

Original article

Cooling stress hazard zoning on different rice (*Oryza sativa* L.) growth stages by using satellite data

Leila Sadooghi¹, Ali Akbar Noroozi^{2*}, Ali Mohammadi Torkashvand³, Ebrahim Pazira³

1. Ph.D.Student, Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

3. Professor, Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received 22 November 2023; Revised 25 February 2024; Accepted 11 March 2024

Extended abstract

Introduction

Cooling stress has led to irreparable damage to the paddy fields of Gilan province. Climate research has shown the prevalence of increasing climate-related hazards including frost, drought, hail, and flood. Environmental stresses, including frost, affect different rice growth stages and affect the morphological and physiological characteristics of rice. Cooling stress is a major risk to be managed and quantitative determination of cooling stress hazard is very serious in realizing the hazard and planning to reduce it. In developing countries such as Iran, meteorological stations are usually scattered. For this reason, they use sensors such as MODIS, that are free and available to help compensate for these deficiencies. Nowadays, remote sensing technology and satellite data provide an opportunity to achieve high-resolution data. Therefore, with the development of GIS and remote sensing, real-time cooling stress monitoring can be achieved in large areas. Also, we used interpolation models so scattered observations can be converted into continuous prediction maps of the entire study area. The objective of this research is to investigate the cooling stress hazard in different rice growth stages, using remote sensing technology and MODIS satellite images in Gilan province.

Materials and methods

In this research, the MOD11A1 product provides daily land surface temperature (LST) data used from the MODIS sensor, and the coordinates of meteorological stations in Gilan province and the required data from these stations during the statistical period from 2000 to 2017 were obtained from the Meteorological Department. The rice growth stage was determined based on the information and statistics of the province and using MODIS sensor images and according to the critical temperature limit below which the plant experiences cold stress.

Results and discussion

Cooling stress hazard zoning maps in ArcGIS software, according to the number of days when the cooling stress hazard in each of the plant growth stages (the germination, the seedling, the vegetative, and the reproductive stages) occurred in the region prepared. According to the root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) obtained, among the different interpolation methods, In different rice growth stages, the IDW method was chosen to prepare the zoning map. Then, the hazard zoning map was prepared according to the cooling stress hazard classification for the rice crop in different plant

* Corresponding author: Ali Akbar Noroozi; E-Mail: noroozi.aa@gmail.com

growth stages between 2000 and 2017 using the IDW method. Five different classes of cooling stress hazard rice were considered as very low, low, medium, high, and very high.

Conclusion

Based on the cooling stress hazard zoning maps during the 17 years investigated in the studied area, in the germination, seedling, vegetative, and reproductive stages, it showed that the highest cooling stress hazard is related to the altitudes of 1000 to 2000 meters in the mountainous areas, and during the growth stage germination and reproductive, the amount of this hazard is very high and we should choose the appropriate date for the germination period and every as we get to the sea, the level of hazard in all growth stages, even in the growth stages of germination and reproductive, is low and very low.

Acknowledgments

We appreciate the Meteorological Department for providing the statistics weather of Gilan province.

Keywords: LST, MODIS, Rice field, Stress

پهنه‌بندی خطر سرمازدگی در مراحل مختلف رشد برنج (*Oryza sativa* L.) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

لیلا صدوقی^۱، علی‌اکبر نوروزی^{۲*}، علی محمدی ترکشوند^۳، ابراهیم پذیرا^۴

۱. دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک، گروه خاک‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳. استاد گروه خاک‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴. استاد گروه خاک‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: تنش شالیزار LST MODIS	پدیده سرمازدگی منجر به خسارات جبران‌ناپذیری به شالیزارهای استان گیلان می‌شود. در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، ایستگاه‌های هواشناسی معمولاً پراکنده هستند به همین دلیل از سنجنده و حسگرهایی مانند MODIS که به صورت رایگان در دسترس هستند استفاده می‌کنند که کمک شایانی به کمبود توزیع ایستگاه‌های زمینی می‌کند. همچنین با استفاده از مدل‌های درون‌یابی، می‌توان مشاهدات پراکنده را به نقشه‌های پیش‌بینی پیوسته در کل منطقه مورد مطالعه تبدیل کرد. هدف از انجام این پژوهش بررسی خطر سرمازدگی در مراحل مختلف رشد گیاه برنج با بهره‌گیری از فناوری سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره MODIS در استان گیلان است. در این پژوهش از بین محصولات سنجنده مودیس (MODIS) از داده‌های دمای روزانه سطح زمین (LST) با کد MOD11A1 استفاده شد و مختصات ایستگاه‌های هواشناسی استان گیلان و داده‌های مورد نیاز از این ایستگاه‌ها طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ از اداره هواشناسی اخذ گردید. تعیین دوره رشد گیاه برنج بر اساس اطلاعات و آمار استان انجام شد و با استفاده از تصاویر سنجده MODIS و با توجه به حد بحرانی دما که کمتر از آن گیاه دچار تنش سرما می‌شود، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سرمازدگی در نرم‌افزار ArcGIS، با توجه به فراوانی و تعداد روزهایی که خطر سرمازدگی در هر مرحله رشد گیاه در منطقه رخ داده بود با روش درون‌یابی IDW تهیه گردید. پنج نوع کلاس متفاوت برای خطر سرمازدگی برنج تحت عنوان بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد در نظر گرفته شد. بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی خطر، رخ داد سرمازدگی طی ۱۷ سال مورد بررسی قرار گرفت؛ و نشان داد که بیشترین خطر سرمازدگی در سطح کل استان مربوط به ارتفاعات ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بوده و در مرحله جوانه‌زنی و زایشی میزان این خطر زیاد و خیلی زیاد است و هر چه که به دریا نزدیک‌تر می‌شویم میزان خطر در همه مراحل رشد حتی در مراحل جوانه‌زنی و زایشی کم و خیلی کم است.

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) در حال حاضر یکی از اصلی‌ترین غلات در جهان و غذای اصلی بیش از نیمی از جمعیت جهان، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه آسیا است (Gharachorloo et al., 2019; Gross and Zhao, 2014; Saadat et al., 2019; Sarangi et al., 2016). مدل‌های پیش‌بینی آب‌وهوا نشان می‌دهد که تنش‌های محیطی در آینده نزدیک به دلیل تغییرات آب‌وهوایی جهانی افزایش خواهند یافت (Ahuja et al., 2017; Selvaraj et al., 2010; al., 2010). و پیش‌بینی می‌شود یک چالش مهم در افزایش راندمان محصولات کشاورزی، حساسیت آن‌ها به تغییرات آب‌وهوایی از جمله دمای پایین و تنش گرمایی است (Mosleh et al., 2015) که برای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و میزان خسارات وارده به محصولات کشاورزی، مدیریت ریسک کشاورزی را حائز اهمیت می‌نماید

برنج (*Oryza sativa* L.) در حال حاضر یکی از اصلی‌ترین غلات در جهان و غذای اصلی بیش از نیمی از جمعیت جهان، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه آسیا است (Gharachorloo et al., 2019; Gross and Zhao, 2014; Saadat et al., 2019; Sarangi et al., 2016). مدل‌های پیش‌بینی آب‌وهوا نشان می‌دهد که تنش‌های محیطی در آینده نزدیک به دلیل تغییرات آب‌وهوایی جهانی افزایش خواهند یافت (Ahuja et al., 2017; Selvaraj et al., 2010; al., 2010). و پیش‌بینی می‌شود یک چالش مهم در افزایش راندمان محصولات کشاورزی، حساسیت آن‌ها به تغییرات آب‌وهوایی از جمله دمای پایین و تنش گرمایی است (Mosleh et al., 2015) که برای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و میزان خسارات وارده به محصولات کشاورزی، مدیریت ریسک کشاورزی را حائز اهمیت می‌نماید

می‌کنند که شدت تنش به عواملی مانند دما، طول دوره، مرحله رشد و شرایط فیزیولوژیکی گیاه بستگی دارد. (Becker et al., 2021; Chauhan et al., 2022; Ji et al., 2021). سالیانه حدود ۱۵ میلیون هکتار از شالیزارهای جهان در مراحل مختلف رشد از جمله جوانه‌زنی و مراحل رشد رویشی و زایشی دچار تنش سرما می‌شوند (Wang et al., 2009; Ye et al., 2019). در طول یک سال سرد تولید برنج ۲۰٪ کاهش می‌یابد (Liu et al., 2013)، صدمات سرمایی عموماً در دوره‌های بحرانی مانند مراحل جوانه‌زنی، رسیدگی و گلدهی رخ می‌دهد و باعث کاهش شدید عملکرد برنج می‌شود (Liu et al., 2013).

