

(OPEN ACCESS)

## Modeling of pollination response to temperature and photoperiod in different quinoa varieties

Komail Askari<sup>1</sup>, Ali Rahemi Karizaki<sup>\*2</sup>, Abbas Biabani<sup>3</sup>,  
Ali Nakhzari-Moghadam<sup>4</sup>, Benjamin Torabi<sup>5</sup>

1. Ph.D. Student of Crop Physiology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Gonbad Kavous, Iran. E-mail: [k\\_askari2007@yahoo.com](mailto:k_askari2007@yahoo.com)
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Gonbad Kavous, Iran. E-mail: [rahemi@gonbad.ac.ir](mailto:rahemi@gonbad.ac.ir)
3. Professor, Dept. of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Gonbad Kavous, Iran. E-mail: [abbas.biabani@gonbad.ac.ir](mailto:abbas.biabani@gonbad.ac.ir)
4. Associate Prof., Dept. of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Gonbad Kavous, Iran. E-mail: [a\\_nakhzari@yahoo.com](mailto:a_nakhzari@yahoo.com)
5. Professor, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan Iran. E-mail: [ben\\_torabi@yahoo.com](mailto:ben_torabi@yahoo.com)

### Article Info

#### Article type:

Full Length Research Paper

#### Article history:

Received: 01.21.2025

Revised: 03.20.2025

Accepted: 04.26.2025

#### Keywords:

Biological day,  
Optimal temperature,  
Phenology,  
Temperature function

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Quinoa is a valuable food product that helps ensure food security worldwide. Accurate phenological predictions are essential for understanding a plant species' growth potential and performance. One of the most important studies required for this purpose is quantifying and estimating cardinal temperatures and day length parameters for the pollination stage, which is a crucial step in understanding the growth and performance of plants. Given that quantitative information on quinoa phenology is scarce, such data regarding pollination responses to temperature and day length can be useful in understanding the growth and performance of this plant. Therefore, the objectives of the present study are: (1) to develop a multiple model for predicting pollination in quinoa, and (2) to determine cardinal temperatures and day length parameters for pollination.

**Materials and Methods:** A field experiment was conducted with 12 planting dates from 2019 to 2021 on three quinoa varieties (Q12, Titicaca, and Giz1) in Galugah city. In this study, 10 plants were randomly selected and marked in each subplot to record the pollination initiation time for each planting date. The time taken to reach the pollination initiation stage was also recorded, where at least 50% of the plants had at least one flower at any position on the plant. To quantify the pollination stage against temperature and day length, a multiple model using combined temperature and day length functions was used. The temperature function was represented as a piecewise function, and the day length function was represented exponentially. The model was executed using the Proc nlin procedure in SAS software. To evaluate the model's accuracy, criteria such as RMSD, R<sup>2</sup>, comparison of 1:1 line coefficients with coefficients a and b from linear regression between predicted and observed values, and the correlation coefficient between them were used.

---

**Results:** The results showed that the RMSD values for different varieties ranged from 1.6 to 6.9 days, with lower values indicating higher model efficiency. The  $R^2$  coefficient for describing the relationship between pollination rate and temperature and day length in the three quinoa varieties was estimated to be above 0.97. A high  $R^2$  value indicates that the model is appropriate for describing the relationship between pollination rate, temperature, and day length. The base temperatures for the different varieties were estimated to be between 1.6 and 4.2 degrees Celsius, but no statistically significant differences were observed in the base temperatures of these three varieties. The optimal temperature estimated among the varieties ranged from 22.1 to 27.9 degrees Celsius. Further analysis using the error of estimating the optimal temperature revealed significant differences among the varieties regarding base temperature, with the Q12 variety having the highest optimal temperature value. The sensitivity coefficients to day length for varieties Q12, Titicaca, and Giz1 were estimated to be 0.025, 0.065, and 0.096 hours per day, respectively. Statistically significant differences were observed among the studied varieties with respect to sensitivity to day length. The biological day (the minimum number of days to pollination under optimal temperature and day length conditions) estimated through the model for the varieties Q12, Titicaca, and Giz1 were 31.7, 32.1, and 36.1 days, respectively.

**Conclusion:** The results showed that due to the low value of RMSD (less than 6.9 days) and high values of  $R^2$  (above 0.97) and  $r$  (above 0.95) in different cultivars, the bipartite-exponential model was able to describe the relationship between pollination well. Describe the temperature and length of the day. This model can be used to optimize management decisions, adjust phenological responses to diverse environmental conditions, and predict phenological responses to temperature and day length changes in the future.

---

Cite this article: Askari, Komail, Rahemi Karizaki, Ali, Biabani, Abbas, Nakhzari-Moghadam, Ali, Torabi, Benjamin. 2026. Modeling of pollination response to temperature and photoperiod in different quinoa varieties. *Journal of Plant Production Research*, 33 (1), 143-159.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jopp.2025.23000.3206

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## مدلسازی پاسخ گرده‌افشانی به دما و دوره نوری در ارقام مختلف کینوا

کمیل عسکری<sup>۱</sup>، علی راحمی کاریزکی<sup>۲\*</sup>، عباس بیابانی<sup>۳</sup>، علی نخزری مقدم<sup>۴</sup>، بنیامین ترابی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران. رایانامه: [k\\_askari2007@yahoo.com](mailto:k_askari2007@yahoo.com)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران. رایانامه: [rahemi@gonbad.ac.ir](mailto:rahemi@gonbad.ac.ir)
۳. استاد گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران. رایانامه: [abbas.biabani@gonbad.ac.ir](mailto:abbas.biabani@gonbad.ac.ir)
۴. دانشیار گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران. رایانامه: [a\\_nakhzari@yahoo.com](mailto:a_nakhzari@yahoo.com)
۵. استاد گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [ben\\_torabi@yahoo.com](mailto:ben_torabi@yahoo.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله کامل علمی- پژوهشی	<b>سابقه و هدف:</b> کینوا یکی از محصولات غذایی با ارزش، سالم و مفید است که به تامین امنیت غذایی در سراسر جهان کمک می‌کند. پیش‌بینی دقیق فنولوژی برای درک پتانسیل رشد و عملکرد یک‌گونه گیاهی ضروری است. مهم‌ترین مطالعه موردنیاز برای این منظور، کمی کردن و تخمین دماهای کاردینال و پارامترهای مربوط به طول روز برای مرحله گرده‌افشانی در درک رشد و عملکرد گیاهان است. با توجه به این‌که، اطلاعات کمی در مورد فنولوژی کینوا نادر است، چنین اطلاعاتی برای واکنش گرده‌افشانی به دما و طول روز می‌تواند در درک رشد و عملکرد این گیاه مفید واقع شود. هدف پژوهش حاضر: (۱) توسعه یک مدل چندگانه برای پیش‌بینی گرده‌افشانی کینوا و (۲) تعیین دمای کاردینال و پارامترهای طول روز برای گرده‌افشانی هست.
<b>واژه‌های کلیدی:</b> تابع دمایی، دمای مطلوب، روز بیولوژیک، فنولوژی	<b>مواد و روش‌ها:</b> آزمایش مزرعه‌ای با ۱۲ تاریخ کاشت در طی دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ بر روی سه رقم کینوا (Giz1 و Titicaca، Q12) در شهرستان گلوگاه انجام شد. آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. به منظور ثبت زمان شروع گرده‌افشانی در هر تاریخ کاشت، در هر کرت فرعی ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و علامت‌گذاری شدند. روز تا رسیدن به مرحله شروع گرده‌افشانی در زمانی که حداقل ۵۰ درصد از بوته‌ها به مرحله گرده‌افشانی رسیدند ثبت شد. برای کمی کردن مرحله گرده‌افشانی در برابر دما و طول روز از یک مدل چندگانه شامل توابع ترکیبی دما و طول روز استفاده شد. تابع دمایی به صورت دو تکه‌ای و تابع طول روز به صورت نمایی استفاده شد. مدل با رویه Proc nlin در نرم‌افزار SAS اجرا شد. برای ارزیابی دقت مدل از معیارهای جذر

