



Determination of Cardinal Temperatures and Photoperiodic Response of Quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) Lines using Linear and Nonlinear Models

Shahab Eghbali Shahabad^{1*}, Mohsen Jahan^{2*}, Masoume Salehi³ and Mehdi Nassiri Mahallati⁴

Received: 26-05-2021	How to cite this article:
Revised: 10-10-2021	Eghbali Shahabad, Sh., Jahan, M., Salehi, M., & Nassiri Mahallati, M. (2023).
Accepted: 11-10-2021	Determination of cardinal temperatures and photoperiodic response of Quinoa (<i>Chenopodium quinoa</i> L.) lines using linear and nonlinear models. <i>Journal of Agroecology</i> . 15(1), 191-208.
Available Online: 11-10-2021	DOI: 10.22067/agry.2021.69386.1036

Introduction

The length of the growth period is the key to crop adaptation to new environments. It is strongly affected by the environment in such a way that it is possible to predict the length of the growing period based on some correlations with environmental factors. Simple models that quantify intraspecific variability in flowering responses to temperature and photoperiod can be useful for characterizing lines. Quinoa (*Chenopodium quinoa*) shows considerable resistance to a wide range of abiotic stresses. Cardinal temperatures and day length at each developmental stage are necessary to find an appropriate model for predicting plant growth and development.

Materials and Methods

Ten separate experiments (10 planting dates included: 29 March, 29 April, 28 May, 28 June, 26 July, 23 August, 6 September, 20 September, 29 January, and 29 February) were conducted as randomized complete block design with three replications. The experimental factor consisted of five quinoa lines plus one cultivar (Titikaka). Five promising lines were modified at Yazd Salinity Research Center. Four lines belong to the middle maturing group, one to the late maturing group, and the Titikaka cultivar belongs to early maturing group. The time of beginning and end of each developmental stage, including germination, pollination, and seed maturity, was recorded. The response of developmental stages to temperature and photoperiod was used to determine the cardinal temperature and day length of the main developmental stages (emergence, flowering, and seed maturity).

Results and Discussion

Based on the coefficient of determination (R^2) it seems that the quadratic model is suitable for estimating the cardinal temperatures of germination, flowering, and ripening of quinoa seeds. Using both quadratic and segmented models to estimate the length of special days resulted to satisfactory robustness. The results showed that on days with a length of lesser than 12 hours and temperatures lesser than 30°C, the flowering rate increased with a simultaneous increase of temperature and day length. As the day length increased to 14 hours, the rate of flowering development changed more significantly when temperatures were between 19 and 25°C than at temperatures below 19°C. For all lines, increasing the day length or temperature resulting in an increased plant maturation rate (from flowering to seed maturity) at a constant temperature or day length. The optimal temperature range for all developmental stages of quinoa lines was between 20 and 25°C. There was a significant difference in the base

1- Ph.D. Student in Agroecology, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

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

3- Assistant Professor of Iranian National Salinity Research Center, Yazd, Iran.

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

(*- Corresponding author's Email: sh_weed@yahoo.com)

temperatures of the developmental stages. The base temperature for germination of quinoa lines was above 0°C, the base temperature for flowering was between -2 and +2°C, and the base temperature for seed maturity was below 0°C. The maximum temperature of all quinoa developmental stages was above 40°C (42-51°C). At low temperatures, the flowering stage was more sensitive than the seed ripening stage. The critical day length for flowering and seed ripening of quinoa lines was between 11.5 to 12 hours.

Conclusions

The optimum temperature range for germination was obtained by 25-34°C, for flowering by 28-21°C, and for seed ripening by 15-32°C. The optimum temperature of all developmental stages of quinoa lines was between 20 and 25°C. The optimum day length range for flowering is estimated at 11.37-34.12 hours and for seed ripening by 10.58-12.3 hours. Using the segmented and quadratic models to estimate quinoa cardinal temperature and photoperiod response resulted in the same estimations, although in most values, the quadratic model showed a higher coefficient of determination. In general, the results indicated that the temperature and day length have a compensatory effect on the flowering rate and seed ripening stages of the studied lines.

Keywords: Cardinal temperatures, Day length, Environmental factors, Modeling, Thermal time



مقاله پژوهشی

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص ۱۹۱-۲۰۸

تعیین دماهای کاردینال و واکنش فتوپریودی مراحل مختلف نموی لاین های کینوا
(*Chenopodium quinoa* L.) با استفاده از مدل های خطی و غیر خطی

شهاب اقبالی شاه آباد^۱، محسن جهان^{۲*}، معصومه صالحی^۳ و مهدی نصیری محلاتی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹

چکیده

کینوا با نام علمی (*Chenopodium quinoa* L.) گیاهی یک ساله، از خانواده کتوبودیاسه و روز کوتاه است که به دلیل برخی ویژگی های خاص خود از جمله مقاومت قابل ملاحظه در برابر طیف وسیعی از تنش های غیرزنده، مورد توجه قرار گرفته است. دماهای ویژه و طول روزهای ویژه هر مرحله نموی برای ارائه مدل مناسب پیش بینی رشد و نمو گیاهی لازم است. در سال های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ آزمایش های مستقلی شامل ۱۰ تاریخ کاشت در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در شهر یزد انجام شد. تیمار آزمایشی شامل پنج لاین امیدبخش اصلاح شده در مرکز تحقیقات شوری یزد به همراه رقم تی تی کاکا بود. از واکنش سرعت مراحل نموی به دما و طول روز برای تعیین درجه حرارت ویژه و طول روزهای ویژه مراحل نموی اصلی (سبز شدن، گل دهی و رسیدگی دانه) استفاده شد. برای همه لاین ها، دمای پایه (T_b) جوانه زنی بذر کینوا ۰/۲ تا ۳/۵۷ درجه سانتی گراد، دامنه دمایی بهینه برای جوانه زنی ۲۵-۳۴ درجه سانتی گراد، گل دهی ۲۸-۲۱ درجه سانتی گراد و رسیدگی دانه ۳۲-۱۵ درجه سانتی گراد بود. دامنه طول روز برای گل دهی ۱۲/۴-۱۱/۴ ساعت و رسیدگی دانه ۱۲/۳-۱۰/۶ ساعت بود. دامنه دمای بهینه برای سه مرحله جوانه زنی، گل دهی و رسیدگی دانه تمام لاین های مورد مطالعه، بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی گراد برآورد شد. نتایج نشان داد که در طول روزهای کمتر از ۱۲ ساعت و دماهای کمتر از ۳۰ درجه سانتی گراد، با افزایش هم زمان دما و طول روز سرعت گل دهی بیشتر شد. به طور کلی، نتایج نشان داد که دما و طول روز اثر جبران کنندگی بر سرعت گل دهی و رسیدگی دانه دارند.

واژه های کلیدی: دماهای ویژه، زمان حرارتی، طول روز ویژه، عوامل محیطی، مدل سازی

- ۱- دانشجوی سابق دکتری اگرواکولوژی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
 - ۲- دانشیار گروه اگرواکولوژی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
 - ۳- استادیار مرکز ملی تحقیقات شوری یزد، ایران.
 - ۴- استاد گروه اگرواکولوژی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- (*)- نویسنده مسئول: (Email: sh_weed@yahoo.com)

مقدمه

نمو عبارت است از تغییرات کیفی که گیاه را به سوی رسیدگی هدایت می‌کند. تحت شرایط فاریاب، تنها عناصر اقلیمی قادر به تغییر رشد و نمو گیاه هستند. مراحل نمو فنولوژیک در گیاهان زراعی تحت تأثیر دما، فتوپریود و بهاره‌سازی قرار می‌گیرند. در گیاهان زراعی سردادوست مانند گندم (*Triticum aestivum*) و کلزا (*Brassica napus*) مراحل نمو گیاه تحت تأثیر هر سه عامل قرار می‌گیرند و در گیاهان گرمادوست مراحل نمو به‌طور عمده تحت تأثیر دما و فتوپریود می‌باشند (Soltani et al., 2006).

دما یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سرعت نمو، رشد و عملکرد گیاهان زراعی می‌باشد. وقوع دماهای بالا و پایین می‌تواند اثرهای مضر بر نمو گیاهان داشته باشد. دماهای بالا نمو گیاه را سرعت می‌بخشد، طول دوره رشد را کاهش می‌دهد و پتانسیل عملکرد را کم می‌کند. وقوع دمای بالا طی گل‌دهی طول دوره آزادسازی و بقای دانه گرده و زمان دریافت دانه گرده توسط گل را کوتاه می‌کند. بنابراین، توانایی گیاه برای تطبیق مراحل حساس نمو با شرایط عدم تنش در طی فصل رشد می‌تواند سبب فرار گیاه از تنش‌های محیطی طی فصل رشد شود (Bunce, 2018; Hinojosa et al., 2019). تاریخ کاشت یک ابزار مدیریتی مهم در به حداقل رساندن جنبه‌های منفی دمای بالا و تنش رطوبت در طی گل‌دهی و پر شدن دانه گیاهان است و تأخیر در کاشت می‌تواند سبب کاهش عملکرد دانه شود (Hirich et al., 2014). واکنش نمو گیاهان حساس به فتوپریود در طول روز معینی آغاز می‌شود و در طول روز معینی به حداکثر می‌رسد، در دامنه بین این دو طول‌روز، تغییر طول‌روز بر نمو گیاه مؤثر است و سبب تسریع نمو (گیاهان روزبلند نظیر گندم و کلزا) یا تأخیر آن (گیاهان روزکوتاه مانند سویا (*Glycine max*) و آفتابگردان (*Helianthus annuus*)) می‌شود. در بیشتر گونه‌های گیاهی مانند گندم و جو (*Hordeum vulgare*) دوره بین سبز شدن تا شروع گل‌دهی علاوه بر دما تحت تأثیر فتوپریود نیز قرار می‌گیرد. فتوپریودهای پایه و سقف در عرض‌های جغرافیایی مختلف باهم تفاوت دارند که علت آن اختلاف محدوده فتوپریودها و تفاوت‌های ژنوتیپی بیان شده است (Gonzalez et al., 2009).

