

کمی سازی جوانه زنی بذر سورگوم در پاسخ به دما

عادل پشت‌دار^۱، سیدعلی طباطبایی^۲، امید انصاری^{۳*}

^۱دکتری، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران
^۲دانشیار، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.
^۳دکتری، گروه علوم و تکنولوژی بذر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۲۰

چکیده

به منظور بررسی اثر دماهای مختلف بر جوانه زنی و تعیین دمای کاردینال جوانه زنی (دمای پایه، مطلوب و بیشینه جوانه زنی) سورگوم، آزمایشی در سال ۱۳۹۸ و آزمایشگاه بذر دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به صورت طرح کامل تصادفی در ۳ تکرار در دماهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد به اجرا درآمد. با استفاده از مدل لجستیک ۳ پارامتری، جوانه زنی بذر سورگوم در دماهای مختلف کمی سازی شد و درصد و زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی به دست آمد. جهت کمی سازی واکنش سرعت جوانه زنی بذر سورگوم به دما از ۳ مدل رگرسیون غیرخطی دو تکه‌ای، دندان مانند و بتا استفاده شد. نتایج نشان داد که دما علاوه بر درصد جوانه زنی بر سرعت جوانه زنی نیز اثر گذار است. در مقایسه ۳ مدل استفاده شده با توجه به پارامترهای CV، RMSE، SE و نمودار خط ۱:۱، مناسب ترین مدل جهت تخمین دماهای کاردینال سورگوم مدل دو تکه‌ای گزارش شد. دمای پایه، مطلوب و سقف با استفاده از مدل دو تکه‌ای به ترتیب ۹/۵۲، ۲۸/۴۹ و ۴۲/۲۳ درجه سانتی گراد بود. از مدل دو تکه‌ای و پارامترهای تخمین زده شده می توان در تهیه و ارزیابی مدل های پیش بینی جوانه زنی بذر سورگوم استفاده کرد.

واژه های کلیدی: جوانه زنی، دما، مدل لجستیک، مدل های رگرسیون غیرخطی.

مقدمه

سورگوم (*Sorghum bicolor* L. Moench.) گیاهی یک ساله از تیره غلات است که به دامنه وسیعی از شرایط اکولوژیک و زراعی سازگار می باشد و در شرایطی که رطوبت، درجه حرارت و مواد غذایی عوامل محدودکننده رشد سایر محصولات زراعی می باشد می تواند عملکرد مطلوبی را تولید کند. این گیاه در بین غلات پس از گندم، برنج، ذرت و جو رتبه پنجم اهمیت از لحاظ سطح زیر کشت و تولید در جهان را دارا می باشد و به عنوان شاخص گیاهان زراعی مقاوم به خشکی نقش مهمی در تولید این مناطق دارد. سطح زیر کشت سورگوم در جهان حدود ۵۰ میلیون هکتار می باشد که حدود ۴۷ میلیون هکتار آن را ارقام سورگوم دانه ای به خود اختصاص داده است (FAO, 2018). جوانه زنی بذرهای مرحله ای مهم و ضروری در توسعه گیاهچه های طبیعی و در نهایت محصول زیاد می باشد. جوانه زنی و رشد گیاهچه با تنش های محیطی غیرزنده مانند شوری، خشکی و سرما کاهش می یابد (Ashraf et al., 1992; Kaya et al., 2006; Atak et al., 2006; Almansouri et al., 2001).

*نویسنده مسئول:

قدرت اولیه بذر دارای چندین شاخص می‌باشد که عبارتند از: جوانه‌زنی، سبز شدن و رشد گیاهچه. زمان تا شروع جوانه‌زنی، حداکثر مقدار جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی به‌عنوان اجزای جوانه‌زنی شناخته شده‌اند (Soltani et al., 2001; Soltani et al., 2002). زمان تا شروع جوانه‌زنی عبارتست از مدت زمان بر حسب روز یا ساعت از کاشت تا زمانی که درصد جوانه‌زنی تجمعی به ۱۰ درصد حداکثر جمعیت برسد و هرچه مقدار زمان تا شروع جوانه‌زنی کوچکتر باشد، به‌دین معنی است که جوانه‌زنی زودتر شروع شده است. یکنواختی جوانه‌زنی به‌صورت مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه‌زنی از ۱۰ درصد حداکثر جمعیت به ۹۰ درصد حداکثر جمعیت برسد، تعریف می‌شود. هر چه مقدار این مدت زمان کمتر باشد نشان دهنده جوانه‌زنی یکنواخت‌تر بذرها می‌باشد. سرعت جوانه‌زنی به‌صورت عکس زمان از کاشت تا زمانی که درصد جوانه‌زنی تجمعی به ۵۰ درصد حداکثر جمعیت می‌رسد در نظر گرفته می‌شود (Latifi et al., 2004).