تنش سرما اغلب جوانه‌زنی و رشد گیاهچه برنج را مختل کرده و به تأخیر می‌اندازد و باعث استقرار ضعیف توده و بلوغ غیریک‌نواخت می‌شود (Ranawake et al., 2014). توسعه ارقام متحمل به تنش سرما برای مدت طولانی یک هدف اصلاحی مهم در تولید برنج بوده است (Lakra et al., 2020; Pachecoy et al., 2014; Ranawake et al., 2014).

سرمازدگی یک نگرانی مهم مرتبط با آب‌وهوا برای تولیدکنندگان محصولات کشاورزی است (Lou et al., 2023; J. Xu et al., 2021a). به‌ویژه زمانی که رویدادهای سرمازدگی با دوره‌های حساس رشد محصول هم‌زمان باشد؛ بنابراین کشاورزان به دنبال افزایش تولید از طریق ارزیابی دقیق ریسک سرمازدگی و مدیریت بهینه سرما هستند. با توجه به گرم شدن آب‌وهوا، ممکن است انتظار رود که ریسک خسارات سرمازدگی در آینده کاهش یابد با این حال، گرم شدن آب‌وهوا باعث پیشرفت در رویدادهای فنولوژیکی مانند جوانه‌زدن، برگ‌ریزی و گلدهی در بهار شده است و باعث کاهش مقاومت گیاهان به سرما می‌شود (Kimura et al., 2021).

امروزه، فناوری سنجش‌ازدور و داده‌های ماهواره‌ای فرصتی را برای دستیابی به داده‌هایی با وضوح بالا فراهم می‌کند که می‌تواند برای تعیین ریسک سرمازدگی مورد استفاده قرار گیرد (Emamifar et al., 2013; Singha and Sarmah, 2019). بسیاری از مجموعه داده‌های ماهواره‌ای برای استفاده رایگان هستند که هزینه‌ها را نیز کاهش می‌دهد (Xu et al., 2020). ایستگاه‌های هواشناسی معمولاً به‌صورت ناهموار و پراکنده توزیع می‌شوند و بیشتر در مناطق دشتی ایجاد شده‌اند. ایستگاه‌های هواشناسی که حتی

(Gobbett et al., 2020; Saadat et al., 2019; Yue et al., 2016; Caldana et al., 2020).

سرمازدگی یک خطر دائمی است که معمولاً باعث آسیب به محصولات کشاورزی می‌شود (Ji et al., 2021; Lagrini et al., 2020). در سال‌های اخیر بر اساس آمار و گزارش‌های صندوق بیمه محصولات کشاورزی با توجه به تغییرات اقلیمی، دوره سرما در اوایل بهار (به‌ویژه ماه فروردین) در استان‌های شمالی باعث خسارت سرمازدگی بر روی محصول برنج شده است (Ghorbani et al., 2011).

گیاه برنج در دمای زیر ۱۵ درجه سانتی‌گراد مستعد آسیب می‌شود (Kayess et al., 2020). به‌طور کلی، دمای پایین می‌تواند نرخ بقای محصول را کاهش دهد، فعالیت فتوسنتزی را محدود کند، رشد را به تأخیر بیندازد و سنتز پروتئین‌ها، لیپیدها و کربوهیدرات‌ها را مسدود کند (Kayess et al., 2020). به‌ویژه در مراحل پنجه‌زنی، خوشه‌دهی و گلدهی که به‌راحتی گیاه در اثر سرمازدگی آسیب می‌بیند (Liang et al., 2006). در معرض دمای پایین، فیزیولوژی محصول برنج مانند کاهش محتوای کلروفیل کل، محدودیت فعالیت فتوسنتزی و استرس اکسیداتیو تغییر می‌کند. همچنین دمای پایین باعث صدمات جبران‌ناپذیری در برگ‌ها مانند نکروز و کلروز می‌شود (Kayess et al., 2020; Najeeb et al., 2021). در مرحله جوانه‌زنی در ارقام مختلف برنج، دمای پایین سبب کاهش درصد جوانه‌زنی می‌شود که خسارت سرما در این مرحله برای شالیکاران شمال کشور به‌عنوان یک مشکل مهم محسوب شود (Ghorbani et al., 2011). کاهش عملکرد به دلیل دمای پایین یک محدودیت عمده برای کشت برنج نه‌تنها در مناطق با عرض جغرافیایی بالا یا ارتفاعات بالا بلکه در کشورهای گرمسیری مانند فیلیپین و تایلند است (Cruz et al., 2013) و هرگونه نوسان در عملکرد برنج ناشی از مسائل آب‌وهوای کشاورزی، تأثیر مستقیمی بر امنیت غذایی خواهد داشت (Ji et al., 2021; Lagrini et al., 2020). فلاح و میارستمی (Fallah and Miarostami, 2015) به نقل از لی (Lee, 1979) دمای بحرانی برای رقم‌های مختلف برنج در کره جنوبی را در مراحل مختلف رشد شامل جوانه‌زنی، گیاهچه‌ای، رویشی، زایشی، خوشه‌دهی و رسیدن دانه به ترتیب ۱۰، ۱۳، ۱۵، ۱۷ و ۱۹ درجه سانتی‌گراد گزارش داد.

اکثر گونه‌های مختلف گیاهی از جمله برنج، معمولاً تنش سرما را در اوایل فصل بهار و یا در طول کشت پاییزه تجربه

توزیع خطر سرمازدگی مؤثر بودند. سوزوکی و همکاران (Suzuki et al., 2008) به بررسی آسیب سرمای ریشه در برنج پرداختند، آن‌ها دریافتند که در مرحله گیاهچه‌ای دما عامل بسیار مهمی در واکنش و حساسیت سطوح مختلف گیاه به تنش سرما است. در حوضه رودخانه یانگ تسه و جنوب چین، زیونگ و همکاران (Xiong et al., 2018) اثرات خشک‌سالی و سیل را بر عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیکی برنج مورد مطالعه قرار دادند و مشخص شد که خشک‌سالی تأثیر بیشتری نسبت به سیل بر روی گیاه برنج دارد. ریسک آسیب سرما برای مناطق کشت برنج توسط چنگ و همکاران (Cheng et al., 2013) در استان هونان، چین با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و داده‌های هواشناسی، ارزیابی شد. قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2011) در مطالعه خود به بررسی تنش سرما در دو رقم برنج نعمت و آوند پرداختند که در تیمار ۱۰ درجه سانتی‌گراد رقم نعمت عملکرد پایین‌تری داشت و رقم آوند مقاوم‌تر و مناسب کشت در مناطقی که دمای پایین دارند به‌ویژه مناطق کوهستانی شناخته شد.

کروز و همکاران (Cruz et al., 2013) تنش سرما در برنج را در دو مرحله گیاهچه‌ای و رسیدگی ارزیابی کردند و نشان دادند که در هر دو مرحله دمای پایین اثرات مضر بر عملکرد محصول دارد، در مرحله اول تعداد بوته‌های مستقر تحت تأثیر قرار می‌گیرد و در مرحله رسیدگی سرما باعث عقیمی و کاهش تعداد نهایی دانه‌ها خواهد شد.

