

An algorithmic approach for determining the optimal sowing dates for crops in Iran

**Seyedreza Amiri^{*1}, Elias Soltani², Seyed Majid Alimagham³, Alireza Nehbandani⁴,
Ebrahim Zeinali⁵, Benjamin Torabi⁶, Eskandar Zand⁷, Sorayya Ghassemi⁸,
Omid Alasti⁹, Amir Dadrasi¹⁰, Roghiyeh Alsadat Hosseini¹¹, Mahboube Zahed¹²,
Hosna Fayazi¹³, Hossein Kamari¹⁴, Rahele Arabameri¹⁵, Zahra Mohammadzadeh¹⁶,
Samaneh Rahban¹⁷, Samaneh Mohammadi¹⁸, Saleh Keramat¹⁹, Afshin Soltani^{*20}**

1. Corresponding Author, Dept. of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Higher Education Complex of Saravan, Saravan, Iran. E-mail: r.amiri@saravan.ac.ir
2. Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: elias.soltani@ut.ac.ir
3. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: m.alimagham@gmail.com
4. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: a.nehbandani@yahoo.com
5. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: zeinalistudents@gmail.com
6. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ben_torabi@yahoo.com
7. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran. E-mail: eszand@yahoo.com
8. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran. E-mail: ghasemi.2560@gmail.com
9. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: o.alasti@gmail.com
10. Ph.D. Student of Agronomy, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. E-mail: v.dadrasi@gmail.com
11. Dept. of Agronomy, Faculty of Agriculture, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran. E-mail: hosseini240@yahoo.com
12. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mahboube.zahed@gmail.com
13. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: h.fayaz222@gmail.com
14. Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: hossin.kamari@gmail.com
15. Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: -----
16. Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: -----
17. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: samaneh.rahban@yahoo.com
18. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: -----
19. Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: -----
20. Corresponding Author, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: afshin.soltani@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper Article history: Received: 03.06.2024 Revised: 04.02.2024 Accepted: 04.21.2024 Keywords: Crops, Simulation, SSM-iCrop2, Temperature	Background and Objectives: The selection of sowing dates within crop simulation models holds great importance when addressing issues pertaining to food security and climate change. Typically, statistical analyses lead to the adoption of a fixed sowing date in these models. However, it should be noted that farmers do not adhere to such a rigid schedule; rather, their sowing dates are subject to annual variations influenced by weather conditions. Consequently, incorporating climatic data becomes an effective methodology for developing algorithms and estimations regarding sowing date within crop models. Materials and Methods: This study involved the collection of information regarding the sowing dates of 12 important crops in Iran from various provinces, with the assistance of Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO) 's provincial centers. Subsequently, algorithmization was performed for each crop based on the sowing dates of farmers. The SSM-iCrop2 model was utilized to evaluate different threshold values for each algorithm in each crop, and the appropriate value was selected to ensure that the predicted sowing date aligned with that of the farmers. To evaluate the sowing algorithm, observed sowing date data were collected from various studies. For those studies where observed sowing dates were available, algorithmization of the sowing date was conducted. Results: The results of the evaluation of different algorithms indicate that the third algorithm is well-suited for autumn crops, including wheat, barley, rapeseed, chickpeas, lentils, potatoes, and sugar beets, with sowing recommended when the mean air temperature is below 16 °C. Moreover, this temperature threshold increases to 17-20 °C in warmer areas. Algorithm number two was found to be suitable for spring cultivation of crops such as beans, chickpeas, lentils, and potatoes, with sowing recommended when the mean air temperature exceeds 7 °C. For spring sugar beets, this temperature was 12°C, and for corn in cold climates and summer crops such as beans during early sowing dates, the recommended temperature range was 15-17 °C. Conclusion: The results of our study can be utilized in crop simulation models to replicate farmers' sowing behavior. Additionally, these algorithms can be applied in regions where information regarding sowing dates is unavailable. By incorporating an algorithm instead of a fixed sowing date within the model, a sowing date that more closely aligns with that of the farmer can be simulated, particularly in situations where various regions and years are being considered.
Cite this article: Amiri, Seyedreza, Soltani, Elias, Alimagham, Seyed Majid, Nehbandani, Alireza, Zeinali, Ebrahim, Torabi, Benjamin, Zand, Eskandar, Ghassemi, Sorayya, Alasti, Omid, Dadrasi, Amir, Hosseini, Roghiyeh Alsadat, Zahed, Mahboube, Fayazi, Hosna, Kamari, Hossein, Arabameri, Rahele, Mohammadzadeh, Zahra, Rahban, Samaneh, Mohammadi, Samaneh, Keramat, Saleh, Soltani, Afshin. 2025. An algorithmic approach for determining the optimal sowing dates for crops in Iran. <i>Journal of Plant Production Research</i>, 32 (1), 1-23.	
	© The Author(s). DOI: ----- Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

رهیافت الگوریتم‌سازی تعیین تاریخ کاشت گیاهان زراعی در ایران

سید رضا امیری^{۱*}، الیاس سلطانی^۲، سید مجید عالیمقام^۳، علیرضا نه‌بندانی^۴، ابراهیم زینلی^۵، بنیامین ترابی^۶، اسکندر زند^۷، ثریا قاسمی^۸، امید الستی^۹، امیر دادرسی^{۱۰}، رقیه السادات حسینی^{۱۱}، محبوبه زاهد^{۱۲}، حسنا فیاضی^{۱۳}، حسین کمری^{۱۴}، راحله عرب‌عامری^{۱۵}، زهرا محمدزاده^{۱۶}، سمانه رهبان^{۱۷}، سمانه محمدی^{۱۸}، صالح کرامت^{۱۹}، افشین سلطانی^{۲۰*}

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی سراوان، سراوان، ایران.
رایانامه: r.amiri@saravan.ac.ir
۲. گروه آموزشی علوم زراعی و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: elias.soltani@ut.ac.ir
۳. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: m.alimagham@gmail.com
۴. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: a.nehbandani@yahoo.com
۵. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: zeinalistudents@gmail.com
۶. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ben_torabi@yahoo.com
۷. مؤسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران. رایانامه: ezsand@yahoo.com
۸. مؤسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران. رایانامه: ghasemi.2560@gmail.com
۹. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: o.alasti@gmail.com
۱۰. دانشجوی دکتری زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: v.dadrasi@gmail.com
۱۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران. رایانامه: hosseini240@yahoo.com
۱۲. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mahboube.zahed@gmail.com
۱۳. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: h.fayaz222@gmail.com
۱۴. گروه آموزشی علوم زراعی و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hossin.kamari@gmail.com
۱۵. گروه آموزشی علوم زراعی و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: -----
۱۶. گروه آموزشی علوم زراعی و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: -----
۱۷. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: samaneh.rahban@yahoo.com
۱۸. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: -----
۱۹. دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: -----
۲۰. نویسنده مسئول، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: afshin.soltani@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲ واژه‌های کلیدی: دما، زراعی، شبیه‌سازی، گیاهان SSM-iCrop2	سابقه و هدف: انتخاب تاریخ کاشت در مدل‌های شبیه‌سازی رشد و تولید گیاهان زراعی در مطالعات مرتبط با امنیت غذایی و تغییر اقلیم اهمیت زیادی دارد. در بیش‌تر موارد بر اساس آماربرداری، تاریخ کاشت ثابتی انتخاب می‌شود. این در حالی است که تاریخ کاشت واقعی کشاورزان ثابت نبوده و بسته به شرایط آب و هوایی هر سال ممکن است تغییر نماید. بنابراین استفاده از داده‌های اقلیمی برای الگوریتم‌سازی و تخمین زمان کاشت در مدل‌های گیاهان زراعی رهیافتی مفید برای پیش‌بینی دقیق عملکرد می‌باشد. مواد و روش‌ها: در این مطالعه اطلاعات تاریخ کاشت گیاهان زراعی مهم کشور (۱۲ گیاه زراعی مهم) از استان‌های مختلف با کمک مراکز استانی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی کشور جمع‌آوری گردید. سپس با توجه به هر گیاه و تاریخ کاشت کشاورزان، الگوریتم‌سازی انجام شد. با کمک مدل SSM-iCrop2 مقادیر مختلف آستانه برای الگوریتم‌های مختلف در هر گیاه بررسی شدند و مقدار مناسب انتخاب گردید طوری که تاریخ کاشت پیش‌بینی‌شده با تاریخ کاشت کشاورزان بیش‌ترین انطباق را داشته باشد. جهت ارزیابی الگوریتم کاشت، داده‌های واقعی تاریخ کاشت در مطالعات مختلف گردآوری شد. سپس برای همان مطالعات که تاریخ کاشت واقعی در دسترس بود، الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت صورت گرفت. یافته‌ها: دو الگوریتم پر کاربرد بودند از: گیاهان پاییزه مثل گندم، جو، کلزا، نخود، عدس، سیب‌زمینی و چغندر قند زمانی کشت می‌شوند که میانگین دمای هوا به کم‌تر از ۱۶ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته باشد. در مناطق گرم‌تر این حد دمایی به ۱۷ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز افزایش پیدا می‌کند. در کشت بهاره، گیاهانی مثل لوبیا، نخود، عدس و سیب‌زمینی زمانی کشت می‌شوند که متوسط دمای هوا به بالاتر از ۷ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته‌باشد. این حد دمایی برای چغندر قند بهاره درجه سانتی‌گراد ۱۲ و برای ذرت در اقلیم‌های سرد و نیز گیاهان تابستانی مثل لوبیا در تاریخ کاشت‌های زود ۱۵ تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد است. نتیجه‌گیری: از نتایج این مطالعه می‌توان در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی برای تقلید رفتار کشاورزان در کاشت استفاده نمود. هم‌چنین برای نقاطی که اطلاعات تاریخ کاشت در دسترس نباشد، الگوریتم‌های کاشت قابل استفاده هستند. به‌عبارت دیگر، استفاده از یک الگوریتم به‌جای تاریخ کاشت ثابت در مدل می‌تواند تاریخ کاشت نزدیک‌تر به کشاورز را به‌ویژه در شرایطی که مناطق و سال‌های متفاوتی مدنظر باشد را شبیه‌سازی کند.
استناد: امیری، سید رضا، سلطانی، الیاس، عالیمقام، سید مجید، نه‌بندانی، علیرضا، زینلی، ابراهیم، ترابی، بنیامین، زند، اسکندر، قاسمی، ثریا، الستی، امید، دادرسی، امیر، حسینی، رقیه السادات، زاهد، محبوبه، فیاضی، حسنا، کمری، حسین، عرب‌عامری، راحله، محمدزاده، زهرا، رهبان، سمانه، محمدی، سمانه، کرامت، صالح، سلطانی، افشین (۱۴۰۴). رهیافت الگوریتم‌سازی تعیین تاریخ کاشت گیاهان زراعی در ایران. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۳۲ (۱)، ۲۳-۱. DOI: -----	
ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان © نویسندگان	

مقدمه

امنیت غذایی یکی از مهم‌ترین مسائل در ارتباط با افزایش رشد جمعیت است (۱). تولید محصولات زراعی تحت تأثیر عوامل مدیریتی در مزرعه (مانند کاشت، آبیاری، کوددهی، مدیریت زراعی و برداشت) می‌باشد (۲). انتخاب تاریخ کاشت مناسب در مدل‌ها اهمیت زیادی دارد. زمان کاشت می‌تواند اثر زیادی بر عملکرد نهایی محصول داشته باشد (۳). تغییرات دما، آب خاک، بارندگی، نوع محصول قبلی از جمله مواردی هستند که می‌توانند تاریخ کاشت را از یک سال تا سال دیگر تغییر دهند و از طرفی بر فنولوژی گیاه اثر داشته باشند (۴).