عوامل محیطی تنظیم‌کننده جوانه‌زنی برای بذرهای بدون خواب؛ دما، آب و اکسیژن می‌باشد و برای بذرهای دارای خواب، علاوه بر این عوامل، به نور و محیط‌های شیمیایی نیز برای جوانه‌زنی نیاز می‌باشد. دما و رطوبت می‌تواند با هم یا به‌طور جداگانه بر درصد و سرعت جوانه‌زنی اثر بگذارند (Baskin and Baskin, 2014). به‌طور کلی، درجه حرارت دارای دو اثر متفاوت بر روی بذر، شامل تاثیر بر خواب بذر و جوانه‌زنی در بذرهای فاقد خواب می‌باشد. با توجه به شرایط خواب بذر، تغییرات فصلی دما عامل مهمی برای از بین بردن خواب اولیه بذر بوده و عامل موثری بر تحمیل خواب ثانویه در دماهای بالاتر می‌باشد (Bradford, 2002). دما نه تنها بر درصد جوانه‌زنی بلکه بر سرعت جوانه‌زنی هم اثر گذار است. به‌طور کلی اثر درجه حرارت بر جوانه‌زنی بر حسب درجه حرارت‌های کاردینال یعنی دمای حداقل، مطلوب و حداکثر بیان می‌شوند و جوانه‌زنی در این محدوده حرارتی رخ می‌دهد. دمای مطلوب بر حسب تعریف دمایی است که در آن بیشترین درصد جوانه‌زنی در کوتاهترین دوره زمانی انجام می‌شود. ولی به‌طور کلی سرعت جوانه‌زنی بین دماهای پایه و مطلوب افزایش می‌یابد، بین دماهای مطلوب و حداکثر کاهش می‌یابد و فراتر از دمای حداکثر و کمتر از دمای پایه متوقف می‌شود (Shafii and Price, 2001; Ansari et al., 2016). مدل‌های ظهور گیاهچه می‌توانند به چند گروه تقسیم شوند به‌طوری که، اگر فقط از درجه حرارت استفاده شود این مدل، مدل ترمال تایم، و اگر از رطوبت استفاده شود مدل هیدروتایم نامیده می‌شوند (Forcella et al. 2000; Bradford 2002; Grundy 2003). همچنین، از مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی و سبز شدن بذرهای گیاهان در مقابل دما استفاده شده است (Hardegree, 2006; Ansari et al., 2016).

انواعی از توابع ریاضی برای شرح رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما استفاده شده است (Soltani et al., 2006; Shafi and Price, 2001). امتیاز این توابع این است که پارامترهای این مدل‌ها دارای مفهوم بیولوژیکی مانند دماهای کاردینال و سرعت ذاتی جوانه‌زنی و سبز شدن هستند. بنابراین، برخی از محققین از این مدل‌ها برای به‌دست آوردن دماهای کاردینال یعنی دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف استفاده کرده‌اند (Hardegree et al., 2006; Ansari et al., 2016). توابع دمایی مختلفی برای توصیف واکنش جوانه‌زنی به دما وجود دارد که از میان آن‌ها سه تابع دوتکه‌ای، بتا و دندان مانند برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرها به دما بیشتر از بقیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Soltani et al., 2006; Kamkar et al., 2011; Derakhshan et al., 2013).

انتخاب مدل مناسب برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما، در تعیین دقیق دماهای کاردینال بسیار مهم است. Kamkar et al. (2011) در مطالعه گیاه خشخاش با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی مدل

دو تکه ای را به عنوان مدل برتر در پیش بینی سرعت جوانه زنی معرفی کردند. Karami (2016) با استفاده از مدل های رگرسیونی غیر خطی پاسخ جوانه زنی بذر ذرت به دما و پیش اندازی کمی سازی نمودند و بیان داشتند که بهترین مدل جهت تخمین دماهای کاردینال ذرت مدل دو تکه ای بود. از آنجا که اطلاعات زیادی در ارتباط با کمی سازی واکنش جوانه زنی سورگوم (رقم پگاه) به دما وجود نداشت این آزمایش به منظور بررسی کمی سازی واکنش جوانه زنی سورگوم در واکنش به دما انجام شد.

مواد و روش ها

این تحقیق در سال ۱۳۹۸ در آزمایشگاه بذر دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان بر روی گیاه سورگوم رقم پگاه انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل دما در هفت سطح (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد) به صورت طرح کامل تصادفی و با ۳ تکرار ۵۰ بذری انجام شد. تیمارهای دمایی توسط انکوباتور، با دقت ۱ درجه سانتی گراد تأمین گردید.