درجه حرارت کمینه یا پایه (T_b) کمترین درجه حرارتی است که برای ظهور هر مرحله نمو نیاز است. درجه حرارت بهینه (T_o) درجه

حرارتی است که هر مرحله نمو در آن بیشترین سرعت را داشته و درجه حرارت بیشینه (T_m) بالاترین درجه حرارتی است که هر مرحله نمو در آن قادر به عبور است. این سه درجه حرارت پایه، بهینه و بیشینه به‌عنوان درجه حرارت‌های ویژه (کاردینال) نمو شناخته می‌شود. دماهای ویژه عموماً بستگی به دامنه سازگاری محیطی یک گونه دارد و تطابق زمان نمو هر مرحله با شرایط مطلوب برای انتقال به مراحل بعدی نمو لازم است. مراحل نمو عمدتاً در گیاهان شامل جوانه‌زنی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک می‌باشد (Bertero et al., 1999a). دماهای ویژه هر مرحله نمو برای ارائه مدل مناسب پیش‌بینی رشد و نمو گیاهی لازم است. همچنین برخی منابع از طول‌روزهای پایه، بهینه و سقف به‌عنوان طول‌روزهای ویژه در مدل‌سازی نمو گیاهان نام برده‌اند (Bertero et al., 1999b).

کینوا با نام علمی (*Chenopodium quinoa*)، مقاومت قابل ملاحظه‌ای در برابر طیف وسیعی از تنش‌های غیرزنده از قبیل سرما، شوری و خشکی از خود نشان می‌دهد و همچنین به‌خوبی قابلیت رشد در خاک‌های فقیر و حاشیه‌ای را دارد (Nanduri et al., 2019; Karina et al., 2014; Garcia et al., 2020; Adolf et al., 2013). به‌دلیل کیفیت بالای دانه‌های کینوا و پتانسیل تولیدی بالای آن در شرایط سخت، در بیشتر مناطق جهان مورد کشت و کار قرار می‌گیرد (FAO, 2011).

آگاهی از واکنش نمو ارقام و لاین‌های کینوا به شرایط محیطی مختلف با تعیین دماها و طول‌روزهای ویژه، به‌منظور مدل‌سازی نمو فنولوژیک آن‌ها ضروری است. با توجه به اینکه ارقام و لاین‌های سازگار به شرایط خاص، دارای واکنش مشابهی به عوامل محیطی متفاوت هستند و می‌توان از مدل‌های ارائه شده در زمینه واکنش نمو کینوا به شرایط محیطی برای ارقام و لاین‌های مشابه نیز استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه‌ای با طول و عرض جغرافیایی $31^{\circ}55'$ و $54^{\circ}21'$ و در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در شهر یزد اجرا شد. قالب آزمایش طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود زیرا آزمایش‌ها در زمان‌های متفاوت اجرا و برای هر تاریخ کاشت زمین انتخابی جداگانه در نظر گرفته شد. تیمار آزمایشی شامل پنج لاین امید بخش اصلاح شده در مرکز تحقیقات شوری یزد به‌همراه رقم تی‌تی‌کاکا بود.

$$Y = a + bx \quad \text{معادله (۴)}$$

$$Y = a - bx$$

$$Y = \text{if } (T - T_o, \text{ region1 } (T), \text{ region2 } (T))$$

$$\text{Region1 } (T) = b (T - T_b)$$

$$\text{Region2 } (T) = C (T_m - T)$$

معادله (۵)

$$Y = a + bT + CT^2 \quad T_o = b + 2CT \quad Y = Y = a + bx + cx^2$$

$$Y = a + bx + cx^2 + dy + ey^2 \quad \text{معادله (۶)}$$

که در این معادلات، R: سرعت رسیدن به هر مرحله نمو، N: تعداد روز لازم تا هر مرحله نمو، R_{max} : حداکثر سرعت رسیدن به هر مرحله نمو، D_{min} : حداقل تعداد روز تا هر مرحله نمو، $F(T)$: تابع دمایی، Y: سرعت نمو، T: درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)، T_b : درجه حرارت کمینه، T_o : درجه حرارت بهینه، T_m : درجه حرارت بیشینه، همچنین a, b, c, d, e به‌عنوان ضرایب رگرسیون در نظر گرفته می‌شود.

برای محاسبه طول‌روز از روش کسلینگ استفاده شد (Keisling, 1982). داده‌های هواشناسی از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل کشت تهیه شد. برازش داده‌ها و رسم نمودارها با نرم‌افزار MS-Excel و SlideWrite 2.0 انجام شد.

نتایج و بحث

تعیین دماهای کاردینال مراحل نمو

سرعت جوانه‌زنی نسبت به سایر شاخص‌ها، حساسیت بیشتری به دما دارد (Javadzadeh et al., 2017)؛ بنابراین از واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما برای تعیین درجه حرارت ویژه یا دمای کاردینال جوانه‌زنی استفاده می‌شود. برای این منظور دو مدل تکه‌ای Segmented و چند جمله‌ای درجه دو Quadratic به داده‌ها برازش داده شدند (شکل ۱). بر اساس مدل تکه‌ای و درجه‌دو، دمای پایه جوانه‌زنی بذر کینوا (T_b) برای همه لاین‌ها ۰/۲ تا ۳/۶ درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه جوانه‌زنی بذر (T_o) ۲۵/۱ تا ۳۰/۳ درجه سانتی‌گراد و دمای بیشینه جوانه‌زنی بذر (T_m) ۴۶/۷ تا ۴۶/۸ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد (جدول ۲). دماهای ویژه جوانه‌زنی بذر برای کینوا در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد (Mamedi et al., 2017) که دمای پایه جوانه‌زنی بذر کینوا (T_b) ۱ تا ۳/۳ درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه جوانه‌زنی بذر (T_o) ۲۶ تا ۳۴ درجه سانتی‌گراد و دمای بیشینه جوانه‌زنی بذر (T_m) ۴۴ تا ۵۴ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند.

لاین‌ها شامل چهار لاین متوسط‌طرس که در این آزمایش با شماره‌های ۱ (NSRCQE)، ۲ (NSRCQC)، ۳ (NSRCQD) و ۶ (NSRCQA)، یک لاین دیررس که با شماره ۴ (NSRCQB) و رقم زودرس تی‌تی‌کاکا^۱ که با شماره ۵ مشخص شد، بود. تاریخ‌های کاشت الزاماً نشان‌دهنده تاریخ‌های کاشت متداول نیستند، بلکه به‌منظور ایجاد رژیم‌های مختلف دمایی و فتوپریودی انتخاب شدند (Soltani et al., 2006). با توجه به اینکه آزمایش‌ها در زمان‌های متفاوت اجرا شد و برای هر تاریخ کاشت زمین انتخابی در نظر گرفته و نه تصادفی، بنابراین طرح آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصافی آنالیز شد. بعد از آماده‌سازی زمین، کاشت به‌صورت دستی در کرت‌هایی به ابعاد ۳×۳ متر و بر اساس تاریخ کاشت‌های جدول ۱ انجام شد. کرت‌ها با پشته‌هایی به عرض یک متر از هم جدا شدند. داخل هر کرت شش ردیف کاشت به فاصله نیم متر از هم در نظر گرفته شد. بعد از سبز شدن، تراکم بوته به ۶۴ بوته در مترمربع رسید. آبیاری کرت‌ها به‌صورت غرقابی بود که در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد هر هفت روز یک‌بار و در سایر ماه‌ها هر ۱۲ روز یک‌بار کرت‌ها آبیاری شد. کودهای تیمارها شامل مصرف کود اوره به‌صورت سرک و به‌مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، در زمان تشکیل گل‌آذین برای تمام تیمارها اعمال شد. مدیریت آفات برحسب نیاز، عمدتاً در ماه‌های اردیبهشت و خرداد سم‌پاشی بر علیه آفت کرم برگ‌خوار و سنک با سم کلروپریفوس انجام شد. نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد. عمل نمونه‌گیری مراحل فنولوژیک، مشاهده بوته‌های دو ردیف از وسط هر کرت در طول دو متر بود. ملاک عمل یادداشت‌برداری هر مرحله از نمو (سبز شدن، گل‌دهی و تغییر رنگ بوته‌ها)، ۵۰ درصد بوته‌های مورد بررسی بود. فاصله زمانی از کاشت تا هر مرحله نمو شامل سبز شدن (مشاهده دو برگ حقیقی در سطح خاک)، گرده‌افشانی (ظهور گرده‌های زردرنگ روی سطح گل‌آذین) و رسیدگی دانه (تغییر رنگ گل‌آذین‌ها و برگ‌ها) ثبت شد. پس از محاسبه روز تا هر یک از مراحل فنولوژی، از معادله‌های ۱ تا ۶ برای محاسبه سرعت نمو، دماها و طول روزهای ویژه هر مرحله نمو هر لاین استفاده شد.

