

## بر آورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور (مطالعه موردی: اراضی منتخب تحت کشت شبکه آبیاری دشت قزوین)

مهدی یونسی<sup>۱</sup>، افشین یوسف گمرکچی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان

<sup>۲</sup> \* استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات،

آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۳

### چکیده

از کاربردهای مهم سنجش از دور در فعالیتهای کشاورزی می توان به برآورد سطح زیر کشت گیاهان زراعی، تهیه نقشه کشت، تعیین عوامل مؤثر بر عملکرد محصول و برآورد آن اشاره کرد. در این راستا، مدل هایی که برای برآورد عملکرد محصول ارائه شده اند عموماً مبتنی هستند بر محاسبه شاخص های پوشش گیاهی که با استفاده از این شاخص ها و با الگوریتمی مشخص میزان محصول برآورد می شود. در این پژوهش، عملکرد محصول کلزا با استفاده از قابلیت های سنجش از دور ماهواره لندست ۸ (سنجنده OLI و TIRS) و سامانه گوگل ارث انجین در اراضی تحت کشت شبکه آبیاری دشت قزوین در فصل زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ بررسی گردید. داده های میدانی از ۱۲ مزرعه تحت کشت کلزا ثبت و اندازه گیری شد. در این زمینه، پس از تصحیح تصویرهای ماهواره لندست ۸ مربوط به دوره رشد، اطلاعات باندهای طیفی آن استخراج و بر اساس مدل باستیانس عملکرد محصول برآورد گردید. نتایج تحلیل ضریب همبستگی پیرسون نشان داد عملکرد محصول همبستگی معنی داری با شاخص سطح برگ در دو مرحله توسعه ای و میانی رشد کلزا دارد که بالاترین میزان همبستگی مرتبط با مرحله میانی رشد محصول با ضریب همبستگی ۰/۸۴۷ بوده است. به سخنی دیگر، طولانی ترین زمان ممکن پیش از برداشت که امکان برآورد دقیق تر عملکرد محصول کلزا با استفاده از قابلیت های سنجش از دور وجود داشته، مرتبط با دوره آغاز گلدهی محصول بوده است. نتایج نشان داد مدل باستیانس در محدوده مورد بررسی، قابلیت برآورد عملکرد محصول کلزا با ضریب تبیین ۰/۹۱ و RMSE برابر با ۰/۶/۴۴۴ کیلوگرم بر هکتار را دارد. در رویکردی کلی، نتایج پژوهش نشان داد مدل های مبتنی بر قابلیت های سنجش از دور امکان برآورد عملکرد محصول را با دقت مناسب دارند.

**واژه های کلیدی:** تصویرهای ماهواره ای، شاخص های پوشش گیاهی، لندست ۸، مدل باستیانس

### مقدمه

امروزه روش های متعددی به منظور برآورد عملکرد محصولات زراعی به کار گرفته می شوند که از آن جمله می توان به روش های مرتبط با سنجش از دور اشاره کرد. محققان در بیشتر مطالعات برآورد عملکرد محصول به علت دسترسی آسان و اقتصادی با قدرت تفکیک میانه (۱۰ تا ۱۰۰ متر)، از داده های طیفی و مکانی سنجش از دور استفاده می کنند. داده های سنجش از دور، برآورد عملکرد گیاه را بر اساس شاخص های گیاهی امکان پذیر می سازد

محصول نیشکر با استفاده از مدل ترکیبی مبتنی بر داده‌ها سنجش از دور و تصویرهای لندست ۸ در مزارع کشت و صنعت حکیم فارابی در نزدیکی اهواز، متوسط عملکرد نیشکر را در دوره رشد ۵۶ تن بر هکتار برآورد کردند که همبستگی خوبی ( $R^2 = 0.83$ ) را با عملکرد واقعی نشان داد. محققان علاوه بر به‌کارگیری مستقیم شاخص‌های پوشش گیاهی، روش‌های دیگری نیز برای تعیین عملکرد محصول به‌کار گرفتند. در این زمینه می‌توان به تحقیق باستیانسن و علی (Bastianssen and Ali, 2003) اشاره کرد. مدل باستیانسن و علی ترکیبی است از مدل مانیتیت برای محاسبه تابش فعال فتوسنتزی جذب‌شده، مدل استنفورد برای تعیین راندمان انرژی جذب‌شده و مدل SEBAL برای توصیف تغییرات مکانی- زمانی تبخیر و تعرق در شرایط رطوبتی زمین. مدل با استفاده از داده‌های زمینی ارزیابی و نشان داده شد ریشه میانگین مربعات خطا برای گندم، برنج و پنبه در حوزه آندیدیوس پاکستان به ترتیب ۵۲۵، ۶۱۶ و ۵۵۱ کیلوگرم بر هکتار بوده است که مناسب بودن مدل را برای برآورد عملکرد گیاه گندم، برنج و پنبه نشان می‌دهد. محققان اختلاف ایجادشده را ناشی از تعدد گیاهان مختلف در یک پیکسل ۱/۱ کیلومتری ماهواره AVHRR می‌دانند. لوبل و همکاران (Lobell et al., 2003) با استفاده از روش سنجش از دور و روش مانیتیت (Monteith, 1972) به برآورد عملکرد محصول سویا در ابعاد منطقه‌ای در مکزیک پرداختند. این محققان با استفاده از تصویرهای MODIS میزان انرژی فعال فتوسنتزی جذب شده توسط گیاه را محاسبه کردند. مقایسه داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های زمینی نشان داد که ضریب تبیین به کمک این روش برابر با ۰/۸ است.

کلزا با سطح زیر کشت تقریبی ۴۰/۶ میلیون هکتار، پس از سویا دومین گیاه دانه روغنی عمده جهان محسوب می‌شود (FAOSTAT, 2021). کلزا منبع اصلی روغن خوراکی انسانی است و بقایای آن غنی از انرژی و پروتئین است و

(Zahirnia and Matinfar, 2016). شاخص‌های پوشش گیاهی مستخرج از تصویرهای ماهواره‌ای از شاخص‌های طیفی هستند که برای تحلیل اطلاعات تصویرهای ماهواره‌ای به‌منظور تعیین ویژگی‌های گیاه همچون تراکم، عملکرد، زمان رسیدگی، نیاز کودی و یا تفکیک محصولات از یکدیگر استفاده می‌شوند. هر یک از این شاخص‌ها با ترکیب باندهای طیفی برای برآورد متغیرهای بیوفیزیکی گیاهی نیز به‌کار می‌روند. اطلاعات باندهای مختلف سنجنده‌ها در قالب شاخص‌های طیفی و نسبت‌های طیفی نقش عمده‌ای در این زمینه ایفا می‌کنند (Loveimi et al., 2019). پیش‌بینی و برآورد عملکرد محصول براساس ایجاد رابطه بین شاخص‌های پوشش گیاهی و عملکرد غلات در تحقیقات مختلف (Rembold et al., 2013; Liaqat et al., 2017; Panek et al., 2020; Panek and Gozdowski, 2021) بررسی شده است.

مطالعات ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2012) در خصوص ارتباط بین شاخص NDVI و عملکرد در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ به کمک تصویرهای MODIS بر دقت پیش‌بینی تاکید دارد. مقدار عملکرد واقعی، عملکرد محاسبه شده و درصد اختلاف این دو برای سال ۲۰۰۸ به ترتیب برابر ۶۰۷/۰ و ۵۹۴/۹ کیلوگرم بر هکتار و ۲- درصد، برای سال ۲۰۰۹ به ترتیب برابر ۵۲۳/۰ و ۴۷۴/۴ کیلوگرم بر هکتار و ۹/۳- درصد و برای سال ۲۰۱۰ به ترتیب برابر ۴۷۹/۴ و ۴۶۰/۸ کیلوگرم بر هکتار و ۳/۹- درصد بوده است. وبر و همکاران (Weber et al., 2012) با پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت تحت رژیم‌های آبیاری متفاوت نشان دادند که بین شاخص‌های طیفی منتج از بازتاب نوری پوشش گیاه و عملکرد محصول ارتباط قوی وجود دارد. آواد (Awad, 2019) در منطقه‌ای در لبنان قابلیت‌های سنجش از دور را به منظور پایش عملکرد محصول سیب‌زمینی بررسی کرد. او با انتخاب الگوریتم متریک (METRIC) در برآورد عملکرد سیب‌زمینی به دقت ۹۶ درصد دست یافت. ولاشجردی و همکاران (Valashjerdi et al., 2019) با مدل‌سازی عملکرد

مؤثر و با صرف کمترین هزینه و زمان ممکن برآورد کند. بدین منظور از مدل باستیانس و علی (Bastianssen and Ali, 2003) استفاده شد. علاوه بر این، تلاش شده است تا طولانی ترین زمان ممکن پیش از برداشت که امکان برآورد مناسب عملکرد محصول را با استفاده از سنجنده OLI در محدوده مورد مطالعه در اختیار خواهد گذاشت، نیز تعیین شود.

### مواد و روش ها

این پژوهش روی مزارع کلزا واقع در اراضی تحت کشت شبکه آبیاری دشت قزوین صورت گرفته است. مشخصات مزارع در جدول ۱ و موقعیت مکانی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است. از ۱۲ مزرعه منتخب اولیه که داده های میدانی مرتبط با آن ثبت و اندازه گیری شده بود، دو مزرعه به دلیل وجود پوشش ابری در هنگام اخذ تصویر ماهواره ای و نیز تعداد کم تصویرهای ماهواره ای در دوره رشد حذف شده است.

دوره رشد کلزا در استان قزوین برای ارقام مختلف کلزا بین ۲۵۰ تا ۲۸۰ روز است و در این دوره ۴ مرحله رشد قابل تشخیص است: مرحله اولیه (از جوانه زنی تا ۵ الی ۸ برگی) به مدت ۱۵۰ تا ۱۶۰ روز؛ مرحله توسعه ای (تا اواخر ساقه دهی) به مدت ۲۰ تا ۲۵ روز؛ مرحله میانی (گلدهی، تشکیل غلاف ها و پرشدن دانه) به مدت ۷۰ تا ۷۵ روز؛ و مرحله پایانی (ادامه پرشدن و رسیدگی دانه) به مدت ۲۰ تا ۲۵ روز (Moayeri, 2019). در پژوهش حاضر، مزارع به نحوی انتخاب شدند که بیشتر شرایط را پوشش دهند، از جمله: بافت خاک، شوری خاک، مدیریت های مختلف زراعی، شوری آب آبیاری و روش های مختلف آبیاری. نکته با اهمیت آن است که به منظور امکان پذیر شدن تحلیل شاخص سطح برگ در فرآیند مدل سازی عملکرد محصول، ارقام کشت شده در همه مزارع منتخب، یکسان بوده است.