واریانس خطا (RMSD)، ضریب تبیین ( $R^2$ )، مقایسه ضرایب خط ۱:۱ با ضرایب a و b و رگرسیون خطی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده و نیز ضریب همبستگی بین آن‌ها استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد مقدار RMSD در ارقام مختلف بین ۱/۶ تا ۶/۹ روز متغیر بود که هرچه مقدار آن کم‌تر باشد نشان‌دهنده کارایی بالاتر مدل است. مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) جهت توصیف رابطه سرعت گرده‌افشانی با دما و طول روز در سه رقم کینوا بالای ۰/۹۷ برآورد شد. ضریب  $R^2$  بالا نشان‌دهنده مناسب بودن مدل برای توصیف رابطه بین سرعت گرده‌افشانی با دما و طول روز است. مدل دمای پایه ارقام مختلف را بین ۱/۶ تا ۴/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد کرد، اما از لحاظ آماری بین دمای پایه این سه رقم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. دمای مطلوب برآورد شده بین ارقام مختلف ۲۲/۱ تا ۲۷/۹ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. بررسی بیش‌تر با استفاده از خطای معیار برآورد دمای مطلوب نشان داد از لحاظ دمای پایه بین ارقام اختلاف معنی‌دار وجود دارد به طوری که رقم Q12 بالاترین مقدار دمای مطلوب را به خود اختصاص داد. ضریب حساسیت به طول روز در رقم Q12، Titicaca و Giz1 به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۶۵ و ۰/۹۶ ساعت در روز برآورد شد. از لحاظ آماری بین ارقام مورد بررسی از لحاظ حساسیت به طول روز اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. روز بیولوژیک (کم‌ترین تعداد روز تا گرده‌افشانی در شرایط مطلوب دما و طول روز) برآورد شده از طریق مدل مورد استفاده برای ارقام Q12، Titicaca و Giz1 به ترتیب ۳۱/۷، ۳۲/۱ و ۳۶/۱ روز برآورد شد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد که مدل دوتکه‌ای-نمایی با توجه به مقدار پایین RMSD (کم‌تر از ۶/۹ روز) و مقادیر بالای  $R^2$  (بالای ۰/۹۷) و r (بالای ۰/۹۵) در ارقام مختلف توانسته به خوبی رابطه بین گرده‌افشانی با دما و طول روز را توصیف کند. این مدل می‌تواند برای بهینه‌سازی تصمیمات مدیریتی، تنظیم پاسخ‌های فنولوژیکی در برابر شرایط محیطی متنوع و پیش‌بینی واکنش‌های فنولوژیکی به تغییر دما و طول روز در آینده استفاده شود.

استناد: عسکری، کامیل، راحمی کاربزکی، علی، بیابانی، عباس، نخزری مقدم، علی، ترابی، بنیامین (۱۴۰۵). مدل‌سازی پاسخ گرده‌افشانی به دما و دوره نوری در ارقام مختلف کینوا. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۳۳ (۱)، ۱۵۹-۱۴۳.

DOI: 10.22069/jopp.2025.23000.3206



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

در سال‌های اخیر، کشت گیاهانی شبیه کینوا به واسطه ارزش غذایی فراوان مورد توجه زیادی قرار گرفته است (۱). کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) گیاهی دانه‌ای و یک‌ساله متعلق به خانواده آمارانتوس و تنها غذای گیاهی که شامل تمام اسیدهای آمینه ضروری، ریزمغذی‌ها و ویتامین‌ها است (که در شرایط آب و هوایی سخت و خاک‌های فقیر رشد می‌کند. داشتن تنوع ژنتیکی و انعطاف‌پذیری گسترده، اجازه سازگاری در محیط‌های مختلف را به این گیاه می‌دهد (۲).

پیش‌بینی دقیق فنولوژی برای درک پتانسیل رشد و عملکرد یک گونه گیاهی ضروری است (۳). مهم‌ترین مطالعه مورد نیاز برای این منظور، کمی کردن واکنش مراحل مختلف رشد به عوامل محیطی مانند دما، طول روز و در دسترس بودن آب است. مدت زمان گرده‌افشانی به دما و طول روز بستگی دارد (۴). واکنش گرده‌افشانی به دما به‌طور معمول بر حسب دمای پایه (Tb)، دمای مطلوب (To) و دمای سقف (Tc) خلاصه می‌شود که در اصطلاح به آن دمای کاردینال می‌گویند. در برخی از گیاهان، دمای مطلوب (To) به محدوده دمای مطلوب محدود شده بین دمای مطلوب تحتانی (To1) و فوقانی (To2) محدود می‌شود (۵، ۶، ۷، ۸، ۹). در دمای پایه و سقف، سرعت گرده‌افشانی (معکوس مدت گرده‌افشانی، در روز) صفر است، درحالی‌که در دمای مطلوب یا محدوده دمای مطلوب، سرعت گرده‌افشانی حداکثر است. سرعت گرده‌افشانی روند افزایشی بین Tb تا To یا To1 و روند کاهشی بالاتر از To یا To2 دارد (۵، ۷، ۱۰، ۱۱ و ۱۲). طول روز عامل مهمی است که بر وقوع مرحله گرده‌افشانی در بسیاری از گونه‌ها تأثیر می‌گذارد. در گیاهان روزکوتاه، گرده‌افشانی با کاهش طول روز سریع‌تر اتفاق می‌افتد درحالی‌که در گیاهان روزبلند، با افزایش طول روز سرعت گرده‌افشانی

تسریع می‌یابد. توابع واکنش گرده‌افشانی به طول روز به‌طور معمول به‌عنوان طول روز بحرانی (CPP) و حساسیت به طول روز (PPsen) تعریف می‌شود. CPP به طول روز در گیاهان روزبلند اشاره دارد که در آن و بالاتر از آن سرعت گرده‌افشانی حداکثر است. برای گیاهان روزکوتاه، CPP به‌عنوان طول روز بحرانی در آن و زیر آن تعریف می‌شود که سرعت گرده‌افشانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. PPsen یک شیب رو به کاهش سرعت گرده‌افشانی زیر CPP برای گیاهان روزکوتاه است (۵، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶). آگاهی از دماهای اصلی و پارامترهای طول روز در مرحله گرده‌افشانی برای انتخاب شرایط محیطی مناسب که در آن‌گونه یا رقم می‌تواند با موفقیت استقرار یابد و رشد کند و همچنین برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی رشد و عملکرد محصول بسیار مهم است (۵ و ۱۷). با این حال، زمانی که هدف پیش‌بینی زمان لازم برای شروع مرحله گرده‌افشانی در شرایط مختلف دما و طول روز باشد، می‌توان از مدل چندگانه استفاده کرد (۱۸). رویکرد مدل چندگانه از حداکثر سرعت نمو (معکوس حداقل زمان مورد نیاز، به‌عنوان مثال، در روز) از ضرب توابع دما و طول روز که دارای مقادیر بین ۰-۱ است، استفاده می‌کند (۵، ۷ و ۱۹).