کاربرد الگوریتم‌های مختلف دمایی و رطوبتی روشی دیگر برای تعیین تاریخ کاشت است (۵). الگوریتم‌ها ابتدا بر اساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده از تاریخ کاشت در مزارع کشاورزان تهیه می‌شوند طوری‌که با به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌ها، رفتار کشاورز قابل تقلید است و می‌توان تأثیر تغییر در رفتار کشاورز بر عملکرد و تولید را نیز بررسی کرد. همچنین با استفاده از این الگوریتم‌ها می‌توان در نقاط و شرایطی (شرایط آینده) که تاریخ کاشت واقعی در اختیار نباشد تاریخ کاشت را مشخص ساخت. همچنین، تغییر اقلیم آینده نیز می‌تواند از طریق تغییرات دمایی و بارندگی موجب طولانی‌تر شدن فصل کشت در بسیاری از نقاط دنیا شود (۶). تغییر بارندگی و افزایش دما در بسیاری از مناطق دنیا می‌تواند در آینده کشاورزان را مجبور به تغییر تاریخ کاشت نماید. الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت می‌تواند در تعیین و بهینه‌سازی تاریخ کاشت در آینده نیز مفید واقع شود (۷).

سه روش تخمین تاریخ کاشت وجود دارد که در مدل‌سازی گیاهان زراعی استفاده می‌شود. در روش اول از یک تاریخ کاشت ثابت بر اساس مشاهدات مربوط به تاریخ کاشت در دوره زمانی خاص استفاده

می‌شود (۸). در روش دوم تاریخ کاشت برای رسیدن به حداکثر عملکرد بهینه ارزیابی می‌شود یعنی تاریخ‌های مختلف بررسی و بهترین تاریخ کاشت انتخاب می‌شود (۹). در روش سوم از داده‌های اقلیمی برای الگوریتم‌سازی و تخمین زمان کاشت استفاده می‌شود (۴، ۱۰).

در بیشتر مطالعات به‌ویژه در مناطق معتدل، الگوریتم‌های کاشت فقط برحسب دمای هوا تعریف شده‌اند (۱۱، ۱۲). تعداد محدودی از مطالعات نیز رطوبت خاک و بارندگی را در نظر می‌گیرند (۱۳، ۱۴). در مدل‌های مختلف گیاهان زراعی امکان تعریف قواعدی جهت انتخاب تاریخ کاشت وجود دارد. برای مثال، در مدل CropSyst تاریخ کاشت می‌تواند توسط دما و محتوای آب خاک تعریف شود که مقادیر بحرانی آن‌ها را کاربر باید مشخص کند (۱۵). در مدل STICS نیز آستانه‌های رطوبت خاک و بارندگی مشخص شده توسط کاربر می‌تواند برای تعیین تاریخ کاشت به‌کار گرفته شود (۱۶). در مدل DSSAT آستانه‌های آب و دما جهت انتخاب تاریخ کاشت در یک بازه زمانی کاشت قابل استفاده است (۱۷). در مدل APSIM امکان تعریف قواعد متفاوت کاشت توسط کاربران وجود دارد که توسط متغیرهای محاسباتی داخلی مدل عمل می‌کند و در نتیجه انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد (۲).

در مدل‌سازی در مقیاس بزرگ که نقاط زیادی را در بر می‌گیرد، امکان تعریف تاریخ کاشت برای تک‌تک نقاط بسیار سخت است (۱۸). شبیه‌سازی تولید و مصرف آب گیاهان زراعی در سطح کشور نیز شامل نقاط متعدد با اقلیم‌های متفاوت است (۱۹) که تعریف تاریخ کاشت برای هر نقطه در مدل دشوار خواهد بود. در این شرایط تعریف الگوریتم‌های کاشت و یافتن مقادیر آستانه برای به‌کارگیری آن‌ها

موجب تسهیل کار و نیز افزایش دقت (به دلیل ماهیت پویای این روش) خواهد شد.

در مطالعه‌ای در کشور بورکینافاسو با استفاده از مدل WOFOST الگوریتم تاریخ کاشت ذرت و سورگوم بررسی شد. برای این منظور ۲۲ الگوریتم مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که بارندگی و رطوبت خاک می‌تواند در تعیین زمان کاشت این دو محصول مورداستفاده قرار گیرد (۲۰). هم‌چنین با استفاده از مدل (LPJmL) قواعد کاشت برای گیاهان زراعی مختلف را به‌ترتیب زیر ارائه دادند: برای غلات معتدله (گندم، جو، چاودار و یولاف) تاریخ کاشت بر حسب دما تعیین گردید به‌این‌ترتیب که برای کشت پاییزه دما به ۱۲ درجه سانتی‌گراد و برای کشت بهاره دما به ۵ درجه سانتی‌گراد برسد. برای برنج کشت به‌صورت ثابت در نظر گرفته شد و در نیمکره شمالی روز ۱۲۰ام سال و در نیمکره جنوبی روز ۲۰۰ام سال در نظر گرفته شد. کشت ذرت تابع دما و بارندگی در نظر گرفته شد، به‌نحوی که دمای بهار به ۱۴ درجه سانتی‌گراد برسد و مقدار بارندگی طی ۱۰ روز آخر حدود ۴۰ میلی‌متر باشد (همه نقاط جهان)، ولی در مناطق گرمسیری آسیا مجموع بارندگی ۱۱۰ میلی‌متر باشد. تاریخ کاشت غلات گرمسیری (ارزن و سورگوم) تابع بارندگی تعریف شد و وقتی مقدار بارندگی طی ۱۰ روز آخر حدود ۴۰ میلی‌متر باشد (همه نقاط جهان)، کشت صورت می‌گیرد، ولی در مناطق گرمسیری آسیا باید مجموع بارندگی ۱۱۰ میلی‌متر باشد. تاریخ کاشت حبوبات (عدس) به‌صورت ثابت در نظر گرفته شد و برای نیمکره شمالی روز ۱۱۰ام سال و در نیمکره جنوبی روز ۲۸۰ام سال تعیین شد. تاریخ کاشت گیاهان ریشه‌ای معتدله (چغندرقد) نیز به‌صورت ثابت در نیمکره شمالی روز ۹۰ام سال و در نیمکره جنوبی روز ۲۷۰ام سال در نظر گرفته شد. تاریخ کاشت آفتاب‌گردان برحسب دما تعیین شد و کشت زمانی

صورت می‌گیرد که در بهار دما ۱۵ درجه سانتی‌گراد شود. کشت سویا به‌صورت ثابت و در نیمکره شمالی روز ۱۴۰ام سال و در نیمکره جنوبی روز ۳۲۰ام سال در نظر گرفته شد. کشت کلزا نیز به دو صورت پاییزه و بهاره و تابع دما بود که در پاییز دما به ۱۷ درجه سانتی‌گراد کاهش یابد و در بهار دما به ۵ درجه سانتی‌گراد برسد (۲۱).

هدف از این مطالعه، تهیه الگوریتم‌های کاشت برای گیاهان زراعی مهم کشور در شرایط دیم و آبی با استفاده از مدل SSM-iCrop2 بود تا به‌جای استفاده از تاریخ کاشت ثابت برای هر منطقه، از الگوریتم‌های کاشت استفاده کرد. از طرفی به‌دلیل ماهیت پویای این روش، تاریخ کاشت‌های دقیق‌تری محاسبه می‌شود. بنابراین در مناطقی که اصلی‌ترین گیاهان زراعی کشور کشت می‌شوند، کاربرد الگوریتم‌های کاشت راهگشا خواهد بود.

مواد و روش‌ها

گیاهان زراعی مورد مطالعه: در کشور ۱۸ گیاه زراعی وجود دارد که سطحی بیش از ۵۰ هزار هکتار دارند و به‌عنوان اصلی‌ترین گیاهان زراعی کشور شناخته می‌شوند (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۷). گیاه گندم حدود ۴۲/۶۹ درصد از سطح کل محصولات کشور را به خود اختصاص داده است. پس از آن گیاه جو (۱۱/۶۳ درصد)، یونجه (۴/۳۰ درصد)، برنج (۳/۸۴ درصد) و نخود (۳/۲۵ درصد) قرار دارند. در این پژوهش، الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت برای گیاهان زراعی مهم کشور شامل گندم (آبی و دیم)، جو (آبی و دیم)، برنج (آبی)، ذرت دانه‌ای (آبی)، نخود (دیم)، لوبیا (آبی)، سویا (آبی)، پنبه (آبی)، کلزا (آبی و دیم)، سیب‌زمینی (آبی) و چغندرقد (آبی) مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات تاریخ کاشت این گیاهان با کمک مراکز استانی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و نیز با کمک متخصصان دانشگاهی

و از اطلاعات قابل دسترس آب و هوا و خاک استفاده می‌کند. در این مدل فرض شده است که از لحاظ عناصر غذایی کمبودی وجود ندارد و آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز نیز به‌طور مؤثر کنترل می‌شوند. مهم‌ترین فرآیندهایی که در مدل باید شبیه‌سازی شوند عبارت است از، فنولوژی گیاه، تغییرات سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و موازنه آب خاک. همچنین موارد مربوط به پارامتریابی و ارزیابی مدل به‌طور کامل در سلطانی و همکاران (۲۰۲۰) آمده است.

