GEE، بخش عمده‌ای از تصاویر

سنجش‌ازدور رصدی زمین، شامل آرشیو لندست و همچنین آرشیو کامل داده‌های سنتینل ۱ و سنتینل ۲ که شامل پیش‌بینی‌های آب‌وهوا و داده‌های پوشش زمین بوده، تشکیل شده است (گورلیک و همکاران، ۲۰۱۷). روند طبقه‌بندی، شناسایی و تفکیک مزارع برنج استان خوزستان با توجه به نوع مدیریت کاشت و آبیاری، در دو گام به انجام رسید. گام اول شامل تفکیک مزارع برنج به عنوان 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 سنتی برنج با غرقاب دائم و سامانه کشت مستقیم بذر در بستر خشک "خشکه‌کاری" با مدیریت متناوب آبیاری) بود؛ بنابراین در 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 منحصرأ برنج در آنجا موجود بود. بخشی از خطای موجود در طبقه‌بندی مزارع برنج نسبت به دیگر محصولات (گام اول)، ناشی از پوشش‌هایی است که در منطقه وجود دارد و هم‌زمان با برنج در تیرماه تا شهریورماه به اوج سبزی‌نگی می‌رسند. تاریخ کشت برنج در خوزستان از دهه اول خردادماه در شمال شرق استان تا ۲۵ خردادماه در مناطق

داشتند، ۵۱۲ نقطه بودند. در این پژوهش، از پروداکت داینامیک ورد^۳ (DW) کلاس ۴ استفاده شد که مربوط به زراعت است. پروداکت DW یک مجموعه داده از کاربری زمین/ پوشش زمین^۴ (LULC) با وضوح بالا در سطح جهانی است که از یادگیری یک سامانه پایه ابری در تصاویر ۱۰ متری سنتینل ۲ بهره می‌برد. این پروداکت که از سال ۲۰۱۵ تا به حال استفاده می‌شود، با توجه به عرض جغرافیایی، بین دو تا پنج روزه‌روز می‌شود (کریستوفر و همکاران، ۲۰۲۲). کلاس‌هایی مانند باغ‌ها، پهنه‌های آبی، نواحی بایر، شهر و مواردی که نیاز نبودند حذف شدند. از طرفی دیگر، به دلیل اینکه مزارع نیشکر منحصراً در کشت و صنعت‌های شرکت توسعه نیشکر خوزستان و یا شرکت‌های کارون و میان‌آب هستند و توجه به این موضوع مهم که نیشکر از منظر حجم آب آبیاری طیف بسیار مشابهی با برنج دارد، از این رو برای سهولت کار، مناطق کشت و صنعت‌های موجود از شیپ فایل اصلی استان خوزستان جدا شدند و در این شرایط، الگوریتم جنگل تصادفی به دقت بالایی از تفکیک مزارع برنج دست پیدا کرد. در این پژوهش برای تفکیک زمین‌های زراعی، تصاویرهای 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) آورده شده است. 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).

مرکزی و جنوبی استان برای روش کشت سنتی با غرقاب دائم است. کشت مستقیم بذر در بستر خشک (خشکه‌کاری) معمولاً از دهه سوم خردادماه تا دهه اول تیرماه است. در این پژوهش، از تصاویر "سنتینل ۲" و "لندست ۹" از سایت <https://earthexplorer.usgs.gov> ترکیب کیفی تصاویر این دو ماهواره برای وارد کردن نمونه‌هایی از اراضی برنج و سایر محصولات زراعی^۱ (ذرت، یونجه، کنجد و محصولات جالیزی) استفاده شد. تاریخ دریافت تصاویر در یک بازه کشت برنج یعنی دهه اول خردادماه (ژوئن) تا اول آبان (اکتبر) ۱۴۰۲ (۲۰۲۳) بود. با نمایش RGB^۲ از باندهای 'B4', 'B8A', 'B12' به صورت 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، مانند دشت بهبهان در زیرحوضه مارون-جراحی (۱۰۸ نمونه)، دشت بنه‌باش در زیرحوضه زهره (۵۰ نمونه)، دشت‌های دزفول در زیرحوضه دز (۳۰۰ نمونه) و پشمینه‌زار اندیمشک در زیرحوضه کرخه (۵۴ نمونه)، برداشت صحرائی انجام شد و کلاسی به نام محصولات غیربرنج در محیط نرم‌افزار ENVI به عنوان ROI ذخیره گردید. در محیط Arc Map، این نمونه‌ها به فرمت شیپ فایل درآمدند و در محیط GEE به عنوان نمونه‌های زمینی وارد شدند. در مقابل، نمونه‌هایی هم از محصول برنج به همین روال برداشت و در سه کلاس خشکه‌کاری، کشت سنتی و مجموع این دو کلاس به عنوان "کلاس برنج" تهیه شد. نمونه‌های زمینی کشت برنج، ۲۰۹۴ نقطه با مختصات مشخص بودند که برای مزارع با روش کشت سنتی با غرقاب دائم، ۱۵۹۴ نقطه و برای روش خشکه‌کاری، ۵۰۰ نقطه را شامل شدند. همچنین نمونه‌های زمینی برای دیگر گیاهان (مانند ذرت، یونجه، کنجد و محصولات جالیزی) که تاریخ کشت منطبق با برنج را

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

شاخص‌ها	نوع ماهواره	باند‌ها	تفکیک مکانی
LAI ^۱	Sentinel2	B8,B4,B2	10m
EVI	Sentinel2	B8,B4,B2	10m
LSWI	Sentinel2	B8A,B11	20m
ST_B10	Landsat9	B10	30m
SWIR2	Sentinel2	B12	20m
Composite 'VV' & 'VH'	Sentinel1	VV,VH	10m

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

شاخص‌ها	نوع ماهواره	باند‌ها	تفکیک مکانی
LSWI	Sentinel2	B8A,B11	20m
AWEInsh ^۲	Sentinel2	B3,B8,B11,B12	10m,20m
ST_B10	Landsat9	B10	30m
NPP ^۳	WAPOR	-	250m
Composite 'VV' & 'VH'	Sentinel1	VV,VH	10m

تصمیم به تعداد گره‌های ۷۹۶ نود برای هر درخت به صورت تصادفی برای تفکیک مزارع برنج از مزارع غیر برنج با شش شاخص منتخب اجرا شد. پس از آن برای تفکیک سامانه‌های مختلف کشت و مدیریت آبیاری متفاوت برنج، با همین تعداد ۸۰ درخت تصمیم ولی تعداد گره‌های ۵۸۶ نود و با پنج شاخص منتخب انجام شد. در نهایت پس از تهیه نقشه برنج (RCM)، عملیات پایش با هدف صحت‌سنجی نقشه تهیه‌شده از پراکنش محصول برنج، در سطح استان انجام شد. برای این کار، نمونه‌هایی به صورت پراکنده از مزارع برنج با روش‌های کاشت مختلف (به جز مزارعی که قبل از تهیه نقشه گیاهی نمونه گرفته شده بود) انجام شد. نمونه‌های برداشت شده شامل ۴۲۵ مزرعه بود. سرانجام، نقاط مزارع نمونه‌برداری شده حاصل از عملیات پایش و نقشه تفکیک محصول (CMR) در محیط ArcMap روی هم قرار داده شد و مورد تطبیق و بررسی قرار گرفت.

بر طبق جدول‌های (۱) و (۲) مشاهده شد که در محاسبه شاخص‌ها از باندهای ماهواره سنتینل ۲، لندست ۹ و پروداکت WAPOR استفاده شده است. در این راستا، برای بالا بردن دقت طبقه‌بندی و کاهش تأثیر پوشش ابر در نتایج برآورد سطح زیر کشت برنج، از تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ نیز استفاده شد. در جدول (۳)، تعاریف شاخص‌ها و مبانی محاسبات آن‌ها آورده شده است.

اعتبارسنجی، ارزیابی و صحت‌سنجی طبقه‌بندی‌ها

برای هریک از کلاس‌ها (برنج، غیر برنج و مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری در محصول برنج)، ۷۰ درصد داده‌های زمینی که در بالا بیان شد، با هدف ارزیابی به عنوان نمونه‌های آموزشی^۴ و ۳۰ درصد دیگر به صورت تصادفی برای اعتبارسنجی^۵ در نظر گرفته شد. دقت کلی و ضریب کاپا با کدنویسی در محیط گوگل ارث انجین محاسبه گردید. الگوریتم طبقه‌بندی RF با ۸۰ تعداد درخت

1 - Leaf Area Index

2 - Automated Water Extraction Index no shadow

3 - Net Primary Production Index

4 - Training

5 - Testing

6 - Overlap

جدول ۳- فرمول محاسباتی و توضیحات شاخص‌های منتخب

منبع	توضیحات	روابط محاسباتی*	شاخص‌های منتخب
دلگیدو و همکاران، ۲۰۱۵	نمایانگر برگ‌هایی است که از نظر فتوسنتزی فعال هستند.	$LAI\ Index = 3.618 \left(\frac{2.5(NIR - RED)}{(NIR + 6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1)} \right) - 0.118$ (1)	شاخص سطح برگ (LAI)
هیت و همکاران، ۲۰۰۲	برای تعیین کمیت سبزیگی پوشش گیاهی استفاده می‌شود. برخی از شرایط جوی و اختلالات پس‌زمینه را تصحیح می‌کند و در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم حساس‌تر است	$EVI\ Index = \frac{2.5(NIR - RED)}{(NIR + 6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1)}$ (2)	شاخص گیاهی بهبودیافته (EVI)
اینوی و همکاران، ۲۰۲۰	این شاخص شامل بازتاب موج کوتاه است. نوار فرسرخ به رطوبت خاک و رطوبت پوشش گیاهی حساس است و می‌تواند برای پایش تغییرات رطوبت خاک استفاده شود.	$LSWI\ Index = \frac{B8A - B11}{B8A + B11}$ (3)	شاخص رطوبت خاک (LSWI)
اصغری و همکاران، ۲۰۲۳ و رونگلی و همکاران، ۲۰۱۸	داده‌های LST بازیابی شده از تصاویر باند فرسرخ حرارتی (TIR) در تعیین دمای سطح محصولات و تفکیک برنج از دیگر محصولات استفاده شد. این موضوع با این فرضیه است که مزرعه برنج بدلیل وجود رطوبت بالا در سطح خاک در مقایسه با دیگر محصولات زراعی موجود در منطقه، دمای سطح کمتری دارد و تحت تأثیر رطوبت منطقه قرار می‌گیرد.	ST_B10 (4)	شاخص دمای سطح زمین (LST)
کاپلان و همکاران، ۲۰۱۷ و فیسا و همکاران، ۲۰۲۱	این شاخص نشان‌دهنده میزان آب در شرایط انواع مختلف اختلالات محیطی است. هدف استفاده از این شاخص در پژوهش حاضر، بهبود دقت تفکیک سطح زیر کشت برنج سنتی به صورت غرقاب دائم از سامانه کشت خشکه‌کاری با روش مدیریت آبیاری متناوب به دلیل تفاوت در میزان آب آبیاری و رطوبت خاک در مزرعه است.	$AWEINH\ Index = 4 \times (Green - SWIR1) - (0.25 \times NIR) - (2.75 \times SWIR2)$ (5)	شاخص (AWEInsh)
https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1	این شاخص بیان‌کننده آن است که فتوسنتز چگونه دی‌اکسیدکربن را به زیست‌توده (بیوماس) تبدیل می‌کند. تولید اولیه خالص (NPP) با استفاده از الگوریتم WAPOR به صورت میانگین ۱۰ روزه با وضوح فضایی 248.2 متر موجود است. تفاوت بین زیست‌توده ناشی از روش خشکه‌کاری و کشت سنتی برنج به علت تفاوت در تاریخ کاشت و مدیریت آبیاری باعث شد تا از این شاخص به عنوان یک فرضیه مهم برای تفکیک این دو سامانه کشت استفاده شود.	پروداکت آماده الگوریتم WAPOR	شاخص NPP

