



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۰ | دی ۱۴۰۰ (ص ۲۵۶۷-۲۵۵۵)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.326556.669012>

(مقاله علمی - پژوهشی)

## Estimating the Rice Yield and Determining Water Productivity of Paddy Fields with Remote Sensing and Lysimeter Data (The Studied Case: North of Sari)

FATEMEH JAFARI SAYADI<sup>1</sup>, MOHAMMAD ALI GHOLAMI SEFIDKOUHI<sup>1\*</sup>, HEMMATOLLAH PIRDASHTI<sup>2</sup>,  
MOJTABA KHOSHRAVESH<sup>1</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2. Department of Agronomy, Faculty of Crops Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

(Received: July. 2, 2021- Revised: Oct. 26, 2021- Accepted: Oct. 31, 2021)

### ABSTRACT

Due to the key role of rice crops in food security and employment in Iran, access to on-time information of productivity and water productivity in paddy fields can provide important strategies for planning activities such as harvesting, storage, marketing, and management of resources and inputs. This study aimed to estimate the yield and determine water productivity of paddy fields in the north of Sari city using Landsat 8 satellite data and N type lysimeter. For this purpose, NDVI, SAVI, and RGVI indices were extracted from the images. Using these indices, a suitable regression relationship was created with rice yield. With continuous monitoring of paddy fields and installation of type N lysimeter, water consumption and evapotranspiration of rice data were measured. Finally, the study area's rice water productivity map was obtained by incorporating remote sensing data (yield) and field data (water consumption and evapotranspiration). The results showed that plant indices in the tillering stage have the highest correlation with rice crop yield, and if yield estimation using remote sensing data is considered, plant indices in tillering stage should be used. Among the plant indices, the SAVI index had the best correlation ( $r=0.94$ ) with yield, and the yield map obtained from this plant index was used to prepare a water productivity map based on water consumption and rice evapotranspiration. Evapotranspiration-based water productivity map provided more realistic data than water consumption-based productivity map, so the SAVI index average productivity was  $0.63 \text{ kg/m}^3$ , and the average measured productivity was  $0.68 \text{ kg/m}^3$ . Findings showed that remote sensing provides useful information for mapping crop yield and water productivity in paddy fields and has good potential for precision and smart agriculture.

**Keywords:** Rice Water Consumption, Evapotranspiration (ET), Vegetation Indices.

---

\*Corresponding Author's Email: ma.gholami@sanru.ac.ir

## برآورد عملکرد برنج و تعیین بهره‌وری آب اراضی شالیزاری با استفاده از سنجش از دور و داده‌های لایسومتر (مورد مطالعه: شمال شهرستان ساری)

فاطمه جعفری صیادی<sup>۱</sup>، محمدعلی غلامی سفیدکوهی<sup>۱\*</sup>، همت‌اله پیردشتی<sup>۲</sup> و مجتبی خوش‌روش<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۲. گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱۱ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۸/۹)

### چکیده

با توجه به نقش کلیدی محصول برنج در تأمین امنیت غذایی و اشتغال‌زایی در کشور، دستیابی به اطلاعات به‌هنگام عملکرد و بهره‌وری زمین‌های شالیزاری می‌تواند راهبردهای مهمی را به‌منظور برنامه‌ریزی فعالیت‌هایی مانند برداشت، ذخیره‌سازی، بازاریابی و مدیریت منابع و نهاده‌ها فراهم نماید. هدف پژوهش حاضر، برآورد عملکرد و تعیین بهره‌وری آب شالیزارهای شمال شهرستان ساری با استفاده از داده‌های ماهواره‌های لندست ۸ و لایسومتر نوع N است. به‌این منظور، پس از انجام تصحیح‌های اتمسفریک و رادیومتریک تصاویر ماهواره‌ای در دوره رشد برنج، شاخص‌های گیاهی SAVI، NDVI و RGVI به دست آمد. با استفاده از این شاخص‌ها رابطه رگرسیونی مناسب با عملکرد برنج ایجاد شد. همچنین، با پیش مداوم شالیزارها و نصب لایسومتر نوع N داده‌های مربوط به آب مصرفی و تبخیر-تعرق برنج اندازه‌گیری شد. در نهایت، نقشه بهره‌وری آب برنج در منطقه مورد مطالعه با تلفیق داده‌های سنجش از دور (عملکرد) و مزرعه‌ای (آب مصرفی و تبخیر-تعرق) به‌دست آمد. نتایج نشان داد، شاخص‌های گیاهی در مرحله پنجه‌زنی بیشترین همبستگی را با میزان عملکرد گیاهی برنج دارند و در صورتی که، برآورد عملکرد با استفاده از داده‌های سنجش از دور مدنظر باشد، شاخص‌های گیاهی در مرحله پنجه‌زنی باید مورد استفاده قرار گیرد. در میان شاخص‌های گیاهی، شاخص SAVI بهترین همبستگی ( $r=0/94$ ) را با عملکرد داشته و نقشه عملکرد حاصل از این شاخص گیاهی برای تهیه نقشه بهره‌وری آب بر مبنای آب مصرفی شالیزار و تبخیر-تعرق گیاه برنج مورد استفاده قرار گرفت. میانگین بهره‌وری با استفاده از شاخص SAVI،  $0/63$  کیلوگرم بر مترمکعب و میانگین بهره‌وری اندازه‌گیری شده  $0/68$  کیلوگرم بر مترمکعب بود. یافته‌ها نشان می‌دهد سنجش از دور حاوی اطلاعات مفیدی برای تهیه نقشه عملکرد گیاهی و بهره‌وری آب در اراضی شالیزاری بوده و از پتانسیل خوبی برای استفاده در کشاورزی دقیق و هوشمند برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: آب مصرفی برنج، تبخیر-تعرق، شاخص‌های گیاهی.

### مقدمه

برای دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار، استفاده هر چه بهتر و موثرتر از منابع کشاورزی همچون زمین، آب، کود، نیروی کار و سایر عوامل تولید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Karthikeyan *et al.*, 2020). جایگاه ویژه و مهم آب در حیات بخشیدن به کشاورزی و جامعه انسانی منجر شده است که در بین تمامی نهاده‌های کشاورزی، مباحث مربوط به آب و حفظ آن بیشتر مورد توجه قرار گیرد. برای بخش بزرگی از جهان بحران آب در حال حاضر وجود دارد و تغییرات آب و هوایی باعث تشدید این بحران شده است (Virnodkar *et al.*, 2020). بنابراین، استفاده پایدار از منابع آب امری بسیار مهم و ضروری بوده تا بتوان حیات انسان و

تولید غذای کافی را تضمین نمود (Nazari *et al.*, 2018). این نهاده در کشور ما به دلیل محدودیت منابع آب از یک طرف و کم بودن راندمان آبیاری و هدر رفت بخش عمده‌ای از منابع آب از طرف دیگر اهمیت دوچندان دارد (Farahza *et al.*, 2020). با افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب شرایط برای حفظ امنیت غذایی فراهم شده و فشار بر منابع آبی کاهش یابد. براساس منابع، متوسط شاخص بهره‌وری آب محصولات کشاورزی در کشور  $0/8$  تا  $1$  کیلوگرم محصول تولیدی بر مترمکعب آب مصرفی است (Loveimi *et al.*, 2021). برای آن که بتوان راهکارهای مناسب در بهبود بهره‌وری را شناسایی نمود باید عوامل موثر بر بهره‌وری تعیین شود. بهره‌وری

آب به زبان ساده، میزان عملکرد دانه در واحد آب تعریف می‌شود (Bastiaanssen & Steduto, 2016). در نتیجه، تعیین عملکرد محصول پارامتر موثر برای محاسبه بهره‌وری آب است. همچنین، بسته به واحد آب در نظر گرفته شده، بهره‌وری آب به صورت عملکرد دانه در واحد تبخیر- تعرق گیاه (WPET<sup>۱</sup>) یا عملکرد دانه در واحد کل آب ورودی یعنی آبیاری به‌علاوه بارندگی (WPIP<sup>۲</sup>) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gemechu *et al.*, 2020). براساس مطالعات انجام شده به‌کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی و داده‌های سنجش از دور می‌تواند موجب بهبود در تعیین عملکرد گیاهی و در نتیجه بهره‌وری آب شود (Foster *et al.*, 2015; Badiehneshin *et al.*, 2017). به‌صورتی که استفاده از روش‌های مختلف پیش‌بینی عملکرد محصول با داده‌های سنجش از دور، به‌عنوان زمینه پژوهشی پویا و کارآمد شناخته می‌شود (Mkhabela *et al.*, 2011; Noureldin *et al.*, 2013). پیشرفت چشم‌گیر فناوری سنجش از دور طی چند دهه اخیر، اطلاعات ارزشمندی در زمینه‌های کشاورزی برای پژوهشگران فراهم کرده است. همچنین، پویایی زمانی داده‌های سنجش از دور و ارتباط نزدیک آنها با ویژگی‌های گیاه می‌تواند نقش مهمی در ایجاد یک روش مطمئن برای پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری قبل از برداشت محصول دارد (Bastiaanssen and Ali, 2003).

