

## یک مدل فیزیکی مقیاس پذیر مبتنی بر سنجش از دور در برآورد عملکرد محصول مزارع برنج

احسان آسمارا<sup>۱</sup>

محمدحسن وحیدنیا<sup>۲\*</sup>

[mhvahidnia@srbiau.ac.ir](mailto:mhvahidnia@srbiau.ac.ir)

مجتبی رضایی<sup>۳</sup>

ابراهیم امیری<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۹

### چکیده

**زمینه و هدف:** گیاه برنج یکی از مهمترین محصولات استراتژیکی در کشور ایران محسوب می‌شود. از دیگر سو، کشاورزی طیف گسترده ای از امکانات و در عین حال مشکلات زیست محیطی را ایجاد می‌کند. در نتیجه، تحقیقاتی که به تولید و توسعه پایدار در این حیطه کمک کنند، حائز اهمیت هستند. هدف اصلی از این پژوهش طراحی و توسعه مدل مقیاس پذیر عملکرد برنج مبتنی بر سنجش از دور و پردازش داده های ماهواره ای است.

**روش بررسی:** در این مطالعه، از چندین تصویر مختلف، موجود در سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) برای تخمین عملکرد برنج در مقیاس های مختلف زمانی (فصول رشد مختلف) و مکانی (وضوح ۳۰ متر تا مقیاس های منطقه ای) استفاده شد. سپس یک مدل کارایی استفاده از نور (LUE) مبتنی بر سنجش از دور را اجرا نموده و در آن تنش های محیطی غیرزنده را وارد نمودیم. این مدل فیزیکی در برابر داده های عملکرد اندازه گیری شده زمینی، در سال های زراعی ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ در ۶۹۱ مزرعه برنج در استان گیلان ارزیابی شد.

**یافته ها:** نتایج، همبستگی مثبت و تطابق قابل توجهی بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی نشان داد، بطوریکه در سال های زراعی مورد مطالعه، میانگین ضریب همبستگی (R) و شاخص توافق (d) برابر با ۰/۵۵ و بدست آمد. میانگین RMSE برابر با ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار،

۱- دانشجوی دکتری گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

۳- استادیار موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.

۴- استاد گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

میانگین MAE برابر با ۴۴۰ کیلوگرم در هکتار، و میانگین NRMSE برابر با ۰,۱۲، حاکی از دقت مناسب مدل در برآورد عملکرد محصول در این مکان‌ها و سال‌هاست. مدل ارائه شده، تغییرپذیری مناسب مقادیر عملکرد را در مقیاس مزرعه نشان داد.

**بحث و نتیجه گیری:** بهره‌گیری از سنجش از دور در محیط GEE به عنوان ابزاری مفید جهت تخمین عملکرد محصول در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی، مورد تایید قرار گرفت. مدل حاضر می‌تواند در طیف وسیعی از کاربردها مانند مدیریت کشاورزی و بیمه محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل عملکرد برنج، مقیاس پذیر، سنجش از دور، گوگل ارث انجین (GEE)، توسعه پایدار کشاورزی.

## **A scalable physical model based on remote sensing in paddy yield estimation**

**Ehsan Asmar**<sup>1</sup>

**Mohammad H. Vahidnia**<sup>2\*</sup>

[mhvahidnia@srbiau.ac.ir](mailto:mhvahidnia@srbiau.ac.ir)

**Mojtaba Rezaei**<sup>3</sup>

**Ebrahim Amiri**<sup>4</sup>

Admission Date: February 22, 2023

Date Received: November 20, 2022

### **Abstract**

**Background and Objective:** Rice is one of the most strategic plants in Iran. On the other hand, agriculture makes a wide variety of environmental amenities and problems. Thus researches that help the production and sustainable development in this area are significant. The main purpose of this research is the design and development of a scalable remote sensing-based paddy yield model.

**Material and Methodology:** In this study, we used several different images available in Google Earth Engine (GEE) to estimate paddy yield at various temporal (growing seasons) and spatial scales (from 30 m resolution to regional scales). Then, a remote sensing-based light use efficiency (LUE) model integrated with inanimate environmental stressors, was implemented. This operational model was assessed against actual field-level yield data in 2016, 2017, and 2019 growing seasons across more than 691 paddy fields in Gilan province.

The efficiency of the current model was evaluated through different statistical measures. The results showed a positive correlation and a signed agreement between the estimated and measured values so that in the studied growing seasons, the average correlation coefficient (R) and agreement index (d) was equal to 0.55. The average RMSE equal to 500 kg/ha, the average MAE equal to 440 kg/ha, and the average NRMSE equal to 0.12, all indicate that the accuracy of the model in estimating crop yield in these locations and years is satisfactory. Also, the submitted model showed the appropriate variability of yield values at the farm scale.

**Discussion and conclusion:** In general, this new approach has confirmed that the use of remote sensing in the GEE is appropriate for estimating crop yield at various temporal and spatial scales, as the current model can be utilized in a wide range of applications such as agricultural management and insurance.

**Keywords:** Paddy Yield Model, Scalable, Remote Sensing, Google Earth Engine (GEE), Sustainable Development of Agriculture.

---

1- Ph.D. Candidate, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. \* (Corresponding Author)

3- Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran.

4- Professor, Department of Water Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

## مقدمه

محصول، رویکرد کارایی استفاده از نور (LUE) مونتیث (۱۲) است (مانند پرینس، ۱۹۹۱ (۱۳)؛ گوتز و پرینس، ۱۹۹۹ (۱۴)؛ هاینش و همکاران، ۲۰۰۳ (۱۵)؛ ترنر و همکاران، ۲۰۰۳ (۱۶)) که عملکرد را به عنوان محصول تابش فعال فتوسنتزی جذب شده (PAR) بیان می کند. کسری از تشعشعات فعال فتوسنتزی جذب شده (fPAR) به عنوان یک پارامتر کلیدی برای این مدل‌ها مانند CERES (۱۷)، EPIC (۱۸) و DSSAT (۱۹) استفاده می شود. بسیاری از محققان پیشنهاد می کنند که مدل زیست توده مبتنی بر LUE پیشنهاد شده توسط مونتیث پتانسیل قابل توجهی برای تخمین عملکرد محصول در ترکیب با داده‌های ماهواره‌ای دارد (۲۰ و ۲۱).

محققان سنجش از دور مدت‌هاست که علاقه‌مند به اندازه‌گیری عملکرد محصول معمولاً با تمرکز بر تخمین تولید در مقیاس منطقه‌ای نسبت به مقیاس مزارع، از فضا بوده‌اند (۲۲). قدمت این کار حداقل به اواخر دهه ۱۹۷۰ برمی گردد، زمانی که هدف اصلی، پیش بینی برداشت محصول در کشورهای استراتژیکی مورد نظر بود (۲۳). در همین راستا مدل LUE با استفاده از سنجنده های با وضوح متوسط مثل MODIS (۲۴) و AVHRR (۲۵) برای نظارت بر تولید زیست توده در مقیاس منطقه ای و با دقت زمانی بالا، اجرا شد. با این حال، عیب استفاده از داده‌های با وضوح متوسط این است که به دلیل پیکسل‌های بزرگ نمی توان آنها را در زمین های کوچک اعمال کرد. کارهای بعدی که در مقیاس مزرعه متمرکز بود، مثال‌های زیادی را ارائه کرده است که در آن نیمی یا بیشتر از تغییرات عملکرد در یک چشم انداز را می توان با تخمین‌های ماهواره‌ای بدست آورد (۲۶)، (۲۷ و ۲۸).

اخیراً، در دسترس بودن گسترده‌تر تصاویر و پلتفرم‌های پیشرفته برای پردازش داده‌ها، هزینه‌های به دست آوردن و پیش‌پردازش تصاویر را به‌طور چشمگیری کاهش داده است. به عنوان مثال، اکنون داده‌های Landsat زمین مرجع شده و با تصحیح جوی به صورت رایگان در دسترس هستند و می‌توانند به سرعت موزاییک شده و از ابرها پوشانده شوند، و در پلتفرم Google Earth Engine (GEE) ترکیب شوند (Google Earth)

برنج از قدیمی‌ترین گیاهانی است که در جهان کشت می‌شود و دانه‌ی آن به مصرف غذای انسان می‌رسد؛ به طوری که هم‌اکنون غذای عمده‌ی بیش از نیمی از مردم مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری را تأمین می‌کند (۱). این گیاه یکی از مهمترین گیاهان استراتژیکی در کشور ایران محسوب می‌شود. با توجه به گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، از سال ۲۰۰۰ میلادی تولید برنج در دنیا با چالش‌های جدید مواجه شده که اهمیت اتخاذ سیاست‌های حمایتی بر افزایش پتانسیل تولید برنج توسط دست اندرکاران امر بیش از پیش آشکار می‌گردد.

مدل‌سازی و پیش‌بینی قابل اعتماد عملکرد محصول (تن در هکتار) در طیف وسیعی از مقیاس‌های مکانی، نقش مهمی در پایش محصولات کشاورزی و بررسی تغییرات عملکرد محصول در پاسخ به عوامل مختلف مدیریتی و محیطی دارد (۲). تصمیم‌گیرندگان برای تعیین کاهش بالقوه در عملکرد محصول، تعیین قیمت مواد غذایی و تصمیم‌گیری به موقع برای واردات و صادرات برای تقویت امنیت غذایی ملی به اطلاعات عملکرد وابسته هستند (۳). کشاورزان می‌توانند از ابزارهای مدل‌سازی عملکرد محصول برای نظارت بر توسعه محصول در طول فصل رشد بهره‌برند (۴) و نیاز به کاربرد کود (۵)، آبیاری (۶) و کنترل بیماری (۷) را ارزیابی کنند. مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد، برای تصمیمات بیمه‌ای یا اجاره زمین نیز که به اطلاعاتی در مورد میانگین و تنوع عملکرد در مقیاس مزرعه نیاز دارند مفید هستند (۸). علاوه بر آن، کشاورزی طیف وسیعی از امکانات و مشکلات زیست محیطی را فراهم می‌کند (۹) و آگاهی از عملکرد مزارع، نقش بسزایی در توسعه پایدار کشاورزی و اتخاذ سیاست‌های کارآمد و عادلانه در این زمینه دارد.

