



Comparison of Geostatistical Method and Remote Sensing in Estimating Rice (*Oryza sativa* L.) Grain Yield in Guilan Province

P. Aalae Bazkiaei¹, B. Kamkar^{2*}, E. Amiri³, H. Kazemi⁴ and M. Rezaei⁵

Received: 28-08-2020

Revised: 17-06-2021

Accepted: 21-06-2021

Available Online: 13-12-2022

How to cite this article:

Aalae Bazkiaei, P., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H., and Rezaei, M., 2022. Comparison of geostatistical method and remote sensing in estimating rice (*Oryza sativa* L.) grain yield in Guilan province. Journal of Agroecology 14(3): 579-599. DOI: [10.22067/agry.2021.20308.0](https://doi.org/10.22067/agry.2021.20308.0)

Introduction

Food security has been the most important human concern on the planet. Food security and future changes in food prices and crop development undeniably depend on the average yield of crops. Rice is the second largest crop in terms of area under cultivation and provides food for more than half of the world's population. Due to the importance of rice production, it is important to monitor its production on a large scale. Remote sensing and geostatistical methods play an important role in the spatial and temporal evaluation of climatic, soil, living factors, and management methods. The study of the amount of yield obtained in the province of Guilan can provide appropriate information in advancing/pursuing goals such as the study of the amount of yield gap in this region; therefore, this study was conducted to evaluate the yield of rice using two methods of geostatistics and remote sensing approach in 2016 and 2017 in Guilan province.

Materials and Methods

In this study, different methods of preparing vegetation maps to determine rice yield maps were evaluated. To compare methods based on satellite imagery and geostatistical procedure models to estimate the rice yield of rice cultivated lands in Guilan province, a study was conducted in 2016 and 2017. For field operations, 320 fields were surveyed to record grain yield (the total of 238,000 hectares of rice-grown fields) during the physiological maturity stage. In this study, 33 statistical procedure models were used to interpolate the amount of grain yield, and then the accuracy of interpolation methods was evaluated using various statistical criteria. Satellite-imagery-based methods using Landsat 8 satellite Operational Land Imager (OLI) sensor images related to the dates of June 18, August 9, August 21 in 2016, and July 23, August 8 in 2017 and the images of the Sentinel-2 satellite on June 30 and September 13, 2017, were used. Eight satellite-derived vegetation indices were calculated and the relationship between them and the yield variable was extracted using the regression relationship, and the yield map was prepared and evaluated. By fitting the peak logistics model between yield values and vegetation indices and selecting the superior index, the yield map was prepared with the help of remote sensing and the obtained yield maps were compared with different statistical criteria.

1-Ph.D., Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2-Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3-Professor, Department of Water Engineering, Lahijan branch, Islamic Azad University, Iran.

4-Associate Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

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

(*Corresponding author: E-mail: kamkar@ferdowsi.um.ac.ir)

Results and Discussion

The results of the evaluation of geostatistical interpolation methods showed the superiority of the ordinary stable kriging procedure model over other models. In this study, the RVI vegetation index was selected as the superior index to predict actual yield throughout the Guilan Province. Comparison of geostatistical procedure models and satellite-imagery oriented models based on the determination coefficient of regressed equations and root mean square error (RMSE) to estimate grain yield in Guilan province showed that both procedures had acceptable accuracy, however, due to the ability of remote sensing to distinguish the pointwise optical reflection of phenomena and to predict yield with high spatial resolution, this method achieved higher accuracy in yield estimating.

Conclusion

A comparison of geostatistical and remote sensing methods in predicting farm yield indicated that the remote sensing method was more accurate. Early harvest forecasting based on the information extracted from this study showed that the use of image/images obtained in June and August and the OLI sensor of Landsat-8 satellite in Guilan province can be used as a basis for forecasting the yield of this plant in the coming years. Such studies in Guilan province, by considering the share of Guilan province in the country's rice supply, will play an effective role in managerial decisions regarding rice supply and demand at the macro level. The results also showed that sampling in the study area based on a regular (systematic) spatial pattern can increase the accuracy of geostatistical methods in the estimation of regional yield. The results of this project can provide suitable basic information for other studies such as the yield gap, the reasons behind it, the relationship between land suitability and the obtained yield, and forecasting and estimating yield in different time periods.

Keywords: Actual yield, Kriging, Landsat-8, Sentinel-2.

مقاله پژوهشی

مقایسه روش‌های زمین‌آمار و سنجش از دور در برآورد عملکرد دانه برنج (*Oryza sativa* L.) در استان گیلان

پویا اعلایی بازکیایی^۱، بهنام کامکار^{۲*}، ابراهیم امیری^۳، حسین کاظمی^۴ و مجتبی رضایی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

اعلایی بازکیایی، پ.، کامکار، ب.، امیری، ا.، کاظمی، ح.، و رضایی، م.، ۱۴۰۱. مقایسه روش‌های زمین‌آمار و سنجش از دور در برآورد عملکرد دانه برنج (*Oryza sativa* L.) در استان گیلان. بوم‌شناسی کشاورزی ۱۴(۳): ۵۷۹-۵۹۹.

چکیده

به منظور مقایسه روش‌های مبتنی بر سنجش از دور و زمین‌آمار برای برآورد عملکرد برنج (*Oryza sativa* L.) اراضی کشت برنج استان گیلان، پژوهشی در سال‌های زراعی ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ انجام شد. جهت انجام عملیات میدانی، ۳۲۰ نمونه عملکرد دانه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه برنج از ۲۳۸ هزار هکتار اراضی برنج برداشت شد. در این تحقیق، از ۳۳ روش-مدل زمین‌آمار برای درون‌یابی مقدار عملکرد دانه استفاده شد و سپس دقت روش‌های درون‌یابی با کمک معیارهای آماری مختلف ارزیابی شد. در روش مبتنی بر سنجش از دور، از تصاویر سنجنده تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) ماهواره لندست-۸ و تصاویر سنجنده تصویربردار ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد. هشت شاخص گیاهی از تصاویر استخراج و ارتباط بین آن‌ها و متغیر عملکرد با استفاده از رابطه رگرسیون استخراج و نقشه عملکرد با کمک تصاویر تهیه و ارزیابی شد. نتایج ارزیابی روش‌های درون‌یابی بیان‌گر برتری روش-مدل کریجینگ معمولی - stable نسبت به دیگر مدل‌ها بود. در این مطالعه، شاخص RVI در بین شاخص‌های گیاهی بیش‌ترین دقت را در پیش‌بینی عملکرد اراضی برنج داشته است. مقایسه روش زمین‌آمار و روش مبتنی بر سنجش از دور بر اساس ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا در برآورد عملکرد دانه در سطح استان گیلان نشان داد که هر دو روش دقت قابل قبولی داشتند، اما با توجه به توانایی سنجش از دور در تفکیک نقطه‌ای بازتاب نوری پدیده‌ها و پیش‌بینی عملکرد با تفکیک مکانی بالا، در این روش دقت بالاتری در تخمین عملکرد حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: سنتینل-۲، عملکرد واقعی، کریجینگ، لندست-۸

- ۱- دکتری زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
 - ۲- استاد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
 - ۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لاهیجان، ایران.
 - ۴- دانشیار، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
 - ۵- استادیار، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.
- (*)- نویسنده مسئول: (Email: kamkar@ferdowsi.um.ac.ir)

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) دومین محصول زراعی از نظر سطح زیر کشت و تأمین‌کننده غذای بیش از نیمی از جمعیت جهان است (Rahmat et al., 2019). یک‌پنجم جمعیت جهان یا بیش از یک میلیارد خانواده در آسیا، آفریقا و آمریکا به‌عنوان منابع اصلی اشتغال و معیشت خود به نظام‌های تولید برنج وابسته هستند. همچنین برنج در مبارزه با گرسنگی و فقر جهانی در خط مقدم قرار دارد (Rahmat et al., 2019). بر اساس آمار سازمان خواربار جهانی (FAO) ایران در سال ۲۰۱۸ دارای ۵۸۰ هزار هکتار سطح زیر کشت و ۱/۹۹ میلیون تن تولید برنج بوده است. واردات برنج در ایران در سال ۲۰۱۸ حدود ۱/۲ میلیون تن بوده است (FAO, 2018). این نتایج دلالت بر آن دارد که تولید داخلی کفایت تأمین نیاز کشور را نداشته و بخشی از نیاز برنج مصرفی از طریق واردات تأمین شده است.

با توجه به مطالب ذکر شده درباره گیاه برنج، نظارت بر تولید آن در سطح وسیع امری مهم است (Ma et al., 2019). مقایسه روش‌های مختلف بررسی عملکرد گیاهان زراعی در سطح وسیع نشان داد که روش‌های سنتی با انتخاب تصادفی اراضی، با توجه به وجود تغییرات جغرافیایی، اقلیمی و خاکی، اطلاعات مناسبی در مورد میزان عملکرد گیاهان زراعی در سطح وسیع در جهت تأمین امنیت غذایی ارائه نمی‌دهد (Ma et al., 2019; Lobell, 2013). در تعیین عملکرد محصولات مختلف، سنجش از دور نقش مهمی در ارزیابی مکانی و زمانی عوامل اقلیمی، خاک، عوامل زنده و روش‌های مدیریتی اثرگذار بر عملکرد دارد که مهم‌ترین مزیت آن پردازش داده‌های مکانی وسیع می‌باشد (Alizadeh Dehkordi et al., 2020). سنجش از دور را می‌توان علم کسب اطلاعات از سطح زمین بدون تماس فیزیکی با آن نامید که از جمله استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. روش سنجش از دور عبارت است از اندازه‌گیری و ثبت انرژی

بازتابی یا منتشر شده الکترومغناطیسی از سطح زمین و جو که در بین پدیده‌های مختلف دارای میزان متفاوتی است (Badsar, 2014). مزیت عمده تصاویر ماهواره‌ای قابلیت استفاده از آن به‌صورت رقومی است که می‌تواند به‌وسیله رایانه‌ها تجزیه و تحلیل شده و در زمان‌های مختلف در دسترس قرار گیرند (Goudarzi et al., 2006). یک راه مناسب بهره‌گیری از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای استخراج شاخص‌های گیاهی مناسب با منطقه و پوشش زمین است (Badsar, 2014). شاخص‌های گیاهی تبدیل‌های ریاضی هستند که بر اساس باندهای مختلف سنجنده تعریف شده و برای ارزیابی گیاهان در تصاویر چندطیفی ماهواره‌ای طراحی شده‌اند (Badsar, 2014). از جمله شاخص‌های گیاهی پرکاربرد می‌توان به NDVI^۲ و TVI^۳ اشاره نمود (Badsar, 2014). زارکو-تجادا و همکاران (Zarco-Tejada et al., 2005) مشاهده کردند که شاخص‌های LAI^۴، RDVI^۵، MTVI^۶ و OSAVI^۷ با استفاده از ماهواره IKONOS با وضوح مکانی چهار متر بهترین ارتباط را با عملکرد پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) در کالیفرنیا داشته‌اند. مو و همکاران (Mo et al., 2005) با استفاده از مدل‌سازی به پیش‌بینی مناسبی از عملکرد گیاهان زراعی چهارکربنی و سه‌کربنی، کارایی مصرف آب و کارایی تبخیر و تعرق با استفاده از NDVI حاصل از سنجنده NOAA-AVHRR^۸ رسیدند. دنت و همکاران (Dent et al., 2008) گزارش کردند که ایجاد نقشه مناسب شاخص سطح برگ با تصاویر ماهواره‌ای به افزایش دقت برآورد عملکرد با استفاده از مدل CERES-Wheat^۹ کمک می‌کند. (Shi & Xingguo 2011) از طریق برقراری ارتباط بین NDVI^{۱۰} (حاصل از تصویر ماهواره Terra-MODIS با گستره دید ۲۳۳۰ کیلومتری) و حداکثر ظرفیت کاتالیزوری روبیسکو (Vcmax)، الگوی ظرفیت فتوسنتزی منطقه مورد مطالعه خود را به‌دست آوردند. محمدی احمدحمودی و همکاران (Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al., 2015) مشاهده کردند که شاخص