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی عملکرد محصول با استفاده از داده‌های سنجش از دور وجود دارد که متداول‌ترین روش، مدل رگرسیون مستقیم بین مقادیر شاخص تفاوت نرمال‌شده گیاهی (NDVI<sup>۳</sup>) و عملکرد محصول است (Prasad *et al.*, 2007; Mkhabela *et al.*, 2011; Mkhabela and Mashinini, 2005). در این رویکرد فرض می‌شود که اندازه‌گیری ظرفیت فتوسنتز از شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی به‌طور مستقیم با عملکرد محصول ارتباط دارد. این فرض مطابق پژوهش‌های مختلف برای محصولات زراعی همچون گندم (Manjunath *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2004; Balaghi *et al.*, 2018; Kamali *et al.*, 2008)، ذرت (Badiehneshin *et al.*, 2015; Prasad *et al.*, 2006; Ren *et al.*, 2008; Mo *et al.*, 2005; Mika *et al.*, 2002; Maselli and Rembold., 2001; Kastens *et al.*, 2005; Ferencz *et al.*, 2004; Wannebo and Wang., 2009; Rosenzweig, 2003; Funk and Budde, 2009 and Huang, 2002; Prasad *et al.*, 2007; Bastiaanssen and Kastens *et al.*, 2010)، سورگوم (Ali, 2003; Huang *et al.*, 2010) و جو (Maselli *et al.*, 2000; Mkhabela *et al.*, 2011; Wendroth *et al.*, 2005; Ferencz *et al.*, 2004).

در زمینه بهره‌وری آب محصولات کشاورزی پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است که به چند پژوهش اخیر اشاره می‌شود. در پژوهش Farahza *et al.* (2020) وضعیت بهره‌وری آب محصولات زراعی دشت مغان مورد بررسی قرار گرفت که در این پژوهش بهره‌وری آب گیاهان کلزا، سویا، برنج و ذرت علوفه‌ای به‌عنوان محصولات با بیشترین سطح زیر کشت در این منطقه به‌ترتیب ۱/۲۲، ۰/۱۵، ۰/۶۷ و ۰/۰۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شده است. تغییرات مکانی و زمانی بهره‌وری آب در کشت چغندر در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ در پژوهش Gemechu *et al.* (2020) مورد بررسی قرار گرفت. در گام اول، بهره‌وری آب با کمک داده‌برداری زمینی محاسبه و در ساختار مختصاتی وارد سامانه اطلاعات جغرافیایی شد. سپس با کمک درون‌یابی، نقشه بهره‌وری آب با صحت کل ۷۶ درصد به‌دست آمد. در گام دوم، بهره‌وری آب با پیش‌بینی عملکرد و تبخیر- تعرق با کمک داده‌های سنجنده مودیس<sup>۴</sup> برآورد و نقشه بهره‌وری آب حاصل از داده‌های سنجش از دور با صحت کل ۸۹ درصد به دست آمد. در نهایت بیشترین و کمترین مقدار بهره‌وری آب در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۰ برای چغندر به ترتیب ۷/۵ و ۴/۳ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد. در پژوهش Tian *et al.* (2020) تمرکز اصلی بر تعیین بهره‌وری آب بر مبنای تبخیر- تعرق بود. در این پژوهش، سری زمانی NDVI سنجنده مودیس بین سال‌های ۲۰۰۰ تا

۱ Water Productivity and Evapotranspiration (WPET)

۲ Water Productivity, Irrigation and Precipitation (WPIP)

۳ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

۴ Soil Adjustment Vegetation Index (SAVI)

۵ Rice Growth Vegetation Index (RGVI)

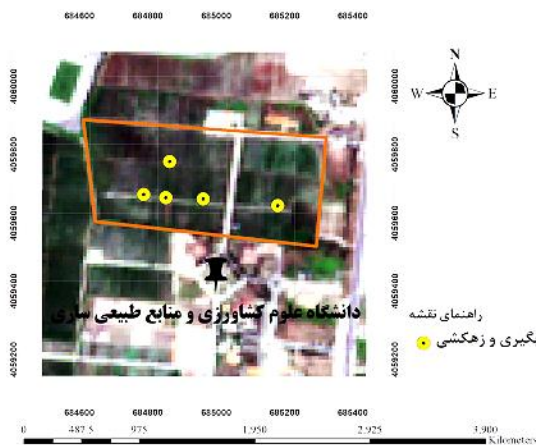
۶ MODIS, Moderate Resolution Imagery Spectrometer

وری بر مبنای میزان تبخیر-تعرق برنج) با تلفیق نقشه عملکرد و داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

شالیزارهای تجهیز و نوسازی شده در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با داشتن ویژگی‌های مناسب از جمله یکنواختی خاک، وجود نقاط آبیگری و زهکشی مشخص، کربندی منظم و مسطح و گستردگی مناسب تاکنون برای انجام پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش حدود ۳۵ هکتار از این شالیزارها انتخاب و برای اهداف پژوهش آماده‌سازی شد. در محدوده مورد مطالعه پنج کرت با پراکندگی مناسب انتخاب شد تا مقدار آب ورودی و خروجی از آنها معرف کل محدوده باشد. در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و کرت‌های انتخابی در تعیین مقدار آب مصرفی نشان داده شده است.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

### اندازه‌گیری مقدار آب مصرفی

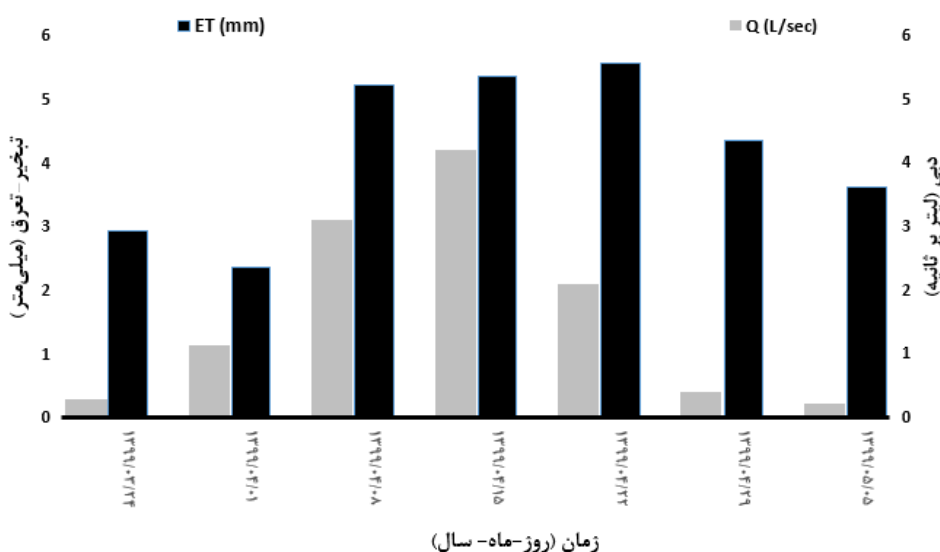
تمامی شالیزارها در محدوده مورد مطالعه در یک زمان نشاکاری شده و برنامه آبیگری آنها توسط یک آبیاری انجام می‌گردد و از لحاظ مرحله زراعی و شادابی گیاه، کل محدوده در شرایط یکسان بود. بنابراین برای اندازه‌گیری آب پنج کرت با پراکندگی مناسب انتخاب شد. در کرت‌های نمونه‌برداری ابتدا نقاط آبیگری و زهکشی شناسایی شد و در صورتی که مرزبندی کرت با شکستگی مواجه بود ترمیم شده تا امکان انتقال آب بین کرت‌های مجاور وجود نداشته باشد. سپس دبی حجمی ورودی و خروجی از هر کرت در بازه زمانی هفت روزه اندازه‌گیری شد. برای افزایش دقت،

برای محاسبه عملکرد محصولات زراعی در دشت‌های گسترده شمال چین مورد استفاده قرار گرفت و داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های مختلف در محدوده مورد نظر برای تعیین تبخیر-تعرق به روش پنمن-مانتیث به کار گرفته شد. نتایج نشان داد با صحت کل ۹۷/۵ درصد می‌توان نقشه بهره‌وری آب را برای سال‌های مختلف استخراج نمود. بهره‌وری آب بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ در حدود ۰/۰۱۷ گرم کربن به ازای یک کیلوگرم آب بوده و از سال ۲۰۱۰ به بعد با افزایش ۶۵ درصدی همراه است. در پژوهش *Virnodkar et al. (2020)* اشاره شده است که تنش گیاهی یکی از عوامل موثر بر عملکرد گیاه بوده و هر گونه تنش منجر به کاهش عملکرد می‌شود. در نتیجه در این پژوهش ابتدا شاخص‌های تنش گیاهی (هفت شاخص) با کمک تصاویر سنجنده مودیس استخراج و نقشه تنش در طی فصل رشد برای محصولات زراعی رایج به دست آمد. سپس با کمک داده‌های ۱۰ ساله، رابطه‌هایی با ضرایب همبستگی بالای ۹۰ درصد بین شاخص‌های تنش گیاهی و بهره‌وری آب ایجاد نمودند. از آنجایی که بهره‌وری به عملکرد گیاهی و عملکرد نیز به تنش‌های گیاهی وابستگی دارد، تغییرات در نقشه تنش گیاهی اثرات مستقیم بر نقشه بهره‌وری آب داشت.

