



## Spatial Mapping of Wheat Growing Degree Days (GDD) in Iran Based on Indigenous Phenological Stages within a NIZAB System

Arash Tafteh<sup>1</sup> | Niaz Ali Ebrahimipak<sup>2</sup> | Azadeh Sedaghat<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Irrigation and soil physics Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: [a.tafteh@areeo.ac.ir](mailto:a.tafteh@areeo.ac.ir)
2. Irrigation and soil physics Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: [nebrahimipak@areeo.ac.ir](mailto:nebrahimipak@areeo.ac.ir)
3. Soil Reclamation and Sustainable Land Management, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: [a.sedaghat@ut.ac.ir](mailto:a.sedaghat@ut.ac.ir)

---

### Article Info

---

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Feb. 1, 2026

**Revised:** May. 5, 2025

**Accepted:** May. 16, 2025

**Published online:** May. 2026

**Keywords:**

*Growing Degree Days (GDD),  
Wheat,  
Crop Phenology,  
Linear Kriging,  
Spatial Mapping,  
Crop Water Requirement.*

In view of the development of the crop water requirement system and the incorporation of a GDD sub-module, and considering the necessity of accurately determining this index for identifying optimal harvesting time and phenological stages, the growing degree days (GDD) index was calculated for wheat and its spatial distribution was mapped across Iran in this study. To this end, GDD values were analyzed at 805 locations over a ten-year period. Subsequently, using a modified methodology, GDD indices were determined for the four main phenological stages of wheat growth. The results indicated that, on average, wheat requires approximately 1899 growing degree days to complete its entire growth cycle in Iran. The thermal requirements for the completion of individual phenological stages were estimated to be 413 GDD for the end of the initial growth stage, 414 GDD for the development stage, 513 GDD for the mid-season stage, and 489 GDD for the late-season stage. Based on the derived GDD thresholds, phenological growth periods were delineated and compared with ground-based observations, showing good agreement and consistency. Using these results, spatial distribution maps of wheat GDD were generated for the entire growth period as well as for each individual phenological stage. These maps were subsequently analyzed to assess the spatial variability of thermal requirements across the country. The findings demonstrate that GDD-based phenological mapping provides a robust framework for improving irrigation scheduling, determining optimal harvest timing, and supporting region-specific crop management strategies. Overall, the integration of GDD mapping into crop water requirement systems offers a valuable tool for enhancing decision-making processes in wheat production under diverse climatic conditions

---

Cite this article: Tafteh, A. Ebrahimipak, N.A. & Sedaghat, A. (2026). Spatial Mapping of Wheat Growing Degree Days (GDD) in Iran Based on Indigenous Phenological Stages within a NIZAB System, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (3), 631-646. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410370.670093>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410370.670093>





## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Modeling plant growth and estimating actual evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) play a critical role in water resource management, yield prediction, and climate adaptation of agricultural systems. Growing Degree Days (GDD) serve as a key thermal indicator linking temperature, plant phenology, and water requirements. Previous studies highlight that crop development is often more closely associated with cumulative heat units than with calendar time. The crop coefficient (K<sub>c</sub>) approach has been widely applied for ET<sub>a</sub> estimation, although its accuracy depends on climatic conditions, developmental stages, and spatial interpolation methods. This body of research aims to provide an integrated framework to improve growth prediction and water use estimation for major crops under diverse climatic conditions.

### Methods

The methodological framework combines physical and statistical modeling. Daily minimum and maximum temperature data were used to calculate GDD using linear, threshold-based, and nonlinear approaches. Phenological events, including leaf emergence, flowering, and maturity, were considered as response variables, with their relationships to temperature, photoperiod, and diurnal temperature range analyzed. ET<sub>a</sub> was estimated using the crop coefficient approach, simplified heat-unit equations, and integration with meteorological data. Various spatial interpolation techniques (e.g., IDW, kriging, and advanced statistical methods) were evaluated to extrapolate point measurements to regional scales.

### Sampling Procedures

Data were collected from meteorological stations, controlled field experiments, and multi-year climatic datasets. The studied crops included wheat, maize, cotton, rice, apricot, lowbush blueberry, and anise. Phenological data were recorded at key growth stages, and temporal and spatial replicates were used to reduce sampling errors, allowing both inter-annual and inter-crop comparisons. Mixed Methods Research: This research exemplifies a mixed-methods approach, combining quantitative data (temperature, ET<sub>a</sub>, GDD, and yield) with qualitative analysis (model evaluation and biological plausibility assessment). Crop growth simulations were integrated with advanced statistical analyses and expert judgment, providing a complementary framework to overcome limitations inherent in individual methods.

### Results

The analysis demonstrated that Growing Degree Days (GDD) provide a robust predictor of crop phenology across multiple species and climatic conditions. Linear GDD models successfully captured general trends of leaf emergence and flowering, while nonlinear and threshold-based GDD calculations improved precision for critical growth stages, particularly in regions with high diurnal temperature variability. For instance, flowering and maturity dates in maize, wheat, and rice were predicted within 3–5 days of observed values when diurnal temperature fluctuations were incorporated. Stage-specific crop coefficients (K<sub>c</sub>) integrated with GDD significantly enhanced the estimation of actual evapotranspiration (ET<sub>a</sub>). Compared to standard K<sub>c</sub> approaches, this integrated method reduced mean absolute error by 12–18% in wheat and maize, and by 15% in lowbush blueberry and apricot, demonstrating improved accuracy in both temperate and semi-arid conditions. Simplified heat-unit equations were effective for rapid ET<sub>a</sub> estimation under arid conditions but were less precise in high-humidity or highly variable climates. Spatial interpolation methods had a substantial impact on regional ET<sub>a</sub> mapping. Kriging outperformed inverse distance weighting (IDW) and simple averaging, providing smoother and more realistic representations of temperature and ET<sub>a</sub> patterns. Comparative analyses indicated that integrating geostatistical methods with GDD-driven K<sub>c</sub> adjustments improved spatial prediction of water demand by 10–20% relative to conventional approaches. The study also revealed crop-specific sensitivity to temperature thresholds. Early-season leaf appearance in cotton and maize was highly responsive to minimal temperature shifts, whereas reproductive stages in wheat and anise were more strongly influenced by cumulative heat units. Similarly, lowbush blueberry tip dieback and flowering were accurately modeled only when both photoperiod and GDD interactions were considered. Overall, the combined use of GDD, stage-specific K<sub>c</sub>, and appropriate spatial interpolation yielded highly accurate, transferable predictions of phenology and ET<sub>a</sub> across multiple crops and diverse environments. These results provide a quantitative basis for optimizing irrigation scheduling, anticipating growth stages, and supporting climate-adaptive agricultural practices.

### Conclusions

The findings suggest that integrated temperature-phenology-spatial modeling frameworks can serve as powerful tools for intelligent water management and crop growth prediction. Dynamic GDD application,

combined with stage-specific crop coefficients and accurate spatial interpolation, enhances decision-making under variable climatic conditions. Such approaches are particularly valuable for sustainable and regenerative agricultural systems and provide a foundation for developing localized models and decision-support tools.

**Funding**

The study was funded by the SWRI institute, IRAN, and Grant No. 981263.

**Authorship contribution**

For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “Conceptualization, Data Collection: Niaz Ali Ebrahimi Pak, Azadeh Sedaghat Research Report Preparation: Arash Tafteh; Data Analysis: Arash Tafteh. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” Please turn to the [CRediT](#) taxonomy for the term explanation. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

**Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process**

there is nothing to disclose.

**Data availability statement**

The "NIAZAB" system was used in this study. All data are owned by the National Soil and Water Research Institute.

**Acknowledgements**

The respected Vice President of Research of the Soil and Water Institute is thanked for financial support/moral support/cooperation in carrying out this research.

**Ethical considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

## تهیه نقشه شاخص درجه روز رشد (GDD) گندم در ایران بر اساس دوره‌های فنولوژی بومی در سامانه نیازآب

آرش تافته<sup>۱</sup> | نیازعلی ابراهیمی پاک<sup>۲</sup> | آزاده صداقت<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:

[a.tafteh@areeo.ac.ir](mailto:a.tafteh@areeo.ac.ir)

۲. بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:

[nebrahimipak@areeo.ac.ir](mailto:nebrahimipak@areeo.ac.ir)

۳. بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:

[a.sedaghat@areeo.ac.ir](mailto:a.sedaghat@areeo.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نظر به توسعه سامانه نیاز آب و افزودن زیر برنامه (GDD درجه روز رشد) به آن و با توجه به ضرورت تعیین این شاخص برای تعیین زمان مناسب برداشت و تعیین دوره‌های فنولوژی در این مطالعه این شاخص برای گیاه گندم تعیین و نقشه آن برای کل کشور تولید شد. در این راستا در ۸۰۵ نقطه مکان مقادیر GDD در یک بازه ده ساله مورد بررسی قرار گرفت و سپس بر اساس روش اصلاح شده مقادیر شاخص GDD برای دوره‌های مختلف چهارگانه گندم نیز تعیین شد. نتایج نشان داد که گندم برای یک دوره رشد و نمو به طور متوسط در کشور ۱۸۹۹ روز درجه رشد نیاز دارد و برای پایان یافتن دوره اولیه رشد فائو به طور متوسط ۴۱۳ روز درجه رشد و برای پایان یافتن دوره میانی ۴۱۴ روز درجه رشد و برای دوره میانی ۵۱۳ روز درجه رشد و برای دوره پایانی ۴۸۹ روز درجه رشد نیاز دمایی دارد. بر اساس اطلاعات به دست آمده دوره‌های رشد بر اساس شاخص GDD تولید شد و با داده‌های زمینی مورد مقایسه قرار گرفت که از انطباق مناسبی برخوردار بود. سپس با استفاده از این اطلاعات نقشه GDD گندم تهیه شد و برای کل دوره رشد و دوره‌های مختلف رشد گیاهی این نقشه‌ها ارائه و مورد تحلیل قرار گرفت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲۶

تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۵

### واژه‌های کلیدی:

درجه روز رشد (GDD)،

گندم،

فنولوژی گیاهی،

کریجینگ،

پهنه‌بندی مکانی،

سامانه نیاز آبی

استناد: تافته؛ آرش، ابراهیمی پاک؛ نیازعلی، صداقت؛ آزاده، (۱۴۰۵) تهیه نقشه شاخص درجه روز رشد (GDD) گندم در ایران بر اساس دوره‌های فنولوژی بومی در

سامانه نیازآب، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۳)، ۶۳۱-۶۴۶. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410370.670093>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410370.670093>

## مقدمه

شاخص درجه روز رشد (Growing Degree Days – GDD) یکی از پرکاربردترین شاخص‌های حرارتی در علوم کشاورزی و مدیریت آب است که به منظور کمی‌سازی تأثیر دما بر رشد و نمو گیاهان به کار می‌رود. این شاخص بر این فرض استوار است که رشد و نمو گیاه تنها در صورتی رخ می‌دهد که دمای محیط از یک آستانه پایه (دمای مبنا) فراتر رود و میزان رشد و نمو متناسب با تجمع حرارت مؤثر در طول زمان است. به صورت تجمعی از اختلاف میانگین دمای روزانه و دمای پایه گیاه محاسبه می‌شود و به دلیل سادگی محاسبه و ارتباط مستقیم با مراحل فنولوژیک گیاه، به طور گسترده در پیش‌بینی زمان سبز شدن، ساقه رفتن، گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیک و برداشت محصولات زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ویژگی باعث شده است که GDD به عنوان یک متغیر کلیدی در مدل‌های رشد و نمو گیاه و مدیریت زراعی شناخته شود. در حوزه نیاز آبی گیاه، شاخص GDD نقش مهمی در تبیین تغییرات زمانی مصرف آب ایفا می‌کند. از آنجا که تبخیر-تعرق واقعی گیاه تابعی از سطح پوشش گیاهی، مرحله رشد و نمو و فعالیت فیزیولوژیک گیاه است، استفاده از GDD امکان ارتباط دینامیک رشد و نمو گیاه با الگوی مصرف آب را فراهم می‌سازد. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات ضریب گیاهی (Kc) و افزایش نیاز آبی در طول فصل رشد همبستگی بالایی با تجمع درجه‌روز رشد دارد. کاربرد GDD در برآورد نیاز آبی، به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم و نوسانات دمایی، می‌تواند دقت برنامه‌ریزی آبیاری را افزایش داده و جایگزین مناسبی برای تقویم‌های ثابت آبیاری باشد. تلفیق شاخص GDD با داده‌های هواشناسی و مدل‌های تبخیر-تعرق مرجع، ابزاری کارآمد برای مدیریت هوشمند آب، بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش تنش آبی در سامانه‌های کشاورزی فراهم می‌کند.

## پیشینه پژوهش

مدل گیاهی GDD از پر اهمیت ترین مدل‌های گیاهی در تعیین دوره‌های رشد و نمو گیاه می‌باشد از این رو در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای در سال‌های اخیر در حال انجام است (Cross and Zuber, 1972). این پارامتر یک خصوصیت اقلیمی-گیاهی است (McMaster and Smika, 1988). رابطه بین رشد و نمو گیاه و درجه حرارت برای محاسبه GDD از اهمیت بالایی برخوردار است. یک رابطه خطی که فرض می‌کند سرعت رشد متناسب با درجه حرارت آستانه است، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و اغلب برای دمای متوسط محاسبات دقیق‌تر است (White et al. 2012).

با این وجود، فرض خطی بودن دما خطاهایی را به همراه خواهد داشت و وقتی دما در شرایط متغیر به سمت افراط گرایش یابد این خطا افزایش می‌یابد (Ritchie and NeSmith, 1991). رابطه خطی بین دما و رشد گیاه در مطالعات طولانی مدت نامناسب است، به خصوص برای کل دوره رشد گیاه خطای زیادی ایجاد می‌شود (Abrami, 1972). بنابراین بسیاری از روشها که فرض رابطه غیر خطی دارند، توسعه یافته‌اند که هریک دارای نقاط قوت و ضعف هستند؛ به عنوان مثال، یک رویکرد دو طرفه اتخاذ شده است که در آن پاسخ به دمای زیر و فوق بالا توسط معادلات خطی مختلف کنترل می‌شود و منحنی پاسخ واقعی به طور کلی نرمال می‌گردد تا نوسانات دمایی که رشد را مختل می‌نمایند در این بازه‌ها در نظر گرفته نشوند (Aiken, 2005).

معادله نمایی معمولاً برای شبیه‌سازی عملکرد در دماهای پایین تا متوسط مؤثر است، ولی برای دما بالا کارایی ندارد زیرا در دکای بالا توسعه گیاهی مختل می‌گردد (Tollenaar et al. 1979). معادله درجه دوم یک مدل ساده است که می‌تواند در دماهای بالا سرعت توسعه کمتری را تعریف نماید (Yan and Wallace, 1998). با این حال، پاسخ دما به ندرت یک حالت متقارن دارد؛ بنابراین کاربردهای مدل‌های درجه دوم خطای بالایی خواهند داشت (Kara, 2015). محققین یک تابع بتا شامل سه پارامتر (کنترل درجه حرارت) برای توصیف پاسخ دما استفاده کردند که نتایج شبیه‌سازی‌ها برای چندین گیاه مانند ذرت، گندم، جو، سورگوم و لوبیا موفقیت آمیز بود. این روش نسبت به روش‌های زمانی-حرارتی که به طور گسترده در پیش‌بینی مراحل رشد و نمو محصول استفاده می‌شد برتری داشت. این روش روند نامتقارن دمایی را برای سرعت رشد و کاهش این سرعت در دمای بالا حساب می‌کند (Yin et al., 1996).

در روش‌های سنتی تعیین GDD، میزان رشد بطور خطی با دمای بالاتر از آستانه و پایین تر از آستانه مرتبط می‌شد؛ با این حال، خطی سازی با وجود استفاده گسترده از آن، اغلب به بیش برآورد بودن مورد انتقاد قرار می‌گیرد (Ruml et al., 2010). یک مدل GDD با ثبات تر و کمتر متغیر که با یک روش دقیق محاسبه شود، لازم است تا مراحل دوره رشد محصول را با دقت مورد مقایسه و پیش‌بینی قرار دهد. بیان داشتند که تعیین ضریب گیاهی براساس درجه روز-رشد نسبت به روش FAO از دقت بیشتری برخوردار است و بر آن



ارجحیت دارد (Lazzar and Rana, 2010). در کالیفرنیا طول مراحل رشد گیاه را هم براساس روز پس از کاشت (DAP) و هم براساس درجه روز-رشد برای تعیین ضریب گیاهی لوییایی چشم بلبل تعیین نمود و نتیجه گرفت که در مراحل اولیه رشد ضریب گیاهی همبستگی بیشتری با روز پس از کاشت داشت، ولی برای کل فصل رشد، تفاوت معنی داری بین همبستگی درجه روز-رشد با ضریب گیاهی در مقایسه با همبستگی روز پس از کاشت با ضریب گیاهی وجود نداشت (De Tar, 2009).

در ادامه روند مطالعات ضریب گیاهی پنبه به عنوان تابعی از روز پس از کاشت و درجه روز-رشد تعیین و نتیجه گرفت که حداکثر ضریب گیاهی (۱/۵۳) در ۱۰۵ روز پس از کاشت بدست آمد که مصادف بود با ۲۴۹۲ درجه روز-رشد. نامبرده طول مراحل اولیه، توسعه و میان فصلی را بترتیب ۲۵، ۳۵ و ۷۲ تعیین نمودند. ضرایب گیاهی برای دوره‌های یاد شده نیز بترتیب ۰/۴۲، ۰/۸۹ و ۱/۴۱ بود. نامبرده همچنین معادله ای برای تعیین ضریب گیاهی از روی درجه روز-رشد ارائه نمودند (Kumar, 2011). در جنوب برزیل مراحل مختلف رشد گیاه لوبیا را بر مبنای درجه روز-رشد تعیین و دریافتند که گله‌ی گیاه مصادف است با ۵۰۴ درجه روز-رشد، حداکثر درصد پوشش در درجه روز-رشد ۵۷۶، مرحله تشکیل غلاف در ۶۵۲ درجه روز-رشد رخ داد (De Medeiros et al., 2016).