- 1- Food and Agriculture Organization
- 2- Normalized difference vegetation index
- 3- Transformed vegetation index
- 4- Leaf area index
- 5- Renormalized difference vegetation index
- 6- Modified triangular vegetation index
- 7- Optimized soil adjusted vegetative index
- 8- National oceanic and atmospheric administration's - advanced very high resolution radiometer
- 9- Crop environment resource synthesis
- 10- Normalized difference vegetation index

۹۱- تا ۳۶۸۷ متر از سطح دریا می‌باشد که دشت‌های آبرفتی و مناطق کوهستانی از سمت شمال به جنوب امتداد یافته است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان گیلان). استان گیلان در مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این استان، بر اساس طبقه‌بندی کوپن-گیگر (بر اساس داده ۳۵ ساله) دارای اقلیم معتدل بسیار مرطوب می‌باشد (Raziei, 2017). محدوده زمانی کاشت تا برداشت برنج در این استان از اوایل فروردین (خانه‌گیری نشا) تا پایان شهریور (برداشت محصول) می‌باشد. وسعت اراضی شالیزاری استان حدود ۲۳۸ هزار هکتار بوده که در سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶، ارقام هاشمی، علی کاظمی، جمشیدجو، خزر بیش‌ترین سطح زیر کشت را داشتند (Agriculture- Jihad Organization in Guilan, 2016).

تعریف نقاط نمونه‌برداری

به‌منظور انجام این پژوهش ابتدا مختصات مکان شالیزارها در منطقه به‌وسیله دستگاه GPS مدل ۵۵۰ Garmin ثبت شد. سپس کمینه تعداد شالیزارهای مورد نیاز برای بررسی به‌صورت تصادفی و بر اساس روش تعیین تعداد نمونه کوکران در سطح استان تعیین و جامعه آماری (۳۲۰ مزرعه) انتخاب شد (Pourhadian et al., 2019). در زمان برداشت محصول به‌منظور تعیین عملکرد دانه، به شالیزارهای انتخابی مراجعه شد. نمونه‌گیری در مرحله رسیدن (تکمیل رشد دانه پیش از ریزش دانه با کد زادوکس^۲=۹۲) با همکاری ناظرین جهاد کشاورزی صورت گرفت. سپس نمونه‌های گیاهی به آزمایشگاه منتقل و پس از تعیین درصد رطوبت، میزان عملکرد دانه با رطوبت ۱۴ درصد محاسبه شد. مختصات جغرافیایی مزارع در شکل (۱) ارائه شده است. از بین نقاط نمونه‌برداری، ۷۰ درصد آن برای برآورد عملکرد دانه برنج با روش سنجش از دور و زمین‌آمار در سطح استان گیلان و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای صحت‌سنجی روش‌های مذکور استفاده شد (Badsar, 2014).

روش درون‌یابی

در این پژوهش، روش درون‌یابی کریجینگ به‌دلیل دقت بالا و در نظر گرفتن ساختار مکانی و همبستگی بالا در داده‌ها مورد استفاده

TVI تصویر سنجنده ETM+^۱ مربوط به اواخر مرحله پنجه‌زنی گندم (*Triticum aestivum* L.)، عملکرد مزرعه را با دقت پیش‌بینی می‌کند. زمین‌آمار یکی دیگر روش‌های بررسی تغییرات عملکرد در سطوح وسیع بر اساس الگوریتم عددی صفات پیوسته است. کریجینگ یکی از روش‌های زمین‌آمار برای درون‌یابی داده‌ها بر اساس واریانس مکانی است (Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al., 2015). سامانه اطلاعات جغرافیایی در برنامه‌ریزی مکانی با تعیین پراکنش پدیده‌ها و روی هم‌گذاری نقشه‌ها و تفسیر داده‌های بوم‌شناختی، در مراحل مختلف برنامه‌ریزی کاربرد دارد (Baskent & Keles, 2005). بررسی تنوع زیستی علف‌های هرز در سامانه‌های زراعی تحت کشت گندم شهرستان گرگان (Ghasemi, 2011)، بررسی رابطه شوری با عملکرد گندم در مزرعه نمونه ارتش گرگان (Azhirabi et al., 2019)، بررسی رابطه عناصر غذایی خاک با عملکرد گندم (Rezaei Hossein Abad, 2013) برآورد خلاء عملکرد در حوضه گرگان با سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل SSM (Badsar, 2014) و پایش تولید زیست‌توده در مزارع گندم ارتش استان گلستان (Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al., 2015) از جمله موارد کاربرد سامانه اطلاعات جغرافیایی در علوم کشاورزی می‌باشند.

بنا بر مطالعات ذکر شده، سنجش از دور و روش زمین‌آمار رهیافت-های کاربردی در زمینه بررسی عملکرد و متغیرهای گیاهی در سطح وسیع می‌باشند. با توجه به اهمیتی که تولید برنج در تأمین امنیت غذایی برنج کشور دارد، بررسی میزان عملکرد به‌دست آمده در سطح استان گیلان که دومین استان از نظر سطح زیر کشت برنج (۲۳۸ هزار هکتار) در کشور می‌باشد، می‌تواند اطلاعات مناسبی در پیشبرد اهدافی چون بررسی میزان خلاء عملکرد در این منطقه فراهم نماید؛ بنابراین این پژوهش با هدف بررسی عملکرد برنج با استفاده از دو روش زمین‌آمار و رهیافت سنجش از دور در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ در سطح استان گیلان انجام شد.

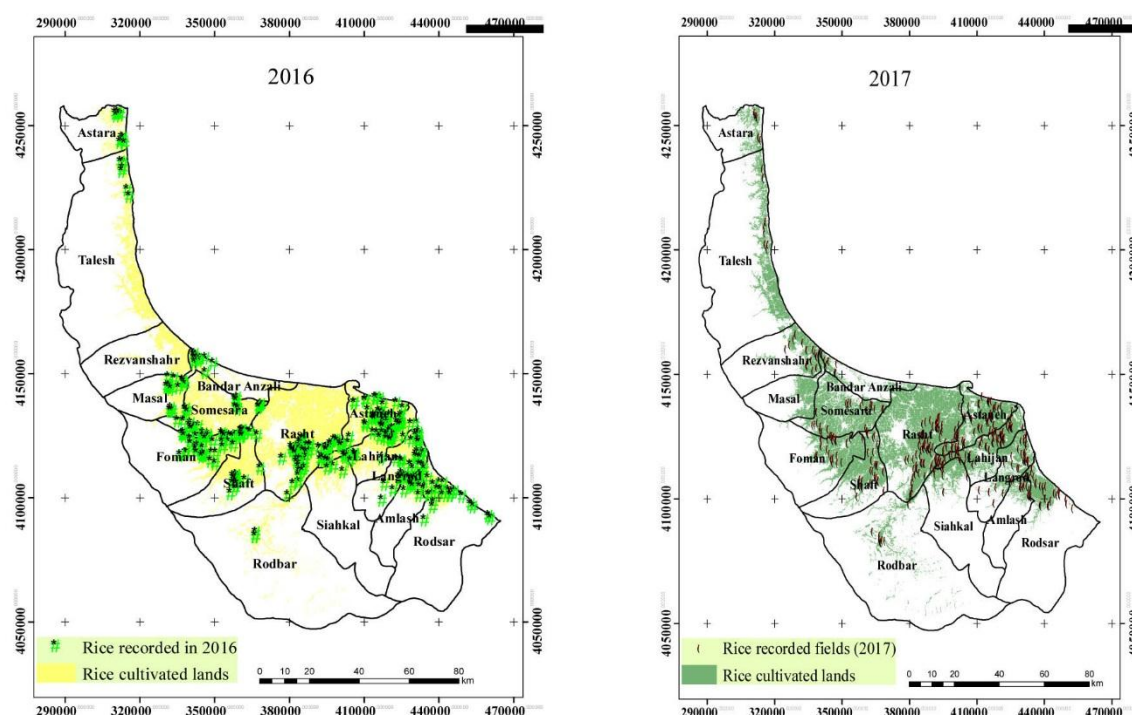
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در سال‌های زراعی ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ در اراضی شالیزاری استان گیلان انجام شد. استان گیلان دارای ۱۶ شهرستان با ارتفاع

بررسی قرار گرفت. مقادیر چولگی و کشیدگی در سال ۱۳۹۵ به ترتیب معادل ۲/۹۴ و ۰/۰۲ و در سال ۱۳۹۶ به ترتیب معادل ۲/۸۳ و ۰/۳۲ به دست آمد.

قرار گرفت (Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al., 2015). بدین منظور، آزمون ران تست^۱ جهت اطمینان از همگنی داده‌ها انجام نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از شاخص‌های مرکزی شامل میانه و میانگین و شاخص‌های پراکندگی شامل چولگی و کشیدگی مورد



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی اراضی شالیزاری و مزارع نمونه‌برداری در استان گیلان در سال ۱۳۹۵ (الف) و ۱۳۹۶ (ب)

Fig. 1 - Geographical location of lands under rice cultivation and sampled farms in Guilan province in 2016 (a) and 2017 (b)

نقطه شعاع تأثیر) می‌باشند (Utset et al., 2000). برای بررسی ساختار مکانی داده‌های مورد استفاده، نسبت اثر قطعه‌ای به سقف در هر نیمه-تغییرنا بررسی شد. همچنین مقدار عددی شعاع تأثیر^۵ بر مبنای متوسط فاصله نقاط از هم و با استفاده از تابع نزدیک‌ترین مجاور^۶، محاسبه و استفاده شد (Badsar, 2014). تعداد گام و نوع شکل تخمین^۷ نیز با آزمون و خطا بر اساس کم‌ترین ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)^۸ با حد خطای ۳۰ درصد میانگین تعیین شد. سپس ایستگاه-های دارای خطای بالا مشخص و حذف شدند و بار دیگر میان‌یابی با تعیین شعاع تأثیر، تعداد گام و مناسب‌ترین شکل تخمین انجام شد.