محصول برنج به دلیل نقش مهم در تغذیه و اشتغال‌زایی در کشور، از دیرباز به عنوان یک محصول راهبردی مطرح بوده است. از این رو اطلاعات به موقع در مورد عملکرد و بهره‌وری زمین‌های شالیزاری می‌تواند راهبردهای مهمی را برای سازمان‌های دولتی و تولیدکنندگان فراهم کند تا امکان برنامه‌ریزی برای فعالیت‌های برداشت، ذخیره‌سازی، بازاریابی و مدیریت منابع و نهاده‌ها انجام گیرد. بنابراین، استفاده از رابطه بین داده‌های سنجنش از دور با ویژگی‌های زیستی-فیزیکی گیاه راهکاری کارآمد برای تعیین فاکتورهای مهم مدیریتی همچون عملکرد و بهره‌وری آب است. در پژوهش حاضر تلاش شد تا با تلفیق داده‌های حاصل از سنجنش از دور و اطلاعات برداشت شده از مزرعه، اهداف زیر حاصل شود: گام اول تعیین بهترین شاخص گیاهی از بین شاخص‌های NDVI، SAVI و RGVI در مناسب‌ترین دوره رشد گیاه برنج برای پیش‌بینی عملکرد برنج با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸. گام دوم، ارزیابی روابط موجود در پژوهش‌های گذشته و ایجاد رابطه رگرسیونی مناسب بین شاخص‌های SAVI، NDVI و RGVI و عملکرد برای تهیه نقشه عملکرد برنج در منطقه مورد مطالعه و در نهایت، تهیه نقشه بهره‌وری آب برنج در منطقه با دو مبنای متفاوت (بهره‌وری بر مبنای آب مصرفی در شالیزار و بهره

غربی و سه لایسیمتر در بخش شرقی محدوده مورد مطالعه مطابق روش ذکر شده، قرار گرفت. داده‌برداری زمینی از زمان آماده‌سازی زمین برای نشاکاری انجام شده بود اما از آنجایی که در این پژوهش از داده‌های سنجش از دور نیز برای تعیین عملکرد استفاده شده است، اطلاعات بعد از مرحله پنجه‌زنی (۲۴ خرداد ۱۳۹۹) و کامل‌شدن پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفت تا مقادیر شاخص‌های گیاهی در آن معرف میزان عملکرد باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده دبی ورودی و تبخیر-تعرق بعد از مرحله پنجه‌زنی در کرت‌های نمونه‌گیری در شکل (۲) نشان داده شده است.

لایسیمتر نوع N<sup>۱</sup> در محدوده مورد مطالعه برای اندازه‌گیری میزان تبخیر-تعرق برنج جانمایی شد. برای تعیین تبخیر-تعرق با استفاده از این نوع لایسیمتر لازم است سه لایسیمتر با ابعاد مشخص (۵۰ در ۳۰ سانتی‌متر با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر) کنار یکدیگر قرار گرفته و ارتفاع آب در آنها اندازه‌گیری شود. یکی از لایسیمترها با پوشش کف بوده که از نفوذ عمقی جلوگیری می‌کند و دو لایسیمتر دیگر با خاک شالیزار در ارتباط بوده که در یکی از آنها کشت گیاه صورت نمی‌پذیرد تا مقدار تبخیر اندازه‌گیری شده و در سومین لایسیمتر گیاه برنج با تراکم موجود در مزرعه کشت می‌شود (Jalali, 2009). سه لایسیمتر در بخش



شکل ۲- مقادیر تبخیر-تعرق و دبی ورودی اندازه‌گیری شده

$$SAVI = \left( \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) (1 + L) \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه  $\rho_{RED}$  بازتاب طول موج قرمز،  $\rho_{BLUE}$  بازتاب طول موج آبی،  $\rho_{NIR}$  بازتاب طول موج فرسرخ نزدیک،  $\rho_{SWIR1}$ ،  $\rho_{SWIR2}$  بازتاب طول موج فرسرخ میانی ۱ و ۲ و  $L$  فاکتور تنظیم‌کننده خاک است (Huete., 1988; Mosleh *et al.*, 2015).

جدول ۱- مشخصات تصاویر مورد استفاده در پژوهش

تاریخ	مرحله زراعی	توان تفکیک مکانی (متر)	درصد ابرناکی
۱۳۹۹/۰۴/۰۴	پنجه‌زنی	۳۰	۰/۰۲
۱۳۹۹/۰۴/۲۰	خوشه‌دهی	۳۰	۱۲/۶۱
۱۳۹۹/۰۵/۲۱	رسیدن	۳۰	۴/۳

مطابق یک نظریه جهانی (Karthikeyan *et al.*, 2020; )

### اندازه‌گیری و برآورد عملکرد

برای تعیین بهره‌وری آب و به‌منظور برآورد عملکرد برنج، شاخص‌های گیاهی NDVI، SAVI و RGVI از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شد. با توجه به هدف پژوهش، تصاویر مربوط به سه مرحله زراعی پنجه‌زنی، خوشه‌دهی و رسیدن مورد توجه قرار گرفت. در نتیجه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مطابق تاریخ‌های ارائه شده در جدول (۱) استفاده شد. بعد از دریافت تصاویر از پایگاه Earth Explorer<sup>۲</sup> با کمک نرم‌افزار ENVI 5.3 تصحیحات ژئومتریکی، رادیومتریکی و اتمسفریک انجام و سپس شاخص‌های گیاهی برای هر تصویر مطابق روابط زیر محاسبه شد.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$RGVI = 1 - \frac{\rho_{BLUE} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1} + \rho_{SWIR2}} \quad \text{رابطه ۲}$$

شده در نقاط دیگر جهان، فقط شاخص NDVI مدنظر قرار داشته است، بنابراین بعد از دوره پنجه‌زنی مقادیر شاخص NDVI در پژوهش حاضر از تصاویر ماهواره‌ای مستخرج و مقدار عملکرد با استفاده از روابط ارائه در جدول (۲) برآورد شد تا این مسائل مورد بررسی قرار گیرد که آیا شاخص NDVI به تنهایی شاخص مناسبی است یا می‌توان شاخص‌هایی دیگری را برای افزایش دقت برآورد عملکرد مورد استفاده قرار داد؟ همچنین بین رابطه خطی و نمایی، کدامیک نتیجه دقیق‌تری دارند؟

Zandsalimi *et al.*, 2021) استفاده از روابط بین داده‌های شاخص های گیاهی حاصل از سنجش از دور با پارامترهای زیستی- فیزیکی گیاهان باید قابلیت بهره‌گیری در مناطق مختلف را داشته باشند تا در صورتی که در منطقه‌ای داده‌برداری زمینی انجام نشده باشد بتوان با کمک داده‌های سنجش از دور فاکتورهای موثر در کشاورزی را برآورد نمود. با همین هدف ابتدا برای برآورد عملکرد برنج با استفاده از شاخص‌های گیاهی، پژوهش‌های انجام گرفته در نقاط مختلف جهان مورد بررسی قرار گرفت و روابط حاصل از این پژوهش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. در پژوهش‌های انجام

جدول ۲- رابطه شاخص NDVI و میزان عملکرد برنج در پژوهش‌های پیشین

شماره	مرجع	r	رابطه بین NDVI و عملکرد	نام محصول
۱	Noureldin <i>et al.</i> 2013	۰/۹۲	$Y = -0.003 + 24.161(NDVI)$	برنج
۲	Noureldin <i>et al.</i> 2013	۰/۸۹	$Y = -2.355 + 22.928(NDVI)$	برنج
۳	Nuarsa <i>et al.</i> 2012	۰/۹۲	$Y = 0.3419e^{4.1587(NDVI)}$	برنج