* 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)

روش تهیه نقشه‌های زمانی-مکانی ET_a و WP_{ET} در مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

بعد از تهیه نقشه گیاهی برنج (RCM) به تفکیک روش‌های سنتی و خشکه‌کاری که در سطح زیر حوضه‌های آبریز استان انجام شد، در این مرحله برای تعیین ET_a و WP_{ET} از پایگاه داده‌ای WAPOR در محیط پلتفرم GEE استفاده شد. نسخه WAPOR2.0 در ژوئن ۲۰۱۹ راه اندازی شد و برای ایران در سطح ۱ ارائه شده است. پایگاه داده‌های WAPOR در مورد کشور ایران از پشتیبانی داده‌های همچون مادیس^۱، سنتینل^۲، لندست، ERA5 برخوردار بوده و دارای تفکیک مکانی ۲۴۸/۲ متر است. برتری اصلی برآورد تبخیر (E)، تعرق (T)، تبخیر از سطح برگ (I) و تبخیر-تعرق (ET) با استفاده از پایگاه WAPOR، فراهم ساختن امکان برآورد متغیرهای مورد نظر به صورت واقعی، مکانی و سری زمانی است. در این پژوهش، نقشه‌های زمانی (در ماه‌های مختلف رشد) و مکانی (در زیر حوضه‌های مختلف آبریز و همچنین وضعیت تغییرات در خود زیر حوضه‌ها) با هدف تشخیص نقاط بحرانی در سطح مورد مطالعه به تفکیک روش کشت

و مدیریت آبیاری محصول برنج، ارزیابی و تحلیل شد؛ بنابراین خروجی‌ها الگوریتم شامل: تهیه نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی (ET_a)، زیست توده (Bio) و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) بود. الگوریتم WAPOR، داده‌های ET_a و WP_{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 زمانی-مکانی WP_{ET} بر پایه زیست توده با کدنویسی در محیط GEE با استفاده از پورتال WAPOR و فرمول‌نویسی در محیط نرم‌افزار Arc Map برآورد شد. شاخص NPP بر اساس شاخص گیاهی NDVI، با دو منبع تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی برآورد می‌شود که معیاری برای رشد زیست توده در لایه‌های سطحی و زیرین خاک است (پن و همکاران، ۲۰۱۴)؛ ویرستریتی و همکاران، ۲۰۰۲). از طرفی الگوریتم WAPOR مقدار NPP را بر پایه مدل ماتیت (۱۹۷۲) که وجود یک رابطه خطی بین نرخ NPP و سرعت جذب انرژی خورشیدی توسط شاخ و برگ به عنوان راندمان تبدیل تابش جذب شده به ماده خشک است، نشان می‌دهد (مک‌کالوم و همکاران، ۲۰۰۹) (جدول ۴).

جدول ۴- مؤلفه‌ها، ماهواره‌های مورد استفاده برای بازیابی اطلاعات، دقت زمانی و مکانی داده‌های پرتال FAO-WAPOR

سطح پرتال در ایران	متغیرها	مؤلفه‌های ورودی	ماهواره‌ها	دقت زمانی و مکانی	توضیحات
L3		تابش خورشیدی	MSG, MERRA/ GEOS-5	1.67 دقیقه‌ای-15 کیلومتر 25 کیلومتر- روزانه	-
		تنش رطوبتی خاک	Landsat, MERRA/ GEOS-5	30-60 متر-5-16 روز 25 کیلومتر- روزانه	کیفیت کم در شرایط ابری/ بارانی
	NPP	کاربری اراضی	Landsat	30-60 متر-5-16 روز	-
		داده‌های هواشناسی	MERRA/ GEOS-5	25 کیلومتر- روزانه	-
		بارش	TRMM, GPM	-	-
		FAPAR	Landsat	30-60 متر-5-16 روز	-
	ET_a	-	-	-	مجموع تبخیر (E)، تعرق (T) و برگاب (I) است. رابطه پنمن ماتیت برای محاسبه تبخیر از روی خاک، تعرق با استفاده از تاج پوشش گیاهی و برگاب با پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ و بارش استفاده می‌شود.

گزارش‌های تحقیقاتی و نتایج کارهای مشاهده‌ای مستند بر اساس خروجی‌های مزرعه‌ای که در خوزستان انجام شده است، مقایسه و تحلیل گردید.

نتایج و بحث

تعیین سطح زیر کشت برنج به تفکیک روش کاشت و مدیریت مختلف آبیاری

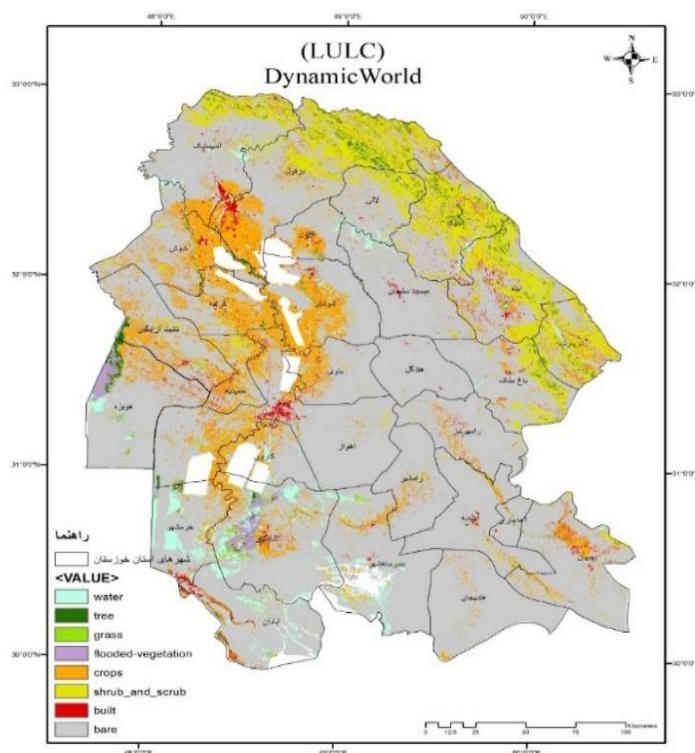
نقشه کاربری زمین / پوشش زمین (LULC)

محدوده استان خوزستان با استفاده از پروداکت DW برحسب طبقه‌بندی‌های مختلف با دقت تقریبی ۹۳ درصد در شکل (۲) آورده شده است. در گام اول که تفکیک مزارع برنج از محصولات زراعی غیر برنج بود (محصولاتی که دارای تاریخ کشت یا دوره رشد هم‌زمان با برنج داشتند)، میزان شاخص‌های مختلف با ترکیب باندهای متفاوت جهت تفکیک مکانی با تشخیص بهینه به شرح جدول (۵) ارائه شده است.

رابطه (۶)، مبانی محاسبه زیست‌توده (B) از شاخص NPP را بیان می‌کند.

$$B = AOT \times f_c \times \frac{NPP}{(1-MC)} \times 22.2 \quad (6)$$

AOT؛ نسبت اندام هوایی به ریشه است؛ بنابراین برای حذف تأثیر ریشه از زیست‌توده کل، AOT استفاده می‌شود که این ضریب برای محصول برنج، یک است (آلمایهو و همکاران، ۲۰۲۰). MC؛ ضریب رطوبت محصول است که برای برنج برابر ۰/۲ است (یلما و همکاران، ۲۰۱۷). f_c ، ضریب تصحیح نوری بوده که برای گیاهان C4 باید اعمال گردد. این مسئله به این دلیل است که شاخص NPP برای گیاهان C3 تعریف شده است. با توجه به گیاه برنج که گیاه C3 است نیاز به اعمال این ضریب نیست. همچنین برای تبدیل واحد NPP (گرم کربن بر مترمربع در روز) به واحد کیلوگرم ماده خشک بر هکتار در روز (واحد زیست‌توده)، رابطه فوق در عدد ۲۲/۲۲۲ ضرب خواهد شد (فائو، ۲۰۲۰؛ آجور، ۲۰۲۱). بعد از خروجی داده‌های WAPOR برای تطبیق و تدقیق داده‌های این الگوریتم، نتایج را با داده‌های



شکل ۲- نقشه کاربری زمین / پوشش زمین استان خوزستان با استفاده از پروداکت دینامیک ورود (DW)

Water)پهنه‌های آبی)؛ (tree باغات)؛ (grass مراتع)؛ (flooded-vegetation تالاب)؛ (crops محصولات زراعی)؛ (shrub&scrub بیشه‌زار)؛ (built ساختمان و شهر)؛ (bare بایر)

جدول ۵- مقایسه شاخص‌های مناسب در تفکیک سطح زیر کشت برنج و سایر محصولات زراعی

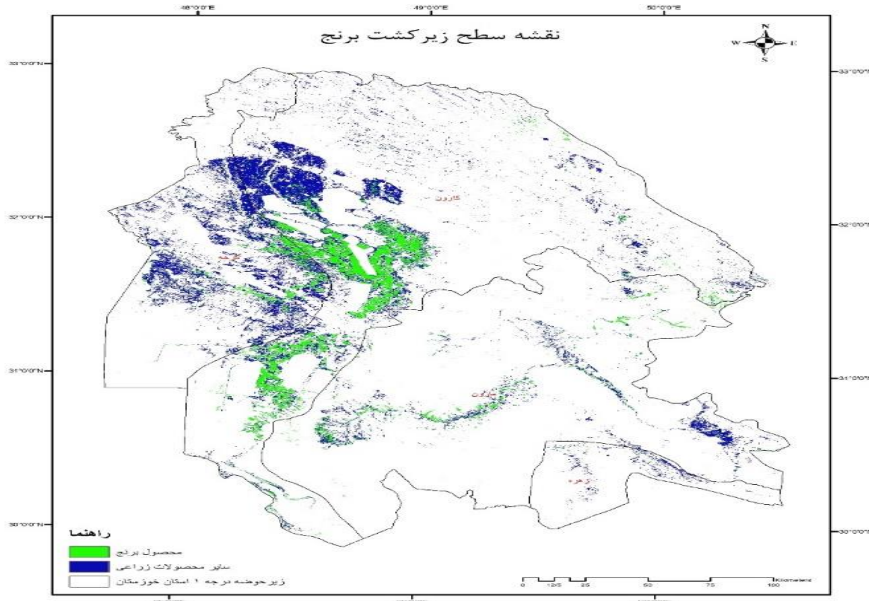
شاخص‌های منتخب	LAI		EVI		LSWI		ST_B10		SWIR		VV&VH	
	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج
مقادیر تصادفی شاخص‌ها	0.659	1.734	0.215	0.512	-0.125	0.061	341.756	314.858	0.333	0.161	1098.605	310.396
	0.489	1.211	0.168	0.367	-0.119	0.061	341.993	314.377	0.361	0.141	1005.583	320.203
	0.586	1.008	0.195	0.311	-0.114	0.030	340.127	313.858	0.328	0.147	856.978	499.823
	0.461	1.501	0.160	0.448	-0.120	0.028	340.433	313.921	0.353	0.149	977.234	694.666
	0.715	1.148	0.230	0.350	-0.126	0.058	341.300	316.104	0.337	0.157	1163.236	400.374
	0.503	1.032	0.172	0.318	-0.129	0.050	341.216	314.830	0.369	0.180	1013.038	788.330
	0.631	1.509	0.207	0.450	-0.114	0.166	341.135	314.357	0.354	0.099	956.413	518.585
	0.633	1.981	0.208	0.580	-0.120	0.276	341.084	314.032	0.347	0.106	905.711	484.594
	0.597	1.690	0.198	0.500	-0.123	0.289	341.703	314.877	0.330	0.106	978.046	562.158
0.630	2.108	0.207	0.615	-0.129	0.264	332.848	317.134	0.295	0.109	737.983	516.626	
میانگین شاخص‌ها	0.590	1.492	0.196	0.445	-0.122	0.128	340.360	314.835	0.341	0.136	969.283	509.576