الگوریتم‌های تاریخ کاشت: الگوریتم‌های تعریف شده در جدول ۱ آمده است. برای شرایطی که الگوریتم‌ها پاسخ ندهند و یا به‌دلیل سیستم زراعی مثل کشت گیاه به‌عنوان گیاه دوم در سیستم دابل‌کراپینگ کشت در زمان خاصی بر اساس سیستم زراعی و نه شرایط آب‌وهوایی صورت می‌گیرد. بهترین نمونه تاریخ کشت سویا یا ذرت یا سبزیجات در تابستان به‌عنوان گیاه دوم است در الگوریتم صفر، تاریخ کاشت برای هر نقطه جغرافیایی ثابت در نظر گرفته می‌شود و برای گیاهانی است که تاریخ کاشت آن‌ها خیلی متغیر نیست. در الگوریتم ۱، فرض بر این است که دما و بارندگی محدودکننده تاریخ کاشت نیستند و چنانچه یک دوره ۵ روزه بارندگی صورت نگیرد که امکان کار در مزرعه فراهم شود، کشت صورت خواهد گرفت. الگوریتم ۲ و ۳ بر اساس دما عمل می‌کنند. در این دو الگوریتم پارامتر آستانه‌ای به نام SowTmp وجود دارد که از این پارامتر برای تعیین زمان کاشت استفاده می‌شود. در الگوریتم ۲ که مخصوص کشت محصولات بهاره در دیم و آبی است، چنانچه دمای هوا بیش‌تر از مقدار SowTmp باشد و برای ۵ روز متوالی بارندگی صورت نگیرد کشت انجام خواهد شد. در شرایط واقعی نیز کشاورزان جهت کاشت محصولات بهاره صبر می‌کنند تا هوا تا حدی گرم شود و خطر سرمای دیررس بهاره

در استان‌های مختلف و تماس با سازمان‌ها و مدیریت‌های جهاد کشاورزی تهیه شدند.

مشخص نمودن اقلیم‌های اصلی: در پروژه GYGA

برای محاسبه متغیرهای مورد استفاده برای پهنه‌بندی اقلیمی از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های واقعی در سرتاسر جهان استفاده شده است. این داده‌ها از بانک اطلاعاتی WorldClim استخراج شده‌اند (۱۹). داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این روش برای دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ میلادی می‌باشد. جهت کسب اطلاعات بیش‌تر در مورد نحوه پهنه‌بندی اقلیمی جهت می‌توان به سایت (www.yieldgap.org/web/guest/cz-ted) مراجعه نمود. برای انجام پهنه‌بندی ابتدا همه مناطق جهان شبکه‌بندی می‌شود. اندازه هر شبکه ۵ دقیقه (تقریباً ۱۰×۱۰ کیلومتر) می‌باشد. سپس شبکه‌هایی که حداقل ۰/۵ درصد از مساحت هر شبکه توسط محصول پوشیده شده باشد، در محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به توضیح است که برای متغیر واحد دما ۱۰ کلاس، برای متغیر شاخص خشکی ۱۰ کلاس و برای متغیر نوسانات دمای فصلی ۳ کلاس ایجاد شده است. برای نام‌گذاری (کدگذاری) هر پهنه اقلیمی نیز از کلاس‌های تعریف شده برای هر متغیر استفاده می‌شود. نام هر پهنه متشکل از یک عدد ۴ رقمی (در مواردی که مقدار متغیر برای یک پهنه در کلاس $GDD > 9851$ عدد ۵ رقمی خواهد شد) می‌باشد.

ساختار مدل: مدل SSM-iCrop2 توسط سلطانی و همکاران (۲۲) ارائه شده است. در این مدل مقدار عملکرد پتانسیل بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک (عمق ۲۵۰ میلی‌متر)، نحوه مدیریت (مانند آبیاری) و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌شود. این مدل با استفاده از ورودی‌های ذکر شده می‌تواند محاسبات را از کاشت تا رسیدگی به صورت روزانه انجام دهد و زمان وقوع مراحل مختلف نمو، سرعت رشد روزانه محصول، عملکرد دانه، شاخص برداشت، تبخیر و تعرق، بهره‌وری آب و سطح برگ را پیش‌بینی

نمی‌شود. الگوریتم ۵، در مناطق پرباران قابل استفاده است. در مناطق پرباران، بارندگی و غرقاب بودن خاک مانع کشت است و تا زمانی که آب خاک به اندازه SowWat کاهش نیابد کشت قابل انجام نخواهد بود. الگوریتم ۶ نیز بر مبنای آب عمل می‌کند، ولی به جای کسر آب قابل دسترس از مقدار بارندگی استفاده می‌کند. به نحوی که وقتی در ۵ روز متوالی میزان بارندگی بیش‌تر از مقدار SowWat باشد، کشت صورت می‌گیرد. این الگوریتم نیز در مناطق دیم قابل استفاده است. الگوریتم ۷ برای شرایط دیم بر اساس ترکیب دما و رطوبت عمل می‌کند. به عبارتی هم میزان SowWat و هم میزان SowTmp برای کشت اهمیت دارد و امکان دارد آب خاک جهت کاشت مناسب باشد، ولی دمای هوا مناسب کشت نباشد و برعکس آن نیز صادق است. در این شرایط از ترکیب رطوبت و دما جهت الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت استفاده می‌شود (جدول ۱).

پشت سر گذاشته شود. در الگوریتم ۳ که مخصوص کشت محصولات پاییزه در دیم و آبی قابل استفاده است، چنانچه دمای هوا کم‌تر از مقدار SowTmp شود و برای ۵ روز متوالی بارندگی صورت نگیرد، کشت انجام خواهد شد. این شرایط نیز در واقع شبیه‌سازی شرایط کاشت واقعی کشاورزان است که برای محصولات پاییزه انجام می‌شود.

الگوریتم‌های ۴ تا ۶ بر مبنای رطوبت خاک عمل می‌کنند. در این الگوریتم‌ها از پارامتری به نام SowWat جهت تعیین زمان کاشت استفاده می‌شود. در الگوریتم ۴، باید مقدار کسر آب قابل دسترس خاک بیش‌تر از مقدار SowWat شود تا در مدل کشت صورت گیرد. این الگوریتم برای کشت در شرایط دیم‌کاری در مناطق خشک کاربرد زیادی خواهد داشت. در این مناطق فاکتور آب خاک جهت کشت اهمیت زیادی دارد و تا زمانی که بارندگی کافی در پاییز صورت نگیرد کشت محصولات انجام

جدول ۱- الگوریتم‌های مورد استفاده در این مطالعه و شرح هر یک از آن‌ها.

Table 1. Algorithms used in this study.

الگوریتم	شرح
0	ثابت. Fixed sowing date
1	کشت در ۵امین روز یک دوره ۵ روزه بدون بارندگی (که امکان کار در مزرعه باشد). Sow in the 5-th day of a 5-day rainfree period
2	کشت در ۵امین روز یک دوره ۵ روزه بدون بارندگی که میانگین دمای هوا طی آن بیش‌تر از مقدار معینی (SowTmp) باشد. این الگوریتم برای کشت‌های بهاره کاربرد دارد. Sow in the 5th day of a 5-day rainfree period + temp > x oC
3	کشت در ۵امین روز یک دوره ۵ روزه بدون بارندگی که میانگین دمای هوا طی آن کم‌تر از مقدار معینی (SowTmp) باشد. این الگوریتم برای کشت‌های پاییزه کاربرد دارد. Sow in the 5th day of a 5-day rainfree period + temp < x oC
4	کاشت در زمانی که کسر آب قابل دسترس خاک بیش‌تر از مقدار معینی (SowWat) باشد. این الگوریتم برای کشت‌های پاییزه در مناطق خشک که وقوع مقداری رطوبت برای کاشت لازم است، کاربرد دارد. Sow when top-layer FTSW1 => SowWat; soilWater should be 'ON'
5	کاشت در زمانی که کسر آب قابل دسترس خاک کم‌تر از مقدار معینی (SowWat) باشد. Sow when top-layer FTSW1 <= SowWat; soilWater should be 'ON'
6	کاشت در زمانی که مجموع بارندگی در یک دوره ۵ روزه بیش‌تر از مقدار معینی (SowWat) باشد. Sow when cum rain > SowWat over a 5-day period
7	ترکیب دما و رطوبت. Sow when cum rain > SowWat over a 5-day period plus avg temp < SowTmp

در این رابطه، CV ضریب تغییرات، δ انحراف معیار و μ میانگین صفت مورد بررسی می‌باشد. برای محاسبه ضریب همبستگی (r) از رابطه زیر استفاده شد:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})(Yi - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Yi - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

که در آن، Xi مقدار اندازه‌گیری‌شده، Yi مقدار شبیه‌سازی‌شده، $\bar{X}$ و $\bar{Y}$ میانگین مقادیر Xi و Yi و n تعداد مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده است.

نتایج و بحث

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت گندم آبی و دیم: نتایج نشان داد که الگوریتم ۳ (جدول ۱) نسبت به بقیه الگوریتم‌ها در پیش‌بینی تاریخ کاشت گندم آبی مناسب‌تر بود. این الگوریتم برای گیاهان پاییزه قابل‌استفاده است. پارامتر SowTmp برای گندم معادل ۱۵ و یا ۱۸ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (جدول ۲). در اقلیم‌هایی با کد گیگای بیش‌تر از ۷۰۰۰ مقدار SowTmp معادل ۱۸ درجه سانتی‌گراد و در اقلیم‌هایی با کد گیگای کم‌تر از ۷۰۰۰ پارامتر SowTmp معادل ۱۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد (جدول ۲). به عبارتی وقتی دمای هوا به کم‌تر از مقدار ۱۵ و یا ۱۸ برسد و ۵ روز متوالی بارندگی رخ ندهد، کشت گندم صورت خواهد گرفت. جهت کسب اطلاعات بیش‌تر در مورد نحوه پهنه‌بندی اقلیمی جهت می‌توان به سایت (www.yieldgap.org/web/guest/cz-ted) مراجعه نمود (۱۹).

