

برآورد دماهای کاردینال و زمان حرارتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذر اویارسلام بذری

(*Cyperus difformis*)

ابوالفضل درخشان*، جاوید قرخلو و عفت پرآور

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

چکیده

هدف از این تحقیق کمی‌سازی پاسخ سرعت جوانه‌زنی علف‌هرز اویارسلام بذری (*Cyperus difformis* L.) به دما، برآورد دماهای کاردینال و زمان حرارتی مورد نیاز برای درصد‌های مختلف جوانه‌زنی بود. چهار مدل رگرسیونی غیرخطی [دندان مانند، دوتکه‌ای، بتا (۴ پارامتره و ۵ پارامتره)] در هفت دمای ثابت (از ۱۵ تا ۴۵ با فواصل ۵ درجه سانتی‌گراد) برای توصیف پاسخی دمای سرعت جوانه‌زنی اویارسلام بذری مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص‌های مختلف آماری (ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص آکائیک (AICc)) برای مقایسه مدل‌ها به کار رفت. پارامترهای برآورد شده با استفاده از مدل دندان مانند از اطمینان بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بود (RMSE=0.0009, AICc=-380.8). دماهای پایه، بهینه زیرین، بهینه زبرین و بیشینه اویارسلام بذری به ترتیب ۱۴/۷۳، ۳۴/۳۴، ۳۸/۵۴ و ۴۵/۰۱ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. بر اساس مدل دندان مانند زمان حرارتی مورد نیاز برای ۵۰ و ۹۵ درصد جوانه‌زنی به ترتیب معادل ۴۳/۵۰ و ۶۵/۰۱-روز بود. دماهای کاردینال به مدل‌های مورد ارزیابی بستگی داشت. به‌طور کلی مدل دندان مانند نسبت به سایر مدل‌ها برآورد بهتری از دماهای کاردینال اویارسلام بذری داشت.

واژه‌های کلیدی: پاسخ دمای، دمای بهینه، دمای بیشینه، دمای پایه، مدل‌سازی

مقدمه

مقایسه منحنی‌های جوانه‌زنی حاصل از رژیم‌های دمایی مختلف است. دامنه دمایی برای جوانه‌زنی توسط دماهای پایه، بهینه و بیشینه (سقف) تعریف می‌شود که می‌توانند برخی محدودیت‌های زیست محیطی برای توزیع جغرافیایی گونه‌ها را تعیین کنند (Hakansson et al., 2002). سرعت نمو بین دماهای پایه و بهینه افزایش می‌یابد، بین دماهای بهینه و بیشینه کاهش یافته و فراتر از دمای بیشینه و کمتر از دمای پایه متوقف می‌شود (Shafii & Price, 2001).

پیش‌بینی جوانه‌زنی و سبز شدن علف‌های هرز می‌تواند راهبرد مناسبی برای مدیریت آنها فراهم سازد (Masin et al., 2005). جوانه‌زنی بذر علف‌های هرز یک فرآیند کلیدی است، زیرا تعداد علف‌های هرزی را که به طور بالقوه می‌توانند در مزرعه سبز شوند و نیز زمان رویش آنها را تعیین می‌کند. برای پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاه، به مدل‌های ریاضی برای توصیف سرعت نمو در پاسخ به دما نیاز است (Jame & Cutforth, 2004). مدل‌های غیر خطی بسیاری برای توصیف سرعت نمو گیاه در برابر دما، از جمله برای توصیف جوانه‌زنی پیشنهاد شده است (Garcia-huidobro et al., 1982). (Steinmaus, et al., 2000) چندین روش مرسوم و جایگزین را برای تعیین دمای پایه جوانه‌زنی ۹ گونه علف هرز مقایسه کردند و همکاران (Kamkar, 2008, 2005) از مدل‌های دوتکه‌ای و لجستیک برای تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی ارزن و سبز شدن گندم استفاده کردند. (Soltani 2006) از مدل‌های بتا، دوتکه‌ای و دندان مانند برای مدل‌سازی سبز شدن گیاه نخود در دماها و عمق‌های مختلف استفاده کردند و مدل دندان مانند را به عنوان مدل برتر در پیش‌بینی سبز شدن این گیاه معرفی کردند. همچنین (Kamkar et al., 2012) از مدل‌های بتا، دوتکه‌ای و دندان مانند برای توصیف سرعت جوانه‌زنی خشخاش (*Papaver somniferum* L.) در برابر دما استفاده کردند. این مطالعه به منظور ارزیابی برخی مدل‌های رگرسیونی غیر خطی برای کمی‌سازی دماهای کاردینال و تعیین زمان حرارتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذور اوپارسلام بذری انجام شد.

