

مقاله پژوهشی

برآورد دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) با استفاده از توابع رگرسیون غیرخطیفاطمه لجم اورک شیرپور^۱، یزدان ایزدی^۲، سید امیر موسوی^{۳*}

چکیده مبسوط

مقدمه: جوانه‌زنی از مهم‌ترین عامل‌های تعیین‌کننده موفقیت و یا شکست در استقرار گیاهان بوده و در صورت عدم وجود محدودیت در سایر عوامل محیطی محدود کننده، مانند رطوبت و دمای محیط، تعیین‌کننده سرعت و درصد نهایی جوانه‌زنی بذرها خواهد بود. این پژوهش با هدف بررسی برخی شاخص‌های جوانه‌زنی و ارزیابی مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای برآورد دماهای کاردینال جوانه‌زنی دو وارسته جدید گوجه‌فرنگی انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی شامل هفت سطح دما (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس) و دو رقم گیاه گوجه‌فرنگی (قرمز گیلانی و زرد گلابی شکل) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در سال ۱۳۹۸ اجرا گردید. برای تعیین رابطه میان سرعت جوانه‌زنی و دما از توابع بتا، دندانه‌ای و دوتکه‌ای و از تابع لجستیک به منظور توصیف الگوی مناسب جوانه‌زنی دو رقم این گیاه در پاسخ به هر سطح دما در طی زمان استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده اثر معنی‌دار برهمکنش دما و رقم بر تمام صفات اندازه‌گیری شده در این آزمایش بود. نتایج نشان داد که درصد جوانه‌زنی در رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی شکل در دماهای ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۹۳، ۹۶، ۹۵ و ۸۶ درصد و در رقم قرمز گیلانی در بازه دمایی اشاره شده به ترتیب برابر ۹۵، ۹۸، ۹۳ و ۹۸ درصد بود. هیچکدام از دو رقم گوجه‌فرنگی در دماهای ۵، ۱۰ و ۳۵ درجه سلسیوس قادر به جوانه‌زنی نبودند. بر اساس نتایج خروجی از توابع برازش داده شده، مشخص شد که در بین تابع‌های رگرسیونی غیر خطی آزمون شده در این پژوهش، تابع دوتکه‌ای به‌خوبی سرعت جوانه‌زنی بذر رقم‌های گوجه‌فرنگی مورد مطالعه را در برابر دما، توصیف نمود (ضریب تبیین $R^2 \geq 0.93$ و شاخص آکاییک ≥ -7.0). همچنین تابع لجستیک نیز برازش مناسبی بر جوانه‌زنی دو رقم در سطوح بین ۱۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس ($R^2 \geq 0.96$) در برابر زمان داشت. بر اساس تابع دو تکه‌ای، دماهای پایه، بهینه و سقف به ترتیب برای رقم زرد گلابی شکل ۱۱/۲۵، ۲۸/۷۲ و ۳۵/۰ و برای رقم قرمز گیلانی شکل ۱۰/۹۷، ۲۸/۶۱ و ۳۵/۰ درجه سلسیوس تخمین زده شد.

نتیجه‌گیری: جوانه‌زنی هر دو رقم گیاه گوجه‌فرنگی نسبت به تغییرات دما حساسیت نشان می‌دهد. در دماهای بالاتر از دمای حداقل، با افزایش دما هم نرخ جوانه‌زنی و هم سرعت آن افزایش پیدا کرد و این افزایش تا دمای مطلوب ادامه داشت و پس از آن روند تغییرات درصد و سرعت جوانه‌زنی به ازای دما کاهشی گردید. همچنین نتایج به‌دست آمده از تابع لجستیک نشان داد که رقم زرد گلابی در مقایسه با قرمز گیلانی، به افزایش دماهای بیش بهینه، حساس‌تر است و با افزایش دما از ۲۵ به ۳۰ درجه سلسیوس جوانه‌زنی از ۹۷/۷۹ به ۸۵/۰۹ درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: ارقام، تابع دوتکه‌ای، تابع لجستیک، دمای بهینه، دمای پایه

جنبه‌های نوآوری:

- ۱- الگوی جوانه‌زنی دو رقم جدید گیاه گوجه‌فرنگی تحت تغییرات سطوح دمایی بررسی شد.
- ۲- دماهای کاردینال دو رقم گوجه‌فرنگی با استفاده از توابع رگرسیون غیر خطی برآورد گردید.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

^۲ دانشجوی دکتری زراعت، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۳ استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان



مقدمه

گوجه‌فرنگی با نام علمی *Solanum lycopersicum* L. از مهم‌ترین گونه‌های تیره سیب‌زمینیان^۱ و بومی آمریکای جنوبی و مرکزی می‌باشد که بنابر ارزش غذایی و مصرفی بالای آن جایگاه دوم جهانی را پس از سیب‌زمینی از نظر میزان تولید به خود اختصاص داده است (جوروار^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). بنابر گزارش سازمان خوار و بار جهانی میزان تولید این محصول در سال ۲۰۱۹ چیزی در حدود ۱۸۰ میلیون تن در جهان و ۵/۲ میلیون تن در ایران و سطح زیر کشت آن، مساحتی حدود ۵/۱ میلیون هکتار در جهان و ۱۲۱ هزار هکتار در ایران برآورد گشته است (فائو^۳، ۲۰۱۹). این گیاه گرمادوست بوده و بطور عمده در فصل بهار کشت می‌شود (رونکا^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). از ویژگی‌های مهم آن، می‌توان به دارا بودن ویتامین آ، ث و هم‌چنین لیکوپن اشاره کرد (جوادی و خماری^۵، ۲۰۱۸). گوجه‌فرنگی دارای ارقام اصلاح شده فراوانی است که از نظر خصوصیات ظاهری هم‌چون رنگ، شکل، طعم و مزه و هم‌چنین نیازهای اکولوژیک هم‌چون دمای مورد نیاز برای آغاز جوانه‌زنی متنوع هستند (سبک‌خیز^۶ و همکاران، ۲۰۱۵).

دما یکی از مهم‌ترین عوامل در آغاز، قابلیت و سرعت جوانه‌زنی است. باتوجه به اهمیت این مساله که کیفیت و کمیت جوانه‌زنی از دما تأثیر می‌پذیرد و تولید موفقیت‌آمیز این گیاه تابعی از شرایط اقلیمی حاکم در زمان کاشت بوده، بنابراین شناسایی شرایط بهینه جوانه‌زنی بذر می‌تواند ما را در انتخاب تاریخ کاشت مناسب ارقام و واریته‌های گیاه گوجه‌فرنگی کمک نماید (بیرادر^۷ و همکاران، ۲۰۱۹). جوانه‌زنی بذر هر گیاه در گستره دمایی خاصی صورت می‌پذیرد که با عنوان دماهای مهم (کاردینال) نامیده می‌شود (رضایی تمیجانی^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). دماهای ویژه جوانه‌زنی

شامل سه دمای کمینه (در کمتر از این دما جوانه‌زنی اتفاق نمی‌افتد)، بیشینه (در بیشتر از این دما جوانه‌زنی اتفاق نمی‌افتد) و بهینه (که در آن حداکثر میزان و سرعت جوانه‌زنی) به‌دست می‌آید، هستند (باث^۹ و همکاران، ۲۰۲۰؛ پرمون^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۵). از اکولوژیک دماهای پایه، بهینه و بیشینه (سقف) می‌توانند برخی محدودیت‌های زیست محیطی برای توزیع جغرافیایی گونه‌ها را تعیین کنند (نیکومرام^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰). آزمایش‌های متعددی وجود دارد که کنترل و شناسایی دمای کاردینال را تعیین می‌کنند. برای مثال کریم‌زاده‌سورشجانی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۹) توابع رگرسیونی غیر خطی دو تکه‌ای، بتا و دندان‌مانند برای تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی گلرنگ و سبز شدن کنگد استفاده کردند. در مطالعه دیگری که برای تخمین دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر خارمریم انجام گرفته بود، مشخص شده که استفاده از توابع بتا و دوتکه‌ای می‌تواند به خوبی در برآورد دماهای کاردینال این گیاه مورد استفاده قرار گیرد (پرمون و همکاران، ۲۰۱۵). تابع‌های بتا، دو تکه‌ای و دندان‌مانند برای توصیف سرعت جوانه‌زنی خشخاش در برابر دما نیز استفاده شده است و مشخص شده است که این تابع‌ها به خوبی توانسته‌اند جوانه‌زنی این گیاه را در پاسخ به دما توصیف نمایند (کامکار^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۲). اعتصامی^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۵) در یک پژوهش نشان دادند که رابطه دما با سرعت جوانه‌زنی در گیاه چای ترش با تابع دوتکه‌ای و با درصد جوانه‌زنی توسط تابع دندان‌مانند، برازش مناسبی داشت و دماهای کمینه و بهینه این گیاه به ترتیب برابر ۱۱ و ۳۵ درجه سلسیوس بودند.