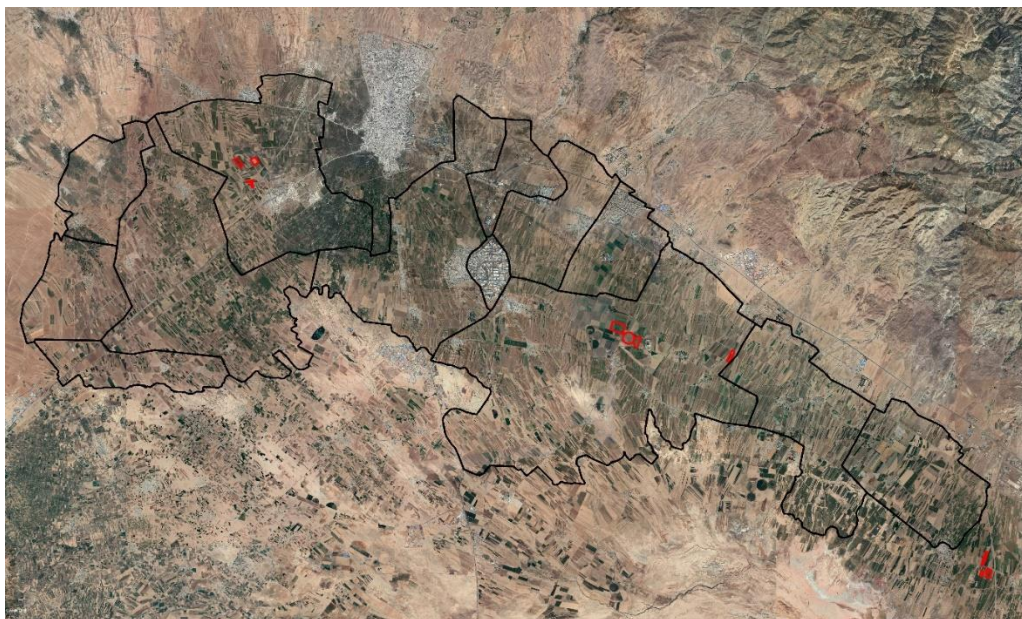
به مصرف خوراک دام می رسد. در ایران، کلزا با سطح زیر کشت تقریبی ۲۱۴/۰۹ هزار هکتار عمده ترین گیاه دانه روغنی محسوب می شود و نقش مهمی در کاهش وابستگی به واردات روغن خوراکی دارد. بر اساس آمار سازمان فائو در سال ۲۰۱۹ میلادی، ایران به لحاظ سطح زیر کشت در بین کشورهای تولید کننده این محصول در رتبه ۲۴ قرار داشته است (FAOSTAT, 2021). استان قزوین به طور متوسط با سطح زیر کشت ۶۰۰۰ هکتار و تولید ۹۰۵۴ تن دانه کلزا در سال زراعی ۹۷-۹۸ رتبه هفتم تولید این محصول در کشور را دارا بوده است (Loveimi et al., 2019). با توجه به اهمیت راهبردی توسعه کشت کلزا در این استان، برآورد عملکرد آن با صرف زمان اندک و هزینه کم، ابزار مناسبی برای مدیران و برنامه ریزان در سیاست گذاری های اقتصادی کشت این محصول است. نتایج بررسی پژوهش ها نشان دهنده آن است که استفاده از روش های سنجش از دور رهیافتی عملی و نسبتاً دقیق برای برآورد عملکرد محصولات مختلف است. بر این اساس، تفاوتی که در بازتاب طیفی عارضه ها وجود دارد می تواند در شناسایی و اندازه گیری آنها به کار رود. بنابراین، مزارع با توجه به شرایط رشد گیاهان رویداده شده در آنها می توانند عملکردهای متفاوتی داشته باشند و این تفاوت عملکرد بازتاب طیفی مزارع مختلف را تحت تأثیر قرار دهد.

در این پژوهش، عملکرد محصول کلزا با استفاده از قابلیت های سنجش از دور و سامانه گوگل ارث انجین در اراضی تحت کشت شبکه آبیاری دشت قزوین در فصل زراعی ۹۹-۱۳۹۸ بررسی شد. هدف اصلی این پژوهش استفاده از مدلی ترکیبی برای برآورد عملکرد محصول کلزا با استفاده از تصویرهای ماهواره ای و داده های زمینی است، مدلی که دارای کمترین داده های ورودی است و بیشتر پارامترهای آن از تصویرهای ماهواره ای قابل استخراج باشد و بتواند عملکرد محصول را با در نظر گرفتن بیشترین عوامل

جدول ۱- مشخصات مزارع منتخب  
Table 1- Specifications of selected farms

| شماره مزرعه<br>Farms No. | تاریخ کاشت<br>Planting Date | تاریخ برداشت<br>Harvesting Date | مساحت مزرعه (هکتار)<br>Farm Area (ha) | بافت خاک (عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر)<br>Soil Texture (Depth 0 to 30 cm) | سیستم آبیاری<br>Irrigation System            | شوری خاک (دسی‌زیمنس بر متر)<br>Soil Salinity (ds/m) | شوری آب آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر)<br>Irrigation Water Salinity (ds/m) | مختصات جغرافیایی (درجه دقیقه ثانیه)<br>Geographical coordinates (D M S) | تعداد تصاویر استفاده شده<br>Number of images used |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|--|---|---|---|---|
| A1                       | 1398/07/01                  | 1399/04/10                      | 15                                    | لوم<br>Loam   | بارانی (لینیر)<br>Sprinkler (Linear)         | 0.63  | 0.31  | 36° 15' 4"<br>49° 54' 15"   | 32  |
| A2                       | 1398/06/15                  | 1399/04/07                      | 60                                    | لوم<br>Loam   | بارانی (لینیر)<br>Sprinkler (Linear)         | 0.76  | 1.10  | 36° 9' 0"<br>50° 10' 40"  | 18  |
| A3                       | 1398/08/03                  | 1399/03/27                      | 2                                     | لوم رسی<br>Clay Loam  | قطره‌ای (تیپ)<br>Drip (Tape)                 | 2.29  | 1.20  | 36° 0' 5"<br>50° 27' 20"  | 14  |
| A4                       | 1398/06/25                  | 1399/03/27                      | 23                                    | لوم رسی<br>Clay Loam  | بارانی (کلاسیک)<br>Sprinkler (Classic)       | 2.29  | 3.20  | 35° 59' 58"<br>50° 27' 25"<br>35° 59' 59"<br>50° 27' 6"                 | 16  |
| A5                       | 1398/06/25                  | 1399/03/27                      | 20                                    | لوم رسی<br>Clay Loam  | جوی و پشته<br>Farrow                         | 2.29  | 3.20  | 36° 0' 33"<br>50° 27' 14"   | 16  |
| A8                       | 1398/06/25                  | 1399/04/05                      | 100                                   | لوم شنی<br>Sandy Loam   | بارانی (سنتریوت)<br>Sprinkler (Center pivot) | 0.76  | 1.30  | 36° 8' 36"<br>50° 11' 10"<br>36° 8' 29"<br>50° 11' 31"                  | 17  |
| A9                       | 1398/07/10                  | 1399/04/10                      | 15                                    | لوم رسی<br>Clay Loam  | جوی و پشته<br>Farrow                         | 0.61  | 0.47  | 36° 15' 1"<br>49° 50' 31"   | 30  |
| A10                      | 1398/07/01                  | 1399/04/12                      | 3.5                                   | لوم<br>Loam   | جوی و پشته<br>Farrow                         | 0.56  | 0.45  | 36° 14' 18.5"<br>49° 54' 3.5"   | 32  |
| A11                      | 1398/07/01                  | 1399/04/12                      | 3.3                                   | لوم<br>Loam   | قطره‌ای (تیپ)<br>Drip (Tape)                 | 0.56  | 0.45  | 36° 14' 10"<br>49° 54' 9"   | 32  |
| A12                      | 1398/06/20                  | 1399/04/07                      | 15                                    | لوم<br>Loam   | جوی و پشته<br>Farrow                         | 1.12  | 1.40  | 36° 7' 57"<br>50° 15' 46"   | 17  |

برآورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور



شکل ۱- موقعیت مزارع مورد مطالعه در سطح شبکه آبیاری دشت قزوین  
 Fig. 1- The location of the studied farms in the Qazvin Plain irrigation network

#### داده های ماهواره ای

محیط سامانه گوگل ارث انجین فراخوانی گردیده و سپس با فراخوانی تصاویر و کدنویسی، عملکرد محصول هر مزرعه محاسبه شده است. با توجه به این امر نیازی به انجام تصحیحات اتمسفری تصاویر نیست. چراکه این سامانه تصاویر تصحیح شده به صورت بازتاب زمینی (Surface reflectance) را در اختیار کاربر قرار می دهد (Wahap and Shafri, 2020).

برای اجرای این پژوهش از تصاویرهای ماهواره لندست ۸ استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۲ اشاره شده است. همچنین از سامانه Google Earth Engine برای انجام تمامی پردازش های تصویری مورد استفاده جهت برآورد تخمین عملکرد محصول استفاده شد. تصاویر مذکور در

جدول ۲- مشخصات ماهواره استفاده شده  
 Table 2- Specifications of the satellite used

| نام ماهواره<br>Satellite Name | نام سنجنده<br>Sensor Name                    | تعداد باندها<br>Numbers of Band | قدرت تفکیک مکانی<br>(متر)<br>Spatial resolution (m) | چرخه تکرار<br>(روز)<br>Repeat cycle (day) | زمان عبور از منطقه<br>(ساعت)<br>Time to cross the region (hour) | زاویه میل<br>(درجه)<br>Inclination Angle (degree) | عرض گذر نواری<br>(کیلومتر)<br>Strip width pass (km) |
|-------------------------------|--|---------------------------------|---|---|---|---|---|
| Landsat 8                     | تصویربردار عملیاتی زمین (OLI <sup>1</sup> )  | 9                               | 15, 30  | 16  | 7:00 – 7:30   | 98.2  | 185   |
|                               | سنسور مادون قرمز حرارتی (TIRS <sup>2</sup> ) | 2                               | 100   |   |   |   |   |

<sup>1</sup> Operational Land Imager

<sup>2</sup> Thermal Infrared Sensor

### مدل برآورد عملکرد

$$B_{act}^{tot} = \sum (\varepsilon_i \times APAR_i) \quad (2)$$

که در آن،  $\varepsilon_i$ : راندمان مصرف نور برای هر تصویر (g/MJ)، و  $APAR_i$ : تابش فعال فتوسنتزی جذب شده برای هر تصویر ( $W/m^2$ ) است. راندمان مصرف نور ( $\varepsilon$ ) از رابطه (۳) قابل محاسبه است (Field *et al.*, 1995).

$$\varepsilon = \varepsilon' \times W \times T_1 \times T_2 \quad (3)$$

که در آن،  $\varepsilon'$ : ضریب راندمان مصرف نور حداکثر (g/MJ) است که در شرایط محیطی بهینه رشد رخ می‌دهد،  $W^5$ : کسر تبخیر،  $T_1$  و  $T_2$  ضریب‌های تأثیرات دما (C) بر ضریب راندمان مصرف نور حداکثر است.  $W$  به معنی نسبت تبخیر و تعرق واقعی به پتانسیل تعریف می‌شود و مقدار آن بین صفر تا ۱ قرار دارد و در بر گیرنده تأثیرات رطوبت خاک بر ضریب راندمان مصرف نور حداکثر است. با این حال حداقل مقدار آن برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (Field *et al.*, 1995).