ابتدا بذرها با قرار گرفتن در محلول وایتکس ۲ درصد به مدت ۲ دقیقه ضد عفونی سطحی شده و پس از شستشو با آب مقطر بر روی یک لایه کاغذ صافی، داخل پتری دیش قرار داده شد. پتری دیش ها داخل ۷ انکوباتور با دماهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. شمارش بذرها از جوانه زده هر ۱۲ ساعت یکبار صورت گرفت. در هر بار بذرها از جوانه زده از محیط جوانه زنی خارج شدند. معیار جوانه زنی خروج ریشه چه به اندازه یک میلی متر یا بیشتر بود (Ansari et al., 2016). در طول آزمایش در صورت نیاز، به تیمارها آب مقطر (شاهد) اضافه شد. برای توجیه روند تغییرات مربوط به درصد جوانه زنی در مقابل دما از تابع لجستیک سه پارامتری (رابطه ۱) استفاده شد (Kamkar et al., 2011):

$$Y = G_{\max} / (1 + \exp(a(t/b))) \quad (1)$$

که G_{\max} : حداکثر درصد جوانه زنی، b : زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی و a : ضریب معادله است. سرعت جوانه زنی (در ساعت) از معکوس کردن زمان تا ۵۰ درصد جوانه زنی بر حسب جمعیت با استفاده از درون یابی در هر دما و تیمار پیش اندازی بذر به دست آمد (از آنجایی که زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی محاسبه شده توسط تابع های سیگموئیدی بر اساس جوانه زنی نهایی می باشد؛ استفاده از این پارامتر جهت محاسبه سرعت جوانه زنی صحیح نیست، بنابراین با استفاده از ضرایب به دست آمده جوانه زنی رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی جمعیت محاسبه و سرعت جوانه زنی بر این اساس برآورد شد) (Ansari et al., 2016). علاوه بر D50 شاخص های D10 (مدت زمانی که طول می کشد تا جوانه زنی به ۱۰ درصد حداکثر جمعیت برسد) و D30 (مدت زمانی که طول می کشد تا جوانه زنی به ۳۰ درصد حداکثر جمعیت برسد) محاسبه شدند.

در نهایت برای کمی سازی واکنش جوانه زنی به دما و تعیین دماهای کاردینال از مدل های دو تکه ای (رابطه ۲)، دندان مانند (رابطه ۳) و بتا (رابطه ۴) استفاده شد (جدول ۱). تخمین پارامترهای هر مدل با روش مطلوب سازی تکراری به کمک نرم افزار سیگما پلات صورت گرفت. در روش مطلوب سازی تکراری با هر بار وارد کردن مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر نهایی آن با روش کمترین توان های دوم تخمین زده می شود. تغییر مقادیر اولیه تا زمانی انجام گرفت که بهترین برآورد از پارامترها به دست آمد. بهترین برآورد پارامترهای مدل بر اساس اشتباه آزمایشی کمتر

پارامترها و جذر میانگین مربعات انحراف^۲ کمتر رگرسیون و با استفاده از میزان اریبی خط رگرسیون داده‌های شبیه‌سازی شده از خط یک به یک مشخص شد. در نهایت جهت مقایسه ضرایب به‌دست آمده توسط مدل‌های استفاده شده در این پژوهش از خطای استاندارد محاسبه شده توسط مدل استفاده شد.

جدول ۱: معادلات مدل‌های دو تکه‌ای، دندان مانند و بتای برازش داده شده به سرعت جوانه‌زنی در دماهای مختلف. T_b دمای پایه، T_{o1} دمای مطلوب تحتانی، T_{o2} دمای مطلوب فوقانی، T_o دمای مطلوب، T_c دمای بیشینه، f_o تعداد ساعات بیولوژیکی و T دما (دمای مورد آزمایش) می‌باشد.