محصول باشد، به طوری که میزان متوسط شاخص ST-B10 در مزارع منتخب برنج ۳۱۴/۸۳ و در مزارع غیر برنج ۳۴۰/۳۶ بود. در بررسی شاخص ترکیبی VV, VH، این شاخص از باندهای ماهواره سنتینل ۱ هستند که نمایه‌ای مهم برای تشخیص پوشش گیاهی بوده و نسبت به رطوبت محیط حساس هستند. به همین دلیل مزارع برنج به علت رطوبت بسیار بالا نسبت به سایر محصولات زراعی منطقه در استفاده از این شاخص قابل تشخیص بوده و میانگین اعداد انتخابی شاخص در مزارع برنج تفاوت محسوسی با مزارع غیر برنج داشتند. از ماهواره سنتینل ۱ در پایش تغییرات مراحل رشد محصولات کشاورزی استفاده می‌شود به طوری که نتایج پروژه تحقیقاتی کوپرنیکاس^۱ که برای تشخیص مزارع برنج ویتنام انجام شد، نشان داد که تصاویر ماهواره سنتینل ۱، پایش کاملی از مراحل رشد برنج را به تصویر می‌کشد. این نتایج مشخص کرد که حسگرهای راداری این ماهواره در شناسایی مزارع غرقاب شده و عبور از محیطی با رطوبت بالا در اطراف مزارع برنج بسیار مفید بودند (ESA, 2020). در نهایت بر طبق جدول ۵، شاخص SWIR باند ۱۲ ماهواره سنتینل ۲ نیز برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و تشخیص پوشش گیاهی استفاده شد که تضاد خوبی بین انواع مختلف پوشش‌های گیاهی ایجاد کرد. در استفاده از شاخص‌های جدول ۵، نتیجه طبقه‌بندی به صورت تفکیک مکانی در حدود ۱۰ متر با پیکسل‌هایی با

میزان شاخص‌ها در جدول ۵ به صورت تصادفی در مزارع برنج و زراعت‌های غیربرنج برداشته شد. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که شاخص‌های حساس در هر دو نوع زراعت، تفاوت‌های محسوسی داشته که عاملی صحیح در تشخیص مزارع برنج بود. شاخص LAI که نمایانگر سبزی‌نگی برگ‌ها با فتوسنتز فعال است در محصول برنج با میزان متوسط ۱/۴۹ نسبت به سایر محصولات زراعی (با میانگین ۰/۵۹) تفاوت محسوسی داشت. این مهم در شاخص EVI هم بدین ترتیب بود (میزان متوسط ۰/۴۵ برنج در مقابل ۰/۱۹۶ محصولات زراعی غیر برنج). دلیل این مسئله متراکم بودن پوشش گیاهی برنج و سبزی‌نگی بالا این محصول است که شاخص‌های مذکور به این موارد حساس هستند (توجه به جدول ۳). این در حالی است که کشت سایر محصولات زراعی غیر برنج در تابستان معمولاً به صورت ردیفی و با تراکم پایین است. لازم به ذکر است همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اراضی نیشکر کاملاً تفکیک و حذف شدند. در بررسی شاخص LSWI (شاخصی که به رطوبت خاک حساس بوده و در پایش این نمایه استفاده می‌شود)، مشخص شد که مزارع برنج به دلیل بالا بودن رطوبت محیط با استفاده از این شاخص قابل تشخیص است. این مهم یعنی بالا بودن رطوبت محیط در مزارع برنج که کاهش دما محیطی را به همراه دارد باعث شد که شاخص دما (ST-B10 یا LST) عاملی مؤثر در شناخت این

تفکیک برنج از دیگر محصولات زراعی و ضریب کاپای مکانی، احتمال وجود لکه‌هایی از کلاس‌های دیگر برای تشخیص بهینه، بالاتر رفت. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای برآورد بود، به طوری که با دقت کلی ۹۴/۹۲ درصد در

مساحت ۰/۰۰۸۵ هکتار بدست آمد. به دلیل این تفکیک مکانی، احتمال وجود لکه‌هایی از کلاس‌های دیگر برای تشخیص بهینه، بالاتر رفت. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای برآورد بود، به طوری که با دقت کلی ۹۴/۹۲ درصد در



شکل ۳- نقشه موقعیت کشت برنج به تفکیک از سایر محصولات در زیر حوضه‌های آبریز استان خوزستان

آبیاری (کشت سنتی برنج با غرقاب دائم و سامانه کشت مستقیم بذر در بستر خشک با مدیریت متناوب دو تا چهار روزه آبیاری)، انتخاب گردید در جدول ۶ آورده شده است.

همچنین میزان شاخص‌های مورد استفاده که به صورت تصادفی از مزارع برنج جهت تشخیص بهینه و تفکیک به دو کلاس برحسب سامانه کشت و مدیریت

جدول ۶- مقایسه شاخص‌های مناسب در تفکیک سطح زیر کشت سنتی برنج با غرقاب دائم از خشکه کاری

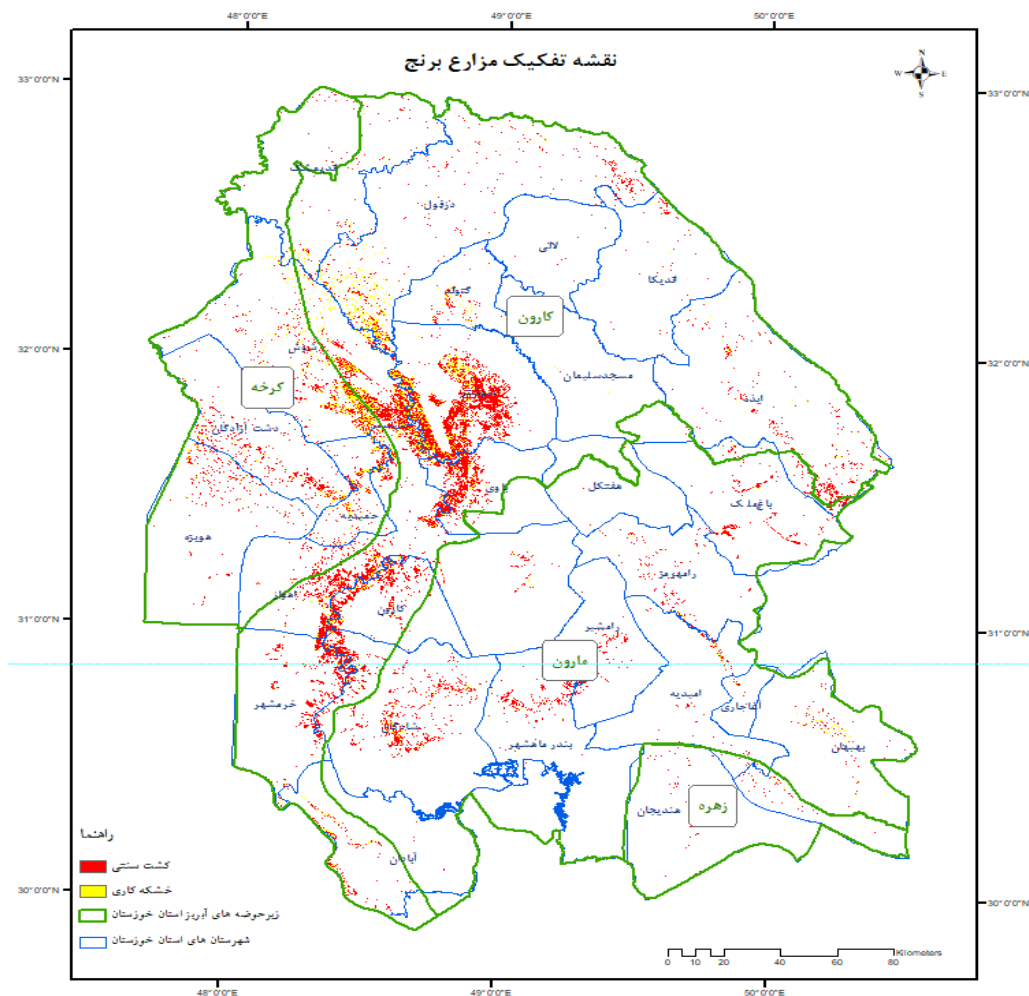
شاخص‌های منتخب	LSWI		AWEInsh		ST_B10		NPP		VV&VH	
	غرقاب سنتی	خشکه کاری	غرقاب سنتی	خشکه کاری	غرقاب سنتی	خشکه کاری	غرقاب سنتی	خشکه کاری	غرقاب سنتی	خشکه کاری
مقادیر تصادفی شاخص‌ها	0.455	0.386	-7374.88	-5036	310.657	312.508	239.12	137.36	632.531	608.874
	0.478	0.430	-8693	-7247.75	310.768	312.696	210.64	107.30	557.718	561.732
	0.405	0.381	-9416	-4706.75	310.002	313.878	243.44	74.05	480.125	338.545
	0.396	0.332	-7426	-6535.50	311.862	313.145	185.83	77.58	546.082	416.702
	0.479	0.393	-8510	-2752.25	311.583	312.245	191.90	80.62	535.796	553.286
	0.364	0.169	-9665	-9605.00	311.874	314.449	268.50	123.50	672.859	503.100
	0.353	0.177	-8257.5	-5347	312.764	313.461	457.33	102.36	500.465	442.320
	0.343	0.249	-8905	-8935.50	312.161	313.559	174.12	111.56	574.839	364.594
	0.317	0.369	-10369.25	-6310	313.165	315.967	272.96	103.60	574.274	691.156
	0.338	0.258	-9818	-9135.88	309.980	313.414	152.94	58.36	433.247	472.042
میانگین شاخص‌ها	0.393	0.315	-8843.46	-6561.16	311.482	313.532	239.678	97.629	550.793	495.235

سه تا پنج روز در مزارع خشکه کاری نسبت به مزارع سنتی است. بر این اساس می‌توان بیان کرد که شاخص **LSWI** به دلیل حساسیت به اختلاف رطوبت محیط، یکی از مهم‌ترین نمایه‌ها در تفکیک این دو روش در کاشت و

آنچه از جدول ۶ قابل مشاهده این است که میزان متوسط شاخص **LSWI**، در مزارع خشکه کاری به میزان ۲۰ درصد نسبت به مزارع کشت سنتی با غرقاب دائم کمتر بود. این مهم به دلیل تفاوت رطوبت خاک ناشی از دور آبیاری

مدیریت آبیاری خواهد بود. در بررسی شاخص مهم AWEInsh (شاخصی که میزان آب و رطوبت محیط را در شرایط مختلف اختلالات محیطی نشان می‌دهد)، تفاوت محسوس اختلاف مزارع برنج در روش‌های خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری و کشت سنتی با غرقاب دائم به علت تفاوت در میزان آب آبیاری در مزارع و موجودیت رطوبت خاک و محیط، مشاهده می‌شود. شاخص AWEInsh برای استخراج آب از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. در شرایط کشت برنج، مقادیر این شاخص منفی است. این مسئله به دلیل غرقاب بودن مزارع برنج است. در شرایط غرقابی، سطح آب به‌طور مداوم بالا است و ممکن است با پوشش گیاهی یا خاک مرطوب ترکیب شود. این وضعیت می‌تواند باعث شود که شاخص AWEInsh مقادیر منفی تری نشان دهد، زیرا بازتاب نوری آب و پوشش گیاهی با هم ترکیب می‌شوند و شاخص به درستی نمی‌تواند آب را از سایر عناصر تفکیک کند. تراکم بالای گیاهان برنج نیز بازتاب نوری را تغییر داده و بر کاهش مقدار این شاخص می‌افزاید. در شرایطی که از کشت برنج که غرقاب دائمی نبوده (مانند مدیریت خشکه‌کاری)، خاک مرطوب توسط این شاخص از آب قابل تفکیک است هرچند باز شاخص در شرایط منفی است اما میزان آن کمتر است (جدول ۶) (فیسسا و همکاران، ۲۰۱۴). بر همین اساس افزایش درجه حرارت محیط در مزارع برنج خشکه‌کاری نسبت به روش کشت سنتی دور از انتظار نبود (شاخص ST_B10)؛ اما مهم‌ترین شاخص در شناخت مزارع برنج با روش خشکه‌کاری از کشت سنتی، NPP بود. این شاخص که مشخص‌کننده زیست‌توده محصول است، به