اوپارسلام بذری (*Cyperus difformis* L.) گونه‌ای از خانواده اوپارسلام^۱ است که به طور معمول در اراضی غرقاب و یا در خاک‌های بسیار مرطوب می‌روید. این گونه به‌طور غالب علف‌هرز مزارع برنج است، اما خیلی اوقات در آبگیرهای کوچک و نیز در امتداد رودها و کانال‌ها یافت می‌شود. توانایی اوپارسلام بذری در تکمیل سریع چرخه رویشی و زایشی خود در طی یک ماه، این علف‌هرز را به عنوان رقیبی سرسخت به‌ویژه در گیاهان زراعی که حداقل به ۹۰ روز یا بیشتر برای تکمیل چرخه زندگی‌شان نیاز دارند، تبدیل کرده است (Holm et al., 1991).

جوانه‌زنی بذر یک فرآیند بیولوژیکی پیچیده است که تحت تاثیر عوامل زیست محیطی و ژنتیکی گوناگونی قرار می‌گیرد (Shafii & Price, 2001) و به عنوان یکی از حیاتی‌ترین دوره‌ها در چرخه زندگی گیاهان در نظر گرفته می‌شود. شرایط محیطی به طور مستقیم جوانه‌زنی موفقیت‌آمیز بذر و متعاقب آن سبز شدن گیاهچه و استقرار آن را تعیین می‌کند (Harper, 1997). عوامل محیطی تنظیم‌کننده جوانه‌زنی برای بذره‌های بدون خواب، به‌طور معمول شامل دما، آب و اکسیژن و برای بذره‌های دارای خواب، علاوه بر این عوامل، نور و محرک‌های شیمیایی می‌باشد (Baskin & Baskin, 2004). دما و رطوبت می‌توانند با هم یا به طور جداگانه بر درصد و سرعت جوانه‌زنی اثر گذارند (Bloomberg et al., 2009). وقتی رطوبت مناسب باشد، سرعت و درصد جوانه‌زنی یک نمونه بذری دارای قابلیت حیات توسط دما کنترل می‌شود (Bradford et al., 2004). دما مهمترین عاملی است که سرعت نمو گیاهان (از جمله سرعت جوانه‌زنی) را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اثرات دما روی نمو گیاه اساس مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی زمان جوانه‌زنی است (Kamkar et al., 2012). از آنجاییکه جوانه‌زنی با دما تغییر می‌یابد، تعریف دماهای کاردینال و سپس تخمین زمان حرارتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی، جایگزین مناسبی برای

^۱- Cyperaceae

مواد و روش‌ها

$$\frac{1}{e} = \frac{f(T)}{f_0} \quad (2)$$

که $f(T)$ تابع دمایی با بازه صفر تا یک و $\frac{1}{f_0}$ ، حداکثر سرعت جوانه‌زنی در دمای بهینه است. بنابراین f_0 حداقل زمان (ساعت) برای جوانه‌زنی در دمای بهینه را نشان می‌دهد (Soltani et al., 2006). $\frac{1}{e}$ 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 8 SigmaPlot استفاده شد. ارزیابی برازش مدل‌ها با کمک شاخص ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$) (رابطه ۳) و ضریب تبیین (R^2) انجام گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum (Y_{obs} - Y_{pred})^2} \quad (3)$$