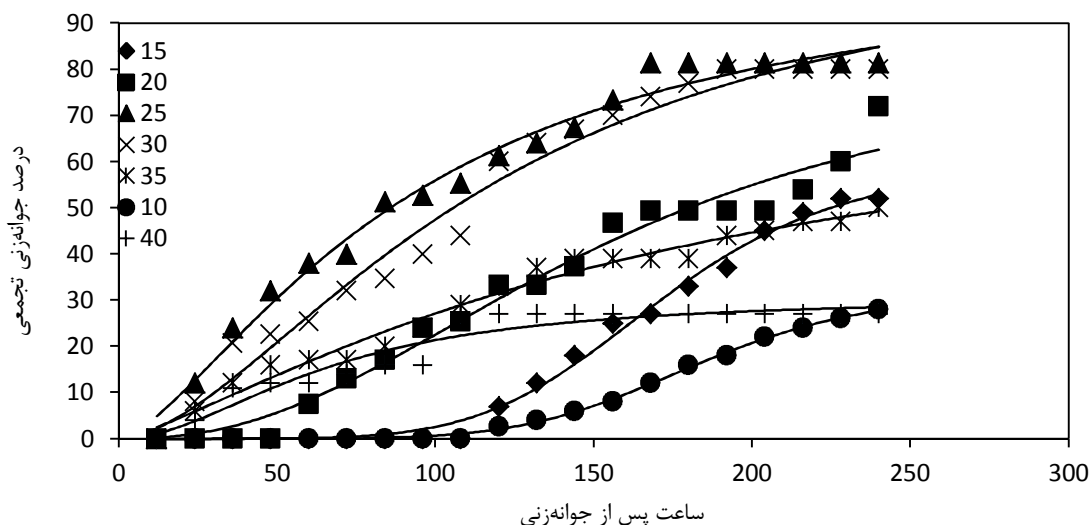
معادله	فرمول
دندان مانند (۲) (Piper, 1996)	$f(T) = (T - T_b) / (T_{o1} - T_b) \text{ if } T_b < T \leq T_{o1}$ $f(T) = (T_c - T) / (T_c - T_{o2}) \text{ if } T_{o2} < T \leq T_c$ $f(T) = 1 \text{ if } T_{o1} < T \leq T_{o2}$ $f(T) = 0 \text{ if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$
دو تکه‌ای (۳) (Soltani et al., 2006)	$f(T) = (T - T_b) / (T_o - T_b) \text{ if } T_b < T \leq T_o$ $f(T) = [1 - (T - T_o) / (T_c - T_o)] \text{ if } T_o < T \leq T_c$ $f(T) = 0 \text{ if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$
بتا (۴) (Yin et al., 1995)	$f(T) = ((T_c - T) / (T_c - T_o)) * ((T - T_b) / (T_o - T_b))^{(T_o - T_b) / (T_c - T_o)}$

نتایج و بحث

با استفاده از برازش مدل لجستیک^۳ پارامتره به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی، حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی نهایی و شیب معادله برای دماهای مختلف بذر محاسبه شد (شکل ۱ و جدول ۱). میزان R^2 Adj مدل لجستیک استفاده شده برای تمامی دماها و تیمارهای پیش‌اندازی بذر بالاتر از ۰/۹۰ بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که با افزایش دما تا دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد درصد جوانه‌زنی افزایش یافت و بعد از آن کاهش یافت (جدول ۱). نتایج مربوط به زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی نهایی نشان داد که زمان رسیدن به ۵۰ درصد نهایی جوانه‌زنی با افزایش دما تا دمای ۲۵ کاهش یافت بعد از آن تا دمای ۳۵ افزایش و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به کمترین میزان خود رسید (جدول ۱). در این راستا محققین مختلفی از مدل‌های سیگموئیدی مختلفی جهت برآورد زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی استفاده نمودند. در بسیاری از گونه‌های گیاهی نظیر *Polypogon fugax* (Wu et al., 2015) و *S. rostratum* (Wei et al., 2009) گزارش شده است که برای جوانه‌زنی به حد آستانه دمایی نیاز دارند و در دامنه محدودی از دماها قادر به جوانه‌زنی هستند، این درحالی است که جوانه‌زنی گونه‌هایی شبیه *malva sylvestris* (Ansari et al., 2016)، *Gomphrena perennis* (Acosta et al., 2012) و *Urena lobata* (Wang et al., 2009) در دامنه وسیعی از دماها اتفاق می‌افتد.

Kamkar et al., (2011) و Ansari et al., (2016) برای برآورد D_{50} از مدل لجستیک استفاده کردند. علاوه بر مدل لجستیکی از سایر مدل‌های سیگموئیدی جهت کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی به زمان جهت برآورد زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی و محاسبه سرعت جوانه‌زنی نیز استفاده شده است. Shafii and Price, 2001 (2001) و Ansari et

al., (2016) از مدل سیگموئیدی ۳ پارامتره جهت برآورد D_{50} استفاده نمودند. Derakhshan و Dumur et al., (1990) و et al., (2013) از مدل ویبول برای محاسبه D_{50} و در نهایت سرعت جوانه زنی استفاده نمودند.



شکل ۱: برازش مدل سیگموئیدی ۳ پارامتره به درصد جوانه زنی تجمعی بذر سورگوم در دماهای مختلف.

جدول ۱: ضرایب به دست آمده از مدل لجستیک ۳ پارامتره برازش داده شده به درصد جوانه زنی تجمعی در دماهای مختلف و تیمارهای مختلف پیش اندازی بذر برای بذر سورگوم. اعداد داخل پرانتز نشان دهنده خطای استاندارد است.