اگرچه روش مستقیم اندازه‌گیری عملکرد محصول به عنوان یک روش سنتی دقیق است، اما دشوار، پرهزینه و زمان‌بر است و در مقیاس‌های بزرگ قابل اجرا نیست. مدل‌های محصول برای غلبه بر محدودیت‌های این روش توسعه یافته‌اند (۱۰). عملکرد محصول در این مدل‌ها بر اساس شبیه‌سازی رشد روزانه محصول برای طیف وسیعی از محیط‌ها برآورد می‌گردد (۱۱). یکی از پرکاربردترین مفاهیم برای مدل‌سازی عملکرد

استان گیلان (به عنوان یکی از مهمترین مناطق کاشت برنج در ایران)، در مقیاس‌های مختلف زمانی (برای فصول رشد با بازه‌های زمانی مختلف) و مکانی (از وضوح ۳۰ متر تا مقیاس‌های منطقه ای) انجام شد. این مدل فیزیکی بر اساس رویکرد کارایی استفاده از نور (LUE) و تاثیر تنش‌های محیطی غیرزنده (دما، رطوبت خاک و عوامل تنش‌زای کمبود بخار) تشکیل و محاسبات مربوط با استفاده از تصاویر ماهواره ای Landsat و داده‌های آب و هوایی شبکه بندی شده، در محیط پلتفرم گوگل ارث انجام گردید. جهت ارزیابی مدل، عملکرد محصول در سال‌های ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ و بطور مجموع در ۶۹۱ مزرعه از اراضی شالیزاری استان گیلان محاسبه و با مقادیر گزارش شده زمینی با استفاده از ضریب همبستگی و معیارهای آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای نسبی (RE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص توافق (d) مقایسه شد.

## ۲- روش بررسی

### ۱-۲- رویکرد کلی

زیست توده بالای زمین (AGB) به عنوان محصول تابش فعال فتوسنتزی جذب شده (APAR, MJ/m<sup>2</sup>/day) (۱۲) و کارایی استفاده از نور (LUE) (۳۲) محاسبه می‌شود. این مدل تاثیر شرایط محیطی را که بر تولید زیست توده تأثیر می‌گذارد، به ویژه برای تأثیر تنش دما (TS)، تنش بخار (VS) و تنش رطوبتی خاک (SMS) در نظر می‌گیرد. رابطه بین عوامل به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$AGB = APAR * LUE_{max} * TS * VS * SMS * 0.864 \quad (1)$$

VS و SMS به ترتیب عوامل استرس زای دما، بخار و رطوبت خاک هستند و ۰٫۸۶۴ یک ضریب تبدیل واحد است (۳۳). LUE واقعی، ضرب LUE<sub>max</sub> در تنش‌ها می‌باشد و LUE<sub>max</sub> یک ویژگی نسبتاً ثابت محصول با تمایز بین

(Engine Team, 2015). پلتفرم GEE یک محل ذخیره پتابایتی متمرکز از داده‌های مشاهده زمین و کتابخانه‌ای از توابع را فراهم می‌کند که برای اجرای تحلیل‌های ارائه شده توسط کاربر ممکن است ترکیب شوند. این ابزار داده شامل تصاویر ماهواره ای (شامل داده‌های بیش از ۴۰ سال لندست)، داده‌های هواشناسی، داده‌های ارتفاعی و داده‌های جوی است. بسیاری از مجموعه داده‌ها به صورت روزانه به روز می‌شوند و کاربران می‌توانند داده‌های خود را برای تجزیه و تحلیل آپلود کنند. تجزیه و تحلیل‌هایی که روی این داده‌ها اجرا می‌شوند به‌طور خودکار موازی شده تا در بسیاری از CPUها در خدمات رایانش ابری گوگل (Google cloud) اجرا شوند و زمان لازم برای تکمیل محاسبات را به شدت کاهش می‌دهند (۸).

با این حال، بهره‌گیری کامل از این پیشرفت‌ها برای تهیه نقشه عملکرد، نیازمند رویکردهای مقیاس پذیرتر برای تبدیل تصاویر به عملکرد است. روشهای موجود اغلب به روابط کالیبره شده بین شاخصهای پوشش گیاهی (VIs) و عملکرد که به مکانها و سالهای خاصی اختصاص دارد، متکی هستند و اندازه‌گیری‌های جدید میدانی برای هر تنظیم مورد نیاز است (۲۹ و ۳۰). رویکردهای دیگر که مدل‌های زراعی اکوفیزیولوژیک را تلفیق می‌کند، می‌تواند تغییرات مکانی، آب و هوایی و زمانبندی تصاویر را بهتر تطبیق دهد (۲۸ و ۳۱)، اما اکثراً به روشهای محاسباتی فشرده‌ای برای استفاده از این داده‌ها نیاز است (بطور مثال خاک منطقه مورد مطالعه و داده روزانه آب و هوا). هم هزینه محاسباتی و هم نیازهای داده‌ای می‌توانند مانع مقیاس پذیری رویکرد به چندین منطقه و سال بدون سرمایه گذاری قابل توجه در زمان و منابع شوند.

در کار حاضر، طراحی و توسعه مدل مقیاس پذیر عملکرد برنج مبتنی بر سنجش از دور، برای تخمین عملکرد محصول برنج در

که در آن AGB (تن در هکتار) تولید زیست توده خشک بالای زمین برای یک روز از دوره رشد گیاه است. APAR، شار فوتون جذب شده توسط عناصر فتوسنتزی تاج پوشش گیاهی است. LUE<sub>max</sub> حداکثر کارایی استفاده از نور (g/MJ) است. TS،

که در آن  $EY_i$  به عنوان عملکرد (تن در هکتار) محصول  $i$  (برنج) نامیده می شود،  $AGDB$  زیست توده خشک انباشته شده در سطح زمین است و  $HI_i$  شاخص برداشت محصول  $i$  (برنج) است که نسبت عملکرد به زیست توده سطح زمین می باشد. در این تحقیق از مقدار ثابت ۰,۴۵ برای  $HI$  محصول برنج استفاده گردید (۴۱). همچنین  $Moisture$  میزان رطوبت شلتوک برنج در زمان برداشت است که برابر با ۱۴ درصد در نظر گرفته شد.

## ۲-۲- سنجش از دور APAR

$APAR$  مستقیماً از تشعشعات فعال فتوسنتزی ( $PAR$ ) و کسری از تشعشعات فعال فتوسنتزی ( $fPAR$ )؛ رهگیری شده توسط برگها و استفاده در فرآیند جذب دی اکسید کربن محاسبه می گردد (۱۲).

$$APAR = fPAR * PAR_{daily} \quad (3)$$

ارتباط بین  $fPAR$  و  $LAI$  و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی ( $NDVI$ ) به طور کامل، در تحقیقات پیشین، به عنوان شاخص های مفید رشد محصول در مدل های عملکرد، ثبت شده است (۴۲ و ۴۳).  $fPAR$  را می توان با استفاده از شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی ( $NDVI$ ) (۴۴ و ۴۵) به صورت زیر محاسبه کرد:

$$fPAR = \begin{cases} -0.161 + 1.257 * NDVI & \text{for } NDVI \geq 0.125 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

تابش فعال فتوسنتزی ( $PAR$ ) روزانه بصورت ذیل تعریف می گردد (۴۸):

$$PAR_{daily} = 0.48 * R_a * \tau_w \quad (5)$$

که در آن  $\tau_w$  قابلیت انتقال اتمسفر و ۰,۴۸ ثابت خورشیدی است. اگرچه مقدار ثابت خورشیدی با میدان دید، عمق نوری و مقدار ازن، متفاوت است (به عنوان مثال، فروین و پینکر، ۱۹۹۵)، به طور کلی مقدار تقریبی ۴۵ تا ۵۰ درصد که شرایط میانگین ۲۴ ساعته را نشان می دهد، پذیرفته شده است (بطور مثال موران و همکاران، ۱۹۹۵).

محصولات  $C3$  و  $C4$  است (۱۲). مطالعات متعددی در مورد تعیین  $LUEmax$  برای محصولات وجود دارد که بین ۱,۴۴ الی ۳,۲۲ برای محصولات  $C3$  (۳۴-۳۷) و بین ۳,۲۷ الی ۴,۲۶ برای محصولات  $C4$  متفاوت است (۳۸ و ۳۹). با این حال، هیچ اتفاق نظری در جامعه علمی در مورد  $LUEmax$  برای محصولات وجود ندارد و هنوز نقشه جهانی محصول سالانه در دسترس نیست. در این تحقیق، از مقدار ثابت ۲,۵ برای  $LUEmax$  گیاه برنج که از نوع محصولات  $C3$  می باشد استفاده می کنیم. عوامل تنش به صورت کسری بیان می شوند که ۰ نشان دهنده تنش شدید و ۱ نشان دهنده عدم تنش است. جزئیات در مورد تخمین  $APAR$  و تنش ها در بخش های ۲-۲ و ۳-۲ ارائه شده است. برای تخمین عملکرد نهایی محصول، ابتدا مقدار زیست توده خشک به تفکیک دوره های فصل رشد، در تاریخ های روگذر ماهواره ای و مابین این تاریخ ها با درونیابی، بدست می آید و سپس مجموع مقادیر روزهای هر دوره و در نهایت مجموع همه دوره ها محاسبه می گردد. در مرحله بعد زیست توده انباشته شده از طریق شاخص برداشت محصول و درصد رطوبت محصول در هنگام برداشت به عملکرد محصول تبدیل می شود (۴۰). عملکرد محصول (تن در هکتار) به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$EY_i = \frac{AGDB_i * HI_i}{1 - \%Moisture} \quad (2)$$

جایی که مقدار ۰,۱۲۵  $NDVI$  نشان دهنده خاک لخت است (۴۵). تابش فعال فتوسنتزی ( $PAR$ )،  $MJ/m^2/day$  محدوده طیفی از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر از تابش خورشیدی موج کوتاه (۰,۳ تا ۳,۰ میکرومتر) را نشان می دهد که توسط عناصر فتوسنتزی تاج پوشش گیاهی استفاده می شود (۴۶).  $PAR$  کسری از تابش خورشیدی موج کوتاه فرودی ( $R_s$ ) است (۴۷).  $R_s$  را می توان از داده های آب و هوایی به دست آورد (اداره ملی اقیانوسی و جوی ( $NOAA$ ) پیش بینی آب و هوا  $CFSv2$  یا مدل های  $Copernicus ECMWF$ ، که هر دو در  $GEE$  موجود هستند). رابطه بین تابش خورشیدی فرازمینی ( $R_a$ ) و

که در آن  $T$  دمای هوا (برحسب درجه سانتی‌گراد)،  $T_H$  حد بالایی فعالیت روزنه گیاه است که برابر با ۴۵ درجه سانتی‌گراد،  $K_T$  دمای هدایت بهینه، برابر با ۲۴ درجه سانتی‌گراد است، و  $T_L$  حد پایینی فعالیت روزنه گیاه است که برابر با ۰ درجه سانتی‌گراد است. در رابطه با گیاه برنج، با توجه به اینکه هرگاه دمای محیط از ۱۳ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر آید برنج با سرما روبه‌رو می‌شود، همچنین هرگاه دمای محیط از ۴۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر شود باعث اختلال در رشد ریشه خواهد شد و گیاه را از بین می‌برد (۱). برای میانگین دمای هوای روزانه بالاتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد و کمتر از ۱۳ درجه سانتی‌گراد،  $TS$  روی ۰/۰۱ تنظیم شده است. مقادیر  $T_H$ ،  $K_T$ ، و  $T_L$  از Maidment (۵۸) به دست می‌آیند.