مبنای نرمال بودن داده‌ها به دست آمدن مقدار چولگی و کشیدگی در محدوده +۳ تا -۳ بود (Badsar, 2014). به منظور بررسی ساختار مکانی داده‌ها نیمه‌تغییرنا مورد بررسی قرار گرفت که ساختار ارتباط مکانی بین نمونه‌ها را نشان می‌دهد (Webster & Oliver, 2001). متغیرهای نیمه‌تغییرنا شامل اثر قطعه‌ای^۲ (خطاهای اندازه‌گیری یا منابع تغییر مکانی در فواصل کوچک‌تر)، دامنه یا شعاع تأثیر^۳ (مؤلفه‌ای از مدل کوواریانس یا نیمه‌تغییرنا که فاصله‌ای را نشان می‌دهد که فراتر از آن همبستگی خودکار بین متغیرها کم است یا اصلاً وجود ندارد) و آستانه یا سقف^۴ (مقدار به دست آمده در مدل نیمه‌تغییرنا در محور y در

- 5- Lag size
- 6- Average nearest neighbor
- 7- Sector type
- 8- Root Mean Square Error

- 1- RUN test
- 2- Nugget effect
- 3- Range
- 4- Sill

طول موج در جدول ۲ ارائه گردید. باندهای مورد استفاده از هر سنجنده با ذکر محدوده طول موج در جدول ۳ ارائه شد. برای محاسبه شاخص‌های مذکور از نرم‌افزار EDRISI نسخه 18.08 TERRSET استفاده شد. سپس با کمک شاخص‌های گیاهی، نقشه عملکرد برنج تهیه و به‌منظور صحت‌سنجی نقشه عملکرد دانه برنج حاصل از شاخص‌های گیاهی، مقایسه عملکرد پیش‌بینی شده و عملکرد ثبت شده صورت گرفت.

پس از محاسبه شاخص‌های گیاهی، مقادیر متناظر این شاخص‌ها در محل نقاط نمونه‌گیری استخراج و ارتباط بین این شاخص‌ها با عملکرد دانه برنج بررسی شد و معنی‌داری این شاخص‌ها با کمک رگرسیون ساده خطی مورد ارزیابی قرار گرفت و شاخص‌های مطلوب برای ادامه فرآیند انتخاب شد. رابطه خطی بین مقادیر شاخص‌های گیاهی با عملکرد دانه برآورد گردید و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 و با کمک رابطه ریاضی به‌دست آمده، عملکرد دانه از روی شاخص‌های گیاهی به‌دست آمده از تصاویر تخمین زده شدند. با استفاده از مقادیر به‌دست آمده عملکرد دانه به‌وسیله شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور و روش زمین‌آمار، نقشه‌های عملکرد واقعی محدوده به‌دست آمد. سپس بهترین نقشه تخمین عملکرد با کمک ریشه دوم میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین (R^2) انتخاب و ارائه شد. آزمون مورد استفاده برای بررسی معنی‌داری R^2 ، آزمون F در سطح احتمال پنج درصد بوده است. در این پژوهش از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.3، Envi 5.1، EDRISI نسخه 18.08 TERRSET و نرم‌افزار آماری SAS 9.4 (SAS Institute, 2015) استفاده گردید.

نتایج و بحث

بررسی عملکرد واقعی با استفاده از فناوری سنجش از دور
روابط خطی بین شاخص‌های گیاهی و عملکرد برنج به همراه ضریب تبیین و ضریب تغییرات برای سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ در جدول (۴ و ۵) نشان داده شده است. در سال ۱۳۹۵ بر اساس مقادیر به‌دست آمده جذر میانگین مربعات خطا (جدول ۴)، شاخص RVI به‌دست آمده

به‌منظور اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، توزیع فراوانی آن‌ها با کمک آماره‌های میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی توسط نرم‌افزار آماری SAS و رویه proc univariate مورد بررسی قرار گرفت (Fatemi & Rezaei, 2006). پس از تأیید نرمال بودن داده‌ها، ۳۳ روش-مدل (سه روش کریجینگ معمولی، جهانی و ساده و ۱۱ مدل دایره‌ای^۱، کروی^۲، نمایی^۳، گوسی^۴، چهاروجهی کروی^۵، پنج‌وجهی کروی^۶، درجه دو منطقی^۷، ثابت^۸، اثر روزنه‌ای^۹، K-Bessel و J-Bessel) مورد ارزیابی قرار گرفتند که برای هر متغیر میزان خطای موجود در تخمین نقاط مجهول مورد بررسی قرار گرفت. جهت تشخیص مناسب‌ترین روش؛ میزان RMSE در هر روش محاسبه و ارزیابی شدند (Kazemi et al., 2012). به‌طور معمول، هر قدر مقدار RMSE کمتر باشد، صحت روش بیشتر است. از نظر تئوری هرگاه این معیار برابر صفر شود نمایانگر این است که مقدار تخمین زده شده یک کمیت، دقیقاً برابر مقدار واقعی آن است (Kazemi et al., 2012).

تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش، از پنج تصویر چند طیفی سنجنده OLI^{۱۰} ماهواره لندست-۸ که دارای نه باند بوده و به تاریخ‌های ۲۹ خرداد، ۱۹ مرداد و ۳۱ مرداد در سال ۱۳۹۵ و تاریخ‌های یک مرداد و ۱۷ مرداد در سال ۱۳۹۶ تعلق داشتند، استفاده شد. تصاویر بر اساس درصد ابرناکی کمتر از دو درصد در محدوده زراعی برش داده شده استان انتخاب شدند. همچنین از تصاویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ در تاریخ نهم تیر و ۲۲ شهریور در سال ۱۳۹۶ استفاده گردید. در این پژوهش، دقت حاصل از کاربرد تصاویر دو ماهواره لندست-۸ و سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی متفاوت در برآورد عملکرد دانه برنج مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر دریافت شده نیاز به تصحیحات هندسی و اتمسفری نداشت. در این پژوهش، هشت شاخص گیاهی شامل RVI، TVI، SAVI، TSAVI، PVI، NDWI، NDVI و DVI مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). باندهای مورد استفاده از هر سنجنده با ذکر محدوده

7- Rational Quadratic
8- stable
9- Hole effect
10- Operational Land Imager

1- Circular
2- Spherical
3- Exponential
4- Gaussian
5- Tetraspherical
6- Pentaspherical

شده تحت تأثیر ساختار هندسی تاج‌پوشش از جمله اندازه، شکل و آرایش اجزای تاج‌پوشش است (Koppe et al., 2013). در این پژوهش، به نظر می‌رسد شاخص RVI، با توجه به خصوصیات ذکر شده در مورد این شاخص، با توصیف بهتر رشد گیاه برنج دقت بالاتری در برآورد عملکرد برنج در محدوده مورد مطالعه داشته است. در مطالعات دیگر از شاخص RVI جهت بررسی متغیرهای گیاهی، خاک و اقلیم استفاده شد.

از تصاویر ماهواره لندست-۸ در تاریخ ۱۹ مرداد دارای کم‌ترین مقدار و ضریب تبیین معنی‌دار در روابط به‌دست آمده بود. در سال ۱۳۹۶ نیز بر اساس مقادیر به‌دست آمده جذر میانگین مربعات خطا، شاخص RVI به‌دست آمده از تصاویر ماهواره لندست-۸ در تاریخ ۱۷ مرداد کم‌ترین مقدار (۲۱۸۰۰۳) و ضریب تبیین معنی‌دار را نشان داد. شاخص RVI از نسبت نور مادون‌قرمز به نور قرمز به‌دست می‌آید که در سطح کاملاً صاف برابر صفر است که با رشد گیاه مقدار آن افزایش می‌یابد (Kim & Van Zyl, 2009). در این شاخص امواج الکترومغناطیسی منعکس

جدول ۱- روابط شاخص‌های گیاهی
Table 1- Vegetation Indices relationships.

علامت	رابطه	منبع
Symbol	Formula	Reference
شاخص گیاهی تبدیل شده Transformed vegetation index	TVI $\sqrt{\frac{b_{NIR} - b_{RED}}{(b_{NIR} + b_{RED}) + 0.5}}$	Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al. (2015)
شاخص گیاهی نسبت Ratio vegetation index	RVI $\frac{b_{NIR}}{b_{RED}}$	Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al. (2015)
شاخص گیاهی خاک تنظیم شده Soil-adjusted vegetation index	SAVI $\left[\frac{b_{NIR} - b_{RED}}{b_{NIR} + b_{RED} + L} \right] \times (1 + L)$	Badsar (2014)
شاخص گیاهی تغییر یافته منظم شده خاک transformed soil-adjusted vegetation index	TSAVI $\frac{a \times (b_{NIR} - a \times b_{RED} - b)}{a \times b_{NIR} + b_{RED} - a \times b}$	Ren et al. (2018)
شاخص گیاهی عمودی Perpendicular vegetation index	PVI $\frac{b_{NIR} - a \times b_{RED} - b}{\sqrt{1 + a^2}}$	Ren et al. (2018)
شاخص تفاضل آبی نرمال شده Normalized difference water index	NDWI $(b_{NIR} - b_{Green}) / (b_{NIR} + b_{Green})$	Zolekar & Bhagat (2015)
شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی Normalized difference vegetation index	NDVI $\frac{b_{NIR} - b_{RED}}{b_{NIR} + b_{RED}}$	Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al. (2015)
شاخص تفاضل گیاه Difference vegetation index	DVI $b_{NIR} - b_{RED}$	Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al. (2015)

b_{RED}: باند قرمز، b_{NIR}: باند مادون‌قرمز نزدیک، b_{Green}: باند سبز، L: عامل تنظیم برای کاهش اثر خاک روی پوشش گیاهی می‌باشد که دارای دو مقدار ۰/۵ و ۱ می‌باشد. ۰/۵ برای تراکم پوشش گیاهی متوسط و ۱ برای مناطق با پوشش گیاهی کم‌تراکم. عامل تصحیح خاک ۰/۵ در نظر گرفته شد (Huete, 1988).
b_{RED}: Red band, b_{NIR}: Near infrared band, b_{Green}: Green band, L: Adjustment factor to reduce the effect of soil on vegetation, which has two values of 0.5 and 1. 0.5 for medium vegetation density and 1 for areas with low vegetation density. Soil adjustment factor was considered 0.5 (Huete, 1988).