در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، ایستگاه‌های هواشناسی معمولاً پراکنده هستند و از سوی دیگر حسگرهایی مانند MODIS به‌صورت رایگان در دسترس هستند که فرصت خوبی برای جبران این کمبودها است. همچنین مدل‌های درون‌یابی، ابزاری مهم برای تحلیل فضایی ویژگی‌های خاک است که می‌تواند مشاهدات پراکنده را به نقشه‌های پیش‌بینی پیوسته در کل منطقه مورد مطالعه تبدیل کنند. هدف از این مطالعه استفاده از سنجش‌ازدور برای کاهش هزینه‌ها، افزایش دقت، سرعت و کمک به تخمین خطر سرمازدگی در مراحل مختلف رشد برنج و تهیه نقشه پهنه‌بندی برای استان گیلان است و ارزیابی خطر سرمازدگی از طریق تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خطر کمک به بهبود مدیریت، تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی و سیاست‌های کشاورزی می‌کند.

در مناطق مسطح به‌درستی توزیع نشده‌اند، اثرات جریان هوا، وارونگی حرارتی و سایر پدیده‌هایی را که بر الگوی آب‌وهوا تأثیر می‌گذارند، شناسایی می‌کنند (Ahmed et al., 2014)؛ بنابراین، با توسعه GIS و سنجش‌ازدور، می‌توان به پیش‌سرمازدگی در زمان واقعی در مناطق وسیع دست یافت (Belal et al., 2014). علاوه بر این، روش‌های سنجش‌ازدور برای پیش‌بینی تولید برنج به دولت‌ها، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا سیاست‌های مناسبی را تدوین کنند و یکی از مهم‌ترین موضوعات دست یافتن کاربر به راه‌های سریع، قابل‌اعتماد (دقیق) و کم‌هزینه‌تر برای برنامه‌ریزی کشاورزی و همچنین پیش‌بینی قبل از برداشت محصول است (Mosleh et al., 2015).

در سال‌های اخیر، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از راه دور (RS) نقش کلیدی در مطالعه انواع مختلف خطرات طبیعی یا ساخته دست بشر ایفا کرده‌اند. مطالعات متعددی در سراسر جهان منتشر شده است تا نحوه به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش‌ازدور و GIS برای خطرات احتمالی آب‌وهوایی نشان دهد (Arnous and Omar, 2018; Belal et al., 2014).

لاگرینی و همکاران (Lagrini et al., 2020) به نقشه‌برداری مناطق آسیب‌پذیر مراکش نسبت به اثرات دما با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداختند. نتایج نشان داد که ۷۸ درصد مراکش به‌عنوان مناطق غیر آسیب‌پذیر و ۱۹ درصد با آسیب‌پذیری متوسط نسبت به اثرات دما می‌باشند. مناطق باقی‌مانده با آسیب‌پذیری بالا تا شدید مشخص شدند. لی و همکاران (Li et al., 2018) به ارزیابی و تهیه نقشه پهنه‌بندی ریسک سرمازدگی چای با استفاده از GIS پرداختند. فلاح و میارستمی (Fallah and Miarostami, 2015) به بررسی اثر تنش دمای پایین بر مراحل رشد و عملکرد برنج در شرایط گلخانه‌ای پرداختند، این مطالعه نشان داد که در مرحله پنجه‌زنی تا ظهور خوشه کاهش دما، باعث ایجاد بیشترین خسارت به دانه برنج می‌شود. کریمپ (Crimp et al., 2015) با استفاده از مدل‌های درون‌یابی خطر سرمازدگی را برای کشاورزی در جنوب شرقی استرالیا، مورد بررسی قرار دادند. زو و همکاران (Xu et al., 2018) با استفاده از داده‌های هواشناسی ۵۰ ایستگاه در استان جیلین، چین و داده‌های سنجش‌ازدور، نقشه پهنه‌بندی ریسک سرمازدگی بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۶ را تهیه کردند که عواملی مانند توپوگرافی و توزیع کاربری اراضی در

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در شمال ایران و جنوب دریای خزر در استان گیلان انجام شده است. استان گیلان در شمال کشور ایران و در ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار قرار گرفته است. میانگین دمای کمینه فصل تابستان در استان گیلان ۱۸/۶ درجه سلسیوس و میانگین دمای بیشینه ۲۹/۰ درجه سلسیوس و میانگین دما هوا برابر ۲۳/۸ درجه سلسیوس بوده است.

استان گیلان بر اساس تقسیمات اقلیمی یکی از گرم‌ترین مناطق مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل است. بیش از ۸۰ درصد سطح برداشت برنج در دو استان شمالی مازندران و گیلان در نواحی ساحلی حاشیه دریای خزر پراکنده است. برنج در استان گیلان دارای سطح زیر کشت حدود ۲۳۰ هزار هکتار است که نیمی از آن در حدود ۱۰۰ هزار هکتار در شرق استان واقع شده است (Pandi et al., 2020; Torabi Golsefidi et al., 2005).

در سال‌های اخیر مشکلات به وجود آمده در بخش کشاورزی از جمله سرمازدگی، شالیکاران را بر آن داشته که به جای کشت این محصول مهم محصولات دیگری کشت کنند (Nosrati et al., 2022).

روش تحقیق

گزارش‌های پایه (شامل فیزیوگرافی، هواشناسی، هیدرولوژی و پوشش گیاهی) و اطلاعات مربوط به منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شد، سپس از بین محصولات سنجنده مودیس (MODIS) که بر روی ماهواره ترا (Terra) نصب شده است و در حدود ساعت ۱۱ صبح از منطقه مورد مطالعه گذر می‌کند داده‌های دمای سطح زمین استخراج شد (Masoodian and Keikhosravi Kiany, 2020). ویژگی‌های محصول MOD11A1 در جدول ۱ نشان داده شده است.

داده‌های مورد نیاز ایستگاه‌های هواشناسی استان گیلان در بازه زمانی سه‌ساعته شش صبح، نه صبح، دوازده ظهر، سه بعدازظهر، شش غروب در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ از اداره هواشناسی اخذ گردید. منطقه انتخاب‌شده در طی سالیان مختلف توسط صندوق بیمه محصولات کشاورزی در معرض پرداخت‌های مکرر خسارات، از جمله سرمازدگی در طی دهه اخیر بوده؛ لذا با پیشنهاد این صندوق، منطقه مورد نظر

به‌عنوان پایلوت انتخاب و مطالعات طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ انجام گردید. با استفاده از داده‌های سری زمانی ایستگاه (نه صبح، دوازده ظهر، سه بعدازظهر) داده‌های سری زمانی ماهواره‌ای واسنجی بین داده‌های ایستگاهی و تصاویر ماهواره‌ای انجام و رابطه معنی‌داری با همبستگی بالا از طریق مدل‌های آماری خطی استخراج گردید.

جدول ۱. معرفی مشخصات داده‌های MOD11A1 (Wan, 2006)

Table 1. Introduction of the characteristics of MOD11A1 data.

Characteristic	Description
Collection	Terra MODIS
File Size	~2 MB
Temporal Resolution	Daily
Temporal Extent	2000-02-24 to Present
Spatial Extent	Global
Coordinate System	Sinusoidal
File Format	HDF-EOS
Geographic Dimensions	1200 km x 1200 km
Number of Science Dataset (SDS) Layers	12
Columns/Rows	1200 x 1200
Pixel Size	1000 m

(Wan, 2006)

تعیین دوره رشد گیاه برنج بر اساس اطلاعات و آمار استان انجام شد (جدول ۲) که مراحل اصلی رشد برنج عبارت‌اند از مرحله جوانه‌زنی که ابتدا غلاف ریشه ظاهر شده سپس ریشه‌چه از غلاف خارج می‌شود (جوانه‌زنی تا ظهور ساقه)، سپس مزوکوتیل طویل شده و در ادامه رشد گیاهچه و ظهور اولین برگ (رشد گیاهچه، پنجه‌زنی و طویل شدن ساقه)، در مرحله رویشی پنجه‌زنی با رشد و توسعه گیاهچه آغاز شده که شامل برگ‌ها، ساقه و ریشه‌ها است که تا زمان تشکیل خوشه اولیه ادامه می‌یابد (از پنجه‌زنی تا تشکیل خوشه) و مرحله آخر مرحله زایشی که از ظهور خوشه تا گل‌دهی و پر شدن دانه (از ظهور خوشه تا گل‌دهی و پر شدن دانه) است (Davatgar et al., 2012; Navabi and Allahgholipoor, 2014; Yoshida, 1981).