ضرایب مدل				دما
R^2	X50 (ساعت)	b	$a (G_{max})$	(درجه سانتی گراد)
۰/۹۹	۱۸۳/۸۲(۲/۶۴)	-۶/۳۲(۰/۳۱)	۳۲/۸۹(۱/۱۵)	۱۰
۰/۹۹	۱۷۱/۶۱(۴/۴۹)	-۵/۷۶(۰/۵۱)	۶۰/۵۳(۳/۴)	۱۵
۰/۹۷	۱۵۴/۲۷(۶/۶۶)	-۲/۳۴(۰/۴)	۸۴/۸۴(۵/۰۶)	۲۰
۰/۹۸	۹۱/۷۱(۱۱/۷۶)	-۱/۴۸(۰/۱۶)	۹۹/۲۲(۸/۳۷)	۲۵
۰/۹۷	۱۱۸/۰۳(۱۲/۶)	-۱/۶۹(۰/۲۴)	۹۹/۳۴(۷/۳۲)	۳۰
۰/۹۸	۱۶۶/۰۸(۲۳/۸۹)	-۱/۳۱(۰/۱۹)	۷۹/۷۱(۶/۲۷)	۳۵
۰/۹۳	۶۵/۷۱(۸/۶۷)	-۱/۹۴(۰/۴۳)	۳۰/۷۹(۲/۷۳)	۴۰

با استفاده از مدل لجستیک سه پارامتره زمان رسیدن به ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه زنی و یکنواختی جوانه زنی محاسبه شد که نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر دما بر کلیه شاخص های اندازه گیری شده در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۲).

قابل ذکر است؛ مدل های سیگموئیدی که پاسخ جوانه زنی تجمعی را کمی سای می کنند زمان سیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی نهایی را برآورد کرده و قادر به برآورد ۵۰ درصد جوانه زنی جمعیت نمی باشند از این رو جهت محاسبه درصد جوانه زنی جمعیت و محاسبه سرعت جوانه زنی باید با استفاده از خروجی مدل زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی جمعیت را برآورد نمود. زمان رسیدن به درصد های مختلف جوانه زنی با استفاده از خروجی مدل لجستیک ۳ پارامتره استفاده شده برآورد و در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۲: تجزیه واریانس اثر دما بر شاخص‌های D10 (مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه زنی به ۱۰ درصد حداکثر جمعیت برسد) شاخص‌های D30 (مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه زنی به ۳۰ درصد حداکثر جمعیت برسد) و D50 (مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه زنی به ۹۰ درصد حداکثر جمعیت برسد) و یکنواختی جوانه‌زنی بذر سورگوم.

منبع تغییرات	درجه آزادی	D10	D50	D90	یکنواختی جوانه‌زنی
دما	۶	۶۹۰۴/۳۱**	۸۴۴۶/۳۶**	۱۷۹۲۱/۹۳**	۷۰۷۷/۷۳**
خطای آزمایشی	۱۲	۶۸/۳۷	۴۹/۱	۶۰/۶۴	۱۱۶/۸۱
درصد ضریب تغییرات	-	۱۳/۳۶	۹/۹۶	۴/۴۵	۹/۵۵

** نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

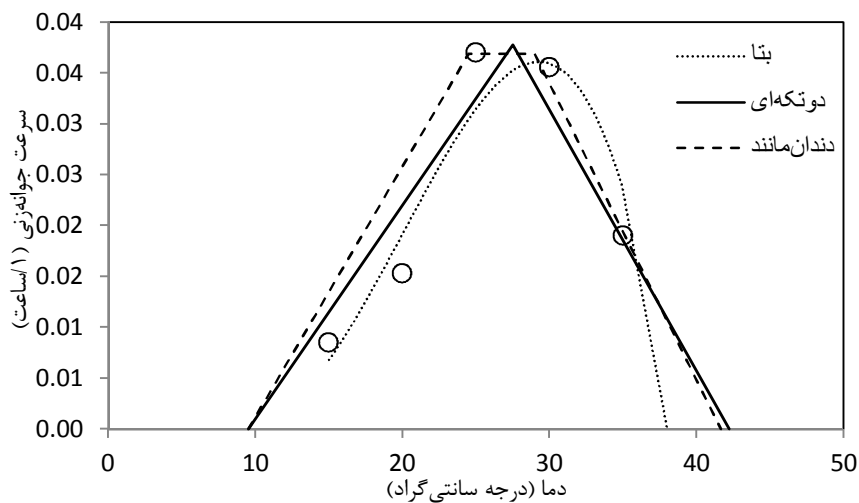
در مطالعه‌ای بر روی گیاه پنیرک، Ansari et al. (2016) بیان داشتند که زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی جمعیت و جوانه‌زنی نهایی متفاوت بوده و محققین جهت محاسبه دقیق سرعت و تعیین دماهای کاردینال باید زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی جمعیت را با استفاده از خروجی مدل‌ها محاسبه نموده و مورد استفاده قرار دهند که نتایج این پژوهش با نتایج نامبرده مبنی بر نحوه محاسبه سرعت جوانه‌زنی مطابقت دارد. در ادامه ایشان نتیجه‌گیری کردند که استفاده از سرعت جوانه‌زنی برآورد شده از زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی جمعیت نسبت به سایر دهک‌های جوانه‌زنی از دقت بالاتری برخوردار است. در پژوهش حاضر سرعت جوانه‌زنی با استفاده از زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی جمعیت محاسبه شد.