دلیل تأخیر در زمان کاشت روش خشکه‌کاری نسبت به کشت سنتی که باعث کاهش میزان زیست‌توده محصول خواهد شد، می‌تواند نمایه‌ای مهم در تفکیک این دو روش کاشت باشد. بر این اساس، در جدول ۶ مشاهده می‌شود که میانگین میزان شاخص NPP در مزارع برنج با روش کشت خشکه‌کاری و مدیریت متناوب آبیاری به میزان ۵۹ درصد نسبت به روش کشت سنتی با غرقاب دائم کمتر بود. در نهایت شاخص VV&VH، همانطور که در جدول ۵ در مورد این شاخص توضیح داده شد، انتظار می‌رود که در روش خشکه‌کاری که آب موجود و رطوبت خاک کمتر است، میزان این شاخص هر چند نامحسوس اما کمتر باشد، اما این حقیقت در تمام نمونه‌ها صدق نمی‌کرد؛ بنابراین مناسب‌ترین شاخص‌ها در تفکیک مزارع برنج با مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری، LSWI، AWEInsh، NPP بودند. در نهایت نتایج به‌دست آمده در استفاده از میزان شاخص‌های جدول ۶، سطح زیر کشت برنج برای سال ۱۴۰۲ در کل استان خوزستان با سامانه سنتی و مدیریت آبیاری غرقاب دائم، ۱۳۶۷۷۰ هکتار و برای روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری، ۴۳۱۷۲ هکتار نشان داد. در این شرایط، دقت کلی تفکیک مزارع برنج برحسب نوع کشت در حدود ۹۹/۶۵٪ و ضریب کاپای ۰/۸۷ بود (شکل ۴). لازم به ذکر است که شکل (۴) در بازه زمانی مرداد تا نیمه شهریورماه تهیه شد که کشت برنج در استان تکمیل شده و دوره پیک مصرف نیاز آبی را طی می‌کند. محدوده زیرحوضه کارون شامل کارون علیا، کارون سفلی و دز (بر طبق شکل ۱) می‌باشد.



شکل ۴- نقشه موقعیت برنج برحسب سامانه کاشت و آبیاری در محدوده زیر حوضه های آبریز و شهرستان های خوزستان

زیرحوضه، از پایین دست سد گتوند (ورود به جلگه خوزستان) تا جنوب غرب استان (شهرستان خرمشهر) بود. در زیر حوضه کارون، بالغ بر ۹۵۰۰۰ هکتار کشت سنتی و ۳۰۶۰۲ هکتار خشکه کاری با آبیاری متناوب (دور آبیاری دو تا چهار روزه) اجرا شد که بیشترین سطح را در دو روش کاشت برنج در کل استان در برداشت.

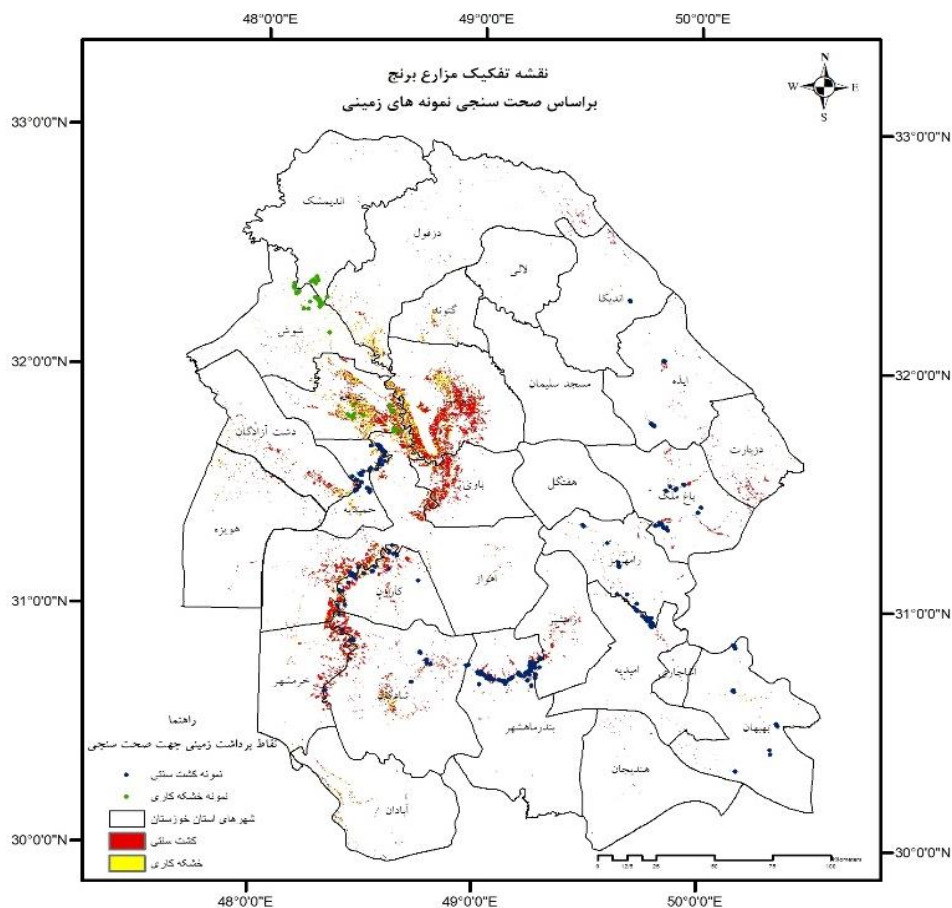
با توجه به شکل (۴)، براساس برش در محدوده زیر حوضه های آبریز، سطح زیر کشت برنج با توجه به روش کاشت و مدیریت آبیاری برای هر زیر حوضه در جدول (۷) آورده شده است. نتایج نشان داد که تمرکز کشت برنج در زیر حوضه آبریز کارون با سطح زیر کشت بالغ بر ۱۲۶۰۰۰ هکتار بود. بیشترین سطح زیر کشت در این

جدول ۷- سطح زیر کشت برنج (هکتار) به تفکیک زیر حوضه های آبریز درجه یک خوزستان با توجه به سامانه کشت و مدیریت آبیاری

زیر حوضه آبریز	سامانه کشت و مدیریت آبیاری	سطح زیر کشت
	کشت سنتی با غرقاب دائم	مجموع سطوح با روش کشت های مختلف
	خشکه کاری با مدیریت متناوب آبیاری	
کارون	95460	126062
کرخه	24132	34745
مارون-جراحی	17077	18987
زهره-هندیجان	101	148
جمع نهایی	136770	179942

در زیر حوضه آبریز کرخه پایین‌دست سد که محدودیت منابع آب دارد، ۱۰۶۱۳ هکتار در محدوده زمانی مذکور (تابستان ۱۴۰۲)، کشت به روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری اجرا شد. با توجه به شکل (۴)، در پایین‌دست زیر حوضه کرخه محدوده شهرستان‌های حمیدیه، دشت آزادگان و هویزه با وجود این‌که در انتهای حوضه 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 حوضه به خود اختصاص داده‌اند (۸۶۲۳ هکتار کشت سنتی در مقابل ۶۰۶ هکتار خشکه‌کاری). این موضوع از نظر راهبردی می‌تواند تأثیر منفی بسیاری بر تالاب هورالعظیم به‌عنوان زیست‌بوم منطقه، تأمین آب برای کشت‌های پاییزه و مسائل شرب منطقه داشته باشد. این مسئله برای شهرستان‌های شادگان، خرمشهر و آبادان که محدوده اراضی آن‌ها در انتهای حوضه کارون بزرگ قرار دارند، نیز صادق است (۲۰۳۳۶ هکتار کشت سنتی در مقابل ۳۵۰۰ هکتار خشکه‌کاری). برداشت بی‌رویه آب در زیر حوضه کارون، به‌خصوص در نبود مدیریت آب در مزرعه در روش‌های کشت سنتی برنج و با تأمین آب برای نخیلات، کاهش کیفیت آب کارون و هجوم

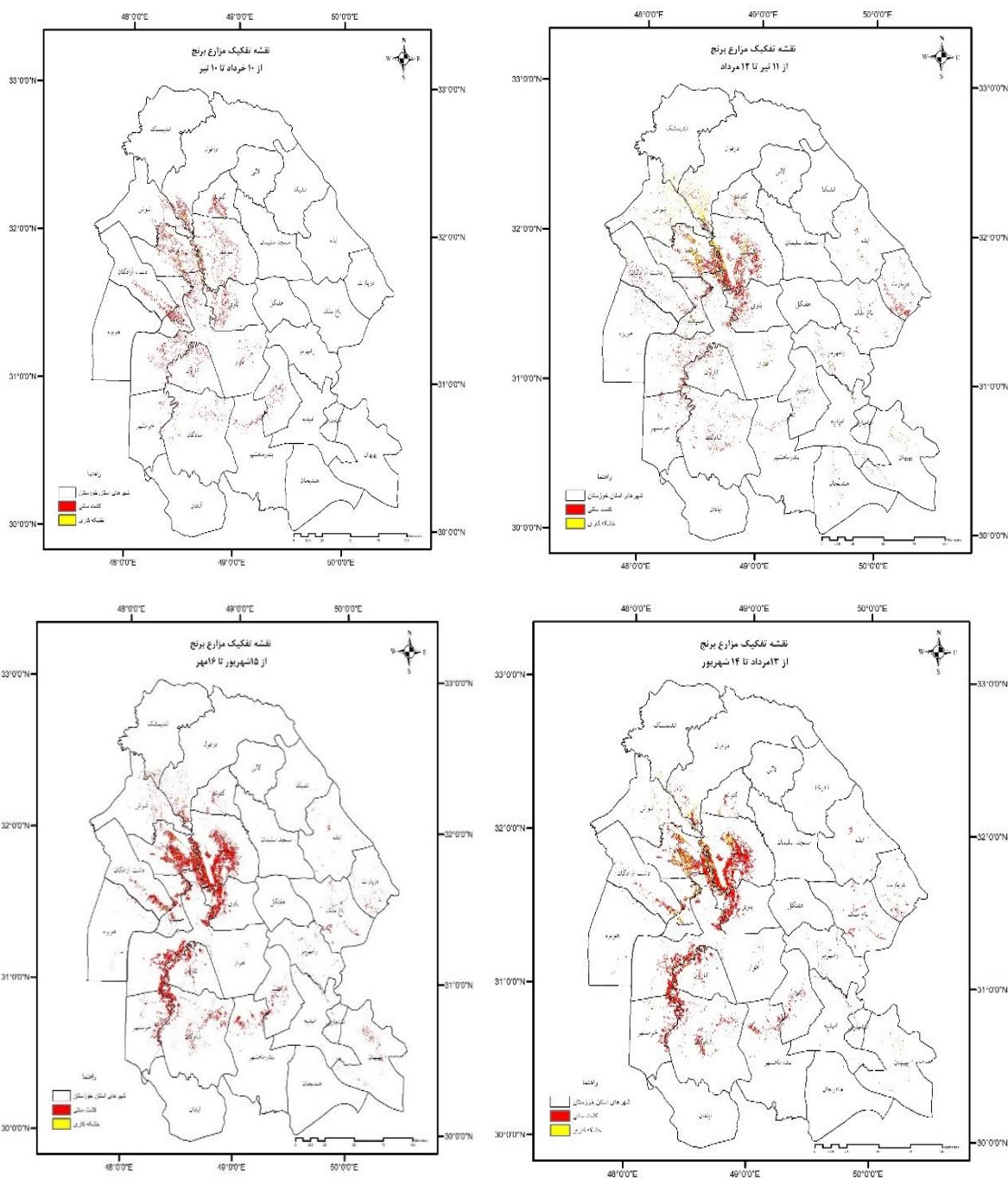
آب شور خلیج فارس و اروندرود (در اثر اختلاف چگالی آب بین آب شور و شیرین ناشی از کاهش حجم آب کارون در پایین‌دست) را به سمت شهرستان‌های آبادان و خرمشهر در پی خواهد داشت. زیر حوضه آبریز مارون-جراحی از این بابت که منتهی‌الیه آن به تالاب شادگان ختم می‌شود، بسیار مهم است. بررسی شکل ۴ و جدول ۷ نشان می‌دهد که کشت سنتی برنج در این زیر حوضه بسیار رایج است، با این همه در قسمت‌هایی از آن به‌صورت پراکنده نیز مبادرت به کشت خشکه‌کاری کرده‌اند. در نهایت برای صحت‌سنجی نقشه‌های خروجی نسبت به واقعیت زمینی، از ۴۲۵ نمونه‌ی زمینی که به‌صورت پراکنده از مزارع برنج با روش‌های کاشت مختلف (به‌جز مزارعی که قبل از تهیه نقشه گیاهی نمونه گرفته شده بود) اخذ شده بود، استفاده گردید. نقاط مزارع نمونه‌برداری شده و نقشه تفکیک محصول در محیط Arc Map روی هم قرار داده شد (شکل ۵). تمام نمونه‌های زمینی در مزارع برنج که توسط الگوریتم یادگیری ماشین در محیط GEE تهیه شده بود، به تفکیک روش کاشت قرار گرفت که خود مؤید صحت بالای این روش در تشخیص محصول است.