سپس با استفاده از تصاویر سنجده MODIS و همچنین بر اساس دستورالعمل موسسه تحقیقات برنج با توجه به حد بحرانی دما (جدول ۳) (Davatgar et al., 2012) که کمتر از آن گیاه دچار تنش سرما می‌شود نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سرما در نرم‌افزار ArcGIS، با توجه به تعداد روزهایی که خطر سرمازدگی در هر مرحله رشد گیاه در منطقه رخ داده بود استخراج و نقشه خطر تهیه گردید. به‌منظور تهیه نقشه

سطح هموارسازی را تعریف می‌کنند، سطوح پیوسته نقاط اندازه‌گیری شده مانند IDW، LPI، GPI و RBF را ایجاد می‌کنند (Bhunia et al., 2018; Jalili Pirani and Modarres, 2020)؛ اما روش‌های درون‌یابی زمین‌آماري از مدل‌های آماری استفاده می‌کنند که روابط آماری و کمی همبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده، مانند کریجینگ معمولی (OK) و کریجینگ جهانی (UK) را تعیین می‌کنند (Antal et al., 2021; Wang et al., 2014). در این تحقیق، انواع تکنیک‌های درون‌یابی مبتنی بر GIS مانند درون‌یابی چندجمله‌ای محلی (LPI)، وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، تابع پایه شعاعی (RBF)، درون‌یابی چندجمله‌ای جهانی (GPI) مقایسه شده و از مدل‌های ریاضی استفاده شد. مقادیر خودهمبستگی فضایی بین نقاط را پیش‌بینی کرده و یک ارزیابی احتمالی از کیفیت درون‌یابی ارائه می‌کند (Antal et al., 2021; Carvalho and Wang, 2019; Keshtkar et al., 2021; Sheng et al., 2021).

روش وزن‌دهی معکوس فاصله IDW

در این روش مقادیر درون‌یابی عمدتاً تحت تأثیر مقادیر نزدیک قرار می‌گیرند و کمتر تحت تأثیر مشاهدات دور و مجموعه داده‌ها و پیش‌بینی مقادیر مناطق ناشناخته قرار می‌گیرند (Garnero and Godone, 2014; Robinson and Metternicht, 2006). IDW، بستگی به درجه کارایی (وزن) نقاط بر روی هر نقطه دیگر دارد که مستقیماً با معکوس فاصله بین نقاط تعیین شده متناسب است و مقدار مجهول یک نقطه بیشتر تحت تأثیر نقاط کنترل نزدیک است تا نقاط دورتر و می‌تواند با معادله زیر (رابطه ۱) نمایش داده شود (Huang et al., 2011; Van Mierlo et al., 2021; Wang et al., 2014).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p}} \quad [1]$$

نقطه درون‌یابی (پیش‌بینی شده) مقدار Z است. Zi یک مقدار نمونه برای نقطه i است (i = 1, 2, ..., n) تعداد نقاط نمونه n است. di فاصله بین مقادیر نمونه‌گیری و درون‌یابی است.

پهنه‌بندی روش‌های مختلف درون‌یابی موردبررسی قرار گرفت.

جدول ۲. تاریخ مراحل مختلف رشد برنج در استان گیلان

Table 2. Date of different rice growth stages of rice in Gilan province

مراحل رشد گیاه برنج	تاریخ
Rice growth stages	Data
جوانه‌زنی	۱۰ اسفند تا ۱۰ خرداد
Germination	1March-31May
گیاهچه‌ای	۱ خرداد تا ۳۱ تیر
Seedling	22May-22July
رویشی	۵ تیر تا ۲۳ مرداد
Vegetative	26 June- 1August
زایشی	۸ مرداد تا ۸ مهر
Reproductive	30 July-30September

جدول ۳. حد بحرانی دما برای خسارت سرما در مراحل مختلف رشد گیاه برنج (Davatgar et al., 2012)

Table 3. Critical temperature limit for cold damage in different growth (Davatgar et al., 2012)

مراحل رشد گیاه برنج	درجه بحرانی حرارت
Rice growth stages	Critical temperature limit (°C)
جوانه‌زنی	10
Seedling	13
Vegetative	15
Reproductive	17

درون‌یابی فرایندی است که طی آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقدارهای همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات متغیر مجهول در منطقه مورد مطالعه به دست آورد. تخمین زمین‌آماري جزو دقیق‌ترین روش‌های برآورد است، به خاطر اینکه عوامل متعددی مانند فاصله بین نقاط، ناهمسانگردی و تنوع مکانی را بررسی می‌کند (Piri et al., 2017). درون‌یابی فضایی در GIS، برای پیش‌بینی و نمایش در بسیاری از مناطق استفاده می‌شود (Huang et al., 2011). درون‌یابی مکانی به دو روش زمین‌آماري و قطعی تقسیم می‌شود. در روش‌های قطعی، با استفاده از فرمول‌های ریاضی که درجه شباهت یا

¹ Inverse Distance Method

p یک عدد واقعی مثبت که پارامتر است نشان‌دهنده توان است (Elumalai et al., 2017; Wang et al., 2014).

اعتبارسنجی متقابل

اعتبارسنجی متقابل یک روش آماری برای ارزیابی و مقایسه بازده تکنیک‌های مختلف درونیابی است. از اعتبارسنجی متقابل برای دانستن اینکه هر مدل چقدر مقادیر را در مکان‌های ناشناخته پیش‌بینی می‌کند استفاده می‌شود (Wang et al., 2014; Xu et al., 2021b). بنابراین، می‌توان از آن برای شناخت بهترین تکنیک‌های درونیابی برای ایجاد یک سطح ثابت برای ارزیابی و مقایسه بازده روش‌های مختلف درونیابی استفاده کرد. در این تحقیق از ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی تکنیک‌های درونیابی استفاده شده است و می‌توان آن را با معادلات زیر (روابط ۲ و ۳) محاسبه کرد:

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad [2]$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})(\bar{z} - \bar{z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \sum_{i=1}^n (\bar{z} - \bar{z})^2}} \right]^2 \quad [3]$$

در معادلات فوق، مقدار پیش‌بینی شده Z است. مقدار مشاهده شده در نقطه i نمونه‌گیری Z_i است ($i = 1, 2, \dots, n$) و n تعداد نقاط نمونه است. روشی که کمترین مقدار RMSE و R^2 را دارا باشد به‌عنوان مناسب‌ترین روش تعیین می‌شود (Carvalho and Wang, 2019; Long et al., 2020; Robinson and Metternicht, 2006).

نتایج و بحث

در این مطالعه از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) به‌عنوان شاخص‌های آماری برای ارزیابی تکنیک‌های مختلف درونیابی استفاده شدند (جدول ۴ و ۵). با توجه به میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) به‌دست‌آمده و منابع مختلف علمی، از بین روش‌های درونیابی مختلف در مراحل مختلف رشد برنج، روش IDW برای تهیه نقشه پهنه‌بندی انتخاب شد. چون در روش GPI، به‌جای استفاده از نقاط اندازه‌گیری شده نزدیک به هم با استفاده از کل مجموعه داده‌ها درونیابی را محاسبه می‌کند در صورتی که در گیاه برنج با توجه به رقم‌های متفاوت

روش درونیابی چندجمله‌ای جهانی GPI¹

برخلاف IDW، درونیابی چندجمله‌ای جهانی به‌جای استفاده از نقاط اندازه‌گیری شده در همسایگی‌ها با استفاده از کل مجموعه داده، پیش‌بینی‌ها را محاسبه می‌کند. در GPI ترتیب اول متناسب با صفحه مسطح است. مرتبه دوم GPI متناسب با سطحی بود که امکان خم شدن را فراهم می‌کند. مرتبه سوم GPI امکان دو خم شدن را فراهم می‌کند. صفحات چندجمله‌ای برای نمایش بهتر سطح موردنظر و برخلاف GPI، LPI سطوحی را تولید می‌کند که تغییرات محلی بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند (Ahmed et al., 2014; Azizian and Shokoohi, 2015; Keshtkar et al., 2021).