که Y_{obs} و Y_{pred} بترتیب مقدارهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده و n تعداد نقاط می‌باشد. $RMSE$ کوچک‌تر و R^2 نزدیک‌تر به یک نشانگر برازش بهتر مدل به داده‌ها می‌باشد. برای انتخاب بهترین مدل از شاخص آکائیک (AIC^2) (رابطه ۴) و شاخص آکائیک تصحیح شده ($AICc^3$) (رابطه ۵) استفاده شد (Burnham & Anderson, 2002).

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k \quad (4)$$

$$AICc = n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k + \left(\frac{2k(k+1)}{n-k-1}\right) \quad (5)$$

که RSS^4 جمع مربعات باقیمانده؛ n تعداد نمونه و k تعداد پارامترهای مدل مورد نظر می‌باشد. بهترین مدل در مقایسه مدل‌ها، مدلی است که کمترین میزان $AICc$ محاسبه شده را داشته باشد. رتبه‌بندی مدل‌ها نیز با استفاده از شاخص Δi (رابطه ۶) انجام شد.

$$\Delta i = AICc - \min AICc \quad (6)$$

که $\min AICc$ ، کمترین مقدار $AICc$ محاسبه شده از بین مدل‌ها است و در واقع متعلق به مدلی است که بهترین

آزمایش در سال ۱۳۹۰ در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. بذور اویارسلام بذری در مهرماه سال ۱۳۹۰ از یک مسیر سه کیلومتری حاشیه مزارع برنج در اطراف شهرستان گرگان جمع‌آوری شدند. جوانه‌زنی بذور اویارسلام بذری روی ۵۰ بذر در چهار تکرار ارزیابی و در حدود ۹۷ درصد تعیین شد. آزمون جوانه‌زنی در اتاقک رشدی با دماهای ثابت (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد) در شرایط نور/ تاریکی (۱۲ ساعت / ۱۲ ساعت) انجام شد. آزمایش با ۴ تکرار انجام شد و هر پتری دیش به منزله یک تکرار در نظر گرفته شد. پنجاه بذر روی کاغذ صافی واتمن شماره یک در پتری دیش پلاستیکی ۹ سانتی‌متری قرار گرفت و سپس کاغذ صافی با ۵ میلی لیتر آب مقطر مرطوب شد. برای کاهش تلفات آب از طریق تبخیر، پتری دیش‌ها با پارافیلیم پیچیده شدند و آبیاری پتری دیش‌ها در صورت نیاز انجام شد. تعداد بذور جوانه‌زده هر ۱۲ ساعت به مدت ۱۴ روز شمارش شد. بذوری که ریشه‌چه آنها به اندازه ۲ میلی‌متر خارج شده بود، جوانه‌زده در نظر گرفته شدند.

در کلیه تیمارهای دمایی نمودار پراکنندگی درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان (ساعت) ترسیم شد. از این منحنی، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی (D_{50}) با برازش مدل لجستیک (رابطه ۱) به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان (ساعت) بدست آمد.

$$G = \frac{G_x}{1 + \exp[a(t-b)]} \quad (1)$$

که G_x ، حداکثر درصد جوانه‌زنی؛ b ، زمان لازم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و a ، شیب منحنی در نقطه b است. زمان لازم برای ۵ درصد (D_{05})، ۱۰ درصد (D_{10})، ۹۰ درصد (D_{90}) و ۹۵ درصد (D_{95}) جوانه‌زنی نهایی از طریق درون‌یابی برآورد گردید. برای کمی‌سازی پاسخ سرعت جوانه‌زنی به دما و تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی از رابطه ۲ استفاده شد (Soltani et al., 2002).