گرفت.

$$WP = \frac{Y}{CW} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن: WP بهره‌وری آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، Y عملکرد محصول (کیلوگرم) و CW آب مصرفی محصول (مترمکعب) است. صورت کسر مربوط به مقدار عملکرد در پایان فصل است که در پژوهش حاضر، یکبار داده‌های مزرعه ای برای محاسبه بهره‌وری واقعی در صورت کسر قرار گرفت و بار دیگر مقدار عملکرد برآورد شده توسط شاخص‌های گیاهی برای برآورد و تهیه نقشه بهره‌وری آب مورد استفاده قرار گرفت. عددی که در مخرج کسر قرار می‌گیرد با عنوان آب مصرفی تعریف شده است که با توجه به پژوهش‌های مختلف آب مصرفی برای برنج به دو صورت تعریف می‌شود. برنج نیز همچون دیگر محصولات کشاورزی، آب را از خاک جذب کرده و به مصرف می‌رساند (تعرق و فتوسنتز) که در این حالت آب مصرفی برنج همان مقدار تبخیر- تعرق گیاه بوده که با لایسیمتر قابل اندازه‌گیری است (Bastiaanssen and Al, 2003; Mcbratney *et al.*, 2005). اگر مبنای محاسبه بهره‌وری آب، تبخیر- تعرق گیاه برنج باشد؛ بهره‌وری در محدوده‌ای مناسب و هم‌تراز با بسیاری از محصولات کشاورزی قرار می‌گیرد. اما در بسیاری از مراجع اشاره شده است که به دلیل قرارگیری برنج در محیط اشباع و وجود دائمی آب در شالیزار، تبخیر- تعرق نمی‌تواند نماینده مناسبی برای تعیین آب مصرفی و در نهایت بهره‌وری آب در شالیزار باشد لذا باید مقدار آب ورودی و حجم آب درون هر شالیزار مبنای محاسبه بهره‌وری آب باشد (Huang *et al.*, 2010; Mo *et al.*, 2005). در این حالت به دلیل آنکه بخش زیادی از آب صرف تبخیر، نفوذ عمقی و رواناب

به منظور ارزیابی مقدار عملکرد برآورد شده با کمک شاخص‌های گیاهی و همچنین، برای ایجاد رابطه رگرسیونی بین شاخص‌های مذکور و عملکرد برنج، در کرت‌های نمونه‌برداری مقادیر عملکرد واقعی برنج اندازه‌گیری شد. بنابراین، در زمان برداشت محصول، اطلاعات مربوط به مقدار شلتوک تولیدی در قطعه زمین‌هایی که لایسیمتر در آنها قرار داشت به علاوه چند قطعه مجاور (در مجموع ۱۲ قطعه) اندازه‌گیری شد. سپس با توجه به ابعاد هر قطعه، عملکرد در واحد سطح مطابق جدول (۳) محاسبه و برای واسنجی و صحت‌سنجی نتایج حاصل از داده‌های سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳- مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد شلتوک برنج

شماره کرت نمونه برداری	مساحت کرت (مترمربع)	شلتوک تولیدی (کیلوگرم)	عملکرد شلتوک (کیلوگرم بر مترمربع)
۱	۲۰۰۰	۷۹۰	۰/۳۹۵
۲	۱۷۰۰	۷۲۰	۰/۴۲۴
۳	۱۵۰۰	۷۱۰	۰/۴۷۳
۴	۱۳۰۰	۶۵۰	۰/۵۰۰
۵	۲۷۰۰	۱۲۰۰	۰/۴۴۴
۶	۲۸۰۰	۱۱۰۰	۰/۳۹۳
۷	۲۵۰۰	۱۱۲۰	۰/۴۴۸
۸	۲۵۰۰	۱۲۰۰	۰/۴۸۰
۹	۲۷۰۰	۱۱۰۰	۰/۴۰۷
۱۰	۲۸۰۰	۱۲۰۰	۰/۴۲۹
۱۱	۲۷۰۰	۱۳۰۰	۰/۴۸۱
۱۲	۲۷۰۰	۱۲۵۰	۰/۴۶۳

#### محاسبه بهره‌وری آب برنج

برای محاسبه شاخص بهره‌وری آب، رابطه ۴ مورد استفاده قرار

## نتایج و بحث

### عملکرد برنج

ابتدا برای برآورد عملکرد با استفاده از شاخص‌های گیاهی، روابط ذکر شده در جدول (۲) مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار عملکرد برنج با کمک شاخص NDVI در مراحل زراعی مختلف مطابق جدول (۵) برآورد شد.

جدول ۵- برآورد عملکرد با استفاده از روابط پژوهش‌های پیشین

مرحله زراعی	کد BBCH*	آماره	مقدار عملکرد (تن بر هکتار)
		رابطه ۱	رابطه ۲
		رابطه ۳	
		بیشینه	۱۹/۲
		میانگین	۱۵/۸۷
		کمینه	۱۰/۷۵
پنجه‌زنی	۳۲-۵۰	RMSE	۱۳/۴۴
		NRMSE	۶۳/۷۷
		بیشینه	۲۳/۸
		میانگین	۲۱/۸۶
		کمینه	۱۹/۳۸
خوشه‌دهی	۵۱-۷۰	RMSE	۱۸/۲۲
		NRMSE	۸۶/۴۱
		بیشینه	۲۱/۰۸
		میانگین	۱۷/۷۹
		کمینه	۱۵/۸۵
رسیدن	۷۱-۹۲	RMSE	۱۳/۸۵
		NRMSE	۶۵/۶۷

\* کد مربوط به مرحله رشد گیاه برنج (Meier, 2001)

مطابق جدول (۳)، کمینه، میانگین و بیشینه عملکرد واقعی در سطح مزرعه به ترتیب ۳/۹۳، ۴/۴۵ و ۵ تن بر هکتار است و تمامی مقادیر عملکرد محاسباتی با کمک روابط جدول (۲) بیش برآورد دارند. رابطه یک و دو به دلیل تفاوت زمان کشت برنج در منطقه مورد پژوهش با استان مازندران در پیش‌بینی عملکرد برنج اعدادی با اختلاف زیاد نسبت به مقدار واقعی عملکرد به دست آوردند و تنها رابطه سه به دلیل متناسب بودن دوره رشد زراعی برنج با فصول کشت برنج در استان مازندران توانست مقدار عملکرد را به عدد واقعی نزدیک‌تر برآورد نماید. شاخص‌های ارزیابی نشان می‌دهند که این روابط در تعیین عملکرد برنج دقت مطلوب را ندارند چرا که هر یک از این روابط براساس شرایط محیطی و بازتابی در منطقه مورد پژوهش خود اصلاح و قابل کاربرد هستند، و در مناطق دیگر نتایج مطلوبی را ارائه نکرده و لازم است برای استفاده عمومی از یک رابطه ضمن توجه به شرایط محیطی و دوره رشد گیاه، ضرایب اصلاحی برای روابط ارائه شود. در پژوهش Bastiaanssen and Steduto, 2016 که

می‌شود، بهره‌وری آب کاهش یافته و گیاه برنج به عنوان گیاهی با مصرف بالای آب و بهره‌وری پایین شناخته می‌شود. بر این اساس در پژوهش حاضر تلاش شد، تا بهره‌وری آب برنج بر مبنای دو مفهوم متفاوت برای آب مصرفی، محاسبه شود و یکبار در مخرج کسر عدد مربوط به تبخیر- تعرق برنج و بار دیگر عدد مربوط به آب مصرفی شالیزار (حجم آب در شالیزار)، قرار گرفته و بهره‌وری آب محاسبه شود.

از آنجایی که در پژوهش حاضر، داده‌های سنجش از دور برای تهیه نقشه بهره‌وری آب برنج مورد استفاده قرار گرفته است، باید مقدار بهره‌وری واقعی با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای، محاسبه و برای واسنجی و صحت‌سنجی نتایج داده‌های سنجش از دور مورد استفاده قرار گیرد. در جدول (۴) مقادیر بهره‌وری واقعی برنج بر مبنای آب مصرفی شالیزار و تبخیر تعرق برنج به صورت مجزا محاسبه شد.