جدول ۲- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای دریافت شده

Table 2- Details of received satellite images

ماهواره	سنجنده	تاریخ	مسیر	ردیف	درصد ابرناکی
Satellite	Sensor	Date	Path	Row	Cloud percent
(Landsat 8) ۸	OLI	۲۹ خرداد (June 18, 2016)	166	034	2.38
(Landsat 8) ۸	OLI	۱۹ مرداد (August 9, 2016)	166	034	0.24
(Landsat 8) ۸	OLI	۳۱ مرداد (August 21, 2016)	166	034	0
(Landsat 8) ۸	OLI	۱ مرداد (July 23, 2017)	166	034	0.02
(Landsat 8) ۸	OLI	۱۷ مرداد (August 8, 2017)	166	034	0
ماهواره	سنجنده	تاریخ	سطح	شماره ردیف	درصد ابرناکی
Satellite	Sensor	Date	Platform	Tile number	Cloud percent
(Sentinel 2) ۲	MSI	۹ تیر (June 30, 2017)	SENTINEL-2B	T39SUB	0
(Sentinel 2) ۲	MSI	۲۲ شهریور (September 13, 2017)	SENTINEL-2B	T39SUB	1.24

جدول ۳- مشخصات باندهای مورد استفاده در تصاویر ماهواره‌ای
Table 3- Characteristics of bands used in satellite imagery

باند Band	ماهواره Satellite	شماره باند Band number	طول موج Band number (μm)	منبع Reference	ماهواره Satellite (μm)	شماره باند Band number	طول موج Band number (μm)	منبع Reference
سبز Green	لندست ۸ (Landsat 8)	3	0.533-0.590		سنتینل ۲- (Sentinel 2)	3	0.533-0.590	
قرمز Red	لندست ۸ (Landsat 8)	4	0.636-0.673	(a)	سنتینل ۲- (Sentinel 2)	4	0.636-0.673	(b)
مادون قرمز Infrared	لندست ۸ (Landsat 8)	5	0.851-0.879		سنتینل ۲- (Sentinel 2)	8	0.851-0.879	

(a): https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook.pdf

(b): https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook

شهرستان شفت (۳۹۹۱ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (شکل ۳). همچنین در سال ۱۳۹۶ بر اساس مدل منتخب، عملکرد واقعی دارای دامنه ۳۲۷۰ تا ۴۷۱۴ کیلوگرم در هکتار بوده است که بیشترین مقدار به شهرستان تالش (۴۳۱۶ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقدار به شهرستان شفت (۴۲۶۰ کیلوگرم در هکتار) تعلق داشت (شکل ۳).

بررسی عملکرد واقعی با استفاده از روش زمین‌آمار

بررسی ساختار مکانی داده‌ها: به منظور بررسی ساختار مکانی داده‌های مورد استفاده، ابتدا مناسب‌ترین مدل به داده‌ها برازش داده شد (شکل ۴) و سپس نسبت بین اثر قطعه‌ای به سقف مورد بررسی قرار گرفت. وقتی این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد متغیر مورد نظر ساختار مکانی قوی دارد، اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد داده‌ها ساختار مکانی متوسط دارند و زمانی که بیشتر از ۷۵ درصد باشد ساختار مکانی ضعیفی دارند (Cambardella et al., 1994). نسبت اثر قطعه‌ای به سقف در متغیر عملکرد دانه (۶۹ و ۲۷ به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶) بیان‌گر همبستگی مکانی متوسط و مناسب این متغیر است (جدول ۶). مقدار کمتر نسبت اثر قطعه‌ای به سقف و دامنه تأثیر بالاتر در سال ۱۳۹۶ نسبت به سال ۱۳۹۵ نشان‌دهنده همبستگی مکانی بهتر داده‌ها در سال ۱۳۹۶ است (جدول ۶؛ شکل ۴). همچنین اثر قطعه‌ای پایین‌تر در سال ۱۳۹۶ نشان‌دهنده پایین‌تر بودن خطاهای اندازه‌گیری در منابع تغییر مکانی در فواصل کوچک‌تر نسبت به نقاط سال ۱۳۹۵ است (جدول ۶؛ شکل ۴).

سیال و همکاران (Siyal et al., 2015) در پاکستان با استفاده از شاخص RVI حاصل از تصاویر دوره هشت ساله سنجنده ETM + مقدار عملکرد برنج را در سال ۲۰۱۳ تخمین زدند. مدل رگرسیونی پیشنهادی آنان بین مقدار محصول برداشت شده و مقدار شاخص‌های RVI در اوج دوره سبزیگی گیاه با ضریب تبیین معنی‌دار برای تخمین عملکرد به کار گرفته شد. کاربرد شاخص RVI برای پیش‌بینی عملکرد برنج (Yaghouti et al., 2019; Wang et al., 2019)، رابطه معنی‌دار شاخص RVI با محتوای آب پوشش گیاهی گندم (Kim et al., 2013)، همبستگی بالای بین تجمع نیتروژن برگ گندم و برنج با شاخص RVI (Zhu et al., 2008)، برآورد عملکرد و شپنه با استفاده از شاخص RVI (Gutierrez et al., 2012)، همبستگی بالای شاخص RVI با عملکرد روغن پالم (Balasundram et al., 2013) و کاربرد شاخص RVI در بررسی رشد و عملکرد نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) در ضریب تبیین معنی‌دار (Simoes et al., 2005) گزارش شده است. رابطه رگرسیونی عملکرد ثبت شده و پیش‌بینی شده با کمک شاخص RVI در ۸۰ نقطه آزمون در سال ۱۳۹۵ و ۸۶ نقطه آزمون در سال ۱۳۹۶ نیز رابطه معنی‌دار بین شاخص RVI و عملکرد دانه برنج را نشان داد (شکل ۲). شکل ۳، عملکرد واقعی برآورد شده برای استان گیلان را بر اساس مدل منتخب نشان می‌دهد. در سال ۱۳۹۵ بر اساس شاخص RVI عملکرد واقعی در اراضی زیر کشت برنج دارای دامنه ۲۷۵۵ تا ۴۶۵۰ کیلوگرم بر هکتار بوده است که بیشترین آن در شهرستان آستارا (۴۱۲۵ کیلوگرم در هکتار) و کمترین آن در

جدول ۴- روابط خطی بین شاخص‌های گیاهی و عملکرد در سال ۱۳۹۵
Table 4- The linear relationships between the vegetation indices and yield in 2016

سال Year	ماهواره Satellite	تعداد نقاط No. of points	تاریخ تصویر Image acquiring date	شاخص Index	معادله Function	ضریب تبیین Coefficient of determination	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (percent)	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (kg.ha ⁻¹)
2016	Landsat 8 لندست ۸	309	۲۹ خرداد (June 18)	NDVI	1098.5x + 3619.1	0.06**	5.72	270.0456
		309	۲۹ خرداد (June 18)	NDWI	1135.1x + 3676.6	0.05**	5.71	270.6862
		309	۲۹ خرداد (June 18)	DVI	14.953x + 4036.6	0.07**	5.72	270.0139
		309	۲۹ خرداد (June 18)	TVI	2001.1x + 2160.7	0.06**	5.72	270.0135
		309	۲۹ خرداد (June 18)	PVI	1098.5x + 3619.1	0.01ns	5.70	271.3446
		309	۲۹ خرداد (June 18)	RVI	-962.43x + 4472.2	0.06**	5.72	269.9875
		309	۲۹ خرداد (June 18)	SAVI	1652.6x + 3619.8	0.06**	5.72	270.0503
		309	۲۹ خرداد (June 18)	TSAVI	13.044x + 3594.5	0.02*	5.69	271.9201
	Landsat 8 لندست ۸	309	۱۹ مرداد (August 9)	NDVI	2655.7x + 3154.3	0.36**	5.98	254.4204
		309	۱۹ مرداد (August 9)	NDWI	3142.4x + 3254.5	0.35**	5.98	254.3260
		309	۱۹ مرداد (August 9)	DVI	25.864x + 4049.2	0.34**	5.96	255.5671
		309	۱۹ مرداد (August 9)	TVI	4765.2x - 306.44	0.36**	5.98	254.1094
		309	۱۹ مرداد (August 9)	PVI	-17.775x + 4111.3	0.04*	5.72	269.8164
		309	۱۹ مرداد (August 9)	RVI	-2244.4x + 5171.4	0.37**	5.99	253.7387
		309	۱۹ مرداد (August 9)	SAVI	3995.7x + 3154.8	0.36**	5.98	254.4223
		309	۱۹ مرداد (August 9)	TSAVI	34.342x + 2481.6	0.27**	5.90	258.9876
	Landsat 8 لندست ۸	309	۳۱ مرداد (August 21)	NDVI	1720.5x + 3588.5	0.14**	5.78	266.6810
		309	۳۱ مرداد (August 21)	NDWI	2516.7x + 3527.4	0.20**	5.82	263.8540
		309	۳۱ مرداد (August 21)	DVI	15.369x + 4101.6	0.12**	5.75	268.1043
		309	۳۱ مرداد (August 21)	TVI	2774.4x + 1527.6	0.18**	5.87	261.2683
		309	۳۱ مرداد (August 21)	PVI	-14.447x + 4108.8	0.03**	5.68	272.5188
		309	۳۱ مرداد (August 21)	RVI	29.701x + 2700.8	0.18**	5.88	260.7151
		309	۳۱ مرداد (August 21)	SAVI	2323.4x + 3542.6	0.17**	5.86	261.6838
		309	۳۱ مرداد (August 21)	TSAVI	-1306.9x + 4718.3	0.18**	5.86	261.7527

*، ** و ns: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیر معنی دار.

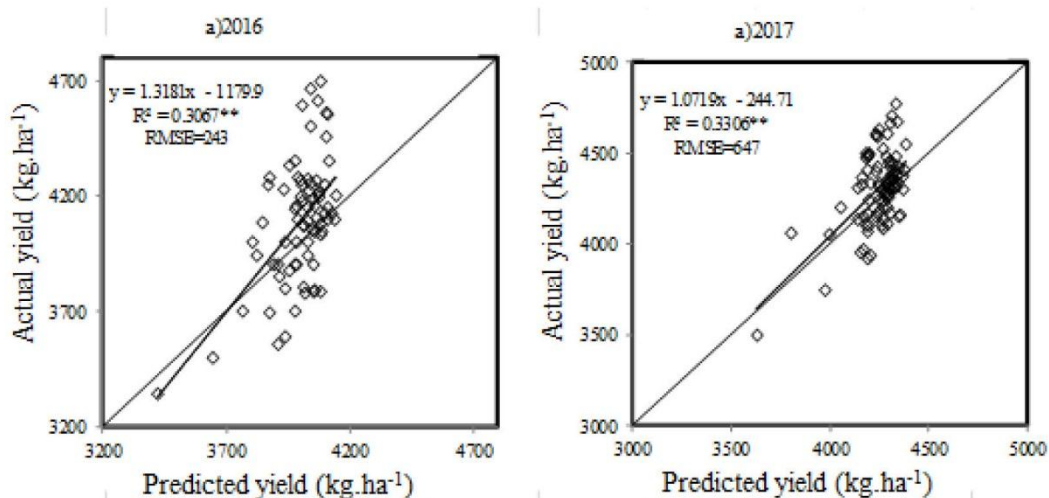
*, **, and ns: significant at the level of 1% and 5% probability and non-significant, respectively.