¹- Root Mean of Squares of Error

²- Akaike Information Criterion

³- Corrected Akaike Information Criterion

⁴- Residual Sum of Square

برای محاسبه زمان حرارتی مورد نیاز برای هر یک از درصد‌های جوانه‌زنی از پارامترهای برآورد شده توسط مدل برتر استفاده شد. زمان حرارتی روزانه (DTT) نیز به صورت $f(T) \cdot (T_o - T_b)$ محاسبه شد. که $f(T)$ تابع دمایی؛ T_o دمای بهینه و T_b دمای پایه می‌باشند. جزء اول معادله زمان حرارتی روزانه ثابت بوده و دماهای نامطلوب زمان حرارتی روزانه را از طریق $f(T)$ تحت تاثیر قرار می‌دهند.

جدول ۱- مدل‌های بتا (۵ پارامتره و ۴ پارامتره)، دندان مانند و دوتکه‌ای به سرعت جوانه‌زنی علف‌هرز اویارسلام بذری در دماهای ثابت برازش داده شد، که T دما؛ T_b دمای پایه؛ T_o دمای بهینه؛ T_{o1} دمای بهینه زیرین (برای تابع دندان مانند)؛ T_{o2} دمای بهینه زیرین (برای تابع دندان مانند)؛ T_c دمای بیشینه و c پارامتر شکل در تابع بتا می‌باشند.

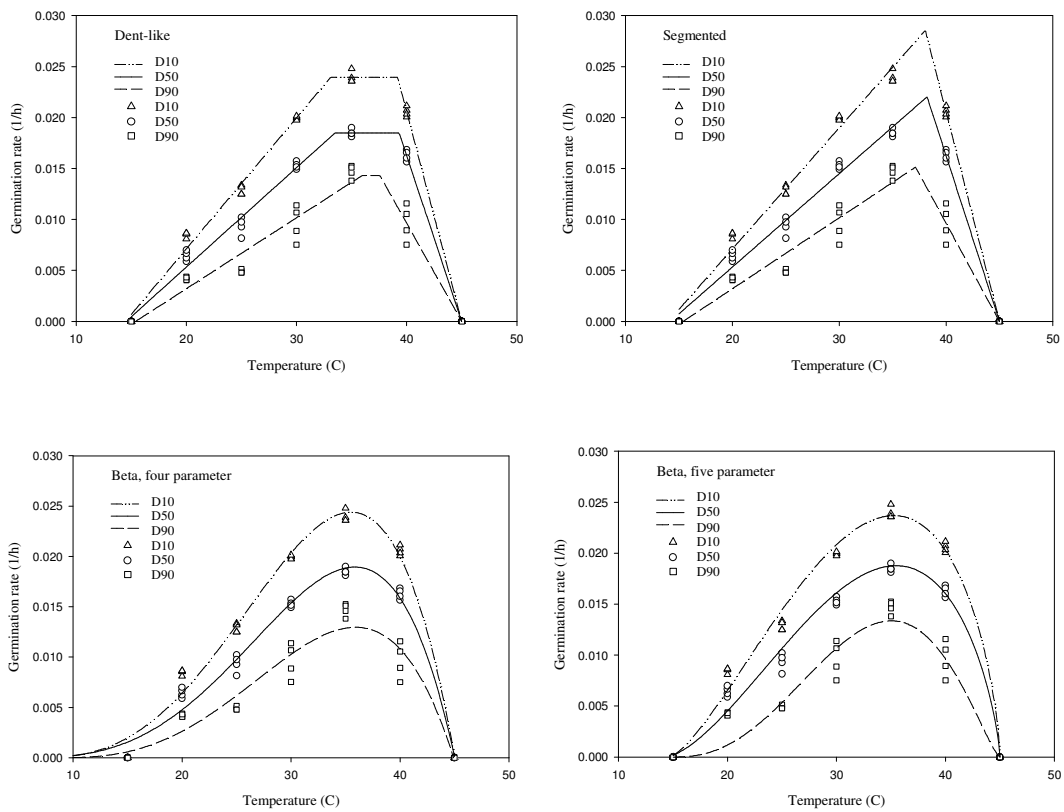
Table 1- Beta (five and four parameter), dent-like and segmented models were fitted to *Cyperus difformis* seed germination rate vs. constant temperatures, where T is the temperature, T_b the base temperature, T_o the optimum temperature, T_{o1} the lower optimum temperature (for dent-like function), T_{o2} the upper optimum temperature (for dent-like function), T_c the ceiling temperature and c is the shape parameter for the beta function.