مطالعات زیادی در مورد مدل‌سازی فنولوژی در گیاهان مختلف انجام شده است، به‌عنوان مثال در مطالعه‌ای با استفاده از تابع دوتکه‌ای-مسطح، دمای پایه برای مجموع ارقام گلرنگ معادل ۲/۵ تا ۴/۳ درجه سانتی‌گراد و دما مطلوب ۲۹ تا ۲۹/۶ درجه سانتی‌گراد گزارش شد (۷). هم‌چنین، گزارش شد که واکنش ارقام گلرنگ به طول روز از نوع روزبلند کیفی یا اجباری است با طول روز بحرانی بین ۱۳/۲ تا ۱۳/۵ ساعت در روز. در پژوهشی دیگر از معادله چندگانه برای توصیف سرعت گل‌دهی باقلا در مقابل درجه

مدل چندگانه برای پیش‌بینی گرده‌افشانی کینوا و (۲) تعیین دمای کاردینال و پارامترهای طول روز برای گرده‌افشانی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

**مشخصات محل آزمایش:** آزمایش مزرعه‌ای به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در قطعه زمینی با مختصات جغرافیایی ۵۳ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی، ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی، در شهرستان گلوگاه در شرق استان مازندران طی دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. قبل از کاشت، نمونه‌برداری خاک جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شد (جدول ۱). عامل اول سه رقم کینوا (Titicaca, Q12 و Gizl) و عامل دوم ۱۲ تاریخ کاشت خواهد بود. تیمارهای کاشت با فاصله هر ۳۰ روز (اولین تاریخ کاشت ۱۵ آذر ۱۳۹۸ و آخرین تاریخ کاشت ۱۵ آبان ۱۴۰۰) انجام شد که تاریخ کاشت‌های ۱۳۹۸/۱۰/۱۶، ۱۳۹۸/۱۱/۱۸، ۱۳۹۸/۱۲/۱۸، ۱۳۹۹/۱/۲۷، ۱۳۹۹/۲/۱۷، ۱۴۰۰/۱/۱۵، ۱۳۹۹/۱۱/۱۵، ۱۳۹۹/۱۲/۱۸، ۱۴۰۰/۲/۱۵، ۱۴۰۰/۵/۱۵ و ۱۴۰۰/۷/۱۵ به عملکرد رسید.

حرارت و طول روز استفاده شد که در این پژوهش دمای پایه برای گل‌دهی را با استفاده از تابع برتر بتا-دوتکه‌ای معادل ۱/۱ درجه سانتی‌گراد و دمای مطلوب را بین ۲۰/۶ تا ۲۸/۳ درجه سانتی‌گراد برآورد کردند (۲۰). هم‌چنین پژوهش‌گران در پژوهشی بر روی ارقام کینوا به شبیه‌سازی نمو فنولوژیک کینوا بر اساس درجه روز رشد پرداختند، بر اساس مدل فنولوژی تهیه‌شده توسط این پژوهش‌گران متوسط درجه روز رشد تا سبز شدن در تمام ارقام را حدود ۹۲/۵، درجه روز رشد تا گلدهی بین ۸۷۲/۷ در ارقام زودرس تا ۱۳۳۳/۸ در ارقام دیررس، درجه روز رشد تا رسیدگی فیزیولوژیک ۱۳۱۸ در ارقام زودرس تا ۲۵۶۶ در ارقام دیررس پیش‌بینی شد (۲۱).

به‌هرحال، اطلاعات پایه در مورد دماهای بحرانی (پایه، مطلوب و سقف) گرده‌افشانی کینوا نادر است، چنین اطلاعاتی برای واکنش به دما و طول روز در مدل‌سازی موردنیاز است. سپس می‌توان از این اطلاعات در مدل‌های گیاهان کینوا برای بسیاری از کاربردهای دیگر از جمله ارزیابی مدیریت مزرعه و انتخاب ارقام جهت بهبود عملکرد در کینوا استفاده کرد. بنابراین، هدف پژوهش حاضر: (۱) توسعه و یک

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش.

Table 1. Some of the physical and chemical characteristics of the soil at the experimental site.

کربن آلی Organic carbon (%)	EC (ms)	pH	ازت کل Total nitrogen (%)	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (ppm)	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium (ppm)	ریس Clay (%)	سیلت Silt (%)	ماسه Sand (%)	پارامترها Parameters
2	928	7.11	0.19	28.1	308.5	14	55	31	مقدار Value

بوته‌ها حداقل یک گل در هر جای بوته داشتند (۷). برای محاسبه طول روز، از روش گوادریان و وان لار (۱۹۹۴) استفاده شد (۲۲). شروع و پایان روز زمانی در نظر گرفته شد که خورشید ۴ درجه زیر افق باشد. به دلیل این است که شدت نور خورشید در طلوع و غروب نیز برای تأثیرگذاری بر واکنش به طول روز کافی است (۱۳).

**توابع و تخمین پارامترها:** در این مطالعه، فرض بر این است که گیاه کینوا از سبز شدن تا گرده‌افشانی نسبت به هر دو عامل دما و طول روز واکنش نشان می‌دهد و برای محاسبه سرعت گرده‌افشانی از دما و طول روز استفاده می‌شود. برای تعیین دماهای کاردینال و پارامترهای مربوط به طول روز و تعداد روز بیولوژیک موردنیاز برای گرده‌افشانی، از مدل چندگانه زیر استفاده شد (۷).

$$1/f = (T) f(PP) / f_0$$

در این مدل، سرعت گرده‌افشانی به نسبت  $1/f$  است،  $f(T)$  تابع دما را نشان می‌دهد،  $f(PP)$  تابع طول روز و  $f_0$  تعداد روز بیولوژیک موردنیاز برای گرده‌افشانی است. تعداد روز بیولوژیک موردنیاز برای گرده‌افشانی به معنای تعداد روزهای لازم برای گرده‌افشانی تحت شرایط بدون محدودیت دما و طول روز است، به عبارت دیگر، حداقل تعداد روزها از سبز شدن تا گرده‌افشانی. برای  $f(T)$  و  $f(PP)$  به ترتیب تابع دوتکه‌ای و نمایی در نظر گرفته شد:

$$f(T) = 1 \quad \text{اگر} \quad T = T_0$$

$$f(T) = 0 \quad \text{اگر} \quad T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$$

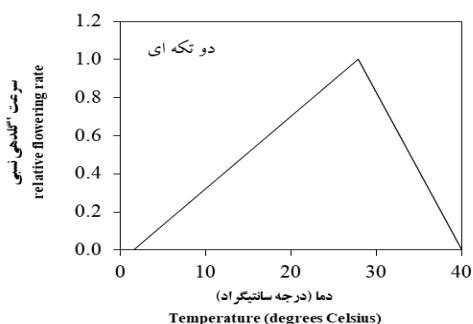
$$f(T) = \frac{T - T_b}{T_o - T_b} \quad \text{اگر} \quad T_b \leq T \leq T_o \quad \text{تابع دوتکه‌ای}$$

$$f(T) = \frac{T - T_o}{T_c - T_o} \quad \text{اگر} \quad T_o \leq T \leq T_c$$

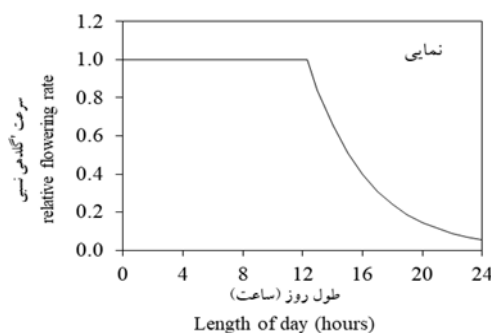
$$f(PP) = [exp(-PPsen \times (PP - CPP))] \quad \text{تابع نمایی}$$