جدول ۵- روابط خطی بین شاخص‌های گیاهی و عملکرد در سال ۱۳۹۶
 Table 5- The linear relationships between the vegetation indices and yield in 2017

سال Year	ماهواره Satellite	تعداد نقاط Number of points	تاریخ تصویر Image acquiring date	شاخص Index	معادله Function	ضریب تبیین Coefficient of determination	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (percent)	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (kg.ha ⁻¹)
2017	Sentinel-2 سنیتل-۲	350	۹ تیر (June 30)	NDVI	313.73x + 4045.9	0.04**	3.95	198.4866
		350	۹ تیر (June 30)	NDWI	462.64x + 4018.5	0.06**	4.00	195.7066
		350	۹ تیر (June 30)	DVI	9.6155x + 4332.2	0.02**	3.93	199.8453
		350	۹ تیر (June 30)	TVI	637.87x + 3566.9	0.04**	3.96	198.2976
		350	۹ تیر (June 30)	PVI	-3.942x + 4240.6	0.001ns	3.92	200.4158
		350	۹ تیر (June 30)	RVI	-361.2x + 4329	0.05**	3.96	197.9668
		350	۹ تیر (June 30)	SAVI	474.06x + 4051.9	0.05**	3.96	197.8531
		350	۹ تیر (June 30)	TSAVI	-7.0839x + 4225.2	0.001ns	3.92	200.5732
2017	Sentinel-2 سنیتل-۲	350	۲۲ شهریور (September 13)	NDVI	36.548x + 4217.9	0.001ns	3.92	200.46
		350	۲۲ شهریور (September 13)	NDWI	-5.656x + 4232.2	0.001ns	3.92	200.31
		350	۲۲ شهریور (September 13)	DVI	1.0101x + 4230.7	0.001ns	3.92	200.58
		350	۲۲ شهریور (September 13)	TVI	65.075x + 4170.9	0.001ns	3.92	200.4839
		350	۲۲ شهریور (September 13)	PVI	7.5764x + 4189.2	0.03**	3.97	197.4
		350	۲۲ شهریور (September 13)	RVI	-30.266x + 4245.9	0.001ns	3.92	200.51
		350	۲۲ شهریور (September 13)	SAVI	148.71x + 4164.5	0.001ns	3.92	200.55
		350	۲۲ شهریور (September 13)	TSAVI	3.5276x + 4176.7	0.03**	3.99	196.26
2017	Landsat 8 لندست ۸	350	۱ مرداد (July 23)	NDVI	584.22x + 3893.5	0.15**	4.05	192.1951
		350	۱ مرداد (July 23)	NDWI	777.99x + 3877.4	0.15**	4.05	192.3069
		350	۱ مرداد (July 23)	DVI	2.3753x + 3859.1	0.18**	4.12	188.1027
		350	۱ مرداد (July 23)	TVI	1155.4x + 3034.9	0.15**	4.06	191.8223
		350	۱ مرداد (July 23)	PVI	3.2348x + 4062.4	0.10**	3.99	196.314
		350	۱ مرداد (July 23)	RVI	-622.18x + 4405.9	0.16**	4.07	191.2944
		350	۱ مرداد (July 23)	SAVI	878.31x + 3893.3	0.15**	4.05	192.1861
		350	۱ مرداد (July 23)	TSAVI	7.2577x + 3427	0.16**	4.13	187.1347
2017	Landsat 8 لندست ۸	350	۱۷ مرداد (August 8)	NDVI	1549.3x + 3761.1	0.32**	4.18	183.4421
		350	۱۷ مرداد (August 8)	NDWI	1951.4x + 3757.9	0.31**	4.19	183.0952
		350	۱۷ مرداد (August 8)	DVI	16.667x + 4274.2	0.32**	4.18	183.8923
		350	۱۷ مرداد (August 8)	TVI	2731.9x + 1785.8	0.32**	4.19	183.2481
		350	۱۷ مرداد (August 8)	PVI	-15.275x + 4314.5	0.08**	3.94	199.1917
		350	۱۷ مرداد (August 8)	RVI	-1254.3x + 4909.5	0.33**	4.19	183.0367
		350	۱۷ مرداد (August 8)	SAVI	2332.4x + 3761.2	0.32**	4.18	198.4866
		350	۱۷ مرداد (August 8)	TSAVI	22.443x + 3332.1	0.21**	4.13	195.7066

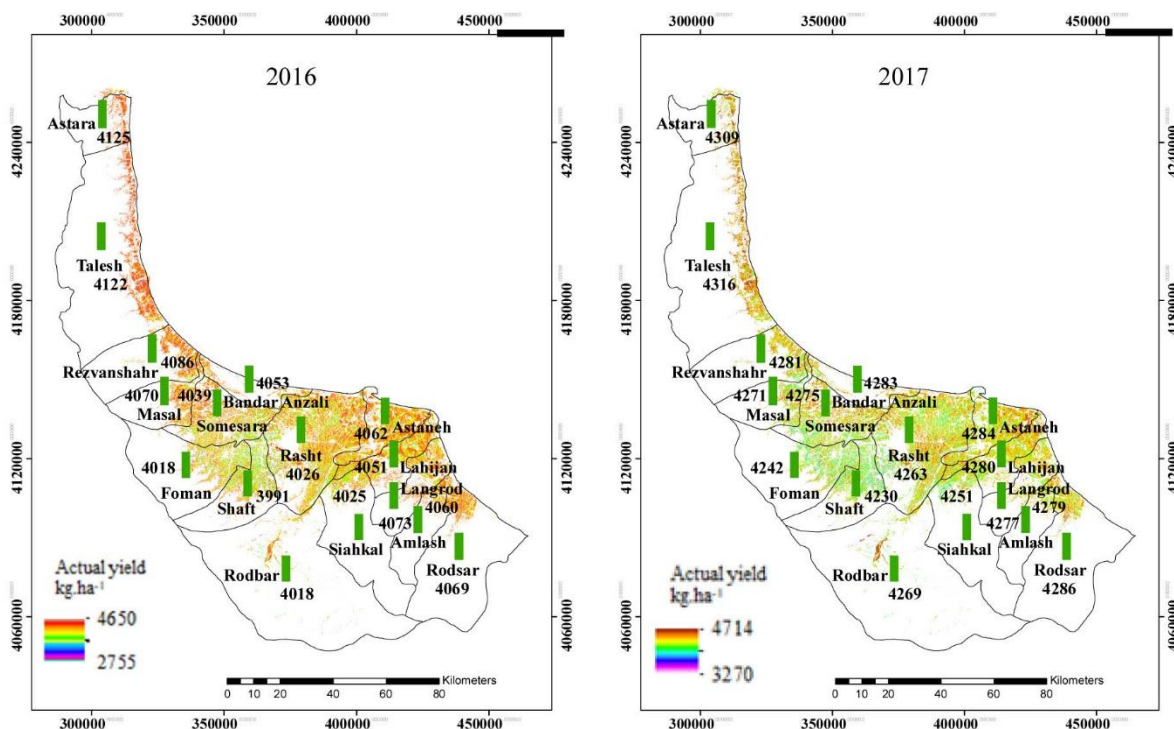
*, **, ns: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیر معنی دار.

*, **, and ns: significant at the level of 1% and 5% probability and non-significant, respectively.



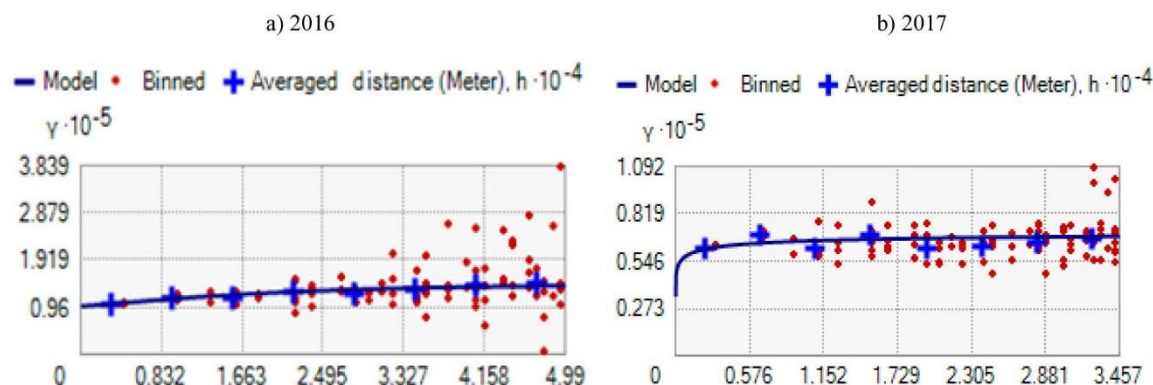
شکل ۲- رابطه رگرسیونی بین عملکرد دانه ثبت شده و پیش‌بینی شده (الف) با کمک شاخص RVI در ۸۰ نقطه آزمون در سال ۱۳۹۵ و (ب) با کمک شاخص RVI در ۸۶ نقطه آزمون در سال ۱۳۹۶

Fig. 2 - Regression relationship between recorded and predicted grain yield a) with the help of RVI index at 80 test points in 2016 and b) with the help of RVI index at 86 test points in 2017



شکل ۳- نقشه عملکرد واقعی استان گیلان بر اساس مدل منتخب مبتنی بر شاخص گیاهی RVI در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶

Fig. 3- Actual yield map of Gilan province based on the selected model based on the RVI in 2016 and 2017



شکل ۴- نیم‌تغییرنماهای تجربی و مدل برازش داده به آن‌ها با روش-مدل کریجینگ معمولی stable برای عملکرد دانه در الف) سال ۱۳۹۵ و ب) سال ۱۳۹۶

Fig. 4- Experimental semi-variograms and the model fitted to them by the ordinary kriging stable method-model for grain yield in a) 2016 and b) 2017

* خط آبی مدل نیم‌تغییرنما برازش داده شده نقاط، نقاط قرمز نقاط جمع‌آوری شده، علامت‌های مثبت معادل میانگین نقاط نزدیک به هم جهت جلوگیری از تداخل نتایج است.
* The blue line of the semi-variable model of the fitted points, the red dots represent the collected points, and the positive signs are equal to the average of the points close to each other to prevent the results from interfering.

جدول ۶- مؤلفه‌های نیم‌تغییرنماهای مورد استفاده در مطالعه برای بررسی ساختار مکانی داده‌های عملکرد برنج در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶
Table 6- Parameters of semi-variograms used in the study to investigate the spatial structure of rice yield data in 2016 and 2017

سال Year	مدل Model	اثر قطعه‌ای Nugget effect	سقف Sill	دامنه تأثیر Range	اثر قطعه‌ای به سقف Nugget Effect to Sill (percent)
2016	ثابت (Stable)	56744	39261	350	69
2017	ثابت (Stable)	39803	10692	20249	27

مطلوب کریجینگ معمولی در برآورد نوسانات عملکرد مزارع گندم (Nasiri Mahalati et al., 2016) گزارش شده است. این در حالی است که اژیرابی و همکاران (Azhirabi et al., 2019) در برآورد عملکرد گندم در مزرعه نمونه ارتش آق‌قلا، برتری مدل‌های کریجینگ جهانی نسبت به کریجینگ معمولی را گزارش نمودند. تسفاهونگن و همکاران (Tesfahunegn et al., 2011) علت برتری کریجینگ معمولی نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی را ارائه بهترین نتایج جهت درون‌یابی فواصل نمونه‌گیری نشده و به حداقل رساندن اثر نقاط پرت روی نتایج درون‌یابی گزارش نمودند. رابطه رگرسیونی عملکرد ثبت شده و پیش‌بینی شده با مدل ثابت در روش کریجینگ معمولی ۸۰ نقطه تست در سال ۱۳۹۵ و ۸۶ نقطه تست در سال ۱۳۹۶ نیز رابطه معنی‌دار بین مقادیر درون‌یابی شده در روش کریجینگ و عملکرد دانه برنج را نشان داد (شکل ۵). شکل ۶ عملکرد واقعی برآورد شده برای استان گیلان را بر اساس روش-مدل منتخب نشان می‌دهد.