شکل ۵- نقشه صحت سنجی موقعیت کشت برنج مستخرج از روش سنجش ازدور با داده های زمینی

متأسفانه در بعضی مناطق از تناوب آبیاری استفاده نمی شود و مانند روش های سنتی به صورت روزانه یا غرقاب دائم آبیاری می کنند. این مسئله در اواخر شهریور تا اواخر مهرماه (زمان پر شدن دانه) بسیار محسوس بود. شکل (۶)، تغییرات سطح زیر کشت برنج با روش های کاشت مختلف را از خردادماه (شروع کشت برنج در خوزستان) تا نیمه مهرماه (پر شدن دانه و انتهای فصل کشت) نشان می دهد. همچنین جدول (۸) با اجرای برش برای طبقه بندی های مختلف سامانه کاشت در ماه های مختلف رشد محصول، سطح زیر کشت روش سنتی برنج با غرقاب دائم، نسبت به روش خشکه کاری با مدیریت تناوب آبیاری را نشان می دهد.

نتایج پایش سطح کشت برنج نشان می دهد که میزان سطح خشکه کاری برنج با مدیریت تناوب آبیاری تقریباً یک سوم میزان سطح روش کشت سنتی برنج با غرقاب دائم است (جدول ۷). هرچند ممکن است در سطح وسیع تری از استان به استفاده از روش کشت مستقیم بذر در بستر خشک (خشکه کاری) مبادرت داشته باشند؛ اما آنچه اهمیت دارد این است که سامانه خشکه کاری یک روش کاشت است و سامانه کشت به تنهایی تأثیری در کاهش حجم آب آبیاری و آب مصرفی گیاه ندارد، بلکه این مدیریت آبیاری تناوب بر اساس میزان تخلیه مجاز رطوبتی گیاه برنج است که در کنار سامانه کاشت باعث کاهش محسوس آب آبیاری و آب مصرفی گیاه می شود. این موضوع روشن می سازد که در سطح استان با وجود استفاده از روش کشت خشکه کاری،



شکل ۶- نقشه موقعیت کشت برنج به تفکیک سامانه کشت و مدیریت آبیاری در بازه زمانی خرداد (شروع کشت) تا نیمه مهرماه

جدول ۸- سطح زیر کشت برنج (هکتار) خوزستان به تفکیک ماه‌های فصل کاشت و داشت با توجه به سامانه کشت و مدیریت آبیاری

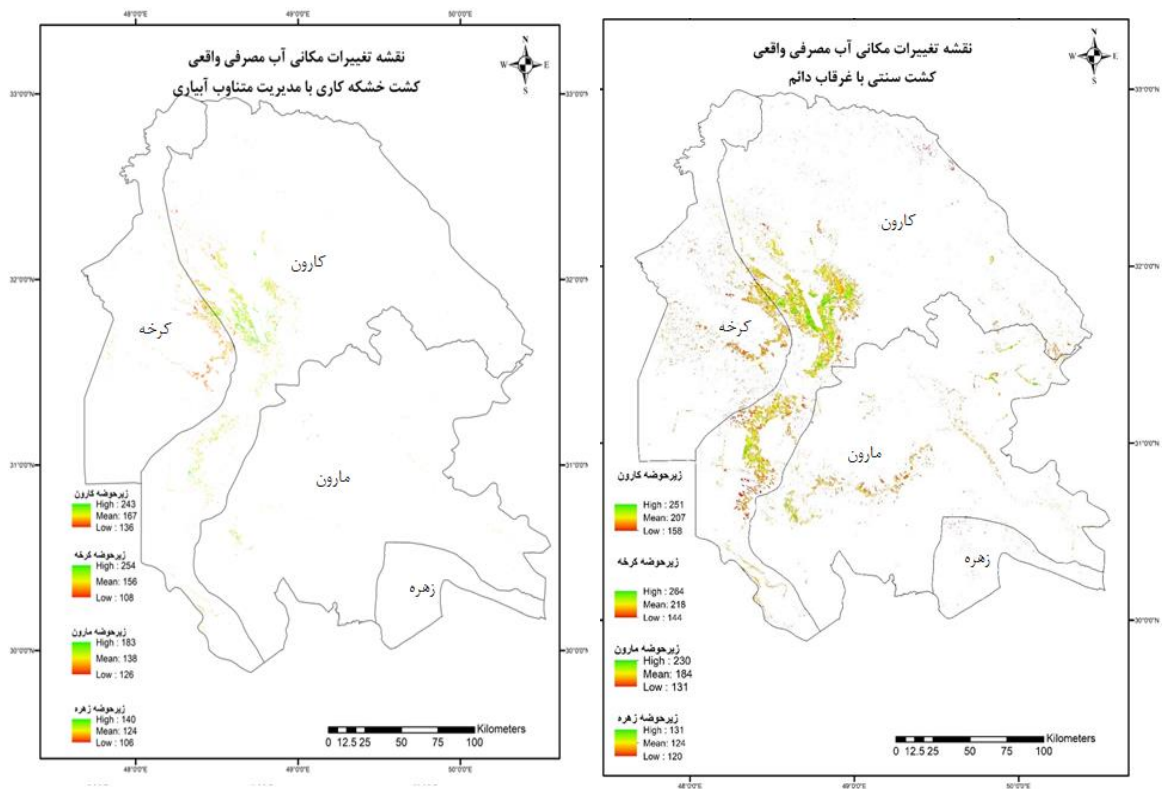
بازه زمانی	سامانه کشت و مدیریت آبیاری		سطح زیر کشت در هر زیر حوضه مجموع سطوح با روش کشت‌های مختلف
	کشت سنتی با غرقاب دائم	خشکه کاری با مدیریت متناوب آبیاری	
۱۰ خرداد - ۱۰ تیر	84968	4003	88972
۱۱ تیر - ۱۲ مرداد	123649	31627	155276
۱۳ مرداد - ۱۴ شهریور	136770	43172	179942
۱۵ شهریور - ۱۶ مهر	174638	5304	179942

آنچه از جدول ۸ استنباط می‌شود این است که روش خشکه‌کاری از اواخر خردادماه آغاز می‌شود. این در حالی است که آغاز کشت سنتی برنج حدود یک‌ماه زودتر است. یکی از دلایل کاهش عملکرد روش خشکه‌کاری همین تاریخ کاشت و دوره رشد کوتاه‌تر است (گیلانی و همکاران، ۱۳۹۵). بر اساس جدول ۸، از اواخر تیرماه تقریباً سطح زیر کشت برنج در خوزستان تکمیل شده است؛ اما موضوع بسیار قابل توجه این است که از اواخر شهریورماه سطح زیر کشت برنج با روش خشکه‌کاری کاهش محسوس یافته است که بدان معنی نیست که برداشت مزارع آغاز شده است، بلکه همان‌طور که در پیش اشاره شد، کشاورزان از اواخر شهریورماه که مقارن با تشکیل گل‌دهی برنج است، مدیریت آبیاری را از تناوب خارج می‌کنند و به سمت آبیاری روزانه تغییر می‌دهند. این نوع مدیریت تا زمان برداشت محصول اتفاق خواهد افتاد. شاخص‌های مهم قابلیت تشخیص مزارع برنج با استفاده از روش سنجش‌ازدور با الگوریتم یادگیری ماشین بر اساس نوع روش کاشت نشان دادند که مزارع خشکه‌کاری با دور آبیاری روزانه به شرایط کشت سنتی با غرقاب دائم تبدیل شده‌اند. این موضوع می‌تواند تأثیر روش خشکه‌کاری بر کاهش آب آبیاری و آب مصرفی واقعی در سطح حوضه-های آبریز را تقلیل دهد. از این رو باید به این موضوع مهم توجه داشت که ترویج روش نوین خشکه‌کاری در صورتی به‌عنوان یک فناوری به‌زراعی قابل قبول است که همراه با مدیریت صحیح آبیاری باشد. این مدیریت، رعایت تناوب

آبیاری بر اساس تغییرات رطوبت خاک و نمایه گیاهی منطبق با تبخیر-تعرق گیاهی در فصل رشد است و باید تا پایان فصل رشد رعایت گردد. از این رو برنج‌کاران در استفاده از روش خشکه‌کاری، به‌منظور جلوگیری از کاهش سطح عملکرد محصول، باید روی تاریخ کاشت و مدیریت تغذیه کودی در کنار مدیریت آبیاری توجه داشته باشند.

تغییرات زمانی-مکانی میزان ETa و WP_{PET} در مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

با توجه به اثر روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری بر کاهش آب آبیاری در مزارع خوزستان (گیلانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ گیلانی، ۱۳۹۸؛ مسکینی‌ویشکایی و همکاران، ۱۴۰۰ و مختاران و همکاران، ۱۴۰۲)، در این قسمت میزان آب مصرفی واقعی (ETa)، زیست‌توده محصول (Bio) و تغییرات بهره‌وری واقعی آب (WP_{PET}) محصول در مقایسه با روش کشت سنتی با غرقاب دائم برای زیر حوضه‌های مختلف با تغییرات مکانی نشان داده می‌شود تا اثر این فناوری بهتر مشهود گردد. لذا در ابتدا از مرحله کاشت تا زمان پرشدن دانه (نیمه شهریورماه) که تناوب آبیاری در این روش کشت توسط کشاورزان رعایت می‌شود، بررسی گردید (شکل ۷ و جدول‌های ۹ و ۱۰). سپس این نمایه‌ها برای کل دوره رشد بررسی و تحلیل شد.