با توجه به این مساله که استفاده از توابع رگرسیونی غیر خطی در پیش‌بینی جوانه‌زنی و ظهور گیاهچه ارقام جدید گیاه گوجه‌فرنگی، هم‌چون گوجه فرنگی قرمز گیلاسی و زرد گلابی شکل در برابر دما حائز اهمیت

¹ Solanaceae² Jorwar³ FAO⁴ Ronga⁵ Javadi and Khemari⁶ Sabokkhiz⁷ Biradar⁸ Rezaei Tamijani⁹ Baath¹⁰ Parmoon¹¹ Nikoumaram¹² Karimzadeh Soureshjani¹³ Kamkar¹⁴ Etesami

هر پتری، دولایه کاغذ واتمن شماره یک قرار گرفته بود. پتری‌ها و بستر (کاغذ صافی واتمن) در اتو کلاو در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت سترون شدند. روش انجام آزمون به شیوه روی کاغذ^۴ بود (ماگورنو^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). برای هر تکرار ۲۰ عدد بذر منظور گردید و سپس به هر پتری ۴ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. در نهایت پتری‌ها به ژرمیناتورهای تنظیم شده با دماهای ثابت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس) و دوره نوردهی ۱۶ ساعت نور در طی روز و ۸ ساعت تاریکی منتقل شدند (مارچیول^۶ و همکاران، ۲۰۱۹).

تعداد بذرهای جوانه‌زده، هر ۱۲ ساعت به مدت یک هفته و در مجموع در ۱۳ قرائت شمارش شد و در روز هفتم جوانه‌زنی ثابت گردید. ملاک جوانه‌زنی، خروج ریشه‌چه به طول دو میلی‌متر بوده و بذرهای جوانه‌زده از محیط آزمایش حذف شد (ایستا، ۲۰۱۲). به منظور ارزیابی صفات جوانه‌زنی برای هر تکرار در هر سطح تیماری از ۳ پتری به عنوان نمونه تخریبی استفاده شد و از هر پتری ۵ گیاهچه به‌طور تصادفی انتخاب شده و صفات طول ریشه‌چه و ساقه‌چه آن‌ها اندازه‌گیری و میانگین این تعداد به عنوان طول ریشه‌چه و ساقه‌چه آن تکرار ذکر گردید. همچنین از داده‌های حاصل از آن، نسبت طول ریشه‌چه به طول ساقه‌چه نیز محاسبه گردید (ایستا، ۲۰۱۲).

درصد جوانه‌زنی نهایی (رابطه ۱) از مجموع نسبت تعداد بذرهای جوانه‌زده به تعداد کل بذرهای ضرب در ۱۰۰ به دست آمد که در آن Ni برابر است با تعداد بذرهای جوانه‌زده تا روز N ام و Ti شماره کل بذرهای مورد اندازه‌گیری بود (اگلی و تیکرونی^۷، ۱۹۹۷).

$$FGP = \sum \frac{Ni}{Ti} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی (MGT) که شاخصی از سرعت و درصد جوانه‌زنی است، از رابطه ۲ محاسبه شد (متیوس و خواجه‌حسینی^۸، ۲۰۰۶). که در این رابطه: n = تعداد بذرهای جوانه‌زده در طی d

بوده و در این زمینه تاکنون مطالعات اندکی صورت گرفته است، این پژوهش با اهداف: (۱) تخمین درجه حرارت‌های مهم دو رقم مورد مطالعه گیاه گوجه‌فرنگی (۲) مقایسه بین توابع مورد استفاده در پیش‌بینی میزان جوانه‌زنی این دو رقم در پاسخ به دما (۳) تعیین کمیت میزان جوانه‌زنی و زمان مورد نیاز برای این دو رقم در پاسخ به سطوح دمایی با استفاده از تابع رگرسیونی غیر خطی لجستیک، صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به منظور بررسی واکنش جوانه‌زنی رقم‌های جدید گیاه گوجه‌فرنگی (تولید سال ۱۳۹۷ و تهیه شده از شرکت تهیه و تولید بذر عنبری واقع در مشهد) به تغییر دما به صورت فاکتوریل دو عاملی شامل هفت سطح دما (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس) و دو رقم گیاه گوجه‌فرنگی (گوجه‌فرنگی قرمز گیلانی *Solanum Lycopersicom* L. Var. *Cerasiformi* و گوجه‌فرنگی زرد گلابی شکل *S. Lycopersicum* L. Var. *Yellow Pear*) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و سه نمونه تخریبی برای هر تکرار و در مجموع ۱۲۶ پتری در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در سال ۱۳۹۸ اجرا گردید. بذرهای تهیه شده قبل از شروع آزمایش به منظور ارزیابی قوه‌نامیه با انجام آزمون جوانه‌زنی استاندارد (۵۰ بذر در سه تکرار) بر اساس ایستا^۱ (۲۰۱۲) سنجش شدند و مشخص شد که قوه‌نامیه آن‌ها ۹۹ درصد است.

قبل از شروع آزمایش، ابتدا بذرهای با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد به مدت سه دقیقه ضدعفونی گردیدند و سپس نمونه‌های مورد نظر سه بار با آب مقطر شستشو داده شدند (صالحی‌ساردوئی^۲، ۲۰۱۹). سپس نمونه‌ها برای خشک شدن در ژرمیناتور با دمای ۳۲ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند (کوپلند و مک‌دونالد^۳، ۲۰۰۱). ظروف مورد استفاده برای آزمون جوانه‌زنی استاندارد، از نوع پتری‌های شیشه‌ای با قطر ۹ سانتی‌متری بودند که در

⁴ Top of Paper

⁵ Măgureanu

⁶ Marchiol

⁷ Egli and Tekrony

⁸ Matthews and Khajeh-Hosseini

¹ ISTA

² Salehi Sardoei

³ Copeland and McDonald

تعداد قرائت‌ها از ابتدای جوانه‌زنی و $\sum n$ = تعداد کل بذره‌های جوانه‌زده است.

$$\text{رابطه ۲)} \quad \text{MGT} = \frac{\sum (nd)}{\sum n}$$

ضریب سرعت جوانه‌زنی (CVG) که مشخصه سرعت و شتاب جوانه‌زنی بذر است، از رابطه ۳ محاسبه شد (مگوایر^۱، ۱۹۶۲). که در این رابطه $G1 - Gn$ تعداد بذره‌های جوانه‌زده از قرائت اول تا قرائت آخر را نشان می‌دهد.

(رابطه ۳)

$$\text{CVG} = \frac{G1+G2+G3+\dots+Gn}{(1 \times G1) + (2 \times G2) + (3 \times G3) + \dots + (n \times Gn)}$$

شاخص سرعت جوانه‌زنی (GRI) نیز طبق رابطه ۴ محاسبه شد (اسیچی^۲، ۱۹۹۴). که $G1$ ، $G2$ و Gn به ترتیب تعداد بذره‌های جوانه‌زده در قرائت اول، دوم و قرائت n ام هستند.

$$\text{رابطه ۴)} \quad \text{GRI} = \frac{G1}{1} + \frac{G2}{2} + \dots + \frac{Gn}{n}$$

سرعت جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها (GR50) با استفاده از رابطه ۵ تعیین گردید (رضایی‌تمیجانی و همکاران، ۲۰۱۶). که در این رابطه D50 زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی می‌باشد. یکنواختی جوانه‌زنی (GU) نیز حاصل تفاضل زمان از ۱۰ درصد جوانه‌زنی تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی (رابطه ۶) است. شاخص بنیه بذر نیز بر اساس رابطه ۷ محاسبه شد (ابدوالباکی و اندرسون^۳، ۱۹۷۵)؛ که در رابطه SVI (۷) شاخص بنیه بذر، FGP درصد جوانه‌زنی نهایی و MSH میانگین طول گیاهچه (حاصل جمع طول ریشه‌چه و ساقه‌چه) می‌باشد.

$$\text{رابطه ۵)} \quad \text{GR50} = 1/D50$$

$$\text{رابطه ۶)} \quad \text{GU} = D90 - D10$$

$$\text{رابطه ۷)} \quad \text{SVI} = \frac{\text{FGP} \times \text{MSH}}{100}$$

تابع‌های مورد استفاده

سپس در ادامه به منظور محاسبه دماهای کاردینال جوانه‌زنی، ابتدا توسط رابطه لجستیکی شماره (۸)، کسرهای مختلف جوانه‌زنی محاسبه شد (کامکار و

همکاران، ۲۰۱۲)؛ که در این رابطه، GP_{max} حداکثر درصد جوانه‌زنی؛ p زمان لازم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و k شیب منحنی در نقطه b است. به منظور برآورد زمان لازم برای تکمیل شدن ۱۰ درصد از جوانه‌زنی کل (D10)، ۵۰ درصد (D50) و ۹۰ درصد (D90) جوانه‌زنی نهایی از برنامه جرمین^۴ استفاده شد. این برنامه D10، D50 و D90 را برای هر پلات از طریق درون‌یابی^۵ منحنی افزایش جوانه‌زنی در مقابل زمان محاسبه می‌کند.

$$\text{رابطه ۸)} \quad G = \frac{GP_{max}}{1 + \exp[k(t-p)]}$$

هر چقدر مدت زمان رسیدن به ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی کمتر باشد بدین معنی است که جوانه‌زنی زودتر شروع شده یا به عبارتی سرعت جوانه‌زنی بیشتر است و هر چه مدت زمان یکنواختی جوانه‌زنی کمتر باشد نشان‌دهنده جوانه‌زنی یکنواخت‌تر بذرها می‌باشد (سلطانی^۶ و همکاران، ۲۰۱۴).