### ۲-۳-۳- تنش رطوبتی خاک (SMS)

فیلد و همکاران (۵۹) تنش رطوبتی خاک را به عنوان تبخیر و تعرق واقعی / بالقوه محاسبه کردند. همچنین کسر تبخیری ( $\Lambda$ ) را می‌توان از تراز انرژی سطحی با استفاده از مدل الگوریتم تعادل انرژی سطح برای زمین (SEBAL) محاسبه کرد (۶۰) که بصورت ذیل است:

$$W = \Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} \quad (11)$$

در این رابطه  $\lambda E$  شار گرمای نهان،  $R_n$  تابش خالص و  $G_0$  شار حرارتی خاک می‌باشند.  $R_n$  از تفاوت بین تشعشع موج کوتاه خالص ورودی ( $R_{ns}$ ) و تشعشع موج بلند خالص خروجی ( $R_{nl}$ ) بدست آمد (۶۱).  $\lambda E$  مستقیماً از مجموعه داده آب و هوایی CFSV2 استخراج گردید و همچنین برای محاسبه  $G_0$  از رابطه ۱۲ (۶۲) استفاده شد:

$$\frac{G_0}{R_n} = (T_s - 273.15) * (0.0038 + 0.0074 * \alpha) * (1 - 0.98 * NDVI^4) \quad (12)$$

که در رابطه فوق  $T_s$  دمای سطح زمین برحسب درجه کلونین،  $\alpha$  آلبدو سطح و  $NDVI$  شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی است. آلبدو نیز از رابطه ۱۳ (۶۳) محاسبه گردید:

### ۲-۳- محاسبات عوامل استرس زای عملکرد

#### ۲-۳-۱- استرس بخار (VS)

عامل تنش بخار نشان می‌دهد که چگونه تبخیر و تعرق و فرآیندهای فتوسنتزی تحت تأثیر فشار بخار قرار می‌گیرند (۴۹). تنش بخار از رابطه اش با کمبود فشار بخار (VPD) (برای رطوبت نسبی کمتر از ۱۰۰٪) تخمین زده می‌شود (۵۰ و ۵۱). VPD به عنوان تفاوت بین فشار بخار اشباع شده و واقعی تعریف می‌گردد. این فاکتور، عامل مهمی برای تقاضای آب و کربن برای محصولات در نظر گرفته می‌شود (۵۲)، بطوریکه در آن افزایش VPD می‌تواند جذب کربن و مصرف آب توسط گیاه را کاهش دهد (۵۳).

$$VS = 0.88 - 0.183 * \log(e_s - e_a) \quad (6)$$

که  $e_s$  و  $e_a$  به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی (برحسب KPa) هستند و از معادله Tetens (۵۴) بدست آمدند.

$$e_s = 0.61078 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \quad (7)$$

$$e_a = \frac{RH * e_s}{100} \quad (8)$$

که در روابط فوق  $T$  دمای هوا به درجه سانتی‌گراد و RH رطوبت نسبی هوا می‌باشد.

#### ۲-۳-۲- محدودیت دمای گیاه (TS)

تنش دما (TS) با توجه به پیشینه‌های تحقیق (۵۵) و (۵۶) محاسبه گردید که در آنها نویسنده، رابطه‌ای بین TS و ضریب Jarvis ( $J_c$ ) (۵۷) را پیشنهاد کرد. TS به عنوان تابعی از دمای روزانه، حد بالا و پایین فعالیت روزنه و دمای هدایت بهینه محصول محاسبه می‌شود.

$$TS = \frac{(T - T_L) * (T_H - T)^{J_c}}{(K_L - T_L) * (T_H - K_L)^{J_c}} \quad (9)$$

جایی که  $J_c$  ضریب جارویس است که طبق معادله ذیل محاسبه می‌شود:

$$J_c = \frac{T_H - K_T}{K_L - T_L} \quad (10)$$

عملکرد محصول دنبال می‌گردد. با توجه به شکل ۱، مدل ارائه شده شامل ۸ مرحله اصلی است که شامل موارد ذیل می‌گردد:

- مرحله ۱: اخذ دمای سطح زمین (LST) و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) از محصول MOD11A1.061 و تصاویر Landsat8
- مرحله ۲: اخذ رطوبت هوا، دمای هوا و تابش خورشیدی از مجموعه داده آب و هوایی
- مرحله ۳: وارد کردن داده های مورد نیاز از مراحل قبل در مدل تعادل انرژی سطح برای زمین (SEBAL)
- مرحله ۴: محاسبات مربوط به تنش ها، با استفاده از داده های مورد نیاز از مرحله ۲ و خروجی مرحله ۳
- مرحله ۵: محاسبه متغیرهای fPAR و PAR با استفاده از داده های اخذ شده در مراحل ۱ و ۲ (جهت ساده سازی کد نوشته شده، با توجه به یکسان بودن منبع داده، متغیر PAR در تمام تنش ها ضرب و بصورت یک ضریب به نام PAR\_VS\_TS\_W در محاسبات بکار گرفته شد)
- مرحله ۶: محاسبه زیست توده خشک
- مرحله ۷: محاسبه عملکرد محصول برنج
- مرحله ۸: ارزیابی مدل با مشاهدات زمینی

$$\begin{aligned} \text{Albedo} = & ((0.356 * \text{blue}) \\ & + (0.13 * \text{red}) \\ & + (0.373 * \text{nir}) \\ & + (0.085 * \text{swir1}) \\ & + (0.072 * \text{swir2}) \\ & - 0.018) / 1.016 \end{aligned} \quad (13)$$

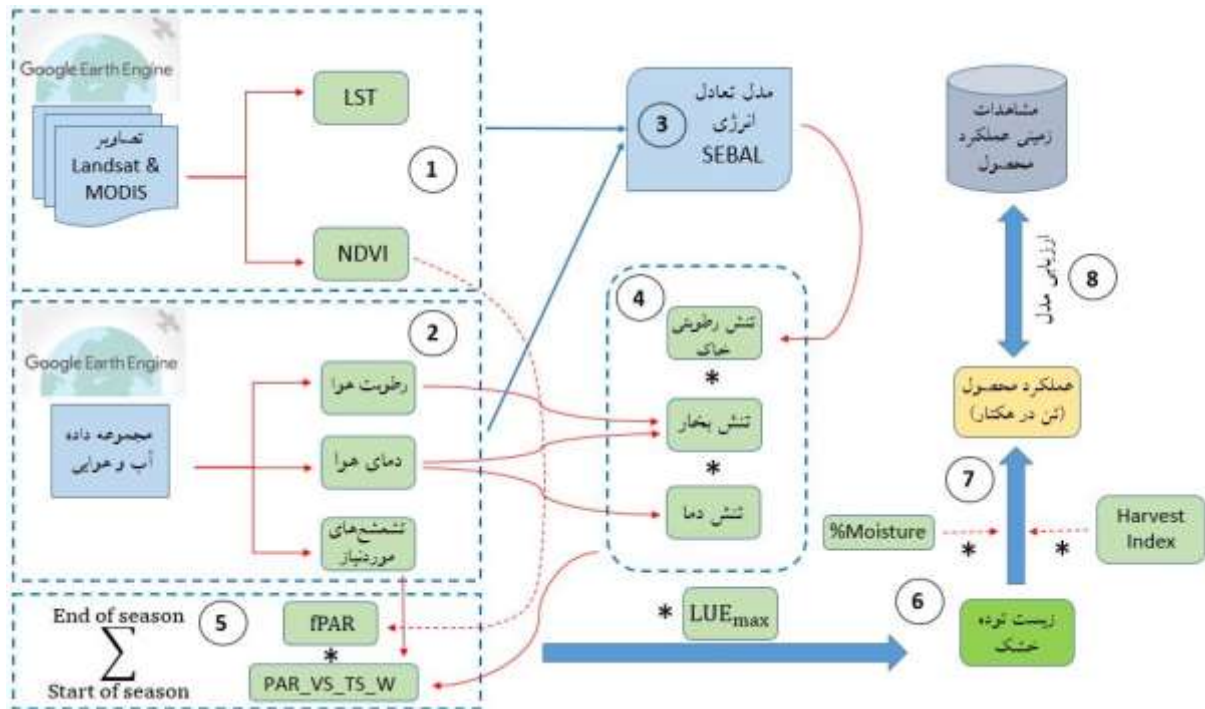
که در آن B2 باند آبی، B4 باند قرمز، B5 باند مادون قرمز نزدیک، B6 و B7 باندهای مادون قرمز موج کوتاه می‌باشند و از تصاویر بازتاب بالای جو (TOA) لندست ۸ بدست آمدند.

## ۲-۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

### ۱-۴-۲- نمای کلی مدل

این مطالعه، با استفاده از حداکثر کارایی استفاده از نور (LUEmax) و مدل APAR و از طریق ادغام تنش های محیطی؛ تنش بخار (VS)، تنش دما (TS) و تنش رطوبتی خاک (SMS)، در پلتفرم GEE به برآورد عملکرد محصول برنج در مقیاس های مختلف زمانی (برای فصول رشد با بازه های زمانی مختلف) و مکانی (از وضوح ۳۰ متر تا مقیاس های منطقه ای) می پردازد و سپس عملکرد تخمینی محصول در برابر مشاهدات عملکرد واقعی محصول که از مزارع مختلف جمع آوری شده است، مورد ارزیابی قرار می گیرد. شکل ۱ متغیرهای مورد استفاده را در قالب یک مدل مفهومی نشان می دهد که برای تخمین





شکل ۱- متغیرهای مورد استفاده و مراحل انجام شده در مدل در قالب مدل مفهومی، جهت تخمین عملکرد محصول

Figure 1. Schematic overview of the methodology used for estimating the Paddy yield

سطح زیر کشت برنج در این استان در سال ۱۴۰۱ طبق آمار ارائه شده توسط سازمان جهاد کشاورزی استان گیلان حدود ۲۳۸ هزار هکتار می‌باشد. مهم‌ترین مناطق تولید کننده برنج در استان گیلان عبارتند از: آستارا، طوالش، بندرانزلی، فومن، زیباکنار، رضوان‌شهر، خمام، لشت‌نشاء، هشتپر، لولمان، کوچصفهان، صومعه‌سرا، آستانه اشرفیه، رودبار، رودسر، رشت، سیاهکل، لاهیجان و لنگرود (۱).

#### ۲-۴-۲- منطقه مورد مطالعه و داده های زمینی

بیشترین تولید برنج در ایران در استان‌های گیلان و مازندران است (۱). منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، اراضی شالیزاری استان گیلان می‌باشد (شکل ۲). میزان بارندگی در استان گیلان اغلب بالاتر از ۸۰۰ میلی‌متر است و ممکن است این رقم به ۲۰۰۰ میلی‌متر برسد که این مقدار مناسب برای کاشت برنج است (۱). این استان از نظر رطوبت نیز برای برنج مناسب می‌باشد (۱).