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده بهره‌وری واقعی آب برنج بر مبنای آب

شماره کرت نمونه‌برداری	بهره‌وری بر مبنای آب مصرفی (کیلوگرم بر مترمکعب)	بهره‌وری بر مبنای تبخیر- تعرق واقعی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۱	۰/۴۵	۰/۶
۲	۰/۴۱	۰/۶۵
۳	۰/۴۱	۰/۷۲
۴	۰/۳۷	۰/۷۷
۵	۰/۶۸	۰/۶۸
۶	۰/۶۳	۰/۶
۷	۰/۶۴	۰/۶۹
۸	۰/۶۹	۰/۷۳
۹	۰/۶۲	۰/۶۲
۱۰	۰/۶۸	۰/۶۶
۱۱	۰/۷۴	۰/۷۴
۱۲	۰/۷۲	۰/۷۱

### معیارهای ارزیابی

آماره‌ها شامل ریشه میانگین مربعات خطا (رابطه ۵) و درصد خطای نرمال شده (رابطه ۶) به منظور ارزیابی نتایج حاصل از داده‌های سنجش از دور و داده‌های زمینی مطابق روابط زیر مورد استفاده قرار گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$NRMSE = \left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \right) \times \frac{100}{\bar{M}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آنها  $S_i$  مقدار برآورد شده،  $M_i$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $\bar{M}$  میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

شاخص‌های گیاهی و عملکرد می‌توان به یک رابطه جهانی مناسب برای برآورد عملکرد دست یافت (Karthikeyan *et al.*, 2020; Mosleh *et al.*, 2015). بنابراین برای دستیابی به یک رابطه عمومی لازم است تا ضرایب اصلاحی برای روابط بین شاخص‌های گیاهی و عملکرد براساس زاویه تابش خورشیدی متناسب با عرض جغرافیایی تعریف شود (Zandsalimi *et al.*, 2021; Gemechu *et al.*, 2020).

با توجه به پیش‌بینی ضعیف عملکرد براساس روابط مستخرج از پژوهش‌های گذشته، در ادامه با استفاده از داده‌های برداشت شده از مزرعه و شاخص‌های گیاهی SAVI، NDVI و RGVI روابط مناسب برای برآورد عملکرد پایان فصل با کمک داده‌های سنجش از دور در مراحل مختلف رشد استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۶) رابطه هر شاخص گیاهی با عملکرد آورده شده است.

بهره‌وری محصولات کشاورزی در سطح جهانی برآورد شده است نیز در هر منطقه با توجه به زاویه تابش خورشیدی و اثرات آن بر بازتاب زمینی، روابط تعیین عملکرد و بهره‌وری اصلاح شد. همچنین شاخص گیاهی NDVI به دلیل عدم حذف اثرات پس‌زمینه، در شرایطی که پوشش گیاهی کامل باشد می‌تواند برای ایجاد رابطه با عملکرد گیاه نتایج مطلوبی ارائه دهد (Nuarsa *et al.*, 2008; Ren *et al.*, 2012). از آنجایی که تاریخ کشت برنج در نقاط مختلف جهان، متفاوت است زمان کامل شدن پوشش گیاهی نیز متفاوت خواهد بود و در نتیجه با تغییر زاویه تابش خورشید، میزان شاخص NDVI در نقاط مختلف در محدود یکسان قرار نمی‌گیرد و برآورد این شاخص به صورت جهانی، دقت کمتری خواهد داشت در حالی که شاخص‌های SAVI و RGVI با حذف اثرات پس‌زمینه، برای ایجاد رابطه با عملکرد گیاه نیاز به تکمیل پوشش گیاهی نداشته و می‌تواند در مراحل مختلف مورد استفاده قرار گیرد و با یکسان‌سازی محدوده زمانی استفاده از روابط

جدول ۶- برآورد عملکرد برنج براساس شاخص‌های گیاهی در مراحل مختلف رشد

مرحله رشد	رابطه NDVI و عملکرد	r	رابطه SAVI و عملکرد	r	رابطه RGVI و عملکرد	r
پنجه‌زنی	$Yield = 0.47(NDVI) + 0.19$	۰/۸۳	$Yield = 0.55(SAVI) + 0.26$	۰/۹۴	$Yield = 3.57(RGVI) - 3.13$	۰/۸۸
خوشه‌دهی	$Yield = 0.64(NDVI) - 0.13$	۰/۸۲	$Yield = 0.24(SAVI) + 0.32$	۰/۷۷	$Yield = 0.93(RGVI) - 0.53$	۰/۸۱
رسیدن	$Yield = 0.62(NDVI) - 0.012$	۰/۷۷	$Yield = 0.36(SAVI) + 0.24$	۰/۸۹	$Yield = 1.46(RGVI) - 1.11$	۰/۷۷

شاخص‌های گیاهی برداشت شده در این مرحله مناسب برای تعیین عملکرد نیستند. در پژوهش (Noureldin *et al.*, 2013) بیان شده است که شاخص‌های گیاهی که بر مبنای باندهای قرمز و فروسرخ نزدیک تعریف می‌شوند به دلیل نمایش بهتر سبزیگی گیاه برای تعیین عملکرد شاخص‌های مطمئن‌تری نسبت به دیگر شاخص‌های گیاهی هستند و همچنین شاخص‌هایی همچون SAVI و RGVI که با اصلاح اثر پس‌زمینه تعریف شده است نتایج مطلوب‌تری برای محاسبه عملکرد دارند. یافته‌ها نشان می‌دهد شاخص SAVI بهترین همبستگی (۹۴ درصد) را در مرحله پنجه‌زنی با عملکرد داشته است و بعد از آن شاخص RGVI و NDVI به ترتیب ۸۸ و ۸۳ درصد همبستگی نشان داده‌اند.

برای ارزیابی درست روابط عملکرد علاوه بر ضریب همبستگی، شاخص‌های ارزیابی نیز محاسبه شد. به این منظور ۳۰ درصد مقادیر شاخص‌های گیاهی در هر مرحله که در ایجاد روابط مورد استفاده قرار نگرفته بود در مرحله ارزیابی به روابط ذکر شده در جدول (۵) وارد و سپس مقادیر عملکرد برآورد شده با مقادیر عملکرد واقعی توسط شاخص‌های ارزیابی مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول (۷) مقادیر شاخص‌های ارزیابی آورده شده

ضریب همبستگی میان شاخص‌های گیاهی و عملکرد در مرحله پنجه‌زنی نسبت به دو مرحله دیگر زراعی بیشترین مقدار بوده و با توجه به نظر بیشتر پژوهشگران مبنی بر ارتباط مستقیم بین سبزیگی و عملکرد گیاهی (Sanaeinejad, *et al.*, 2014; Loveimi, *et al.*, 2021; Mkhabela, *et al.*, 2011; Virnodkar, *et al.*, 2020) این مسئله قابل تحلیل است. در دوره پنجه‌زنی گیاه بیشترین سطح سایه‌انداز را داشته و میزان سبزیگی آن به اوج می‌رسد. در این دوره گیاه به اندازه کافی باید سطح فتوسنتز کننده خود را گسترش دهد تا با انرژی کافی وارد مرحله خوشه‌دهی شود (Mahmoud Soltani, and Abbasian, 2021). با توجه به اینکه تصویر انتخابی در میانه مرحله پنجه‌زنی قرار دارد، نماینده بیشینه سبزیگی گیاه بوده و بالاترین همبستگی روابط در این مرحله بر مبنای اصول سنجش از دور قابل تایید است. در مرحله خوشه‌دهی با گذشت زمان میزان سبزیگی گیاه کاهش یافت. بنابراین در پژوهش مبتنی بر سنجش از دور، کاهش سبزیگی نشانه ضعیف شدن گیاه و کاهش عملکرد در آینده بوده و از میزان همبستگی روابط کاسته شد. همچنین در مرحله رسیدن، گیاه کمترین سطح سبزیگی را بازتاب کرده و



است.