ارزیابی الگوریتم تاریخ کاشت: با کمک مدل SSM-iCrop2 مقادیر مختلف آستانه برای الگوریتم‌های مختلف در هر گیاه بررسی شدند و مقدار مناسب انتخاب گردید طوری که تاریخ کاشت پیش‌بینی شده با کمک و تاریخ کاشت کشاورزان بیش‌ترین انطباق را با هم پیدا کنند. جهت ارزیابی الگوریتم کاشت، داده‌های واقعی تاریخ کاشت در مطالعات مختلف گردآوری شد. سپس برای همان مطالعات که تاریخ کاشت واقعی در دسترس بود، الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت صورت گرفت. برای هر محصول الگوریتم مناسبی انتخاب شد و بعد از اجرای مدل روز پیشنهادی جهت تاریخ کاشت که توسط الگوریتم ارائه شده بود، تعیین گردید. تاریخ کاشت ارائه شده توسط الگوریتم با مقدار تاریخ کاشت واقعی که در پژوهش‌های پیشین مشاهده شده بود (۱۹)، مورد مقایسه قرار گرفتند. در نهایت، مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۱)، ضریب تغییرات (CV) (رابطه ۲) و ضریب همبستگی (r) (رابطه ۳) جهت بررسی خطا و دقت الگوریتم در پیش‌بینی تاریخ کاشت مورد استفاده قرار گرفتند.

$$RMSE(\%) = \sqrt{\left(\frac{\sum (Xi - Yi)^2}{n-1}\right)} \times \frac{100}{\bar{X}} \quad (1)$$

که در آن، Xi مقدار اندازه‌گیری‌شده، Yi مقدار شبیه‌سازی شده و n تعداد مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده است که برای محاسبه RMSE استفاده می‌شوند. در این روش چنانچه مقادیر RMSE (%) کم‌تر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیش‌تر از ۳۰ درصد ضعیف ارزیابی خواهد شد.

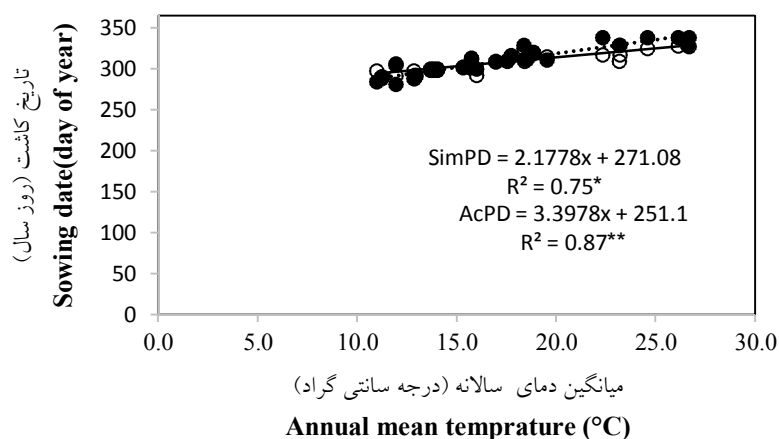
$$CV = \frac{\delta}{\mu} \times 100 \quad (2)$$

جدول ۲- الگوریتم‌ها و پارامتر SowT_{mp} برای تخمین تاریخ کاشت محصولات زراعی مختلف.Table 2. Algorithms and SowT_{mp} parameter to estimate the sowing date of different crops.

تعداد سال Number of years	تعداد مناطق Number of locations	SowT _{mp} (درجه سانتی‌گراد) SowT _{mp} (°C)	الگوریتم Algorithm	محصول Crop
30	29	15 or 18	3	گندم (آبی) Wheat (Irrigated)
30	32	15 or 18	3	گندم (دیم) Wheat (rainfed)
30	18	10, 15, 20 or 35	2	لوبیا Beans
30	22	5.5 or 15	0, 2 or 3	عدس Lentil
30	28	12 or 17	0, 2 or 3	چغندر قند Sugar beet
30	22	7 or 15	2 or 3	نخود Chickpea
30	48	17	3	جو (آبی) Barley (Irrigated)
30	38	17	3	جو (دیم) Barley (rainfed)
30	23	23	0 or 3	کلزا (آبی) Canola (irrigated)
30	22	23	3	کلزا (دیم) Canola (rainfed)
30	23	16	2	پنبه Cotton
30	35	8, 13 or 17	0, 2 or 3	سیب‌زمینی Potato
30	20	15, 20, 25 or 34	2	برنج Rice
30	3	-	0	سویا Soybean
30	23	-	0	ذرت Corn

تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده حدود ۲ روز به تأخیر افتاد. افزایش میانگین دمای هوا نیز موجب تأخیر در کاشت شد که شیب افزایش آن برای تاریخ کاشت واقعی حدود ۳/۴ روز و برای تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده حدود ۲/۲ روز به‌ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش بود (شکل ۱).

ارتباط بین تاریخ کاشت (واقعی و شبیه‌سازی شده) با اقلیم نشان داد که با افزایش دمای منطقه مورد مطالعه، تاریخ کاشت کشاورزان به تعویق می‌افتد و روند مشابهی برای تاریخ کاشت واقعی و شبیه‌سازی شده وجود داشت (شکل ۱). به‌ازای افزایش هر یک درجه سانتی‌گراد به دمای حداکثر منطقه مورد مطالعه، تاریخ کاشت واقعی حدود ۳ روز و



شکل ۱- رابطه بین تاریخ کاشت و میانگین دمای در مناطق تحت کشت گندم آبی. مقادیر تاریخ کاشت واقعی (AcPD) و تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده (SimPD) مورد بررسی قرار گرفتند. (●: تاریخ کاشت واقعی، ○: تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده، خط پیوسته: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت شبیه‌سازی شده، نقطه چین: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی).

Fig. 1. The relationship between sowing date and mean annual temperature in areas cultivated of wheat. Actual sowing date (AcPD) and simulated sowing date (SimPD) values were evaluated. (●: actual sowing date, ○: simulated sowing date, Continuous line: regression line among simulated sowing dates and dashed line: actual sowing date).

پارامتر ۱۸ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد (جدول ۲). به عبارتی در مکان‌های مختلف وقتی دمای هوا به زیر ۱۵ و یا ۱۸ درجه سانتی‌گراد برسد و برای ۵ روز متوالی بارندگی رخ ندهد، کشت گندم آبی در مدل صورت خواهد گرفت.

افزایش میانگین دمای هوای سالانه مناطق مورد مطالعه موجب تأخیر کاشت (واقعی و شبیه‌سازی شده) گندم دیم شد. روند تغییرات تاریخ کاشت در گندم آبی و دیم مشابه یکدیگر بود و شیب تغییرات آن برای تاریخ کاشت واقعی کمی بیش‌تر از تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده بود (شکل ۲). به‌طورکلی، به‌ازای هر واحد افزایش دمای هوای سالانه تاریخ کاشت واقعی حدود ۳/۵ روز و تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده حدود ۳ روز به تعویق افتاد (شکل ۲).

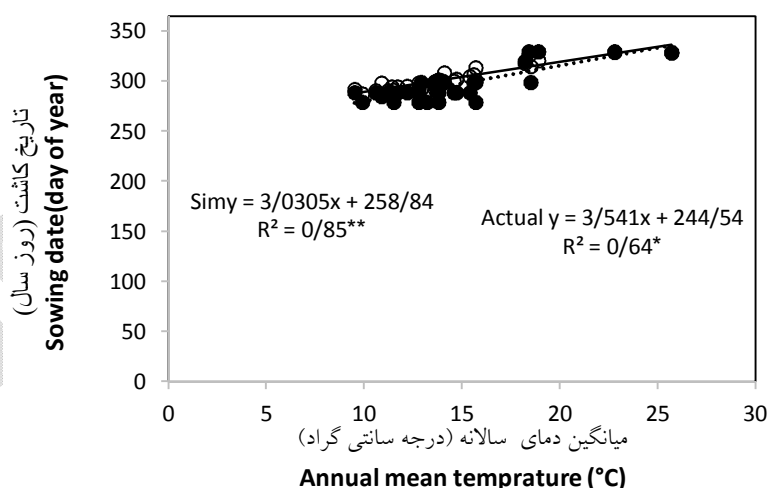
از طرف دیگر، میزان انطباق تاریخ کاشت کشاورز با تاریخ کاشت حاصل از الگوریتم در اکثر مقادیر حول خط ۱:۱ نوسان داشتند و همه نقاط در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ واقع بودند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۵ بود که حدود ۱/۵ درصد تاریخ کاشت رایج است. ضریب تبیین بین تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۰/۹۹ درصد بود (جدول ۳). در مجموع می‌توان گفت الگوریتم مورد استفاده دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی تاریخ کاشت گندم آبی داشت.

جهت پیش‌بینی تاریخ کاشت گندم دیم، الگوریتم ۳، نسبت به بقیه الگوریتم‌ها موفق‌تر بود. پارامتر SowTmp برای همه اقلیم‌های زیر کشت گندم دیم معادل ۱۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد به‌جز مسجد سلیمان (کد گیگا ۷۰۰۳) که در آن مقدار این

جدول ۳- ارزیابی تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج برای گیاهان مورد مطالعه.

Table 3. Algorithm sowing date evaluation and common sowing date for differnt crops.