روابط خطی به‌دست آمده، ضریب تبیین و ضریب تغییرات مرتبط با ۳۳ مدل درون‌یابی مورد مطالعه و عملکرد در سال ۱۳۹۵ در جدول ۷ نشان داده شد. در سال ۱۳۹۵ بر اساس کم‌ترین جذر میانگین مربعات خطا (۳۰۱/۵۵) و ضریب تبیین معنی‌دار، روش-مدل کریجینگ ساده J-Bessel-بهبود یافته در روش-مدل در درون‌یابی عملکرد دانه بود، اما به‌دلیل عدم مشاهده روند مشخص از روش-مدل کریجینگ معمولی-Stable جهت درون‌یابی عملکرد استفاده شد (جدول ۷). همچنین در سال ۱۳۹۶ بر اساس کم‌ترین جذر میانگین مربعات خطا (۳۰۱/۵۵) و ضریب تبیین معنی‌دار، روش-مدل کریجینگ معمولی-Stable، بیش‌ترین دقت را در درون‌یابی عملکرد دانه برنج داشته است (جدول ۸).
نتایج این پژوهش برتری کریجینگ معمولی نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی شامل کریجینگ جهانی و کریجینگ ساده را نشان داد. در تحقیقات دیگر نیز کاربرد کریجینگ معمولی در درون‌یابی عملکرد برنج و خصوصیات خاک در جنوب چین (Liu et al., 2014) و کاربرد

جدول ۷- نتایج ارزیابی ۳۳ روش-مدل مورد استفاده برای درون‌یابی متغیر عملکرد دانه برنج در استان گیلان [کریجینگ معمولی (OK)، ساده (SK) و جهانی (UK)] بر اساس جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در سال ۱۳۹۵

Table 7- Results of evaluation of 33 model-methods used for interpolation of rice grain yield variable in Guilan province [Ordinary (OK), Simple (SK) and Universal (UK)] based on the root mean square error (RMSE) in 2016

سال Year	روش درون‌یابی Interpolation method	مدل Model	معادله Function	ضریب تبیین Coefficient of determination	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (percent)	تعداد نقاط Number of points	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (kg ha ⁻¹)
2016	OK	ثابت (Stable)	$0.0980 * x + 3601.8723$	0.057**	3.74	320	319.66
	OK	(J-Bessel)	$0.0943 * x + 3608.9441$	0.057**	3.77	320	323.93
	OK	(K-Bessel)	$0.0501 * x + 3796.4241$	0.042**	2.90	320	295.42
	OK	اثر روزنه‌ای (Hole Effect)	$0.0944 * x + 3607.8357$	0.058**	3.65	320	309.91
	OK	درجه دو منطقی (rotional quadric)	$0.1083 * x + 3555.4296$	0.055**	3.73	320	324.47
	OK	گوسی (Gaussian)	$0.0980 * x + 3601.8723$	0.057**	3.74	320	317.13
	OK	نمایی (Exponential)	$0.0069 * x + 3959.7759$	0.031**	2.70	320	299.93
	OK	کروی پنج وجهی (Pentaspheical)	$0.0058 * x + 3964.7214$	0.030**	2.69	320	299.78
	OK	کروی چهاروجهی (Tetraspheical)	$0.0058 * x + 3964.6454$	0.030**	2.69	320	300.54
	OK	کروی (Spherical)	$0.0080 * x + 3956.6498$	0.030**	2.68	320	301.12
OK	دایره‌ای (Circular)	$0.0081 * x + 3956.6430$	0.030**	2.67	320	301.77	
2016	SK	ثابت (Stable)	$0.0311 * x + 3890.2568$	0.095**	2.58	320	302.42
	SK	(J-Bessel)	$0.0903 * x + 3657.0910$	0.12**	2.65	320	301.05
	SK	(K-Bessel)	$0.0280 * x + 3902.2152$	0.094**	2.57	320	302.5
	SK	اثر روزنه‌ای (Hole Effect)	$0.0525 * x + 3802.9399$	0.11**	2.72	320	299.83
	SK	درجه دو منطقی (rotional quadric)	$0.0290 * x + 3897.8376$	0.086**	2.42	320	303.84
	SK	گوسی (Gaussian)	$0.0311 * x + 3890.2568$	0.095**	2.58	320	302.38
	SK	نمایی (Exponential)	$0.0288 * x + 3898.4861$	0.082**	2.44	320	304.52
	SK	کروی پنج وجهی (Pentaspheical)	$0.0318 * x + 3886.5833$	0.091**	2.58	320	302.98
	SK	کروی چهاروجهی (Tetraspheical)	$0.0323 * x + 3884.5562$	0.092**	2.59	320	302.88
	SK	کروی (Spherical)	$0.0331 * x + 3881.4118$	0.093**	2.60	320	302.74
SK	دایره‌ای (Circular)	$0.0345 * x + 3875.5539$	0.094**	2.61	320	302.5	
UK	UK	ثابت (Stable)	$0.0432 * x + 3823.5528$	0.045**	2.81	320	294.06
	UK	(J-Bessel)	$0.0942 * x + 3609.2470$	0.060**	3.77	320	323.65
	UK	(K-Bessel)	$0.0438 * x + 3820.6934$	0.044**	2.87	320	290.17
	UK	اثر روزنه‌ای (Hole Effect)	$0.0893 * x + 3627.2377$	0.058**	3.65	320	309.61
	UK	درجه دو منطقی (rotional quadric)	$0.0084 * x + 3955.4801$	0.030**	2.65	320	297.59

2016	UK	گوسی (Gaussian)	$0.0979 * x + 3602.1247$	0.057**	3.74	320	319.44
	UK	نمایی (Exponential)	$0.0525 * x + 3785.6460$	0.033**	2.75	320	296.58
	UK	کروی پنج وجهی (Pentaspheical)	$0.0079 * x + 3957.5271$	0.030**	2.65	320	297.89
	UK	کروی چهاروجهی (Tetraspheical)	$0.0079 * x + 3957.5073$	0.030**	2.65	320	298.084
	UK	کروی (Spherical)	$0.0079 * x + 3957.5018$	0.029**	2.65	320	298.24
	UK	دایره‌ای (Circular)	$0.0080 * x + 3957.4544$	0.029**	2.65	320	298.04

*, **, و ns: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیر معنی دار.

*, **, and ns: significant at the level of 1% and 5% probability and non-significant, respectively.

جدول ۸- نتایج ارزیابی ۳۳ روش-مدل مورد استفاده برای درون‌یابی متغیر عملکرد دانه برنج در استان گیلان [کریجینگ معمولی (OK)، ساده (SK) و جهانی (UK)] بر اساس جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در سال ۱۳۹۶

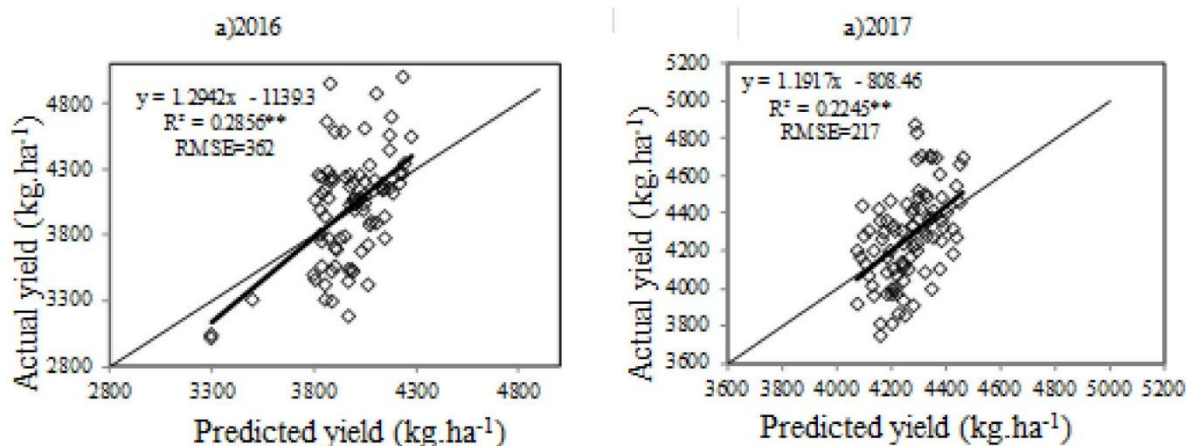
Table 8- Results of evaluation of 33 model-methods used for interpolation of rice grain yield variable in Guilan province [Ordinary (OK), Simple (SK) and Universal (UK)] based on the root mean square error (RMSE) in 2017

سال Year	روش درون‌یابی Interpolation method	مدل Model	معادله Function	ضریب تبیین Coefficient of Determination	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (percent)	تعداد نقاط Number of points	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (kg.ha ⁻¹)
2017	OK	ثابت (Stable)	$0.2064 * x + 3365.6888$	0.127**	2.38	340	227.51
	OK	(J-Bessel)	$0.2067 * x + 3369.1511$	0.117**	2.40	340	222.76
	OK	(K-Bessel)	$0.2119 * x + 3346.5929$	0.138**	2.47	340	223.21
	OK	اثر روزنه‌ای (Hole Effect)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	229.4
	OK	درجه دو منطقی (rotional quadric)	$0.2083 * x + 3361.9908$	0.12**	2.41	340	226.27
	OK	گوسی (Gaussian)	$0.1997 * x + 3399.1626$	0.117**	2.41	340	225.68
	OK	نمایی (Exponential)	$0.2013 * x + 3389.1025$	0.125**	2.43	340	218.82
	OK	کروی پنج وجهی (Pentaspheical)	$0.1988 * x + 3402.1933$	0.123**	2.42	340	218.54
	OK	کروی چهاروجهی (Tetraspheical)	$0.2014 * x + 3391.9521$	0.122**	2.41	340	218.66
	OK	کروی (Spherical)	$0.2007 * x + 3394.6525$	0.122**	2.41	340	218.88
	OK	دایره‌ای (Circular)	$0.2015 * x + 3391.1550$	0.121**	2.41	340	218.97
2017	SK	ثابت (Stable)	$0.1049 * x + 3796.2375$	0.123**	1.51	340	227.68
	SK	(J-Bessel)	$0.1067 * x + 3789.1075$	0.105**	1.23	340	230.95
	SK	(K-Bessel)	$0.1180 * x + 3744.2340$	0.121**	1.46	340	228.1
	SK	اثر روزنه‌ای (Hole Effect)	$0.1063 * x + 3792.0311$	0.105**	1.17	340	231.57
	SK	درجه دو منطقی (rotional quadric)	$0.1265 * x + 3708.7952$	0.103**	1.53	340	226.23
	SK	گوسی (Gaussian)	$0.1137 * x + 3762.0492$	0.101**	1.31	340	230.05
	SK	نمایی (Exponential)	$0.1230 * x + 3724.2304$	0.108**	1.46	340	227.64
	SK	کروی پنج وجهی (Pentaspheical)	$0.1088 * x + 3782.6882$	0.105**	1.37	340	229.06

	SK	کروی چهاروجهی (Tetraspherical)	$0.1112 * x + 3772.0524$	0.105**	1.36	340	229.19
	SK	کروی (Spherical)	$0.1121 * x + 3768.3034$	0.105**	1.35	340	229.34
	SK	دایره‌ای (Circular)	$0.1110 * x + 3772.6714$	0.104**	1.35	340	229.41
	UK	ثابت (Stable)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	(J-Bessel)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	(K-Bessel)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	اثر روزنه‌ای (Hole Effect)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	درجه دو منطقی (rotional quadric)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
2017	UK	گوسی (Gaussian)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	نمایی (Exponential)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	کروی پنج وجهی (Pentaspherical)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	کروی چهاروجهی (Tetraspherical)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	کروی (Spherical)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74
	UK	دایره‌ای (Circular)	$0.1744 * x + 3505.9224$	0.118**	2.41	340	208.74

*, **, و ns: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیر معنی دار.