شکل ۲- نمای کلی استان گیلان بعنوان منطقه مورد مطالعه (Google Imagery, 2022)

Figure 2. Overview of Gilan province as the study area (Google Imagery, 2022)

اینصورت که حداقل ۵ نمونه با استفاده از ابزار نمونه برداری کادر مربع شکل به مساحت ۱ مترمربع برداشت شد.

- برای خشک کردن و خرمکوبی، بوته های نمونه برداری شده بصورت دستی کوبیده شد، بطوریکه همه محورهای خوشه از دانه های کوبیده شده جدا گردیدند.
- دانه های جدا شده با ترازو وزن و مقدار رطوبت آنها با استفاده از رطوبت سنج اندازه گیری شد. عملکرد در واحد سطح بر مبنای رطوبت ۱۴ درصد محاسبه گردید.
- بمنظور محاسبه عملکرد با ضرب نمودن وزن دانه های بدست آمده با رطوبت ۱۴ درصد (در یک مترمربع که از میانگین ۵ نقطه نمونه برداری بدست آمده است) در عدد ۱۰۰۰۰، عملکرد شلتوک در هکتار بدست آمد.

در مجموع ۶۹۱ مشاهده عملکرد مختلف در مقیاس میدانی در سطح استان گیلان برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. این داده های زمینی که مربوط به سال های زراعی ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ می باشند (جدول ۱) از طریق نمونه برداری از مزارع بدست آمد.

### ۳-۴-۲- روش نمونه برداری از مزارع

یک مسئله بحرانی در ارزیابی الگوریتم های سنجش از دور، داشتن یک مجموعه داده مستقل با اندازه گیری های نسبتاً دقیق برای مکان های شناخته شده و در مقیاس های مکانی است که می تواند با مقیاس داده های سنجش از دور مطابقت داشته باشد. از این سو در این تحقیق، جهت انجام نمونه برداری از مزارع شالیزاری مراحل ذیل انجام شد (۶۴):

- از GPS چند فرکانسه جهت برداشت طول و عرض جغرافیایی مزارع استفاده شد.
- اندازه گیری عملکرد، در امتداد دورترین و کوتاهترین گوشه های مزرعه بصورت قطری انجام شد، به

## جدول ۱- اطلاعات کلی مربوط به داده های زمینی مورد استفاده جهت ارزیابی مدل

Table 1. General information related to field measured data used to evaluate the model

منبع داده	تعداد مشاهدات	مقدار عملکرد محصول			سال
		Mean.	Min.	Max.	
نمونه برداری از مزارع	۲۷۵	۴/۰۲	۳/۱۰	۴/۷۳۴	۱۳۹۵
نمونه برداری از مزارع	۲۴۷	۴/۲۴	۳/۸۴	۴/۸۶۶	۱۳۹۶
نمونه برداری از مزارع	۱۶۹	۴/۲۷	۳/۴۶	۵/۲۰	۱۳۹۸
	۶۹۱	مجموع:			

Score موجود در GEE حداقل ۲۰٪ احتمال حاوی

ابر بودن داشت، به عنوان ابر پوشانده شد.

- محصول دمای سطح زمین/تابش روزانه (MOD11A1.061): دمای سطح زمین (LST) در تخمین شار حرارتی خاک ( $G_0$ )، از طریق مجموعه داده MOD11A1.061 بدست آمد.
- مجموعه های داده آب و هوایی: متغیرهای دمای هوای ۲ متری سطح زمین، تشعشعات موج کوتاه و بلند و شار گرمای نهان از طریق مجموعه داده آب و هوایی CFSV2 (NCEP Climate Forecast System Version 2, 6-Hourly Products) و رطوبت نسبی در معادله Tetens با استفاده از مجموعه داده GFS (Global Forecast System 384-Hour Predicted Atmosphere Data) اخذ شد.

## ۲-۴-۴- داده های ورودی مدل

داده های ورودی در مدل و عدم قطعیت های محتمل مربوط به آنها، بصورت خلاصه در جدول ۲ ارائه می گردد. لازم بذکر است تمامی مجموعه های داده مورد استفاده، در محیط GEE قابل دسترسی می باشند:

- تصاویر بازتاب بالای جو و بازتاب سطح لندست ۸: برای محاسبه متغیر Albedo در مدل تعادل انرژی SEBAL و همچنین متغیر fPAR، به ترتیب از مجموعه داده بازتاب بالای جو لندست ۸ (USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1) و مجموعه داده بازتاب سطح لندست ۸ (USGS Landsat 8 Level 2, TOA Reflectance Collection 2, Tier 1) با دقت مکانی ۳۰ متر، به عنوان تصویر پایه استفاده شد. هر مشاهده ای از هر پیکسل که بر اساس الگوریتم Simple Cloud

## جدول ۲- اطلاعات کلی داده های ورودی در مدل و عدم قطعیت های محتمل مربوط به آنها

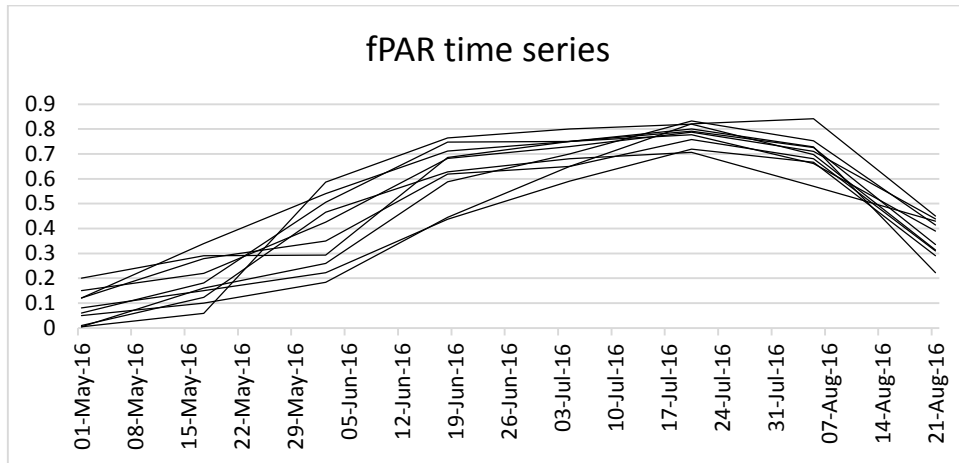
Table 2. Major data inputs used in this study, with the respective spatial and temporal resolutions, and possible uncertainties

ورودی های مدل	مورد استفاده	دقت مکانی (متر)	دقت زمانی	عدم قطعیت های محتمل
CFSV2	استخراج متغیرهای آب و هوایی	22264	6 hr	در مناطق با توپوگرافی پیچیده پیکسل ها ممکن است منعکس کننده شرایط محلی نباشند
GFS	رطوبت نسبی	27830	6 hr	در مناطق با توپوگرافی پیچیده پیکسل ها ممکن است منعکس کننده شرایط محلی نباشند
Landsat 8	محاسبه Albedo و fPAR	30	16 days	به دلیل وجود ابر، منجر به مشاهدات محدود می شود/ پر کردن شکاف بوسیله اصلاح کننده اسکن لاین/ فاصله زمانی زیاد تصویر برداری از هر منطقه باعث ایجاد عدم قطعیت در محاسبات می گردد/ خطاهای متفاوت تصحیح اتمسفریک در صحنه های مختلف Landsat
شاخص برداشت (HI)	-	-	-	ونانسیو (۶۵) نشان داد که استفاده از مقادیر خاص HI می تواند تفاوت بین عملکرد پیش بینی شده و اندازه گیری شده را از ۱۰٪+ (با استفاده از یک مقدار HI) به ۵٪+ (با استفاده از یک مقدار خاص HI) کاهش دهد
LUE <sub>max</sub>	-	-	-	دونگ و همکاران (۶۶) در هنگام استفاده از LUE <sub>max</sub> اخذ شده (حدود ۱۵٪ برای ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)) در مقایسه با LUE <sub>max</sub> ثابت، بهبود قابل توجهی در دقت تخمین زیست توده نشان داد

## ۵-۲- تعیین فصل رشد

به مشاهدات زمینی و همچنین نمودار تغییرات fPAR در پیکسل های مورد مطالعه، بازه زمانی برای تمامی سالها از نیمه اردیبهشت (در زمان نشاء) تا نیمه مرداد (در زمان برداشت محصول) انتخاب شد. همچنین در این تحقیق، محاسبه زیست توده گیاه در هر کدام از مراحل رشد سه گانه، بصورت مجزا صورت گرفت و سپس مجموع آنها به عنوان عملکرد نهایی محصول در تمامی فصل رشد بدست آمد. در شکل ۳ نمونه ای از نمودار تغییرات fPAR روزانه از ۱۰ مزرعه برنج مختلف در طول فصل رشد سال ۱۳۹۵ که بصورت تصادفی از مزارع نمونه برداری شده انتخاب شده است، ارائه می گردد.

دوره رشد برنج شامل بازه زمانی از ابتدای جوانه زدن بذر تا رسیدگی (که در برگیرنده مراحل: رشد رویشی، رشد زایشی و رسیدگی است) می باشد (۱). برنج گیاهی است که دارای ارقام زودرس (طول دوره رشد ۱۳۰ تا ۱۴۵ روز)، متوسط رس (۱۵۰ تا ۱۶۰ روز) و ارقام دیر رس (۱۷۰ تا ۱۸۰ روز) می باشد (۱). در رقم های مختلف گیاه برنج، مدت زمان مراحل رشد زایشی و رسیدگی نسبتا مشابه (به ترتیب ۳۰ و ۳۵ روز)، اما مرحله رشد رویشی بسته به دیررس یا زود رس بودن رقم گیاهی متفاوت می باشد (۶۴). از آنجائیکه استفاده از ویژگی های فنولوژیکی گیاه برنج امکان انتخاب بهتر تصاویر را فراهم می کند (۶۷)، با توجه



شکل ۳- نمودار تغییرات fPAR در ۱۰ مزرعه برنج مختلف در طول فصل رشد سال ۱۳۹۵ (۲۰۱۶)

Figure 3. fPAR time series in 10 different rice fields during the growing season of 2016

۶-۲- شاخص های آماری مورد استفاده

خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای نسبی (RE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) طبق روابط ذیل استفاده شد:

کارایی مدل پیشنهادی از طریق ضریب همبستگی (R) و شاخص توافق (d) مورد بررسی قرار گرفت و برای ارزیابی دقت برآوردهای عملکرد، شاخص های آماری ریشه میانگین مربعات

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - X_m) * (Y_i - Y_m)]}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2 * \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_m)^2]}} \quad (14)$$