جدول ۷- شاخص‌های ارزیابی روابط محاسبه عملکرد برنج

رابطه SAVI و عملکرد		رابطه RGVI و عملکرد		رابطه NDVI و عملکرد		مرحله رشد
NRMSE	RMSE (Kg/ha)	NRMSE	RMSE (Kg/ha)	NRMSE	RMSE (Kg/ha)	
۶۰۰۰	۴۰۰	۹۱۰۰	۶۰۰	۷۸۰۰	۵۰۰	پنجه‌زنی
۶۰۰۰	۴۰۰	۶۰۰۰	۴۰۰	۴۷۰۰	۳۰۰	خوشه‌دهی
۴۷۰۰	۳۰۰	۷۶۰۰	۵۰۰	۵۷۰۰	۳۰۰	رسیدن

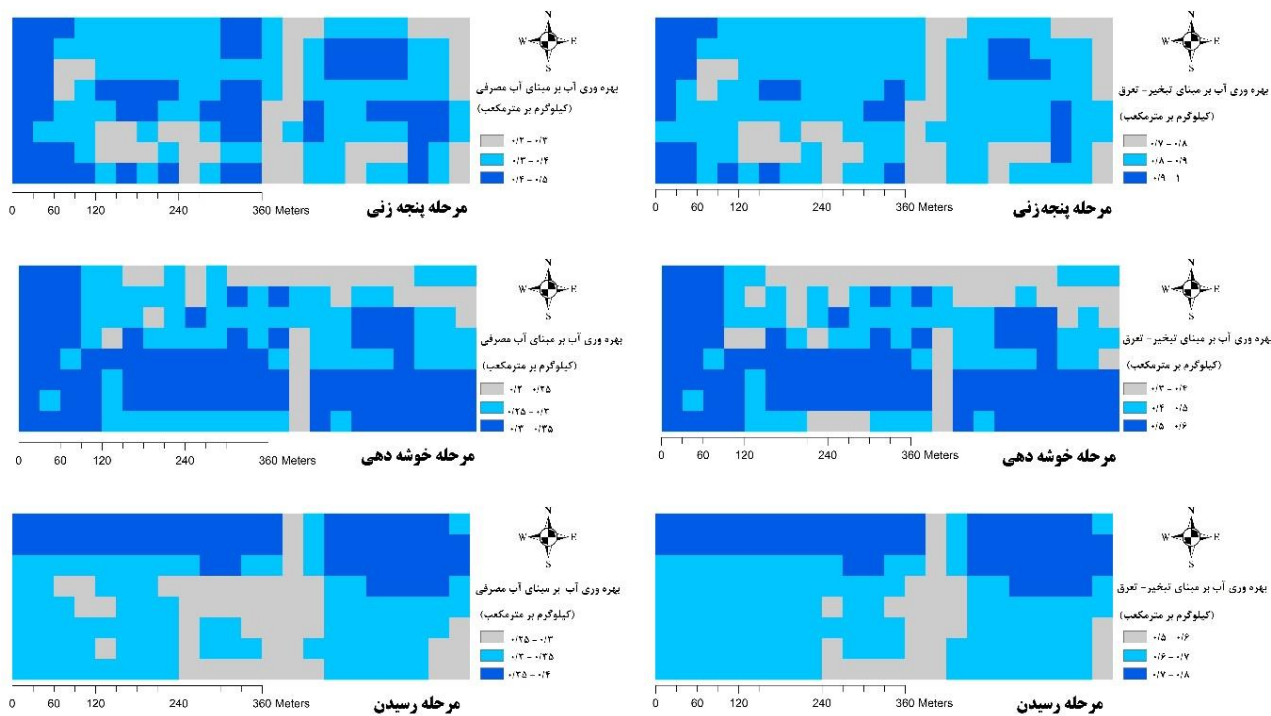
مختلف (Kastens *et al.* 2005; Mo *et al.* 2005; Nuarsa *et al.*, 2012) انتخاب مراحل ابتدایی رشد (قبل از شروع پنجه‌زنی) موجب برآورد میزان سبزی‌نگی کم در گیاه و در نتیجه برآورد بسیار کم عملکرد پایان فصل می‌شود؛ در نتیجه، انتخاب دوره‌های رشد بعد از مرحله پنجه‌زنی یک عامل مهم در برآورد دقیق‌تر عملکرد است. در پژوهش حاضر نیز شاخص‌های گیاهی حاصل از مرحله‌های پنجه‌زنی و خوشه‌دهی همبستگی بیشتری با مقدار عملکرد داشتند.

#### نقشه بهره‌وری آب

با توجه به آنکه شاخص گیاهی SAVI بالاترین همبستگی و کمترین خطا را در تعیین عملکرد داشت، برای تهیه نقشه بهره‌وری آب در منطقه مورد مطالعه، نقشه عملکرد حاصل از این شاخص مورد استفاده قرار گرفت. پس از تهیه نقشه عملکرد، با تقسیم ارزش‌های هر پیکسل بر مقدار تبخیر- تعرق گیاه برنج، نقشه بهره‌وری آب بر مبنای تبخیر- تعرق گیاه به دست آمد. در گام دیگر ارزش‌های هر پیکسل در نقشه عملکرد برنج بر مقدار آب مصرفی شالیزار تقسیم شد و در هر دوره گیاهی نقشه بهره‌وری آب بر مبنای آب مصرفی شالیزار نیز به دست آمد. با بررسی هر دو نقشه مربوط به بهره‌وری آب بر مبنای تبخیر- تعرق برنج و آب مصرفی شالیزار، تغییرات مکانی بهره‌وری شناسایی شده و دلایل اختلاف مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۳).

در تمامی نقشه‌های ارائه شده در شکل (۳)، محدوده‌هایی که کمترین مقدار عملکرد را داشته در موقعیت مربوط به جاده آسفالت بین دو مزرعه بوده است و می‌توان مسیر جاده را با کمک پیکسل‌ها به خوبی شناسایی نمود. همچنین با توجه به وجود درختان تنومند در اطراف مرز شالیزار و سایه‌اندازی آنها بر نقاط مرزی زمین، این مناطق نیز مقدار عملکرد کمتری دارد زیرا مقدار بازتاب سبزی‌نگی در اثر سایه‌اندازی درختان کاهش یافته و مقدار شاخص گیاهی کمتر از مقدار واقعی سبزی‌نگی گیاه است. پیکسل‌هایی که از جاده و مرزها فاصله بیشتری دارند محدوده عددی بالاتری برای بهره‌وری نشان می‌دهند که دلیل آن اشباع سبزی‌نگی و برآورد دقیق‌تر عملکرد با شاخص گیاهی است.

کمیته و بیشینه ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۳۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار بوده که نشانه دقت بالای روابط در تعیین عملکرد برنج است و با توجه به گستردگی سطح برآورد شده در هر تصویر ماهواره‌ای (محدوده مورد مطالعه ۳۵ هکتار است) این مقدار خطا در سطح گسترده قابل پذیرش است. شاخص SAVI در تمام مراحل زراعی کمترین خطا را در برآورد عملکرد داشته و دلیل آن علاوه بر همبستگی بالای در رابطه برآورد عملکرد، توانایی اثر حذف پس‌زمینه و خالص‌سازی مقدار برآورد سبزی‌نگی است. شاخص RGVI با در نظر داشتن تعداد باندهای بیشتر در معادله خود، پیش‌بینی می‌شد که نتایج بهتری را نسبت به دو شاخص گیاهی دیگر نشان دهد اما در جدول (۷) بیشترین خطا را در برآورد عملکرد داشته که دلیل آن با توجه به نظر Mosleh, *et al.* (2015) این شاخص به دلیل حذف کامل اثرات پس‌زمینه و به ویژه بازتاب آب در اغلب موارد با بیش برآورد سبزی‌نگی همراه بوده و پارامترهایی همچون عملکرد که رابطه مستقیم با سبزی‌نگی گیاه دارند تحت تاثیر این بیش‌برآورد قرار گرفته و مقادیر محاسباتی از مقادیر واقعی فاصله می‌گیرد. در نتیجه ریشه میانگین خطا برای این شاخص به ویژه در مرحله پنجه‌زنی که اوج سبزی‌نگی گیاه است بیشترین مقدار (۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) بوده و به تبع آن درصد خطا نیز در این مرحله (۹۱۰۰) بالاتر بود. در مجموع با توجه به نتایج ( Bastiaanssen and Steduto, 2016; Huang *et al.* 2010; Mkhabela *et al.* 2011) در زمینه تعیین عملکرد گیاهی با استفاده از سنجش از دور، در نظر داشتن خطا در این روش کاملاً منطقی بوده و با توجه به مزایای این روش همچون پیش‌بینی عملکرد قبل از برداشت محصول و تعیین عملکرد در سطوح گسترده خطای محاسباتی قابل پذیرش است. هر اندازه بتوان با دقت بیشتری تصحیحات رادیومتریک و اتمسفریک را روی تصاویر ماهواره‌ای انجام داده و برای تعیین شاخص‌های گیاهی مقادیر صحیح ارزش هر باند را مورد استفاده قرار داد، نتایج حاصل از این روش دقت بیشتری خواهد داشت (Balaghi, *et al.* 2008; Loveimi, *et al.* 2021). همچنین انتخاب مرحله زراعی مناسب در تعیین دقیق میزان سبزی‌نگی گیاه اثر مستقیم داشته و با توجه به نظر پژوهشگران



شکل ۲- نقشه بهره‌وری آب به دست آمده از شاخص SAVI بر مبنای دبی مصرفی و تبخیر- تعرق

دارند. بر اساس یافته‌ها، در مرحله پنجه‌زنی نقشه مربوط به بهره‌وری بر مبنای تبخیر- تعرق بیشینه مقدار یک کیلوگرم بر مترمکعب بوده است اما در مرحله خوشه‌دهی این مقدار به  $0/6$  کیلوگرم بر مترمکعب کاهش یافته است. نقشه در مرحله خوشه‌دهی با اعداد واقعی (جدول ۴) نزدیکی بیشتری دارد با نتایج پژوهش *Tian et al. (2020)* و *Bastiaanssen and Steduto, (2016)* که اظهار داشتند مراحل پنجه‌زنی و خوشه‌دهی به دلیل داشتن سبزی‌نگی مناسب و کامل بودن پوشش گیاهی مراحل مناسبی برای تهیه نقشه عملکرد و بهره‌وری آب است، مطابقت دارد.