روش درونیابی چندجمله‌ای محلی LPI²

درونیابی چندجمله‌ای‌های محلی به‌جای همه داده‌ها با استفاده از نقاط تنها در همسایگی مشخص‌شده و مقدار سطح در مرکز همسایگی به‌عنوان مقدار پیش‌بینی شده تخمین زده می‌شود. GPI برای دانستن روندهای دوربرد در مجموعه داده‌ها مفید است، درحالی‌که LPI می‌تواند سطوحی ایجاد کند که تغییرات کوتاه برد را ثبت کند (Antal et al., 2021; Wang et al., 2014).

تابع پایه شعاع (RBF)³

RBF مقادیر بالاتر از حداکثر و کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده را پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که IDW هرگز مقادیر بالاتر از حداکثر یا کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده را پیش‌بینی نمی‌کند. RBF می‌تواند نتایج خوبی برای سطوح صاف ایجاد کند و زمانی که تغییر چشمگیری در مقادیر سطحی در فواصل کوتاه ایجاد می‌شود، بی‌اثر است و این روش‌ها شکلی از شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند (Ahmed et al., 2014; Azizian and Shokoohi, 2015; Bhunia et al., 2018; Wang et al., 2014).

² Local Polynomial Interpolation

³ Radial Basis Function

¹ Global Polynomial Interpolation

و در مراحل متفاوت رشد ناهمگنی وجود دارد؛ لذا طبق نتایج به‌دست‌آمده روش IDW که نقاط مجاور یکدیگر به‌جای کل نقاط در نظر می‌گیرد استفاده شد. سپس نقشه پهنه‌بندی خطر با توجه به جدول طبقه‌بندی خطر سرمازدگی (جدول ۶) برای محصول برنج در مراحل مختلف رشد گیاه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ با روش IDW تهیه گردید که به ۵

گروه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد با توجه به تعداد روزهای خطر سرمازدگی طبقه‌بندی شد. سپس نقشه پهنه‌بندی خطر سرمازدگی در مراحل مختلف رشد تهیه شد که نشان می‌دهد در مراحل جوانه‌زنی و زایشی خطر سرمازدگی برای گیاه برنج نسبت به سایر مراحل بیشتر است (شکل‌های ۱ تا ۴).

جدول ۴. RMSE روش‌های مختلف درون‌یابی در مراحل مختلف رشد برنج

Table 4. RMSE of different interpolation methods in different of rice growth stages

روش	جوانه‌زنی	گیاهچه‌ای	رویشی	زایشی
Method	Germination	Seedling	Vegetative	Reproductive
IDW	143.17	5.38	6.53	65.2
GPI	138.33	8.55	9.63	90.22
RBF	134.14	3.45	5.36	59.75
LPI	146.33	3.85	5.93	73.46

جدول ۵. R2 روش‌های مختلف درون‌یابی در مراحل مختلف رشد برنج

Table 5. R2 of different interpolation methods in different of rice growth stages

روش	جوانه‌زنی	گیاهچه‌ای	رویشی	زایشی
Method	Germination	Seedling	Vegetative	Reproductive
IDW	0.31	0.89	0.66	0.65
GPI	0.49	0.007	0.003	0.30
RBF	0.23	0.79	0.60	0.40
LPI	0.47	0.85	0.60	0.48

جدول ۶. طبقه‌بندی خطر سرما برای محصول برنج

Table 6. Cooling stress hazard classification for rice crop

طبقه‌بندی خطر	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
Hazard classification	Very low	Low	Moderate	High	Very high
مقدار شاخص خطر (روز)	20<	20-40	40-60	60-80	>80
Hazard Index value (day)					

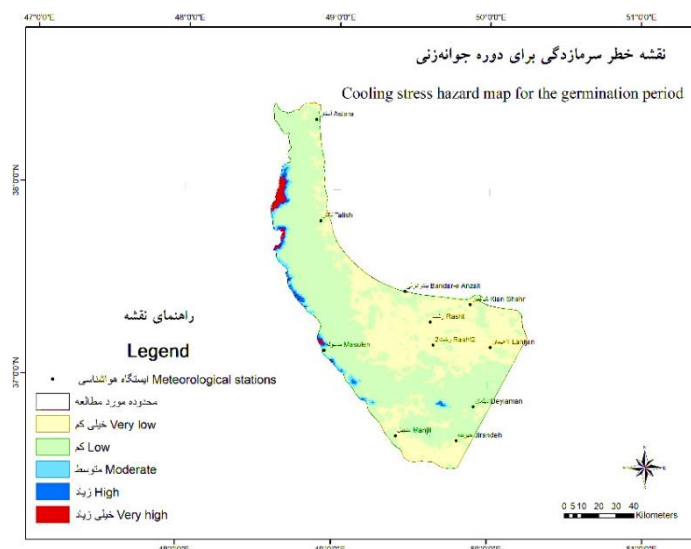
نتیجه‌گیری نهایی

سرما به اغلب محصولات زراعی از جمله برنج آسیب می‌رساند و خسارت‌های اقتصادی جبران‌ناپذیری را ایجاد می‌کند، به همین دلیل تاریخ کاشت و تغییرات دمایی را بایستی مدنظر قرار دهیم؛ زیرا نقش مهمی در میزان عملکرد تولید برنج ایفا می‌کنند. در این مطالعه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سرمازدگی با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS طی فصل رشد گیاه برنج در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ و به روش وزن‌دهی معکوس فاصله در چهار مرحله رشد گیاه برنج شامل مراحل جوانه‌زنی، گیاهچه‌ای، رویشی و زایشی در کل سطح استان گیلان تهیه گردید که با توجه به تنوع توپوگرافی استان شامل

دشت تا کوهستان، نقشه خطر سرما بر روی کل پهنه استان منطبق با اراضی کشت برنج تولید شده است و بر اساس معیارهای در نظر گرفته‌شده، پنج نوع کلاس متفاوت برای خطر سرمازدگی برنج بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد در نظر گرفته شد. نقشه پهنه‌بندی خطر سرما در دوره جوانه‌زنی نشان می‌دهد ۳۷/۷۶ درصد معادل ۴۴۴۸۵۸/۶۳ هکتار از سطح کل استان دارای خطر خیلی کم، ۵۸/۳۶ درصد معادل ۶۸۷۵۰۸/۸۰ هکتار دارای خطر کم، ۲/۰۸ درصد معادل ۲۴۴۷۱/۰۹ هکتار دارای خطر متوسط، ۰/۹۳ درصد معادل ۱۰۹۰۴/۶۶ هکتار دارای خطر زیاد و ۰/۸۷ درصد معادل ۱۰۲۱۷/۷۵ هکتار دارای خطر خیلی زیاد هستند و در

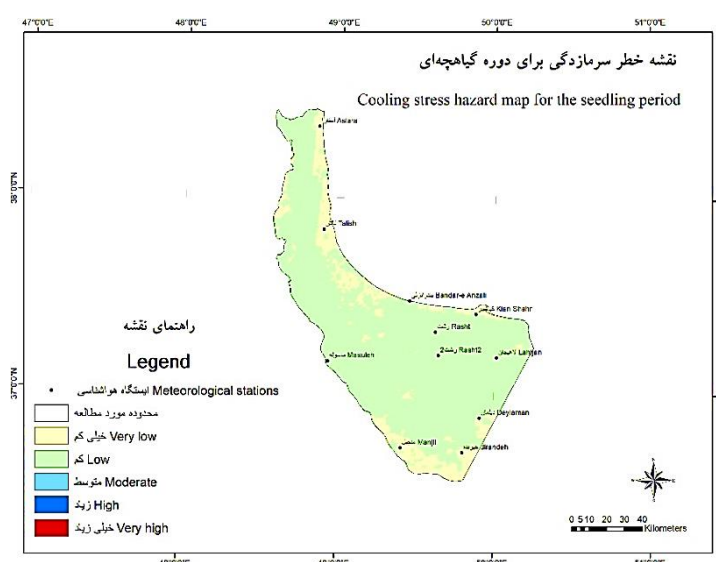
خطر سرمازدگی در سطح کل استان مربوط به ارتفاعات ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بوده و در مرحله جوانه‌زنی و زایشی میزان این خطر زیاد و خیلی زیاد است و هر چه که به دریا نزدیک‌تر می‌شویم میزان خطر در همه مراحل رشد حتی در مراحل جوانه‌زنی و زایشی کم و خیلی کم است.