در ایتالیا ضریب گیاهی گوجه فرنگی را بر مبنای درجه روز-رشد تعیین و معادلات زیر را برای تعیین ضریب گیاهی از روی درجه روز-رشد بترتیب برای مراحل توسعه و مرحله پایانی ارائه نمودند (Cerekovic et al., 2010). در آزمایشی درجه روز-رشد را برای دوره‌های مختلف رشد سویا و ضریب گیاهی متناسب با هر دوره را بدست آوردند. بر اساس نتایج نامبردگان درجه روز-رشد سویا در مراحل مختلف رشد رویشی (از VE تا V6) در محدوده ۷۰ تا ۶۱۰ و در مراحل رشد زایشی (R1 تا R8) در محدوده ۶۸۳ تا ۲۰۱۹ متغیر بود. ضریب گیاهی سویا در دوره‌های یاد شده نیز بترتیب در محدوده ۰/۷۵ تا ۰/۸۸ و ۰/۹ تا ۱/۲۹ در نوسان بود (Irmak et al., 2013). در آزمایشی دیگر در مصر، درجه روز-رشد را برای مراحل مختلف رشد گندم برای تخمین نیاز آبی آن بر پایه دوره‌های رشد ارائه شده توسط فائو ارائه نمودند. این مقادیر برای دوره‌های رشد اولیه، توسعه، میان فصلی و پایانی بترتیب برابر ۲۴۱/۵، ۲۵۰، ۶۳۰/۵ و ۲۳۷ بود (Salama et al., 2015). مروری بر تحقیقات انجام شده در مناطق مختلف، بیانگر وابستگی طول دوره‌های رشد گیاه به عوامل اقلیمی و تغییر این عوامل در مناطق مختلف می‌باشد. از سوی دیگر تعیین طول مراحل رشد گیاه بر اساس درجه روز رشد از دقت بیشتری نسبت به روز پس از کاشت برخوردار است. لذا لازم است تا دوره فنولوژی گیاه در هر منطقه بر اساس درجه روز-رشد تعیین گردد.

با این حال، روابط و روش‌های سنتی نمی‌توانند دقیقاً تأخیر در رشد یا در دمای بالاتر از دمای قابل تحمل گیاه را نشان دهند. با تمام پیشرفت‌های روابط غیرخطی بین نرخ توسعه و درجه حرارت به ندرت برای محاسبه GDD اعمال می‌شوند زیرا برای هر منطقه می‌بایست مورد واسنجی و ارزیابی قرار گیرند (Zhou and Wang, 2018).

با توجه به موارد مذکور هدف از انجام این مطالعه تعیین مقادیر GDD با دوره‌های بومی برای گیاه گندم و ارائه نقشه‌های GDD متناسب با دوره‌های مختلف رشد و کل دوره رشد بود که در تعیین الگوی کشت و برنامه ریزی منابع آبی بسیار پر کاربرد است.

### روش‌شناسی پژوهش

برای محاسبه روز درجه رشد (GDD) از روش پیشنهادی (Zhou and Wang, 2018) که دقت بسیار مناسب تری نسبت به سایر روش‌ها دارد استفاده شد. معادلات حاکم بر این روش به شرح ذیل می‌باشد.

$$GDD = \sum DTT$$

رابطه ۱)

که DDT در آن به شرح ذیل محاسبه می‌گردد:

$$DDT = \begin{cases} 0 & Tave < Tb \\ Tave' - Tb & Tb < Tave < Tu \\ Tu - Tb & Tu < Tave \end{cases}$$

رابطه ۲)

$$Tm = \min(Tmax, Tu)$$

رابطه ۳)

$$Tn = \max(Tmin, Tb)$$

رابطه ۴)

$$Tave' = (Tm + Tn) / 2$$

رابطه ۵)

که در آن  $Tave'$  میانگین دمای روزانه اصلاح شده بوده و  $Tb$  دمای پایه رشد گیاه و  $Tu$  بیشینه دمای ممکن است.  $Tm$  برای کنترل دما است که از حد بیشینه دمای در محاسبات فراتر نرود و  $Tn$  برای کنترل دما است که از حد پایه در محاسبات پایین تر نشود که با شرایط رشد گیاه متناسب تر می‌باشد. با توجه به تحقیقات انجام شده مقدار بیشینه دمای ممکن برای رشد حدود ۳۰ درجه و دمای حداقل رشد صفر درجه به عنوان حد پایین قابل توصیه و قابل قبول (بدون ترند) گزارش شده است که در این تحقیق مقدار بیشینه ۳۰ و مقدار

دمای پایه ۴ درجه برای گیاه گندم از بانک اطلاعات سامانه نیاز آب گرفته شد (Grigorieva et al., 2010). پس از تعیین شاخص GDD در دوره‌های مختلف رشد و نمو گیاه گندم در ۸۰۵ نقطه مکان که به صورت بومی دوره‌های فنولوژی در آن‌ها تعیین شده بود نقشه شاخص GDD برای تک تک دوره‌ها و برای کل دوره رشد ترسیم شد. برای این کار، از داده‌ها و لایه‌های مکانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS برای انجام تحلیل‌های فضایی و درون‌یابی درجه‌روز رشد (Growing Degree Days: GDD) در سطح کل کشور ایران استفاده شد. نرم‌افزار ArcGIS مجموعه‌ای از روش‌های متنوع برای درون‌یابی فضایی ارائه می‌دهد که شامل روش‌های قطعی (Deterministic)، زمین‌آماری (Geostatistical) و روش‌های درون‌یابی با در نظر گرفتن موانع مکانی (Barrier approaches) می‌شود. هر یک از این دسته‌ها شامل چندین الگوریتم مختلف هستند که همه آن‌ها در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفتند. بمنظور تحلیل و پهنه‌بندی مکانی شاخص‌های حرارتی، از هشت پارامتر روز درجه رشد (Growing Degree Days: GDD) مرتبط با مراحل مختلف رشد گیاه استفاده شد. این پارامترها به دو گروه اصلی تقسیم شدند: روز درجه رشد نهایی (Final GDD) و روز درجه رشد مرحله‌ای (Stage-wise GDD). روز درجه رشد نهایی شامل مقادیر تجمعی روز درجه رشد در پایان مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد گیاه (GDD\_Ini\_End, GDD\_Mid\_End, GDD\_Dev\_End, GDD\_Late\_End) بود، در حالی که روز درجه رشد مرحله‌ای بیانگر مقدار روز درجه رشد طی هر یک از مراحل رشد به صورت مجزا (GDD\_Ini, GDD\_Dev, GDD\_Mid, GDD\_Late) است. (جدول ۱).

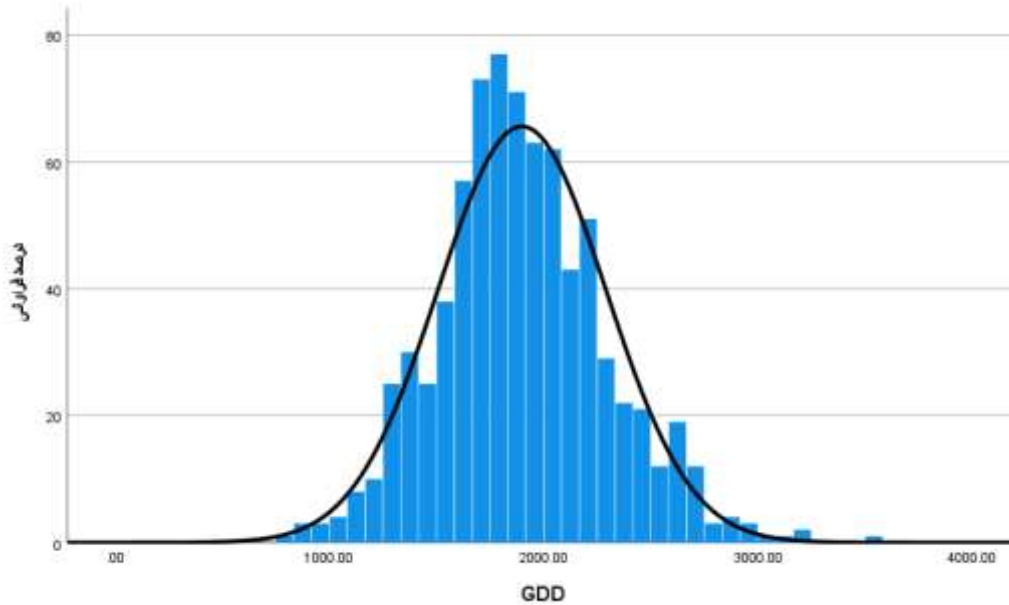
جدول ۱ - نام اختصاری برای دوره‌های مختلف رشد شاخص GDD گیاه گندم

نام کامل انگلیسی	نام کامل فارسی	علامت اختصاری
Growing Degree Days at the End of Initial Stage	روز درجه رشد در اتمام دوره اولیه	GDD_Ini_End
Growing Degree Days at the End of Development Stage	روز درجه رشد در اتمام دوره توسعه	GDD_Dev_End
Growing Degree Days at the End of Mid-season Stage	روز درجه رشد در اتمام دوره میانی	GDD_Mid_End
Growing Degree Days at the End of Late Season Stage	روز درجه رشد در اتمام دوره پایانی	GDD_Late_End
Growing Degree Days during Initial Stage	روز درجه رشد دوره اولیه	GDD_Ini
Growing Degree Days during Development Stage	روز درجه رشد دوره توسعه	GDD_Dev
Growing Degree Days during Mid-season Stage	روز درجه رشد دوره میانی	GDD_Mid
Growing Degree Days during Late Season Stage	روز درجه رشد دوره پایانی	GDD_Late

داده‌های مورد استفاده شامل ۷۷۶ نقطه مشاهده‌ای بود که به صورت مکانی در سطح منطقه مورد مطالعه (کشور ایران) پراکنش داشتند. به منظور انجام درون‌یابی و ارزیابی دقت روش‌ها، داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند؛ به طوری که ۷۰ درصد داده‌ها (حدود ۵۴۳ نقطه) برای تولید سطوح درون‌یابی شده و ۳۰ درصد باقی‌مانده (۲۳۳ نقطه) برای اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفتند. فرآیند درون‌یابی مکانی پارامترهای GDD با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و به کارگیری چندین روش متداول انجام شد. این روش‌ها شامل فاصله معکوس وزنی (IDW) با توان‌های ۱ و ۲، روش اسپلاین (Spline)، همسایه طبیعی (Natural Neighbor) و انواع مختلف روش کریجینگ شامل کریجینگ دایره‌ای، کروی، نمایی، گاوسی، یونیورسال و خطی بودند. برای هر پارامتر، نقشه‌های درون‌یابی شده بر اساس داده‌های آموزشی تهیه شد. به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف درون‌یابی، مقادیر برآورد شده در نقاط آزمون با مقادیر مشاهده‌ای متناظر مقایسه گردید. دقت روش‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) مورد سنجش قرار گرفت.