جدول ۳: مقایسه میانگین اثر دما بر شاخص‌های D10 (مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه زنی به ۱۰ درصد حداکثر جمعیت برسد) شاخص‌های D30 (مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه‌زنی به ۳۰ درصد حداکثر جمعیت برسد) و D50 (مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه زنی به ۹۰ درصد حداکثر جمعیت برسد) و یکنواختی جوانه‌زنی بذر سورگوم.

دما (درجه سانتی‌گراد)	D10	D30	D50	یکنواختی جوانه‌زنی
۱۰	۱۵۹/۱۲	-	-	۶۱/۵۷
۱۵	۲۲۴/۸۶	۱۷۱/۴۲	۱۱۷/۳۲	۷۹/۴۳
۲۰	۱۸۰/۳۳	۱۱۸/۸۷	۶۵/۴۴	۱۲۴/۵۶
۲۵	۸۵/۹۲	۴۹/۴۱	۲۸/۰۱۶	۱۶۹/۹۸
۳۰	۱۰۵/۵	۶۶/۳۳	۲۹/۷	۱۷۶/۲۲
۳۵	۲۴۰	۱۱۲/۶۴	۴۱/۶۷	۱۷۲/۱۷
۴۰	۴۴/۹۵۳۱	-	-	۱۳۵/۰۴

بعد از برآورد سرعت جوانه‌زنی، به داده‌های مربوط به سرعت جوانه‌زنی مدل‌های رگرسیون غیرخطی؛ دوتکه‌ای، دندان مانند و بتا برازش داده شد (شکل ۲). در نهایت دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف با استفاده از این مدل‌ها برای بذر سورگوم برآورد شدند (جدول ۴). دمای پایه با استفاده از مدل دوتکه‌ای، دندان‌مانند و بتا به ترتیب ۹/۵۲، ۲۹/۲۵ و ۸/۳۸ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. دمای مطلوب با استفاده از مدل دوتکه‌ای و بتا به ترتیب ۲۸/۴۹ و ۲۹/۲۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. دمای مطلوب تحتانی و فوقانی با استفاده از مدل دندان‌مانند به ترتیب ۲۶/۹۳ و ۲۸/۹۹

درجه سانتی گراد برآورد شد. دمای سقف با استفاده از مدل دو تکه ای، دندان مانند و بتا به ترتیب ۴۱/۶۹ و ۳۸/۴۵ درجه سانتی گراد برآورد شد. تعداد ساعات بیولوژیکی با استفاده از مدل دو تکه ای، دندان مانند و بتا به ترتیب ۲۶/۴۹، ۲۷/۲۹ و ۲۷/۷ ساعت برآورد شد (جدول ۴). جهت بررسی دقت مدل های استفاده شده و تعیین مناسب ترین مدل از نمودار خط ۱:۱ سرعت جوانه زنی مشاهده شده در مقابل سرعت جوانه زنی پیش بینی شده استفاده شد. با استفاده از نمودار خط ۱:۱ مقادیر R^2 ، R^2 Adj، CV ، $RMSE$ برای تمامی مدل های استفاده شده به صورت جداگانه محاسبه شدند که CV و $RMSE$ پائین و R^2 و R^2 Adj بالا نشان دهنده دقت بالاتر در مدل بود (جدول ۴). با توجه به نتایج به دست آمده مناسب ترین مدل برای بذر سورگوم مدل دو تکه ای و سپس مدل دندان مانند بود (جدول ۴).



شکل ۲: سرعت جوانه زنی پیش بینی شده (خطوط) و مشاهده شده (نقاط) با استفاده از مدل های دو تکه ای، دندان مانند و بتا در دماها و پتانسیل های اسمزی برای بذر سورگوم. دایره های تو خالی نشان دهنده سرعت جوانه زنی در دماهای مختلف می باشند.

جدول ۴: برآورد دمای پایه (T_b)، دمای مطلوب (T_o)، دمای مطلوب تحتانی (T_{o1})، دمای مطلوب فوقانی (T_{o2})، دمای بیشینه (T_c)، تعداد ساعات بیولوژیکی (f_o)، عرض از مبدا (a) و شیب خط رگرسیون سرعت جوانه زنی واقعی و پیش بینی شده با استفاده از مدل های رگرسیون غیرخطی برای بذر سورگوم. اعداد داخل پرانتز نشان دهنده خطای استاندارد می باشد.