دوره رویشی منطقه دارای ۹۲/۶۲ درصد خطر کم و ۷/۳۸ درصد خیلی کم و در دوره گیاهچه‌ای دارای ۸۴/۶۶ درصد خطر کم و ۱۵/۳۴ درصد خیلی کم و در دوره زایشی ۴۷/۸۶ درصد خیلی کم، ۴۷/۳۹ درصد کم، ۳/۸۴ درصد متوسط، ۰/۶۹ درصد زیاد و ۰/۲۱ درصد دارای خطر خیلی زیاد است. بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی خطر، رخداد سرمازدگی طی ۱۷ سال موردبررسی قرار گرفت؛ و نشان داد که بیشترین



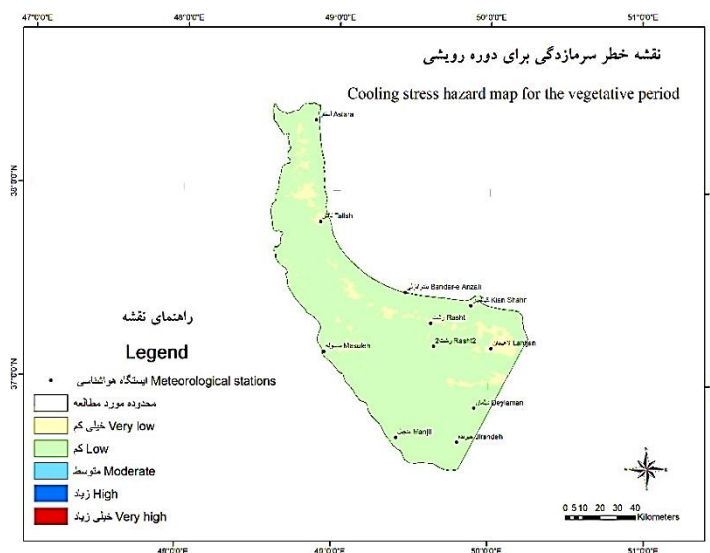
شکل ۱. نقشه خطر سرمازدگی برای دوره جوانه‌زنی

Fig. 1. Cooling stress hazard map for the germination period



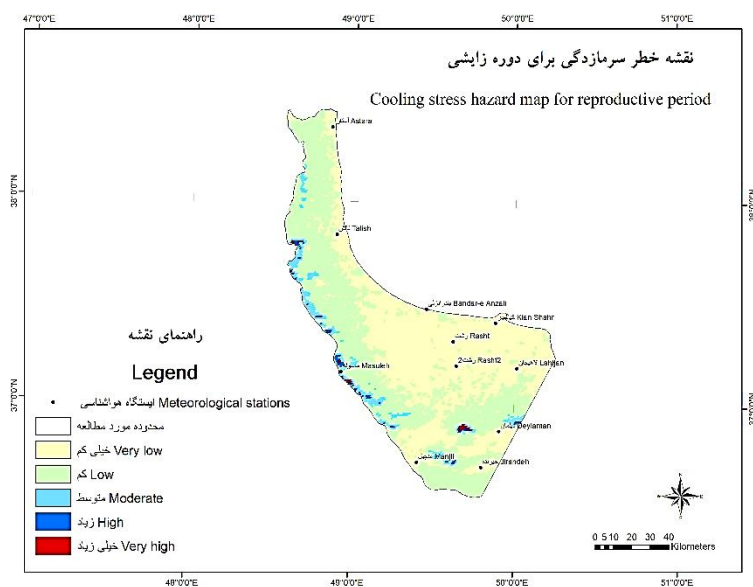
شکل ۲. نقشه خطر سرمازدگی برای دوره گیاهچه‌ای

Fig. 2. Cooling stress hazard map for the seedling period



شکل ۳. نقشه خطر سرمازدگی برای دوره رویشی

Fig. 3. Cooling stress hazard map for the vegetative period



شکل ۴. نقشه خطر سرمازدگی برای دوره زایشی

Fig. 4. Cooling stress hazard map for reproductive period

باید تاریخ مناسبی را برای دوره جوانه‌زنی انتخاب کنیم تا در این زمان کمترین تلفات را داشته باشد. همچنین در مناطق شمال غربی استان که این مناطق فاصله دریا تا مناطق کوهستانی کم است بهتر است برنج کشت نشود؛ چون خطر سرمازدگی در این مناطق نسبت به سایر مناطق استان بیشتر است و دارای شدت زیاد و خیلی زیاد است. در سایر مناطق که دارای شدت متوسط و کم هستند پیشنهاد می‌شود به تاریخ کشت دقت کنند به خاطر اینکه بعد از دوره جوانه‌زنی دوره زایشی بیشترین خطر سرمازدگی را داراست که برای

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برنج در دوره جوانه‌زنی نسبت به سایر مراحل رشد در معرض خطر سرمازدگی قرار دارد. بر اساس نتایج آندایا و مکیل (Andaya and Mackill, 2003) در مراحل اولیه رشد برنج، وقوع تنش دمای پایین بر جوانه‌زنی بذر تأثیر می‌گذارد که مانع از استقرار گیاهچه می‌شود و در نهایت منجر به بلوغ غیریکنواخت محصول می‌شود. خطر سرمازدگی برنج در دو مرحله رویشی و گیاهچه‌ای کم و خیلی کم است که با کمک نتایج حاصل و همچنین با توجه به داده‌های هواشناسی در سطح زیر کشت،

همچنین کاهش عملکرد محصول ناشی از سرمازدگی قابل بررسی است. در نهایت تأثیر تنش دمایی و سرمازدگی در مراحل مختلف رشد برنج نشان داد؛ در مراحل رشد اولیه گیاه از جوانه‌زنی تا پنجه دهی و ظهور خوشه تا طول شدن ساقه از حساس‌ترین مراحل نسبت به تنش است. ارزیابی خطر سرمازدگی از طریق تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خطر، کمک به بهبود مدیریت، تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی و سیاست‌های کشاورزی می‌کند.

جولوگیری از این اتفاق بهترین کار تعیین زمان کاشت مناسب و پرهیز از سرمازدگی در مراحل اولیه دوره رشد است. همچنین در مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد بایستی از ارقامی استفاده شود که در دماهای پایین تحمل بالاتری دارند؛ چون همان‌طور که می‌دانیم ارقام مختلف برنج از نظر تحمل به دمای پایین بسیار متفاوت هستند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تصاویر ماهواره‌ای در ارزیابی تنش‌های سرما عملکرد خوبی دارند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، سرمازدگی در مراحل مختلف رشد برنج و