شکل ۷- نقشه‌های آب مصرفی واقعی (ETa) برحسب میلی‌متر در زیر حوضه‌های آبریز خوزستان بعد از تکمیل عملیات کاشت تا قبل از زمان گلدهی

جدول ۹- میزان کاهش آب مصرفی واقعی (ETa) در پیک تراکم کشت با رعایت تناوب آبیاری در روش خشکه کاری

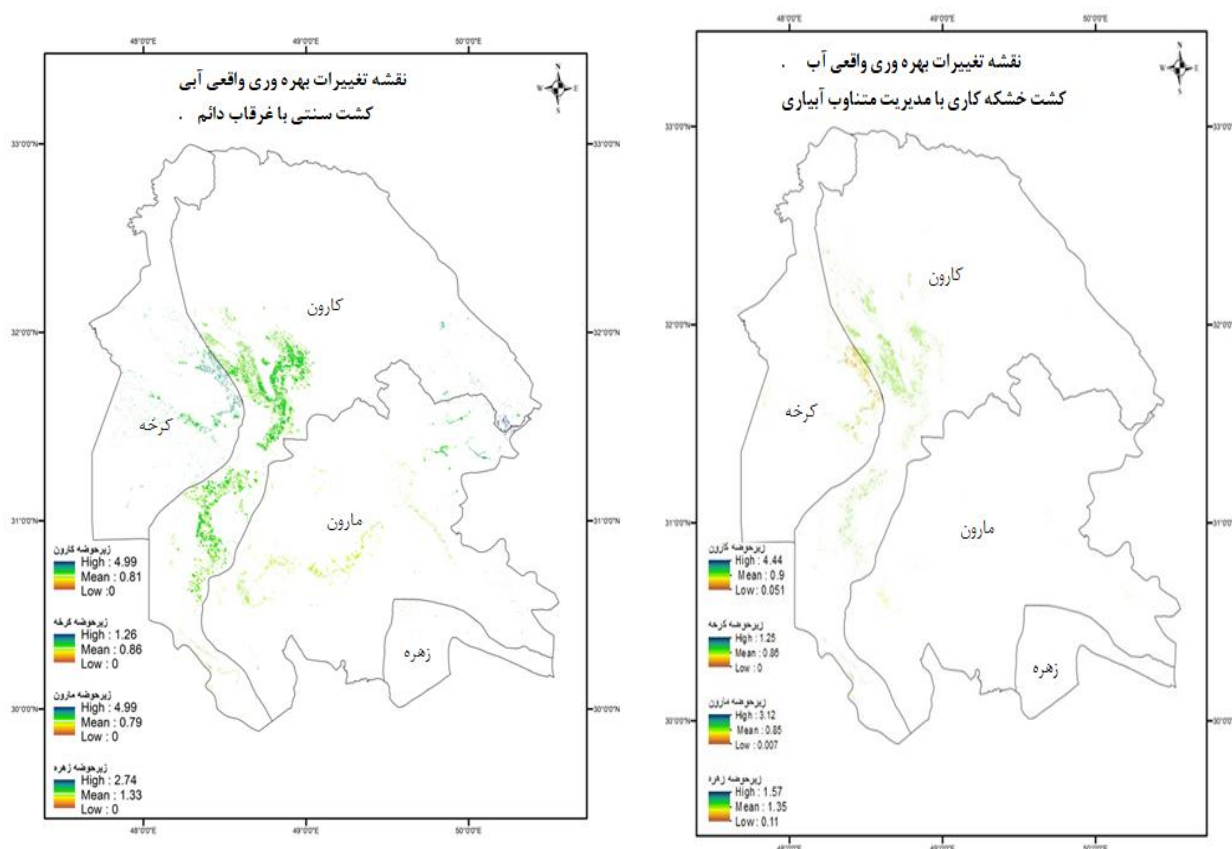
ماه پیک تراکم کشت گیاه برنج (13 مرداد تا 16 شهریور) - دوره کاشت تا زمان گلدهی			
زیر حوضه‌های استان	ETa کشت سنتی با غرقاب دائم (مترمکعب در هکتار)	ETa فناوری خشکه کاری با تناوب آبیاری (مترمکعب در هکتار)	میزان کاهش ETa در فناوری خشکه کاری با تناوب آبیاری نسبت به کشت سنتی (درصد)
کارون	2070	1670	19
کرخه	2180	1560	28
مارون - جراحی	1840	1380	25
زهره - هندیجان	1650	1520	13

جدول ۱۰- میزان کاهش زیست‌توده و ارتقا بهره‌وری واقعی آب (WPET) در پیک تراکم کشت با رعایت تناوب آبیاری در روش خشکه کاری

ماه پیک تراکم کشت گیاه برنج (13 مرداد تا 16 شهریور) - دوره کاشت تا زمان گلدهی				
زیر حوضه‌های استان	زیست‌توده کشت سنتی با غرقاب دائم (کیلوگرم ماده خشک در هکتار)	زیست‌توده روش خشکه کاری با تناوب آبیاری (کیلوگرم ماده خشک در هکتار)	میزان کاهش زیست‌توده در فناوری خشکه کاری با تناوب آبیاری نسبت به کشت سنتی (درصد)	ارتقا WPET در فناوری خشکه کاری با تناوب آبیاری نسبت به کشت سنتی (با توجه به جدول ۹)
کارون	2937.24	2803.75	4.5	20
کرخه	2565.19	2208.42	14	20
مارون - جراحی	3020.82	2454.98	18.7	8
زهره - هندیجان	1485.45	1393.02	6	1

نسبت به کشت سنتی (زیر حوضه مارون-جراحی) و یا میزان تولید پایین زیست توده محصول (زیر حوضه زهره-هندیجان) بود. دلیل این مهم در این دو زیر حوضه، شوری آب آبیاری (سه تا شش دسی‌زیمنس بر متر) و حساسیت برنج به شوری آب و خاک در مناطق جلگه‌ای (جنوب و جنوب‌شرق استان در این دو زیر حوضه) می‌توان عنوان کرد. این مسئله با اعمال تناوب آبیاری در روش خشکه کاری بیشتر اثرگذار بود. بر این اساس توصیه می‌شود در این مناطق خاص، کشت برنج متوقف شود و در صورت کشت، از فناوری‌های کاهش اثرات تجمع نمک اطراف ریشه گیاه مانند کشت با دستگاه‌های خطی کار کف‌کار، زهکشی اراضی و آبیویی پیوسته در مزرعه استفاده گردد. شکل ۸ تغییرات مکانی نمایه WP_{ET} را در زمان برای زیر حوضه‌های مختلف استان در هر دو نوع کشت و مدیریت آبیاری نشان می‌دهد. در نهایت جدول‌های ۱۱ و ۱۲، میزان Bio , WP_{ET} , ETa برای کل دوره رشد در زیر حوضه‌های مختلف به تفکیک بیان می‌کند.

بر اساس جدول‌های ۹ و ۱۰ منتج از شکل ۷ تا زمان رعایت تناوب آبیاری در خشکه کاری برنج، میزان میانگین وزنی کاهش ETa در کل استان، ۲۴ درصد بود. این در حالی است که بیشترین ارتقا WP_{ET} در این شرایط به زیر حوضه‌های کارون و کرخه برمی‌گردد (افزایشی ۲۰ درصدی). این مسئله به دلیل کاهش محسوس ETa (۲۸ درصد) برای زیر حوضه کرخه و یا تولید زیست توده مناسب و پایین بودن درصد کاهش زیست توده (۴/۵ درصد) برای زیر حوضه کارون) در فناوری خشکه کاری با تناوب آبیاری نسبت به روش کشت سنتی با غرقاب دائم بود. کیفیت مناسب آب آبیاری و خاک مزارع در مناطق شمالی این زیر حوضه‌ها توانسته فناوری خشکه کاری با تناوب آبیاری را مؤثر جلوه دهد. این در حالی است که زیر حوضه های مارون-جراحی و یا زهره-هندیجان، کمترین میزان ارتقا WP_{ET} را در اجرای فناوری خشکه کاری با تناوب آبیاری نسبت به کشت سنتی با غرقاب دائم داشتند. این مسئله به دلیل کاهش شدید زیست توده در این فناوری



شکل ۸- نقشه‌های بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) برحسب کیلوگرم بر مترمکعب برای زیر حوضه‌های آبریز خوزستان در دوره رشد کامل برنج برای مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

جدول ۱۱- میزان آب مصرفی واقعی (ETa) برنج در استان خوزستان با توجه به مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

زیر حوضه‌های استان	سطح کشت سنتی با غرقاب دائم (هکتار)	ETa سنتی (مترمکعب در هکتار)	حجم آب مصرفی واقعی کشت‌های سنتی (مترمکعب)	سطح خشکه کاری با مدیریت متناوب (هکتار)	ETa خشکه کاری (مترمکعب در هکتار)	حجم آب مصرفی واقعی کشت‌های خشکه کاری (مترمکعب)	میزان کاهش آب مصرفی واقعی به ازای هر هکتار در خشکه کاری نسبت به کشت سنتی (درصد)
کارون	95,460	9400	897,324,000	30,602	8350	255,526,700	11
کرخه	24,132	9090	219,359,880	10,613	7950	84,373,350	12.5
مارون - جراحی	17,077	8970	153,180,690	1910	7500	14,325,000	16
زهره - هندیجان	101	5290	534,290	47	4450	209,150	15.8
مجموع	136,770	-	1,270,398,860	43,172	-	354,434,200	
							1,624,833,060

جدول ۱۲- تولید خالص (NPP) میزان زیست‌توده (Bio) و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) برنج در خوزستان با مدیریت‌های کاشت و آبیاری

زیر حوضه‌های استان	کشت سنتی با غرقاب دائم			خشکه کاری با مدیریت متناوب			میزان کاهش Bio در روش خشکه کاری نسبت به کشت سنتی (درصد)	میزان افزایش WP _{ET} در روش خشکه کاری نسبت به کشت سنتی (درصد)
	NPP (گرم کربن در مترمربع)	Bio (کیلوگرم ماده خشک در هکتار)	WP _{ET} کشت سنتی (کیلوگرم در مترمکعب)	NPP (گرم کربن در مترمربع)	Bio (کیلوگرم ماده خشک در هکتار)	WP _{ET} خشکه کاری (کیلوگرم در مترمکعب)		
کارون	1418.48	17716.82	0.81	1350.82	17479.61	0.9	1	
کرخه	1497.42	18702.77	0.885	1252.74	16210.45	0.877	13	
مارون - جراحی	1312	16386.88	0.786	1186.11	15348.26	0.88	6	
زهره - هندیجان	1310.31	16365.77	1.330	1093.64	14151.7	1.367	13.5	

اگر تناوب آبیاری در فناوری خشک‌کاری تا زمان برداشت محصول رعایت می‌شد، ارتقا بهره‌وری تا ۲۰ درصد نسبت به کشت سنتی افزایش داشت و میزان تولید محصول شاید کاهشی پنج درصدی را تجربه می‌کرد (توجه به جدول ۱۰). کابانگون و همکاران (۲۰۰۲) بیان می‌کنند که روش کشت مستقیم هوازی (خشک‌کاری) 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. همچنین وانگ و همکاران (۲۰۰۲)، نشان دادند که شیوه‌ی کشت خشک‌کاری در مقایسه با روش کشت مرسوم گلخراپی و بسته به نوع خاک، ۳۰ تا ۵۱ درصد آب کمتری برای تهیه زمین نیاز دارد که باعث می‌شود بهره‌وری آب آبیاری را ۳۲ تا ۸۸ درصد افزایش دهد. دلیل این مهم تفاوت اساسی در فرآیند بسترسازی از جمله حذف گلخراپی، مدیریت کاشت، آبیاری پس از آن به‌خصوص از زمان کاشت تا پایان مرحله گیاهچه‌ای (۳۰-۲۵ روز)، تناوب آبیاری و دوره رشد کوتاه‌تر است (گوپال و همکاران، ۲۰۱۰؛ گیلانی، ۱۳۹۸؛ یعقوبی و رجبیان، ۱۳۹۸ و کیانی و همکاران، ۱۳۹۹). از طرفی دیگر برای صحت‌سنجی خروجی‌های سنجش‌ازدور با داده‌های صحرائی و محاسباتی، جدول ۱۳ تهیه شد.