در رابطه فوق R ضریب همبستگی،  $X_i$  مقادیر متغیر X در یک نمونه،  $X_m$  میانگین مقادیر متغیر X،  $Y_i$  مقادیر متغیر Y در یک نمونه و  $Y_m$  میانگین مقادیر متغیر Y است.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Measured Yield}_i - \text{Estimated Yield}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\text{Estimated Yield}_i - \text{Measured Yield}_m| + |\text{Measured Yield}_i - \text{Measured Yield}_m|)^2} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Estimated Yield}_i - \text{Measured Yield}_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\text{Estimated Yield}_i - \text{Measured Yield}_i|}{n} \quad (17)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Estimated Yield}_i - \text{Measured Yield}_i)}{\sum_{i=1}^n \text{Measured Yield}_i} \quad (18)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\text{Measured Yield}_m} \quad (19)$$

## ۳- یافته‌ها

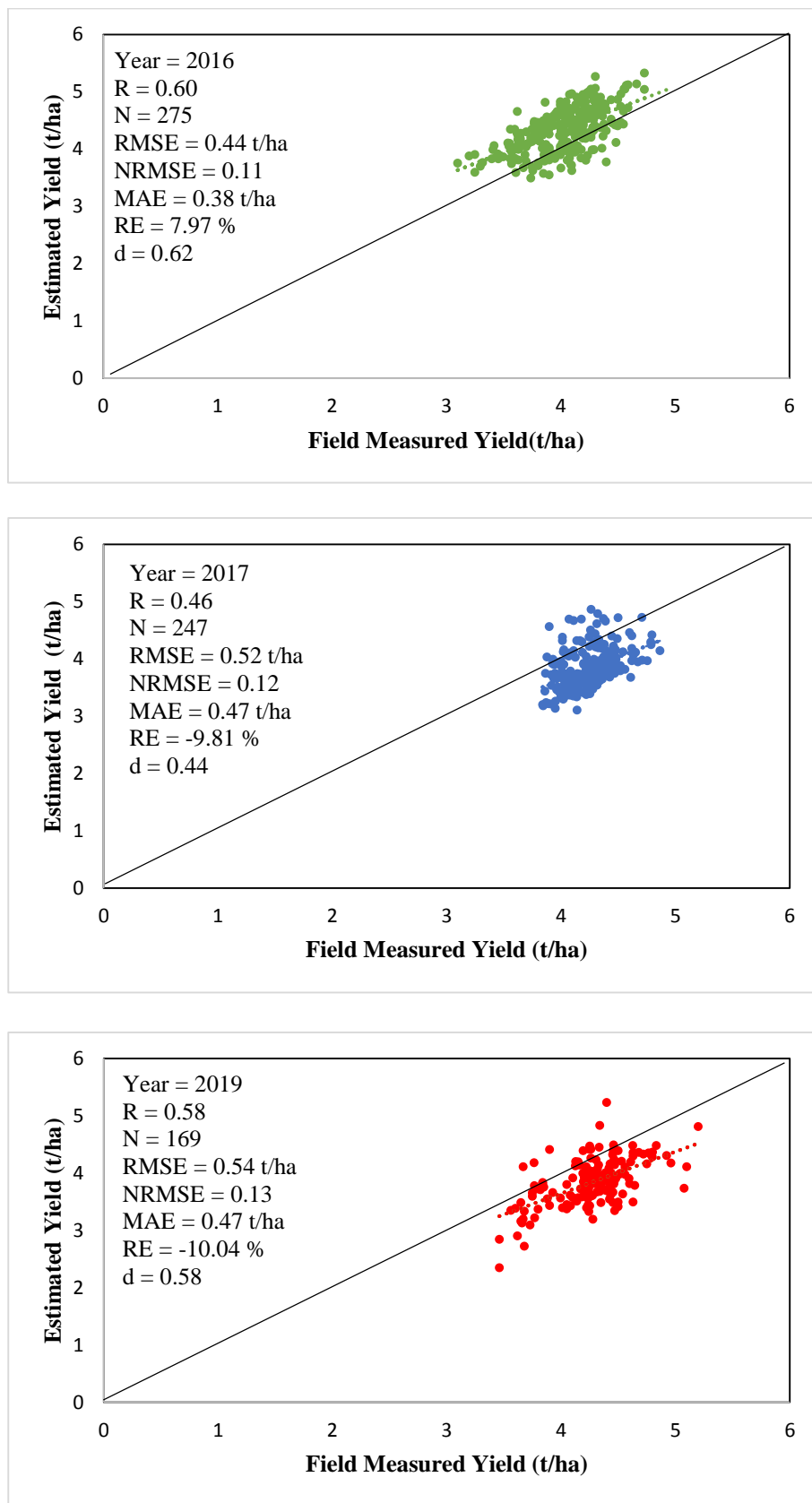
## ۳-۱- کارایی مدل

در مجموع، برآوردهای مدل جهت اعتبارسنجی، با ۶۹۱ مشاهده میدانی عملکرد محصول در سال‌های ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ مقایسه شد که نمودار همبستگی هر کدام از سال‌ها در شکل ۴ ارائه می‌گردد. شکل ۴ مقایسه عملکرد محاسباتی و مشاهداتی محصول برنج را برای سال‌های زراعی ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. نکته قابل توجه قبل از بررسی کارایی مدل این است که، در همه مدل‌های محصول، عدم قطعیت‌های غیرقابل اجتناب وجود دارد که حتی دقت بالای بدست آمده از مدل، کارایی خوب مدل را بر روی داده‌های واقعی تضمین نمی‌کند (۸). مدل حاضر که مبتنی بر سنجش از دور می‌باشد نیز از این قاعده مستثنی نیست و عدم قطعیت‌هایی ناشی از داده‌های ورودی که در جدول ۲ ارائه شده است و نیز عدم لحاظ همه فرآیندها (مثل نحوه بکارگیری کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم (NPK) بعنوان یک عامل مدیریتی، خسارت ناشی از باران‌های سیل آسا (۶۸) و وزش باد بصورت توأم که باعث ورس و خوابیدگی گیاه برنج می‌گردد و همچنین خسارت ناشی از آفات و بیماری‌ها)، در این مدل وجود دارد.

مقدار عملکرد محاسباتی مدل در نقاط دارای اندازه‌گیری زمینی در سال ۹۵ دارای میانگین ۴/۳۴ در بازه ۳/۴۹ الی ۵/۳۳ با واریانس ۰/۱۴۲، در سال ۹۶ دارای میانگین ۳/۸۲ در بازه ۳/۱ الی ۴/۸۶ با واریانس ۰/۱۲۲ و در سال ۹۸ دارای میانگین ۳/۸۴ در بازه ۲/۳۴ الی ۵/۲۳ (همه مقادیر عملکرد، تن در هکتار) با واریانس ۰/۱۵۸ می‌باشد که طیف قابل توجهی از تنوع عملکرد محصول را در تمامی این سال‌ها نشان می‌دهد. در جدول ۳ مقادیر متوسط

عملکرد محاسباتی، fPARmean و PAR\_VS\_TS\_W در تمامی نقاط مشاهداتی به تفکیک سال ارائه می‌گردد. با توجه به جدول ۳، از آنجایی که جهت محاسبه fPAR از تصویر بازتاب سطح لندست ۸ با دقت مکانی ۳۰ متر استفاده شد، ارتباط معنی‌داری بین افزایش مقدار این متغیر با افزایش میزان عملکرد محصول وجود دارد. البته تاثیر متغیر آب و هوایی PAR\_VS\_TS\_W، علیرغم استفاده از مجموعه داده آب و هوایی با دقت مکانی بالا (۲۲ کیلومتر)، در اختلاف مقدار عملکرد سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ که دارای متوسط fPAR برابر هستند، مشخص است. لازم بذکر است که محاسبات، همانطور که قبلاً بیان شد بر اساس تاریخ‌های روگذر ماهواره‌ای در طول هر یک از دوره‌های فصل رشد و درونیایی بین این تاریخ‌ها انجام شد و مقادیر متوسط فوق، یک تحلیل کلی از نتایج بدست آمده می‌باشد.

مقایسه بین عملکرد محاسباتی و مشاهداتی برنج، همبستگی مثبت قابل توجهی را در تمام سال‌های زراعی مورد مطالعه نشان داد، بطوریکه ضریب همبستگی در سال ۹۵ برابر با ۰/۶ (ضریب تعیین، ۰/۳۶)، در سال ۹۶ برابر با ۰/۴۶ (ضریب تعیین، ۰/۲۱) و در سال ۹۸ برابر با ۰/۵۸ (ضریب تعیین، ۰/۳۴) می‌باشد. همچنین شاخص توافق (d)، عددی بین ۰ (عدم توافق) و ۱ (تطابق کامل)، که توسط ویلموت (۱۹۸۱) بعنوان معیار استاندارد شده درجه خطای پیش‌بینی مدل پیشنهاد شد، برای سال ۹۵ برابر با ۰/۶۲، برای سال ۹۶ برابر با ۰/۴۴ و برای سال ۹۸ برابر با ۰/۵۸، بدست آمد که تطابق و همبستگی بیشتر مقادیر پیش‌بینی شده مدل را با مشاهدات زمینی، به ترتیب در فصول رشد ۹۵، ۹۸ و ۹۶ نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمودار همبستگی بین برآوردهای مدل و مشاهدات میدانی عملکرد محصول در سال‌های ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸

Figure 4. Comparison of estimated yield with field measured yield for the growing seasons of 2016, 2017 and 2019

جدول ۳- مقادیر متوسط عملکرد محاسباتی، میانگین fPAR و PAR\_VS\_TS\_W در تمامی نقاط مشاهداتی به تفکیک سال

Table 3. Mean values of estimated yield, fPAR and PAR\_VS\_TS\_W in all measured points by year

سال	عملکرد (t/ha)	fPAR <sub>mean</sub>	PAR_VS_TS_W
۱۳۹۵	۴/۳۴	۰/۵۸	۵۶/۶۱
۱۳۹۶	۳/۸۲	۰/۵۲	۵۸/۳۹
۱۳۹۸	۳/۸۴	۰/۵۲	۶۲/۷۰

می‌باشد، سزاوار توجه بیشتری است. با این حال، در بسیاری از کاربردها، تغییرپذیری مقادیر در مقیاس مزرعه که عملکرد نسبی آنها را در مقایسه با همسایگان نمایش می‌دهد، دارای اهمیت بیشتری است. به عنوان مثال، یکی از استفاده‌های سنجش از دور عملکرد محصول، شناسایی مزارع با دهک عملکردی بالا در یک سال و یک منطقه خاص و ردیابی همین مناطق در سال‌های دیگر است که به نوعی تداوم تفاوت بین مزارع در میزان محصول، مورد بررسی قرار گیرد (۸). این نوع اطلاعات می‌تواند، جهت ایجاد تغییرات مداوم مدیریتی یا بهبود مهارت کشاورز، کاهش شکاف عملکردی مزارع و داشتن انتظارات واقع بینانه در این خصوص و همچنین برای شناسایی مناطقی که اختلاف عملکردی پایدار نسبت به دیگر مزارع دارند و شایسته توجه بیشتری هستند، مفید باشد (۸).