مدل	دو تکه ای	دندان مانند	بتا
T_b	۹/۵۲(۱/۹)	۹/۵۲(۲/۳۳)	۸/۳۸(۱۶/۶۵)
T_o	۲۸/۴۹(۱/۶۲)	-	۲۹/۲۵(۱/۹۹)
T_{o1}	-	۲۶/۹۳(۴/۲۳)	-
T_{o2}	-	۲۸/۹۹(۳/۷۶)	-
T_c	۴۲/۲۳(۲/۰۹)	۴۱/۶۹(۲/۵۷)	۳۸/۴۵(۳/۲۲)
f_o	۲۶/۴۹(۲/۴۳)	۲۷/۲۹(۴/۳۴)	۲۷/۷(۴/۳۶)
R^2	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۲
Adj Rsqr	۰/۹	۰/۸۴	۰/۷
CV	۱۶/۴۳	۱۹/۳۲	۲۶/۳۲
$RMSE$	۱۲/۵۵	۲۲/۸۲	۳۴/۴۳

دما به دلیل تأثیر بر جوانه‌زنی و خواب بذر می‌تواند سرعت‌های جوانه‌زنی، رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه را تحت تأثیر قرار دهد (Bradford, 2002). Forcella (2000) عنوان کرد زمان جوانه‌زنی یکی از مهم‌ترین رخدادهایی است که موفقیت یا شکست گونه‌های یک‌ساله در آلوده‌کردن و افزایش جمعیت آن‌ها در بوم نظام‌های کشاورزی را تعیین می‌کند. دامنه دمایی که جوانه‌زنی بذر را تحت تأثیر قرار می‌دهد در گیاهان مختلف متفاوت است (Ellis et al., 1986). از دلایل کاهش در شاخص‌های جوانه‌زنی در دماهای غیر مطلوب می‌توان به کاهش یا ممانعت از فعالیت آنزیم‌ها و نتیجه کاهش سرعت فرآیندهای زیستی لازم برای جوانه‌زنی در این دماها اشاره کرد (Kamaha and Magure, 1992). در مطالعه‌ای که توسط Khodarahmpour (2015) بر روی ۱۵ لاین سورگوم انجام شد مشخص شد که دمای پایه لاین‌های مختلف سورگوم بین ۹/۳۶ تا ۱۴/۲۸ و دمای مطلوب بین ۲۳ تا ۳۷/۲ و دمای سقف بین ۴۰/۷ و ۴۹/۷۶ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. چنین نتایجی نیز بر روی ۱۶ هیبرید سورگوم توسط Wade et al. (1993) انجام شده است. در آزمایشی که توسط Ansari et al. (2016) بر روی پنیرک انجام شد، با استفاده از توابع مختلف از قبیل توابع بتا، دندان مانند و دوتکه‌ای دماهای کاردینال برای این بذر برآورد شد که با توجه به مقایسه مدل‌ها مدل دندان‌مانند مناسب‌ترین مدل بود. همچنین سایر محققان با استفاده از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی دماهای کاردینال برای تعدادی دیگر از گیاهان را محاسبه کردند و برای مقایسه مدل‌ها از CV، RMSE، و شاخص آکائیک (AICc) استفاده کردند (Ansari et al., 2016; Derakhshan et al., 2013; Kamkar et al., 2011).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج نشان داد که شاخص‌های جوانه‌زنی بذر سورگوم تحت تأثیر دما قرار گرفت و با افزایش دما تا دمای مطلوب (۲۸/۴۹ درجه سانتی‌گراد) سرعت جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و بعد از آن کاهش یافت، در مقایسه ۳ مدل استفاده شده با توجه به مقادیر R^2 ، R^2 Adj، CV، RMSE، مناسب‌ترین مدل جهت تخمین دماهای کاردینال سورگوم مدل دوتکه‌ای بود که دمای پایه، مطلوب و سقف را به ترتیب ۹/۵۲، ۲۸/۴۹ و ۴۲/۲۳ درجه سانتی‌گراد برآورد نمود. بنابراین، از مدل دوتکه‌ای می‌توان در تهیه و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر سورگوم در شرایط مطلوب استفاده کرد.