بر اساس جدول ۱۱، مشاهده می‌شود که میزان میانگین وزنی کاهش Eta در فناوری خشک‌کاری تا پایان دوره کاشت نسبت به روش کشت سنتی به ۱۳ درصد می‌رسد. این در حالی است که تا زمانی که تناوب آبیاری در روش خشک‌کاری رعایت شد، میزان کاهش آب مصرفی واقعی بیشتر بود (۲۴ درصد برای کل استان با توجه به جدول ۹). بر اساس جدول ۱۱، میزان آب مصرفی واقعی در اثر کشت برنج در سال ۱۴۰۲ در استان خوزستان بالغ بر ۱/۶۲ میلیارد مترمکعب بود. این مقدار آب از دسترس خارج شده و به چرخه برنمی‌گردد. با توجه به جداول ۹ و ۱۱ می‌توان تفهیم شد که با توجه به اثربخشی محسوس فناوری خشک‌کاری با مدیریت تناوب آبیاری (دور آبیاری دو تا چهار روزه) بر کاهش آب مصرفی واقعی (Eta)، متأسفانه سهم این فناوری در استان بسیار نامحسوس است. توجه به جدول ۱۲ نشان می‌دهد، با اینکه کشاورزان در ۴۵ روز آخر دوره رشد، با خارج شدن از تناوب آبیاری تلاش کرده‌اند که کاهش عملکرد در روش خشک‌کاری متوجه محصول نشود (توجه به کاهش بسیار ناچیز در زیر حوضه کارون به‌عنوان بیشترین سطح زیر کشت است)، با این حال فناوری خشک‌کاری در این زیر حوضه توانسته تا ۱۱ درصد ارتقا بهره‌وری واقعی آب نسبت به کشت سنتی را به‌همراه داشته باشد. این در حالی است که در همین زیر حوضه،

جدول ۱۳- صحت‌سنجی میزان آب مصرفی واقعی با نیاز آبی استاندارد و تعیین راندمان مزارع برنج در خوزستان

زیر حوضه‌های استان	متوسط Eta	متوسط Eta	نیاز آبی استاندارد بر اساس سند ملی سامانه نیاز آب ^{۱*} (مترمکعب بر هکتار)	میزان متوسط حجم آب آبیاری در مزارع بر اساس گزارش‌های تحقیقاتی- ترویجی ^{۲*} در فناوری خشک‌کاری (مترمکعب در هکتار)	میزان متوسط حجم آب آبیاری در مزارع سنتی	راندمان آبیاری مزارع در فناوری خشک‌کاری (درصد)	راندمان آبیاری مزارع سنتی (درصد)
کارون	9400	8350	9800	34000	23000	36.3	27.6
کرخه	9090	7950	10500			34.5	26.7
مارون - جراحی	8970	7500	10000			32.6	26.3
زهره - هندیجان	5290	4450	12000			19.3	15.5

*۱: <http://niwr.ir>

*۲: (گیلانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ گیلانی، ۱۳۹۸؛ مسکینی ویشکایی و همکاران، ۱۴۰۰؛ مختاران و همکاران، ۱۴۰۱ و مختاران و همکاران، ۱۴۰۲)

زیر حوضه‌های آبریز مورد مطالعه کمتر بود. این مسئله به دلیل توزیع نامناسب آب آبیاری در زمان و عدم یکنواختی

بر اساس جدول ۱۳ مشاهده می‌شود که میزان آب مصرفی واقعی (Eta)، از نیاز آبی استاندارد (ETc) در همه

۱۸۰۰۰۰ هزار هکتار سطح زیر کشت برنج در سال ۱۴۰۲، نزدیک به ۱۲۴۰۰۰ هکتار در مناطق جنوب، جنوب غرب و غرب استان (تمامی زیر حوضه زهره- هنديجان، پایین‌دست زیر حوضه‌های کارون، کرخه و مارون- جراحی) برنج کشت شده است. کشت برنج به روش کشت سنتی با غرقاب دائم در این مناطق به دلیل کیفیت نامناسب آب آبیاری و مستعد بودن خاک‌ها به شوری و سدیمی بودن باعث می‌شود که آب خارج شده از مزارع با راندمان آبیاری پایین (جدول ۱۳)، قابل بازیافت و استفاده مجدد در پایین‌دست نباشد که این مسئله یکی از دلایل پایین بوده بهره‌وری آب کشاورزی در سطح زیر حوضه‌های آبریز استان است.

نتیجه‌گیری

وجود متولیان و ذینفعان مختلف در اثرگذاری بر منابع و مصارف آب بخش کشاورزی، داشتن اطلاعات قابل‌اعتماد از تغییرات مؤلفه‌های بیلان منابع و مصارف جهت مدیریت یکپارچه در سطح حوضه است. صرفه‌جویی واقعی آب زمانی اتفاق می‌افتد که تمرکز آن روی کاهش مصرف آب بوده، لذا باید شاخص بهره‌وری آب باید مبتنی بر تبخیر-تعرق واقعی محصول (ETa) باشد. برنج در خوزستان یکی از مهم‌ترین محصولات تابستانه است که کشت گسترده آن تأثیر بسیاری در ایجاد تنش آبی بر زیر حوضه‌های آبریز خوزستان دارد. در این استان، برنج به صورت کشت سنتی (نشاکاری و کشت مستقیم بذر در محیط مرطوب) با غرقاب دائم انجام می‌شود، اما در سال‌های اخیر استفاده از روش آبیاری متناوب به صورت خشک و مرطوب کردن در سامانه کشت مستقیم برنج هوایی یا خشکه‌کاری از جمله فناوری‌هایی است که اخیراً 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 استان برای مدیران آب و بهره‌برداران محسوس نیست. لذا این پژوهش با هدف تعیین نقشه پراکنش کشت

توزیع آب در مزارع است. در زیر حوضه کارون به دلیل شرایط بهتر آب از نظر کمیت، کیفیت و دسترسی به آب، میزان ETa به نیاز آبی استاندارد نزدیک بود، اما این مسئله در زیر حوضه زهره- هنديجان بسیار متفاوت بود. کمبود و تنش آبی شدید در این زیر حوضه و کیفیت بسیار نامناسب آب در رودخانه زهره در کنار شوری و مستعد بودن خاک‌ها به سدیمی شدن از یک طرف و حساسیت برنج به شرایط کم‌آبی و شوری، باعث شد که اختلاف ETa و ETc تا ۱۴۰ درصد باشد. همچنین بخشی از کاهش عملکردی که در این زیر حوضه در روش خشکه‌کاری مشاهده شده است، ناشی از مدیریت آبیاری نامناسب در مزارعی است که خشکه‌کاری در آن‌ها صورت گرفته و مقدار آب مصرفی واقعی در این مزارع به شدت کمتر از نیاز واقعی گیاه بود که موجب بهره‌وری کم روش خشکه‌کاری در این زیر حوضه شده است. از مقایسه میزان آب مصرفی واقعی (ETa) و آب آبیاری در مزارع برنج، نتایج نشان داد که کشت برنج در خوزستان از راندمان آبی مطلوبی برخوردار نیست. میزان راندمان کاربرد آب در مزارع (جدول ۱۳ و شکل ۷) بیان می‌کند که در صورت ضرورت، کشت برنج باید به روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری و در مناطقی که از نظر خاک، آب، سطح آب زیرزمینی و مهندسی زهکشی در وضعیت مناسبی باشند، انجام گردد. مختاران و همکاران (۱۳۹۲ و ۱۴۰۳) در همین زمینه گزارش کردند که بخشی از زمین‌های استان خوزستان در مرکز، غرب و جنوب غرب آن دارای منابع آب لب‌شور تا شور و بافت خاک سنگین با آب زیرزمینی شور و کم‌عمق است که با اجرای سامانه زهکشی زیرزمینی و احیای اراضی، مناسب برای عملیات کشاورزی شده‌اند. وسعت این منطقه تقریباً ۶۵ درصد مساحت کل استان است، تجهیز و نوسازی زمین‌های کشاورزی در این مناطق و ارائه ندادن الگوی کشت اقتصادی و منطبق با وضعیت منابع آب استان باعث شده است کشاورزان به سمت کشت گیاهانی مانند برنج سوق داده شوند که از لحاظ آب پرمصرف‌اند. این در حالی است که در این پژوهش مشخص شد از تقریباً

پژوهش و آب آبیاری اندازه‌گیری شده در مزارع برنج منتج از تحقیقات کاربردی و مشاهده‌ای استان، میزان راندمان کاربرد آب در مزارع با کشت سنتی، ۲۷ درصد و برای روش خشکه‌کاری، ۳۴ درصد برآورد شد. این مهم نشان می‌دهد که کشت برنج در بسیاری از مناطق خوزستان که میزان مصرف آب را در حالت بحرانی قرار داده، توجیه نداشته و در صورت ضرورت، کشت برنج باید به روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری و در مناطقی که از نظر خاک، آب، سطح آب زیرزمینی و مهندسی زهکشی در وضعیت مناسبی باشند، انجام گردد. در این شرایط پیشنهاد می‌شود که فناوری خشکه‌کاری با مدیریت متناوب به صورت خشک و مرطوب کردن در کنار سایر فناوری‌های نوین مانند آبیاری قطره‌ای نواری، کشت روی پشته‌های بلند و عریض و یا کشت با دستگاه‌های خطی کار کف کار در شرایط شور و استفاده از برنامه‌ریزی دقیق آبیاری طبق نمایه‌های خاک و گیاه بهره‌برداری شود که این مهم نیاز به تحقیق و ارائه ضوابط و دستورالعمل لازم را دارد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

تشکر و قدردانی

در این پژوهش لازم است از زحمات و پشتیبانی همکاران محترم جهاد کشاورزی خوزستان در شهرستان‌های مختلف و موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی تشکر و قدردانی بعمل آید.

برنج (RCM) برای روش‌های مختلف مدیریتی کاشت و آبیاری (کشت سنتی با غرقاب دائم و خشکه‌کاری با تناوب آبیاری) از خرداد تا آبان ماه ۱۴۰۲ در خوزستان با استفاده از شاخص‌های گیاهی، دما، خاک و داده‌های سنجش‌ازدور انجام شد. در این پژوهش، همچنین تغییرات زمانی-مکانی مصارف آب برنج بر اساس میزان آب مصرفی واقعی (ETa) و بهره‌وری واقعی آب (WPET) ارزیابی و تحلیل شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فناوری سنجش‌ازدور می‌تواند اطلاعات به‌موقع و دقیقی در مورد توزیع محصول، سطح کاشت و تولید بالقوه برای تصمیم‌گیرندگان در سطوح مختلف فراهم کند. نتایج به‌دست آمده از محاسبه سطح زیر کشت برنج (۱۸۰ هزار هکتار)، تفکیک برنج برحسب نوع کشت (بالغ بر ۱۳۶ هزار هکتار برای کشت سنتی و حدود ۴۳ هزار هکتار برای سامانه خشکه‌کاری) و دقت طبقه‌بندی (حدود ۹۹ درصد) و ضریب کاپای بالا (۰/۸۷) در استان خوزستان، موید کارایی بالای استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای و تکنیک‌های سنجش‌ازدور در برآورد دقیق سطح زیر کشت بود. نتایج نقشه‌های زمانی-مکانی ETa و WPET برنج در دوره رشد محصول برای تمامی زیر حوضه‌های آبریز استان نشان داد که مجموع ETa برنج در سال ۱۴۰۲ بالغ بر ۱/۶۲ میلیارد مترمکعب بود. این پژوهش میزان میانگین وزنی کاهش ETa و ارتقا WPET در فناوری خشکه‌کاری نسبت به روش کشت سنتی را به ترتیب ۱۳ و ۸ درصد نشان داد. همچنین نتایج صحت‌سنجی خروجی‌های سنجش‌ازدور با داده‌های صحرائی و محاسباتی، میزان ETa از نیاز آبی استاندارد (ETc) کمتر بود. این مسئله به دلیل کمبود و تنش آبی در زیر حوضه‌ها و نامناسب بودن کیفیت آب در بسیاری از مناطق کشت برنج بود. به‌طوری‌که از مقایسه میزان ETa حاصل از این