GR نیز سرعت جوانه‌زنی را برای درصدهای مختلف نشان می‌دهد، برای برآورد زمان تا درصدهای مختلف جوانه‌زنی و همچنین پارامترهای مدل‌ها (دندان مانند، دو تکه‌ای و بتا؛ جدول ۱) از نرم افزار SigmaPlat ver 14 استفاده شد.

سپس در ادامه این مطالعه داده‌های جمع‌آوری شده از میانگین‌های درصد جوانه‌زنی در طی زمان در هر سطح تیمار دمایی برای پیش‌بینی رفتار جوانه‌زنی دو رقم گیاه گوجه‌فرنگی و به منظور ساخت و ارزیابی تابع معروف لجستیک سه پارامتره (رابطه ۱۲) مورد استفاده قرار گرفت (شافی و بارنی^۷، ۲۰۰۱).

$$\text{رابطه ۱۲)} \quad y = a / (1 + \exp^{-b(x-x_0)})$$

که در این تابع y نشان‌دهنده درصد جوانه‌زنی در هر رقم گیاه گوجه‌فرنگی، x نشان‌گر زمان برحسب ساعت، a بیانگر مجانب بالای منحنی یا همان حداکثر مقدار جوانه‌زنی، b شیب منحنی یا آهنگ تغییر صفت مورد بررسی به ازای زمان در هر سطح دمایی و در نهایت x_0

⁴ Germin

⁵ Interpolated

⁶ Soltani

⁷ Shafii and Barney

¹ Maguire

² Esehie

³ Abdul-baki and Anderson

جدول ۱. تابع‌های دوتکه‌ای، بتا و دندان‌های به منظور تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی

Table 1. Segmented, beta and dent-like models to determine the cardinal temperatures of germination.

مدل‌ها Models	روابط ریاضی Mathematical relations	منبع References
(رابطه ۹) مدل دو تکه‌ای Segmented model	$f(T) = \frac{T - T_b}{T_o - T_b}$ $\text{if } T_b < T < T_o$ $f(T) = 1 - \left(\frac{T - T_o}{T_c - T_o} \right)$ $\text{if } T_o \leq T < T_c$ $f(T) = 0$ $\text{if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$	(مواله ^۱ و همکاران، ۱۹۹۴)
(رابطه ۱۰) مدل بتا Beta model	$f(T) = \left(\frac{(T - T_b)}{(T_o - T_b)} \right) \left(\frac{(T_c - T)}{(T_c - T_o)} \right)^{\left(\frac{(T_c - T_o)}{(T_o - T_b)} \right)^c}$ $\text{if } T > T_b \text{ and } T < T_c$ $f(T) = 0 \text{ if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$	(ین ^۲ و همکاران، ۱۹۹۵)
(رابطه ۱۱) مدل دندان‌های Dent-like model	$f(T) = \frac{T - T_b}{T_{o1} - T_b}$ $\text{if } T_b < T \leq T_{o1}$ $f(T) = \frac{T_c - T}{T_c - T_{o2}}$ $\text{if } T_{o2} < T < T_c$ $f(T) = 1 \text{ if } T_{o1} \leq T \leq T_{o2}$ $f(T) = 0 \text{ if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$	(پپر ^۳ و همکاران، ۱۹۹۶)

در این توابع T متوسط دمای روزانه، T_b دمای پایه، T_o دمای مطلوب، T_{o1} دمای مطلوب تحتانی، T_{o2} دمای مطلوب فوقانی و T_c دمای سقف می‌باشد.

In these functions, T is the average daily temperature, T_b is the base temperature, T_o is the optimum temperature, T_{o1} is the lower optimum temperature, T_{o2} is the upper optimum temperature and T_c is the ceiling temperature.

همکاران، ۲۰۱۳).

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}$$

(رابطه ۱۳)

(رابطه ۱۴)

$$AICc = n \cdot \ln \left(\frac{RSS}{n} \right) + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1}$$

محاسبات آماری

قبل از انجام محاسبات آماری آزمون نرمال بودن باقی‌مانده داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک انجام گرفت و فقط داده‌های مربوط به درصد جوانه‌زنی با استفاده از روش $\text{Arc sin} \sqrt{x}$ تبدیل شدند.

زمانی که در آن شیب منحنی در هر سطح دمایی خطی می‌شود. ارزیابی برازش تمام تابع‌ها با کمک ضریب تبیین (R^2) انجام گرفت (رابطه ۱۳) که در رابطه آن SSR مجموع مربعات رگرسیون و SST مجموع مربعات کل می‌باشد. همچنین برای انتخاب بهترین تابع از شاخص آکائیک تصحیح شده ($AICc^3$) (رابطه ۱۴) استفاده شد (بورنهام^۴ و همکاران، ۲۰۱۱). که در رابطه آن RSS^4 جمع مربعات باقی‌مانده؛ n، تعداد نمونه و k، تعداد پارامترهای تابع مورد نظر می‌باشد. بهترین تابع در مقایسه تابع‌ها، تابعی است که R^2 نزدیک به یک و مقدار AICc کمتر یا منفی‌تری داشته باشد (دهقان^۵ و

¹ Mwale

² Yin

³ Piper

⁴ Burnham

⁵ Dehghan

تجزیه واریانس داده‌ها بوسیله نرم افزار ver 9.3 SAS (سس انستیتو^۱، ۲۰۱۲) و دستور ANOVA به‌صورت مدل آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. میانگین‌ها با آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند. همچنین برازش منحنی‌ها و رسم شکل‌ها با کمک نرم‌افزارهای Systat SigmaPlot v14 انجام شد. در ضمن با توجه به معنی‌دار بودن اثر متقابل فاکتورهای مورد بررسی برش‌دهی برهمکنش‌ها در سطح هر رقم با استفاده از نرم افزار SAS v9.3 و دستور Slice صورت گرفت و مقایسه میانگین سطوح دمایی و رتبه‌بندی آن‌ها در سطح هر رقم به‌طور مجزا انجام شد (سلطانی، ۲۰۰۷).

نتایج و بحث

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان‌دهنده اثر معنی‌دار برهمکنش رقم و دما بر تمام صفات مورد مطالعه در این آزمایش بود (جدول ۲). با توجه به اینکه برهمکنش‌ها برای صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود از مقایسه میانگین اثرات اصلی خودداری شد و مقایسه برهمکنش‌ها مورد بررسی و بحث قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین تأثیر دما بر مولفه‌های جوانه‌زنی نهایی نشان داد که در دماهای ۵ تا ۱۰ درجه سلسیوس و همچنین دمای ۳۵ درجه سلسیوس، هیچ‌کدام از ارقام جوانه‌زنی نداشتند. افزایش دما، بیش از ۱۰ درجه سلسیوس، موجب شروع جوانه‌زنی در بذرهاى هر دو رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی و قرمز گیلای شکل شد، به نحوی که در رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی شکل بیشترین میزان صفات درصد جوانه‌زنی نهایی (با میانگین ۹۶/۷ درصد)، طول ریشه‌چه (با میانگین ۰/۳۴۰ میلی‌متر)، طول ساقه‌چه (با میانگین ۰/۳۵۰ میلی‌متر) و شاخص بنیه بذر (با میانگین ۳۲/۸۰) در تیمار دمایی ۲۰ درجه سلسیوس و صفات یکنواختی جوانه‌زنی (با میانگین ۲۳/۵۹ ساعت)، ضریب سرعت جوانه‌زنی (با میانگین ۰/۰۲۰۲)، شاخص سرعت جوانه‌زنی (با میانگین ۱۷۱/۶۷)، سرعت جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها (با میانگین ۰/۱۸۷ تعداد بذر در هر ساعت) و نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه (با میانگین