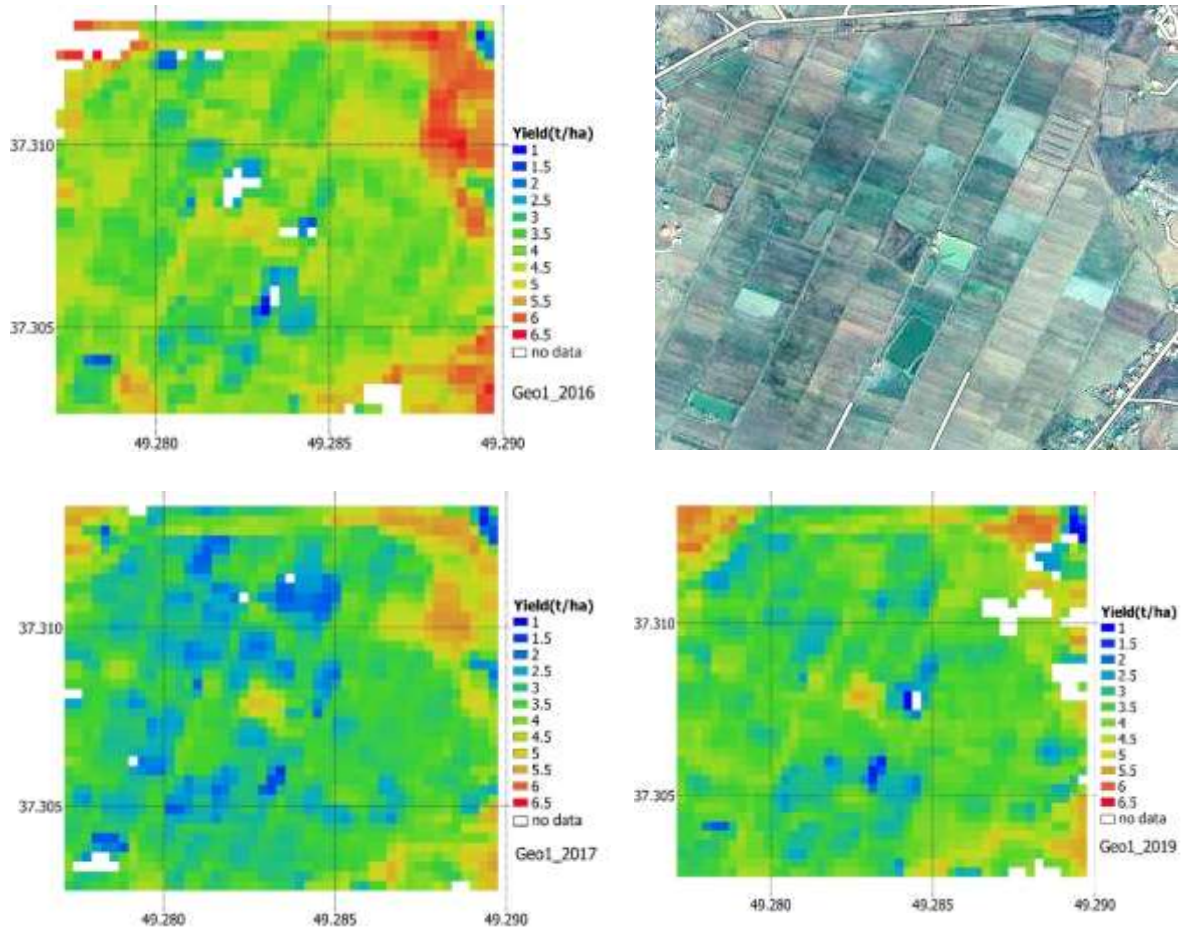
در ادامه، نمونه‌هایی از نقشه‌های عملکرد محصول (t/ha) خروجی از مدل و جدول آماری مربوط، در ۲ منطقه مختلف استان گیلان به تفکیک سال، جهت مقایسه نسبی میزان عملکرد محصول در مزارع ارائه می‌گردد. این دو منطقه بصورتی انتخاب شده اند که در آنها مزارع برنج، نسبت به دیگر چشم اندازها (مناطق مسکونی، جاده‌ها، جنگل‌ها، مناطق آبی و غیره) بیشتر است. شکل ۵ و ۶ به ترتیب، نقشه‌های عملکرد محصول برای منطقه ۱ و منطقه ۲ می‌باشند. جدول آماری مقادیر عملکرد محصول برنج (t/ha) خروجی از مدل، به تفکیک سال، که شامل تعداد پیکسل‌های مزارع برنج و مقادیر میانگین، کمینه، بیشینه، واریانس و انحراف معیار می‌باشد، برای مناطق ۱ و ۲ به ترتیب در جداول ۴ و ۵ قابل مشاهده است.

شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای نسبی (RE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، به ترتیب برای سال ۹۵ برابر با ۰/۴۴ تن در هکتار، ۰/۳۸ تن در هکتار، ۷/۹۷ درصد و ۰/۱۱، برای سال ۹۶ برابر با ۰/۵۲ تن در هکتار، ۰/۴۷ تن در هکتار، ۹/۸۱- درصد و ۰/۱۲، و برای سال ۹۸ برابر با ۰/۵۴ تن در هکتار، ۰/۴۷ تن در هکتار، ۱۰/۰۴- درصد و ۰/۱۳ بدست آمد که دقت بیشتر مدل در محاسبه عملکرد محصول و انحراف کمتر از مقادیر عملکرد مشاهداتی را، به ترتیب در سال‌های ۹۵، ۹۶ و ۹۸ نشان می‌دهد. بطور کلی، میانگین RMSE برابر با ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار، میانگین MAE برابر با ۴۴۰ کیلوگرم در هکتار، میانگین RE برابر با ۹/۲۷ درصد و میانگین NRMSE برابر با ۰/۱۲، حاکی از دقت مناسب مدل در برآورد عملکرد محصول در تمامی مکان‌ها و سال‌های مورد مطالعه است.

### ۲-۳- بررسی تغییرپذیری مقادیر مدل

اگرچه نتایج ذکر شده فوق حاکی از عملکرد قابل قبول مدل می‌باشد ولی می‌بایست به این نکته توجه نمود که در مقیاس‌های بزرگ مثل مقیاس‌های استانی و کشوری، بدلیل محدودیت مشاهدات زمینی نمی‌توان بطور قطع در مورد دقت و کارایی مدل، اظهار نظر کرد (همانطور که قبلاً در مورد عدم قطعیت‌های مدل ارائه شده، اشاره شد). در نمودارهای مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی شکل ۴ نیز، جهت گیری پیش‌بینی‌های مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی مشهود است. این امر بویژه در مواردی که مقدار مطلق عملکردها بسیار مهم و حیاتی





شکل ۵- تصویر Google و نقشه های متناظر عملکرد محصول (t/ha) خروجی از مدل، در محیط گوگل ارث انجین برای منطقه ۱، به تفکیک سال

Figure 5. Google imagery with the respective model crop yield maps (t/ha) in Google Earth Engine for region 1, by year

جدول ۴- جدول آماری مقادیر عملکرد محصول برنج (t/ha) خروجی از مدل، به تفکیک سال برای منطقه ۱

Table 4. Statistics for model paddy yield values (t/ha), by year for region 1

سال	تعداد پیکسل ها	mean.	min.	max.	variance.	stdev.
۱۳۹۵	۱۰۴۱	۳/۹۳۰	۰/۹۷۳	۵/۸۲۱	۰/۳۱۶	۰/۵۶۲
۱۳۹۶	۱۰۵۱	۳/۱۴۴	۱/۴۰۷	۵/۲۱۱	۰/۳۲۲	۰/۵۶۸
۱۳۹۸	۱۰۴۱	۳/۴۸۶	۰/۸۱۶	۵/۳۹۹	۰/۲۵۱	۰/۵۰۱

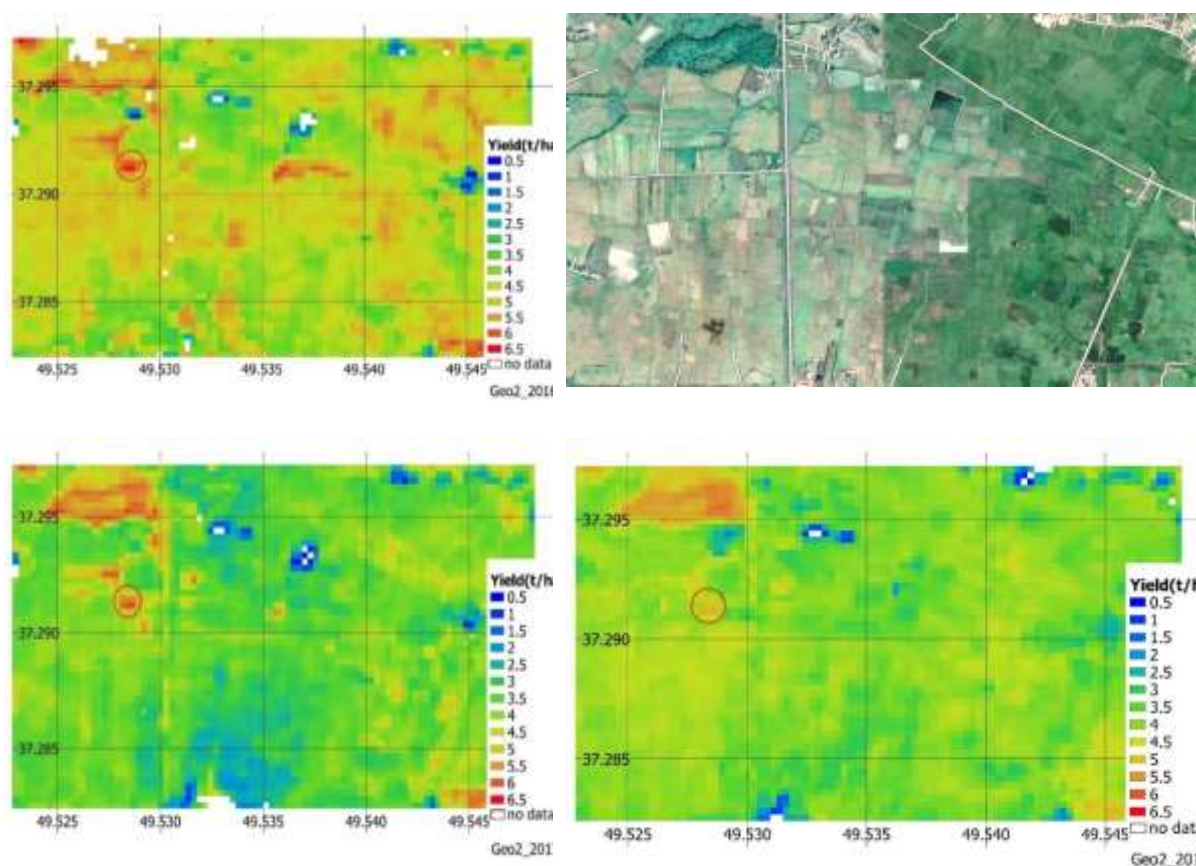
۰/۳۲، ۰/۲۵ بوده که نشان از پراکندگی کمتر میزان عملکرد محصول حول میانگین در سال ۹۸ را دارد و حاکی از شکاف عملکردی کمتر مزارع مورد نظر در این سال است که به وضوح در نقشه های عملکرد مشخص می باشد. همچنین میانگین پایین