در مرحله رسیدن نیز، نتایج در حال تکرار بوده و نقشه بهره‌وری بر مبنای تبخیر- تعرق نسبت به نقشه بهره‌وری بر مبنای آب مصرفی مقدار بیشتر و واقعی‌تری دارد. در این مرحله انتظار می‌رود با نزدیک شدن به پایان فصل و کاهش سبزی‌نگی پوشش گیاهی مقدار آب مصرفی و تبخیر- تعرق گیاه کاهش یابد که نقشه‌های بهره‌وری در این دوره معین آن است زیرا در این دوره نیز حد بالا و پایین بهره‌وری در هر دو نقشه حاصل از تبخیر- تعرق و آب مصرفی مقداری بیشتری نسبت به مرحله خوشه‌دهی دارد. به نظر می‌رسد با توجه به شکل ۳ و پژوهش‌های مشابه در این زمینه همچون *Gemechu et al. (2020)*، *Tian et al. (2020)* و *Bastiaanssen and Steduto, (2016)* بهتر است مبنای تعیین

در مرحله پنجه‌زنی، نقشه بهره‌وری حاصل از تبخیر- تعرق در محدوده  $0/7$  تا یک قرار دارد در حالی که بالاترین مقدار در نقشه بر مبنای آب مصرفی  $0/5$  و کمترین مقدار  $0/2$  است. اما در کل با مقایسه پیکسل به پیکسل نقشه‌ها مشخص می‌شود که محدوده‌هایی با بهره‌وری متوسط به بالا در هر دو نقشه تعداد پیکسل‌های برابری دارند. با توجه به جدول (۴) که در آن بهره‌وری آب بر اساس داده‌های واقعی محاسبه شده است، وجود اختلاف در نقشه‌های بهره‌وری قابل پیش‌بینی بوده و نقشه مربوط به تبخیر- تعرق مقادیری نزدیک به واقعیت را نشان می‌دهد. از آنجایی که صورت کسر بهره‌وری، عملکرد بوده و مقدار آن در هر دو نقشه بهره‌وری یکسان است، اختلاف در مقدار مخرج کسر منجر به تفاوت در نقشه‌های بهره‌وری شده است و علت آن همان‌طور که قبلاً تشریح شد، دقت داده‌های لایسومتر است.

در مرحله خوشه‌دهی نیز نقشه بهره‌وری بر مبنای تبخیر- تعرق اعداد بزرگتری نسبت به نقشه بهره‌وری حاصل از آب مصرفی دارد. با مقایسه دو نقشه بهره‌وری آب بر مبنای تبخیر- تعرق و آب مصرفی، در این مرحله اختلاف اعداد بین دو نقشه کمتر از مرحله پنجه‌زنی است و دلیل آن کامل‌تر شدن پوشش گیاهی و کاهش دوره غرقابی بوده که در نتیجه آن، مقدار آب مصرفی به تبخیر- تعرق گیاه نزدیک شده است. نقشه‌های بهره‌وری در این دوره مقدار عددی کمتری نسبت به مرحله قبل

خطا در این روش کاملاً منطقی بوده و با توجه به مزایای این روش همچون پیش‌بینی عملکرد قبل از برداشت محصول و تعیین عملکرد در سطوح گسترده خطای محاسباتی قابل پذیرش است. در بین شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در این پژوهش، شاخص SAVI به دلیل رابطه رگرسیونی با همبستگی بالا و خطای کم، برای تعیین نقشه بهره‌وری آب مورد استفاده قرار گرفت. نقشه بهره‌وری آب حاصل از داده‌های سنجنش از دور به پایش وضعیت بهره‌وری آب در سطح شالیزار کمک فراوانی می‌کند. نقشه بهره‌وری آب یکبار بر مبنای تبخیر-تعرق گیاهی و بار دیگر بر اساس آب مصرفی به دست آمد و نقشه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نقشه حاصل از بهره‌وری آب بر مبنای تبخیر-تعرق در دوره خوشه‌دهی گیاه اعداد نزدیک‌تری به مقادیر واقعی بهره‌وری داشته است. در پژوهش‌های مشابه همچون ( Gemechu *et al.* 2020; Tian *et al.* 2020; Bastiaanssen and Steduto, 2016) بهره‌وری آب بر مبنای تبخیر-تعرق برای داشتن دیدگاه واقعی، پیشنهاد شده است.

پیشنهاد می‌شود از داده‌های سنجنش از دور برای اهداف مختلف کشاورزی بهره برد، زیرا داده‌های سنجنش از دور با داشتن دوره پایش کوتاه‌مدت و در دسترس بودن در زمان‌های قبل از برداشت، داده‌های مناسبی برای پایش شرایط مزرعه، عملکرد و بهره‌وری آب است و به دلیل گستردگی مطلوب، برای برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیمات راهبردی مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش‌های (Balaghi, *et al.* (2008); Bastiaanssen, and Steduto, (2016; Bastiaanssen, and Ali, (2003); Gemechu, *et al.* (2020); Karthikeyan, *et al.* (2020); Nuarsa, *et al.* (2020) and Tian, *et al.* (2012) با مبنای سنجنش از دوری، توصیه شده است تا کشورهای مختلف به سمت کشاورزی دقیق و هوشمند بر مبنای داده‌های ماهواره‌ای حرکت کرده و از این پتانسیل استفاده صحیح و مطلوب صورت پذیرد. بنابراین، به دلیل کارآمدی سنجنش از دور در تعیین عملکرد گیاه، پیشنهاد می‌شود تا با استفاده از این اطلاعات نقشه مربوط به بهره‌وری محصولات کشاورزی به‌روزرسانی شود. همچنین با استفاده از داده‌های سنجنش از دور امکان تعیین تبخیر-تعرق گیاهی وجود داشته و می‌توان اطلاعات حاصل از آن را با کمک داده‌های زمینی واسنجی و صحت‌سنجی نموده و برای تهیه نقشه بهره‌وری آب از نقشه تبخیر-تعرق در هر محدوده استفاده کرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

Badiheshin, A., Noory, H. and Vazifedoust, M. (2015). Improving Crop Yield Estimation through SWAP Model Using Satellite Data. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 45 (4), 379-

بهره‌وری آب در محصولات هم‌چون برنج که شرایط کاشت و داشت غرقاب دارند را تبخیر-تعرق قرار داد تا بتوان به عددی واقعی دست یافت.

در نهایت، با توجه به آنکه، حد بالا و پایین در نقشه‌های بهره‌وری با اعداد واقعی (جدول ۴) مطابقت مناسبی داشته است می‌توان از این نقشه‌های برای پایش وضعیت مزرعه استفاده نمود و با مقایسه کردن موقعیت مکانی نقاط با بهره‌وری بالا و پایین به اصلاح شرایط مزرعه پرداخته و بتوان با الگوبرداری از نقاط با بهره‌وری بالا، دیگر نقاط را نیز به شرایط مطلوب نزدیک نمود.

## نتیجه‌گیری

توسعه و گسترش روز به روز داده‌های سنجنش از دور این امکان را فراهم کرده است تا بتوان از این داده‌ها به منظور تهیه نقشه‌های مختلف در پژوهش‌های کشاورزی استفاده نمود. تصاویر به‌هنگام گزینه مناسبی برای پیش‌بینی اطلاعات آینده خواهد بود و پارامترهایی همچون عملکرد گیاهی و بهره‌وری آب با کمک سنجنش از دور، قبل از دوره برداشت گیاه برآورد می‌شود. در این پژوهش، روابط بین شاخص‌های گیاهی و عملکرد که در پژوهش‌های دیگر پژوهشگران به آنها اشاره شده است (جدول ۲) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که به دلیل اختلاف در تاریخ کشت محصول برنج در نقاط مختلف جهان، برای استفاده از این روابط باید اصلاحاتی صورت پذیرد و لازم است مطالعات بیشتری در این زمینه انجام شود تا به ضرایب اصلاحی مناسب دست پیدا کرد. سپس رابطه‌ای جدید بین شاخص‌های گیاهی و عملکرد استخراج شد تا با ضریب همبستگی بالای ۹۰ درصد، عملکرد برنج با دقت بیشتری برآورد شود. انتخاب مرحله زراعی مناسب برای برآورد عملکرد برنج، از دیگر اهداف پژوهش حاضر بود که بالاترین همبستگی در دوره پنجه‌زنی به دست آمد. مقادیر عملکرد با استفاده از روابط رگرسیونی سه شاخص SAVI، NDVI، و RGVI محاسبه و برای ارزیابی نتایج آنها با مقادیر عملکرد واقعی، آماره‌های ارزیابی مورد استفاده قرار گرفت. میانگین آماره‌های RMSE و NRMSE برای سه شاخص SAVI، NDVI، و RGVI به ترتیب ۳۶۰ و ۶۰، ۳۶۰ و ۵۶ و ۵۰۰ و ۷۶ کیلوگرم در هکتار به دست آمد که با توجه به نتایج ( Bastiaanssen and Steduto, 2011; Huang *et al.* 2010; Mkhabela *et al.* 2016) در زمینه تعیین عملکرد گیاهی با استفاده از سنجنش از دور، در نظر داشتن

388.