۱/۲۳) در تیمار دمایی ۲۵ درجه سلسیوس حاصل شد. همچنین در این رقم بیشترین مقدار متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی در تیمار دمایی ۱۵ درجه سلسیوس (با میانگین ۷/۵۵ در هر ساعت) به دست آمد (جدول ۳). در رقم گوجه‌فرنگی قرمز گیلای شکل نیز بیشترین میزان صفت درصد جوانه‌زنی نهایی (با میانگین ۹۸/۳ درصد) در تیمار دمایی ۲۰ درجه سلسیوس مشاهده شد که البته اختلاف معنی‌داری با تیمار دمایی ۳۰ درجه سلسیوس نداشت، همچنین بیشترین مقدار یکنواختی جوانه‌زنی (با میانگین ۲۳/۲۴ ساعت) نیز در تیمار دمایی ۲۵ درجه سلسیوس مشاهده شد. در ادامه نتایج مقایسه میانگین برهمکنش رقم در دما نشان داد که در این رقم بالاترین نرخ سرعت جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها (با میانگین ۰/۱۸۱ تعداد بذر در هر ساعت)، طول ریشه‌چه (با میانگین ۳/۵۴۷ میلی‌متر)، طول ساقه‌چه (با میانگین ۰/۷۴۳ میلی‌متر)، نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه (با میانگین ۴/۷۷۳) و شاخص بنیه بذر (با میانگین ۳۳۱/۲۷) در تیمار دمایی ۲۵ درجه سلسیوس و بیشترین مقدار صفات متوسط زمان لازم برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی (با میانگین ۷/۵۳ در هر ساعت) و ضریب سرعت جوانه‌زنی (با میانگین ۳۵/۸۵) در تیمار دمایی ۲۵ درجه سلسیوس به‌دست آمد. همچنین بیشترین مقدار شاخص سرعت جوانه‌زنی (با میانگین ۱۶۷/۳۳) نیز در تیمار دمایی ۳۰ درجه سلسیوس حاصل شد (جدول ۳).

محققان دیگری نیز این مطلب را تأیید کرده‌اند که افزایش دما تا حد بهینه موجب افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌شود، اما ادامه افزایش از حد بهینه، درصد و سرعت جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد (باث و همکاران، ۲۰۲۰؛ برادفورد^۲، ۲۰۰۲؛ شفیع و پرایس^۳، ۲۰۰۱). نتایج بسیاری از مطالعات نشان داده است که سرعت نسبی جوانه‌زنی بذرها، در یک دمایی و کمتر از آن، برابر با صفر است و به تدریج با افزایش دما، این سرعت نسبی افزایش خواهد یافت و با رسیدن به حداکثر میزان خود در دمای بهینه، به تدریج و با بیشتر شدن دما در فراتر از

² Bradford

³ Shafii and Price

¹ SAS Institute

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر دما بر برخی صفات جوانه‌زنی دو رقم گیاه گوجه‌فرنگی

Table 2. Analysis of variance (mean squares) for the effects of temperature on some germination traits in two cultivars of *Solanum lycopersicum* L.

منابع تغییر Source of Variation	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی نهایی FGP	متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی MGT	ضریب سرعت جوانه‌زنی CVG	شاخص سرعت جوانه‌زنی GRI	سرعت جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها GR50
Variety (V) رقم	1	0.0297 ^{ns}	0.512 ^{**}	2409.24 ^{**}	7.71 ^{ns}	0.00000058 ^{**}
Temperature دما (T)	6	3.2632 ^{**}	58.896 ^{**}	358.51 ^{**}	35283.91 ^{**}	0.00042172 ^{**}
V × T رقم × دما (T)	6	0.0191 [*]	0.164 ^{**}	358.45 ^{**}	141.32 ^{**}	0.00000055 ^{**}
(Error) خطا	28	0.0074	0.299	1.65	2.26	0.00000004
CV ضریب تغییرات (%)		10.95	5.67	16.99	2.00	2.42
منابع تغییر Source of Variation	درجه آزادی df	یکنواختی جوانه‌زنی GU	طول ریشه‌چه RL	طول ساقه‌چه SL	نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه RL/SL ratio	شاخص بنیه بذر SVI
Variety (V) رقم	1	54.86 [*]	4.4492 ^{**}	0.1131 ^{**}	12.915 ^{**}	40470.57 ^{**}
Temperature دما (T)	6	2629.87 ^{**}	2.8576 ^{**}	0.2652 ^{**}	10.807 ^{**}	25088.05 ^{**}
V × T رقم × دما (T)	6	49.08 ^{**}	2.2273 ^{**}	0.1074 ^{**}	3.833 ^{**}	19486.20 ^{**}
(Error) خطا	28	12.19	0.0018	0.00015	0.0046	42.90
CV ضریب تغییرات (%)		17.14	9.01	7.84	6.63	14.73

^{ns}, * و **: به ترتیب بیانگر عدم معنی‌داری، معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ درصد

^{ns}, * and **: not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

FGP, Final germination percentage; MGT, Mean germination time; CVG, Coefficient of Uniformity of Germination; GRI, Germination Rate Index; GR50, Germination Rate 50% of seeds; GU, Germination uniformity; RL, Radical length; SL, Shoot length; RL/SL ratio, Radical length / Shoot length ratio; SVI, Seed vigor index

در شکل ۱ تابع‌های برازش داده شده به سرعت جوانه‌زنی نسبی در مقابل دما برای کسرهای ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی دو رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی و قرمز گیلانی شکل ارائه شده است. در برازش تابع‌ها برای کلیه مقادیر سرعت جوانه‌زنی از تابع‌های بتای چهار پارامتره، دو تکه‌ای و دندان‌های استفاده شده است. بر اساس خروجی توابع، مشخص گردید که دو تابع دوتکه‌ای و بتا، برای کسرهای جوانه‌زنی محاسبه شده اختلاف قابل توجهی در برآورد دماهای کاردینال ندارند. همچنین مشخص گردید که تابع دوتکه‌ای ($R^2 \geq 0.93$) و $AIC_c \leq -70$ نسبت به دو تابع دیگر مورد استفاده در این مطالعه، دقت مناسب‌تری را به‌منظور برآورد دماهای

حد بهینه افت خواهد کرد و در دمای سقف به صفر خواهد رسید (سلطانی^۱ و همکاران، ۲۰۰۶).

نتایج به‌دست آمده از توابع نشان داد که میانگین درصد جوانه‌زنی بذر رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی شکل در دماهای ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب برابر ۹۳، ۹۶، ۹۵ و ۸۶ درصد بود. میزان جوانه‌زنی بذر رقم قرمز گیلانی شکل در بازه دمایی اشاره شده به ترتیب برابر ۹۵، ۹۸، ۹۳ و ۹۸ درصد بود. هیچکدام از دو رقم گوجه‌فرنگی در دماهای ۵، ۱۰ و ۳۵ درجه سلسیوس توانایی جوانه‌زنی را از خود نشان ندادند.

¹ Soltani

لجم اورک شیرپور و همکاران: برآورد دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی...

کاردینال در هر دو رقم گوجه‌فرنگی ارائه کرد (جدول ۴).
جوانه‌زنی رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی شکل حداکثر ۱۱/۵ درجه سلسیوس تخمین زده شد.
بیشترین میزان دمای پایه کسر جوانه‌زنی ۵۰ درصد،
برای رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی شکل، محاسبه شده
توسط تابع دوتکه‌ای (۱۱/۲۵ درجه سلسیوس) به دست
آمد. بر اساس تمامی توابع برازش داده شده، دمای پایه
هم‌چنین بر اساس تابع دو تکه‌ای، دمای پایه رقم
قرمز گیلانی شکل، در محدوده بین ۱۰ تا ۱۱ درجه
سلسیوس متفاوت بود. در تمامی توابع استفاده شده،
برای کسرهای مختلف جوانه‌زنی، دمای بیشینه، حداقل

جدول ۳. برهمکنش رقم × دما بر برخی صفات جوانه‌زنی گیاه گوجه‌فرنگی (برش‌دهی برهمکنش‌ها دما در سطح هر رقم)

Table 3. Variety × temperature interaction on some germination traits in *Solanum lycopersicum* L. seed (sliced by variety levels)