همانطور که از شکل ۵ و جدول ۴ مشخص است، میانگین عملکرد برنج در منطقه مورد نظر، در سال ۹۵ نسبت به سال های دیگر بیشتر می باشد و این در حالی است که مدل توانسته است طیف وسیعی از عملکرد محصول را در این سال تخمین زند. مقادیر واریانس برای سال های ۹۵، ۹۶ و ۹۸ به ترتیب برابر با ۰/۳۱،

عملکرد، می‌بایست مورد توجه بیشتری قرار گیرد. نقشه‌های عملکرد ارائه شده ذیل به وضوح، تحلیل‌های آماری فوق را بصورت بصری نمایش می‌دهد. نکته جالب توجه در نقشه‌های عملکرد ذیل، مزرعه مشخص شده با دایره قرمز است که دارای عملکرد محصول بالا بوده و توانسته است، شکاف عملکردی خود را با دیگر مزارع در سال‌های بعد نیز تداوم بخشد. با توجه به اینکه در بسیاری از کاربردهای تغییرپذیری در مقیاس مزرعه، مقدار مورد علاقه بیشتر، عملکرد نسبی مزارع در مقایسه با همسایگان آنها است (۸). نمونه‌های فوق، بیانگر کاربرد موثر مدل در این زمینه می‌باشد.

و اختلاف زیاد عملکرد محصول در مزارع این منطقه در سال ۹۶ حائز اهمیت است.

منطقه ۲، با توجه به شکل ۶، به مراتب بزرگتر از منطقه ۱ انتخاب گردیده و مزارع برنج همانند منطقه ۱، از مابقی چشم اندازها بیشتر است. همانطور که از جدول ۵ مشخص است، سال زراعی ۹۵ بیشترین میانگین عملکرد محصول را در مقایسه با دیگر سال‌های مورد مطالعه، در منطقه مورد نظر دارا می‌باشد. البته واریانس و طیف گسترده مقادیر عملکرد در این سال، حائز اهمیت است. اختلاف عملکرد مزارع در سال ۹۸ با توجه به واریانس مقادیر، نسبت به سال‌های ۹۵ و ۹۶ کمتر بوده و این در حالیست که سال زراعی ۹۶ بدلیل واریانس بالای مقادیر و میانگین پایین



شکل ۶- تصویر Google و نقشه‌های متناظر عملکرد محصول (t/ha) خروجی از مدل، در محیط گوگل ارث انجین برای منطقه ۲، به تفکیک سال

Figure 6. Google imagery with the respective model crop yield maps (t/ha) in Google Earth Engine for region 2, by year

## جدول ۵- جدول آماری مقادیر عملکرد محصول برنج (t/ha) خروجی از مدل، به تفکیک سال برای منطقه ۲

Table 5. Statistics for model paddy yield values (t/ha), by year for region 2

سال	تعداد بیگسل‌ها	mean.	min.	max.	variance.	stdev.
۱۳۹۵	۴۲۱۱	۴/۴۹۸	۰/۶۰۱	۶/۳۷۶	۰/۳۳۰	۰/۵۷۴
۱۳۹۶	۴۲۱۲	۳/۵۸۱	۰/۶۴۷	۶/۰۶۴	۰/۳۳۸	۰/۵۸۱
۱۳۹۸	۴۲۳۸	۳/۸۸۱	۰/۷۵۸	۵/۲۶۱	۰/۱۶۲	۰/۴۰۲

## ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، طراحی و توسعه یک مدل جدید برای پیش‌بینی عملکرد محصول برنج در مقیاس‌های مختلف زمانی (برای فصول رشد با بازه‌های زمانی مختلف) و مکانی (از وضوح ۳۰ متر تا مقیاس‌های منطقه‌ای)، بر اساس ادغام عوامل استرس‌زای محیطی و مدل Monteith و استفاده از سنجش از دور، انجام شد و اجرای آن در پلتفرم GEE نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان داد. مدل فوق در مزارع مختلف برنج که در سطح استان گیلان پراکنده بود، اعتبار سنجی شد. نتایج به‌دست‌آمده، بهره‌گیری از سنجش از دور در محیط GEE را به عنوان ابزاری مفید جهت تخمین عملکرد محصول در مقیاس‌های زمانی و مکانی دلخواه، مورد تأیید قرار داد بطوریکه مدل حاضر می‌تواند در طیف وسیعی از کاربردها مانند مدیریت کشاورزی و بیمه محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین تغییرپذیری مناسب مقادیر عملکرد مدل در مقیاس مزرعه، که عملکرد نسبی مزارع را به خوبی نشان داد، می‌تواند جهت ایجاد تغییرات مداوم مدیریتی یا بهبود مهارت کشاورز، کاهش شکاف عملکردی مزارع و داشتن انتظارات واقع بینانه در این خصوص و همچنین برای شناسایی مناطقی که اختلاف عملکردی پایدار نسبت به دیگر مزارع دارند و شایسته توجه بیشتری هستند، مفید باشد و به توسعه پایدار کشاورزی کمک کند.

همانطور که قبلاً بیان شد، روشهای موجود اغلب به روابط کالیبره شده بین شاخصهای پوشش گیاهی (VIS) و عملکرد که به مکانها و سالهای خاصی اختصاص دارد، متکی هستند و اندازه گیری های جدید میدانی برای هر تنظیم مورد نیاز است. رویکردهای دیگر که مدلهای زراعی اکوفیزیولوژیک را تلفیق می‌کند، می‌تواند

تغییرات مکانی، آب و هوایی و زمانبندی تصاویر را بهتر تطبیق دهد، اما اکثراً به روشهای محاسباتی فشرده‌ای برای استفاده از این داده‌ها نیاز است (بطور مثال خاک منطقه مورد مطالعه و داده روزانه آب و هوا). هم هزینه محاسباتی و هم نیازهای داده‌ای میتوانند مانع مقیاس پذیری رویکرد به چندین منطقه و سال، بدون سرمایه گذاری قابل توجه در زمان و منابع شوند. از همین رو، تحقیق پیش‌رو جهت محاسبه عملکرد محصول برنج، بر جنبه‌های زیر تمرکز دارد که برای انجام آن از قابلیت پلتفرم GEE استفاده شده است: (۱) مدل‌سازی مکانی-زمانی عملکرد در مقیاس موردنظر (۲) ایجاد یک چارچوب عملیاتی برای مدل‌سازی عملکرد محصول و (۳) ادغام داده‌های آب و هوای جهانی و مدل تعادل انرژی SEBAL در مدل Monteith. جهت لحاظ کردن عوامل استرس‌زای غیرزیستی در محاسبات زیست توده محصول. در مقایسه با مدل‌های مشابه تخمین عملکرد محصول مبتنی بر سنجش از دور، نتایج بدست آمده از این تحقیق قابل قبول است. از کارهای مشابه، می‌توان به مدل عملکرد محصول (۲۵) با استفاده از تصاویر سنجنده AVHRR با دقت مکانی ۱٫۱ کیلومتری اشاره کرد که در آن RMSE برای گندم و برنج به ترتیب برابر با ۵۲۵ و ۶۱۶ کیلوگرم در هکتار گزارش شد. مدل عملکرد محصول SCYM (۸) که بر روی مزارع ذرت و سویا با استفاده از تصاویر Landsat 8 انجام گرفت، میانگین ضریب همبستگی (R) برای ذرت و سویا به ترتیب برابر با ۰٫۵۷ و ۰٫۴۷، نتیجه گردید. در مدل شبکه عصبی (۶۹) که جهت پیش‌بینی عملکرد محصول گندم و جو بصورت توأم با تصاویر پهپاد انجام شد، MAE برابر با ۶۲۴/۳ کیلوگرم در هکتار

- Agric. Water Manag. 2000, 46, 137–155.
7. Mahlein, A.K.; Oerke, E.-C.; Steiner, U.; Dehne, H.W. Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *Eur. J. Plant Pathol.* 2012, 133, 197–209.
  8. Lobell DB, Thau D, Seifert C, Engle E, Little B. A scalable satellite-based crop yield mapper. *Remote Sensing of Environment.* 2015 Jul 1;164:324-33.
  9. Lichtenberg E. Agriculture and the environment. *Handbook of agricultural economics.* 2002 Jan 1;2:1249-313.
  10. Khan, A.; Stöckle, C.O.; Nelson, R.L.; Peters, T.; Adam, J.C.; Lamb, B.; Chi, J.; Waldo, S. Estimating Biomass and Yield Using METRIC Evapotranspiration and Simple Growth Algorithms. *Agron. J.* 2019, 111, 536–544.
  11. Asseng, S.; Ewert, F.; Rosenzweig, C.; Jones, J.W.; Hatfield, J.L.; Ruane, A.C.; Boote, K.J.; Thorburn, P.J.; Rötter, R.P.; Cammarano, D.; et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 2013, 3, 827.
  12. Monteith, J. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 1972, 9, 747–766.
  13. Prince SD. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing.* 1991 Jun 1;12(6):1313-30.
  14. Goetz SJ, Prince SD. Modelling terrestrial carbon exchange and storage: evidence and implications of functional convergence in light-use efficiency. In *Advances in ecological research* 1999 Jan 1 (Vol. 28, pp. 57-92). Academic Press.

بدست آمد. همانطور که در بخش کارایی مدل هم بیان شد، عدم قطعیت‌هایی ناشی از داده‌های ورودی که در جدول ۲ ارائه شده است و نیز عدم لحاظ برخی فرآیندها، در این مدل وجود دارد. در صورت اجرایی شدن شیوه پیشنهادی می‌توان با روش‌هایی برای کمتر نمودن این عدم قطعیت‌ها اقدام نمود. به عنوان نمونه، دخیل کردن خسارت ناشی از باران سیل آسا به صورت یک ضریب کاهش در مدل و یا استخراج پارامترهای آب و هوایی از داده‌های ثبت شده سنجنده‌های زمینی، می‌تواند موثر باشد. هر چند مقایسه مقادیر خطای بدست آمده از مدل حاضر با پژوهش‌های مشابه نشان از رضایتبخش بودن آن دارد. همچنین میانگین ضریب همبستگی (R) برابر با ۰/۵۵ بین تخمین‌های مدل و داده‌های زمینی که از طیف گسترده‌ای از مقادیر می‌باشد، حاکی از توجیه‌پذیری استفاده از مدل حاضر جهت تخمین عملکرد محصول استراتژیک برنج است.