در این پژوهش، به منظور برآورد عملکرد محصول از یک مدل ترکیبی شامل مدل مانیتیت برای محاسبه تابش فعال فتوسنتزی جذب شده (APAR)، مدل استنفورد برای تعیین راندمان مصرف نور (LUE) و الگوریتم بیلان انرژی سطح (SEBAL) استفاده شد (Bastianssen and Ali, 2003; Awad, 2019). در این زمینه، عملکرد محصول از رابطه (۱) قابل محاسبه است (Bastianssen and Ali, 2003).

$$Y_{act} = \frac{h_{ind} \times B_{act}^{tot}}{1 - m_{oi}} \quad (1)$$

که در آن،  $Y_{act}^1$ : عملکرد واقعی محصول ( $kg/m^2$ )،  $B_{act}^{tot2}$ : زیست توده کل ( $kg/m^2$ )،  $h_{ind}^3$ : شاخص برداشت محصول (%)، و  $m_{oi}^4$ : مقدار رطوبت محصول در زمان برداشت (%). مقدار  $B_{act}^{tot}$  از رابطه (۲) محاسبه شده است (Bastianssen and Ali, 2003).

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای برآورد عملکرد محصول (Zhu *et al.*, 2006; Younesi, 2022)

Table 3- Values of parameters required to estimate crop yield

| نوع کشت<br>Type of cultivation | شاخص برداشت محصول<br>Harvest Index | رطوبت هنگام برداشت محصول<br>Water Content of the Crop During Harvest | راندمان مصرف نور حداکثر (گرم بر مگاژول)<br>Maximum Light Use Efficiency (g/MJ) |
|--------------------------------|------------------------------------|--|--|
| کلزا<br>Rapeseed               | 0.35                               | 0.10   | 0.542  |

$$W = \frac{\lambda ET}{R_n - G} \quad (4)$$

مقدار کسر تبخیر (W) با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی سطح (SEBAL) از رابطه (۴) محاسبه شده است (Bastianssen and Ali, 2003).

<sup>4</sup> Water Content of the Crop During the Harvest

<sup>5</sup> Evaporation Fraction

Actual Yield

<sup>2</sup> Total Actual Biomass

<sup>3</sup> Harvest Index

برآورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور

باتوجه به تغییرات پوشش و رطوبت خاک، مقدار راندمان مصرف نور تغییر می کند، از این رو نیاز به محاسبه شاخص سطح برگ (LAI) خواهد بود. این شاخص برابر با کسری از کل سطح برگ سبز گیاه در واحد سطح افقی زمین تعریف می شود. تاج پوشش، تبخیر و تعرق و فتوسنتز ناخالص مستقیماً با LAI مرتبط هستند زیرا سطوح برگ مرز اصلی تبادل انرژی و جرم را تشکیل می دهند. از این شاخص همچنین برای محاسبه پوشش شاخ و برگ، پیش بینی رشد و عملکرد محصول استفاده می شود (Boegh et al., 2002).

که در آن،  $\lambda ET$ : شار گرمای نهان ( $W/m^2$ )،  $R_n^1$ : شار تابش خالص سطح ( $W/m^2$ )، و  $G^2$ : شار گرمای خاک ( $W/m^2$ ) است.

الگوریتم بیلان انرژی سطح (SEBAL) از دو پیکسل مینا به نام های پیکسل سرد و گرم استفاده می کند که در منطقه مورد نظر قرار دارند. پیکسل سرد پوشش گیاهی کامل دارد و به خوبی آبیاری شده است. دمای سطح زمین و دمای هوای نزدیک به سطح در این پیکسل مشابه فرض می شود. پیکسل گرم به عنوان یک سطح خشک انتخاب می گردد که در آن تبخیر و تعرق صفر در نظر گرفته می شود. مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده به انتخاب دقیق این دو پیکسل وابسته است (Allen et al., 2002).

$$LAI = 3.618 \times \left( 2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1} \right) - 0.118 \quad (5)$$

نیمه خشک، اگر دمای محیط شروع به انحراف از دمای بهینه کند،  $T_2$  راندمان مصرف از نور را کاهش می دهد. ضریب های تأثیرات دما از رابطه های (۶) و (۷) محاسبه می شود (Bastianssen and Ali, 2003; Awad, 2019).

که در آن، LAI: شاخص سطح برگ (بدون بعد)، NIR: باند مادون قرمز نزدیک (باند ۵) ( $\mu m$ )، Red: باند قرمز (باند ۴) ( $\mu m$ )، Blue: باند آبی (باند ۲) ( $\mu m$ ) است.

ضریب  $T_1$  اساساً اثر کاهش مناطق سردتر بر رشد محصول را نشان می دهد، در برابر آن برای مناطق خشک و

$$T_1 = 0.8 + 0.02T_{opt} - 0.0005T_{opt}^2 \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0.2T_{opt} - 10 - T_{mon})} \times \frac{1}{1 + \exp(0.3(-T_{opt} - 10 + T_{mon}))} \quad (7)$$

هواشناسی کشاورزی واقع در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل آباد واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین استفاده شده است.

که در آن،  $T_{opt}^3$ : متوسط دمای هوا در ماهی است که شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده ( $NDVI^4$ ) حداکثر است (C)،  $T_{mon}^5$ : متوسط دمای ماهانه هوا (C) است (جدول ۴). در این پژوهش، از داده های ایستگاه

<sup>4</sup> Normalized Difference Vegetation Index

<sup>5</sup> Mean Monthly Air Temperature

<sup>1</sup> Net Surface Radiation

<sup>2</sup> Soil Heat Flux

<sup>3</sup> Optimum Mean Monthly Air Temperature

جدول ۴- مقادیر آماری دمای روزانه هوا (درجه سلسیوس) در ایستگاه هواشناسی کشاورزی اسماعیل آباد

Table 4- Statistical values of daily air temperature (degrees Celsius) in Ismailabad agricultural meteorological station

| ماه<br>Month   | حداقل<br>Min | میانگین<br>Mean | حداکثر<br>Max | انحراف معیار<br>STDEV |
|----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| September 2019 | 18.25        | 21.96           | 27.10         | 2.31                  |
| October 2019   | 11.05        | 16.92           | 21.65         | 3.29                  |
| November 2019  | -0.25        | 7.93            | 13.10         | 3.18                  |
| December 2019  | 3.45         | 5.51            | 10.00         | 1.42                  |
| January 2020   | -2.55        | 1.21            | 3.75          | 1.47                  |
| February 2020  | -7.35        | 3.79            | 11.40         | 4.17                  |
| March 2020     | 3.25         | 8.77            | 12.90         | 2.35                  |
| April 2020     | 1.65         | 13.78           | 23.90         | 6.69                  |
| May 2020       | 18.80        | 23.07           | 27.55         | 2.37                  |
| June 2020      | 19.20        | 24.52           | 27.85         | 2.59                  |

که NIR: باند مادون قرمز نزدیک (باند ۵) ( $\mu\text{m}$ )، Red: باند قرمز (باند ۴) است.

$K_{24}^{\downarrow}$ : کسری از تابش انرژی ورودی خورشید ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) است. تابش فعال فتوسنتزی ( $0.7-0.4 \mu\text{m}$ ) قسمتی از طول موج کوتاه ورودی ( $0.3-3 \mu\text{m}$ ) یا همان شار تابش خورشید است که توسط کلروفیل برای فتوسنتز در گیاهان جذب می‌شود. نسبت ( $\text{PAR}/K_{24}^{\downarrow}$ ) در طول شبانه روز بین  $0.45$  تا  $0.5$  است که معمولاً  $0.48$  در نظر گرفته می‌شود (Moran *et al.*, 1995; Awad, 2019). انرژی خورشیدی دریافتی توسط سطح زمین می‌تواند از موقعیت جغرافیایی ایستگاه هواشناسی و با استفاده از انرژی تابش خورشید بالای جو (تابش فرازمینی) در طول شبانه‌روز، حداکثر تعداد ساعات روز و تعداد ساعات واقعی آفتابی براساس رابطه (۱۲) محاسبه شود (Bastianssen and Ali, 2003).

$$K_{24}^{\downarrow} = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N}\right) R_a \quad (12)$$

که در آن،  $n/N$ : نسبت ساعات واقعی آفتاب به حداکثر ساعات ممکن (بدون بعد) ( $R_a^2$ : جدول ۵) تابش برون زمینی ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}$ ) است (Alizadeh, 2014)، برای

مقدار تابش فعال فتوسنتزی جذب شده (APAR) از رابطه (۸) محاسبه شده است (Bastianssen and Ali, 2003; Awad, 2019).

$$APAR = f \times PAR \quad (8)$$

که در آن،  $f$ : شاخص فعالیت فتوسنتزی کلروفیل (بدون بعد)،  $PAR^1$ : تابش فعال فتوسنتزی ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) است که با استفاده از رابطه‌های (۹) و (۱۰) قابل محاسبه است (Monteith, 1972; Bastianssen and Ali, 2003; Awad, 2019).

$$f = -0.161 + 1.257 NDVI \quad (9)$$

$$PAR = 0.48 \times K_{24}^{\downarrow} \quad (10)$$

که در آن، NDVI: شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (بدون بعد) است که بر اساس رابطه ۱۱ محاسبه شده است (Rouse *et al.*, 1973).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (11)$$

<sup>2</sup> Extraterrestrial Radiation

<sup>1</sup> Photosynthetically Active Radiation



برآورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور

تبدیل واحد (MJ m<sup>-2</sup> day) به (W/m<sup>2</sup>) می توان از ضرب کردن مقدار ۱۱/۵۷۴۱ در K<sub>24</sub><sup>۱</sup> استفاده کرد.