$$R = 1/N \quad \text{معادله (۱)}$$

$$R_{max} = 1/D_{min} \quad \text{معادله (۲)}$$

$$F(T) = R/R_{max} \quad \text{معادله (۳)}$$

جدول ۱- تاریخ‌های کاشت و شرایط اقلیمی محل آزمایش

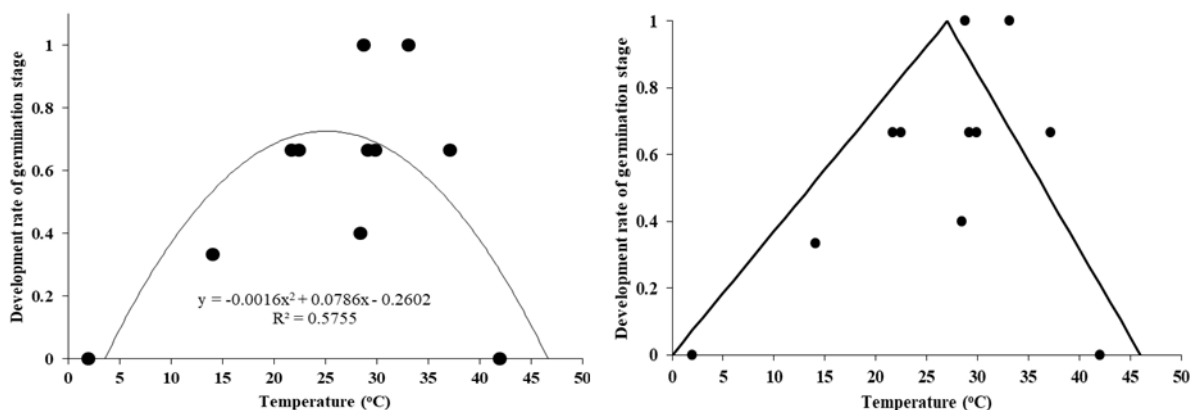
Table1- Planting dates and climatic conditions of the study site

منابع Resources	فروردین March	اردیبهشت April	خرداد May	تیر June	مرداد July	اول شهریور August	نیمه شهریور September	مهر September	بهمن January	اسفند February
تاریخ کاشت Date of planting	29	29	28	28	26	23	6	20	29	29
میانگین دماهای حداقل Average minimum temperatures	12.9	17.2	22.47	28.7	27.7	21.5	21.5	18	2.8	7.9
میانگین دماهای حداکثر Average maximum temperatures	25.1	29.69	36.19	41.9	39.9	36.7	36.7	32	15.8	21.9
میانگین دما Average temperatures	19	23.36	29.33	35.3	33.8	29.1	29.1	25	9.3	14.9
میانگین طول روز Average day length	12.47	13.37	13.95	13.9	13.3	12.4	12.4	11.44	10.65	11.5

جدول ۲- برآورد دماهای ویژه جوانه‌زنی لاین‌های کینوا

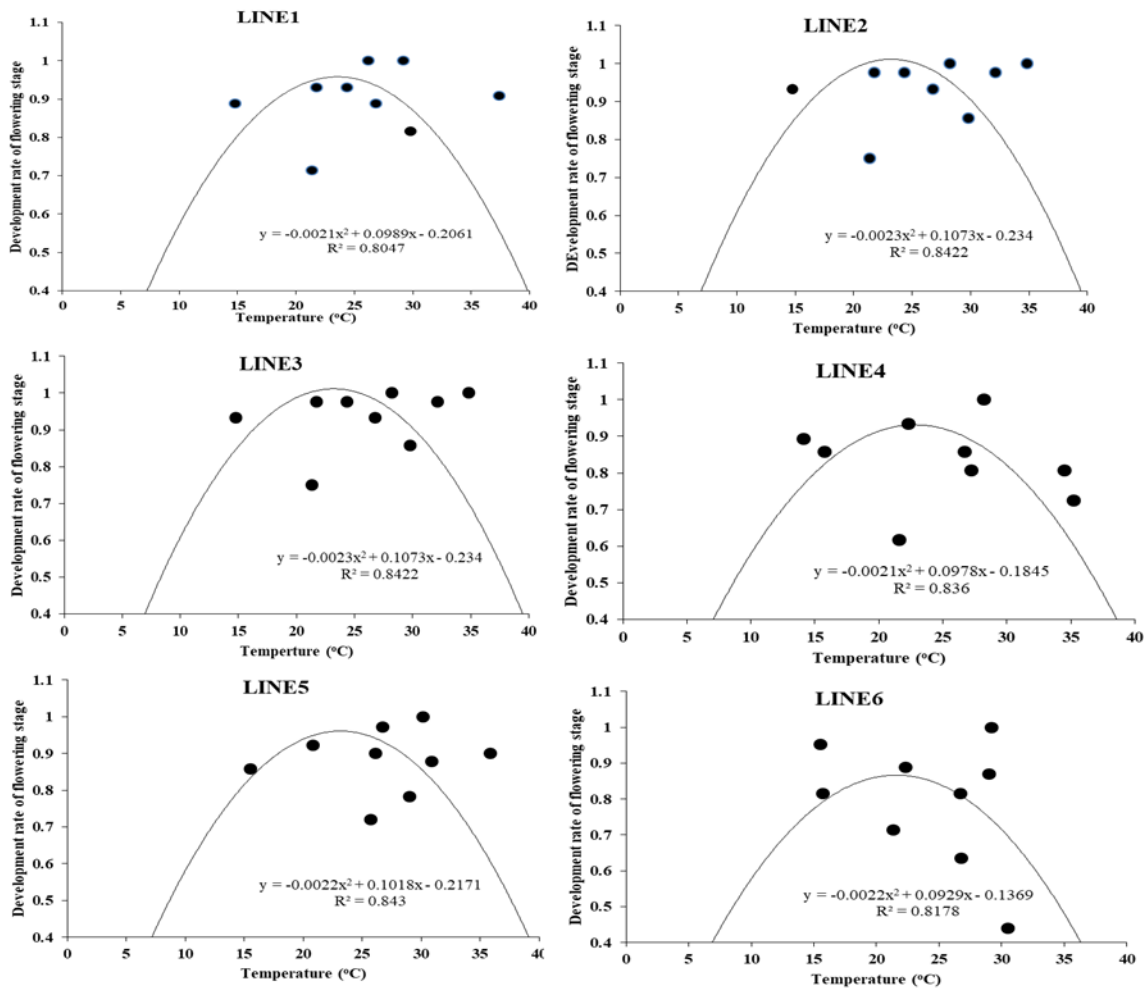
Table2- Estimation of cardinal temperatures of germination of quinoa lines

مرحله جوانه‌زنی Germination stage	دمای پایه T _b (°C)	دمای بهینه T _o (°C)	دمای بیشینه T _m (°C)	ضریب تبیین R ²
مدل درجه‌دو Quadratic model	3.6	25.1	46.7	0.57
مدل تکه‌ای Segmented model	0	30.3	46.8	0.65



شکل ۱- رابطه دما و سرعت جوانه‌زنی لاین‌های کینوا، برازش داده شده با مدل درجه‌دو و تکه‌ای

Fig. 1- Relationship between temperature and germination rate of quinoa lines using segmented and quadratic models



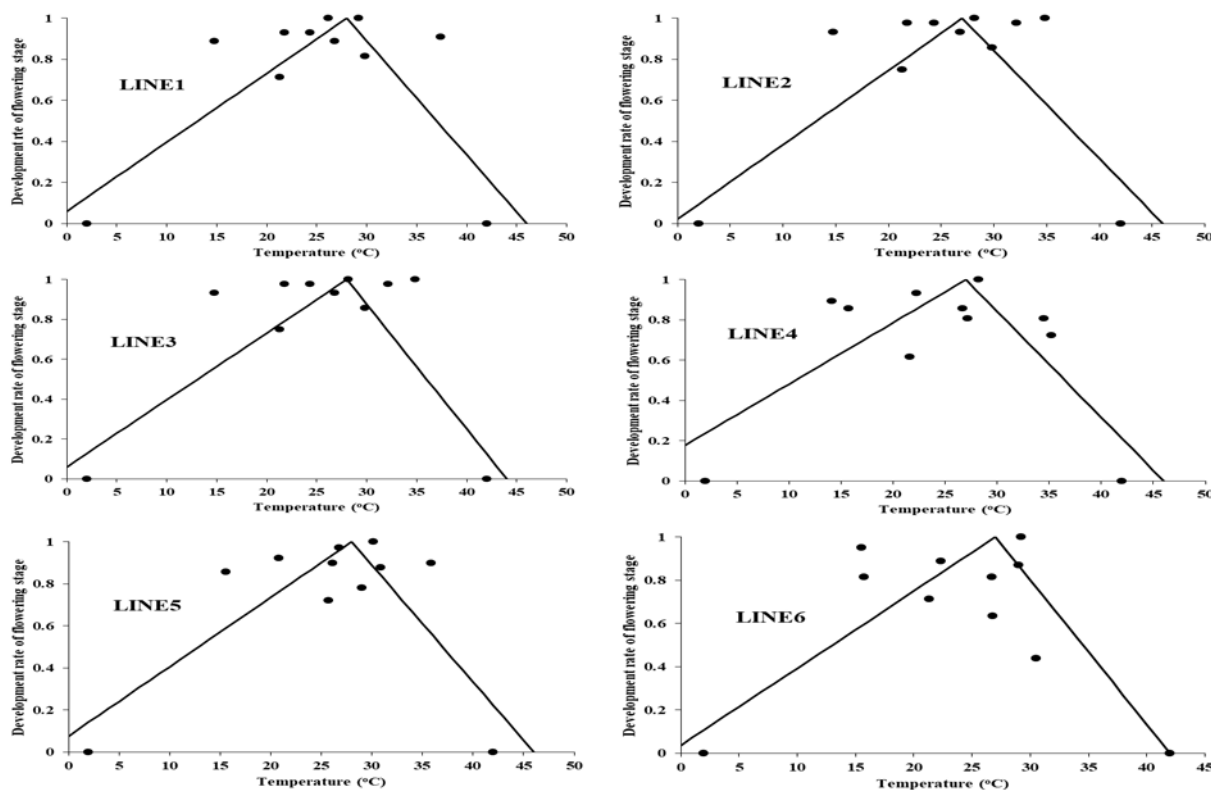
شکل ۲- رابطه دما و سرعت گل‌دهی لاین‌های کینوا برآزش داده شده با مدل درجه‌دو