با بررسی نتایج تجزیه و تحلیل شیمیایی خاک و با توجه به حد مطلوب عناصر فسفر و پتاسیم در خاک محل آزمایش از مصرف آن‌ها صرف نظر به عمل آمد. کود نیتروژن از منبع اوره به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، که در سه مرحله پایه، شروع مرحله ساقه جانی و غنچه‌دهی استفاده شد. هر کرت شامل پنج ردیف با طول دو متر و عرض ۵۰ سانتی‌متری در نظر گرفته شد. بین هر واحد آزمایشی یک فاصله دو متری و عمق کشت بذر نیم تا یک سانتی‌متری و تراکم ۴۰ بوته در مترمربع کشت شد. بذر کینوا از مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال کرج تهیه شد. پس از استقرار کامل گیاهچه با در نظر گرفتن فاصله پنج سانتی‌متری، بوته‌ها تنک شد. عملیات وجین، مبارزه با آفات و بیماری‌ها نیز هم‌زمان در تمام کرت‌های آزمایشی در طی مرحله رشد و نمو گیاه انجام شد. برای مبارزه با بیماری سفیدک داخلی از قارچ‌کش اوروگو سوسپانسیون ۵۲/۵ درصد (Orvego 52.5% SC) (۷۰۰ میلی‌لیتر در هکتار) و برای مبارزه با آفت شته (حشره کامل) از حشره‌کش استامی پراید (۲۵۰ سی‌سی در هکتار) استفاده شد. خسارت سایر آفات و بیماری‌ها در سطح اقتصادی نبود که مبارزه انجام شود. در این مطالعه، به منظور ثبت زمان شروع گرده‌افشانی در هر تاریخ کاشت، در هر کرت فرعی ۱۰ بوته به طور تصادفی انتخاب و علامت‌گذاری شدند. زمان لازم برای رسیدن به مرحله شروع گرده‌افشانی نیز ثبت شد، که در آن ۵۰ درصد از

گرده‌افشانی شروع به کاهش می‌کند) و ضریب حساسیت به طول روز می‌باشند (۷). شکل ۱، واکنش سرعت گرده‌افشانی در برابر دما و طول با استفاده از داده‌های رقم Q12 نشان می‌دهد.



در این توابع،  $T_c$  و  $T_o$ ،  $T_b$ ،  $T$  به ترتیب نشان‌دهنده متوسط دمای هوا، دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف می‌باشند. همچنین PP، CPP و  $PP_{sen}$  به ترتیب نشان‌دهنده طول روز، طول روز بحرانی (طول روزی که در بالاتر از آن سرعت



شکل ۱- تابع دما و طول روز مورد استفاده برای کمی کردن سرعت گرده‌افشانی در مقابل دما و طول روز با استفاده از داده‌های رقم Q12.  
**Fig. 1. Temperature and day length functions used to quantify the pollination rate versus temperature and day length using data from the Q12 cultivar.**

توصیف‌کننده رابطه بین سرعت گرده‌افشانی با دما و طول روز از معیارهای زیر استفاده شد:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum(P-O)^2}{n}}$$

۱-  $RMSD$  (جذر میانگین مربع انحراف معیار) به صورت مقابل محاسبه می‌شود: که در آن،  $P$  و  $O$  به ترتیب تعداد روزهای پیش‌بینی شده و مشاهده شده تا مرحله گرده‌افشانی می‌باشند و  $n$  تعداد مشاهدات است. مقدار کم‌تر  $RMSD$  نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل در پیش‌بینی مرحله گرده‌افشانی است.

۲- ضریب تبیین مدل ( $R^2$ )

۳- ضرایب رگرسیون خطی ساده ( $y=a+bx$ ،  $a$ ،  $b$ ) بین روزهای مشاهده شده تا گرده‌افشانی (به عنوان  $X$ ) و روزهای پیش‌بینی شده تا گرده‌افشانی (به عنوان  $Y$ ). ضرایب  $a$  و  $b$  به ترتیب نشان‌دهنده انحراف خط رگرسیون از مبدأ و انحراف خط رگرسیون از خط ۱:۱

تخمین پارامترهای مدل در این مطالعه با استفاده از روش مطلوب‌سازی تکراری<sup>۱</sup> و با استفاده از رویه PROC NLIN در نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد (۲۳). در این مطالعه دمای سقف برای مرحله گرده‌افشانی به طور ثابت ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. این امر به دلیل کم بودن دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. در روش مطلوب‌سازی تکراری، با وارد کردن مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر نهایی آن‌ها با استفاده از روش کم‌ترین توان‌های دوم تخمین زده می‌شود. مقادیر اولیه پارامترها تا زمانی تغییر می‌کنند که بهترین برآورد از پارامترها به دست آید. این فرآیند نیازمند چندین برازش هر مدل بر روی داده‌ها است. بهترین برآورد پارامترهای مدل بر اساس کم‌ترین خطاهای استاندارد ( $SE$ ) پارامترها و جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ <sup>۳</sup>) کم‌تر تجزیه رگرسیون تعیین شد. همچنین برای ارزیابی دقت مدل

- 1- Iterative optimization method
- 2- Standard Error
- 3- Root Mean Square

گلدهی برای این ارقام بین ۹۶ تا ۱۰۵ روز در تاریخ کاشت دی‌ماه متغیر بود. کمینه‌ی متوسط دمای هوا در طول دوره سبز شدن تا گلدهی برای رقم‌های مورد بررسی در تاریخ کاشت دی‌ماه با ۱۰/۴ درجه سانتی‌گراد تجربه شد. بیشینه متوسط دمای هوای تجربه‌شده در طول دوره سبز شدن تا گلدهی برای رقم Q12، ۲۸/۷ درجه سانتی‌گراد و برای ارقام Titicaca و Giz1 ۲۶/۹ درجه سانتی‌گراد در تاریخ کاشت مردادماه رخ داد. متوسط طول روز تجربه‌شده در طول دوره سبز شدن تا گلدهی نیز همانند متوسط دماهای هوا در طول دوره سبز شدن تا گلدهی متفاوت می‌باشد. حداقل طول روز تجربه‌شده در طول دوره سبز شدن تا گلدهی ارقام مورد مطالعه در تاریخ کاشت مهرماه با ۱۱/۴ ساعت در روز به دست آمد. درحالی‌که حداکثر متوسط طول روز تجربه‌شده در طول دوره سبز شدن تا گلدهی نیز برای ارقام در اردیبهشت‌ماه با ۱۵/۳ ساعت در روز حاصل شد (جدول ۲).

(خط ۴۵ درجه) هستند. اگر نقاط پیش‌بینی‌شده روی خط ۱:۱ قرار بگیرند، نشان‌دهنده عملکرد ایده‌آل مدل است. خط ۱:۱ با تقاطعی صفر ( $a=0$ )، شبیه ۴۵ درجه ( $b=1$ ) دارد.

۴- ضریب همبستگی ( $r$ ) بین روزهای مشاهده‌شده تا گرده‌افشانی و روزهای پیش‌بینی‌شده تا گرده‌افشانی. مقایسه پارامترهای تخمین زده شده (دماهای کاردینال و پارامترهای مربوط به طول روز) بین ارقام بر اساس بازه اطمینان تقریباً ۹۵ درصد آن‌ها انجام شد.

### نتایج و بحث

جدول ۲ تغییرات تعداد روز، متوسط دمای هوا و طول روز از سبز شدن تا گلدهی را برای هر رقم کینوا نشان می‌دهد. حداقل تعداد روز از سبز شدن تا گلدهی برای ارقام Q12، Titicaca و Giz1 در تاریخ کاشت مردادماه بین ۳۱ تا ۳۳ روز اتفاق افتاد (جدول ۲)، درحالی‌که حداکثر تعداد روز از سبز شدن تا

جدول ۲- حداقل، حداکثر و میانگین روز تا گلدهی، متوسط دمای هوا و طول روز در طول همین دوره در تاریخ کاشته‌ای مختلف در سه رقم کینوا در شرایط مزرعه.