Function	Formula	Reference
Beta, five parameter		f_1 Yin <i>et al.</i> , 1995
Beta, four parameter		Yan & Hunt, 1999 f_1
Dent-like	$f(T) = (T - T_b) / (T_{o1} - T_b) \quad \text{if } T_b < T < T_{o1}$ $f(T) = (T_c - T) / (T_c - T_{o2}) \quad \text{if } T_{o2} < T < T_c$ $f(T) = 1 \quad \text{if } T_{o1} \leq T \leq T_{o2}$ $f(T) = 0 \quad \text{if } T \leq T_b \text{ or } T_c \leq T$	Piper <i>et al.</i> , 1996
Segmented	$f(T) = (T - T_b) / (T_o - T_b) \quad \text{if } T_b < T < T_o$ $f(T) = 1 - \left(\frac{T - T_o}{T_c - T_o} \right) \quad \text{if } T_o \leq T < T_c$ $f(T) = 0 \quad \text{if } T \leq T_b \text{ or } T_c \leq T$	Mwale <i>et al.</i> , 1994

دهک‌ها بین ۱۵/۳۹-۱۴/۰۱ درجه سانتی‌گراد تغییر کرد. مدل بتا ۴ پارامتره برای همه دهک‌ها برآورد بسیار کمتری از دمای پایه داشت. بر اساس این مدل دمای پایه برای درصد‌های مختلف در محدوده بین ۸/۱۱-۴ درجه سانتی‌گراد تغییر کرد. همچنین بر اساس مدل بتا ۵ پارامتره دمای پایه در محدوده بین ۸/۵۲-۱۴/۰۷ درجه سانتی‌گراد متفاوت بود. حداقل ضریب تغییرات (CV%) برای برآورد دمای پایه، مربوط به مدل دوتکه‌ای (۳/۰۳ درصد) و بیشترین ضریب تغییرات مربوط به مدل بتا ۴ پارامتره (۲۷/۳۴ درصد) بود. در هر چهار مدل برای درصد‌های مختلف جوانه‌زنی در برآورد دمای بیشینه اختلاف قابل توجهی وجود نداشت و بین ۴۵/۰۳-۴۴/۹۲ درجه سانتی‌گراد با حداقل ضریب تغییرات (۰/۰۱ درصد) برآورد شد.

نتایج و بحث

میانگین درصد جوانه‌زنی بذور اویارسلام بذری در دماهای ثابت ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب معادل $96 \pm 1/41$ ، $94/5 \pm 1/66$ ، $89/5 \pm 3/84$ ، $33 \pm 5/2$ و $3/16 \pm 90$ بود، درحالی‌که در دماهای ۱۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد بذور این علف‌هرز فاقد جوانه‌زنی بودند. در شکل (۱) مدل‌های برازش داده شده به سرعت جوانه‌زنی نسبی در مقابل دما برای دهک‌های D_{10} ، D_{50} و D_{90} و در جدول (۲) پارامترهای برآورد شده برای کلیه درصد‌های جوانه‌زنی با استفاده از مدل‌های دندان مانند، دوتکه‌ای، بتا ۴ پارامتره و بتا ۵ پارامتره ارائه شده است. بر اساس مدل‌های دندان مانند و دوتکه‌ای، برای درصد‌های مختلف جوانه‌زنی اختلاف قابل توجهی در برآورد دمای پایه وجود نداشت و برای همه



شکل ۱- سرعت جوانه‌زنی پیش‌بینی شده (خطوط) در مقابل مشاهده شده (نمادها) در علف‌هرز اوپارسلام بذری در دماهای ثابت برای درصد‌های مختلف جوانه‌زنی (D_{90} و D_{50} ، D_{10}) با استفاده از مدل‌های دندان مانند، دوتکه‌ای، بتا (ϵ پارامتره) و بتا (δ پارامتره).