رقم Variety	دما Temperature (°C)	درصد جوانه‌زنی نهایی FGP (%)	متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی MGT (hour)	ضریب سرعت جوانه‌زنی CVG	شاخص سرعت جوانه‌زنی GR (%/hour)	سرعت تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی GR50 (1/hour)
گوجه‌فرنگی زرد گلابی <i>S. Lycopersicom</i> L. Var. Yellow Pear	5	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^d
	10	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^d
	15	93.3 ^{ab}	7.55 ^a	0.00099 ^c	72.67 ^d	0.0083 ^c
	20	96.7 ^a	5.77 ^b	0.00134 ^b	133.00 ^c	0.0127 ^b
	25	95.0 ^a	3.77 ^c	0.00202 ^a	171.67 ^a	0.0187 ^a
	30	86.7 ^b	3.49 ^c	0.00198 ^a	152.00 ^b	0.0187 ^a
	35	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^d
گوجه‌فرنگی قرمز گیلانی <i>S. Lycopersicom</i> L. Var. Cerasiformi	5	0.0 ^b	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d
	10	0.0 ^b	0.0 ^d	0.020 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d
	15	95.0 ^a	7.53 ^a	35.85 ^a	74.33 ^c	0.009 ^c
	20	98.3 ^a	6.52 ^b	32.07 ^a	115.67 ^b	0.012 ^b
	25	93.3 ^a	3.95 ^c	18.43 ^b	166.00 ^a	0.0181 ^a
	30	98.3 ^a	4.13 ^c	19.67 ^b	167.33 ^a	0.0176 ^a
	35	0.0 ^b	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d
رقم Variety	دما Temperature (°C)	یکنواختی جوانه‌زنی GU (hour)	طول ریشه‌چه RL (mm)	طول ساقه‌چه SL (mm)	نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه RL/SL ratio	شاخص بنیه بذر SVI
گوجه‌فرنگی زرد گلابی <i>S. Lycopersicom</i> L. Var. Yellow Pear	5	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^c
	10	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^c
	15	31.12 ^b	0.207 ^c	0.0 ^d	0.0 ^c	19.28 ^c
	20	52.67 ^a	0.340 ^a	0.350 ^a	0.973 ^b	32.80 ^a
	25	23.59 ^b	0.273 ^b	0.223 ^b	1.230 ^a	25.97 ^b
	30	43.20 ^a	0.183 ^c	0.173 ^c	1.063 ^{ab}	15.88 ^d
	35	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^c
گوجه‌فرنگی قرمز گیلانی <i>S. Lycopersicom</i> L. Var. Cerasiformi	5	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^d
	10	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^d
	15	31.18 ^b	0.240 ^d	0.0 ^d	0.0 ^c	22.80 ^d
	20	52.21 ^a	0.530 ^c	0.127 ^c	4.317 ^a	52.08 ^c
	25	23.24 ^b	3.547 ^a	0.743 ^a	4.773 ^a	331.27 ^a
	30	27.95 ^b	1.243 ^b	0.603 ^b	2.060 ^b	122.33 ^b
	35	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^c	0.0 ^d

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون و در سطح هر رقم دارای اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد نیستند.

Means with the same letters in each column related to each variety are not significantly different at 5% probability level based on Tukey's test.

FGP, Final germination percentage; MGT, Mean germination time; CVG, Coefficient of Uniformity of Germination; GRI, Germination Rate Index; GR50, 50% Germination Rate; GU, Germination uniformity; RL, Radical length; SL, Shoot length; RL/SL ratio, Radical length / Shoot length ratio; SVI, Seed vigor index.

میزان حداکثر جوانه‌زنی زمان نیاز دارد در حالی که این زمان برای رقم قرمز گیلای شکل، ۸۹/۹۷ ساعت بود (شکل ۲). جوانه‌زنی بیشتر رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی شکل در دماهای پایین‌تر نسبت به رقم گوجه‌فرنگی قرمز گیلای شکل حاکی از انطباق بیشتر این رقم با دماهای پایین‌تر و مطلوب بودن آن برای کشت در نقاط معتدل‌تر می‌باشد. برای توصیف واکنش جوانه‌زنی بذرها به دما، از توابع مختلف می‌توان استفاده کرد که در بین آن‌ها، تابع دوتکه‌ای، بتا و دندانه‌ای بیشترین کاربرد را دارند (کریم‌زاده‌سورش‌جانی و همکاران، ۲۰۱۹). مقایسه آماره‌های ضریب تبیین و شاخص آیکائیک نشان داد که استفاده از تابع دوتکه‌ای به منظور توصیف واکنش جوانه‌زنی رقم‌های گوجه‌فرنگی مناسب‌تر است؛ بنابراین، دماهای پایه، بهینه و سقف به ترتیب برای رقم زرد گلابی شکل ۱۱/۲۵، ۲۸/۷۲ و ۳۵ درجه سلسیوس و برای رقم قرمز گیلای شکل ۱۰/۹۷، ۲۸/۶۱ و ۳۵ درجه سلسیوس بود. نتایج بیان‌گر این واقعیت است که گوجه‌فرنگی، در دماهای سرد توانایی جوانه‌زنی ندارد.

بر این اساس پیشنهاد می‌شود تا تاریخ کشت ارقام زرد گلابی و قرمز گیلای شکل هنگامی باشد تا علاوه بر اتمام یخبندان زمستان، دما به تدریج به بیش از ۱۰ درجه سلسیوس برسد و حداقل دمای لازم برای جوانه‌زنی بذرها و سبز شدن گیاهچه این دو رقم جدید فراهم آید. تفاوت در واکنش جوانه‌زنی بذرها ارقام گوجه‌فرنگی، ممکن است ناشی از ویژگی‌های ژنتیکی درونی خود بذرها باشد. در این پژوهش مشخص شد که بهترین تابع در برآورد دماهای کاردینال جوانه‌زنی ارقام مطالعه شده، مدل دو تکه‌ای است.

عدم یکنواختی در زمان جوانه‌زنی، وابستگی زمان جوانه‌زنی به دما و وقوع نرخ بالای جوانه‌زنی در طیف وسیعی از دما سه ویژگی برجسته در شکل ۲ برای هر دو رقم مورد مطالعه بودند که این نتایج با آنچه که توسط پوررضا و بحرانی^۲ (۲۰۱۲) برای گیاه خارمریم و

اختلاف را در هر دو رقم نشان داد و میزان آن بین ۳۴ تا ۳۶ درجه سلسیوس تخمین زده شد (جدول ۴). دماهای بهینه اول و دوم حاصل شده برای کسرهای جوانه‌زنی ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد براساس نتایج حاصل از خروجی تابع دندان‌مانند به ترتیب ۲۹/۹۵ تا ۲۶/۳۳؛ ۳۰/۲۶ تا ۲۳/۹۱ و ۲۹/۰۲ تا ۲۶/۱۱ درجه سلسیوس برای رقم زرد گلابی شکل و ۲۹/۹۸ تا ۲۳/۸۱؛ ۲۹/۸۷ تا ۲۳/۷۱ و ۲۹/۶۶ تا ۲۴/۷۵ درجه سلسیوس برای رقم قرمز گیلای شکل بود (جدول ۴).

هم‌چنین در رقم گوجه‌فرنگی زرد گلابی شکل حداقل زمان لازم برای رسیدن به ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی (f_0) بر اساس تابع دوتکه‌ای به ترتیب ۳۵/۰، ۴۲/۶ و ۶۵/۷ ساعت، بر اساس تابع بتا به ترتیب ۳۵/۷، ۴۹/۰ و ۷۸/۴ ساعت و بر اساس تابع دندان‌مانند ۳۴/۵، ۵۳/۵ و ۷۱/۶ ساعت محاسبه گردید. این در حالی بود که در رقم گوجه‌فرنگی قرمز گیلای شکل، حداقل زمان لازم برای رسیدن به ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی بر اساس تابع دوتکه‌ای به ترتیب ۳۹/۱، ۴۴/۵ و ۶۰/۰ ساعت، بر اساس تابع بتا به ترتیب ۴۵/۷، ۵۲/۳ و ۷۰/۸ ساعت و بر اساس تابع دندان‌مانند به ترتیب ۴۸/۸، ۵۵/۳ و ۷۲/۰ ساعت به دست آمد (جدول ۴).

دیگر محققان نیز دمای مطلوب جوانه‌زنی گوجه‌فرنگی را در دامنه بین ۲۸-۲۷ درجه سلسیوس و دمای حداکثر و حداقل لازم برای توقف جوانه‌زنی این گیاه را به ترتیب ۹ و ۴۰ درجه سلسیوس گزارش کردند (سوسرای^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). هم‌چنین بنابر گزارش این محققان بین سرعت جوانه‌زنی و دما تا حد مطلوب جوانه‌زنی رابطه خطی مثبتی وجود داشت.

نتایج به‌دست آمده از تابع لجستیک سه پارامتره نشان داد که رقم زرد گلابی شکل در مقایسه با قرمز گیلای، به افزایش دماهای بیش بهینه، حساس‌تر است و با افزایش دما از ۲۵ به ۳۰ درجه سلسیوس جوانه‌زنی از ۹۷/۷۹ به ۸۵/۰۹ درصد کاهش یافت. هم‌چنین، سرعت جوانه‌زنی رقم زرد گلابی شکل، در تمامی دماهای مورد بررسی، بیشتر از رقم قرمز گیلای بود (جدول ۵). برای مثال در دمای ۲۰ درجه سلسیوس، رقم زرد گلابی به ۷۸/۲۹ ساعت برای رسیدن به ۵۰٪

² Pourreza and Bahrani¹ Sousaraei

لجم اورک شیرپور و همکاران: برآورد دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی...

جدول ۴. پارامترهای برآورد شده توسط توابع بتای چهار پارامتره، دندانهای و دو تکه‌ای برای دماهای کاردینال دو رقم گوجه‌فرنگی

Table 4. Estimated parameters for the cardinal temperatures of two tomato variety using four parameter beta, dent-like and segmented functions.