**Table 2. Minimum, maximum, and average days to flowering, average air temperature, and day length during the same period in different planting dates in three quinoa cultivars in field conditions.**

رقم Cultivar	پارامترها Parameters	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Average
Q12	روز از سبز شدن تا گلدهی Day after emergence to flowering	31	98	58
	متوسط دمای هوا (°C) Average air temperature	10.4	28.7	17.8
	طول روز (ساعت در روز) Day length	11.4	15.3	13.6
Titicaca	روز از سبز شدن تا گلدهی Day after emergence to flowering	31	99	55
	متوسط دمای هوا (°C) Average air temperature	10.4	26.9	17.7
	طول روز (ساعت در روز) Day length	11.4	15.3	13.6
Giz1	روز از سبز شدن تا گلدهی Day after emergence to flowering	33	105	55
	متوسط دمای هوا (°C) Average air temperature	10.4	26.9	17.8
	طول روز (ساعت در روز) Day length	11.4	15.3	13.6

پیدا کرد. طول دوره گرده‌افشانی از ۹۷ روز به ۱۷ روز در شرایط روزهای کوتاه و دمای بالا کاهش پیدا کرد (۲۴). دابا و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند دمای بالاتر و طول روز طولانی‌تر در تسریع گرده‌افشانی توده‌های مختلف نخود مؤثر بودند. اما بین این دو عامل اثر متقابل معناداری وجود داشت. آن‌ها نشان دادند میانگین تعداد روز تا گرده‌افشانی توده‌های مختلف در روزهای بلند (۱۶ ساعت) و روزهای کوتاه (۱۰ ساعت) به ترتیب ۳۸ و ۶۱ روز بود. میانگین تعداد روز تا گرده‌افشانی توده‌های مختلف به ترتیب ۶۴، ۶۶ و ۳۷ روز در دمای ۱۶ و ۸ درجه سانتی‌گراد، ۲۰ و ۱۲ درجه سانتی‌گراد و ۲۴ و ۱۶ درجه سانتی‌گراد (روز در مقابل شب) بود (۴). لطیف و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند با افزایش طول روز و کاهش دما، طول دوره گرده‌افشانی لاین‌های مختلف برنج افزایش پیدا می‌کند (۲۵).

طول دوره گرده‌افشانی: نتایج تجزیه واریانس موجود در جدول ۳ بیانگر آن است که بین تاریخ کاشت‌ها و ارقام مختلف از نظر روز تا گلدهی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد. همچنین نتایج نشان داد اثر متقابل رقم و تاریخ کاشت اختلاف معنی‌داری دارد. مقایسه میانگین روز از کاشت تا گلدهی در تاریخ کاشت‌های مختلف نیز نشان داد که بین تاریخ کاشت‌ها از این نظر اختلاف وجود دارد (شکل ۲). طول دوره گرده‌افشانی در ارقام Q12 بین ۳۴ تا ۹۶ روز، Titicaca بین ۳۴ تا ۹۵ روز و Giz1 بین ۳۵ تا ۱۰۰ روز متغیر بود. در همه ارقام با حرکت از سمت کشت بهاره به کشت زمستانه طول دوره گرده‌افشانی افزایش یافت. تغییر در طول دوره گرده‌افشانی می‌تواند به دلیل تغییرات عوامل محیطی از جمله دما و طول روز باشد. برترو و همکاران (۱۹۹۹) نشان دادند با افزایش طول روز و کاهش دما طول دوره گرده‌افشانی در ارقام مختلف کینوا افزایش

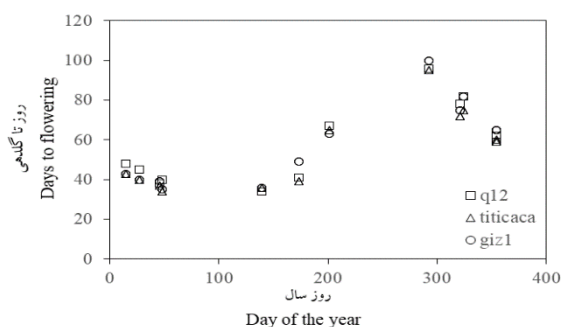
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای زمان از سبز شدن تا گلدهی.

Table 3. Results of analysis of variance (mean squares) for the time from emergence to flowering.

میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی Df	منابع تغییر S.O.V
73.5**	2	تکرار (R) Replication
3622.8**	11	تاریخ کاشت (P) Planting date
8.8	22	خطای a Error a
90.7**	2	رقم (C) Cultivar
33**	4	رقم*تکرار C × R
16**	22	رقم*تاریخ کاشت C × P
8	44	خطای b Error b
5		ضریب تغییرات (درصد) CV (%)

\* و \*\* به ترتیب تأثیر معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

\*, \*\* Significant at of 5% and 1% probability level, respectively



شکل ۲- طول دوره گرده‌افشانی در تاریخ کاشت‌های مختلف در سه رقم کینوا در شرایط مزرعه.

ارقام عبارت‌اند از: Q12، Titicaca و Giz1.

Fig. 2. The length of the pollination period at different planting dates for three quinoa cultivars in field conditions. Cultivars are: Q12, Titicaca and Giz1.

سلطانی (۲۰۰۸) دمای پایه برآورد شده توسط تابع بتا-دوتکه‌ای در مرحله گرده‌افشانی را برای سه رقم برکت، سرازیری و عراقی باقلا ۱- درجه سانتی‌گراد گزارش کردند (۲۷). هم‌چنین عجم نوروژی و همکاران (۲۰۰۸) دمای پایه برای رقم گاوی باقلا توسط مدل بتا-نمایی منفی ۱- درجه سانتی‌گراد برآورد نمودند (۲۷). سلطانی و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از مدل دندان مانند-درجه دوم دمای پایه گرده‌افشانی را برای مجموع ارقام نخود ۳/۳ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند (۵). ترابی و همکاران (۲۰۲۰) دمای پایه برای ارقام مختلف گلرنگ را بین ۲/۳ تا ۳/۴ درجه سانتی‌گراد برآورد کردند (۷).

تخمین پارامترهای مدل: مدل دمای پایه ارقام مختلف را بین ۱/۶ تا ۴/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد کرد. دمای پایه تخمین زده شده برای رقم Giz1 نسبت به دو رقم دیگر بالاتر بود، اما از لحاظ آماری بین دمای پایه این سه رقم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. مدل برای مجموع ارقام، دمای پایه را ۲/۰ درجه سانتی‌گراد برآورد کرد (جدول ۴). برترو و همکاران (۱۹۹۹) دمای پایه برای گرده‌افشانی ۹ رقم کینوا را بین ۱/۵ تا ۵/۶ درجه سانتی‌گراد برآورد کردند که با دمای پایه برآورد شده در پژوهش حاضر مطابقت دارد (۲۴). سلیم و امانگا (۲۰۰۱) دمای پایه برای گرده‌افشانی ارقام مختلف لپه هندی را بین ۵/۱ تا ۱۰/۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند (۲۶). عجم نوروژی و

جدول ۴- برآورد دمای پایه ( $T_b$ )، دمای مطلوب ( $T_o$ )، دمای سقف ( $T_c$ )، طول روز بحرانی (CPP) و ضریب حساسیت به طول روز

(PPSen) و تعداد روز بیولوژیک (fo) برای گلدهی سه رقم کینوا با S-NE.