### یافته‌های پژوهش و بحث

بررسی نتایج بدست آمده از ۸۰۵ نقطه کشور نشان داد که به طور متوسط گیاه گندم در ایران ۱۸۹۹ روز درجه رشد نیاز دمایی دارد. کمینه آن ۷۶۵ روز درجه رشد مربوط به شهرستان نور استان مازندران می‌باشد و بیشینه آن ۳۵۱۵ مربوط به شهرستان اوز استان فارس می‌باشد. نمودار فراوانی و توزیع نرمال داده‌ها در شکل ۱ ارائه شده است که نتیجه آزمون شاپیرو ویلک نشان از نرمال بودن داده دارد.



شکل ۱- بررسی توزیع نرمال داده‌های شاخص GDD در کل کشور

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، توزیع مقادیر GDD دارای الگوی تقریباً نرمال است، به طوری که بیشترین فراوانی در بازه‌ای متمرکز حول مقدار میانی (حدود ۱۸۰۰-۲۰۰۰ واحد GDD) قرار دارد. این تمرکز بیانگر غالب بودن شرایط حرارتی مشابه در بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه است. با این حال، شکل توزیع کاملاً متقارن نیست و کمی چولگی به سمت راست (Right-skewness) در داده‌ها مشاهده می‌شود. وجود دم کشیده در مقادیر بالاتر GDD (بیش از حدود ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰) نشان‌دهنده مناطقی با شرایط حرارتی گرم‌تر یا دوره‌های رشد طولانی‌تر است که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های ارتفاعی، عرض جغرافیایی، یا شرایط اقلیمی محلی باشد. در مقابل، مقادیر بسیار پایین GDD فراوانی کمتری دارند که حاکی از محدود بودن مناطق سردتر یا کوتاه‌بودن دوره رشد در بخش کوچکی از مناطق است. برازش مناسب منحنی نرمال بر روی هیستوگرام نشان می‌دهد که فرض نرمال بودن داده‌های GDD تا حد زیادی قابل قبول است. این موضوع از نظر روش‌شناسی اهمیت بالایی دارد، زیرا بسیاری از روش‌های زمین‌آماری، به‌ویژه Kriging، بر مبنای توزیع نرمال یا نزدیک به نرمال داده‌ها عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. بنابراین، این شکل از نظر آماری توجیه‌کننده استفاده از روش‌های Kriging در تحلیل مکانی GDD در این پژوهش است البته به این نتیجه تنها اکتفا نشد و همه روش‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند (Li and Heap, 2014). دامنه نسبتاً گسترده تغییرات GDD (تقریباً از کمتر از ۱۰۰۰ تا بیش از ۳۰۰۰ واحد) بیانگر ناهمگنی مکانی قابل توجه در شرایط حرارتی کشور است. چنین ناهمگنی‌ای نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های ساده و قطعی ممکن است قادر به بازنمایی دقیق این تغییرات نباشد و لزوم بهره‌گیری از روش‌هایی که ساختار مکانی داده‌ها را در نظر می‌گیرند مانند Kriging را تقویت می‌کند. در مجموع، این شکل نشان می‌دهد که داده‌های GDD دارای توزیعی نسبتاً نرمال همراه با چولگی مثبت ملایم هستند که هم‌زمان بیانگر پایداری الگوی کلی اقلیمی و وجود تفاوت‌های محلی معنی‌دار در منطقه مورد مطالعه است. این ویژگی‌ها تأیید می‌کند که انتخاب روش‌های زمین‌آماری پیشرفته برای مدل‌سازی مکانی GDD در این پژوهش از نظر آماری و اقلیم‌شناسی کاملاً موجه است (Wilks 2011). پس از آموزش اعتبار سنجی ۲۳۳ نقطه انجام شد و نتایج آن در جدول ۲ برای هر روش میانبایی و پارامترهای مختلف GDD که در جدول ۱ تعریف شده بودند ارائه شد.

نتایج به دست آمده در جدول ۲ نشان داد که نتایج نشان داد که روش Spline در تمامی شاخص‌ها ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داده است. مقادیر بسیار بالای RMSE و NRMSE در تمام مراحل رشد) به‌ویژه در شاخص‌های تجمعی مانند GDD\_mid\_End و (GDD\_Late\_End حاکی از ناتوانی این روش در بازنمایی ساختار مکانی داده‌های GDD است. این مسئله می‌تواند ناشی از حساسیت بالای Spline به نوسانات محلی و عدم تطابق آن با ماهیت تدریجی و پیوسته تغییرات دمایی باشد. بنابراین، استفاده از این روش برای برآورد مکانی GDD توصیه نمی‌شود. در مقابل، روش‌های مبتنی بر Kriging عملکردی پایدار، دقیق و قابل اعتماد از خود نشان دادند. در میان مدل‌های مختلف Kriging، تفاوت چشمگیری از نظر دقت مشاهده نشد، اما به‌طور کلی Kriging و Kriging Gaussian

Universal کمترین مقادیر RMSE و NRMSE را در اکثر شاخص‌ها ثبت کردند. این برتری را می‌توان به توانایی Kriging در لحاظ کردن ساختار مکانی داده‌ها از طریق تابع واریوگرام و همچنین در نظر گرفتن روندهای کلی مکانی در Kriging Universal نسبت داد. نتایج نشان می‌دهد که این روش‌ها قادرند تغییرات تدریجی و سیستماتیک درجه‌روز رشد را با دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها شبیه‌سازی کنند. که این نتایج با گزارش برای درونیایی دما و بارش در دره میانی ایبرو (اسپانیا)، منطبق بوده زیرا روش‌های geostatistical شامل انواع Kriging نتایج دقیق‌تری نسبت به روش‌های محلی مانند IDW و Splines ارائه می‌دهند و بهترین نقشه‌های اقلیمی را تولید می‌کنند؛ این نتایج برای هر دو متغیر دما و بارش مورد تأیید قرار گرفتند و نشان‌دهنده توانایی Kriging در مدل‌سازی ساختار مکانی داده‌های اقلیمی هستند (Vicente-Serrano et al., 2003). از طرف دیگر مطالعه بازبینی نیز نشان داده است که Kriging نسبت به سایر روش‌ها مزایای آماری مهمی دارد، از جمله توانایی تخمین واریانس پیش‌بینی و انعطاف‌پذیری در انتخاب مدل‌های واریوگرام، که به‌وضوح باعث بهبود دقت درونیایی متغیرهای محیطی مانند دما و بارش می‌شود (Li and Heap, 2011).