تعداد تاریخ کاشت	ضریب تغییرات (درصد)	ضریب تبیین (درصد)	مجدور میانگین مربعات خطا (درصد)	
n	CV (%)	R ² (%)	RMSE (%)	
29	1.53	0.99	5	گندم (آبی) Wheat (Irrigated)
32	3.51	0.73	11	گندم (دیم) Wheat (rainfed)
32	1.73	0.81	5.12	جو (آبی) Barley (Irrigated)
38	2.09	0.85	6.31	جو (دیم) Barley (rainfed)
435	9	0.66	12	برنج Rice
20	0.22	0.99	4.36	نخود (دیم) Chickpea (rainfed)
555	10	0.69	14	لوبیا آبی Beans (irrigated)
30	4.69	0.5	6.03	پنبه آبی Cotton (irrigated)
20	2.36	0.96	6.78	کلزا آبی Canola (irrigated)
21	2.4	0.94	6.92	کلزا دیم Canola (rainfed)
42	6	0.99	10	سیب‌زمینی آبی Potato (irrigated)
28	7.5	0.98	7.92	چغندر قند آبی Sugar beet (irrigated)



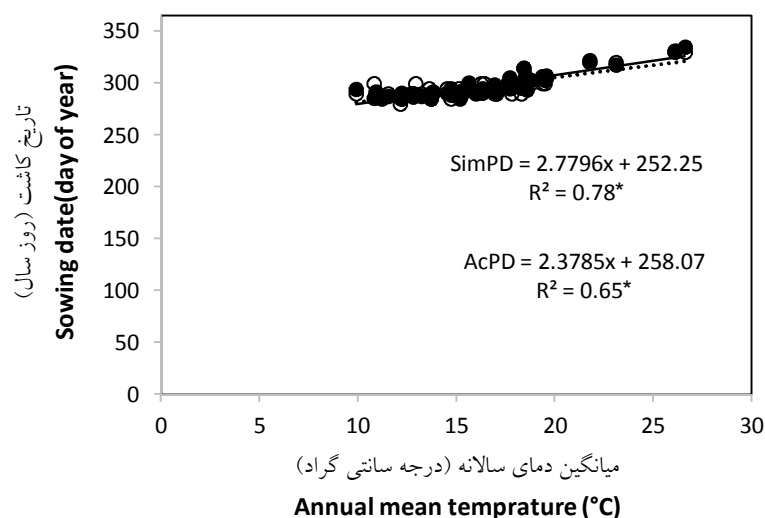
شکل ۲- رابطه بین تاریخ کاشت و میانگین دمای روزانه در مکان‌های زیر کشت گندم دیم. مقادیر تاریخ کاشت واقعی (AcPD) و تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده (SimPD) مورد بررسی قرار گرفتند. (●: تاریخ کاشت واقعی، ○: تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده، خط پیوسته: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت شبیه‌سازی شده، نقطه چین: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی).

Fig. 2. The relationship between sowing date and annual mean daily temperature in areas cultivated of rainfed wheat. Actual sowing date (AcPD) and simulated sowing date (SimPD) values were evaluated. (●: actual sowing date, ○: simulated sowing date, Continuous line: regression line among simulated sowing dates and dashed line: actual sowing date).

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت جو آبی و دیم: نتایج ارزیابی نشان داد که الگوریتم ۳، نسبت به بقیه الگوریتم‌ها برای جو آبی مناسب‌تر است. مقدار پارامتر SowTmp معادل ۱۷ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (جدول ۲). به عبارتی وقتی دمای هوا به زیر ۱۷ درجه سانتی‌گراد برسد و برای ۵ روز متوالی بارندگی رخ ندهد کشت جو در مدل صورت خواهد گرفت.

تغییرات تاریخ کاشت واقعی برای جو آبی در مقابل افزایش دمای منطقه کشت در شکل ۳ نشان داده شده است. به ازای افزایش هر یک درجه سانتی‌گراد به میانگین تاریخ کاشت واقعی کشاورزان حدود ۲/۴ روز به تأخیر افتاد. شیب تغییرات تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده در مقابل دما بیش‌تر از تاریخ کاشت واقعی بود و بین ۲/۶ تا ۲/۸ روز افزایش دما به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دما بود.

نتایج حاصل از ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت توسط الگوریتم در جدول ۳ نشان داد که اکثر مقادیر حول خط ۱:۱ تغییر داشتند و همه نقاط در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ قرار داشتند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۱۱ روز بود که حدود ۳/۵ درصد تاریخ کاشت رایج است. ضریب تبیین بین تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۰/۷۳ درصد بود. دوبور و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که در مجارستان ذرت و گندم در شرایط تغییر اقلیم و سال ۲۱۰۰ به ترتیب ۲ هفته زودتر و ۲ هفته دیرتر کشت خواهند شد. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به پیدا کردن الگوریتم مناسب جهت تعیین تاریخ کاشت در شرایط تغییر اقلیم نیز کمک کند (۴).

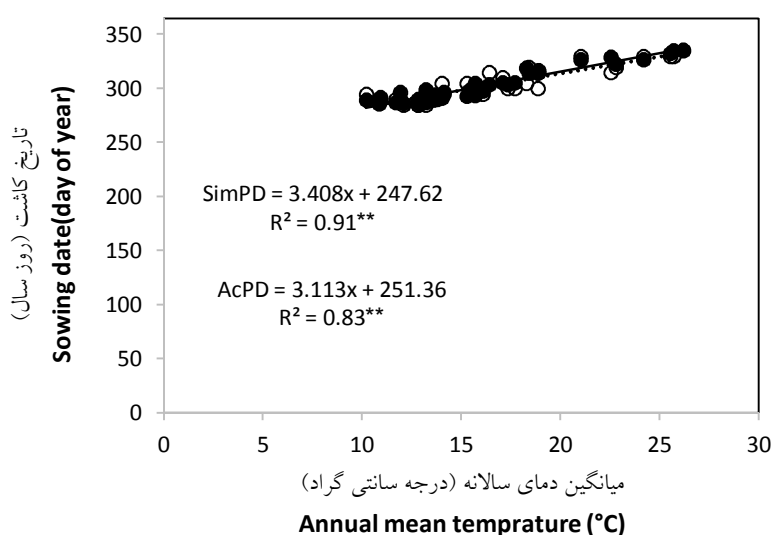


شکل ۳- رابطه بین تاریخ کاشت و میانگین دمای روزانه در مکان‌های زیر کشت جو آبی. مقادیر تاریخ کاشت واقعی (AcPD) و تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده (SimPD) مورد بررسی قرار گرفتند. (●): تاریخ کاشت واقعی، ○: تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده، خط پیوسته: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت شبیه‌سازی شده، نقطه‌چین: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی).

Fig. 3. The relationship between sowing date and mean daily temperature in areas cultivated of irrigated barley. Actual sowing date (AcPD) and simulated sowing date (SimPD) values were evaluated. (●: actual sowing date, ○: simulated sowing date, Continuous line: regression line among simulated sowing dates and dashed line: actual sowing date).

معادل ۱۷ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (جدول ۲). به عبارتی وقتی دمای هوا به زیر ۱۷ درجه سانتی‌گراد برسد و برای ۵ روز متوالی بارندگی رخ ندهد کشت جو در مدل صورت خواهد گرفت. نتیجه تجزیه رگرسیون نشان داد که تاریخ کاشت (واقعی و شبیه‌سازی شده) با افزایش دمای هوا افزایش یافت (شکل ۴). با افزایش یک درجه سانتی‌گراد به میانگین دمای هوا تاریخ کاشت واقعی کشاورزان حدود ۳/۴ روز و تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده ۳/۱ روز به تأخیر افتادند (شکل ۴).

هم‌چنین نتایج ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت توسط الگوریتم اثبات کرد که اکثر مقادیر حول خط ۱:۱ متغیر هستند و همه نقاط در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ قرار داشتند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۵ روز بود که حدود ۱/۷ درصد تاریخ کاشت رایج است. ضریب تبیین بین تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۰/۸۱ درصد بود (جدول ۳). بررسی الگوریتم‌ها جهت پیش‌بینی تاریخ کاشت جو دیم نشان داد که الگوریتم ۳، نسبت به بقیه الگوریتم‌ها مناسب‌تر بود. مقدار پارامتر SowTmp



شکل ۴- رابطه بین تاریخ کاشت و میانگین دمای روزانه در مکان‌های زیر کشت جو دیم. مقادیر تاریخ کاشت واقعی (AcPD) و تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده (SimPD) مورد بررسی قرار گرفتند. (●: تاریخ کاشت واقعی، ○: تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده، خط پیوسته: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی)، نقطه چین: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی).

Fig. 4. The relationship between sowing date and mean daily temperature in areas cultivated of rainfed barely. Actual sowing date (AcPD) and simulated sowing date (SimPD) values were evaluated. (●: actual sowing date, ○: simulated sowing date, Continuous line: regression line among simulated sowing dates and dashed line: actual sowing date).

بود که حدود ۱/۱ درصد تاریخ کاشت رایج است. ضریب تبیین بین تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۰/۸۵ درصد بود (جدول ۳). نتایج به‌طورکلی نشان داد که در کشت‌های پاییزه با افزایش دمای محیط کشت به تأخیر افتاد. اما در کشت‌های

نتایج حاصل از ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت توسط الگوریتم نشان داد اکثر مقادیر حول خط ۱:۱ تغییر داشتند و همه نقاط در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ قرار داشتند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۶/۶ روز

بهاره با گرم‌تر شدن مکان مورد مطالعه تاریخ کاشت زودتر صورت گرفت. در نتیجه در شرایط تغییر اقلیم که احتمالاً هوا گرم‌تر خواهد شد برای کشت‌های پاییزه تاریخ کاشت باید دیرتر از زمان فعلی صورت گیرد و در کشت‌های بهاره زودتر اقدام به کشت کرد. روابطی که در این پژوهش بین دمای هوا و تاریخ کاشت حاصل شد می‌تواند در پیدا کردن الگوریتم مناسب در شرایط تغییر اقلیم مفید باشد.

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت برنج آبی: جهت
الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت برنج از الگوریتم ۲ استفاده شد. مقدار SowTmp برای شهرهای مورد مطالعه متفاوت در نظر گرفته شدند (جدول ۳). برای پل سفید (اقلیم ۵۰۰۲) و شهرکرد (اقلیم ۵۰۰۳) مقدار آن معادل ۱۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد که کم‌ترین مقادیر این پارامتر بودند. بیش‌ترین مقدار پارامتر SowTmp نیز مربوط به شهرهای آبادان و اهواز با مقدار ۳۴ درجه سانتی‌گراد بود (داده‌ها ارائه نشدند). نتایج ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت توسط الگوریتم نیز اثبات کرد که اکثر مقادیر حول خط ۱:۱ تغییر داشتند و همه نقاط در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ قرار داشتند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۱۲ روز بود که حدود ۹ درصد تاریخ کاشت واقعی کشاورزان است. ضریب همبستگی بین تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده و تاریخ کاشت واقعی معادل ۰/۶۶ بود (جدول ۳). در مجموع می‌توان گفت الگوریتم مورد استفاده دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی تاریخ کاشت برنج آبی داشته است.