Fig. 2- Relationship between temperature and flowering rate of quinoa lines using the quadratic model

جدول ۳- برآورد دماهای ویژه گل‌دهی لاین‌های کینوا با استفاده از مدل‌های درجه‌دو و تکه‌ای

Table 3- Estimation of cardinal flowering temperatures of quinoa lines using the quadratic model and segmented model

	لاین Line	دمای پایه T_b (°C)	دمای بهینه T_o (°C)	دمای بیشینه T_m (°C)	ضریب تبیین R^2
مدل درجه‌دو Quadratic model	1	2.2	23.5	44.9	0.8
	2	2.3	23.2	44.1	0.84
	3	2.3	23.2	44.1	0.84
	4	2	22.8	43.7	0.84
	5	2.2	23.1	44	0.84
	6	1.5	21.6	41.7	0.82
مدل تکه‌ای Segmented model	1	-1.8	28	46.1	0.8
	2	-0.6	26.5	45.9	0.81
	3	-1.8	28.2	44.6	0.78
	4	-5.9	26.9	46.2	0.6
	5	-2.3	27.9	45.7	0.73
	6	-0.9	23.5	42.4	0.74



شکل ۳- رابطه دما و سرعت گل‌دهی لاین‌های کینوا برآزش داده شده با تابع دو تکه‌ای

Fig. 3- Relationship between temperature and flowering rate of quinoa lines using the segmented model

لاین‌ها نیاز داشتند (جدول ۳). سایر محققین دمای پایه گل‌دهی کینوا را بین یک تا سه درجه سانتی‌گراد گزارش کردند (Bertero et al., 1999a).

درجه حرارت رسیدگی دانه لاین‌های کینوا با استفاده از دو مدل تکه‌ای و درجه‌دو تعیین شد (شکل‌های ۴ و ۵).

بر اساس مدل درجه‌دو، درجه حرارت‌های ویژه رسیدگی دانه لاین‌های کینوا شامل دمای پایه رسیدگی دانه (T_b) بین $-2/8$ تا $0/5$ درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه رسیدگی دانه (T_o) بین $15/2$ تا $23/1$ درجه سانتی‌گراد و دمای بیشینه رسیدگی دانه (T_m) بین $33/2$ تا $45/7$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد (جدول ۴). بر اساس مدل تکه‌ای، درجه حرارت‌های ویژه رسیدگی دانه لاین‌های کینوا شامل دمای پایه رسیدگی دانه (T_b) بین $-2/9$ تا -8 درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه رسیدگی دانه (T_o) بین $17/7$ تا $32/7$ درجه سانتی‌گراد و دمای بیشینه رسیدگی دانه (T_m) بین 43 تا $51/4$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد (جدول ۴). بر اساس محاسبه انجام شده توسط هر دو مدل، لاین ۶ دمای ویژه رسیدگی دانه کمتر و رقم زودرس ۵ دمای ویژه

درجه حرارت ویژه گل‌دهی لاین‌های کینوا با استفاده از دو مدل تکه‌ای (خطوط متقاطع) و درجه‌دو برآزش داده شدند (شکل‌های ۲ و ۳).

بر اساس مدل چندجمله‌ای درجه‌دو، درجه حرارت‌های ویژه گل‌دهی لاین‌های کینوا شامل دمای پایه گل‌دهی (T_b) بین $1/5$ تا $2/3$ درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه گل‌دهی (T_o) بین $21/6$ تا $23/5$ درجه سانتی‌گراد و دمای بیشینه گل‌دهی (T_m) بین $41/7$ تا $44/9$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد (جدول ۳). بر اساس مدل خطوط متقاطع، درجه حرارت‌های ویژه گل‌دهی لاین‌های کینوا شامل دمای پایه گل‌دهی (T_b) بین $-0/9$ تا $-5/9$ درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه گل‌دهی (T_o) بین $23/5$ تا $28/2$ درجه سانتی‌گراد و دمای بیشینه گل‌دهی (T_m) بین $42/4$ تا $46/2$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد (جدول ۳). بر اساس هر دو مدل، لاین ۶ دمای بهینه گل‌دهی کمتر و لاین‌های متوسط‌رس ۱، ۲ و ۳ دمای بهینه گل‌دهی بیشتر از سایر لاین‌ها نیاز داشتند؛ همچنین لاین دیررس ۴ دمای پایه گل‌دهی کمتر و لاین‌های متوسط‌رس ۲ و ۶ دمای پایه گل‌دهی بیشتر از سایر

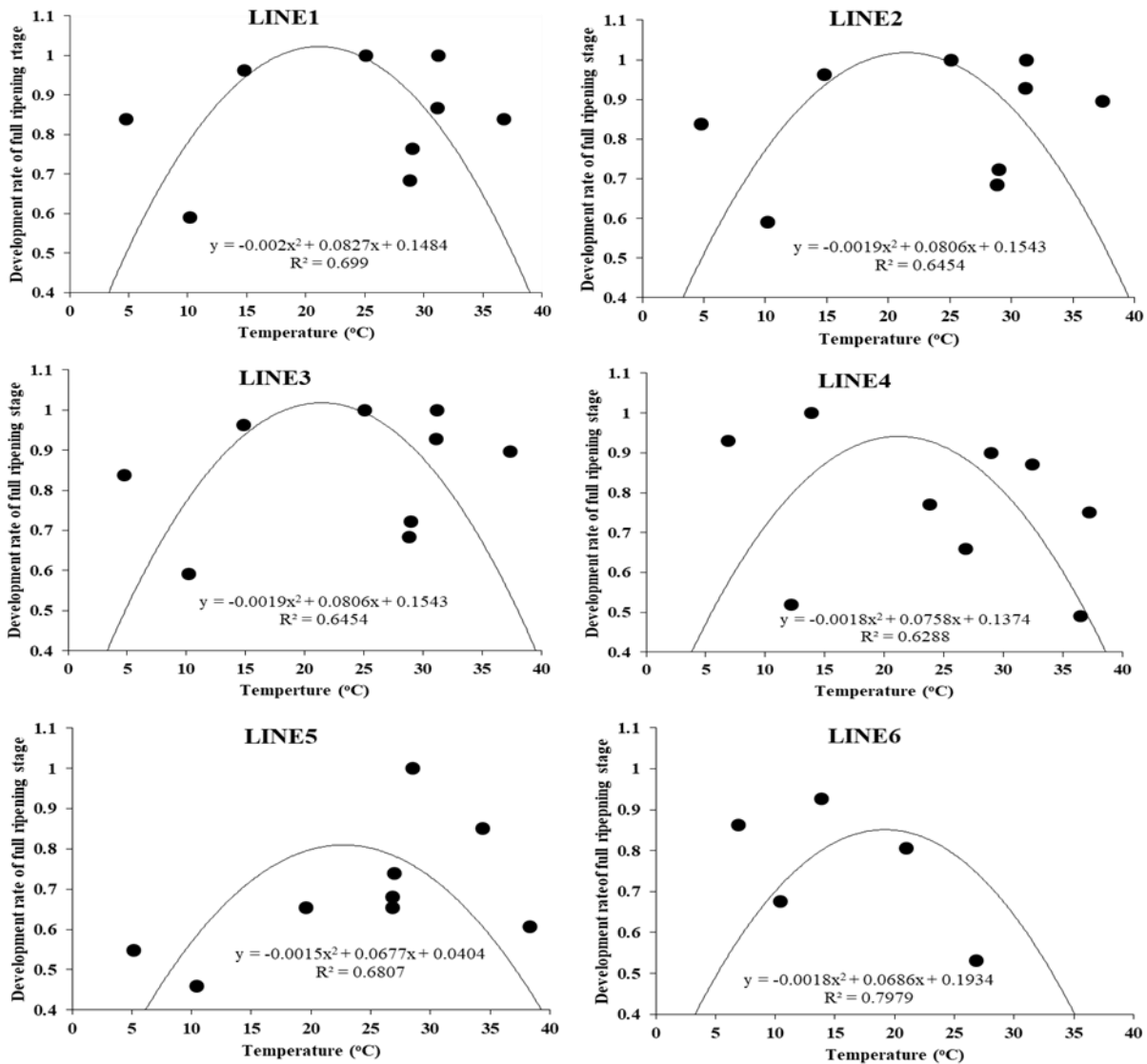
و ۴). به نظر می‌رسد که تفاوت حاصله ناشی از ساختار ریاضی مدل‌ها در تخمین پارامترهای مدل باشد.

واکنش به طول‌روز

طول روز گل‌دهی لاین‌های کینوا با استفاده از دو مدل تک‌های و درجه‌دو تعیین شدند (شکل‌های ۶ و ۷).