جدول ۲- بررسی دقت روش‌های میان‌یابی در تعیین شاخص‌های GDD گندم

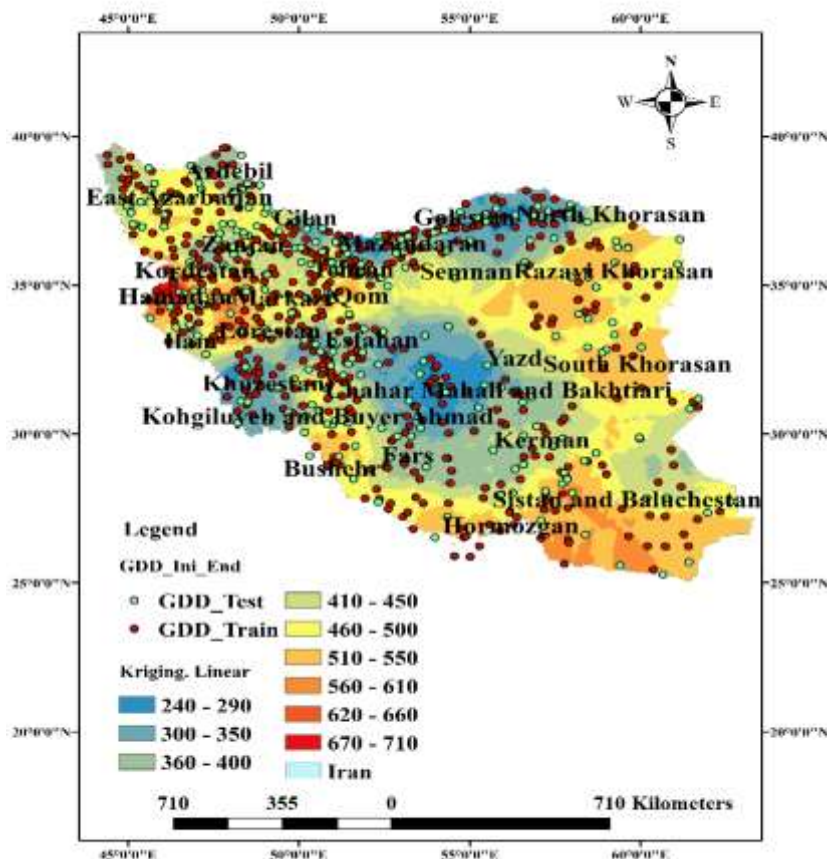
شاخص		IDW1	IDW2	Spline	Kriging .circula r	Kriging. Spherica l	Kriging. .Exp	Krigin .g. Univ	Krigin ggaus	Krigin g.linear	Natura .neig
GDD_Ini_End	RMSE	۱۷۳	۱۷۸	۲۴۲	۱۷۳	۱۷۴	۱۷۳	۱۵۰	۱۴۳	۱۴۳	۱۸۹
	NRMSE	۰/۴۰	۰/۴۱	۰/۵۶	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۴۴
GDD_Dev_End	RMSE	۱۸۴	۱۸۳	۵۱۲	۱۸۷	۱۸۷	۱۸۶	۱۹۴	۱۹۰	۱۸۷	۲۷۶
	NRMSE	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۶۰	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۳۲
GDD_mid_End	RMSE	۲۴۳	۲۴۲	۸۱۶	۲۴۸	۲۴۸	۲۴۶	۲۵۲	۲۵۱	۲۴۸	۳۹۸
	NRMSE	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۵۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲۹
GDD_Late_End	RMSE	۲۹۸	۲۹۸	۱۰۴۴	۳۰۲	۳۰۲	۳۰۱	۳۰۱	۳۰۶	۳۰۳	۵۱۳
	NRMSE	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۵۵	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۲۷
GDD_Ini	RMSE	۱۳۴	۱۳۲	۳۷۶	۱۴۳	۱۴۳	۱۴۳	۱۴۹	۱۴۳	۱۴۳	۱۶۱
	NRMSE	۰/۳۱	۰/۳۰	۰/۸۷	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۷
GDD_Dev	RMSE	۹۸	۹۹	۲۶۴	۹۸	۹۸	۹۸	۱۰۲	۱۰۲	۹۹	۱۵۵
	NRMSE	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۶۲	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۳۶
GDD_Mid	RMSE	۹۶	۹۶	۳۷۷	۹۹	۹۹	۹۸	۱۰۰	۹۹	۹۹	۱۴۵
	NRMSE	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۷۱	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۲۷
GDD_Late	RMSE	۸۱	۸۳	۲۶۰	۸۱	۸۱	۸۱	۷۸	۷۹	۸۱	۱۳۲
	NRMSE	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۵۱	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۲۶

روش‌های IDW1 و IDW2 نیز عملکرد قابل قبولی داشتند و در برخی شاخص‌ها نتایجی نزدیک به Kriging ارائه دادند. با این حال، در اکثر موارد مقدار خطا در این روش‌ها اندکی بالاتر از بهترین مدل‌های Kriging بود. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه IDW به دلیل سادگی محاسباتی و عدم نیاز به مدل‌سازی واریوگرام می‌تواند گزینه‌ای مناسب در شرایط محدودیت داده یا زمان باشد، اما از نظر دقت نهایی نمی‌تواند جایگزین روش‌های Kriging شود. در تحلیل جامع که در بسیاری از مرورهای متدهای درونیایی اقلیمی نقل شده است، Kriging به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی درونیایی در علوم محیطی تبیین شد، به‌ویژه به‌خاطر توانایی آن در بهره‌گیری از خودهمبستگی مکانی و ارائه تخمین واریانس که در روش‌های قطعی وجود ندارد. این یافته‌ها اساس بسیاری از استفاده‌های گسترده Kriging در مطالعات دما، بارش، و شاخص‌های تجمعی اقلیمی را فراهم کرده‌اند (Goovaerts, 2000).

روش Natural Neighbor عملکردی متوسط داشت و اگرچه در مقایسه با Spline نتایج بهتری ارائه داد، اما در اغلب شاخص‌ها نسبت به IDW و Kriging دارای خطای بیشتری بود. این مسئله به‌ویژه در مراحل پایانی رشد که مقادیر GDD تجمعی افزایش می‌یابد، مشهودتر است و نشان می‌دهد این روش در بازتولید الگوهای مکانی تجمعی دما کارایی محدودی دارد. بررسی تغییرات خطا در مراحل مختلف رشد نشان داد که با پیشرفت مراحل فنولوژیک، مقدار RMSE افزایش ولی مقدار NRMSE کاهش می‌یابد. این پدیده بیانگر آن است که اگرچه خطای مطلق به دلیل افزایش مقدار تجمعی GDD بیشتر می‌شود، اما دقت نسبی مدل‌ها در مراحل پایانی رشد بهبود می‌یابد.



این موضوع نشان‌دهنده پایداری بالاتر مدل‌ها در بازنمایی الگوهای مکانی GDD در بازه‌های زمانی طولانی‌تر است. در نتیجه در میان روش‌های مورد بررسی، روش کریجینگ با مدل واریوگرام خطی (Kriging Linear) در تمامی پارامترهای روز درجه رشد کمترین میزان خطا را دارا بوده و عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان داده است. از این رو، این روش به‌عنوان مناسب‌ترین روش درون‌یابی برای تهیه نقشه‌های نهایی پارامترهای GDD انتخاب شد و کلیه نقشه‌های پهنه‌بندی نهایی بر اساس این روش در محیط ArcGIS استخراج گردید. در شکل ۲ نتایج شاخص روز درجه رشد در اتمام دوره اولیه ارائه شده است:



شکل ۲- نقشه برآورد شاخص GDD در پایان دوره اولیه رشد گیاه گندم در کشور

نقشه ارائه‌شده در شکل ۲ نشان‌دهنده توزیع شاخص درجه روزهای حرارتی (GDD) در پایان دوره اولیه رشد گیاه گندم در ایران است. شاخص GDD معیاری برای سنجش میزان گرما دریافت‌شده توسط گیاه است و ارتباط مستقیم با سرعت رشد و توسعه گیاه دارد؛ مقادیر بالاتر نشان‌دهنده رشد تندتر و مقادیر پایین‌تر نمایانگر رشد کندتر گیاه هستند. بر اساس نقشه، می‌توان ایران را به چند منطقه با ویژگی‌های متفاوت از نظر GDD تقسیم‌بندی کرد:

**شمال ایران و ارتفاعات غربی و شمال غربی استان‌های آذربایجان، کردستان، مازندران و گلستان:**

این مناطق عمدتاً دارای رنگ‌های آبی و سبز روی نقشه هستند که نشان‌دهنده GDD پایین (240-350) است. این مقادیر پایین به دلیل آب و هوای سردتر و ارتفاع بالاتر است و منجر به کندی رشد گندم در دوره اولیه می‌شود. در این مناطق، انتخاب ارقام دیررس یا مدیریت زمان کشت مرحله‌ای می‌تواند برای بهینه‌سازی رشد گیاه موثر باشد

**مرکز ایران شامل اصفهان، قم، تهران، یزد:**

مقادیر متوسط (410-500) GDD در این مناطق دیده می‌شود که رشد متوسط گیاه را نشان می‌دهد. دوره اولیه رشد طولانی‌تر نسبت به جنوب، اما کوتاه‌تر از شمال، مشخصه این مناطق است. این شرایط اجازه می‌دهد کشاورزان با مدیریت زمان کاشت و تغذیه، رشد گیاه را

بهینه کنند.