Balaghi, R., Tychon, B., Eerens, H. and Jlibene, M. (2008). Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early

- prediction of wheat grain yields in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 10, 438–452.
- Bastiaanssen, W. G. and Steduto, P. (2016). The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. *Science of the Total Environment*. 575, 1-17.
- Bastiaanssen, W.G.M. and Ali, S. (2003). A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 94, 321–340.
- Farahza, M. N., Nazari, B., Akbari, M. R., Naeini, M. S. and Liaghat, A. (2020). Assessing the physical and economic water productivity of annual crops in Moghan Plain and analyzing the relationship between physical and economic water productivity. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11 (42), 166-179. (In Farsi)
- Ferencz, C., Bognar, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarscai, G., *et al.* (2004) Crop yield estimation by satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 4113–4149.
- Foster, T. Brozovic, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U. Raes, D., Steduto, P. and Hsiao, T. C. (2017). AquaCrop- OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18-22.
- Funk, C. and Budde, M.E. (2009). Phonologically-tuned MODIS NDVI-based production anomaly estimates for Zimbabwe. *Remote Sensing of Environment*, 113, 115–125.
- Gemechu, M.G., Huluka, T.A., Steenbergen, F.V., Wakjira, Y.C., Chevalking, S. and Bastiaanssen, S.W. (2020). Analysis of spatial-temporal variability of water productivity in Ethiopian sugar estates: *using open access remote sensing source. Annals of GIS*.
- Huang, J.F., Wang, F.M. and Wang, X.Z. (2010). Hyper-spectral experiment for paddy rice remote sensing; Huang JQ, Chen JY, editors. *Hangzhou: Zhejiang University Press*. 315 p. (in Chinese with English abstract).
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- Jalali Koutenaeei, N. 2009. Basic and criteria survey, design and execution of land consolidation in the paddy fields. Haraz Extension and Technology Development Center. 212pp.
- Kamali, L., Kaviani, A., Nazari, B. and Liaghat, A. M. (2018). Wheat yield estimate by satellite imageris Landsat 8 (Case study: Moghan Plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 49 (5), 1031-1042.
- Karthikeyan, L., Chawla, I. and Mishra, A.K. (2020). A review of remote sensing applications in agriculture for food security: Crop growth and yield, irrigation, and crop losses. *Journal of Hydrology*, 586, 1-22.
- Kastens, J.H., Kastens, T.L., Kastens, D.L.A., Price, K.P., Martinko, E.A., *et al.* (2005). Image masking for crop yield forecasting using AVHRR NDVI time series imagery. *Remote Sensing of Environment*, 99, 341–356.
- Loveimi, N., Akram, N., Bagheri, N. and Hajiahmad, A. (2021). Evaluation of several spectral indices for estimation of Canola yield using Sentinel- 2 sensor image. *Journal of Agricultural Machinery*, 11 (2), 447- 464. (In Farsi)
- Mahmoud Soltani, S. and Abbasian, A. (2021). Simultaneous application of rice husk biochare and zinc sulfate fertilizer on yield, yield components of rice (*Oryza sativa* L.) Hashemi cultivar and some soil chemical properties. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52 (3), 707-719.
- Manjunath, K.R., Potdar, M.B. and Purohit, N.L. (2002). Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 3023–3038.
- Maselli, F. and Rembold, F. (2001). Analysis of GAC NDVI data for cropland identification and yield forecasting in Mediterranean African countries. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 593–602.
- Maselli, F., Romanelli, S., Bottai, L. and Maracchi, G. (2000). Processing of GAC NDVI data for yield forecasting in the Sahelian region. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 3509–3523.
- Mcbratney, A., Whelan, B., Ancev, T. and Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. *Journal of Precision Agriculture*, 6 (1), 7-23.
- Meier, U. 2001. Growth stages of mono-and dicotyledonous plants, BBCH Monograph. Federal Biological Research Center for Agriculture and Forestry.
- Mkhabela, M.S., Bullock, P., Raj, S., Wang, S. and Yang, Y. (2011). Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 385–393.
- Mkhabela, M.S. and Mashinini, N.N. 2005. Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAAs- AVHRR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 1–9.
- Mika, J., Kerényi, J., Rimoczi-Paal, A., Merza, A., Szinell, C., *et al.* (2002). On correlation of maize and wheat yield with NDVI: Example of Hungary (1985-1998) In: Fellous JL, LeMarshall JF, Choudhury BJ, Menenti M, Paxton LJ *et al.*, editors. *Earth's Atmosphere, Ocean and Surface Studies*, 2399–2404.
- Mo, X., Liu, S., Lin, Z., Xu, Y., Xiang, Y. and McVicar, T.R. (2005). Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling*, 183, 301-322.
- Mosleh M.K., Hassan Q.K. and Chowdhury E.H.

- (2015). Application of Remote Sensing in Mapping Rice Area and Forecasting Its Production. *Sensors*, 15, 769-791.
- Nazari, B., Liaghat, A., Akbari, M. R. and Keshavarz, M. (2018). Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. *Agricultural Water Management*, 208, 7-18.
- Noureldin, N.A., Aboelghar, M.A., Saady, H.S. and Ali, A.M. (2013). Rice yield forecasting models using satellite imagery in Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 16, 125-131.
- Nuarsa, I.W., Nishio, F. and Hongo, C. (2012). Rice yield estimation using Landsat ETM+ data and field observation. *Journal of Agricultural Science*, 4 (3), 45- 56.
- Prasad, A.K., Singh, R.P., Tare, V. and Kafatos, M. (2007). Use of vegetation index and meteorological parameters for the prediction of crop yield in India. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 5207-5235.
- Ren, J.Q., Chen, Z.X., Zhou, Q.B. and Tang, H.J. (2008). Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 10, 403-413.
- Sanaeinejad, H., Nassiri Mahallati, M., Zare, H., Salehnia, N. and Ghaemi, M. (2014). Wheat yield estimation using Landsat images and field observation: A case study in Mashhad. *Journal of Plant Production*, 20 (4), 45- 63. (In Farsi)
- Tian, F., Zhang, Y. and Saihong, L. (2020). Spatial-temporal dynamics of cropland ecosystem water-use efficiency and the responses to agricultural water management in the Shiyang River Basin, northwestern China. *Agricultural Water Management*, 237, 1-12.
- Virnodkar, S.S., Pachghare, V.K., Paril, V.C. and Jha, S.K. (2020). Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review. *Precision agriculture*.
- Wannebo, A. and Rosenzweig, C. (2003). Remote sensing of US cornbelt areas sensitive to the El Niño-Southern Oscillation. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (10), 2055-2067.
- Wang, R.C, Huang, J.F. (2002). Rice yield estimation using remote sensing data. Beijing. *China Agriculture Press*, 287 p. (in Chinese with English abstract).
- Weissteiner, C. and Ku' hbauch, W. (2005). Regional Yield Forecasts of Malting Barley (*Hordeum vulgare* L.) by NOAA-AVHRR Remote Sensing Data and Ancillary Data. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 191, 308-320.
- Wendroth, O., Reuter, H.I. and Kersebaum, K.C. (2003). Predicting yield of barley across a landscape: a state-space modeling approach. *Journal of Hydrology*, 272, 250-263.
- Zandsalimi, Z., Sima, S. and Mousivand, A.J. (2021). Evaluating the Performance of Global Land Cover Maps in Agricultural Land Delineation (Case Study: Lake Urmia Basin). *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52 (3), 795-810.
- Zhang, F., Wu, B.F. and Luo, Z.M. (2004). Winter wheat yield predicting for America using remote sensing data. *Journal of Remote Sensing*, 8, 611-617. (In Chinese with English abstract).