دمای سقف به‌طور ثابت ۴۰/۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

Table 4. Estimation of base temperature ( $T_b$ ), optimal temperature ( $T_o$ ), ceiling temperature ( $T_c$ ), critical day length (CPP) and sensitivity coefficient to day length (PPSen) and the number of biological days (fo) for the flowering of three quinoa cultivars with S-NE. The ceiling temperature is fixed at 40 degrees Celsius.

fo	PPSen	CPP	$T_c$	$T_o$	$T_b$	رقم Cultivar
31.7 ± 0.98	0.025 ± 0.0434	12.3 ± 0.92	40.0	27.9 ± 0.12	1.6 ± 0.35	Q12
32.1 ± 0.77	0.096 ± 0.0872	12.3 ± 0.48	40.0	25.3 ± 0.27	2.0 ± 0.66	Titicaca
36.1 ± 1.51	0.065 ± 0.2340	12.1 ± 0.10	40.0	22.1 ± 0.67	4.2 ± 1.58	Giz1
32.4 ± 0.40	0.011 ± 0.0777	11.9 ± 0.05	40.0	26.3 ± 0.23	2.0 ± 0.53	مجموع ارقام Cultivar Total

از لحاظ آماری بین ارقام اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴). طول روز بحرانی برای مجموع ارقام ۱۱/۹ ساعت برآورد شد (جدول ۴). ضریب حساسیت به ترتیب ۰/۰۲۵، ۰/۰۶۵ و ۰/۰۹۶ ساعت در روز برآورد شد. از نظر حساسیت به طول روز بین ارقام مورد بررسی اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. برازش مدل به مجموع داده‌های به دست آمده، ضریب حساسیت به طول روز ۰/۰۱۱ ساعت در طول روز را تخمین زد (جدول ۴). عجم نوروژی و سلطانی (۲۰۰۸) طول روز بحرانی و ضریب حساسیت برای ارقام برکت، سرازیری و عراقی باقلا توسط تابع بتا-دوتکه‌ای را به ترتیب ۱۵/۸، ۱۶/۱ و ۱۴/۵ ساعت و ۰/۱۷ و ۰/۲۰ برآورد کردند. به علاوه طول روز بحرانی و ضریب حساسیت برای رقم گاوی باقلا توسط تابع بتا-نمایی منفی ۱۵/۳ ساعت و ۰/۵۶ برآورد شد (۲۷). تورپین و همکاران (۲۰۰۳) طول روز پایه و بحرانی برای گرده‌افشانی باقلا را به ترتیب ۱۲/۵ و ۱۴ ساعت گزارش نمود (۲۸). سلطانی و همکاران (۲۰۰۶) طول روز بحرانی را با استفاده از تابع دندان مانند-درجه دوم برای ارقام نخود ۲۰/۸ و ۲۲/۲ ساعت گزارش کردند. آن‌ها هم‌چنین ضریب حساسیت به طول روز را با همین تابع برای ارقام نخود ۰/۰۰۸ برآورد نمودند (۵). زو (۲۰۰۰) مقدار طول روز بحرانی ارقام آراپاهو و کارل ۹۲ گندم را به ترتیب ۹/۵ و ۷ ساعت گزارش کرد. هم‌چنین ضریب حساسیت به طول روز این ارقام را ۰/۳۴ و ۰/۱۶ برآورد نمود (۲۹). یان و والاس (۱۹۹۸) نشان دادند که طول روز بحرانی ارقام مختلف ذرت متفاوت است. آن‌ها مقدار طول روز بحرانی ذرت به عنوان یک گیاه روزکوتاه را ۱۵ ساعت گزارش کردند (۲۰). کامکار (۲۰۰۵) مقدار طول روز بحرانی گیاه ارزن را توسط مدل دوتکه‌ای ۱۲/۴۳ ساعت برآورد نمود (۳۰). فولیارد و همکاران (۲۰۰۴)

دمای مطلوب برآورد شده بین ارقام مختلف ۲۲/۱ تا ۲۷/۹ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. بررسی بیش‌تر با استفاده از خطای معیار برآورد دمای مطلوب نشان داد که از لحاظ دمای پایه بین ارقام اختلاف معنی‌دار وجود دارد. با توجه به این‌که در روش برآورد پارامترهای مدل از روش مطلوب‌سازی تکراری استفاده شده است. بنابراین انتظار این است که با هر بار اجرای مدل جهت تخمین پارامترها، برآوردهای مدل تغییر کند. با توجه به این موضوع (با وجود اختلاف معنی‌داری بین دمای مطلوب برآورد شده)، برای مجموع ارقام مدل برازش داده شد و مقدار دمای مطلوب برای مجموع ارقام ۲۶/۳ درجه سانتی‌گراد برآورد شد (جدول ۴). سلیم و امانگا (۲۰۰۱) دمای مطلوب برای گرده‌افشانی ارقام مختلف لپه هندی را بین ۲۳/۱ و ۲۶/۱ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند (۲۶). سلطانی و همکاران (۲۰۰۶) دمای مطلوب تحتانی و فوقانی برای ارقام مختلف نخود را با تابع دندان مانند-درجه دوم به ترتیب ۲۰ و ۳۳/۱ درجه سانتی‌گراد برآورد نمودند (۵). عجم نوروژی و سلطانی (۲۰۰۸) دمای مطلوب برای گرده‌افشانی ارقام برکت، سرازیری و عراقی باقلا که توسط تابع بتا-دوتکه‌ای برآورد شد به ترتیب ۲۸/۳، ۲۷/۷ و ۲۰/۶ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. به علاوه دمای مطلوب برای گرده‌افشانی رقم گاوی باقلا توسط تابع بتا-نمایی منفی ۲۴/۶ درجه سانتی‌گراد برآورد شد (۲۷). ترابی و همکاران (۲۰۲۰) دمای مطلوب برای ارقام مختلف گلرنگ را بین ۲۰/۵ تا ۲۳/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد کردند (۷). برترو و همکاران (۱۹۹۹) دمای پایه برای گرده‌افشانی ۹ رقم کینوا را بین ۱۸/۱ تا ۲۱/۱ درجه سانتی‌گراد برآورد کردند (۲۴).

برآورد پارامتر طول روز بحرانی (طول روزی که در بالاتر از آن سرعت گلدهی رو به کاهش می‌گذارد) در بین ارقام از ۱۲/۱ تا ۱۲/۳ ساعت متغیر بود اما

ارزیابی دقت مدل: جدول ۵ معیارهای ارزیابی دقت مدل دوتکه‌ای- نمایی را در برآورد پارامترهای مدل نشان می‌دهد. مقدار جذر میانگین مربع انحرافات بین روز تا گرده‌افشانی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده (RMSD) در ارقام مختلف بین ۱/۶ تا ۶/۹ روز متغیر بود. هم‌چنین مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) جهت توصیف رابطه سرعت گرده‌افشانی با دما و طول روز در سه رقم کینوا بالای ۰/۹۷ برآورد شد. ضریب  $R^2$  بالا نشان‌دهنده مناسب بودن مدل برای توصیف رابطه بین سرعت گرده‌افشانی با دما و طول روز است. برای ارزیابی کارایی برازش مدل بر داده‌های ارقام مختلف کینوا در شرایط مزرعه از خط ۱:۱ استفاده شد (شکل ۳). هرچه پراکنش این نقاط در اطراف خط ۱:۱ کم‌تر باشد نشان‌دهنده بالاتر بودن کارایی مدل می‌باشد. ضرایب رگرسیون خطی  $a$  و  $b$  بین داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد که مقدار این ضرایب از لحاظ آماری با ضرایب  $a$  و  $b$  خط ۱:۱ اختلاف ندارد. این بدین معنی است دقت مدل در پیش‌بینی زمان گرده‌افشانی در شرایط مزرعه قابل قبول بوده است. این موضوع می‌تواند با ضریب همبستگی بالا ( $r > 0/95$ ) بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده روز تا گرده‌افشانی مورد تأیید قرار گیرد (جدول ۵). برترو و همکاران (۱۹۹۹) از مدل خطی دمایی و نیز مدل خطی دما و طول روز برای کمی کردن واکنش گرده‌افشانی ارقام مختلف کینوا استفاده کردند. مدل‌های مورد استفاده آن‌ها، RMSD ۱/۷ تا ۶/۲ روز و  $R^2$  بالاتر از ۰/۸۶ را برای کمی کردن واکنش گرده‌افشانی به دما و طول را نشان داد (۲۴). ترابی و همکاران (۲۰۲۰) از مدل‌های مختلفی برای کمی کردن واکنش گرده‌افشانی به دما و طول روز در چهار رقم گلرنگ استفاده کردند. ارزیابی مدل‌های مختلف نشان داد مدل دندان مانند-دوتکه‌ای با RMSD بین ۳/۷ تا ۲۵/۹ روز، ضریب همبستگی ( $r$ ) بالای ۰/۸۸