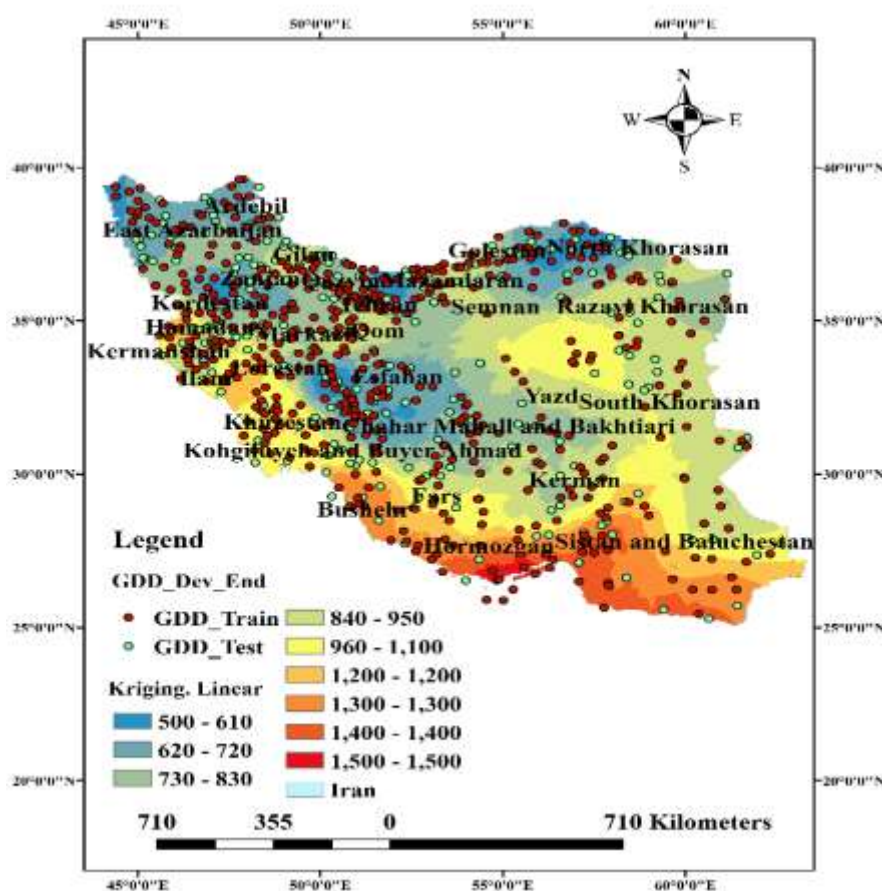
جنوب و جنوب شرق ایران شامل خوزستان، فارس، سیستان و بلوچستان، کرمان:

مناطق جنوبی و جنوب شرقی عمدتاً با رنگ‌های نارنجی و قرمز نشان داده شده‌اند، که بیانگر GDD بالا (560-710) است. رشد گیاه در این مناطق سریع است و دوره اولیه رشد کوتاه‌تر است. با این حال، سرعت بالای رشد ممکن است نیازمند مدیریت دقیق منابع آبی و کوددهی برای جلوگیری از تنش‌های حرارتی و کمبود مواد مغذی باشد.

شرق ایران خراسان رضوی، جنوبی و شمالی:

این مناطق دارای مقادیر متوسط تا بالای (460-610) GDD هستند که رشد گیاه را در سطح متوسط تا سریع نشان می‌دهد و بسته به رقم گندم و شرایط اقلیمی محلی، می‌توان برنامه‌های مدیریت کشت و آبیاری را تنظیم کرد.

در شکل ۳ نتایج شاخص درجه روز رشد در اتمام دوره توسعه ارائه شده است:



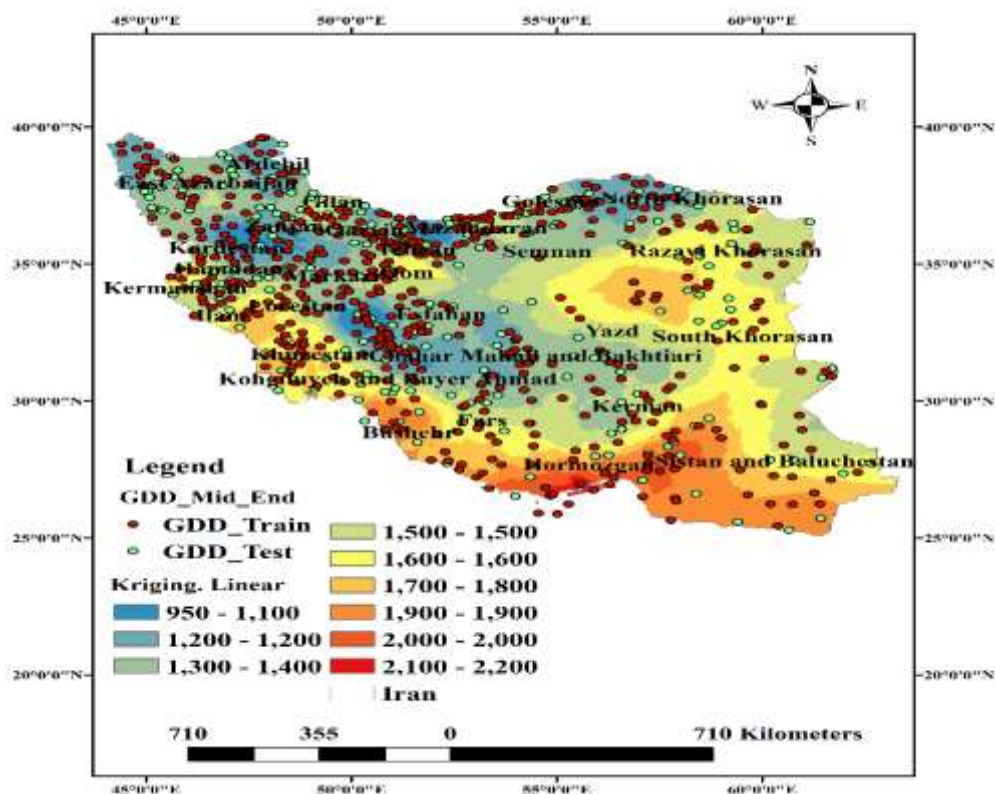
شکل ۳- نقشه برآورد شاخص GDD در پایان دوره توسعه رشد گیاه گندم در کشور

نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد شاخص درجه روز رشد تجمعی (GDD) در پایان دوره توسعه رشد گندم، ناهمگنی فضایی قابل توجهی را در سطح کشور دارد که بازتابی از تنوع اقلیمی، توپوگرافی و الگوهای حرارتی حاکم بر مناطق مختلف است. مقادیر GDD در مناطق سردسیر و مرتفع شمال غرب، البرز و زاگرس مرکزی در کمینه قرار دارد، در حالی که بیشترین مقادیر در نواحی جنوبی، جنوب شرقی و بخش‌هایی از جنوب غرب کشور مشاهده می‌شود. این اختلاف مکانی چشمگیر بیانگر تفاوت در میزان انرژی حرارتی تجمع یافته تا انتهای مرحله توسعه فنولوژیک گندم بوده و نقش تعیین کننده‌ای در زمان بندی مراحل بعدی رشد ایفا می‌کند.

پایان دوره توسعه رشد یکی از مراحل حساس فنولوژیک گندم است، چرا که گیاه در این مقطع وارد فازهای تعیین کننده عملکرد از جمله ساقه رفتن و خوشه دهی می‌شود. بر این اساس، پایین بودن GDD در مناطق سردتر کشور می‌تواند به طولانی تر شدن این مرحله و تأخیر در ورود به مراحل زایشی منجر شود، در حالی که در مناطق با GDD بالاتر، تسریع رشد و کوتاه شدن طول فصل رشد محتمل است.

دوره رشد کوتاهتر و آب مصرفی کمتری خواهند داشت. این تفاوت‌ها مستقیماً بر بهره‌وری مصرف آب، تخصیص بیوماس و نهایتاً عملکرد دانه اثرگذار خواهند بود. از منظر مدیریت زراعی، الگوی مکانی GDD در پایان دوره توسعه رشد گندم می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تنظیم تاریخ کاشت و انتخاب ارقام سازگار فراهم آورد. در مناطق با GDD پایین‌تر، استفاده از ارقام زودرس یا تنظیم تاریخ کاشت به گونه‌ای که گیاه از پنجره حرارتی مناسب بهره‌مند شود، اهمیت بیشتری دارد. در مقابل، در مناطق گرم‌تر کشور که GDD در این مرحله بالاتر است، خطر مواجهه گیاه با تنش‌های حرارتی و خشکی در مراحل بعدی رشد افزایش می‌یابد و استفاده از ارقام متحمل به گرما و مدیریت دقیق آبیاری ضروری خواهد بود. علاوه بر این، نتایج حاصل از این نقشه نشان می‌دهد که شاخص GDD می‌تواند به‌عنوان پیونددهنده‌ای مؤثر میان اقلیم و نیاز آبی گندم عمل کند. افزایش GDD معمولاً با افزایش تبخیر-تعرق بالقوه همراه است و در نتیجه، مناطق با مقادیر بالاتر GDD در پایان دوره توسعه رشد، نیازمند توجه ویژه در برآورد دقیق نیاز آبی و زمان‌بندی آبیاری هستند. در این راستا، تلفیق نقشه‌های GDD با مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق و سامانه‌های تصمیم‌یار کشاورزی می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری منابع کمک شایانی کند. از منظر تغییر اقلیم، الگوی فضایی GDD در این مرحله فنولوژیک، ابزار ارزشمندی برای پیش‌بینی تغییرات آبی در تقویم رشد گندم محسوب می‌شود. افزایش دما در سناریوهای اقلیمی آینده احتمالاً منجر به افزایش GDD و جابه‌جایی زمانی مراحل رشد خواهد شد که این امر می‌تواند پیامدهایی همچون کاهش طول دوره پرشدن دانه و افت عملکرد را در برخی مناطق به دنبال داشته باشد. بنابراین، استفاده از چنین نقشه‌هایی در مطالعات تطبیقی گذشته-حال-آینده، نقش کلیدی در تدوین راهبردهای سازگاری کشاورزی ایفا می‌کند. در مجموع، نقشه برآورد GDD در پایان دوره توسعه رشد گندم نه تنها تصویری روشن از تنوع حرارتی مؤثر بر فنولوژی این محصول در ایران ارائه می‌دهد، بلکه به‌عنوان پایه‌ای علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، برنامه‌ریزی زراعی و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تولید گندم کشور قابل استفاده است.