جدول ۵- مقادیر ماهانه نسبت ساعات واقعی به حداکثر آفتاب در منطقه (Younesi *et al.*, 2022)  
Table 5- Monthly values of the ratio of real hours to maximum sunshine in the region

| ماه         | نسبت ساعات واقعی به حداکثر | ماه    | نسبت ساعات واقعی به حداکثر |
|-------------|----------------------------|--------|----------------------------|
| Month       | n/N                        | Month  | n/N                        |
| فروردین     | 0.53                       | مهر    | 0.78                       |
| Farvardin   |                            | Mehr   |                            |
| اردیبهشت    | 0.60                       | آبان   | 0.66                       |
| Ordibehesht |                            | Aban   |                            |
| خرداد       | 0.72                       | آذر    | 0.49                       |
| Khordad     |                            | Azar   |                            |
| تیر         | 0.82                       | دی     | 0.42                       |
| Tir         |                            | Dey    |                            |
| مرداد       | 0.86                       | بهمن   | 0.46                       |
| Mordad      |                            | Bahman |                            |
| شهریور      | 0.85                       | اسفند  | 0.59                       |
| Shahrivar   |                            | Esfand |                            |

در مراحل مختلف رشد استفاده شده است. به منظور ارزیابی نتایج تخمین عملکرد محصول و عملکرد واقعی ثبت شده نیز از ضریب تبیین بین داده ها (R<sup>2</sup>)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE<sup>1</sup>)، میانگین خطای سوگیری (MBE<sup>2</sup>) و میانگین خطای مطلق (MAE<sup>3</sup>) استفاده شده است.

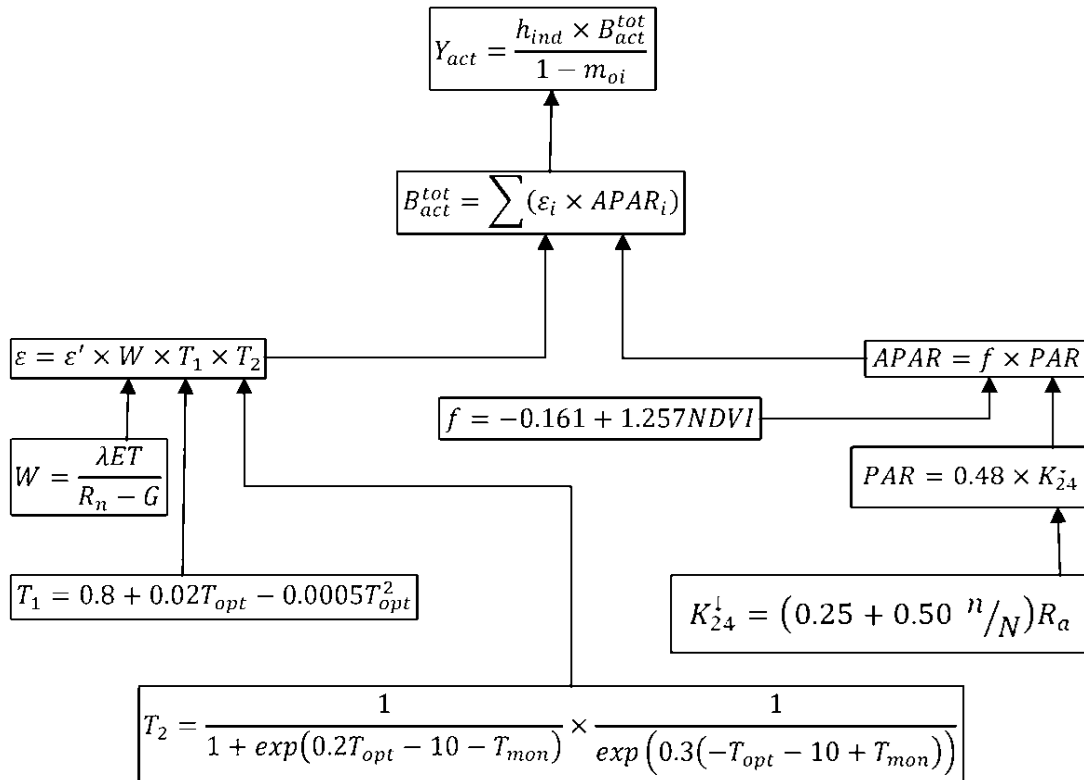
در شکل ۲ روندنمای محاسبات برآورد عملکرد محصول به روش باستیانس نشان داده شده است.

در این پژوهش به منظور ارزیابی کارایی مدل در پیش-بینی عملکرد محصول از ضریب همبستگی پیرسون بین داده ها برای تحلیل همبستگی عملکرد و شاخص سطح برگ

<sup>3</sup> Mean Absolute Error

<sup>1</sup> Root Mean Square Error

<sup>2</sup> Mean Bias Error



شکل ۲- روندنمای محاسبات برآورد عملکرد محصول به روش باستیانس  
 Fig. 2- Calculation process of estimating crop yield by Bastiaansen method

### داده‌های هواشناسی

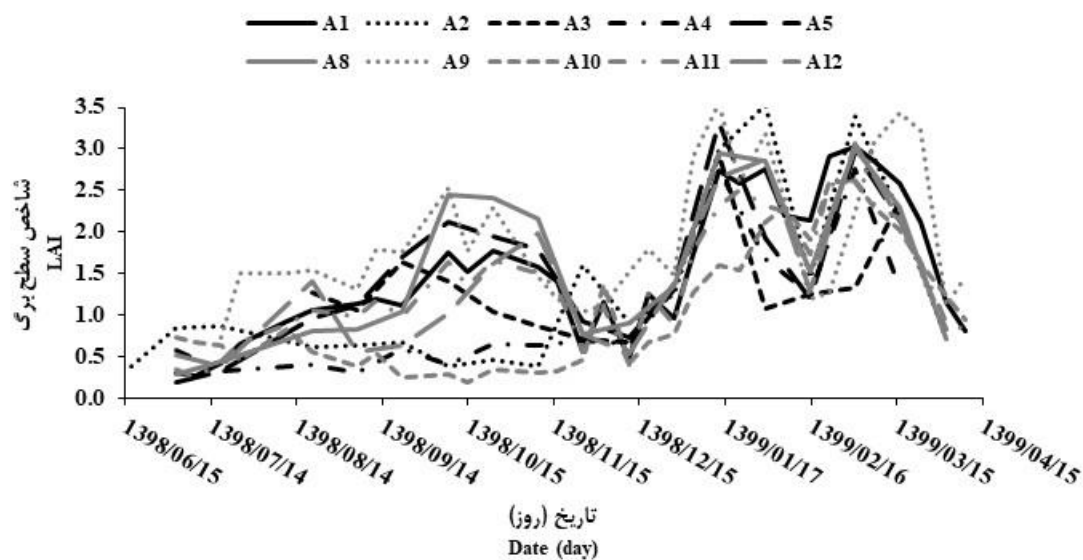
در این پژوهش، داده‌های هواشناسی مورد نیاز در فرآیند مدل‌سازی عملکرد از جمله دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، دمای سطح خاک و تابش خورشیدی بر اساس اطلاعات ثبت شده در ایستگاه هواشناسی کشاورزی اسماعیل‌آباد، با مختصات مکانی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ۴۹ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی، استفاده گردید.

### نتایج

عامل اثرگذار در مدل تخمین عملکرد محصول به روش باستیانس، برآورد شاخص سطح برگ (LAI) است و از این

رو در مرحله اول پس از استخراج اطلاعات باندهای طیفی مزارع، شاخص سطح برگ (LAI) در دوره رشد محاسبه گردید. در شکل ۳، روند تغییرات شاخص سطح برگ مزارع منتخب نشان داده شده است. نکته مهم آن است که در پژوهش حاضر اقلیم منطقه، عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا تقریباً در مزارع مورد بررسی یکسان است و همان‌گونه که اشاره گردید ارقام کشت شده در مزارع مورد بررسی نیز یکسان بوده‌اند، از این رو با توجه به تغییرات شاخص سطح برگ می‌توان نتیجه گرفت تاریخ کشت یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در روند رشد فنولوژیک گیاهی و به تبع آن تفاوت عملکرد محصول در مزارع بوده است.

برآورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور



شکل ۳- نمودار توزیع زمانی شاخص سطح برگ در مزارع مورد مطالعه

Fig. 3- Time distribution diagram of LAI in the studied farms

با توجه به پایش میدانی مزارع، در جدول ۶ تغییرات طول دوره زمانی مراحل فنولوژیک رشد کلزا در مزارع منتخب نشان داده شده است.

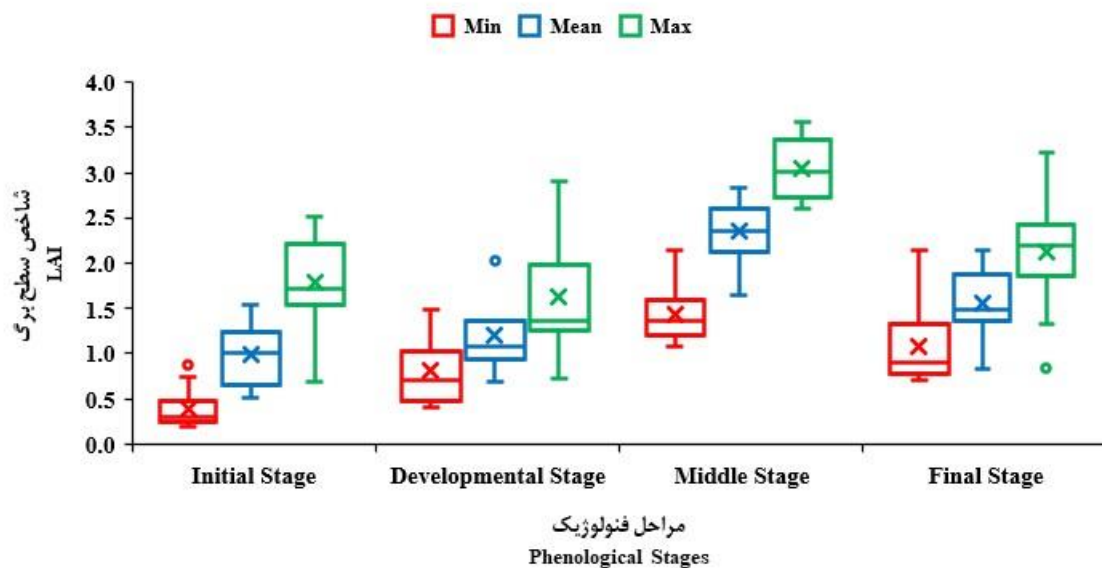
جدول ۶- طول دوره مراحل فنولوژیک رشد کلزا در مزارع منتخب (روز)