Figure 1- Predicted (lines) vs. observed (symbols) germination rates in *Cyperus difformis* at constant temperatures for different germination percentiles (D_{10} , D_{50} and D_{90}) using segmented, dent-like and beta (four and five parameter) models.

جدول ۲- پارامترهای برآورد شده با استفاده از مدل‌های دندان مانند، دوتکه‌ای و بتا (۴ پارامتره و ۵ پارامتره) برای درصد‌های مختلف جوانه‌زنی بذر اویارسلام بذری.

Table 2- Estimated parameters for the dent-like, segmented and beta (4 and 5 parameter) models for different germination percentiles of *Cyperus difformis* seed.

Parameter ¹	Dent-like					C V	Segmented					C V	Beta, four parameter					CV	Beta, five parameter					CV
	D05	D10	D50	D90	D95		D05	D10	D50	D90	D95		D05	D10	D50	D90	D95		D05	D10	D50	D90	D95	
T _b	14.8	14.0	14.1	15.3	15.2	4.	14.5	14.4	14.5	15.3	15.2	3.	5.16	5.87	4.00	8.11	7.44	27.	13.2	12.7	14.0	8.52	10.2	19.
	0	1	9	9	5	19	2	6	4	9	5	03	34	9	2	7	5	34	9	2	7	5	64	
T _o	-	-	-	-	-	-	38.1	38.0	38.2	37.1	36.9	1.	35.6	35.4	35.8	35.9	35.8	0.4	35.7	35.5	35.6	35.2	35.1	0.7
	-	-	-	-	-	-	8	6	3	5	7	61	4	9	4	2	7	3	3	5	3	7	4	0
T _c	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	0.	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	0.	45.0	45.0	45.0	44.9	44.9	0.1	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	0.0
	0	1	2	0	0	02	0	0	1	0	0	01	3	3	2	3	2	2	0	0	0	2	1	2
T _{o1}	33.1	33.1	33.5	35.9	36.0	4.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	1	3	1	35	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T _{o2}	39.3	39.1	39.3	37.5	37.2	2.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	8	1	9	9	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f _o	38.8	41.7	54.0	69.9	75.1	-	32.4	35.0	45.3	66.0	72.1	-	35.8	40.9	52.7	77.1	84.5	-	39.0	42.0	54.4	69.9	74.0	-
	7	4	6	4	6	-	6	1	7	4	1	-	9	9	7	7	-	-	9	6	8	1	4	-
c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.61	1.73	1.55	4.57	4.48	-
R ²	0.99	0.99	0.98	0.93	0.92	-	0.98	0.98	0.98	0.93	0.93	-	0.97	0.98	0.97	0.91	0.89	-	0.98	0.98	0.98	0.90	0.88	-
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
RMSE	08	07	07	12	12	-	10	09	08	12	12	-	13	12	10	14	14	-	10	10	09	15	15	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AIC	388.	396.	396.	365.	368.	-	377.	384.	392.	367.	370.	-	363.	369.	378.	358.	359.	-	376.	376.	380.	355.	354.	-
	1	7	8	6	3	-	8	5	7	6	3	-	1	8	9	0	3	-	5	5	8	6	0	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AICc	385.	394.	394.	363.	366.	-	376.	382.	391.	365.	368.	-	361.	368.	377.	356.	357.	-	373.	373.	378.	352.	351.	-
	8	4	5	3	0	-	0	8	0	8	5	-	6	4	5	6	8	-	8	8	1	8	3	-
	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5	-	9.8	11.6	3.5	0.0	0.0	-	24.2	26	17	9.2	10.7	-	12	20.6	16.4	13	17.2	-