در شکل ۴ نتایج شاخص روز درجه رشد در اتمام دوره میانی ارائه شده است:



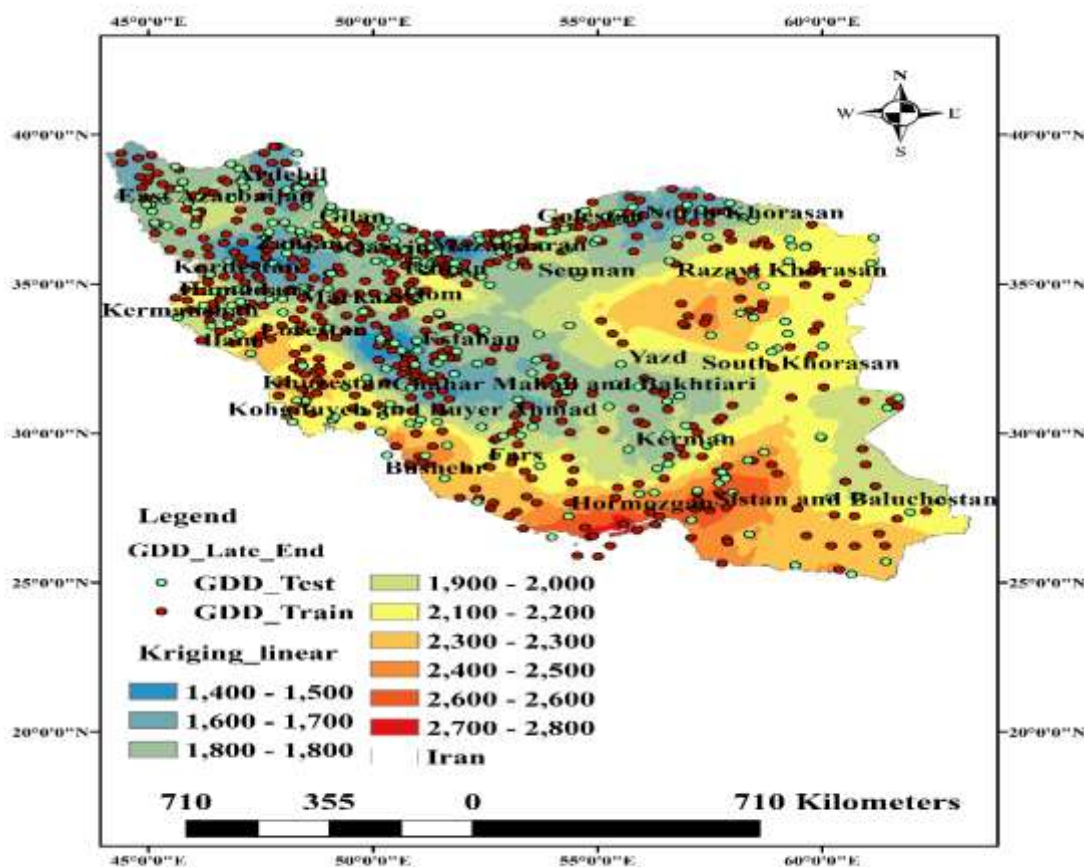
شکل ۴- نقشه برآورد شاخص GDD در پایان دوره میانی رشد گیاه گندم در کشور

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نقشه برآورد شاخص GDD در پایان دوره میانی رشد گندم در پایان دوره میانی رشد گندم، الگوی فضایی مشخص و گرادینانی از شمال غرب به جنوب و جنوب شرق کشور دارد:

کمترین مقادیر GDD حدود ۹۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه-روز (در مناطق شمال غرب، ارتفاعات زاگرس و البرز شامل: آذربایجانها کردستان همدان بخش‌هایی از لرستان و چهارمحال این مناطق تحت تأثیر ارتفاع، دمای پایین‌تر و طولانی‌تر شدن دوره رشد رویشی قرار دارند. مقادیر متوسط GDD حدود ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه-روز (در بخش‌های وسیعی از غرب و مرکز کشور استان‌های اصفهان، مرکزی، قم، سمنان که بیانگر شرایط نسبتاً متعادل حرارتی برای مرحله میانی رشد گندم است. بیشترین مقادیر 1700 GDD تا بیش از ۲۱۰۰ درجه-روز (در مناطق جنوب شرق جنوب غرب (خوزستان، هرمزگان، سیستان و بلوچستان، جنوب کرمان) که ناشی از دمای بالا و تسریع تجمع حرارتی در این نواحی است. تفسیر فیزیولوژیک برای گندم در مناطق با GDD بالا موجب رشد سریع‌تر می‌شود و احتمال کوتاه شدن دوره پر شدن دانه افزایش ریسک تنش گرمایی در مراحل زایشی را دارد.

در مناطق با GDD پایین رشد رویشی طولانی‌تر تأخیر در خوشه‌دهی و گل‌دهی امکان افزایش زیست‌توده، اما با ریسک سرما یا یخ‌زدگی وجود دارد. پیامدهای مدیریتی و زراعی این نقشه نشان می‌دهد که یک نسخه مدیریتی واحد برای کشت گندم در کشور قابل توصیه نیست لذا مناطق با GDD بالا نیاز به ارقام زودرس یا متحمل به گرما با تنظیم دقیق تاریخ کاشت برای فرار از تنش حرارتی نیاز است و در مناطق با GDD پایین نیاز به ارقام دیررس‌تر وجود دارد و اهمیت مدیریت سرما و طول فصل رشد ارزیابی روش‌شناسی نقشه استفاده از درون‌یابی کریجینگ خطی (Linear Kriging) سبب ایجاد سطحی پیوسته و قابل اعتماد از GDD شده است. هم‌پوشانی مناسب داده‌های آموزشی (Train) و آزمون (Test) بیانگر پایداری و اعتبار مکانی برآوردها است. جمع‌بندی کلیدی نقشه برآورد GDD در پایان دوره میانی رشد گندم نشان می‌دهد که اقلیم حرارتی کشور ایران از نظر نیاز گرمایی گیاه، به شدت ناهمگن بوده و این ناهمگنی، لزوم مدیریت منطقه‌محور تاریخ کاشت، انتخاب رقم و پیش‌بینی عملکرد گندم را برجسته می‌سازد.

در شکل ۵ نتایج شاخص روز درجه رشد در اتمام دوره پایانی یعنی شاخص GDD نهایی ارائه شده است:



شکل ۵- نقشه برآورد شاخص GDD در پایان دوره نهایی رشد گیاه گندم در کشور

نقشه برآورد شاخص درجه-روز رشد (GDD) در پایان دوره نهایی رشد گیاه گندم در کشور نشان‌دهنده توزیع فضایی ناهمگن و گرازیان حرارتی مشخصی از شمال غرب به سمت جنوب و جنوب شرق ایران است. دامنه تغییرات این شاخص از حدود ۱۴۰۰ درجه-روز در



مناطق سرد و مرتفع شمال غرب و ارتفاعات زاگرس و البرز آغاز شده و به بیش از ۲۷۰۰ تا ۲۸۰۰ درجه-روز در نواحی گرم و خشک جنوب، جنوب شرق و جنوب غرب کشور می‌رسد. این الگوی مکانی بیانگر تأثیر هم‌زمان عرض جغرافیایی، ارتفاع و شرایط اقلیمی بر میزان تجمع حرارت در طول فصل رشد گندم است. در مناطق با مقادیر پایین GDD، از جمله آذربایجان‌ها، کردستان و بخش‌هایی از غرب کشور، تجمع حرارتی به‌کندی صورت گرفته و فصل رشد طولانی‌تر است که می‌تواند منجر به تأخیر در رسیدگی فیزیولوژیک شود. در مقابل، در نواحی مرکزی کشور مقادیر متوسط GDD (حدود ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ درجه-روز) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده شرایط حرارتی نسبتاً متعادل و مناسب برای تکمیل مراحل فنولوژیک گندم است. بیشترین مقادیر GDD در استان‌های جنوبی و جنوب شرقی از جمله خوزستان، بوشهر، هرمزگان، جنوب کرمان و سیستان و بلوچستان ثبت شده است که بیانگر تجمع سریع حرارت و تسریع فرآیند رسیدگی در این مناطق می‌باشد.

از دیدگاه فیزیولوژیک، مقادیر بالای GDD در پایان دوره نهایی رشد می‌تواند موجب کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و افزایش ریسک تنش گرمایی انتهایی فصل شود، در حالی که مقادیر پایین‌تر GDD سبب طولانی‌تر شدن دوره رسیدگی و امکان افزایش وزن دانه، همراه با احتمال بروز تنش سرما یا بارش‌های دیر هنگام، می‌گردد. بنابراین، نتایج این نقشه بر ضرورت اتخاذ مدیریت منطقه‌محور در انتخاب رقم، تنظیم تاریخ کاشت و برنامه‌ریزی زراعی گندم در کشور تأکید دارد. به‌طور کلی، نقشه برآورد شاخص GDD در پایان دوره نهایی رشد گندم می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در سامانه‌های پیش‌بینی عملکرد، مدیریت نیاز آبی و ارزیابی ریسک‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد و نقش مهمی در بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های کلان بخش کشاورزی ایفا کند.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص درجه روز رشد (GDD) گندم در مقیاس ملی از ناهمگنی مکانی قابل توجهی برخوردار است که بازتاب‌دهنده تنوع اقلیمی، توپوگرافی و شرایط حرارتی کشور ایران می‌باشد. بررسی داده‌های ۸۰۵ ایستگاه نشان داد که به‌طور متوسط گندم در ایران به حدود ۱۸۹۹ درجه روز حرارتی برای تکمیل چرخه رشد نیاز دارد، در حالی که دامنه تغییرات آن از ۷۶۵ درجه روز در مناطق سرد و مرطوب شمال کشور تا بیش از ۳۵۰۰ درجه روز در نواحی گرم و خشک جنوب کشور متغیر است. آزمون شاپیرو-ویلک و تحلیل توزیع فراوانی نیز حاکی از نرمال بودن نسبی داده‌ها با چولگی مثبت ملایم بود که از نظر آماری، زمینه مناسبی برای به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماری فراهم ساخت.