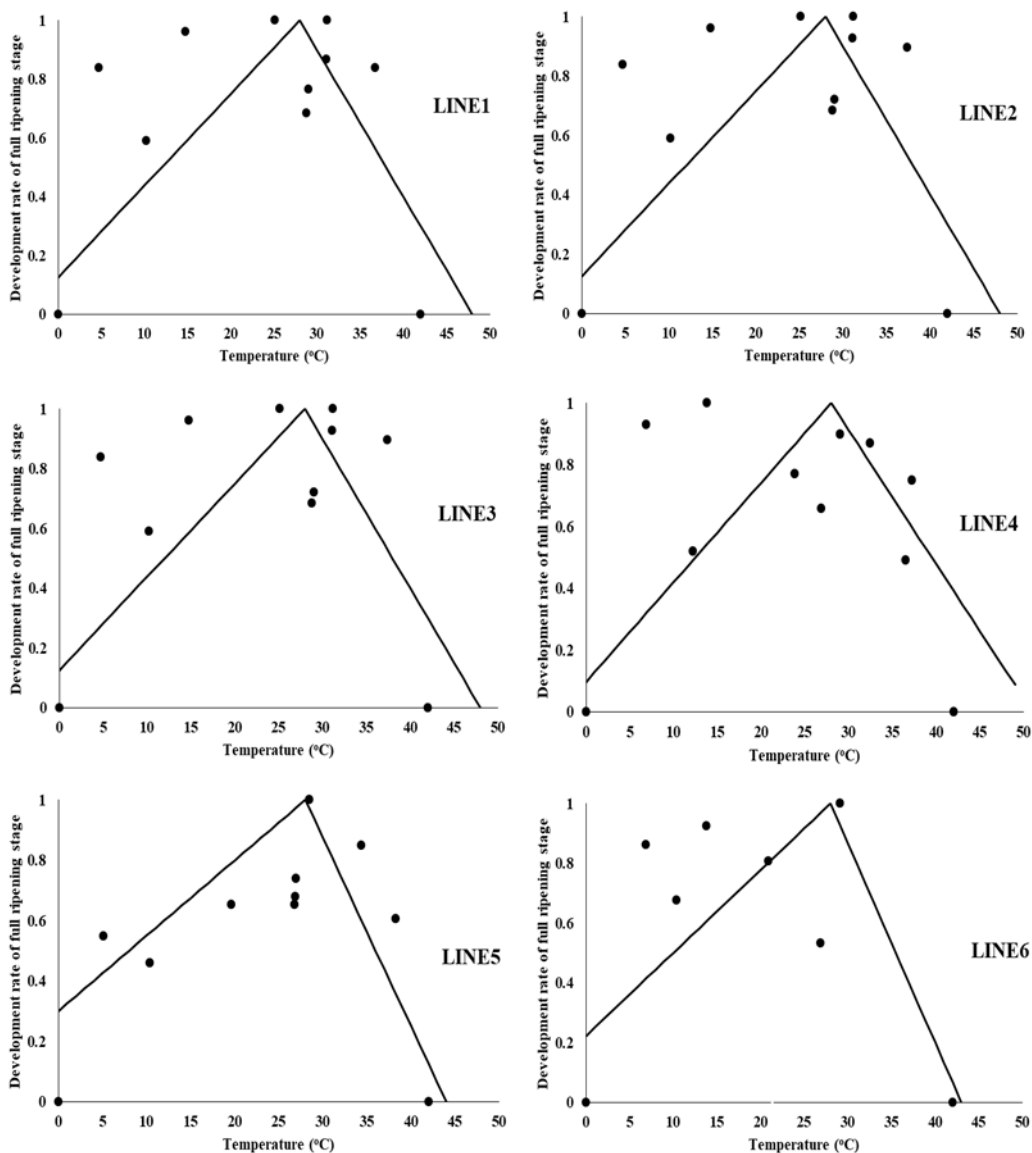
رسیدگی دانه بیشتر از سایر لاین‌ها نیاز داشتند (جدول ۴). سایر محققین دمای پایه رسیدگی دانه کینوا را دو درجه سانتی‌گراد گزارش کردند و اظهار داشتند که بوته کینوا تا ۳- درجه سانتی‌گراد زنده می‌ماند (Bertero, 2003; Bois et al., 2006).

نتایج نشان داد که درجه حرارت‌های ویژه به‌دست آمده توسط مدل‌های تک‌های و درجه‌دو با یکدیگر متفاوت بودند (جدول‌های ۲، ۳



شکل ۴- رابطه دما و سرعت رسیدگی دانه لاین‌های کینوا برآزش داده شده توسط مدل درجه‌دو

Fig. 4- Relationship between temperature and grain ripening rate of quinoa lines using the quadratic model



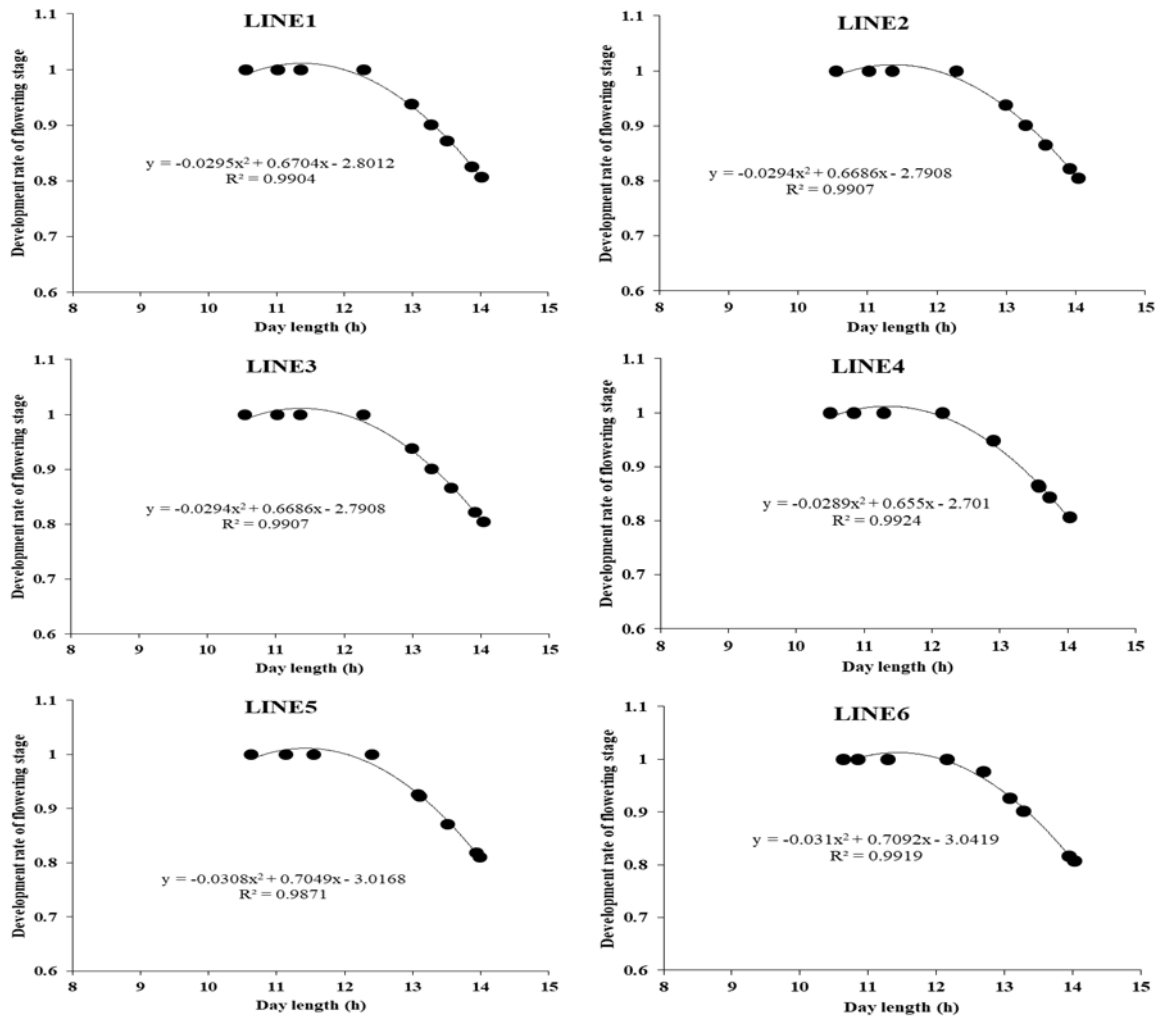
شکل ۵- رابطه دما و سرعت رسیدگی دانه لاین‌های کینوا برآزش داده شده توسط مدل تکه‌ای

Fig. 5- Relationship between temperature and grain ripening rate of quinoa lines using the segmented model

جدول ۴- برآورد دماهای ویژه رسیدگی دانه لاین‌های کینوا با استفاده از مدل‌های درجه‌دو و تابع تکه‌ای

Table 4- Estimation of cardinal grain ripening temperatures of quinoa lines using the quadratic model and segmented model

	لاین Line	دمای پایه T_b (°C)	دمای بهینه T_o (°C)	دمای بیشینه T_m (°C)	ضریب تبیین R^2
مدل درجه‌دو Quadratic model	1	-0.7	21.5	43.9	0.65
	2	-0.9	21.8	44.5	0.60
	3	-0.9	21.8	44.5	0.60
	4	-0.6	21.7	44	0.59
	5	0.5	23.1	45.7	0.66
	6	-2.8	15.2	33.2	0.18
مدل تکه‌ای Segmented model	1	-4	20.5	47.7	0.59
	2	-4	20.2	49.4	0.59
	3	-4	20.2	49.4	0.58
	4	-2.9	17.7	51.4	0.48
	5	-12.1	32.6	44.6	0.70
	6	-8	21.7	42.9	0.53