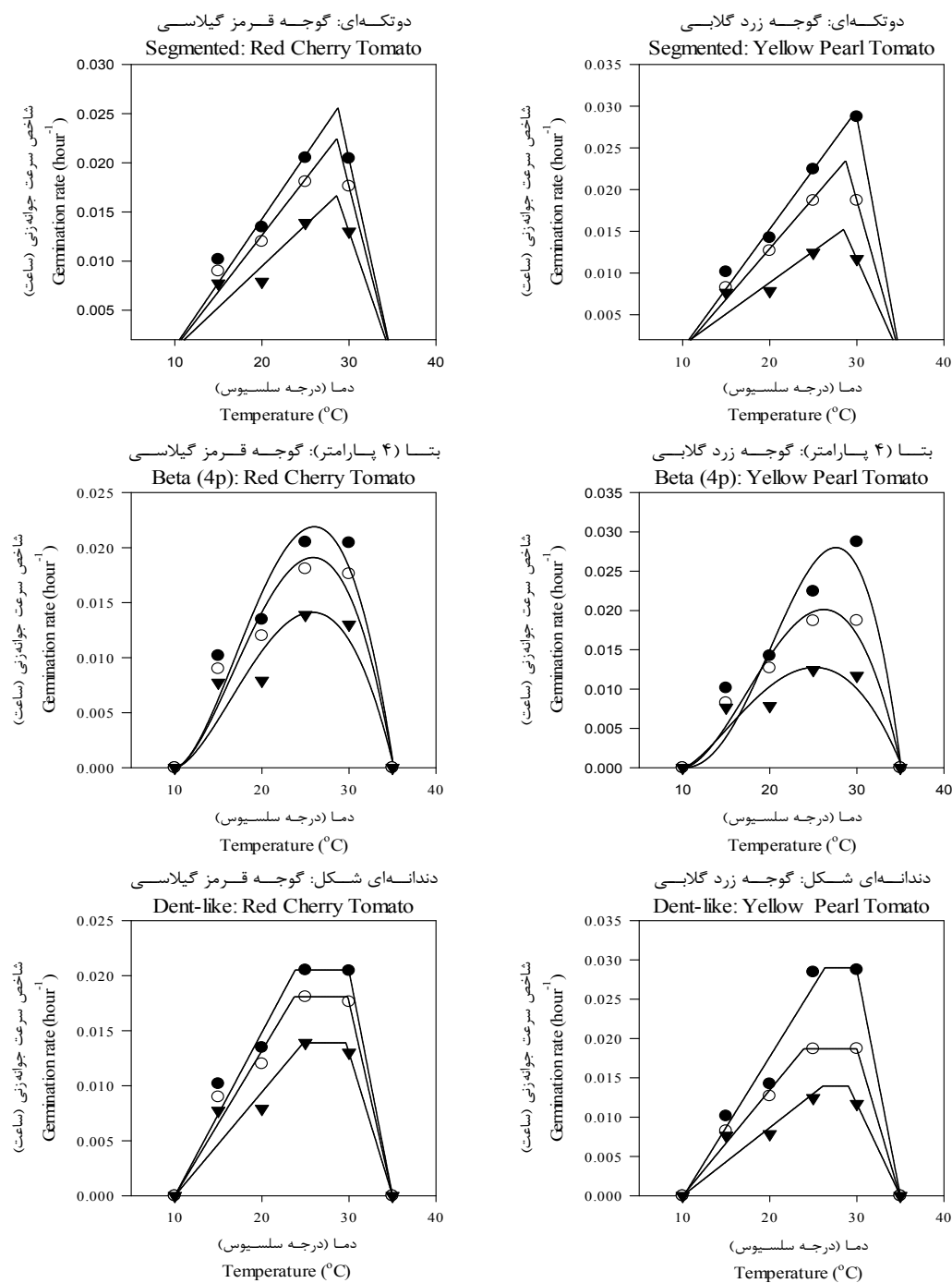
Yellow pearl (زرد گلابی)									
	دو تکه‌ای Segmented			بتا Beta			دندانهای شکل Dent-like		
	10	50	90	10	50	90	10	50	90
T _b	10.3±1.08	11.25±0.94	11.66±2.79	10±0.60	10±0.92	10±0.56	10.11±1.92	10±0.17	10±0.37
T _o	29.8±0.38	28.72±0.40	28.48±1.21	27.59±1.80	26.20±1.43	25.14±2.70	-	-	-
T _{o1}	-	-	-	-	-	-	26.33±0.68	23.91±2.20	26.11±0.29
T _{o2}	-	-	-	-	-	-	29.95±0.44	30±2.60	29.02±0.75
T _c	34.02±2.00	35±0.31	35±0.92	35.09±0.66	35.11±0.57	35.24±1.15	35±0.72	34.94±0.45	35±1.47
f _o	35±0.30	42.59±1.92	65.68±8.33	35.70±5.43	49±4.09	78.42±12.72	34.48±1.43	53.49±4.95	71.64±1.40
R ²	0.99	0.99	0.93	0.88	0.94	0.83	0.97	0.99	0.92
AICc	-72.82	-77.58	-70.26	-58.96	-67.17	-66.59	-64.58	-75.04	-66.77
Red Cherry tomato (قرمز گیلاسی)									
T _b	10.98±1.14	10.97±1.40	10.68±0.45	10±0.51	10±0.17	10±0.29	10±1.89	10±1.84	10±0.27
T _o	28.73±0.63	28.61±0.64	28.59±1.09	26.02±1.81	25.88±1.77	25.79±2.48	-	-	-
T _{o1}	-	-	-	-	-	-	23.81±3.52	23.71±3.41	24.75±6.44
T _{o2}	-	-	-	-	-	-	29.98±1.06	29.87±1.08	29.66±1.89
T _c	35.00±0.49	35.00±0.49	35±0.84	35.14±0.73	35.14±0.72	35.16±1.02	35±0.75	35±0.75	35±1.29
f _o	39.06±2.78	44.48±3.12	60.00±7.11	45.66±5.62	52.33±6.18	70.76±11.51	48.76±7.32	55.34±8.17	72±17.49
R ²	0.98	0.98	0.94	0.91	0.91	0.84	0.97	0.97	0.93
AICc	-71.07	-72.71	-70.03	-63.63	-65.71	-65.46	-68.14	-69.86	-67.05

T_b, T_o, T_c, T_{o1}, T_{o2}, f_o and c are base temperature, optimum temperature, maximum temperature, lower limit of optimum temperature, upper limit of optimum temperature, minimum time to reach a given percentile, coefficient of regression (R²) and corrected Aikaike index (AIC_c), respectively.

جدول ۵. پارامترهای به دست آمده از برازش تابع لجستیک سه پارامتره بر درصد جوانه‌زنی دو رقم گوجه‌فرنگی در برابر زمان

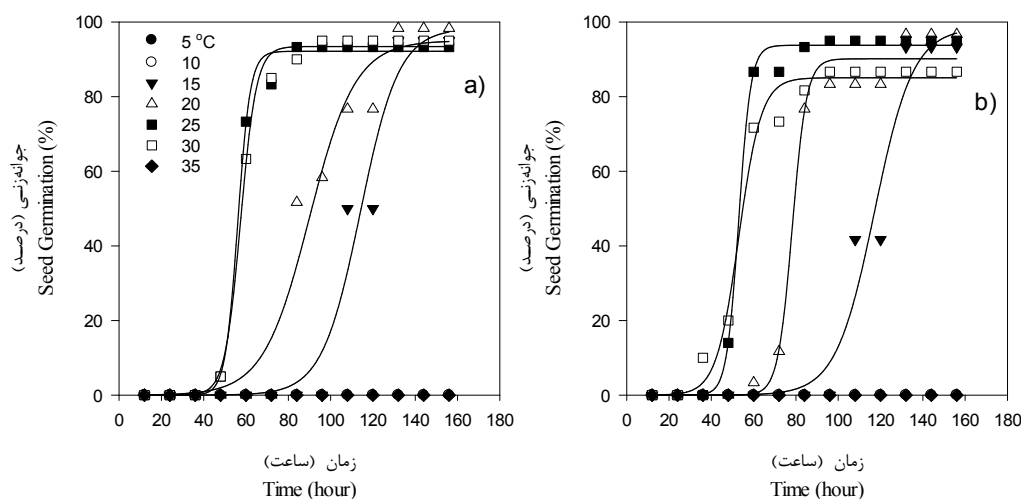
Table 5. Parameters estimated from the three-parameter logistic model fitted to germination percentage of two tomato cultivars against time.