**, *, and ns: significant at the level of 1% and 5% probability and non-significant, respectively.



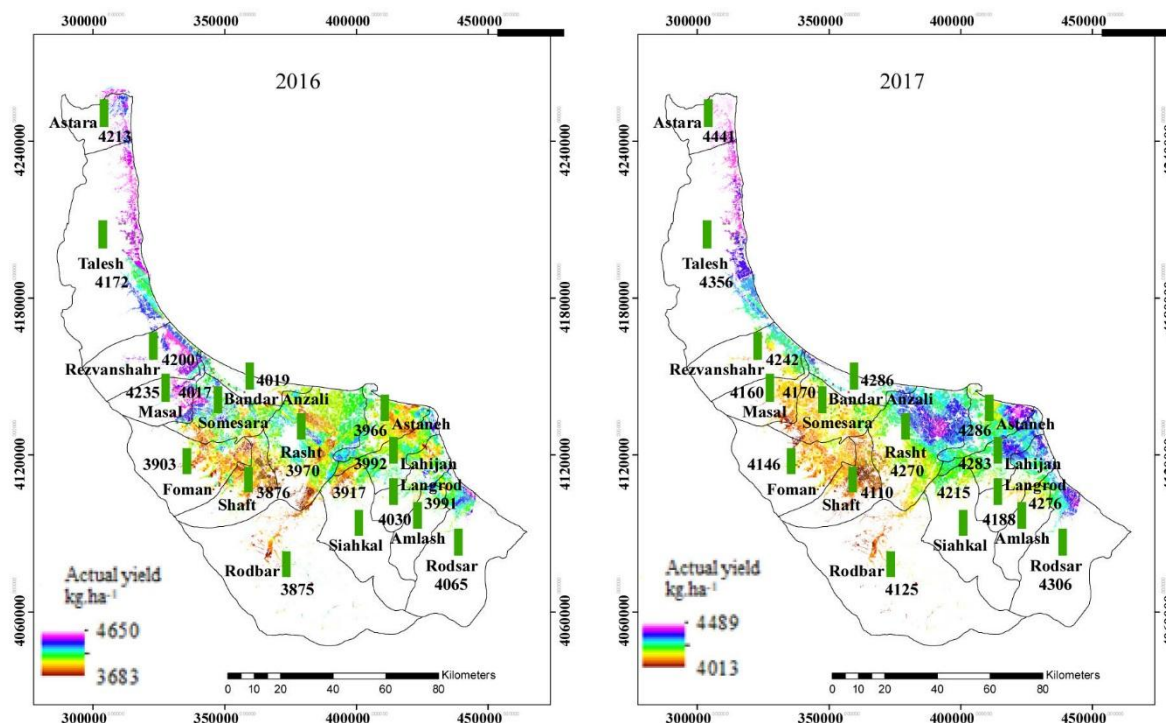
شکل ۵- رابطه رگرسیونی بین عملکرد ثبت شده و پیش‌بینی شده الف) با روش - مدل کریجینگ معمولی Stable در ۸۰ نقطه تست در سال ۱۳۹۵ و ب) با روش - مدل کریجینگ معمولی Stable در ۸۶ نقطه تست در سال ۱۳۹۶

Fig. 5- Regression relationship between recorded and predicted yield a) with the stable ordinary kriging method - model at 80 test points in 2016 and b) with the stable ordinary kriging method - model at 86 test points in 2017

رودبار (۳۸۷۵ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (شکل ۶). دامنه عملکرد واقعی در سال ۱۳۹۶ بین ۴۰۱۳ تا ۴۴۸۹ کیلوگرم در هکتار تغییرات داشت که بیشترین آن در شهرستان آستارا (۴۴۴۱ کیلوگرم در هکتار)

در سال ۱۳۹۵ بر اساس نتایج درون‌یابی، عملکرد واقعی دارای دامنه ۳۶۸۳ تا ۴۶۵۰ کیلوگرم بر هکتار بوده است که بیشترین آن در شهرستان ماسال (۴۲۳۵ کیلوگرم در هکتار) و کمترین آن در شهرستان

و کمترین آن در شهرستان شفت (۴۱۱۰ کیلوگرم در هکتار) تعیین شد (شکل ۶).



شکل ۶- نقشه عملکرد واقعی استان بر اساس روش-مدل کریجینگ معمولی Stable در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶
Fig. 6- Actual yield map of the province based on the stable ordinary kriging method - model in 2016 and 2017

بود. تفاوت به‌دست آمده در دقت دو روش زمین‌آمار و مدل-روش‌های مبتنی بر سنجش از دور می‌تواند به‌دلیل تفاوت اساس دو روش در برآورد متغیرها باشد. کریجینگ یک روش زمین‌آمار برای درون‌یابی داده‌ها بر اساس واریانس مکانی است که به هر دو معیار فاصله و میزان تغییرات در زمان پیش‌بینی مقدار مجهول توجه می‌کند (Khosravi et al., 2014). این در حالی است که در روش‌های مبتنی بر سنجش از دور عموماً شاخص‌های گیاهی برای ارزیابی یک یا چند متغیر خاص و بر مبنای ویژگی‌ها و رفتارهای طبیعی پدیده‌ها توسعه داده می‌شوند. بسیاری از شاخص‌های گیاهی بر مبنای بازتاب در محدوده نور قرمز و مادون‌قرمز نزدیک قرار داشته و ترکیبی جبری از این دو باند هستند (Bannari et al., 2008; Elvidge & Chen, 1995). بر اساس روش مبتنی بر سنجش از دور، داده‌های باندهای طیفی مختلف می‌توانند درصد پوشش متغیرهایی مانند گیاهان، زیست‌توده و شاخص سطح برگ را در هر واحد سلول تصاویر و با دقت مطلوب پیش‌بینی نمایند (Sanaienejad et al., 2008). در این پژوهش، از داده‌های نمونه‌گیری شده توسط ناظرین برنج

مقایسه رهیافت‌های مبتنی بر سنجش از دور و زمین‌آمار و برآورد عملکرد واقعی

مقایسه روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار و شاخص‌های گیاهی به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای در برآورد عملکرد واقعی دانه برنج نشان داد که بر اساس جذر میانگین مربعات خطا شبیه‌سازی و ضریب تبیین به‌دست آمده بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده عملکرد، شاخص RVI حاصل از تصاویر ماهواره‌ای ۱۹ مرداد در سال ۱۳۹۵ و ۱۷ مرداد در سال ۱۳۹۶، به بهترین شکل مقادیر عملکرد برنج محدوده مورد مطالعه را برآورد کرده است (جدول‌های ۴، ۵، ۷ و ۸). محمدی احمد محمدی و همکاران (Mohammadi Ahmad Mahmoudi et al., 2015) در مقایسه روش زمین‌آمار و استفاده از داده‌های سنجش از دور به‌منظور پیش‌بینی عملکرد گندم در برخی از مراحل رشد در استان گلستان، در ارزیابی نقشه‌های عملکرد پیش‌بینی شده، برتری قاطع روش‌های مبتنی بر سنجش از دور را نسبت به زمین‌آمار نشان دادند. نتایج این پژوهش بیان‌گر قابلیت تصاویر ماهواره‌ای در پیش‌بینی عملکرد گندم در اواخر پنجه‌زنی با ۷۱۵ کیلوگرم در هکتار خطای برآورد

در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ استفاده شد که پراکنش نقاط نمونه-گیری شده در شکل ۱ نشان داده شده است. یکی از دلایل کاهش دقت روش کریجینگ در پیش‌بینی عملکرد دانه در محدوده مورد مطالعه می‌تواند تعداد نقاط نمونه ناکافی و بر اساس پراکنش نامناسب باشد که سبب می‌شود تا روش کریجینگ تغییرات عملکرد اراضی را با دقت کم‌تری پیش‌بینی نماید. ون‌گرونیگن و همکاران (Van Groenigen et al., 1999) گزارش کردند که الگوی مکانی نمونه‌گیری در روش زمین‌آمار می‌تواند یکی از دلایل مهم در به حداقل‌رسانی واریانس روش درون‌یابی کریجینگ باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اجرای نمونه‌گیری در سطح استان با استفاده از الگوی مشخص با به‌کارگیری روش‌هایی مانند اجرای الگوی fishnet در ArcGIS در محدوده کاربری تخصیص یافته به کشت برنج، می‌تواند سبب افزایش دقت درون‌یابی با روش زمین‌آمار گردد.

نتیجه‌گیری

رهیافت‌های زمین‌آمار و مبتنی بر سنجش از دور از روش‌های پرکاربرد در پیش‌بینی عملکرد در یک محدوده می‌باشند که می‌توانند نتایج کاربردی و مفیدی از موجودیت عملکرد در یک منطقه جهت اتخاذ سیاست‌گذاری کلان در تولید را فراهم نمایند. نتایج نشان داد که پیش‌عملکرد در سطح استان گیلان، می‌تواند اطلاعات مفیدی در جهت پیش‌بینی میزان عملکرد در کل استان را فراهم نماید. در مقایسه روش زمین‌آمار و روش-مدل‌های مبتنی بر سنجش از دور در پیش‌بینی عملکرد مزارع مشاهده شد که روش مبتنی بر سنجش از دور بر اساس نمونه‌گیری‌های انجام شده دقت بالاتری داشته است. روش زمین‌آمار و سنجش از دور دو روش متفاوت در برآورد یک متغیر در سطح بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده نقطه‌ای می‌باشد. روش زمین‌آمار روند تغییرات متغیر را بر اساس معادلات ریاضی پیش‌بینی می‌کند. این روند می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله تغییر آب و هوا، خصوصیات خاک مانند ماده آلی و حاصلخیزی و خصوصیات توپوگرافی قرار گیرد. همچنین استفاده از روش زمین‌آمار جهت اجرای یک درون‌یابی مطلوب

نیازمند نمونه‌گیری بسیار منظم می‌باشد که اغلب با توجه به کمبود امکانات امکان‌پذیر نمی‌باشد. روش سنجش از دور را می‌توان از این حیث مورد توجه قرار داد. زیرا روش سنجش از دور با توجه بر مبتنی بر انعکاس امواج الکترومغناطیس بودن، دارای مزایایی از جمله امکان برآورد متغیرها در مناطق با دسترسی دشوار و عدم تأثیرپذیری از تغییرات محیطی می‌باشد. مزیت این دو رویه در مطالعات آگرواکولوژیک در این است که امکان تعمیم نتایج به شکل رسترهای پیوسته را در مقیاس وسیع فراهم می‌کنند و در نتیجه، استفاده از این اطلاعات را در مدل‌های مکان‌مند تصمیم‌سازی^۱ ممکن می‌سازند. این روش‌ها به‌ویژه در شرایطی که هدف مقایسه نسبت‌ها و یا استفاده از شاخص‌های نسبی باشد در مقایسه با شرایطی که هدف تعیین مطلق مقادیر یک کمیت باشد بسیار کارآمد هستند و می‌توانند در حوزه مطالعات آگرواکولوژیک راهگشا باشند.