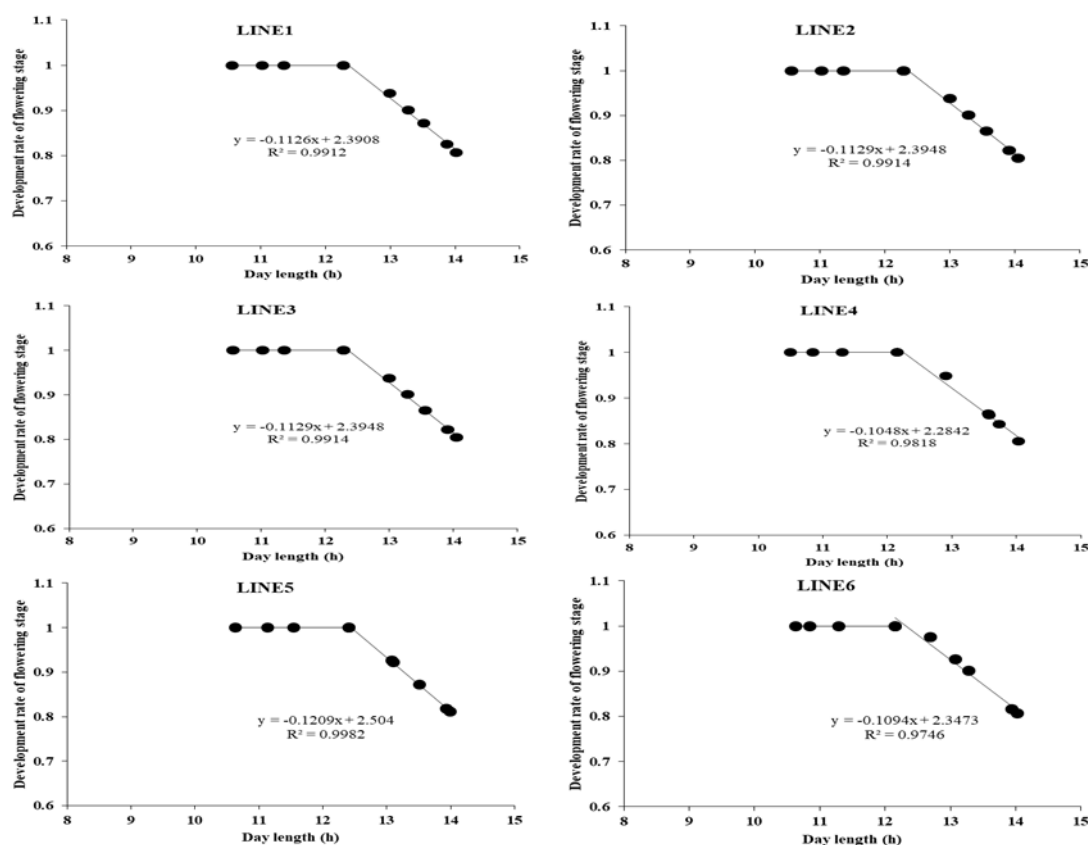
شکل ۶- رابطه طول روز و سرعت گل‌دهی لاین‌های کینوا برازش داده شده توسط مدل درجه‌دو

Fig. 6- Relationship between day length and flowering rate of quinoa lines using the quadratic model

جدول ۵- برآورد طول‌روز ویژه گل‌دهی لاین‌های کینوا با استفاده از مدل‌های درجه‌دو و تابع تکه‌ای

Table 5- Estimation of day length for flowering of quinoa lines using the quadratic model and segmented model

	لاین	طول روز پایه P_b (h)	طول روز بهینه P_o (h)	طول روز بیشینه P_m (h)	ضریب تبیین R^2
مدل درجه‌دو Quadratic model	1	5.52	11.37	17.23	0.99
	2	5.51	11.37	17.24	0.99
	3	5.51	11.37	17.24	0.99
	4	5.42	11.34	17.26	0.99
	5	5.7	11.43	17.16	0.98
	6	5.72	11.44	17.15	0.99
مدل تکه‌ای Segmented model	1	0	12.35	21.21	0.99
	2	0	12.35	21.21	0.99
	3	0	12.35	21.21	0.99
	4	0	12.25	21.8	0.98
	5	0	12.44	20.7	0.99
	6	0	12.31	21.45	0.98



شکل ۷- رابطه طول روز و گل‌دهی لاین‌های کینوا برآزش داده شده توسط تابع تکه‌ای

Fig. 7- Relationship between day length and ripening rate of quinoa lines using the segmented model

بیشینه کینوا بین ۱۳/۳ تا ۱۴/۵ ساعت و فتوپریود بهینه بین ۱۲/۷ تا ۱۳/۴ ساعت بیان شده است (Bertero et al., 1999b). برخی محققین بیان کردند که کینوا در محدوده وسیعی از طول روز به مرحله بلوغ می‌رسد، اما طول روزهای بلند باعث کلروزه شدن برگ‌های پایین گیاه کینوا می‌شود (Bendevis, 2013).

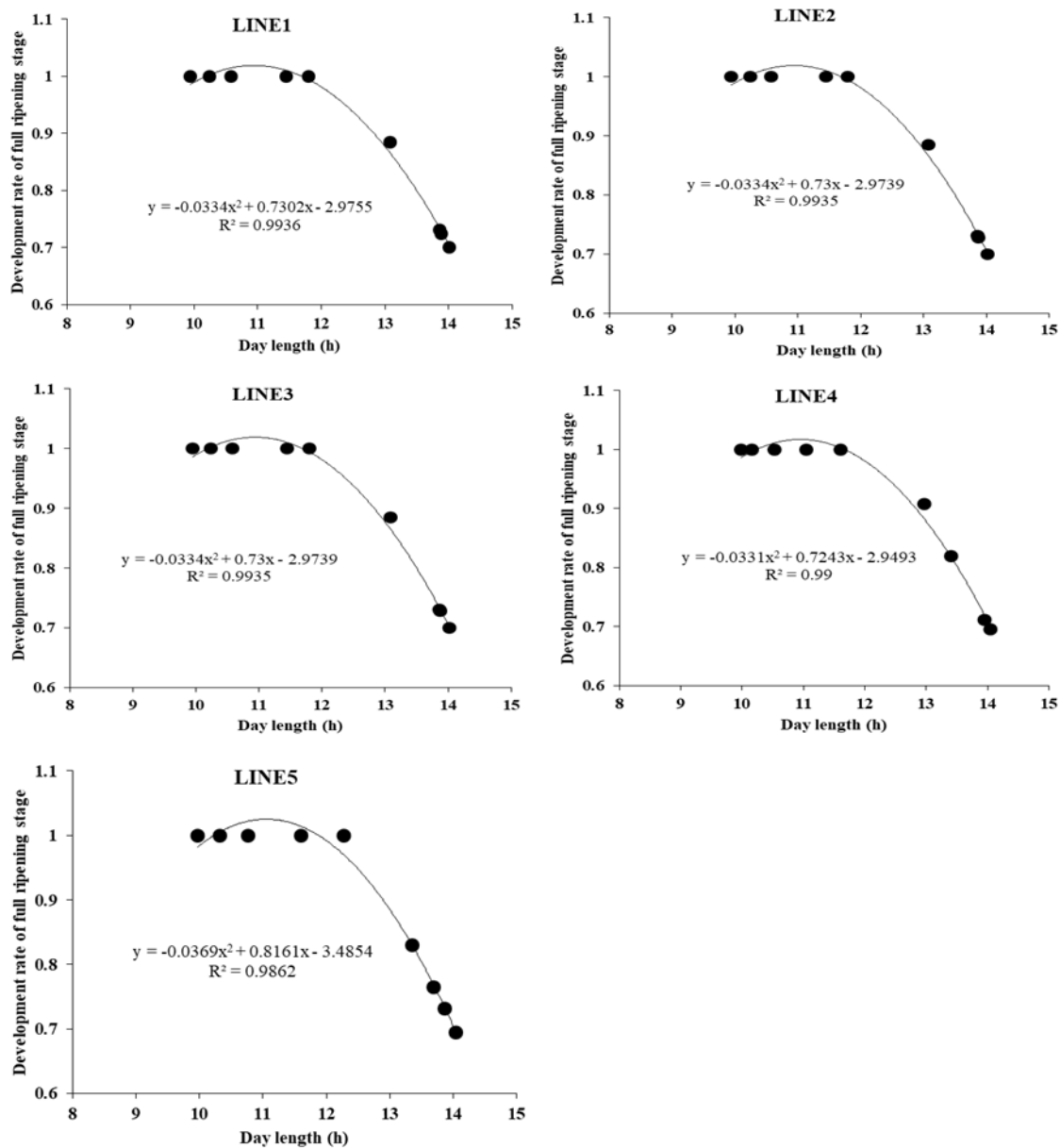
نتایج نشان داد که در طول روزهای کمتر از ۱۲ ساعت و دماهای کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش هم‌زمان دما و طول روز سرعت گل‌دهی بیشتر شد. با افزایش طول روز تا ۱۴ ساعت، تغییر در سرعت نمو گل‌دهی در دماهای بین ۱۹ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دماهای کمتر از ۱۹ درجه سانتی‌گراد بیشتر بود (شکل ۷).

بر اساس مقادیر ضریب تبیین (R^2) برای تخمین درجه حرارت‌های ویژه جوانه‌زنی، گل‌دهی و رسیدگی دانه کینوا به نظر می‌رسد که مدل درجه‌دو مناسب‌تر از مدل تکه‌ای است (جدول‌های ۲، ۳ و ۴)، با این حال، به‌کارگیری هر دو مدل برای برآورد طول‌روزهای ویژه نتایج یکسانی به‌همراه داشت (جدول ۶).

بر اساس نتایج این دو مدل، طول‌روزهای ویژه گل‌دهی لاین‌های کینوا شامل طول‌روز پایه گل‌دهی (P_b) بین صفر تا ۵/۷ ساعت، طول روز بهینه گل‌دهی (P_o) بین ۱۱/۴ تا ۱۲/۴ ساعت و طول روز بیشینه گل‌دهی (P_m) بین ۱۷/۱ تا ۲۱/۸ ساعت برآورد شد (جدول ۵). طول روز رسیدگی دانه لاین‌های کینوا با استفاده از دو مدل تکه‌ای و درجه‌دو تعیین شدند (شکل‌های ۸ و ۹).