Table 6- The length of the phenological stages of rapeseed growth in selected fields (days)

| شماره مزرعه<br>Farms No. | مرحله اولیه<br>Initial Stage | مرحله توسعه ای<br>Developmental stage | مرحله میانی<br>Middle Stage | مرحله پایانی<br>Final Stage |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| A1                       | 152                          | 32                                    | 64                          | 33                          |
| A2                       | 162                          | 32                                    | 64                          | 27                          |
| A3                       | 97                           | 32                                    | 64                          | 42                          |
| A4                       | 152                          | 32                                    | 64                          | 26                          |
| A5                       | 152                          | 32                                    | 64                          | 26                          |
| A8                       | 152                          | 32                                    | 64                          | 35                          |
| A9                       | 152                          | 23                                    | 73                          | 24                          |
| A10                      | 152                          | 32                                    | 64                          | 35                          |
| A11                      | 152                          | 32                                    | 64                          | 35                          |
| A12                      | 163                          | 32                                    | 76                          | 21                          |
| حداقل (Min)              | 97                           | 23                                    | 64                          | 21                          |
| میانگین (Mean)           | 149                          | 31                                    | 66                          | 30                          |
| حداکثر (Max)             | 163                          | 32                                    | 76                          | 42                          |
| انحراف معیار (STDEV)     | 18.65                        | 2.85                                  | 4.48                        | 6.54                        |

شاخص سطح برگ آن افزایش داشته است. در مرحله میانی شاخص سطح برگ تغییرات کمتری داشته و در سطح مزارع به حداکثر مقدار خود رسیده است. به عبارت دیگر، بالاترین شاخص سطح برگ در محصول کلزا در ابتدای مرحله گلدهی حادث شده است. افزایش گلبرگ‌ها در گیاه کلزا در دوران گلدهی تراکم پوشش گیاه را افزایش می‌دهد اما این به مفهوم افزایش سطح سبز (کلروفیل) گیاه نیست و از این رو با افزایش شاخص سطح برگ کلزا در این دوره باید با احتیاط برخورد کرد. در مرحله بعدی رشد، به دلیل آنکه کلزا گل‌های خود را از دست داده و گیاه به پرکردن غلاف‌های خود می‌پردازد، شاخص سطح برگ کاهش قابل توجهی داشته است. بعد از پر شدن غلاف‌ها، گیاه در مرحله پایانی به رنگ قهوه‌ای درآمده و شاخص سطح برگ آن رو به کاهش نهاده است.

در شکل ۴، نمودار Box Plot تغییرات شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد کلزا در مزارع منتخب نشان داده شده است. تغییرات شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد نشان دهنده آن است که مقدار این شاخص در اوایل فصل رشد کم است. روند کند سرعت رشد محصول در این مرحله به دلیل کامل نبودن پوشش گیاهی و پایین بودن درصد جذب نور بوده است. بیشترین میزان تغییرات شاخص سطح برگ در مرحله توسعه‌ای رشد کلزا رخ داده است. به عبارتی، بیشترین تاثیر عواملی همچون تاریخ کشت، کیفیت و کمیت آب آبیاری، شوری خاک در مرحله توسعه‌ای رشد کلزا بوده است. این امر باعث شده شاخص سطح برگ در مرحله توسعه‌ای رشد نیز تغییرات زیادی در مزارع منتخب داشته باشد. طول این دوره رشد بر اساس پایش میدانی در مزارع منتخب بین ۲۳ تا ۳۲ روز بوده است. در مرحله میانی رشد، گیاه شروع به گلدهی کرده و مقدار



شکل ۴- نمودار Box Plot تغییرات شاخص سطح برگ در مراحل فنولوژیک کلزا در مزارع منتخب

Fig. 4- Box Plot diagram of leaf surface index changes in phenological stages of rapeseed in selected farms

عملکرد پتانسیل محصول کلزا در شبکه آبیاری دشت قزوین ۴۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار برآورد شده است (Uossef, Gomrokchi, 2021) بر این اساس هیچ یک از مزارع به حداکثر شاخص سطح برگ نرسیده است و با توجه به

نکته بااهمیت آن است که اگر حداکثر شاخص سطح برگ در مرحله گلدهی کمتر از ۴ باشد، می‌توان گفت رشد و عملکرد گیاه در اثر کمبود سطح برگ محدود شده است (Zamani-Noor and Feistkorn, 2022). با توجه به آنکه

برآورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور

عملکرد و شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد کلزا در (جدول ۷) نشان داده شده است. نتایج تحلیل ضریب همبستگی پیرسون نشان داد عملکرد محصول همبستگی معنی داری با شاخص سطح برگ در دو مرحله توسعه ای و میانی رشد کلزا داشته که بالاترین میزان همبستگی مرتبط با مرحله میانی رشد محصول بوده است.

اثرگذاری مستقیم شاخص سطح برگ در مرحله گلدهی بر عملکرد محصول، حداکثر پتانسیل عملکرد در مزارع منتخب حاصل نشده است. از این رو می توان گفت شاخص سطح برگ در مرحله گلدهی معیار مناسبی برای برآورد کاهش عملکرد محصول کلزا محسوب می شود. با توجه به پایش عملکرد محصول در مزارع منتخب، ضریب همبستگی

جدول ۷- معیارهای آماری برازش عملکرد محصول با شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد  
Table 7- Statistical criteria of crop yield fit with leaf area index in different stages of growth

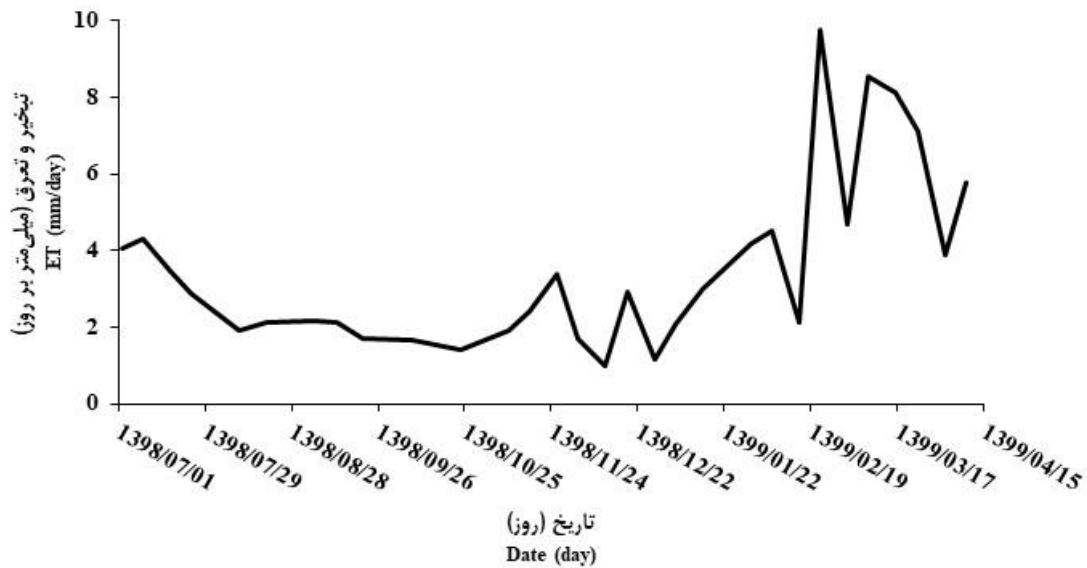
| مرحله<br>Stage                        | میانگین<br>Mean | انحراف معیار<br>STDEV | واریانس<br>Variance | Pearson Correlation | Sig. (2-tailed) | N  |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------|----|
| مرحله اولیه<br>Initial Stage          | 0.99            | 0.44                  | 0.10                | 0.612 <sup>ns</sup> | 0.060           | 10 |
| مرحله توسعه ای<br>Developmental stage | 1.38            | 0.42                  | 0.43                | 0.750*              | 0.013           | 10 |
| مرحله میانی<br>Middle Stage           | 2.31            | 0.61                  | 0.10                | 0.847**             | 0.002           | 10 |
| مرحله پایانی<br>Final Stage           | 1.56            | 0.46                  | 0.12                | 0.618 <sup>ns</sup> | 0.057           | 10 |

\*\*، \* و ns به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و نبود معنی داری

مرحله اوج گلدهی بیشترین همبستگی با عملکرد کلزا وجود داشته است.

در گام بعد، از شاخص های پوشش گیاهی NDVI و LAI در دوره رشد محصول برای برآورد تبخیر و تعرق گیاهی در الگوریتم سبال استفاده گردید. در شکل ۵، توزیع زمانی تبخیر و تعرق واقعی گیاه در دوره های ۱۶ روزه با استفاده از تصویرهای ماهواره لندست ۸ در یک مزرعه مورد بررسی نشان داده شده است. به طوری که حداکثر میزان تبخیر و تعرق روزانه در این مزرعه، در اردیبهشت ماه، ۹/۳ میلی متر بر روز بوده است.

در محصولات زراعی مانند گندم، حداکثر همبستگی شاخص پوشش گیاهی و عملکرد در مرحله سبزیبندی و در شرایط اوج تراکم محصول از نظر زیست توده و حجم بوته رخ می دهد (Ghorbani et al., 2021). در حالی که کلزا، برعکس اکثر محصولات زراعی، دو پوشش گیاهی متفاوت (سبز و زرد رنگ) دارد که این دو پوشش گیاهی (مرحله اوج گلدهی و نیز رسیدگی سبز کلزا) در مراحل مختلف رشد ظهور خواهند داشت. بنابراین، بیشترین ضریب تبیین عملکرد با مرحله اوج گلدهی محصول (مرحله میانی رشد) بوده است (Loveimi et al., 2019)، مطالعات سولیک و یانگ (Sulik and Long, 2016)، نیز نشان می دهد در



شکل ۵- نمودار توزیع زمانی تبخیر و تعرق محاسبه شده مزرعه A1 با الگوریتم سبال  
 Fig. 5- Time distribution diagram of evapotranspiration calculated of farm A1 with SEBAL algorithm

در (جدول ۸)، به مقادیر تبخیر و تعرق واقعی محاسباتی سبال برای تبدیل تبخیر و تعرق لحظه‌ای به روزانه باید به روش سبال در مراحل مختلف دوره رشد فنولوژیک کلزا در مزارع منتخب اشاره شده است. در مرحله پایانی الگوریتم مانتیث-فائو استفاده شده است. مقدار تبخیر و تعرق مرجع استفاده شود که از معادله پنمن-مانتیث-فائو استفاده شده است.