References

- Acosta, J.M., Bentivegna, D.J., Panigo, E.S. and Dellaferrera, I. 2014. Influence of environmental factors on seed germination and emergence of *Iresine diffusa*. Weed Res. 54(6): 584-592.
- Almansouri, M., Kinet, J.M. and Lutts, S. 2001. Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Plant Soil. 231: 243-254.
- Ansari, O., Gherekhloo, J., Kamkar, B. and Ghaderi-Far, F. 2016. Breaking seed dormancy and determining cardinal temperatures for *Malva sylvestris* using nonlinear regression. Seed Sci. Technol. 44(3), 1-14.
- Ashraf, M., Bokhari, H. and Cristiti, S.N. 1992. Variation in osmotic adjustment of lentil (*Lens culinaris* Medic) in response to drought. Acta Bot. Neerlandica. 41: 51-62.
- Atak, M., Kaya, M.D., Kaya, G., Cıkkılı, Y. and Ciftçi, C.Y. 2006. Effects of NaCl on the germination, seedling growth and water uptake of triticale. Turk. J. Agric. Fore. 30: 39-47
- Baskin, C.C. and Baskin, J.M. 2014. Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination. San Diego, Academic Press. Pp: 787.

- Bradford, K.J. 2002.** Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Sci.* 50: 248–260.
- Derakhshan, A., Gherekhloo, J., Vidal, R.B. and De Prado, R. 2013.** Quantitative description of the germination of littleseed canarygrass (*Phalaris minor*) in response to temperature. *Weed Sci.* 62: 250-257.
- Dumur, D., Pilbeam, C.J. and Craigon, J. 1990.** Use of the Weibull Function to Calculate Cardinal Temperatures in *Faba Bean*. *J. Exp. Bot.* 41: 1423–1430.
- Ellis, R.H., Covell, S., Roberts, E.H. and Summerfield, R.J. 1986.** The influence of temperature on seed germination rate in grain legume. II. Intraspecific variation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) at constant temperatures. *J. Exp. Bot.* 37: 1503- 1515.
- F.A.O. 2018.** Faostat. Production. <http://faostat.fao.org/site/567/pag ID=567>.
- Forcella, F., and Benech Arnold, R.L. and Sanchez, R., 2000.** Modelling seedling emergence. *Field Crop. Res.* 67: 123-139.
- Grundy, A.C. 2003.** Predicting weed emergence: a review of ap457 proaches and future challenges. *Weed Research.* 43: 1–11.
- Hardegee, S.P. 2006.** Predicting germination response to temperature. I. Cardinal-temperature models and subpopulation-specific regression. *Ann. Bot.* 97: 1115-1125.
- Kamkar, B., Jami Al-Ahmadi, M. and Mahdavi-Damghani, A. 2011.** Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds germinate using non-linear regression models. *Ind. Crop. Pro.* 35: 192-198.
- Karami, H. 2016.** An alternative model to quantifying corn seed germination to temperature and water potential. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of M.Sc. in Agronomy. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. [In Persian with English Summary].
- Kaya M.D., Okcu, G., Atak, M., Cıkkılı, Y. and Kolsarıcı, O. 2006.** Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Eur. J. Agron.* 24: 291-295.
- Khodarahmpour, Z. 2015. Study germination response of forage sorghum lines to temperature changes. *Crop physiology Journal.* 7(27): 105-117.
- Latifi, A., Soltani, A. and Spanner, D. 2004.** Effect of temperature on germination components in canola cultivars. *Iranian, J. Agric. Sci.* 35(2): 313-321.
- 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 Sci.* 36:1606–1614.
- Shafi, B. and Price, W. J. 2001.** Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. *J. Agric. Biol. Environ. Stat.* 6: 356–366.
- Soltani, A., Zeinali, E., Galeshi, S. and Latifi, N. 2001.** Genetic variation for and interrelationships among seed vigor traits in wheat from the Caspian Sea coast of Iran. *Seed Sci. Technol.* 29: 653-662.
- Soltani, A., Robertson, M.J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M. and Sarparast, R. 2006.** Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agri. Forest. Met.* 138:156–167.
- Soltani, A., S. Galeshi, E. Zeinali, and Latifi, N. 2002.** Germination, seed reserve utilization and seedling growth of chickpea as affected by salinity and seed size. *Seed Sci. Technol.* 30: 51-60.
- Wade, L.J., Hammer, G.L. and Davey, M.A. 1993.** Response of germination to temperature amongst divers sorghum hybrids. *Field. Crop. Res.* 31: 295-308.
- Wang, J., Ferrell, J., MacDonald, G. and Sellers, B. 2009.** Factors affecting seed germination of Cadillac (*Urena lobata*). *Weed Sci.* 57(1): 31-35.
- Wei, S., Zhang, C., Li, X., Cui, H., Huang, H., Sui, B., Meng, Q. and Zhang, H. 2009.** Factors affecting Buffalobur (*Solanum rostratum*) seed germination and seedling emergence. *Weed Sci.* 57: 521-525.
- Yin, X., Kropff, M. J., McLaren, G. and Visperas, R.M. 1995.** A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agri. Forest. Met.* 77:1-16.