بر اساس نتایج این دو مدل، طول‌روزهای ویژه رسیدگی دانه لاین‌های کینوا شامل طول‌روز پایه رسیدگی دانه (P_b) بین صفر تا ۵/۸ ساعت، طول روز بهینه رسیدگی دانه (P_o) بین ۱۰/۹ تا ۱۲/۳ ساعت و طول روز بیشینه رسیدگی دانه (P_m) بین ۱۶/۳ تا ۱۹/۲ ساعت برآورد شد (جدول ۵). سایر محققین بیان کردند طول‌روز بحرانی برای کینوا، ۱۸ ساعت است و حساسیت به طول‌روز در مرحله رسیدگی دانه بیشتر از گل‌دهی است (Christiansen et al., 2010).

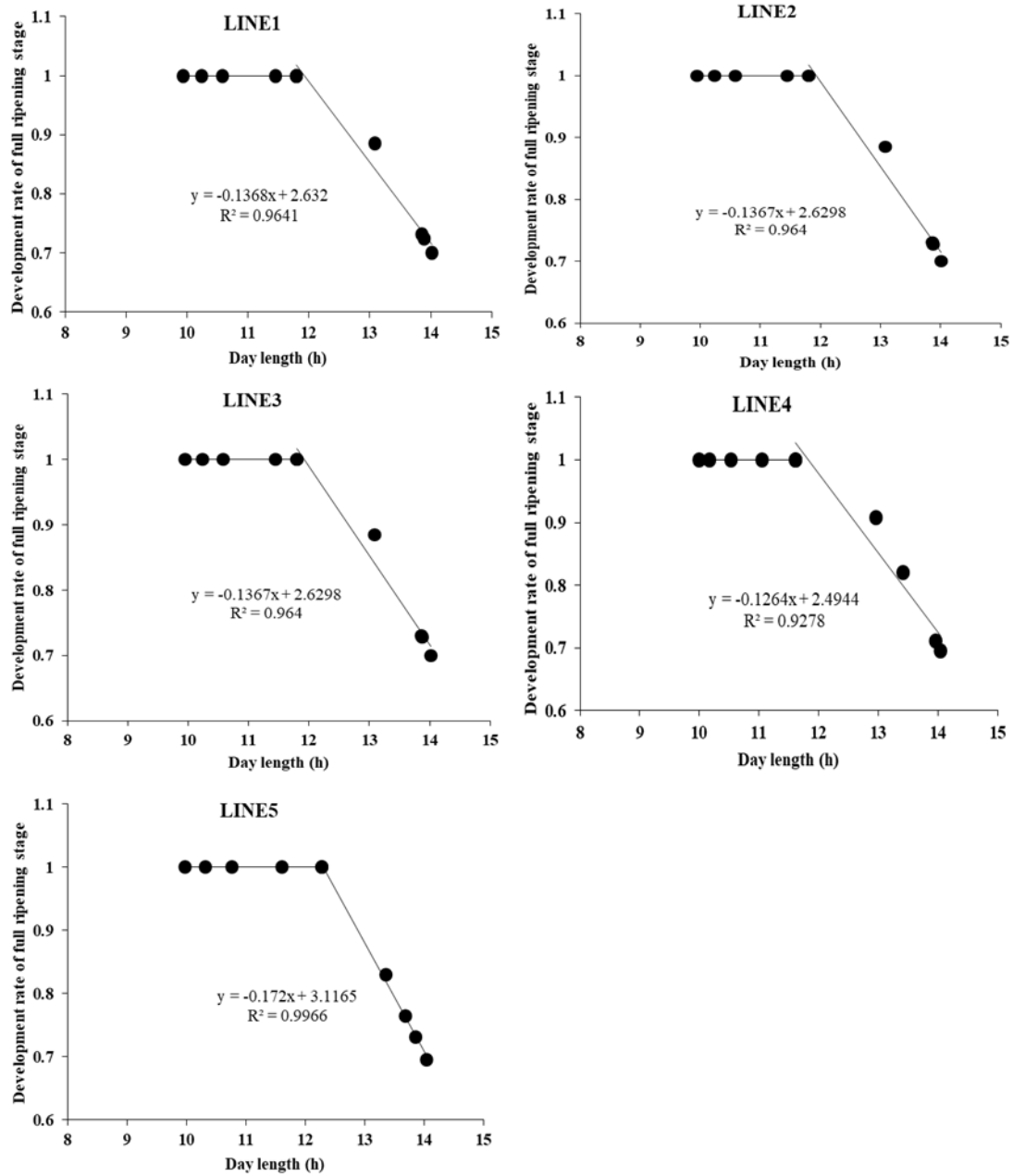
به‌دلیل واکنش کیفی لاین ۶ به طول‌روز، برآزش مدل تکه‌ای و درجه‌دو برای لاین ۶ انجام نشد. در تحقیقات آزمایشگاهی طول‌روز



شکل ۸- رابطه طول روز و سرعت رسیدگی دانه لاین‌های کینوا برازش داده شده با استفاده از مدل درجه دو
 Fig. 8- Relationship between day length and grain ripening rate of quinoa lines using the quadratic model

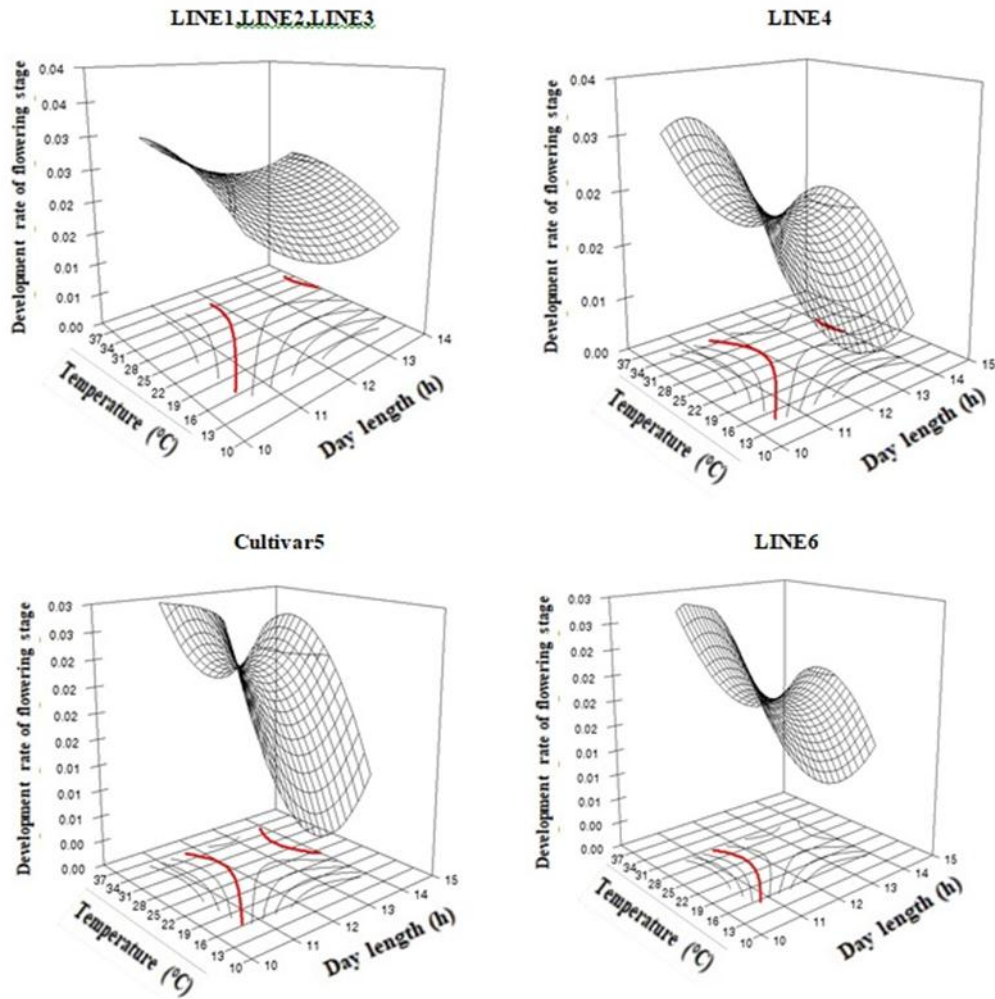
گل‌دهی تا رسیدگی دانه) افزایش یافت (شکل ۱۱).
 نتایج نشان داد آستانه طول روز در تغییر اثرات متقابل دما و طول روز بر سرعت گل‌دهی در لاین‌های ۱ تا ۴ و رقم ۵، طول روز ۱۲ ساعت و در لاین ۶ طول روز ۱۱/۵ ساعت بود (شکل ۱۰).