	گوجه زرد گلابی Yellow pearl tomato				گوجه قرمز گیلاسی Red cherry tomato			
دما (°C) Temperature (°C)	15	20	25	30	15	20	25	30
بیشترین جوانه‌زنی بذر (GP _{max}) Maximum seed germination (GP _{max})	98.43	90.16	97.79	85.09	98.30	95.02	92.18	93.46
زمان ۵۰٪ جوانه‌زنی بذر (TG50) Time to 50% of seed germination (TG50)	117.17	78.29	52.96	53.02	114.08	89.94	56.07	57.43
شیب (p) Slope (p)	9.12	3.39	2.85	5.31	9.07	10.87	2.95	3.73
R ²	0.96	0.98	0.99	0.98	0.96	0.96	0.99	0.99



شکل ۱. تابع‌های دو تکه‌ای، بتا چهار پارامتره و دندانهای برآزش داده شده بر سرعت جوانه‌زنی ارقام گوجه‌فرنگی گلابی شکل زرد رنگ و قرمز گیلانی به‌منظور تعیین دمای کاردینال جوانه‌زنی. خطوط با دایره‌های توپر سیاه، توخالی و مثلث سیاه به ترتیب سرعت تا ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی می‌باشند.

Figure 1. Segmented, four-parameter beta and dent-like models fitted to seed germination rate of Yellow pearl and Red cherry tomato cultivars under different temperatures to determine cardinal temperatures. Regression lines with black solid and hollow circles and black triangles denote seed germination rate up to 10, 50 and 90% respectively.



شکل ۲. برازش تابع لجستیک سه پارامتره بر درصد جوانه‌زنی گوجه قرمز گیلانی (a) و زرد گلابی (b)

Figure 2. Three parameters Logistic model fitted to seed germination percentage of Red cherry tomato (a) and Yellow pearl tomato (b)

غلام‌حسینی^۶ و همکاران، ۲۰۱۶)، اما در نتایج این پژوهش مشخص گردید که تابع دوتکه‌ای برآورد مناسب‌تری را برای تخمین دماهای کاردینال به‌دست می‌دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که در هر دو رقم گوجه‌فرنگی تمام مولفه‌های جوانه‌زنی مورد مطالعه نسبت به تغییرات دمایی تأثیر می‌پذیرند. به نحوی که در دماهای بالاتر از دمای حداقل جوانه‌زنی با افزایش دما، هم میزان جوانه‌زنی و هم سرعت آن به شکل خطی افزایش پیدا کرد و این افزایش تا دمای مطلوب ادامه داشت و پس از یک توقف در دمای بهینه روند تغییرات درصد و سرعت جوانه‌زنی به ازاء افزایش دما کاهشی شد. نتایج نشان داد با استفاده از توابع رگرسیونی غیر خطی به خوبی می‌توان واکنش جوانه‌زنی بذرهای هر دو رقم گوجه‌فرنگی را به دما کمی‌سازی نمود. به‌طور کلی و براساس نتایج در بین توابع رگرسیونی غیر خطی آزمون شده در این پژوهش، تابع دوتکه‌ای با توجه به کمترین AICc و بیشترین R^2 بهترین برازش را بر داده‌های جوانه‌زنی نشان داد و به‌خوبی سرعت جوانه‌زنی بذر رقم‌های گوجه‌فرنگی مورد مطالعه را در برابر دما، توصیف نمود. همچنین تابع

آندرده^۱ و همکاران (۲۰۱۸) برای ۷ گونه گیاه مدیریت‌های گزارش شده بود هم‌خوانی داشت.

نتایج پژوهش انجام شده توسط کامکار^۲ و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که استفاده از تابع‌های رگرسیون غیر خطی می‌تواند به خوبی در تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی ارقام آفتابگردان استفاده شود. نتیجه پژوهش آن‌ها نشان داد که تابع دندان‌های شکل تابع برتر در ارزیابی بین تابع‌های بکار رفته بود. بر اساس این تابع دمای بهینه جوانه‌زنی ژنوتیپ فرخ، ۳۳/۲۶ درجه سلسیوس برآورد گردید.

فلاحی^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از انواع توابع رگرسیونی غیرخطی، دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر را برای دو رقم ریحان تعیین نمودند و نتیجه مطالعه انجام شده توسط آن‌ها، نشان داد که دمای کاردینال برآورد شده، بسته به تابع متفاوت است و در تابع برتر بر اساس ضریب تبیین به دست آمده، دمای پایه و بهینه به ترتیب ۷ و ۲۴/۹۷ درجه سلسیوس برآورد گردید. در برخی دیگر از مطالعات انجام شده، تابع دندان‌های بهترین نتیجه را در تخمین دماهای کاردینال داشت (کامکار^۴ و همکاران، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲؛ حیدری^۵ و همکاران، ۲۰۱۴؛

¹ Andrade

² Kamkar

³ Fallahi

⁴ Kamkar

⁵ Heidari

⁶ Gholamhosseini

لجستیک سه پارامتره نیز در پیش‌بینی جوانه‌زنی
بذرهای هر دو رقم گیاه گوجه‌فرنگی در طی زمان در
دماهای مختلف جوانه‌زنی، برازش مناسبی داشت؛
بنابراین به منظور برآورد دماهای کاردینال گیاه
گوجه‌فرنگی و به منظور پیش‌بینی و تعیین زمان مناسب
کاشت گونه‌های جدید این گیاه در یک منطقه می‌توان
از خروجی این تابع‌ها استفاده کرد.

منابع

- Abdul-Baki, A.A. and Anderson, J.D. 1973. Vigor determination of soybean seed by multiple criteria. *Crop Science*, 13(6): 630-633. <https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x>
- Andrade, J.A., Cadima, J. and Abreu, F.M. 2018. Modeling germination rate and cardinal temperatures of seven Mediterranean crops. *Journal of Crop Improvement*, 32(6): 878-902. <https://doi.org/10.1080/15427528.2018.1542362>
- Baath, G.S., Kakani, V.G., Gowda, P. H., Rocateli, A.C., Northup, B.K., Singh, H. and Katta, J.R. 2020. Guar responses to temperature: Estimation of cardinal temperatures and photosynthetic parameters. *Industrial Crops and Products*, 145: 111940. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111940>
- Biradar, G., Laxman, R.H., Namratha, M.R., Thippeswamy, M., Shivashankara, K.S., Roy, T.K. and Sadashiva, A.T. 2019. Induction temperature enhances antioxidant enzyme activity and osmoprotectants in tomato. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(3): 1284-1293. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.803.152>
- Bradford, K.J. 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50(2): 248-260. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0248:AOHTTQ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0248:AOHTTQ]2.0.CO;2)
- Burnham, K.P., Anderson, D.R. and Huyvaert, K.P. 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 65(1): 23-35. <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1029-6>
- Copeland, L.O. and McDonald, M.B. 2001. *Principles of Seed Science and Technology*. Dordrecht. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 18-25.
- Dehghan, A., Bannayan Awal, M., Khajehossaini, M., Izadi, E. and Mijani, S. 2013. Simulation of emergence pattern of weeds species in Corn (*Zea mays* L.) field based on sigmoidal models. *Journal of Plant Protection*, 26(4): 457-466. [In Persian with English Summary].
- Egli, D.B. and TeKrony, D.M. 1997. Species differences in seed water status during seed maturation and germination. *Seed Science Research*, 7(1): 3-12. <https://doi.org/10.1017/S0960258500003305>
- Esechie H. 1994. Interaction of salinity and temperature on the germination of sorghum. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 172(3): 194-199. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1994.tb00166.x>
- Etesami, M., Karizaki, A.R. and Torabi, B. 2015. Quantifying germination response of hibiscus tea (*Hibiscus sabdariffa*) seeds to temperature. *Iranian Journal of Seed Research*, 2(1): 73-80. [In Persian with English Summary].
- Fallahi, H.R., Mohammadi, M., Aghhavani-Shajari, M. and Ranjbar, F. 2015. Determination of germination cardinal temperatures in two basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivars using non-linear regression models. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2(4): 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.09.004>
- FAO. 2019. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT Statistical: anonymous: FAO. Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RF>.