پیش‌بینی پیش از موعد برداشت بر اساس اطلاعات مستخرج از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از تصویر/تصاویر به‌دست آمده در ماه‌های خرداد و مرداد و سنجنده OLI ماهواره لندست-۸ در استان گیلان می‌تواند به‌عنوان مبنای پیش‌بینی‌های عملکرد این گیاه در سال‌های آتی مدنظر قرار گیرد. چنین مطالعاتی در استان گیلان، با توجه به سهم استان گیلان در تأمین برنج کشور، نقش مؤثری در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در خصوص عرضه و تقاضای برنج در سطوح کلان خواهد داشت. همچنین نتایج نشان داد که نمونه‌گیری انجام شده در محدوده مورد مطالعه بر اساس الگوی مکانی منظم (سیستماتیک) موجب افزایش دقت روش‌های زمین‌آمار در تخمین عملکرد منطقه‌ای خواهد شد. نتایج این طرح می‌تواند اطلاعات پایه مناسبی برای مطالعات دیگر از جمله بررسی میزان خلاء عملکرد، دلایل خلاء عملکرد، بررسی ارتباط تناسب اراضی با میزان عملکرد به‌دست آمده و پیش‌بینی و برآورد عملکرد در بازه زمانی مختلف را فراهم نماید.

References

- Alizadeh Dehkordi, P., Nehbandani, A.R, Hassanpour-bourkheili, S., and Kamkar, B., 2020. Yield gap analysis using remote sensing and modeling approaches: Wheat in the Northwest of Iran. *International Journal of Plant Production* 1-10. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00095-4>
- Azhibabi, R., Kamkar, B., and Abdi, O., 2019. Comparison of geostatistical interpolation models (kriging) to estimate soil

- salinity and wheat yield (A case study: Army field of Aq Qala. *Crop Production* 12(1): 1-16. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22069/EJCP.2019.6955.1495>
- Badsar, M., 2014. Yield gap estimation in wheat fields using GIS, RS and SSM model (A case study: Qaresso basin, Gorgan distinct). M.Sc. Thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural, Iran. 95 p. (In Persian)
- Balasundram, S.K., Memarian, H., and Khosla, R., 2013. Estimating oil palm yields using vegetation indices derived from Quickbird. *Life Science Journal* 10(4): 851-860
- Bannari, A., Staenz, K., Haboudane, D., and Khurshid, K., 2006. Sensitivity analysis of chlorophyll indices to soil optical properties using ground-reflectance data. In: 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (pp. 120-123). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.36>.
- Baskent, E.Z., and Keles, S., 2005. Spatial forest planning: A review. *Ecological Modeling* 188(2-4): 145-173. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.059>
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., and Koropaka, A.E., 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Dente, L., Satalino, G., Mattia, F., and Rinaldi, M., 2008. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield. *Remote Sensing of Environment* 112(4): 1395-1407. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.023>
- Elvidge, C.D., and Chen, Z., 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 54(1): 38-48. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00132-K](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00132-K)
- FAO. 2018. Food and Agricultural Organization of the United Nations (sited in: http://www.fao.org/index_en.htm/, 1/1/2020.
- Fatemi, B., and Rezaei, Y., 2006. Basic of Remote Sensing. Azade publication. 257 p. (In Persian)
- Ghasemi, M., 2011. Investigating Weed biodiversity in wheat fields of Gorgan County. M.Sc. Thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. 114 p. (In Persian with English Summary)
- Goudarzi, M., Farahpour, M., and Mosavi, A.R., 2006. Land cover and rangeland classification map using Land sat satellite image (TM) (Case study) Namrood watershed. *Rangeland and Desert Research* 13(3): 265-277. (In Persian with English Summary)
- Gutierrez, M., Norton, R., Thorp, K.R., and Wang, G., 2012. Association of spectral reflectance indices with plant growth and lint yield in upland cotton. *Crop Science* 52(2): 849-857. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.04.0222>
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Kazemi, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kamkar, B., Shataei, S., and Sadeghi, S., 2012. Evaluation of geostatistical methods for estimating and zoning of macronutrients in agricultural lands of Golestan province. *Water Soil Science*. 22(1): 201-218. (In Persian with English Summary)
- Khosravi, R., Hemami, M.R. and Malekian, M., 2014. Comparison of geostatistical methods to determine the best bioclimatic data interpolation method for modeling species distribution in Central Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology* 3(8): 55-68. (In Persian with English Summary) [20.1001.1.24763128.1393.3.8.5.5](https://doi.org/10.1001.1.24763128.1393.3.8.5.5)
- Kim, Y., Jackson, T., Bindlish, R., Hong, S., Jung, G., and Lee, K., 2013. Retrieval of wheat growth parameters with radar vegetation indices. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11(4): 808-812. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2279255>
- Kim, Y., and Van Zyl, J., 2009. A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47: 2519-2527. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2014944>
- Koppe, W., Gnyp, M., Hutt, C., Yao, Y., Miao, Y., Chen, X., and Bareth, G., 2013. Rice monitoring with multitemporal and dualpolarimetric TerraSAR-X data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 568-576. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.016>
- Liu, Z., Zhou, W., Shen, J., He, P., Lei, Q., and Liang, G., 2014. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China. *Geoderma* 235: 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.027>

- Lobell, D.B., 2013. The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research* 143: 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.08.008>
- Ma, J.W., Nguyen, C.H., Lee, K., and Heo, J., 2019. Regional-scale rice-yield estimation using stacked auto-encoder with climatic and MODIS data: A case study of South Korea. *International Journal of Remote Sensing* 40(1): 51-71. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1488291>
- Mo, X., Liu, S., Lin, Z., Xu, Y., Xiang, Y., and McVicar, T.R., 2005. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling* 183(2): 301-322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.07.032>
- Mohammadi Ahmad Mahmoudi, E., Kamkar, B., and Abdi, O., 2015. Comparison of geostatistical- and remote sensing data-based methods in wheat yield prediction in some of growing stages (A case study: Nemooneh filed, Golestan province). *Crop Production* 8(2): 51-76. (In Persian with English Summary). [20.1001.1.2008739.1394.8.2.3.5](https://doi.org/10.1001.1.2008739.1394.8.2.3.5)
- Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A.R., and Jahani, M., 2016. Estimating within field variability of wheat yield using spatial variables: An approach to precision agriculture. *Journal of Agroecology* 8(3): 329-345. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22067/jag.v8i3.34502>
- Pourhadian, H., Kamkar, B., Soltani, A., and Mokhtarpour, H., 2019. Evaluation of forage maize yield gap using an integrated crop simulation model-satellite imagery method (Case study: Four watershed basins in Golestan Province). *Archives of Agronomy and Soil Science* 65(2): 253-268. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1493579>
- Rahmat, S.R., Firdaus, R.R., Shahrudin, S.M., and Ling, L.Y., 2019. Leading key players and support system in Malaysian paddy production chain. *Cogent Food and Agriculture* 5(1): 1708682. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1708682>
- Raziei, T., 2017. Köppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th century. *Earth and Space Physics* 43: 419-439. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2017.58916>
- Ren, H., Zhou, G., and Zhang, F., 2018. Using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *Remote Sensing of Environment* 209: 439-445. <https://doi.org/10.3390/s21062115>
- Rezaei Hossein Abad, A.R., 2013. An Investigation on the relationship between soil nutrients and wheat yield using Geographic Information Systems (GIS). M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. 71 p. (In Persian with English Summary)
- Sanaienejad, S.H., Shah Tahmasbi, A.R., Sadr Abadi Haghghi, R., and Kelarestani, K.A., 2008. Study of spectral reflection on wheat fields in Mashhad using MODIS data. *Journal of Water and Soil Science* 12(45):11-19. (In Persian with English Summary) [20.1001.1.24763594.1387.12.45.2.9](https://doi.org/10.1001.1.24763594.1387.12.45.2.9)
- SAS Institute., 2015. Base SAS 9.4 procedures guide. SAS Institute. www.sas.com
- Shi, H., and Xingguo, M., 2011. Interpreting spatial heterogeneity of crop yield with a process model and remote sensing. *Ecological Modeling* 222(14): 2530-2541. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.11.011>
- Simoës, M.D.S., Rocha, J.V., and Lamparelli, R.A.C., 2005. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. *Scientia Agricola* 62(3): 199-207. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000300001>
- Siyal, A.A., Dempewolf, J., and Becker-Reshef, I., 2015. Rice yield estimation using Landsat ETM+ Data. *Journal of Applied Remote Sensing* 9: 1-16. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.095986>
- Tesfahunegn, G.B., Tamene, L., and Vlek, P.L.G., 2011. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. *Soil Tillage Research* 117: 124-139. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.09.005>
- Utset, A., Lopez, T., and Diaz, M., 2000. A comparison of soil maps, kriging and a combined method for spatially prediction bulk density and field capacity of Ferralsols in the Havana-Matanaz Plain. *Geoderma* 96(3): 199-213. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00055-5)
- Wang, J., Dai, Q., Shang, J., Jin, X., Sun, Q., Zhou, G., and Dai, Q., 2019. Field-scale rice yield estimation using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar (SAR) data in coastal saline region of Jiangsu province, China. *Remote Sensing* 11(19): 2274. <https://doi.org/10.3390/rs11192274>
- Webster, R., and Oliver, M., 2001. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 271 p.

- Yaghouti, H., Pazira, E., Amiri, E., and Masihabadi, M.H., 2019. The feasibility of using vegetation indices and soil texture to predict rice yield. *Polish Journal of Environmental Studies* 28(4). DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/81088>
- Zarco-Tejada, P.J., Ustin, S.L., and Whiting, M.L., 2005. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal* 97(3): 641-653. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0257>
- Zhu, Y., Yao, X., Tian, Y., Liu, X., and Cao, W., 2008. Analysis of common canopy vegetation indices for indicating leaf nitrogen accumulations in wheat and rice. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10(1): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.02.006>
- Zolekar, R.B., and Bhagat, V.S., 2015. Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote sensing and GIS approach. *Computers and Electronics in Agriculture* 118: 300-321. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.016>