منابع

- Ahmed, K., Shahid, S., Harun, S.B., 2014. Spatial interpolation of climatic variables in a predominantly arid region with complex topography. *Environment Systems and Decisions*, 34, 555–563. <https://doi.org/10.1007/s10669-014-9519-0>
- Ahuja, I., de Vos, R.C., Bones, A.M., Hall, R.D., 2010. Plant molecular stress responses face climate change. *Trends in Plant Science*, 15, 664–674.
- Andaya, V.C., Mackill, D.J., 2003. Mapping of QTLs associated with cold tolerance during the vegetative stage in rice. *Journal of Experimental Botany*, 54, 2579–2585. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg243>
- Antal, A., Guerreiro, P.M.P., Cheval, S., 2021. Comparison of spatial interpolation methods for estimating the precipitation distribution in Portugal. *Theoretical and Applied Climatology*, 145, 1193–1206. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-329689/v1>
- Arnous, M.O., Omar, A.E., 2018. Hydrometeorological hazards assessment of some basins in Southwestern Sinai area, Egypt. *Journal of Coastal Conservation*, 22, 721–743. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0604-2>
- Azizian, A., Shokoohi, A., 2015. Investigation of the Effects of DEM Creation Methods on the Performance of a Semidistributed Model: TOPMODEL. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20, 05015005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001204](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001204)
- Becker, C.C., Streck, N.A., Schwab, N.T., Uhlmann, L.O., Tomiozzo, R., Ferraz, S.E.T., 2021. Climate risk zoning for gladiolus production under three climate change scenarios. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, 25, 297–304. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n5p297-304>
- Belal, A.-A., El-Ramady, H.R., Mohamed, E.S., Saleh, A.M., 2014. Drought risk assessment using remote sensing and GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 35–53. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0707-2>
- Bhunja, G.S., Shit, P.K., Maiti, R., 2018. Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.02.001>
- Caldana, N.F.da S., Nitsche, P.R., Ferreira, L.G.B., MartelÃ3cio, A.C., Caramori, P.H., Zaccheo, P.V.C., Martins, J.A., 2020. Agroclimatic risk zoning of mango (*Mangifera indica*) in the hydrographic basin of Paran River III, Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 16, 983–991. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.14737>
- Carvalho, K.S., Wang, S., 2019. Characterizing the Indian Ocean sea level changes and potential coastal flooding impacts under global warming. *Journal of Hydrology*, 569, 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.072>
- Chauhan, Y.S., Allard, S., Krosch, S., Ryan, M., Rachaputi, R.C.N., 2022. Relationships of frequencies of extreme low temperatures with grain yield of some Australian commercial chickpea cultivars. *International Journal of Biometeorology*, 66, 2105–2115. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02344-9>
- Cheng, Y., Huang, J., Han, Z., Guo, J., Zhao, Y., Wang, X., Guo, R. 2013. Cold damage risk

- assessment of double cropping rice in Hunan, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 12, 352–363.
- Crimp, S., Bakar, K.S., Kokic, P., Jin, H., Nicholls, N., Howden, M., 2015. Bayesian space-time model to analyse frost risk for agriculture in Southeast Australia: SPACE-TIME MODEL TO ANALYSE FROST RISK. *International Journal of Climatology*, 35, 2092–2108. <https://doi.org/10.1002/joc.4109>
- Cruz, R.P. da, Sperotto, R.A., Cargnelutti, D., Adamski, J. M., de Freitas Terra, T., Fett, J.P., 2013. Avoiding damage and achieving cold tolerance in rice plants. *Food and Energy Security*, 2, 96–119. <https://doi.org/10.1002/fes3.25>
- Davatgar, N., Shahdi Koomleh, A., Amiri Larijani, B., Tarang, A.R., Padasht, F., Majidi, F., Mohammadian, M., Fallah, A., Farzaneh, D., Azadpeyma, V.A., Karbalaee, M.T., Guilani, A.A., Babazadeh, S., Yaghoubi, B., Nasiri, M., Allahgholipour, M., Dorosti, H., Sodaee, S., Mousanejad, S., 2012. Guidelines for assessing damage by separation of management and natural factors in different stages of rice growth. Research project number 40091 dated 19/02/2012 Agriculture information and science document center in Areo (Agriculture research education extension organization) [In Persian].
- Elumalai, V., Brindha, K., Sithole, B., Lakshmanan, E., 2017. Spatial interpolation methods and geostatistics for mapping groundwater contamination in a coastal area. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 11601–11617. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8681-6>
- Emamifar, S., Rahimikhoob, A., Noroozi, A.A., 2013. Daily mean air temperature estimation from MODIS land surface temperature products based on M5 model tree: DAILY MEAN AIR TEMPERATURE ESTIMATION FROM MODIS. *International Journal of Climatology*, 33, 3174–3181. <https://doi.org/10.1002/joc.3655>
- Fallah, A., Miarostami, P., 2015. Effect of temperature treatments on growth stages and yield of rice varieties in greenhouse. *Applied Field Crops Research*, 28, 94–103. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22092/aj.2015.105728>
- Garnero, G., Godone, D., 2014. Comparisons Between Different Interpolation Techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5-W3, 139–144. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W3-139-2013>
- Gharachorloo, M., Zulfiqar, A., Bayat, M. H., Bahrami, F., 2019. Arsenic Tracking in Iranian Rice: Analysis of Agricultural Soil and Water, Unpolished Rice and White Rice. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 9, 19–34.
- Ghorbani, A., Zarinkamar, F., Fallah, A., 2011. Effect of cold stress on the anatomy and morphology of the tolerant and sensitive cultivars of rice during germination. *Cell and Tissue Journal*, 2, 235–244. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.52547/JCT.2.3.235>
- Gobbett, D. L., Nidumolu, U., Crimp, S., 2020. Modelling frost generates insights for managing risk of minimum temperature extremes. *Weather and Climate Extremes*, 27, 100176. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.06.003>
- Gross, B.L., Zhao, Z., 2014. Archaeological and genetic insights into the origins of domesticated rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 6190–6197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308942110>
- Huang, F., Liu, D., Tan, X., Wang, J., Chen, Y., He, B., 2011. Explorations of the implementation of a parallel IDW interpolation algorithm in a Linux cluster-based parallel GIS. *Computers and Geosciences*.
- Jalili Pirani, F., Modarres, R., 2020. Geostatistical and deterministic methods for rainfall interpolation in the Zayandeh Rud basin, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 65, 2678–2692. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1833014>
- Ji, R., Yu, W., Feng, R., Wu, J., Zhang, Y., 2021. Identification and characteristics of combined agrometeorological disasters caused by low temperature in a rice growing region in Liaoning Province, China. *Scientific Reports*, 11, 9968. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89227-y>
- Kayess, M.O., Hassan, M.M., Nurhasan, M., Ahmed, K., 2020. Effect of Low Temperature on Chlorophyll and Carotenoid Content on the Seedlings of Some Selected Boro Rice Varieties. *American Journal of Plant Sciences*,