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت نخود دیم: جهت کشت
بهاره نخود دیم از الگوریتم ۲ استفاده شد و الگوریتم ۳ جهت کشت تأخیری در دو شهر اسلام‌آباد غرب و روانسر مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۳). پارامتر SowTmp برای کشت بهاره نخود دیم معادل ۷

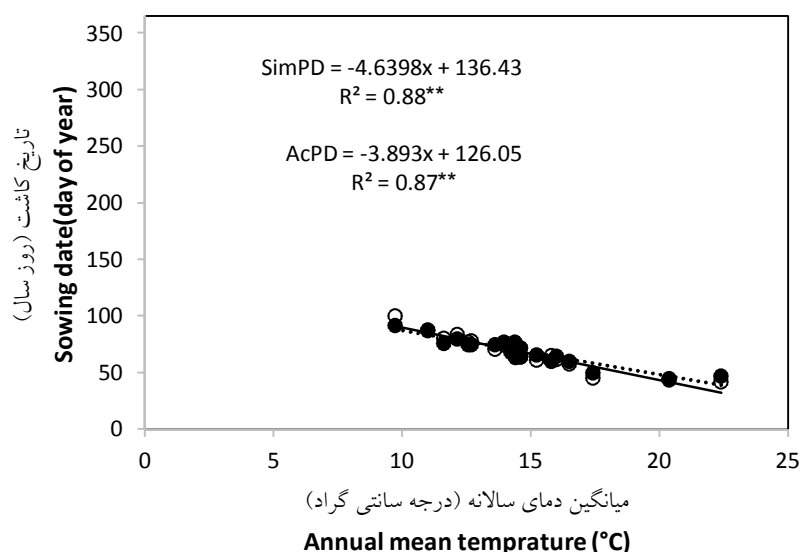
درجه سانتی‌گراد و جهت کشت تأخیری آن معادل ۱۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. به عبارتی در کشت بهاره وقتی دما به بیش‌تر از ۷ درجه سانتی‌گراد برسد و ۵ روز متوالی بارندگی رخ ندهد کشت نخود دیم صورت می‌گیرد. در کشت تأخیری وقتی دمای هوا کم‌تر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد باشد و ۵ روز متوالی بارندگی رخ ندهد کشت صورت می‌گیرد (داده‌ها ارائه نشدند).

نتایج نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین دمای منطقه مورد مطالعه و تاریخ کاشت (واقعی و شبیه‌سازی شده) وجود داشت (شکل ۵). به طور کلی، با افزایش دمای مکان تاریخ کاشت به زودتر صورت خواهد گرفت. به ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دمای هوا تاریخ کاشت واقعی کشاورزان حدود ۳/۵ روز زودتر خواهد بود. از طرفی این مقدار برای تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده حدود ۴/۲ روز بود. دمای حداقل و حداکثر نیز رابطه مشابهی با تاریخ کاشت واقعی و شبیه‌سازی شده داشتند (شکل ۵). نتایج حاصل از ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت نخود دیم توسط الگوریتم در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج ارزیابی الگوریتم‌های مختلف نشان داد که آن‌ها توانستند بادقت خوب و خطای مناسبی تاریخ کاشت را شبیه‌سازی نمایند. در واقع این الگوریتم‌ها تقلیدی از رفتار کشاورزان هستند. در هر یک از این الگوریتم‌ها رفتار کشاورزان برای کشت در شرایط مختلف تقلید شده است. این الگوریتم‌ها صرفاً برای شرایط ایران ساخته نشدند و می‌توان از آن‌ها در همه نقاط جهان استفاده نمود. در الگوریتم ۲ و ۳ که در اکثر محصولات مورد مطالعه در این پژوهش از آن‌ها استفاده شد، دما عامل تعیین‌کننده تاریخ کاشت است. اکثر کشت‌های بهاره در ایران به صورت آبی صورت می‌گیرند و معمولاً کشاورزان در اولین فرصت ممکن

الگوریتم ۲ در واقع تقلیدی از شرایط کشت در بهار است که در آن با گرم شدن هوا تا حدی مناسب و کافی بودن رطوبت خاک جهت عملیات زراعی کشت صورت می‌گیرد.

محصول خود را زیر کشت می‌برند (۱۸). عاملی که تعیین‌کننده زودترین زمان ممکن برای تاریخ کاشت در بهار است، دما می‌باشد. در واقع اگر دما از حدی بالاتر نباشد و کشت صورت گیرد ممکن است در اثر سرمای بهاره محصول از بین رود. به این ترتیب



شکل ۵- رابطه بین تاریخ کاشت و میانگین دمای روزانه در مکان‌های زیر کشت نخود دیم در صورت بهاره. مقادیر تاریخ کاشت واقعی (AcPD) و تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده (SimPD) مورد بررسی قرار گرفتند. (●: تاریخ کاشت واقعی، ○: تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده، خط پیوسته: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت شبیه‌سازی شده، نقطه چین: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی).

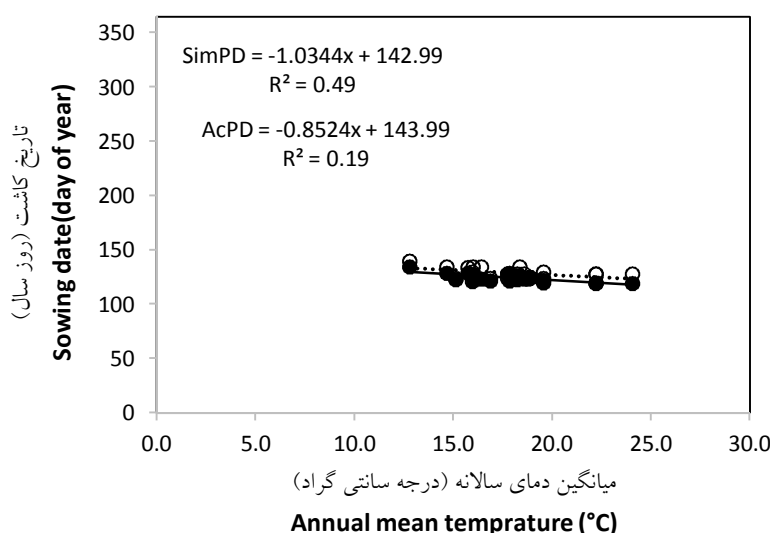
Fig. 5. The relationship between sowing date and annual mean daily temperature in areas cultivated of rainfed chickpea. Actual sowing date (AcPD) and simulated sowing date (SimPD) values were evaluated. (●: actual sowing date, ○: simulated sowing date, Continuous line: regression line among simulated sowing dates and dashed line: actual sowing date).

نتایج حاصل از ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت لوبیا آبی توسط الگوریتم در جدول ۳ نشان می‌دهد که اکثر مقادیر در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ قرار داشتند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۱۴ روز بود که حدود ۱۰ درصد تاریخ کاشت واقعی کشاورزان است. ضریب همبستگی بین تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده و تاریخ کاشت واقعی معادل ۰/۶۹ بود (جدول ۳).

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت لوبیا آبی: برای الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت لوبیا آبی از الگوریتم ۲ جهت کشت بهاره استفاده شد. مقدار پارامتر SowTmp برای مکان‌های مختلف متفاوت بود. در اقلیم‌های گرم (۸۰۰۰) مقدار SowTmp معادل ۳۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. در سایر اقلیم‌ها نیز SowTmp معادل ۱۰، ۱۵ و یا ۲۰ به دست آمد (داده‌ها ارائه نشدند).

زودتر صورت گرفت (شکل ۶). رابطه بین تاریخ کاشت واقعی و دما ضریب تبیین بالایی نداشت و مقدار آن بین ۰/۱۴ تا ۰/۲۱ تغییر داشت. با این حال تاریخ کاشت واقعی پنبه نیز با افزایش هر درجه سانتی‌گراد بین ۰/۶ تا حدود یک روز زودتر صورت گرفته بود. لازم به ذکر است که رابطه مشخصی بین تاریخ کاشت پنبه (واقعی و شبیه‌سازی‌شده) با بارندگی و مقدار تشعشع وجود نداشت. هم‌چنین نتایج حاصل از ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت پنبه آبی توسط الگوریتم در جدول ۳ نشان داده شده است.

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت پنبه آبی: الگوریتم ۲ تاریخ کاشت بهینه پنبه آبی را پیش‌بینی کرد. مقدار پارامتر SowTmp برای این گیاه معادل ۱۶ درجه سانتی‌گراد به دست آمد (جدول ۲). به‌طورکلی، با افزایش میانگین دمای سالانه هوا تاریخ کاشت پنبه (شبیه‌سازی شده و واقعی) زودتر صورت گرفت (شکل ۶). رابطه رگرسیونی مناسبی بین تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده و دمای میانگین و دمای حداکثر سالانه وجود داشت و در هر دو به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده حدود ۱ روز



شکل ۶- رابطه بین تاریخ کاشت و میانگین سالانه دمای روزانه در مکان‌های زیر کشت پنبه آبی در کشت بهاره. مقادیر تاریخ کاشت واقعی (AcPD) و تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده (SimPD) مورد بررسی قرار گرفتند. (●: تاریخ کاشت واقعی، ○: تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده، خط پیوسته: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت شبیه‌سازی‌شده، نقطه‌چین: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی).

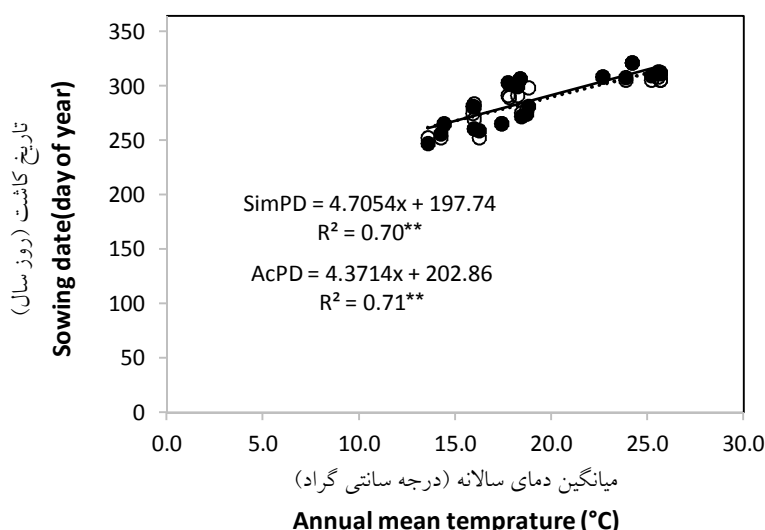
Fig. 6. The relationship between sowing date and annual mean daily temperature in areas cultivated of irrigated cotton. Actual sowing date (AcPD) and simulated sowing date (SimPD) values were evaluated. (●: actual sowing date, ○: simulated sowing date, Continuous line: regression line among simulated sowing dates and dashed line: actual sowing date).

درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد (جدول ۲). به‌عبارتی کشت زمانی صورت می‌گیرد که دمای هوا به زیر ۲۳ درجه سانتی‌گراد برسد. افزایش دمای هوای منطقه مورد مطالعه موجب تأخیر در کاشت کلزای آبی گردید (شکل ۷). تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده با افزایش هر درجه سانتی‌گراد

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت کلزای آبی و دیم: الگوریتم ۳، نسبت به بقیه الگوریتم‌ها جهت پیش‌بینی تاریخ کاشت کلزا انتخاب شد. در سه منطقه مورد مطالعه بهبهان، گرگان و حاجی‌آباد (هرمزگان) الگوریتم تاریخ کاشت به‌صورت ثابت در نظر گرفته شد. پارامتر SowTmp برای تعیین زمان کاشت ۲۳

به زیر ۲۳ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید و بنابراین تاریخ کاشت دیرتر صورت خواهد گرفت. رابطه‌ای بین میزان بارندگی و تشعشع با تاریخ کاشت (واقعی و شبیه‌سازی‌شده) وجود نداشت.

به دمای میانگین ۴/۷ روز به تأخیر افتاد. تاریخ کاشت واقعی نیز روند مشابه‌ای داشت و به‌ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دمای میانگین حدود ۴/۴ روز به تأخیر افتاد. به‌عبارتی در اقلیم‌های گرم‌تر دما دیرتر



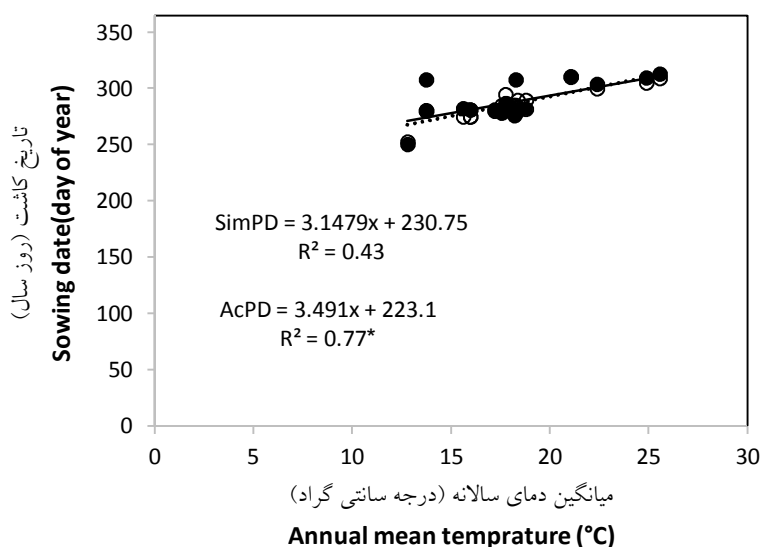
شکل ۷- رابطه بین تاریخ کاشت و میانگین سالانه دمای روزانه در مکان‌های زیر کشت کلزای آبی در کشت پاییزه. مقادیر تاریخ کاشت واقعی (AcPD) و تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده (SimPD) مورد بررسی قرار گرفتند. (●: تاریخ کاشت واقعی، ○: تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده، خط پیوسته: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت شبیه‌سازی‌شده، نقطه‌چین: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی).

Fig. 7. The relationship between sowing date and annual mean daily temperature in areas cultivated of irrigated canola. Actual sowing date (AcPD) and simulated sowing date (SimPD) values were evaluated. (●: actual sowing date, ○: simulated sowing date, Continuous line: regression line among simulated sowing dates and dashed line: actual sowing date).

شبیه‌سازی‌شده به‌ترتیب حدود ۳/۵ و ۳/۲ روز به تأخیر افتادند.

از طرف دیگر، ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت کلزای دیم توسط الگوریتم نشان داد که همه مقادیر در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ قرار داشتند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۷ روز بود که حدود ۲ درصد تاریخ کاشت واقعی کشاورزان است. ضریب همبستگی بین تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده و تاریخ کاشت واقعی معادل ۰/۹۴ بود (جدول ۳).

الگوریتم ۳، نسبت به بقیه الگوریتم‌ها جهت پیش‌بینی تاریخ کاشت کلزای دیم نیز استفاده شد. پارامتر SowTmp برای این گیاه ۲۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که رابطه مناسبی بین دما و تاریخ کاشت وجود دارد (شکل ۸). البته این رابطه بین تاریخ کاشت واقعی و دما قوی‌تر از رابطه بین تاریخ کاشت شبیه‌سازی‌شده و دما بود. در مجموع با افزایش دما تاریخ کاشت (واقعی و شبیه‌سازی‌شده) به تأخیر افتاد. به‌ازای هر واحد افزایش میانگین دمای هوا تاریخ کاشت واقعی و



شکل ۸- رابطه بین تاریخ کاشت و میانگین سالانه دمای روزانه در مکان‌های زیر کشت کلزای دیم در کشت پاییزه. مقادیر تاریخ کاشت واقعی (AcPD) و تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده (SimPD) مورد بررسی قرار گرفتند. (●: تاریخ کاشت واقعی، ○: تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده، خط پیوسته: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت شبیه‌سازی شده، نقطه چین: رگرسیون بین تاریخ‌های کاشت واقعی).
Fig. 8. The relationship between sowing date and annual mean daily temperature in areas cultivated of rainfed canola. Actual sowing date (AcPD) and simulated sowing date (SimPD) values were evaluated. (●: actual sowing date, ○: simulated sowing date, Continuous line: regression line among simulated sowing dates and dashed line: actual sowing date).

بهاره کشت می‌شوند). برای ساریان کشت به صورت ثابت در نظر گرفته شد و در نتیجه پارامتر SowTmp اثری بر شبیه‌سازی تاریخ کاشت نخواهد داشت (داده‌ها ارائه نشدند).

نتایج حاصل از ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت سب‌زمینی توسط الگوریتم در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه مقادیر در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ قرار داشتند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۱۰ روز بود که حدود ۶ درصد تاریخ کاشت واقعی کشاورزان است. ضریب همبستگی بین تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده و تاریخ کاشت واقعی معادل ۰/۹۹ بود (جدول ۳). الگوریتم ۳ جهت شبیه‌سازی تاریخ کاشت در محصولات پاییزه قابل استفاده است. در این الگوریتم رفتار کشاورزان برای کشت محصولات پاییزه تقلید می‌شود و وقتی

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت سب‌زمینی آبی: الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت این گیاه با سه الگوریتم متفاوت در نقاط مختلف ایران صورت گرفت. در اقلیم‌هایی با کد گیگا بیش از ۶۰۰۰، با الگوریتم ۳ شبیه‌سازی شدند، ولی سایر نقاط کشور با دو الگوریتم ثابت (صفر) و الگوریتم ۲ شبیه‌سازی شدند. پارامتر SowTmp برای اکثر نقاط مورد مطالعه معادل ۱۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. اما در اقلیم‌های گرم مانند شهرهای دزفول، مسجدسلیمان، رودان و امیدیه مقدار آن معادل ۱۷ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. به عبارتی کشت در مناطق گرم‌تر با الگوریتم ۳، وقتی صورت می‌گیرد که دما کم‌تر از ۱۷ درجه سانتی‌گراد (یا ۱۳ درجه سانتی‌گراد) باشد (یعنی به صورت پاییزه کشت می‌شوند). در الگوریتم ۲ برای سب‌زمینی، وقتی کشت صورت می‌گیرد که دما بیش‌تر از ۱۳ درجه سانتی‌گراد باشد (یعنی به صورت

روز بود که حدود ۷/۵ درصد تاریخ کاشت واقعی کشاورزان است. ضریب همبستگی بین تاریخ کاشت شبیه‌سازی شده و تاریخ کاشت واقعی معادل ۰/۹۸ بود (جدول ۳). به عبارت دیگر، الگوریتم مورد استفاده دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی تاریخ کاشت چغندر قند در کشت پاییزه یا بهاره داشت.

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت ذرت دانه‌ای و سویا: ذرت در ایران معمولاً به صورت کشت دوم و آبی کشت می‌شود و تاریخ کاشت آن تابع دما و رطوبت خاک نیست. بنابراین، الگوریتم تاریخ کاشت برای آن به صورت ثابت در نظر گرفته شد. مقادیر تاریخ کاشت ثابت بین روز ۱۳۰م سال تا روز ۲۰۳م سال تغییر داشت.

سویا نیز در ایران معمولاً به صورت کشت دوم و آبی کشت می‌شود و تاریخ کاشت آن تابع دما و رطوبت خاک نیست. بنابراین، الگوریتم تاریخ کاشت برای آن به صورت ثابت در نظر گرفته شد. مقادیر تاریخ کاشت ثابت آن برای همه نقاط ۱۷۶ در نظر گرفته شد.