- Gholamhosseini, M., Sedghi, G.F., Farzaneh, S. and Ghaderi-far, F. 2016. Quantifying of priming effect on the hydrothermal time of sesame seed using regression equations. PhD. dissertation, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. 60p. [In Persian with English Summary].
- Heidari, Z., Kamkar, B. and Masoud Sinaki, J. 2014. Determination of cardinal temperatures of milk thistle (*Silybum marianum* L.) germination. *Advances in Plants and Agriculture Research*, 1(5): 21-28. <https://doi.org/10.15406/apar.2014.01.00027>
- ISTA. 2012. International rules for seed testing. edition 2012. International seed testing association (ISTA). Bassersdorf, Switzerland.
- Javadi, A. and Khemari, S. 2018. Effect of different methods of seed preparation in tomato seed germination indices. *Journal of Seed Research*, 8(3): 42-50. [In Persian with English Summary].
- Jorwar, R.M., Ulemale, D. H. and Sarap, S. M. 2017. Economics of production and marketing of tomato in Amravati district. *International Research Journal of Agricultural Economics and Statistics*, 8(1): 56-59. <https://doi.org/10.15740/HAS/IRJAES/8.1/56-59>
- Kamkar, B., Ahmadi, M., Soltani, A. and Zeinali, E. 2008. Evaluating non-linear regression models to describe response of wheat emergence rate to temperature. *Seed Science and Biotechnology*, 2(2): 53-57.
- Kamkar, B., Al-Alahmadi, M.J., Mahdavi-Damghani, A. and Villalobos, F.J. 2012. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds to germinate using non-linear regression models. *Industrial Crops and Products*, 35(1): 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.06.033>
- Kamkar, B., Zolfagharnejad, H. and Khalili, N. 2015. Quantifying of germination rate response to temperature of three sunflower varieties using nonlinear regression models. *Plant Products Research Journal*, 22: 119-136.
- Karimzadeh Soureshjani, H. K., Bahador, M., Tadayon, M. and Dehkordi, A. G. 2019. Modelling seed germination and seedling emergence of flax and sesame as affected by temperature, soil bulk density, and sowing depth. *Industrial Crops and Products*, 141: 111770. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111770>
- Maguire, J.D. 1962. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2(2):176-177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Măgureanu, M., Sîrbu, R., Dobrin, D. and Gîdea, M. 2018. Stimulation of the germination and early growth of tomato seeds by non-thermal plasma. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 38(5): 989-1001. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9916-0>
- Marchiol, L., Filippi, A., Adamiano, A., Degli Esposti, L., Iafisco, M., Mattiello, A. and Braidot, E. 2019. Influence of hydroxyapatite nanoparticles on germination and plant metabolism of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) preliminary evidence. *Agronomy*, 9(4): 161-170. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040161>
- Matthews, S. and Khajeh Hosseini, M. 2006. Mean germination time as an indicator of emergence performance in soil of seed lots of Maize (*Zea mays* L.). *Seed Science and Technology*, 34(2): 339-347. <https://doi.org/10.15258/sst.2006.34.2.09>
- Mwale, S.S., Azam-Ali, S.N., Clark, J.A., Bradley, R.G. and Chatha, M.R. 1994. Effect of temperature on the germination of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Seed Science and Technology*, 22(3): 565-571.
- Nikoumaram, S., Bayatian, N. and Ansari, O. 2020. Quantification of the priming effect of canola (*Brassica napus* cv. Zafar) response to temperature using nonlinear regression models. *Iranian*

- Journal of Seed Research, 6(2): 111-123. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.29252/yujrs.6.2.111>
- Parmoon, G., Moosavi, S.A., Akbari, H. and Ebadi, A. 2015. Quantifying cardinal temperatures and thermal time required for germination of *Silybum marianum* seed. The Crop Journal, 3(2): 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.11.003>
- Piper, E.L., Boote, K.J., Jones, J.W. and Grimm, S.S. 1996. Comparison of two phenology models for predicting flowering and maturity date of soybean. Crop Science, 36(6): 1606-1614. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600060033x>
- Pourreza, J., and A. Bahrani. 2012. Estimating cardinal temperatures of Milk Thistle (*Silybum marianum*) Seed germination. American-Eurasian Journal Agricultural Environmental Science, 12(11): 1485-89.
- Rezaei Tamijani, M., Esfehiani, M. and Sabouri, A. 2016. Determination of cardinal temperatures for germination of *Salvia mirzayanii* using nonlinear regression. Iranian Journal of Field Crop Science, 48(2): 527-534. [In Persian with English Summary].
- Ronga, D., Galligani, T., Zaccardelli, M., Perrone, D., Francia, E., Milc, J. and Pecchioni, N. 2019. Carbon footprint and energetic analysis of tomato production in the organic vs the conventional cropping systems in Southern Italy. Journal of Cleaner Production, 220: 836-845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.111>
- Sabokkhiz, M., Malekzadeh Shafaroudi, S. and Mirshamsi Kakhki, A. 2015. Study on seed germination of two tomato purified cultivars under salinity stress. Iranian Journal of Field Crops Research, 12(4): 834-840. [In Persian with English Summary].
- Salehi Sardoei, A. 2019. Effect of allelopathy nut grass (*Cyperus rotundus*) weed on germination of tomato (*Solanum lycopersicum*) seed cultivars. Journal of Seed Research, 9(4): 31-40. [In Persian with English Summary].
- SAS Institute. 2012. SAS/OR 9.3 User's Guide: Mathematical Programming Examples. SAS institute.
- Shaffi, B. and Barney, D.L. 2001. Drying and cold storage affect germination of black huckleberry seeds. HortScience, 36(1): 145-147. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.36.1.145>
- Shaffi, B. and Price, W.J. 2001. Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 6(3): 356-366. <https://doi.org/10.1198/108571101317096569>
- Soltani, A. 2007. Application of SAS in Statistical Analysis. Jahad-e-Daneshgahi Mashhad Press (2th ed.). 182p. [In Persian].
- Soltani, A., Robertson, M.J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M. and Sarparast, R. 2006. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. Agricultural and Forest Meteorology, 138(1-4): 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.04.004>
- Soltani, E., Soltani, A. and Oveisi, M. 2014. Modelling seed aging effect on wheat seedling emergence in drought stress: optimizing germin program to predict emergence pattern. Journal of Crop Improvement, 15(2): 147-160. [In Persian with English Summary].
- Sousaraei, N., Torabi, B., Mashaieki, K., Soltani, E. and Mousavizadeh, S. J. 2021. Variation of seed germination response to temperature in tomato landraces: An adaptation strategy to environmental conditions. Scientia Horticulturae, 281: 109987. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109987>
- Yin, X., Kropff, M.J., McLaren, G. and Visperas, R.M. 1995. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. Agricultural and Forest Meteorology, 77(1-2): 1-16. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02236-Q](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02236-Q)

Research Article

Estimation of Cardinal Temperatures for Tomato (*Solanum lycopersicom*) Seed Germination Using Nonlinear Regression ModelsFatemeh Lajmorak Shirpour¹, Yazdan Izady², Seyed Amir Moosavi^{3,*}**Extended Abstract**

Introduction: Seed germination is one of the most important factors which determine the success of failure of crop establishment. In the absence of other environmental limiting factors such as moisture, temperature would determine the rate and overall seed germination. This research was conducted to investigate the effect of temperature regimes on seed germination, quantify the response of germination rate to temperature and determine the cardinal temperatures for different germination percentiles in *Solanum lycopersicom*.

Materials and Methods: Two-way factorial experiment including seven constant temperatures (5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 °C) and two tomato varieties (Red cherry: var. Cerasiformi and Yellow pearl: var. Yellow Pearl) was conducted based on a completely randomized design arranged with three replications at the seed technology laboratory of Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan in 2019. Beta, segmented and dent-like functions were used to determine the relationship between germination rate and temperature. Logistic model was used to describe the suitable pattern for the germination of these two cultivars in response to each temperature level.

Results: Results of analysis of variance showed that the interaction effect of temperature and cultivar was significant on all studied traits. Results showed that respectively at temperatures of 15, 20, 25 and 30 °C, total seed germination for yellow pearl tomato was 93%, 96%, 95% and 86% and for red cherry tomato was 95, 98, 93 and 98 percent. There was no seed germination for both tomato varieties at 5, 10 and 35 °C. Based on the results of the fitted models, it was revealed that among the tested non-linear regression models, segmented model described the germination rate of the studied tomato cultivars against the temperature the best ($AIC_c \leq 70$, $R^2 = 0.93$). Three parameter logistic function exhibited a reasonable fit ($R^2 = 0.96$) for germination time course under temperature range of 15 to 30 °C in both cultivars. Based on the segmented model, base, optimum and ceiling temperatures of Yellow pearl and Cherry tomato were estimated 11.25, 28.72, 35.00 °C and 10.97, 28.361 and 35 °C, respectively.

Conclusion: Both tomato cultivars exhibited sensitivity to changes in temperature. Seed germination rate and number of the germinated seeds increased at temperatures higher than base. This increase continued until the optimum temperature and then started to decline as the temperature exceeded from optimum range. Also, results obtained from the logistic function showed that Yellow pearl cultivar is more sensitive to supra-optimal temperatures compared with Cherry tomato, and germination percentage of the 97.79 to 85.09 percent as temperature reached from 25 to 30 °C.

Keywords: Base temperature, Cultivar, Logistic model, Optimal temperature, Segmented model

Highlights:

- 1- The pattern of seed germination in two new tomato cultivars was investigated under temperatures regimes
- 2- Cardinal temperatures of two new tomato varieties was estimated using nonlinear regression models

¹ Master student, Department of Plant Production and Genetics, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.23831251.1400.8.2.11.7>

² Ph.D. Candidate of Agronomy, Department of Plant Production and Genetics, Shadid Chamran University of Khuzestan, Khuzestan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran

* Corresponding author, E-mail: amirmoosavi@asnrukh.ac.ir

DOI: 10.52547/yujs.8.2.81



CrossMark