نتایج نشان داد که در لاین‌های متوسط‌ترس ۱، ۲، ۳، ۴ و ۶ لاین دیررس ۴ با افزایش هم‌زمان دما و طول روز سرعت رسیدگی دانه ثابت ماند. این مطلب برای رقم زودرس (۵) در دماهای بالاتر از ۱۶ درجه سانتی‌گراد صادق بود. در تمام لاین‌ها در یک دمای ثابت، با تغییر طول روز و یا در یک طول روز ثابت با تغییر دما سرعت بلوغ گیاه (از



شکل ۹- رابطه طول روز و سرعت رسیدگی دانه لاین‌های کینوا برآزش داده شده توسط تابع تکه‌ای

Fig. 9- Relationship between day length and grain ripening rate of quinoa lines using the segmented model



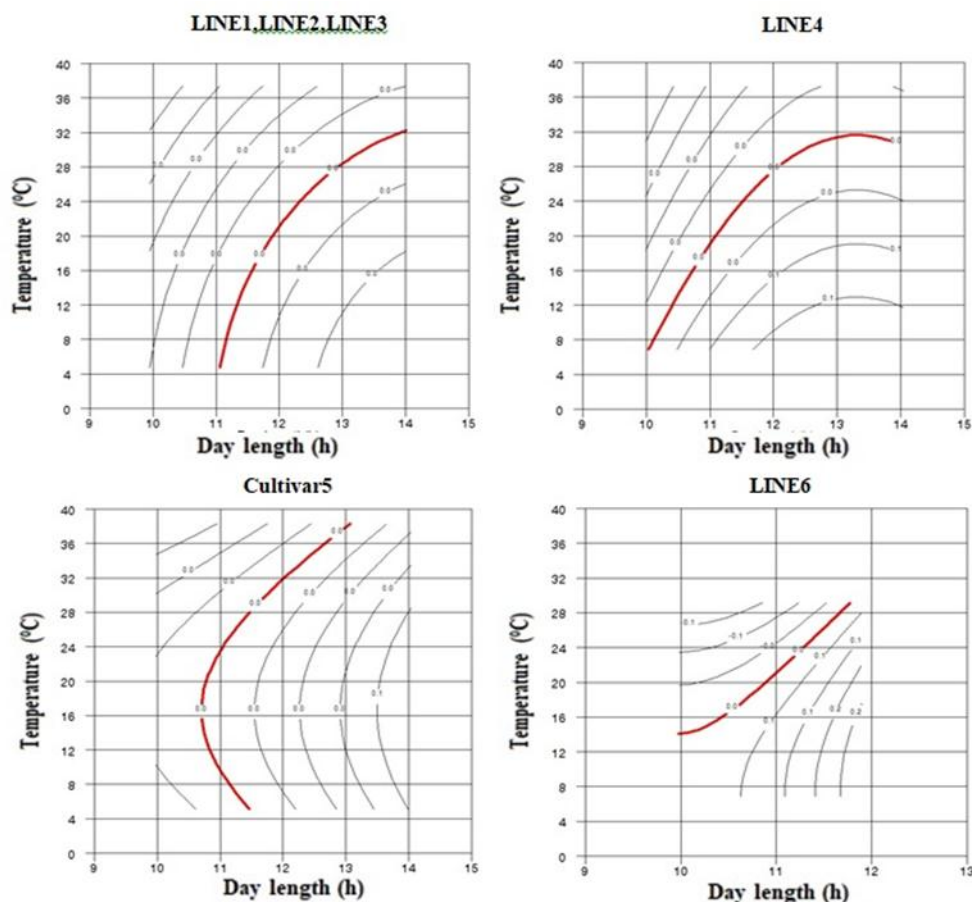
شکل ۱۰- اثر دما و طول روز بر سرعت گل‌دهی لاین‌های کینوا

Fig. 10- The effect of temperature and day length on the flowering rate of quinoa lines

جدول ۶- تخمین طول روز ویژه رسیدگی دانه لاین‌های کینوا با استفاده از مدل‌های درجه‌دو و تابع تکه‌ای

Table 6- Estimation of day length for grain ripening of quinoa lines using the quadratic model and segmented model

	لاین	طول روز پایه	طول روز بهینه	طول روز بیشینه	ضریب تبیین
	Line	P_b (h)	P_o (h)	P_m (h)	R^2
مدل درجه‌دو Quadratic model	1	5.41	10.94	16.47	0.99
	2	5.41	10.94	16.47	0.99
	3	5.41	10.94	16.47	0.99
	4	5.41	10.95	16.5	0.99
	5	5.78	11.05	16.32	0.98
مدل تکه‌ای Segmented model	1	0	11.92	19.23	0.96
	2	0	11.92	19.23	0.96
	3	0	11.92	19.23	0.96
	4	0	11.82	19.73	0.99
	5	0	12.3	18.12	0.99



شکل ۱۱- اثر دما و طول‌روز بر سرعت رسیدگی دانه لاین‌های کینوا
 Fig. 11- The effect of temperature and day length on grain ripening rate of quinoa lines

و دقیق‌تر در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گیرد. دمای بیشینه تمام مراحل نمو کینوا بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد (۴۲-۵۱ درجه سانتی‌گراد) محاسبه شد. مرحله گل‌دهی نسبت به رسیدگی دانه به درجه حرارت‌های پایین حساس‌تر بود. طول‌روز مناسب گل‌دهی و رسیدگی دانه لاین‌های کینوا بین ۱۱/۵ تا ۱۲ ساعت محاسبه شد. تفاوت‌ها بین نتایج برآورد دما و طول‌روز بین دو مدل تکه‌ای و درجه‌دو قابل توجه نبود، اگر چه در اغلب برآوردها مدل درجه‌دو ضریب تبیین بالاتری داشت. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که دما و طول‌روز اثر جبران‌کنندگی بر سرعت گل‌دهی و رسیدگی دانه لاین‌های مورد مطالعه دارد.

سپاسگزاری

هزینه انجام این پژوهش در قالب طرح شماره ۳ به‌شماره

محدوده متوسط سرعت گل‌دهی و سرعت دانه‌بندی در نمودارهای اثرات متقابل دما و طول‌روز با خطوط ضخیم‌تر در اشکال ۱۰ و ۱۱ مشخص شد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که بر اساس معادلات خطی و غیرخطی دمای بهینه تمام مراحل نمو لاین‌های کینوا بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. بین دماهای پایه مراحل نمو اختلاف قابل توجهی وجود داشت. دمای پایه جوانه‌زنی لاین‌های کینوا بالای صفر درجه سانتی‌گراد، دمای پایه گل‌دهی بر اساس معادلات رگرسیون، بین ۲- تا ۲+ درجه سانتی‌گراد و دمای پایه رسیدگی دانه، زیر صفر درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. این نتایج حاصل از مدل معادلات خطی و غیر خطی بر روی داده‌های مزرعه است و لازم است بررسی بیشتر

۱۳۹۹/۰۶/۱۹ مصوب ۳/۵۲۶۴۸ توسط معاونت محترم پژوهش و
 فناوری دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده است که به این وسیله
 قدردانی می‌شود.

References

- Adolf, V. I., Jacobsen, S.E., & Shabala, S. (2013). Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environmental and Experimental Botany*, 92, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.004>
- Bendevis, M.A., (2013). Differentiation of photoperiod-induced ABA and soluble sugar responses of two quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *Journal of Plant Growth Regulation*, DOI 10.1007/s00344-013-9406-9.
- Bertero, H. D., (2003). Response of developmental processes to temperature and photoperiod in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19, 87-97. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018870>
- Bertero, H. D., King, R. W., & Hall, A. J., (1999a). Modelling photoperiod and temperature responses of flowering in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 63, 19-34. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00024-6)
- Bertero, H. D., King, R. W., & Hall, A. J., (1999b). Photoperiod-sensitive development phases in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 60, 231-243. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00128-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00128-2)
- Bois, J. F., Winkel, T., Lhomme, J. P., Raffailac, J. P., & Rocheteau, A. (2006). Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy*, 25, 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.06.007>
- Bunce, J. A. (2018). Thermal acclimation of the temperature dependence of the V_Cmax of Rubisco in quinoa. *Photosynthetica*, 56, 1-6.
- Christiansen, J. L., Jacobsen, S. E., & Jørgensen, S. T. (2010). Photoperiodic effect on flowering and seed development in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Acta Agriculturae Scandinavica*, 60, 539-544. <https://doi.org/10.1080/09064710903295184>
- FAO.(2011). Quinoa; an ancient crop to contribute to world food security. 63 p.
- García-Parra, M. A., Roa-Acosta, D. F., Stechauner-Rohringer, R., García-Molano, F., Bazile, D., & Plazas-Leguizamón, N.(2020). Effect of temperature on the growth and development of quinoa plants (*Chenopodium quinoa* Willd.): A review on a global scale. *SYLWAN*, 164, 411-433.
- Gonzalez, J. A, Rosa, M., Parrado, M. F., Hilal, M., & Prado, F. E.(2009). Morphological and physiological responses of two varieties of a highland species (*Chenopodium quinoa* Willd.) growing under near-ambient and strongly reduced solar UV-B in a lowland location. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 96, 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2009.05.003>
- Hinojosa, L., Matanguihan, J. B., & Murphy, K. M.(2019). Effect of high temperature on pollen morphology, plant growth and seed yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205, 33-45. <https://doi.org/10.1111/jac.12302>
- Hirich, A., Choukr-Allah, R., and Jacobsen, S.E. (2014). Quinoa in Morocco—Effect of sowing dates on development and yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200, 371-377. <http://dx.doi.org/10.1111/jac.12071>
- Javadzadeh, S. M., Rezvani Moghaddam, P., Banayan-Aval, M., & Asili, A. (2017). Cardinal temperatures for germination of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Iranian Journal of Seed Research*, 3,129-141. <http://dx.doi.org/10.29252/yuj.3.2.129>
- Karina, B. R., Stefania, B., Rómulo, O., Ian, S. A. R., Fabiana, A., Enrique, A. M. M., Amadou, C., Alipio, C.M., Milton, P., Andrés, Z.S., Didier, B., Sven, E.J., & Marco, A. M. M. (2014). Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change. A review. *Agronomy for . Sustainable Development*, 34, 349-359.
- Keisling, T. C. (1982). Calculation of the length of day. *Agronomy Journal*, 74, 758-759.
- Mamedi, A., Tavakkol Afshari, R., & Oveisi, M. (2017). Cardinal temperatures for seed germination of three quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crop Science, Special Issue* 89-100. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.206204.654106>
- Nanduri, K.R., Hirich, A., Salehi, M., Saadat, S., & Jacobsen, S. E. (2019). Quinoa: A New Crop for Harsh

Environments. *Food and Bioprocess Technology*, 301-333. [Doi.org/10.1007/978-3-030-04417-6_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04417-6_19).

Soltani, A., Robertson, M., Mohammad-Nejad, Y., & Rahemi-Karizaki, A.(2006). Modeling chickpea growth and development: Leaf production and senescence. *Field Crops Research*, 99, 14. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.005>