فهرست منابع

۱. افشاری‌پور، سید کریم و حمزه، سعید، علوی پناه، سید کاظم و مقبلی دامنه، اسماعیل. ۱۳۹۸. ارزیابی میزان بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل WATPRO (مطالعه موردی؛ اراضی تحت کشت گندم حوزه آبریز دشت جیرفت). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۱)، صص. ۴۵-۵۸.
۲. سامانه نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور. <http://niwr.ir>
۳. گیلانی، عبدالعلی، آبسالان، شکراله و جلالی، سامی، ۱۳۹۵. مقایسه روش خشکه‌کاری با شیوه‌های رایج کاشت ارقام برنج از نظر میزان آب مصرفی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، شماره ثبت: ۴۹۸۰۲. ۲۷ صص.
۴. گیلانی، عبدالعلی، ۱۳۹۸. مدیریت تولید برنج در روش خشکه‌کاری، موسسه تحقیقات برنج کشور، نشریه فنی، ش ۴۱، ۲۳ صص.
۵. فتیحی، مهدیه و شاه‌حسینی، رضا، ۱۴۰۲. بهبود دقت شناسایی مزارع برنج با استفاده از تصاویر سری زمانی دمای سطح زمین ماهواره لندست ۸ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۱۲۵(۳۲)، صص. ۵۳-۶۶. doi: 10.22131/sepehr.2023.535693.2777
۶. مختاران، علی، گیلانی، عبدالعلی، سپهری صادقان، سالومه و ورجاوند، پیمان، ۱۴۰۱. بازچرخانی زهاب در مزارع کشت و صنعت نیشکر جنوب استان خوزستان برای کشت گیاهان زراعی (گندم و برنج)، نشریه فنی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی (AERI)، شماره ثبت ۶۱۹۳۶، ۴۸ صص.
۷. مختاران، علی، گیلانی، عبدالعلی، جلالی، سامی، بهبهانی، لیلا، رضایی، مجتبی و تجددی طلب، 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. ۱۵۸-۱۳۹. doi:10.22092/jwra.2023.359561.935
۸. مختاران، علی، دهقانی سانچ، حسین و محمدی، مریم، ۱۴۰۳. تشخیص سطح سامانه‌های مختلف کشت مزارع برنج مبتنی بر مدیریت آبیاری با استفاده از تکنیک یادگیری ماشین، دستنامه فنی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی (AERI)، شماره ثبت ۶۵۲۴۲، ۷۰ صص.
۹. مختاران، علی، ناصری، عبدعلی و کشکولی. حیدرعلی، ۱۳۹۲. تعیین ضخامت فصل مشترک آب شور-شیرین در اراضی تحت آبیاری و آب زیرزمینی شور و کم عمق، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران.
۱۰. 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.
۱۱. یعقوبی، بیژن و رجیبان، مریم، ۱۳۹۸. مروری بر کشت مستقیم برنج با تأکید بر مدیریت علف‌های هرز، موسسه تحقیقات برنج کشور، نشریه فنی، ش ۳۷، ۵۱ صص.
۱۲. یوسفی، حسین، کردی، فاطمه، محبتی، فرهاد و قاسمی، لیلا، ۱۴۰۰. برآورد آب مصرفی بخش کشاورزی کشور ایران و ارزیابی نتایج به‌دست آمده از سامانه WaPOR با داده‌های زمینی، اکوهیدرولوژی، ۸(۳)، صص. ۸۳۹-۸۵۹. doi: 10.22059/ije.2021.324474.1512
13. 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.

14. Allen, R. G., Tasumi, M. and Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), PP. 380-394.
15. 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**.
16. Ajour, S. A. 2021. Evaluation of FAO's Water Productivity Portal (WAPOR) Yield Over the Bequaa Valley, Lebanon (Thesis for the degree of Master of Science to the Department of Landscape Design and Ecosystem Management of the Faculty of Agricultural and Food Sciences at the American University of Beirut.
17. Alemayehu, T., Bastiaanssen, S., Bremer, K., Cherinet, Y., Chevalking, S. and Girma, M., 2020. Water Productivity Analyses Using WAPOR Database. A Case Study of Wonji, Ethiopia. Water-PIP technical report series. IHE Delft Institute for Water Education.
18. 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.
19. 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.
20. Blatchford, M.L., Mannaerts, C.M., Njuki, S. M., Nouri, H., Zeng, Y., Pelgrum, H. and Karimi, P., 2020a. Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa. *Hydrological Processes*, 34(15), PP. 3200-3221.
21. Blatchford, M., M Mannaerts, C., Zeng, Y., Nouri, H. and Karimi, P., 2020b. Influence of spatial resolution on remote sensing-based irrigation performance assessment using WaPOR data. *Remote Sensing*, 12(18), 2949.
22. 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 International Soil Conservation Organization Conference (Beijing)*, PP. 175–181.
23. 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.
24. F. Brown, ch., P. Brumby, S., Guzder-Williams, B., Birch, T., Brooks Hyde, S., Mazzariello, J. and M.Tait, A., 2022. Dynamic World, near real-time global 10m land use land cover mapping. *Scientific Data* 9(1), 251PP. doi: **10.1038/s41597-022-01307-4**.
25. Darvishzadeh, R., Matkan, A. A. and Eskandari, N., 2011. Evaluation of ALOS-AVNIR2 spectral indices for prediction of rice biomass. *Journal of Geographical Landscape*, 6, PP. 11-14. (In Persian).
26. Dehghanisanij, H., 2012. Current agricultural water and soil resources and productivity in the Iranian highlands: measures and Improvements. *Journal of Agriculture, Biotechnology & Ecology*. 5(1), PP.1-14.
27. 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**.
28. ESA .2020. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Rice_fields_Vietnam.
29. FAO. 2018. WaPOR Database Methodology: Level 1. Remote Sensing for Water Productivity Technical Report: Methodology Series. Rome, FAO. 72 P.
30. FAO. 2019. Food and agriculture organization of the United Nations. FAOSTAT: Crops. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
31. FAO. and Delft, I., 2019. WaPOR quality assessment. Technical report on the data quality of the WaPOR FAO database version 1.0. Rome. 134P.
32. FAO. 2020. WaPOR database methodology: Version2 release, Rome.
33. FAO & World Bank. 2022. Irrigating from space—Using remote sensing for agricultural water management. Investment brief. Rome. doi: **10.4060/cc3745en**.

34. Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. & Proud, S.R., 2014. Automated Water 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.
35. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 202(1), PP.18-27.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Izaddoost, H., Samizadeh, H., Rabiei, B. and Abdollahi, S., 2013. Evaluation of salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars and lines with emphasis on stress tolerance indices. *Cereal Research*, 3, PP.167-180. (In Persian). doi.20.1001.1.22520163.1392.3.3.1.2.
41. Karimi, P., Molden, D., Bastiaanssen, W.G.M. and Cai, X., 2012. Water accounting to assess use and productivity of water: evolution of a concept and new frontiers. In Godfrey, J. M.; Chalmers, K. (Eds). *Water accounting: international approaches to policy and decision-making*. Cheltenham, UK: Edward Elgar. PP. 76-88.
42. 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.
43. Kaune, A. and Opstal, JV. 2020. Water Productivity Technical Report. Agência de desenvolvimento do Vale Zambeze (ADVZ). *FutureWater*, Report 195.
44. Liu, L., Huang, J., Xiong, Q., Zhang, H., Song, P., Huang, Y., Dou, Y. and Wang, X., 2020. Optimal MODIS data processing for accurate multi- year paddy rice area mapping in China. *GIScience & Remote Sensing*, 57(5), PP. 687-703.
45. Magidi, J., Nhamo, L., Mpandeli, S. and Mabhaudhi, T., 2021. Application of the Random Forest Classifier to Map Irrigated Areas Using Google Earth Engine. 13, 876. doi: 10.3390/rs13050876.
46. McCallum, I., Wagner, W., Schullius, C., Shvidenko, A., Obersteiner, M., Fritz, S. and Nilsson, S., 2009. Satellite-based terrestrial production efficiency modeling. *Carbon Balance and Management*, 4(1), 8P.
47. Monteith, J., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of applied ecology*, 9(3), PP. 747-766.
48. Pan, S., Tian, H., Dangal, S. R. S., Ouyang, Z., Tao, B., Ren, W., Lu, C. and Running, S. W., 2014. Modeling and monitoring terrestrial primary production in a changing global environment: toward a multiscale synthesis of observation and simulation. *Ecosystem and Conservation Sciences Faculty Publications*. 45. <https://scholarworks.umd.edu/decspubs/45>. doi: 10.1155/2014/965936.
49. Roy, R., Chan, N.W. and Xenarios, S., 2016. Sustainability of rice production systems: an empirical evaluation to improve policy. *Environ Dev Sustain* 18: PP. 257–278. doi:10.1007/s10668-015-9638-x.
50. Rongali, G., Keshari, A.K., Gosain, A.K. and Khosa, R., 2018. Split Window Algorithm for Retrieval of Land Surface Temperature Using Landsat 8 Thermal Infrared Data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*. 14(2), PP. 1-19. doi:10.1007/s41651-018-0021-y

51. Schmidt, J., Marques, M.R., Botti, S. and Marques, M.A., 2019. Recent advances and applications of machine learning in solid-state materials science. *NPJ Comput. Mater.* 5, PP. 1–36.
52. Torbick, N., Chowdhury, D., Salas, W. and Qi, J., 2017. Monitoring rice agriculture across Myanmar using time series Sentinel-1 assisted by Landsat-8 and PALSAR-2. *Remote Sensing*. 9(2), 119P. **doi:10.3390/rs9020119**
53. Torre, D.M.G., Gao, J., Macinnis-Ng, C. and Shi, Y., 2021. Phenology-based delineation of irrigated and rain-fed paddy fields with Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine. *Geo-Spatial Information Science*. **doi:10.1080/10095020.2021.1984183**
54. Veroustraete, F., Sabbe, H. and Eerens, H., 2002. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. *Remote Sensing of Environment*, 83(3), PP. 376-399.
55. Wang, J., Huang, J., Wang, X., Jin, M., Zhou, Z., Guo, Q., Zhao, Z., Huang, W., Zhang, Y. and Song, X., 2015. Estimation of rice phenology date using integrated HJ-1 CCD and Landsat8 OLI vegetation indices time-series images. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 16 (10), PP. 832-844.
56. Wang, H., Bouman, 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.
57. Yilma, W. A., Opstal, J. V., Karimi, P. and Bastiaanssen, W. G. M., 2017. *Computation and Spatial Observation of Water Productivity in Awash River Basin*. UNESCO-IHE, Delft.
58. Zhan, P., Zhu, W. and Li, N., 2021. An automated rice mapping method based on flooding signals in synthetic aperture radar time series. *Remote Sensing of Environment*. 252:112112. **doi: 10.1016/j.rse.2020.112112**
59. Zhang, C., Dong, J., Xie, Y., Zhang, X. and Ge, Q., 2022. Mapping irrigated croplands in China using a synergetic training sample generating method, machine learning classifier, and Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 112 (2022), 102888. **doi:10.1016/j.jag.2022.102888**
60. Ziaeian Firouzabadi, P., Sayad Bidhendi, L. and Eskandari Noudeh, M., 2009. Mapping and acreage estimating of rice agricultural land using radarsat a satellite images. *Physical Geography Research Quarterly*, 41, PP.45-58. (In Persian).