طول روز بحرانی سورگوم را ۱۲/۷ ساعت برآورد کردند (۳۱). ترابی و همکاران (۲۰۲۰) طول روز بحرانی برای ارقام مختلف گلرنگ را بین ۱۳/۰ تا ۱۳/۴ ساعت برآورد کردند (۷). برترو و همکاران (۱۹۹۹) طول روز بحرانی برای گرده‌افشانی ۹ رقم کینوا را بین ۱۳/۳ تا ۱۴/۵ ساعت برآورد کردند (۲۴). روز بیولوژیک (کم‌ترین تعداد روز تا گرده‌افشانی در شرایط مطلوب دما و طول روز) برآورد شده از طریق مدل مورد استفاده برای ارقام Q12، Titicaca و Giz1 به ترتیب ۳۱/۷، ۳۲/۱ و ۳۶/۱ روز برآورد شد (جدول ۴). از لحاظ آماری بین ارقام از نظر تعداد روز بیولوژیک مورد نیاز برای گرده‌افشانی اختلاف وجود ندارد (جدول ۴). برازش مدل برای مجموع داده‌های ارقام، تعداد روز بیولوژیک مورد نیاز برای گرده‌افشانی را ۳۲/۴ روز برآورد کرد. برترو و همکاران (۱۹۹۹) حداقل تعداد روز لازم برای گرده‌افشانی برخی از ارقام کینوا را ۱۷ روز تخمین زدند (۲۴). این تناقض با نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به دلیل تفاوت در ماهیت ژنتیکی ارقام و هم‌چنین اثرات محیطی و اثر متقابل محیط و ژنتیک باشد. عجم نوری و سلطانی (۲۰۰۸) حداقل روز تا گرده‌افشانی در شرایط مطلوب دما و فتوپریود برای ارقام برکت، سرازیری و عراقی باقلا توسط تابع بتا-دوتکه‌ای به ترتیب ۳۰/۶، ۲۹/۲ و ۳۵/۹ روز برآورد کردند. هم‌چنین برای رقم گاوی باقلا با تابع بتا-نمایی منفی ۳۳/۱ روز گزارش کردند (۲۵). سلطانی و همکاران (۲۰۰۶) با تابع دندان مانند-درجه دوم حداقل روز تا گرده‌افشانی را برای ارقام مختلف نخود بین ۲۲/۷ تا ۳۲/۹ روز برآورد کردند (۵). ترابی و همکاران (۲۰۲۰) تعداد روز بیولوژیک برای گرده‌افشانی گلرنگ ارقام اصفهان، گلدشت و صفه توسط تابع دندان مانند-دوتکه‌ای را به ترتیب ۶۲/۹، ۵۴/۲ و ۶۱/۰ روز برآورد کردند (۷).

دوم با RMSD بین ۹/۷ تا ۲۳/۰ روز و ضریب همبستگی ( $r$ ) بالای ۰/۹۲ نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه واکنش گرده‌افشانی به دما و طول روز را بهتر توصیف کرد. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند داده‌های پیش‌بینی شده در مقابل مشاهده شده به خوبی حول خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند (۵).

نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه، واکنش گرده‌افشانی به دما و طول روز را بهتر توصیف کرد (۷). سلطانی و همکاران (۲۰۰۶) از مدل‌های مختلفی برای کمی کردن واکنش گرده‌افشانی به دما و طول روز در چهار رقم نخود استفاده کردند. ارزیابی مدل‌های مختلف نشان داد مدل دندان مانند-درجه

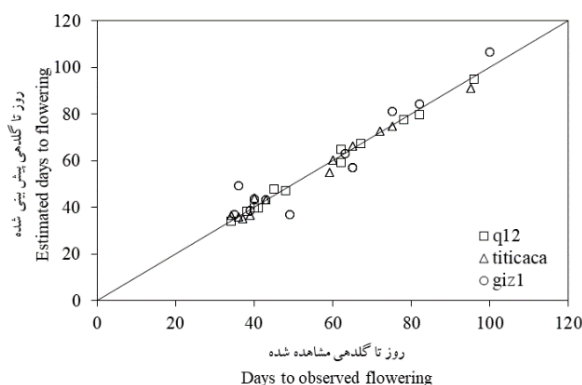
جدول ۵- جذر میانگین مربع انحرافات (RMSD) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل دوتکه‌ای- نمایی برای رابطه سرعت گلدهی با دما و طول روز در ارقام کینوا.

ضرایب رگرسیون ( $a$  و  $b$ ) و ضریب همبستگی ( $r$ ) مربوط به رابطه مقادیر روز از سبز شدن تا گلدهی مشاهده و پیش‌بینی شده ارائه شده‌اند.

**Table 5. Root Mean Square Deviation (RMSD) and the coefficient of determination ( $R^2$ ) of the bipartite-exponential model for the relationship between flowering rate to temperature and day length in quinoa cultivars.**

The regression coefficients ( $a$  and  $b$ ) and the correlation coefficient ( $r$ ) related to the relationship between observed and predicted day values from greening to flowering are also presented.

$r$	$b \pm SE$	$a \pm SE$	$R^2$	RMSD	رقم Cultivar
0.99	$0.98 \pm 0.020$	$1.2 \pm 0.84$	0.99	1.6	Q12
0.99	$0.96 \pm 0.02$	$2.2 \pm 1.14$	0.99	2.4	Titicaca
0.95	$1.01 \pm 0.058$	$-0.1 \pm 3.56$	0.97	6.9	Giz1



شکل ۳- مقادیر روز تا گلدهی پیش‌بینی شده با مدل دوتکه‌ای - نمایی در مقابل مقادیر مشاهده شده در مزرعه برای ارقام مختلف کینوا. ارقام عبارت‌اند از: Q12، Titicaca و Giz1.

**Fig. 3. Values of the days to flowering predicted by the bi-exponential model versus the values observed in the field for different quinoa cultivars. Cultivars are: Q12, Titicaca and Giz1.**

## نتیجه‌گیری

سبز شدن، گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک) نسبت به سایر پارامترهای فنولوژیک در تعیین تاریخ کاشت و تولید و توزیع ماده‌ی خشک نقش اساسی دارند، بنابراین تعیین این پارامترها در شرایط تنوع نوری و دمایی متفاوت باعث ایجاد مدل مطمئن برای کینوا شد. بنابراین از این مدل می‌توان در بهینه‌سازی تصمیمات مدیریتی مانند تاریخ کاشت، تنظیم پاسخ‌های فنولوژیکی در برابر شرایط محیطی متنوع و پیش‌بینی واکنش‌های فنولوژیکی کینوا به تغییر دما و طول روز در آینده استفاده کرد. اما با توجه به این‌که ارقام محدود بود، بنابراین بهتر است از ارقام بیشتری در تعیین این ضرایب استفاده کرد. علاوه بر این، این مدل می‌تواند به‌عنوان یک مدل فرعی در مدل‌های شبیه‌سازی محصول برای پیش‌بینی فنولوژی کینوا مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج نشان داد که مدل دوتکه‌ای-نمایی با توجه به مقدار پایین RMSD (کم‌تر از ۶/۹ روز) و مقادیر بالای  $R^2$  (بالای ۰/۹۷) و  $r$  (بالای ۰/۹۵) در ارقام مختلف توانسته به‌خوبی رابطه بین گرده‌افشانی با دما و طول روز را توصیف کند. مدل مورد استفاده دمای پایه گرده‌افشانی ارقام مختلف را بین ۱/۶ تا ۴/۲ درجه سانتی‌گراد و دمای مطلوب را بین ۲۲/۱ تا ۲۷/۹ درجه سانتی‌گراد برآورد کرد. برآورد پارامتر طول روز بحرانی بین ارقام از ۱۲/۱ تا ۱۲/۳ ساعت و ضریب حساسیت به طول روز بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۹۶ ساعت در روز متغیر بود. مدل‌های شبیه‌سازی در گیاهان زراعی از سه زیر بخش اصلی تشکیل شده است که شامل مدل‌سازی فنولوژی، شاخص سطح برگ و تولید و توزیع ماده‌ی خشک است. در بخش فنولوژی دماهای کاردینال برای مراحل فنولوژی (مانند