جدول ۸- تبخیر و تعرق واقعی محاسباتی به روش سبال در مراحل دوره رشد در مزارع منتخب  
 Table 8- Actual evapotranspiration calculated by the SEBAL method in the stages of the growth period in selected farms

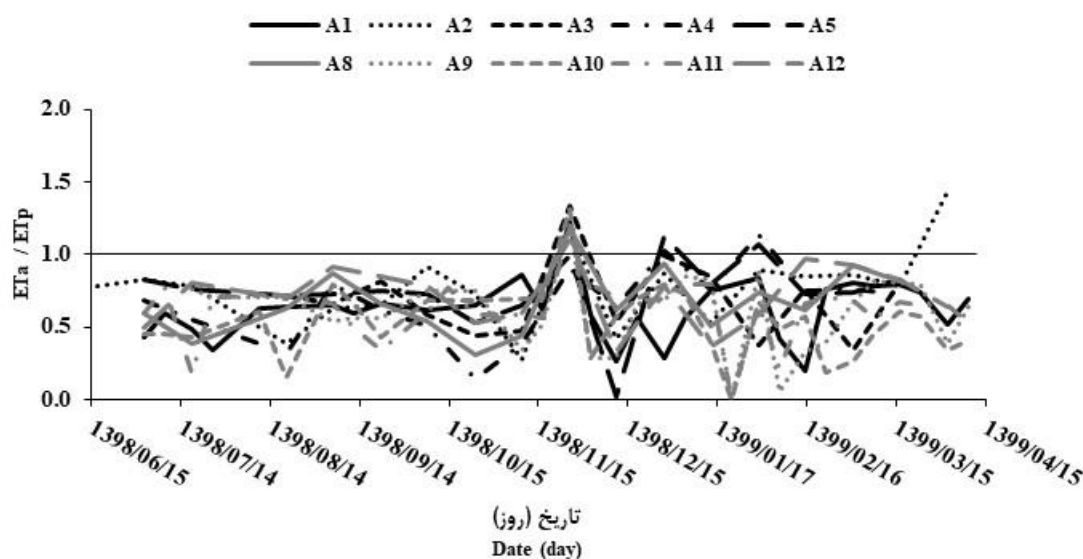
| شماره مزرعه<br>Farms No. | تبخیر و تعرق واقعی<br>(میلی‌متر)<br>Actual Evapotranspiration (mm) |                                       |                             |                             |
|--------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                          | مرحله اولیه<br>Initial Stage                                       | مرحله توسعه‌ای<br>Developmental stage | مرحله میانی<br>Middle Stage | مرحله پایانی<br>Final Stage |
|                          | A1   | 375.59                                | 60.07                       | 329.96                      |
| A2                       | 643.27   | 83.10                                 | 328.65                      | 180.95                      |
| A3                       | 202.92   | 92.23                                 | 279.66                      | 113.84                      |
| A4                       | 446.55   | 105.98                                | 338.29                      | 74.19                       |
| A5                       | 585.59   | 74.72                                 | 327.88                      | 84.27                       |
| A8                       | 431.19   | 99.54                                 | 282.04                      | 159.43                      |
| A9                       | 442.05   | 78.45                                 | 293.74                      | 94.49                       |
| A10                      | 389.20   | 94.39                                 | 200.92                      | 121.34                      |
| A11                      | 414.75   | 96.64                                 | 278.68                      | 152.03                      |
| A12                      | 583.95   | 74.69                                 | 433.74                      | 23.84                       |

در برآوردهای تبخیر و تعرق ممکن است مقدار جزء تبخیر و تعرق (ET<sub>TrF</sub>) که در روش سبال استفاده می‌شود با خطای محاسباتی همراه باشد. این خطا می‌تواند ناشی از خطای در برآورد دما در هر پیکسل باشد که به دلیل تأثیر

برآورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور

عبارتی، در مزارع مورد بررسی با رسیدن به مراحل رشد نهایی محصول، مقادیر محاسباتی تبخیر و تعرق به روش سبال خطای تخمین کمتری داشته است. در یک رویکرد کلی و با توجه به مبانی محاسباتی معادله پنمن-مانتیت-فائو و روش سبال، این نتایج نشان می‌دهد در زمانی که شاخص پوشش گیاهی در شرایط نزدیک به استاندارد فائو ۵۶ بوده، مقادیر محاسباتی تبخیر و تعرق به روش سبال با روش پنمن-مانتیت-فائو اختلاف کمتری داشته است. از سوی دیگر، باید توجه داشت میزان تبخیر و تعرق استاندارد با روش فائو ۵۶ همواره تبخیر و تعرق واقعی محصول را ارائه نمی‌دهد زیرا ممکن است عواملی مانند تنش آبی و شوری منجر به کاهش میزان تبخیر و تعرق محصول شود (Zare khormizi, 2021).

رادیومتری پیکسل‌های مجاور است. این عامل می‌تواند به-عنوان بخش عمده‌ای از اختلافات بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده باشد (Marofi et al., 2017). از این‌رو، نسبت تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال به تبخیر و تعرق پتانسیل به روش پنمن-مانتیت-فائو در مراحل مختلف رشد بررسی گردید (شکل ۶). بر این اساس، بیشترین مقدار بیش‌برآورد در مزارع منتخب در مرحله توسعه‌ای است. با این حال در بعضی از مزارع در مرحله میانی و پایانی نیز بیش‌برآورد رخ داده که حداکثر مقدار خطا برابر با ۰/۳۱ است. این در حالی است که نسبت تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال به تبخیر و تعرق پتانسیل به روش پنمن-مانتیت-فائو در مراحل اولیه رشد به دلیل خطای تخمین شاخص پوشش گیاهی، کمتر از ۱ است و در مراحل رشد نهایی محصول، این نسبت به ۱ نزدیک بوده است. به

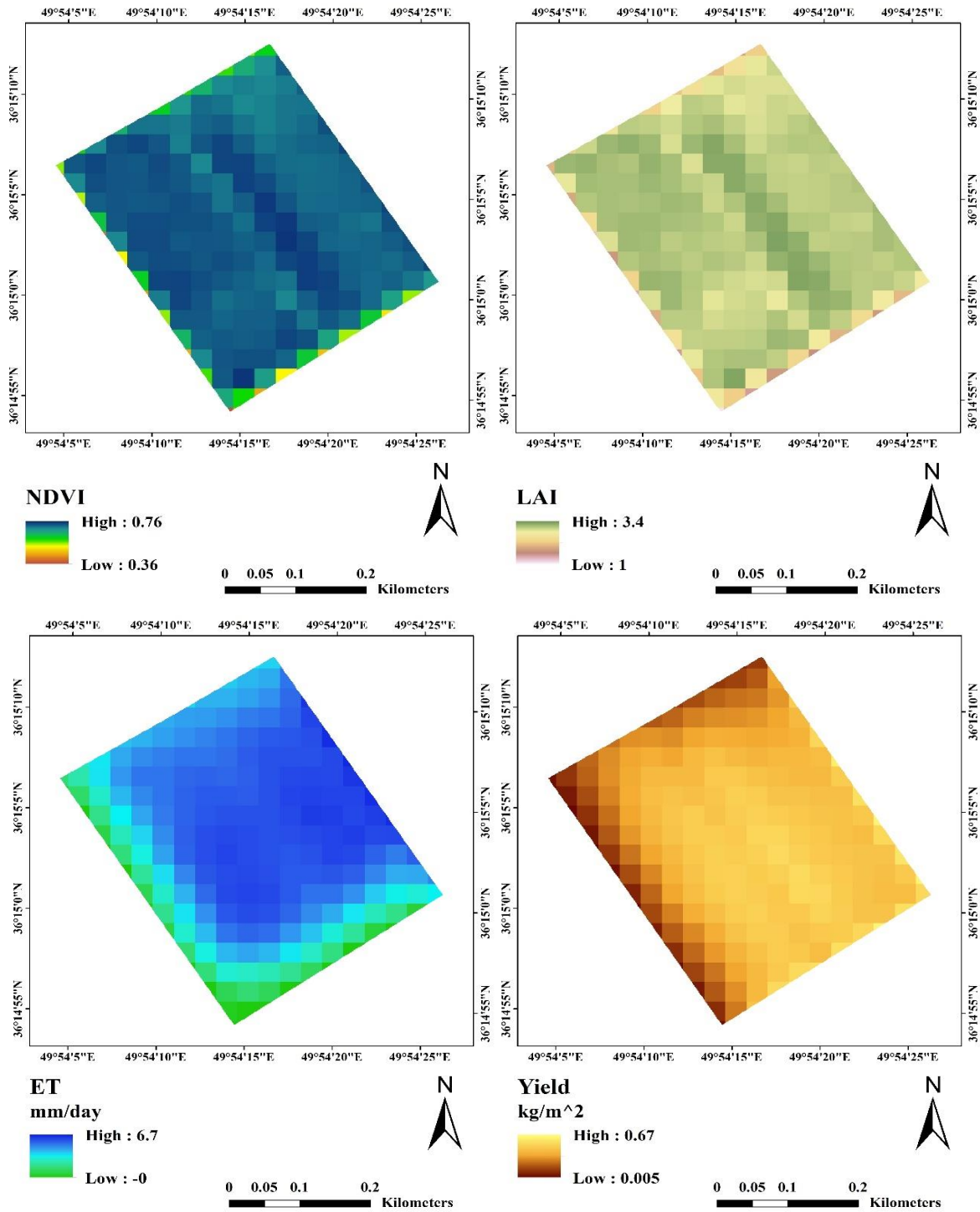


شکل ۶- نمودار نسبت تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال به تبخیر و تعرق پتانسیل به روش پنمن-مانتیت-فائو

Fig. 6- Diagram of the ratio of actual evapotranspiration by the SEBAL method to potential evapotranspiration by the FAO-PM method

شکل ۷ نمونه‌ای از نقشه‌های محاسباتی برای برآورد عملکرد محصول نشان داده شده است. در شکل ۸ نیز نمودار تغییرات زیست توده در مزارع منتخب در دوره رشد نشان داده شده است.