## References

1. Okhovat, M., and D. Vakili. "Rice (cultivation, keep, Harvest). Tehran University P." 1996. (In Persian)
2. Lobell DB. The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research.* 2013 Mar 1;143:56-64.
3. Khaki, S.; Wang, L. Crop yield prediction using deep neural networks. *Front. Plant Sci.* 2019, 10, 621.
4. Kross, A.; McNairn, H.; Lapen, D.; Sunohara, M.; Champagne, C. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2015, 34, 235–248.
5. Scharf, P.C.; Lory, J.A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict sidedress nitrogen need. *Agron. J.* 2002, 94, 397–404.
6. Bastiaanssen, W.G.; Molden, D.J.; Makin, I.W. Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications.

22. Becker-Reshef I, Justice C, Sullivan M, Vermote E, Tucker C, Anyamba A, Small J, Pak E, Masuoka E, Schmaltz J, Hansen M. Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: The Global Agriculture Monitoring (GLAM) project. *Remote Sensing*. 2010 Jun 18;2(6):1589-609.
23. MacDonald RB, Hall FG. Global crop forecasting. *Science*. 1980 May 16;208(4445):670-9.
24. Boschetti, M.; Stroppiana, D.; Confalonieri, R.; Brivio, P.A.; Crema, A.; Bocchi, S. Estimation of rice production at regional scale with a Light Use Efficiency model and MODIS time series. *Ital. J. Remote Sens. Riv. Ital. Di Telerilevamento* 2011, 43, 63–81.
25. Bastiaanssen, W.G.; Ali, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2003, 94, 321–340.
26. Clevers JG. A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data. *Remote sensing of Environment*. 1997 Aug 1;61(2):221-8.
27. Lobell DB, Ortiz-Monasterio JI, Asner GP, Naylor RL, Falcon WP. Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape. *Agronomy Journal*. 2005 Jan;97(1):241-9.
28. Moulin S, Bondeau A, Delecalle R. Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing*. 1998 Jan 1;19(6):1021-36.
15. Heinsch FA, Reeves M, Votava P, Kang S, Milesi C, Zhao M, Glassy J, Jolly WM, Loehman R, Bowker CF, Kimball JS. Gpp and npp (mod17a2/a3) products nasa modis land algorithm. MOD17 User's Guide. 2003:1-57.
16. Turner DP, Urbanski S, Bremer D, Wofsy SC, Meyers T, Gower ST, Gregory M. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology*. 2003 Mar;9(3):383-95.
17. Jones, C.A. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development; Texas A&M University Press: College Station, TX, USA, 1986.
18. Williams, J.R.; Jones, C.A.; Dyke, P.T. The EPIC model and its application. In *Proceedings of the International Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer*, Patancheru, India, 21–26 March 1983; pp. 111–121.
19. Jones, J.W.; Hoogenboom, G.; Porter, C.H.; Boote, K.J.; Batchelor, W.D.; Hunt, L.; Wilkens, P.W.; Singh, U.; Gijsman, A.J.; Ritchie, J.T. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 2003, 18, 235–265.
20. Daughtry, C.; Gallo, K.; Goward, S.; Prince, S.; Kustas, W. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sens. Environ.* 1992, 39, 141–152.
21. Kumar, M. Remote Sensing of Crop Growth. In *Plants and the Daylight Spectrum: Proceedings of the First International Symposium of the British Photobiology Society*, Leicester, UK, 5–8 January 1981; Smith, H., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 1981; Volume 1, pp. 133–144.

37. Rochette, P.; Desjardins, R.L.; Pattey, E.; Lessard, R. Crop net carbon dioxide exchange rate and radiation use efficiency in soybean. *Agron. J.* 1995, 87, 22–28.
38. Richards, R.; Townley-Smith, T. Variation in leaf area development and its effect on water use, yield and harvest index of droughted wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 1987, 38, 983–992.
39. Varlet-Grancher, C.B.; Bonhomme, R.; Chartier, M.; Artis, P. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta Oecologica Oecologia Plantarum* 1982, 3, 3–26.
40. Das, D.; Mishra, K.; Kalra, N. Assessing growth and yield of wheat using remotely-sensed canopy temperature and spectral indices. *Int. J. Remote Sens.* 1993, 14, 3081–3092.
41. Bueno CS, Lafarge T. Higher crop performance of rice hybrids than of elite inbreds in the tropics: 1. Hybrids accumulate more biomass during each phenological phase. *Field Crops Research.* 2009 Jun 26;112(2-3):229-37.
42. Calera, A.; González-Piqueras, J.; Melia, J. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* 2004, 25, 97–109.
43. Hatfield, J.; Asrar, G.; Kanemasu, E.T. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote Sens. Environ.* 1984, 14, 65–75.
44. Asrar, G.; Myneni, R.; Choudhury, B. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: A modeling study. *Remote Sens. Environ.* 1992, 41, 85–103.
29. Báez-González AD, Chen PY, Tiscareño-López M, Srinivasan R. Using satellite and field data with crop growth modeling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop science.* 2002 Nov;42(6):1943-9.
30. Shanahan JF, Schepers JS, Francis DD, Varvel GE, Wilhelm WW, Tringe JM, Schlemmer MR, Major DJ. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal.* 2001 May;93(3):583-9.
31. Gallego J, Carfagna E, Baruth B. Accuracy, objectivity and efficiency of remote sensing for agricultural statistics. *Agricultural survey methods.* 2010 Apr 16:193-211.
32. Field, C.B.; Randerson, J.T.; Malmström, C.M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 1995, 51, 74–88.
33. De Oliveira Ferreira Silva, C.; Lilla Manzione, R.; Albuquerque Filho, J.L. Large-Scale Spatial Modeling of Crop Coefficient and Biomass Production in Agroecosystems in Southeast Brazil. *Horticulturae* 2018, 4, 44.
34. Casanova, D.; Epema, G.; Goudriaan, J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crop. Res.* 1998, 55, 83–92.
35. Christensen, S.; Goudriaan, J. Deriving light interception and biomass from spectral reflectance ratio. *Remote Sens. Environ.* 1993, 43, 87–95.
36. Garcia, R.; Kanemasu, E.T.; Blad, B.L.; Bauer, A.; Hatfield, J.L.; Major, D.J.; Reginato, R.J.; Hubbard, K.G. Interception and use efficiency of light in winter wheat under different nitrogen regimes. *Agric. For. Meteorol.* 1988, 44, 175–186.

- Y.; Chen, G.; Dong, W.; Hu, Z. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Sci. Adv.* 2019, 5, eaax1396.
54. Buck AL. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology and Climatology.* 1981 Dec;20(12):1527-32..
55. Stewart, J. Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.* 1988, 43, 19–35.
56. Stewart, J. On the use of the Penman-Monteith equation for determining area évapotranspiration. *Estimation Areal Evapotranspiration* 1987, 3–12.
57. Jarvis, P. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 1976, 273, 593–610.
58. Maidment, D.R. *Handbook of Hydrology*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1993; Volume 9780070.
59. Field CB, Randerson JT, Malmström CM. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote sensing of Environment.* 1995 Jan 1;51(1):74-88.
60. Bastiaanssen WG, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AA. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology.* 1998 Dec 1;212:198-212.
61. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56.* Fao, Rome. 1998;300(9):D05109.
62. Allen R, Irmak A, Trezza R, Hendrickx JM, Bastiaanssen W, Kjaersgaard J.
45. Carlson, T.N.; Ripley, D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sens. Environ.* 1997, 62, 241–252.
46. Gao, Z.; Xie, X.; Gao, W.; Chang, N.-B. Spatial analysis of terrain-impacted Photosynthetic Active Radiation (PAR) using MODIS data. *GIScience Remote Sens.* 2011, 48, 501–521.
47. McCree, K.J. Photosynthetically active radiation. In *Physiological Plant Ecology I*; Springer: Berlin, Germany, 1981; pp. 41–55.
48. Duffie, J.A.; Beckman, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1980.
49. Fletcher, A.L.; Sinclair, T.R.; Allen, L.H., Jr. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered 'slow wilting' and commercial soybean. *Environ. Exp. Bot.* 2007, 61, 145–151.
50. Fuchs, M.; Stanghellini, C. The functional dependence of canopy conductance on water vapor pressure deficit revisited. *Int. J. Biometeorol.* 2018, 62, 1211–1220.
51. Oren, R.; Sperry, J.; Katul, G.; Pataki, D.; Ewers, B.; Phillips, N.; Schäfer, K. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant Cell Environ.* 1999, 22, 1515–1526.
52. Rawson, H.; Begg, J.; Woodward, R. The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of leaves of several plant species. *Planta* 1977, 134, 5–10.
53. Yuan, W.; Zheng, Y.; Piao, S.; Ciais, P.; Lombardozzi, D.; Wang, Y.; Ryu,

- satellite data to improve crop biomass estimation. *IEEE Journal of Selected topics in Applied Earth observations and Remote sensing*. 2016 Oct 18;10(1):104-17.
67. Hedayati A, Vahidnia MH, Behzadi S. Paddy lands detection using Landsat-8 satellite images and object-based classification in Rasht city, Iran. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2022 Feb 1;25(1):73-84.
68. Asmar E, Sadeghi Niaraki A, Abdeh Kolahchi A, Rezaei M. Scrutiny of TRMM Satellite Precipitation Data Efficiency for Evaluation of Rainfall Damages on Gilan's Province Rice Farming. *Journal of Geomatics Science and Technology*. 2019 Sep 10;9(1):57-64. (In Persian)
69. Nevavuori P, Narra N, Lipping T. Crop yield prediction with deep convolutional neural networks. *Computers and electronics in agriculture*. 2019 Aug 1;163:104859.
- Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*. 2011 Dec 30;25(26):4011-27.
63. Waters, R., Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M. & Trezza, R. Surface energy balance algorithms for land, Idaho implementation, advanced training and users manual. NASA USA. 2002.
64. Davatgar, N., et al. Detection and assessment of harmful environmental and managerial factors in paddy fields. 2011. (In Persian)
65. Venancio LP, Mantovani EC, do Amaral CH, Neale CM, Gonçalves IZ, Filgueiras R, Campos I. Forecasting corn yield at the farm level in Brazil based on the FAO-66 approach and soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Agricultural Water Management*. 2019 Nov 20;225:105779.
66. Dong T, Liu J, Qian B, Jing Q, Croft H, Chen J, Wang J, Huffman T, Shang J, Chen P. Deriving maximum light use efficiency from crop growth model and