## منابع

- Hosseini, S. H., Rahemi Karizaki, A., Nakhzari Moghadam, A., Biabani, A., & Taliei, F. (2023). Light interception and radiation use efficiency in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Crop Science*, 63(4), 2438-2449. DOI: 10.1002/csc.2.20963.
- Abd El-Hakim, A. F., Mady, E., Abou Tahoun, A. M., Ghaly, M. S., & Eissa, M. A. (2022). Seed quality and protein classification of some quinoa varieties. *Journal of Ecological Engineering*, 23(1), 24-33. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/143866>.
- Huang, J. Z., Shrestha, A., Tollenaar, M., Deen, W., Rajcan, I., Rahimian, H., & Swanton, C. J. (2001). Effects of temperature and photoperiod on the phenological development of wild mustard (*Sinapis arvensis* L.). *Field Crops Research*, 70, 75-86. DOI: 10.1016/S0378-4290(00)00155-6.
- Daba, K., Tar'an, B., Bueckert, R., & Warkentin, T. D., (2016). Effect of temperature and photoperiod on time to pollination in chickpea. *Crop Science*, 56(1), 200-208. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.07.0445>.
- Soltani, A., Hammer, G. L., Torabi, B., Robertson, M. J., & Zeinali, E. (2006). Modeling chickpea growth and development: phenological development. *Field Crops Research*, 99, 1-13. DOI: 10.1016/j.fcr.2006.02.004.
- Torabi, B., Adibniya, M., & Rahimi, A. (2015). Seedling emergence response to temperature in safflower: measurements and modeling. *International Journal Plant Production*, 9, 393-314. doi: 10.22069/ijpp.2015.2223.
- Torabi, B., Adibnya, M., Rahimi, A., & Azari, A. (2020). Modeling pollination response to temperature and photoperiod in safflower. *Industrial Crops and Products*, 151, 112474. doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112474.

8. Torabi, B., Attarzadeh, M., & Soltani, A. (2013). Germination Response to Temperature in Different Safflower (*Carthamus tinctorius*) Cultivars. *Seed Technology*, 35, 47-59.
9. Torabi, B., Soltani, E., Archontoulis, S. V., & Rabii, A. (2016). Temperature and water potential effects on *Carthamus tinctorius* L. seed germination: measurements and modeling using hydrothermal and multiplicative approaches. *Brazilian Journal of Botany*, 39, 427-436. doi:10.1007/s40415-015-0243-x.
10. Hardegree, S. P. (2006a). Predicting germination response to temperature. I. Cardinal-temperature models and subpopulation-specific regression. *Annals of Botany*, 97, 1115-1125. doi: 10.1093/aob/mcl071.
11. Hardegree, S. P., & Winstral, A. H. (2006). Predicting germination response to temperature. II. Three-dimensional regression, statistical gridding and iterative-probit optimization using measured and interpolated-subpopulation data. *Annals of Botany*, 98, 403-410. doi:10.1093/aob/mcl112.
12. Hardegree, S. P. (2006b). Predicting germination response to temperature. III. Model validation under field-variable temperature conditions. *Annals of Botany*, 98, 827-834. doi: 10.1093/aob/mcl163.
13. Ellis, R. H., Hadley, P., Roberts, E. H., & Summerfield, R. J. (1990). Quantitative relations between temperature and crop development and growth, in: Jackson, M.T., Ford-Lloyd, B.V., Parry, M.L. (Eds.), Climatic change and plant genetic resources. London: Belhaven Press, 85-115.
14. Slafer, G. A., & Rawson, H. M. (1996). Responses to photoperiod change with phenophase and temperature during wheat development. *Field Crops Research*, 46, 1-13. doi:10.1016/0378-4290(95)00081-X.
15. Soltani, A., Torabi, B., Zeinali, E., & Sarparast, R. (2004). Response of chickpea to photoperiod as a qualitative long-day plant. *Asian Journal Plant Science*, 6, 705-708. doi:10.3923/ajps.2004.705.708.
16. Jensen, E., Robson, P., Norris, J., Cookson, A., Farrar, K., Donnison, I., & Clifton-Brown, J. (2013). Pollination induction in the bioenergy grass *Miscanthus sacchariflorus* is a quantitative short-day response, whilst delayed pollination under long days increases biomass accumulation. *Journal of experimental Botany*, 64, 541-552. doi:10.1093/jxb/ers346.
17. Mwale, S. S., Azam-Ali, S. N., Clark, J. A., Bradley, R. G., & Chatha, M. R. (1994). Effect of temperature on the germination of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Seed Science Technology*, 22, 565-571. doi: 10.1002/fsn3.1983.
18. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. CABI International. 322 p.
19. Archontoulis S. V., Miguez, F. E., & Moore, K. J. (2014). A methodology and an optimization tool to calibrate phenology of short-day species included in the APSIM PLANT model: application to soybean. *Environmental Modeling & Software*, doi:10.1016/j.envsoft.2014.04.009.
20. Yan, W., & Wallace, D. H. (1998). Simulation and prediction of plant phenology for five crops based on photoperiod×temperature interaction. *Annals of Botany*, 81, 705-716. doi:10.1006/anbo.1998.0625.
21. Eghbali, Sh., Nassiri-Mahallati, M., Jahan, M., & Salehi, M. (2023). Quinoa Phenological Development Modeling Based on Field Data. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 47-60. <https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.74969.1145>.
22. Goadriaan, J., & Van Laar, H. H. (1994). Modeling potential crop growth processes. Kluwer Academic Public, Dordrecht, the Netherlands. 54(1), 127-129.

23. SAS Institute Inc. (1989). SAS user' guide: Statics, Version 6, 4th editions, SAS Inst. Inc. Cary, N.C.
24. Bertero, H. D., King, R. W., & Hall, A. J. (1999). Modelling photoperiod and temperature responses of pollination in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) *Field Crops Research*, 63(1), 19-34. **doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00024-6.**
25. Latif, T., Haider, Z., Ramzan, M., Akhter, M., Gull, S., Mahmood, A., Riaz, A., & Khan, R. (2019). Quantifying effects of photoperiod, temperature and humidity on pollination initiation in Basmati rice lines. *American Journal of Plant Sciences*, 10, 893-903. **doi:10.4236/ajps.2019.106064.**
26. Silim, S. N., & Omanga, P. A. (2001). The response of short-duration pigeonpea lines to variation in temperature under field condition in Kenya. *Field Crops Research*, 72, 97-108. **doi:10.1016/S0378-4290(01)00167-8.**
27. Ajam-Norouzi, H., & Soltani, A. (2008). Prediction of pollination occurrence in faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15, 65-77. **doi:10.15835/nbha3915615.**
28. Turpin, L. E., Robertson, M. J., Haire, C., Bellotti, W. D., Moore, A. D., & Rose, I. (2003). Simulating faba bean development, growth and yield in Australian. *Australian Journal of Agricultural Research*. 54, 39-52. **doi:10.1071/AR02064.**
29. Xue, Q. (2000). Phenology and gas exchange in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) Ph.D. Dissertation, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln.
30. Kamkar, B. (2005). Application of a system approach for evaluation of potential yield and yield gap of cumin and three millet genus (a case study in Northern, Razavi and Southern Khorasan provinces). Ph.D. thesis. Ferdowsi Univ Mashhad, 177p.
31. Folliard, A., Traore, P. C. S., Vaksman, M. & Kouressy, M. (2004). Modeling of sorghum response to photoperiod: a threshold-hyperbolic approach. *Field Crops Research*, 89, 59-70. **doi:10.1016/j.fcr.2004.01.006.**