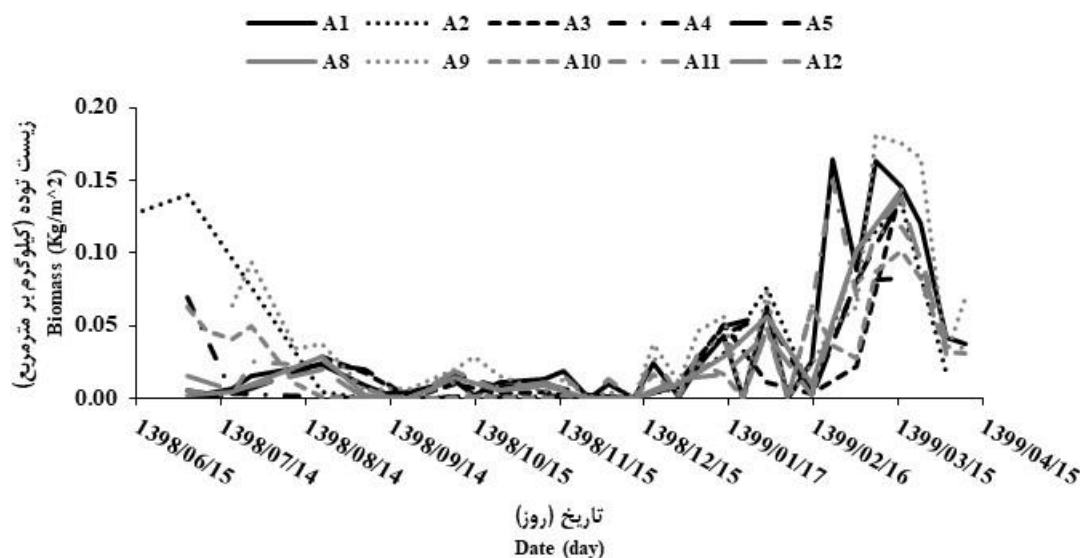
پس از محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق به روش سبال، مقدار زیست توده برای هر تصویر ماهواره‌ای بر اساس رابطه ۲ محاسبه شد که با جمع آن‌ها مقدار زیست توده کل و پس از آن مقدار عملکرد محصول محاسبه شده است. در



شکل ۷- نمونه‌ای از نقشه‌های محاسباتی (مزرعه A1)  
 Fig. 7- Example of computational maps (farm A1)



برآورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور



شکل ۸- تغییرات مقادیر زیست توده در مزارع منتخب  
Fig. 8- Biomass values Changes in selected farms

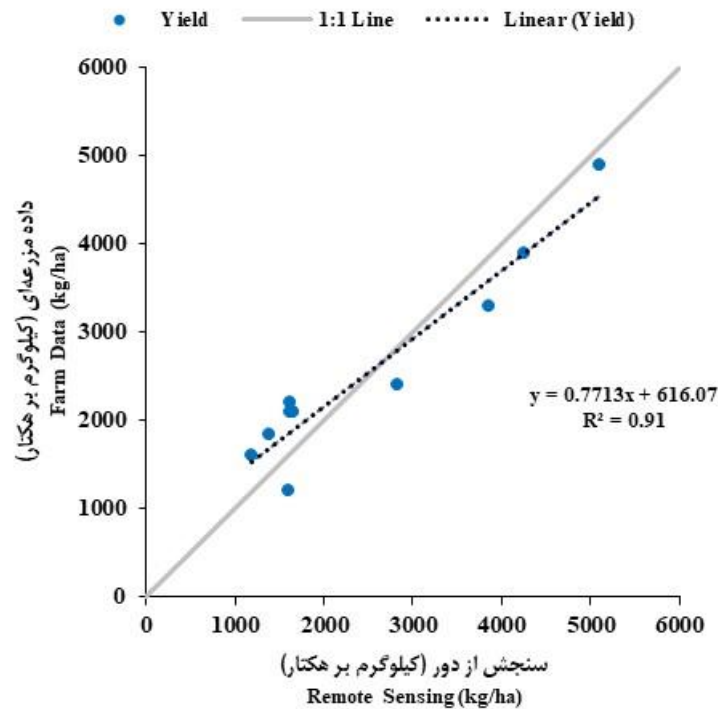
در جدول ۹ مقادیر برآوردی عملکرد بر اساس روش باستیانسن در مزارع منتخب نشان داده شده است.

جدول ۹- مقادیر برآورد عملکرد به روش باستیانسن در مزارع منتخب  
Table 9- Yield estimation values by Bastiansen's method in selected farms

| شماره مزرعه | تبخیر و تعرق محاسباتی بر اساس روش SEBAL (مترمکب بر هکتار)                   | عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار) | برآورد عملکرد بر اساس روش باستیانسن (کیلوگرم بر هکتار) |
|-------------|---|---------------------------------|--|
| Farms No.   | Computational Evapotranspiration based on SEBAL method (m <sup>3</sup> /ha) | Crop Yield (kg/ha)              | Yield Estimation based on Bastiansen's Method (kg/ha)  |
| A1          | 9196.54   | 3900                            | 4263.8   |
| A2          | 12359.74  | 2400                            | 2826.9   |
| A3          | 6886.47   | 1600                            | 1188.7   |
| A4          | 9650.15   | 1850                            | 1386.4   |
| A5          | 10724.67  | 2200                            | 1626.6   |
| A8          | 9722.04   | 2100                            | 1613.4   |
| A9          | 9087.30   | 4900                            | 5109.5   |
| A10         | 8058.34   | 1200                            | 1596.4   |
| A11         | 9421.09   | 3300                            | 3862.1   |
| A12         | 11162.19  | 2100                            | 1663.3   |

(MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE) به ترتیب برابر ۴۳۳/۰۳، ۴۱/۲۳، ۴۴۴/۰۶ کیلوگرم بر هکتار بوده است. در شکل ۹ نمودار برازش عملکرد محصول داده های مزرعه ای و سنجش از دور نشان داده شده است.

نتایج تحلیل ضریب همبستگی پیرسون نشان داد همبستگی معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد بین داده های ثبت شده مزرعه ای و مقادیر برآورد عملکرد وجود داشته است. مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) برابر با ۰/۹۱ و ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای سوگیری



شکل ۹- نمودار برازش عملکرد محصول داده‌های مزرعه‌ای و سنجش از دور  
Fig. 9- Crop yield fit plot of field data and remote sensing

شاخص سطح برگ در مرحله گلدهی کلزا معیاری مناسب برای برآورد خلأ عملکرد محصول کلزا محسوب می‌شود. این توانمندی، علاوه بر فراهم آوردن امکان پیش‌بینی عملکرد و میزان درآمد از واحد سطح، قابلیت‌هایی را در اختیار برنامه‌ریزان خواهد گذاشت که در صورت پایش عملکرد در مقیاس ناحیه‌ای یا منطقه‌ای و دسترسی به‌هنگام به داده‌های میدانی، در برنامه‌ریزی کلان حوزه کشاورزی، منابع آب و بیمه محصولات کشاورزی بسیار تأثیرگذار خواهد بود. نکته مهم در بررسی مدل‌های تخمین عملکرد محصول بیانگر آن است که دقت پیش‌بینی عملکرد محصولات با تصویرهای ماهواره‌ای هنوز به‌طور متوسط گزارش شده است (Pratt, 2013; Roznik et al, 2022). در این خصوص، افزون بر مسئله دقت اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، موضوع مهم‌تر میزان پایین تفکیک مکانی سنجنده‌ها و وجود ابر، مه، گاز و ذرات معلق در کنار عامل پیچیدگی‌های مربوط به روند رشد و باردهی گیاهان و فاکتورهای محیطی متغیر دخیل در آن است. همه این موارد در کاهش دقت پیش‌بینی عملکرد و

## بحث و نتیجه‌گیری

عوامل کمی متعددی در عملکرد محصول مؤثر هستند، اما مدل‌سازی با ساده‌سازی روابط علی و معلولی حاکم بر هر پدیده، روابط متقابل بین متغیرهای مستقل و وابسته را با صرف کمترین زمان و هزینه توجیه می‌کند. نتایج پژوهش در برآورد عملکرد با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی، الگوریتم‌های تبخیر و تعرق و مدل‌های ترکیبی نشان‌دهنده آن است که می‌توان با استفاده از قابلیت‌های سنجش از دور به برآورد قابل قبولی از عملکرد محصول دست یافت. به طور نمونه، نتایج پژوهش حاضر به برنامه‌ریزان در محدوده مورد مطالعه این امکان را می‌دهد که به راحتی با تهیه تصویر برگزیده ماهواره لندست ۸ (سنجنده OLI و TIRS) مرتبط با دوره آغاز گلدهی کلزا در سال‌های بعد و استخراج شاخص سطح برگ در دوره میانی رشد، عملکرد مزرعه را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند. افزون بر آن می‌توان گفت

برآورد عملکرد کلزا با استفاده از داده های زمینی و سنجش از دور

اعتبار مدل های ارائه شده تاثیر دارند. به هر حال، مدل ها و روابط با دقت و اعتبار متوسط در نمایش کلی از شرایط مزارع و مناطق و نیز نمایش نسبی از وضعیت متغیر نقطه ای هر مزرعه می توانند کارآمد باشند اگر چه انتظار می رود روند این پژوهش ها طی سال های آتی با تنوع سنجنده ها و ورود رایانش آبری به عرصه محاسبات پیچیده، بهبود و به شکلی روزافزون گسترش یابد.