- 11, Article 2.
<https://doi.org/10.4236/ajps.2020.112010>
- Keshtkar, A.R., Moazami, N., Afzali, A., 2021. Assessment of spatial interpolation techniques for drought severity analysis in Iran's Salt Lake Basin. *Desert*, 26.
<https://doi.org/10.22059/jdesert.2021.305618.1006786>
- Kimura, K., Kudo, K., Maruyama, A., 2021. Spatiotemporal distribution of the potential risk of frost damage in tea fields from 1981-2020: A modeling approach considering phenology and meteorology. *Journal of Agricultural Meteorology*, 77, 224-234.
<https://doi.org/10.2480/agrmet.D-21-00011>
- Lagrini, K., Ghafiri, A., Ouali, A., Elrhaz, K., Feddoul, R., Elmoutaki, S., 2020. Application of geographical information system (GIS) for the development of climatological air temperature vulnerability maps: An example from Morocco. *Meteorological Applications*, 27, e1871. <https://doi.org/10.1002/met.1871>
- Lakra, N., Soni, A., Munjal, R., 2020. Biotechnological approaches to develop rice tolerance to low and high temperature stress. *Rice Research for Quality Improvement: Genomics and Genetic Engineering*: 1, 549-578. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4120-9_23
- Li, S., Wang, Z., Huang, J. 2018. Evaluation of Tea Frost Risk in Zhejiang Province Based on GIS. 7th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics) IEEE, 2018. 1-4. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2018.8476062>
- Liang, C., Qiao-jun, L.O.U., Zong-xiu, S.U.N., Yong-zhong, X., Xin-qiao, Y.U., Li-jun, L.U. O., 2006. QTL mapping of low temperature on germination rate of rice. *Rice Science*, 13, 93.
- Liu, X., Zhang, Z., Shuai, J., Wang, P., Shi, W., Tao, F., Chen, Y., 2013. Impact of chilling injury and global warming on rice yield in Heilongjiang Province. *Journal of Geographical Sciences*, 23, 85-97.
<https://doi.org/10.1007/s11442-013-0995-9>
- Long, J., Liu, Y., Xing, S., Zhang, L., Qu, M., Qiu, L., Huang, Q., Zhou, B., Shen, J., 2020. Optimal interpolation methods for farmland soil organic matter in various landforms of a complex topography. *Ecological Indicators*, 110, 105926.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105926>
- Lou, W., Zhao, Y., Huang, X., Zhu, T., Yang, M., Deng, S., Zhou, Z., Zhang, Y., Sun, Q., Chen, S., 2023. Frost risk assessment based on the frost-induced injury rate of tea buds: A case study of the Yuezhou Longjing tea production area, China. *European Journal of Agronomy*, 147, 126839. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126839>
- Masoodian, S.A., Keikhosravi Kiany, M.S., 2020. Trend analysis of snow accumulation season start in Iran using remote sensing data. *Geography and Environmental Planning*, 31, 1-14. [In Persian with English summary].
<https://doi.org/10.22108/gep.2020.120775.1249>
- Mosleh, M., Hassan, Q., Chowdhury, E., 2015. Application of remote sensors in mapping rice area and forecasting its production: A review. *Sensors*, 15, 769-791.
<https://doi.org/10.3390/s150100769>
- Navabi, M., Allahgholipoor, M., 2014. Rice phenological stages. Ministry of Agriculture-Jahad Agricultural Research, Education and Extension Organization Rice Research Institute of Iran. Research project number 88/329 dated 2014 Agriculture information and science document center in Areeo (Agriculture research education extension organization). [In Persian].
- Najeeb, S., Mahender, A., Anandan, A., Hussain, W., Li, Z., Ali, J., 2021. Genetics and Breeding of Low-Temperature Stress Tolerance in Rice. *Rice Improvement: Physiological, Molecular Breeding and Genetic Perspectives*. 221-280.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-66530-2_8
- Nosrati, M., Barghi, H., Ghanbari, Y. 2022. Changing the cultivation pattern and its effect on the structure of stable economy (Case study: Rural areas of Gilan province). *Geography and Environmental Sustainability*. 12, 109-125. [In Persian with English summary].
<https://doi.org/10.22126/GES.2022.7432.2498>
- Pachecoy, M.I., Ramirez, I.A., Marín, A., Pontaroli, A.C., 2014. Assessment of cold tolerance at early developmental stages and allelic variation at candidate genes in South American rice germplasm. *Euphytica*, 197, 423-434. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1078-4>
- Pandi, H., Asadi Kapourchal, S., Vazifedoust, M., Rezaei, M., 2020. Simulation of rice yield and its components using SWAP model and remote sensing technology for optimal use of

- water and soil. *Environment and Water Engineering*, 6, 374–387. <https://doi.org/10.22034/jewe.2020.242119.1398>
- Piri, I., Khanamani, A., Shojaei, S., Fathizad, H., 2017. Determination of the best geostatistical method for climatic zoning in Iran. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15, 93–103.
- Ranawake, A. L., Manangkil, O. E., Yoshida, S., Ishii, T., Mori, N., Nakamura, C., 2014. Mapping QTLs for cold tolerance at germination and the early seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.). *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 28, 989–998. <https://doi.org/10.1080/13102818.2014.978539>
- Robinson, T.P., Metternicht, G., 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.07.003>
- Saadat, M., Hasanlou, M., Homayouni, S., 2019. Rice crop mapping using sentinel-1 time series images (Case study: Mazandaran, Iran). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4-W18, 897–904. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-897-2019>
- Sarangi, S.K., Maji, B., Singh, S., Sharma, D.K., Burman, D., Mandal, S., Singh, U.S., Ismail, A. M., Haefele, S.M., 2016. Using improved variety and management enhances rice productivity in stagnant flood -affected tropical coastal zones. *Field Crops Research*, 190, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.024>
- Selvaraj, M. G., Ishizaki, T., Valencia, M., Ogawa, S., Dedicova, B., Ogata, T., Yoshiwara, K., Maruyama, K., Kusano, M., Saito, K., Takahashi, F., Shinozaki, K., Nakashima, K., Ishitani, M., 2017. Overexpression of an Arabidopsis thaliana galactinol synthase gene improves drought tolerance in transgenic rice and increased grain yield in the field. *Plant Biotechnol J*, 15, 1465–1477. <https://doi.org/10.1111/pbi.12731>
- Sheng, J., Yu, P., Zhang, H., Wang, Z., 2021. Spatial variability of soil Cd content based on IDW and RBF in Fujiang River, Mianyang, China. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 419–429. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02758-1>
- Singha, M., Sarmah, S., 2019. Incorporating crop phenological trajectory and texture for paddy rice detection with time series MODIS, HJ-1A and ALOS PALSAR imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 52, 73–87.
- Suzuki, K., Nagasuga, K., Okada, M., 2008. The chilling injury induced by high root temperature in the leaves of rice seedlings. *Plant & Cell Physiology*, 49, 433–442. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn020>
- Torabi Golsefidi, H., Givi, J., Karimian Eghbal, M., 2005. Land evaluation of paddy soils by FCC and parametric methods and their comparisons, in eastern Gilan Province. *Pajouhesh-va-Sazandegi*, 18, 28–31. [In Persian with English summary].
- Van Mierlo, C., Faes, M.G.R., Moens, D., 2021. Inhomogeneous interval fields based on scaled inverse distance weighting interpolation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 373, 113542. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113542>
- Wan, Z., 2006. MODIS land surface temperature products users' guide. ICES, University of California Santa Barbara, CA, USA. 805, 7
- Wang, S., Huang, G.H., Lin, Q.G., Li, Z., Zhang, H., Fan, Y.R., 2014. Comparison of interpolation methods for estimating spatial distribution of precipitation in Ontario, Canada. *International Journal of Climatology*, 34, 3745–3751. <https://doi.org/10.1002/joc.3941>
- Wang, Z., Wang, J., Wang, F., 2009. Genetic control of germination ability under cold stress in rice. *Rice Science*, 16(3), 173–180. [https://doi.org/10.1016/S1672-308\(08\)60076-1](https://doi.org/10.1016/S1672-308(08)60076-1)
- Xiong, Q., Deng, Y., Zhong, L., He, H., Chen, X., 2018. Effects of drought-flood abrupt alternation on yield and physiological characteristics of rice. *International Journal of Agriculture and Biology*, 20, 1107–1116. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0609>
- Xu, C., Qu, J. J., Hao, X., Zhu, Z., Gutenberg, L., 2020. Surface soil temperature seasonal variation estimation in a forested area using combined satellite observations and in-situ measurements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102156. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102156>

- Xu, J., Guga, S., Rong, G., Riao, D., Liu, X., Li, K., Zhang, J., 2021a. Estimation of Frost Hazard for Tea Tree in Zhejiang Province Based on Machine Learning. *Agriculture*. 11, 607.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11070607>
- Xu, J., Guga, S., Rong, G., Riao, D., Liu, X., Li, K., Zhang, J., 2021b. Estimation of Frost Hazard for Tea Tree in Zhejiang Province Based on Machine Learning. *Agriculture*. 11, 607.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11070607>
- Xu, S., Yang, X., Sun, R., Fu, S., Liang, H., Chen, L., 2018. Cold wave climate characteristics and risk zoning in Jilin Province. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6, 38–51.
<https://doi.org/10.4236/gep.2018.68004>
- Ye, T., Zong, S., Kleidon, A., Yuan, W., Wang, Y., Shi, P., 2019. Impacts of climate warming, cultivar shifts, and phenological dates on rice growth period length in China after correction for seasonal shift effects. *Climatic Change*, 155, 127–143.
- Yoshida, S., 1981. *Fundamentals of Rice Crop Science*. International Rice Research Institute. 1- 278.
- Yue, Y., Zhou, Y., Wang, J., Ye, X., 2016. Assessing Wheat Frost Risk with the Support of GIS: An Approach Coupling a Growing Season Meteorological Index and a Hybrid Fuzzy Neural Network Model. *Sustainability*. 8, 1308. <https://doi.org/10.3390/su8121308>