ارزیابی دقت روش‌های مختلف درونیایی با استفاده از اعتبارسنجی ۲۳۳ نقطه مستقل نشان داد که روش Spline در تمامی شاخص‌ها ضعیف‌ترین عملکرد را داشته و به دلیل خطای بالا، توانایی لازم برای بازنمایی ساختار مکانی تدریجی GDD را ندارد. در مقابل، روش‌های مبتنی بر Kriging، به‌ویژه Kriging با مدل واریوگرام خطی، Universal و Gaussian، بالاترین دقت و پایداری را در اغلب مراحل فنولوژیک گندم از خود نشان دادند. برتری Kriging را می‌توان به توانایی این روش در لحاظ کردن خودهمبستگی مکانی، مدل‌سازی ساختار واریوگرام و ارائه تخمین خطای پیش‌بینی نسبت داد. در میان این روش‌ها، Kriging خطی به‌طور یکنواخت کمترین مقادیر RMSE و NRMSE را در تمامی پارامترهای GDD ثبت کرد و به‌عنوان مناسب‌ترین روش درونیایی برای تولید نقشه‌های نهایی انتخاب شد.

نقشه‌های پهنه‌بندی GDD در مراحل مختلف رشد گندم (پایان دوره اولیه، توسعه، میانی و نهایی) نشان دادند که الگوی فضایی تجمع حرارتی کشور به‌صورت یک گرادینان مشخص از شمال غرب و ارتفاعات مرکزی به سمت جنوب و جنوب شرق تغییر می‌کند. مناطق سردسیر و مرتفع دارای مقادیر پایین GDD و فصل رشد طولانی‌تر هستند، در حالی که مناطق گرم و خشک جنوبی با تجمع سریع حرارت، دوره رشد کوتاه‌تر و ریسک بالاتر تنش گرمایی در مراحل زایشی مواجه‌اند. این تفاوت‌های مکانی تأکید می‌کند که مدیریت یکنواخت کشت گندم در سطح کشور کارایی لازم را نداشته و اتخاذ رویکرد منطقه‌محور در انتخاب رقم، تنظیم تاریخ کاشت، مدیریت آبیاری و پیش‌بینی عملکرد ضروری است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شاخص GDD ابزاری کارآمد برای تبیین ارتباط میان اقلیم و فنولوژی گندم در ایران است و نقشه‌های حاصل از درونیایی دقیق آن می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی در برنامه‌ریزی زراعی، بهینه‌سازی مصرف آب، ارزیابی ریسک‌های اقلیمی و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرند. به‌کارگیری روش Kriging خطی در تولید نقشه‌های GDD، ضمن افزایش دقت مکانی برآوردها، امکان استفاده مؤثر از این نتایج را در سامانه‌های تصمیم‌یار کشاورزی و مدیریت کلان تولید گندم کشور فراهم می‌سازد.

## ملاحظات اخلاقی

### حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی موسسه خاک و آب انجام شد. حمایت مالی از این پژوهش از طرف موسسه تحقیقات خاک و آب کشور در قالب پژوهانه طرح پژوهشی انجام شده است به شماره ۹۸۱۲۶۳.

### مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: نیازعلی ابراهیمی پاک، آزاده صداقت تهیه گزارش پژوهش: آرش تافته؛ تحلیل داده‌ها: آرش تافته  
نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.  
مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:  
نویسنده اول: انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه مقاله  
نویسنده دوم: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها  
نویسنده سوم: تهیه نقشه‌ها و آنالیزهای آماری دقت روش‌های زمین‌آماري  
اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش  
چیزی برای فاش کردن وجود ندارد، لذا نیازی به افزودن اعلامیه نیست.

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است. داده‌های مرتبط با این مقاله در سامانه نیاز آب در دسترس است.

### سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی موسسه خاک و آب به خاطر حمایت مالی/ حمایت معنوی / همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود؛ از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

## REFERENCES

- Abrami, G. (1972). Optimum mean temperature for plant growth calculated by a new method of summation. *Ecology*, 53, 893–900.
- Aiken, R. M. (2005). Applying thermal time scales to sunflower development. *Agronomy Journal*, 97(3), 746–754. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0181>.
- Cereković, N., Todorović, M., Snyder, R. L., Boari, F., Pace, B., & Cantore, V. (2010). Evaluation of the crop coefficients for tomato crop grown in a Mediterranean climate. In A. López-Francos (Ed.), *Economics of drought and drought preparedness in a climate change context* (pp. 91–94). CIHEAM /FAO/ICARDA /GDAR/CEIGRAM/MARM.
- Cross, H. Z., & Zuber, M. S. (1972). Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agronomy Journal*, 64, 351–355. <https://doi.org/10.2134/agronj1972.00021962006400030029x>.
- De Medeiros, G. A., Daniel, L. A., & Fengler, F. H. (2016). Growth, development, and water consumption of irrigated bean crop related to growing degree-days on different soil tillage systems in southeast Brazil. *International Journal of Agronomy*, 2016, Article 8065985. <https://doi.org/10.1155/2016/8065985>.
- De Tar, W. R. (2009). Crop coefficients and water use for cowpea in the San Joaquin Valley of California.



- Agricultural Water Management, 96(1), 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.011>.
- Ebrahimi Pak, N., Tafteh, A., Hosseini, S.N., Keykhaei, F. 2022. Niazab System. Soil and Water Research Institute. <http://niwr.ir>.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228(1–2), 113–129. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X).
- Grigorieva, E. A., Matzarakis, A., & de Freitas, C. R. (2010). Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude. *Climate Research*, 42(2), 143–154. <https://doi.org/10.3354/cr00888>.
- Irmak, S., Odhiambo, L. O., Specht, J. E., & Djaman, K. (2013). Hourly and daily single and basal evapotranspiration crop coefficients as a function of growing degree days, days after emergence, leaf area index, fractional green canopy cover, and plant phenology for soybean. *Transactions of the ASABE*, 56(5), 1785–1803. <https://doi.org/10.13031/trans.56.10219>.
- Li, J., & Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Environmental Modelling & Software*, 26(4), 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.12.003>.
- Kara, N. (2015). Yield, quality, and growing degree days of anise (*Pimpinella anisum* L.) under different agronomic practices. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(6), 1014–1022. <https://doi.org/10.3906/tar-1411-143>.
- Kumar, V. (2011). Stage specific cotton water use crop coefficients in northeast Louisiana (Master's thesis). Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. [https://doi.org/10.31390/gradschool\\_theses.373](https://doi.org/10.31390/gradschool_theses.373).
- Lazzara, P., & Rana, G. (2010). The use of crop coefficient approach to estimate actual evapotranspiration: A critical review for major crops under Mediterranean climate. *Italian Journal of Agrometeorology*, 15, 25–39.
- Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173–189.
- McMaster, G. S., & Smika, D. E. (1988). Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43(1), 1–18. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(88\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(88)90002-0).
- Ritchie, J. T., & NeSmith, D. S. (1991). Temperature and crop development. In J. Hanks & J. T. Ritchie (Eds.), *Modeling plant and soil systems* (pp. 5–29). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Ruml, M., Vuković, A., & Milatović, D. (2010). Evaluation of different methods for determining growing degree-day thresholds in apricot cultivars. *International Journal of Biometeorology*, 54(4), 411–422. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0292-6>.
- Salama, M. A., Yousef, Kh. M., & Mostafa, A. Z. (2015). Simple equation for estimating actual evapotranspiration using heat units for wheat under arid conditions. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8(2), 418–427. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.03.008>.
- Tollenaar, M., Daynard, T. B., & Hunter, R. B. (1979). Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Science*, 19, 363–366.
- Vicente-Serrano, S. M., Saz-Sánchez, M. A., & Cuadrat, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): Application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24(2), 161–180. <https://doi.org/10.3354/cr024161>.
- White, S. N., Boyd, N. S., & van Acker, R. C. (2012). Growing degree-day models for predicting lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.) ramet emergence, tip dieback, and flowering in Nova Scotia, Canada. *HortScience*, 47(8), 1014–1021. <https://doi.org/10.21273/hortsci.47.8.1014>.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3rd Edition. Academic Press.
- Yan, W., & Wallace, D. H. (1998). Simulation and prediction of plant phenology for five crops based on photoperiod × temperature interaction. *Annals of Botany*, 81(6), 705–716. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0625>.
- Yin, X., Kropff, M. J., & Ellis, R. H. (1996). Rice flowering in response to diurnal temperature amplitude. *Field Crops Research*, 48(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00033-0](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00033-0).
- Zhou, G., & Wang, Q. (2018). A new nonlinear method for calculating growing degree days. *Scientific Reports*, 8, Article 10149. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>