## مراجع

- Alizadeh, A. (2014). Soil, Water, Plant Relationship. Mashhad, Iran: Sajjad University of Technology. (in Persian)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Allen, R., Tasumi, M. & Trezza, R. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) Advanced Training and User's Manual. Idaho Implementation, Version 1.0.
- Awad, M. M. (2019). An Innovative Intelligent System Based on Remote Sensing and Mathematical Models for Improving Crop Yield Estimation. *Information Processing in Agriculture*, 6(3), 316-325.
- Bastianssen, W. G. M., & Ali, S. (2003). A New Crop Yield Forecasting Model Based on Satellite Measurements Applied Across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*; (94), 321-340.
- Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C.B., Jensen, N.O., Schelde, K., and Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*; 81: 179-193.
- Field, C. B., Randerson, J. T., & Malmström, C. M. (1995). Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. *Remote Sensing Environment*, 51, 74-88.
- Food and Agriculture Organization Statistical Data (FAOSTAT). 2021. FAO Statistical Data. (Available at: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>)
- Liaqat, M. U., Cheema, M. J. M., Huang, W., Mahmood, T., Zaman, M. & Khan, M. M., (2017). Evaluation of MODIS and Landsat multiband vegetation indices used for wheat yield estimation in irrigated Indus Basin. *Computers and Electronics in Agriculture*, (138), 39-47. (in Persian)
- Lobell, D. B., Asner, G. P., Ortiz-Monasterio, I., & Benning, T. L. (2003). Remote Sensing of Regional Crop Production in the Yaqui Valley, Mexico: Estimates and Uncertainties. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, (94), 205-220.
- Loveimi, N., Akram, A., Bagheri, N., & Hajiahmad, A. (2019). Prediction of Canola Yield in Some of Growth Stages by Using Landsat Satellite, OLI Sensor. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(1), 101-113. (in Persian)
- Marofi, S. Mousavi, R. & Nasiri Gheidari, O. (2017). Investigation of Spatial and Temporal Variation of Water Requirement of Ghazvin Desert, Using METRIC Algorithm and Landsat Images. *Geographical Researches*, 32(2), 80-92. (in Persian)

- Moayeri, M. (2019). Determination of water requirement and comprehensive irrigation management of canola farms. Karaj: Agricultural Engineering Research Institute. (in Persian)
- Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747-766.
- Moran, M. S., Maas, S. J., & Pinter, P. J. (1995). Combining Remote Sensing and Modeling for Estimating Surface Evaporation and Biomass Production. *Remote Sensing Reviews*, 12(3-4), 335-353.
- Panek, E. & Gozdowski, D., (2021). Relationship between MODIS Derived NDVI and Yield of Cereals for Selected European Countries. *Agronomy*, 11(2), 340.
- Panek, E., Gozdowski, D., Stępień, M., Samborski, S., Ruciński, D. & Buszke, B., (2020). Within-Field Relationships between Satellite-Derived Vegetation Indices, Grain Yield and Spike Number of Winter Wheat and Triticale. *Agronomy*, 10(11), 1842.
- Pratt, S. (2013). Satellite crop estimate too low: Analysts. The Western Producer. Retrieved March 28, 2018, from <https://www.producer.com/2013/10/satellite-crop-estimate-too-low-analysts>.
- Rembold, F., Atzberger, C., Savin, I., & Rojas, O., (2013). Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection. *Remote Sensing*, 5(4), 1704-1733.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., and Deering, D. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium NASA; 309-317.
- Roznik, M., Boyd, M., & Porth, L. (2022). Improving crop yield estimation by applying higher resolution satellite NDVI imagery and high-resolution cropland masks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 25, (100693).
- Uossef Gomrokchi, A. (2021). Estimation of Potential Yield and Yield Gap of major crops in Qazvin irrigation network. *Water Resources Engineering*, 14(50), 75-88. (in Persian)
- Valashjerdi, M., Hamzeh, S., Moghadasi, M. & Shini Dashtgol. (2019). Modeling the sugarcane crop yield by using a composite model based on remote sensing data. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6), 141-158. (in Persian)
- Wahap, N., Shafri, H.Z. (2020). Utilization of Google Earth Engine (GEE) for land cover monitoring over Klang Valley, Malaysia. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol 1. IOP Publishing, pp 012003.
- Weber, V.S., Araus, J.L., Cairns, J.E., Sanchez, C., Melchinger, A.E. & Orsini, E. (2012). Prediction of grain yield using reflectance spectra of canopy and leaves in maize plants grown under different water regimes. *Journal of Field Crops Res*, 128, 82-90.
- Younesi, M. (2022). Feasibility of Using Precision Irrigation Process in Improving Agricultural Water Productivity Index in Wheat Crop (M.Sc. Thesis), Tehran University, Iran. (in Persian)
- Younesi, M., Mashal, M. & Yousef Gomrokchi, A. (2022). Estimation of Real Evapotranspiration of Wheat and Rapeseed Using SEBAL Algorithm (Case Study: Esmail Abad Agricultural Research Station in Qazvin Province). *Iranian Journal of ECOHYDROLOGY*, 9(3), 475-487. (in Persian)
- Zahirnia, A.R. & Matinfar, H.R. (2016). Evaluate the yield of irrigated wheat fields on the basis of data obtained from Landsat 8 in the southwestern province of Khuzestan. First National Conference on Remote Sensing and GIS in the earth sciences. Atmospheric and Oceanic Sciences Research Center-in. College of Agriculture, Shiraz University. (In Persian)

- Zamani-Noor, N., Feistkorn, D. (2022). Monitoring Growth Status of Winter Oilseed Rape by NDVI and NDYI Derived from UAV-Based Red–Green–Blue Imagery. *Agronomy*, 12, 1-16.
- Zare khormizi, H., Tavili, A., & Ghafarian Malamiri, H. R. (2021). Estimation of Actual Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Comparison with Improved FAO 56 Standard Evapotranspiration with KC-NDVI Relationship. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 13(3), 73-92. (In Persian)
- Zhang, H., Chen, H., & Zhou, G. (2012). *The model of wheat yield forecast based MODIS-NDVI-A case study of Xinxiang*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Conference, Melbourne, Australia.
- Zhu, W., Pan, H., He, H., Yu, D., & Hu, H. (2006). Simulation of Maximum Light Use Efficiency for some Typical Vegetation Types in China. *Chinese Science Bulletin*, 51(4), 457-463.

## **Estimation of rapeseed yield using Geo-data and remote sensing (Case study: Selected Lands cultivated in Qazvin plain irrigation network)**

**Mahdi Younesi, \*Afshin Uossef Gomrokchi**

**\* Assistant Professor., Agricultural Engineering Research Department, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Qazvin, Iran.**

### **Introduction**

Among the applications of remote sensing in agriculture, we can mention the estimation of crop yield, the preparation of the cultivation map, the factors affecting the crop yield. The models presented to estimate the crop yield are generally based on the calculation of vegetation indicators, which are used to estimate the amount of production using these indicators and with a specific algorithm. Researchers have used other methods (in addition to the direct use of vegetation indices) to estimate crop yield. In this regard, we can refer to Bastianssen and Ali's research (Bastianssen and Ali, 2003). This model (Bastiansen model) is a combination of the Monteith model to calculate the absorbed photosynthetic active radiation, the Stanford model to determine the absorbed energy efficiency, and the SEBAL model to describe the spatial-temporal changes of evapotranspiration.

Rapeseed is the second major oilseed crop in the world after soybeans. Rapeseed is the main source of human edible oil and its residues for livestock are rich in energy and protein. Considering the importance of the development of rapeseed cultivation in Qazvin province, yield estimation with low-cost method is a suitable tool for managers and planners in the economic policies of this crop cultivation. The results of the research show that the use of remote sensing techniques is a relatively accurate method to estimate the crop yield of different products. In this research, rapeseed yield was investigated by using remote sensing technique and Google Earth Engine in the cultivated lands of Qazvin plain irrigation network. For this purpose, the model presented by Bastianssen and Ali (Bastianssen and Ali, 2003) was used.

### **Methodology**

This research was carried out in rapeseed fields in the cultivated lands of Qazvin plain irrigation network. In this research, the fields were selected to cover soil texture, soil salinity, different crop management, irrigation water salinity and different irrigation methods. In order to be able to analyze the leaf area index in the process of crop performance modeling, rapeseed cultivars were the same in all the selected fields. In this research, a hybrid model was used to estimate crop yield, including the Monteith model to calculate the absorbed photosynthetically active radiation (APAR), the Stanford model to determine the light consumption efficiency (LUE), and the surface energy balance algorithm (SEBAL). In order to evaluate the crop yield prediction model, Pearson's correlation coefficient was used between the data to analyze the correlation of yield and leaf area index in different stages of growth. Also, in order to evaluate the crop yield estimation results and the recorded real field yield, the coefficient of explanation between data ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE) and mean absolute error (MAE) have been used. In this research, the meteorological data required for yield modeling such as temperature, relative humidity, wind speed, sunshine hours, soil surface temperature, and solar radiation were used from the recorded data of Ismailabad agricultural meteorological station.

## **Results and Discussion**

The analysis of the leaf area index in the studied fields showed that the date of cultivation was one of the most important factors influencing the process of plant phenological growth and consequently the difference in crop yield in the fields. Considering that the potential yield of rapeseed in the Qazvin Plain irrigation network is estimated at 4000 kg/ha, none of the farms have reached the maximum leaf area index, and considering the direct effect of the leaf area index in the flowering stage on the crop yield, the maximum yield potential in the selected farms is not available. Therefore, the leaf area index in the flowering stage is considered a suitable criterion for estimating the yield reduction of rapeseed. The results of Pearson's correlation coefficient analysis showed that crop yield had a significant correlation with leaf area index in development and middle stages of rapeseed growth, and the highest correlation was related to the middle stage of crop growth.

The results of Pearson's correlation coefficient analysis showed that there was a significant correlation at the 1% probability level between the field recorded data and yield estimation values. Also, the values of explanation coefficient ( $R^2$ ) equal to 0.91, root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE), mean absolute error (MAE) were equal to 444.06, 41.23, 433.03 kg/ha respectively. Is. Also, the results of the correlation coefficient analysis of yield values and calculated evapotranspiration based on the SEBAL method showed that there was no significant correlation.

## **Conclusions**

Several factors are effective in product performance, but modeling by simplifying the relationships related to a phenomenon, justifies the mutual relationships between independent and dependent variables by spending the least amount of time and money. The results of the research regarding yield estimation using vegetation indices, evapotranspiration algorithms and hybrid models show that it is possible to make an acceptable estimate of crop yield by using Remote Sensing techniques. For example, the results of present research showed that by preparing the selected image of Landsat 8 satellite (OLI and TIRS) related to the beginning of rapeseed flowering period in the following years and extracting the leaf area index in the middle period of growth, the yield of field can be predicted with reasonable accuracy. Also, the leaf area index in the rapeseed flowering stage is a suitable measure to estimate the yield gap of the rapeseed crop. The important point is that the accuracy of predicting crop performance by satellite images is still reported was average. The accuracy of field measurements, the low spatial resolution of satellite images, as well as the presence of clouds, fog, gas, and suspended particles, along with the complexities related to plant growth modeling, have an effect on reducing the accuracy of yield prediction and the validity of models. Although these researches are expected to improve and expand with the variety of satellite images and the entry of cloud computing into the field of complex computing.

**Keywords:** Bastianssen Model, Landsat 8, Satellite Images, Vegetation Indices