عوامل غیر اقلیمی نیز می‌توانند تا حد زیادی بر تاریخ کاشت اثر داشته باشند (۲۴). عوامل مختلف مانند روش‌های کشت سنتی و اجتماعی، محصولات مورد نیاز، تقاضای بازار، عملیات زراعی، تغییر تکنولوژی، اندازه مزرعه، می‌توانند اثر زیادی در انتخاب تاریخ کاشت داشته باشند. تناوب زراعی، زمان کاشت و برداشت محصول قبلی نیز می‌تواند تاریخ مناسب کاشت را تغییر دهد. البته، در صورت فراهم بودن همه شرایط کاشت، احتمال دارد کاشت به دلیل کمبود نیروی کارگری یا ماشین‌آلات به تأخیر افتد (۲۵). تاریخ کاشت دو محصول ذرت و سویا که به صورت بهاره در ایران کشت می‌شوند با این الگوریتم قابل شبیه‌سازی نیستند. به خاطر این که کشاورزان این دو محصول را معمولاً به صورت کشت

دما از حد معینی (SowTmp) کم‌تر شود کشت صورت می‌گیرد. کشت زود هنگام در پاییز باعث می‌شود گیاه پیش از رسیدن به فصل زمستان رشد زیادی داشته باشد و در نتیجه تحمل آن نسبت به سرمای زمستان کاهش یابد. از طرف دیگر، کشت دیر هنگام پاییزه نیز باعث می‌شود گیاه ذخیره غذایی کافی جهت پشت سر گذاشتن زمستان نداشته باشد و گیاه در اثر سرما از بین رود. در این شرایط کشاورزان با خنک شدن هوا به اندازه معینی (برای هر گیاه زراعی و منطقه متفاوت است) و در شرایط مناسب بودن وضعیت خاک کشت را انجام می‌دهند که در الگوریتم ۳ همین رفتار تقلید شده است. دوره ۵ روزه بدون بارندگی برای جلوگیری از مرطوب بودن بیش از حد خاک گذاشته شده است که به عنوان شرایط عملیات زراعی شناخته می‌شود (۲۳).

الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت چغندر قند آبی: جهت الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت چغندر قند، الگوریتم ۲ برای اکثر نقاط زیر کشت استفاده شد (داده‌ها ارائه نشدند). این الگوریتم مخصوص کشت بهاره است. پارامتر SowTmp برای کشت چغندر قند به صورت بهاره معادل ۱۲ یا ۱۷ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. در دزفول کشت چغندر قند به صورت پاییزه صورت گرفت و از الگوریتم ۳، جهت شبیه‌سازی تاریخ کاشت استفاده شد. پارامتر SowTmp برای کشت پاییزه (الگوریتم ۳) معادل ۲۹ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. به عبارتی کشت در این مکان وقتی صورت می‌گیرد که دما کم‌تر از ۲۹ درجه سانتی‌گراد باشد. در مشکین شهر نیز تاریخ کاشت به صورت ثابت شبیه‌سازی شد (الگوریتم صفر).

همچنین، همه مقادیر ارزیابی پیش‌بینی تاریخ کاشت سیب‌زمینی توسط الگوریتم، در بازه ۱۰ درصد انحراف از خط ۱:۱ قرار داشتند. مقدار RMSE برای تاریخ کاشت الگوریتم و تاریخ کاشت رایج معادل ۸

تقلیدی از رفتار کشاورز است و می‌توان به‌جای ثابت قرار دادن تاریخ کاشت از الگوریتم استفاده نمود. بنابراین، استفاده از یک الگوریتم به‌جای تاریخ کاشت ثابت در مدل می‌تواند تاریخ کاشت دقیقی برای شبیه‌سازی تعیین کند به‌ویژه در شرایطی که مکان‌های متفاوت و سال‌های متفاوتی مدنظر شبیه‌سازی باشند. در شرایط تغییر اقلیم آینده تاریخ کاشت با شرایط حال حاضر متفاوت خواهد بود که با الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت می‌توان تاریخ دقیقی برای کشت در شرایط تغییر اقلیم تعیین نمود. از الگوریتم‌سازی تاریخ کاشت می‌توان جهت توصیه تاریخ کاشت برای نواحی که اطلاعاتی در مورد تاریخ کاشت مناسب محصول وجود ندارد استفاده نمود. در نهایت، در شرایط شبیه‌سازی محصولات مختلف ممکن است اطلاعاتی در زمینه تاریخ کاشت مناسب در یک منطقه در دسترس نباشد که با استفاده از الگوریتم می‌توان این مشکل را حل نمود.

دوم بعد از گندم یا محصولات دیگر پاییزه کشت می‌کنند. بنابراین، دما یا رطوبت خاک تعیین‌کننده تاریخ کاشت در این دو محصول نیست. تاریخ برداشت محصولی مانند گندم می‌تواند اولین تاریخ کاشت مناسب برای این دو محصول را نشان دهد. در این مطالعه، الگوریتم تاریخ کاشت این دو محصول به‌صورت ثابت در نظر گرفته شد که با شرایط اقلیمی حاضر تطابق خوبی دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد الگوریتم‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی تاریخ کاشت گیاهان زراعی اصلی در ایران از توانایی خوبی برخوردار بودند. از طرف دیگر، با گرم‌شدن مناطق مورد مطالعه تحت کشت محصولات پاییزه تاریخ کاشت به تأخیر خواهد افتاد، ولی برای کشت محصولات بهاره تاریخ کاشت به جلو خواهد افتاد. در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی می‌توان از الگوریتم برای تاریخ کاشت استفاده نمود که در واقع

منابع

1. Sekine, H. (2021). Wheat grower payments for varietal use: comparison between Japan, Germany, and Australia. *Japanese Journal of Agricultural Economics*, 23, 18-31.
2. Chen, C., Ota, N., Wang, B., Fu, G., & Fletcher, A. (2023). Adaptation to climate change through strategic integration of long fallow into cropping system in a dryland Mediterranean-type environment. *Science of the Total Environment*, 880, 163230.
3. Jiang, T., Wang, B., Xu, X., Cao, Y., Li Liu, D., & He, L. (2022). Identifying sources of uncertainty in wheat production projections with consideration of crop climatic suitability under future climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 319, 108933.
4. Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Árendás, T., Spitko, T., & Fodor, N. (2016). Crop sowing date matters: Estimation methods and effect on future yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 103-115.
5. Taylor, C., Cullen, B., D'Occhio, M., Rickards, L., & Eckard, R. (2018). Trends in wheat yields under representative climate futures: implications for climate adaptation. *Agricultural Systems*, 164, 1-10.
6. Zhao, Y., Xiao, D., Tang, J., & Bai, H. (2019). Effects of climate change on the yield of major grain crops and its adaptation measures in China. *Research of Soil and Water Conservation*, 26, 317-326.
7. Cammarano, D., Payero, J., Basso, B., Stefanova, L., & Grace, P. (2013).

- Adapting wheat sowing dates to projected climate change in the Australian subtropics: analysis of crop water use and yield. *Crop and Pasture Science*, 63 (10), 974-986.
8. Elliott, J., Müller, C., Deryng, D., Chrysanthacopoulos, J., Boote, K. J., Büchner, M., Foster, I., Glotter, M., Heinke, J., Iizumi, T., & Izaurralde, R. C. (2015). The global gridded crop model intercomparison: data and modeling protocols for phase 1 (v1. 0). *Geoscientific Model Development*, 8 (2), 261-277.
 9. Waongo, M., Laux, P., & Kunstmann, H. (2015). Adaptation to climate change: the impacts of optimized sowing dates on attainable maize yields under rainfed conditions in Burkina Faso. *Agricultural and forest meteorology*, 205, 23-39.
 10. Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E. J., Snow, V., Murphy, C., & Moore, A. D. (2014). APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327-350.
 11. Deryng, D., Sacks, W. J., Barford, C. C., & Ramankutty, N. (2011). Simulating the effects of climate and agricultural management practices on global crop yield. *Global biogeochemical cycles*, 25 (2), 1-18.
 12. Zhen-Zhen, Z., Shuang, C., Peng, F., Nian-Bing, Z., Zhi-Peng, X., Ya-Jie, H., Fangfu, X., Bao-Wei, G., Hai-Yan, W., & Hong-Cheng, Z. (2023). Effects of sowing date and ecological points on yield and the temperature and radiation resources of semi-winter wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 22 (5), 1366-1380.
 13. Leenhardt, D., & Lemaire, P. (2002). Estimating the spatial and temporal distribution of sowing dates for regional water management. *Agricultural Water Management*, 55 (1), 37-52.
 14. Maton, L., Bergez, J. E., & Leenhardt, D. (2007). Modelling the days which are agronomically suitable for sowing maize. *European journal of agronomy*, 27 (1), 123-129.
 15. Stöckle, C. O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European journal of agronomy*, 18 (3), 289-307.
 16. Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., & Bussière, F. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of agronomy*, 18 (3-4), 309-332.
 17. Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Boote, K. J., Hunt, L. A., Singh, U., Lizaso, J. I., White, J. W., Uryasev, O., & Ogoshi, R. (2015). Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Version 4.6. DSSAT Foundation, Prosser, WA.
 18. Sacks, W. J., Deryng, D., Foley, J. A., & Ramankutty, N. (2010). Crop sowing dates: an analysis of global patterns. *Global Ecology and Biogeography*, 19 (5), 607-620.
 19. Soltani, A., Nehbandani, A., Zainli, A., Torabi, B., Zand, A., Ghasemi, S., Elesti, A., Dadarsi, A., Hosseini, R. A., Aalimaqam, S. M., Zahid, M., Fayazi, H., Kemari, H., Arab Ameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rehban, S., Mohammadi, S., & dignity, P. (2018). Preparation of the gap atlas of yield and production capacity of important agricultural plants in the country in current and future climatic conditions. The research plan of the Agricultural Research, Education and Promotion Organization. 274 p. [In Persian]
 20. Wolf, J., Ouattara, K., & Supit, I. (2015). Sowing rules for estimating rainfed yield potential of sorghum and maize in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 208-218.
 21. Bondeau, A., Smith, P. C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., LOTZE-CAMPEN, H. E. R. M. A. N. N., Müller, C., Reichstein, M., & Smith, B. (2007). Modelling the role of agriculture for the

- 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 13 (3), 679-706.
22. Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R. S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., van Ittersum, M. K., & Sinclair, T. R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, 102855.
23. Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Šiška, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., & Dubrovský, M. (2013). Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe—hotspots, regional differences and common trends. *The Journal of Agricultural Science*, 151 (6), 787-812.
24. Waha, K., Van Bussel, L. G. J., Müller, C., & Bondeau, A. (2012). Climate-driven simulation of global crop sowing dates. *Global Ecology and Biogeography*, 21 (2), 247-259.
25. Kucharik, C. J. (2008). Contribution of sowing date trends to increased maize yields in the central United States. *Agronomy Journal*, 100 (2), 328-336.

Uncorrected Proof