¹ T_b = base temperature, T_o = optimum temperature, T_c = maximum temperature, T_{o1} = lower limit of optimum temperature, T_{o2} = upper limit of optimum temperature, f_o = minimum time to reach a given percentile, c = parameter of beta function, R² = coefficient of regression, RMSE = Root Mean of Squares of Error, AIC = Akaike Information Criterion, AICc= Corrected Akaike Information Criterion, and Δi = AIC differences.

و D95 وجود نداشت و میزان AICc کمتر مدل دوتکه‌ای به دلیل تعداد پارامترهای کمتر آن بود ($\Delta i=2/5$). همچنین مقدار تفاضل AICc (Δi) دهک‌های D10 و D50 برای مدل دوتکه‌ای کمتر از ۱۰ بود (جدول ۲)، از اینرو می‌توان اظهار داشت که اختلافی در دقت برازش این مدل با مدل دندان مانند برای این دهک‌ها وجود نداشته است. آمار توصیفی (میانگین، دامنه و انحراف معیار) بر روی دماهای کاردینال برآورد شده در جدول (۳) ارائه شده است. کمترین دامنه و انحراف معیار در برآورد دمای پایه و دمای بهینه به ترتیب مربوط به مدل‌های دوتکه‌ای و بتا ۴ پارامتره بود. دمای بهینه برآورد شده توسط مدل‌های دوتکه‌ای، بتا ۴ پارامتره و بتا ۵ پارامتره در محدوده بین دمای بهینه زیرین و دمای بهینه زیرین برآورد شده با مدل دندان مانند قرار داشتند. در مجموع میانگین پارامترهای برآورد شده با مدل دندان مانند (جدول ۳) نسبت به سایر مدل‌ها قابل اطمینان‌تر بود. مدل دوتکه‌ای نیز برازش‌های بهتری نسبت به مدل‌های بتا داشت.

بر اساس مدل دندان مانند دمای بهینه برای همه درصد‌های جوانه‌زنی بین ۳۳/۱۱ و ۳۹/۳۱ درجه سانتی‌گراد قرار داشت. همچنین دمای بهینه با استفاده از مدل‌های دوتکه‌ای، بتا ۵ پارامتره و بتا ۴ پارامتره به ترتیب بین ۳۸/۲۳-۳۶/۹۷، ۳۵/۷۳-۳۵/۱۴ و ۳۵/۴۹-۳۵/۹ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. کمترین ضریب تغییرات (% ۰/۴۷) برای برآورد دمای بهینه مربوط به مدل بتا ۴ پارامتره بود. ضریب تبیین بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده برای همه مدل‌ها بین ۰/۹۹-۰/۸۸ متغیر و معیار مناسبی برای ارزیابی برازش مدل‌ها نبود. با وجود ضریب تغییرات اندک در برآورد دمای بهینه با مدل‌های بتا ۵ پارامتره و بتا ۴ پارامتره، شاخص آکائیک (AICc) نشان داد که این مدل‌ها و پارامترهای برآورد شده توسط آن‌ها قابل اطمینان نیست. همچنین، ریشه میانگین مربعات خطا حاکی از برازش بهتر مدل‌های دوتکه‌ای و دندان مانند نسبت به مدل‌های بتا بود. کمترین میزان AICc برای دهک‌های D05، D10 و D50 مربوط به مدل دندان مانند بود ($\Delta i=0$). اختلافی در برازش مدل‌های دوتکه‌ای و دندان مانند به داده‌های دهک‌های D90

جدول ۳- نتایج آمار توصیفی روی دماهای کاردینال برآورد شده توسط مدل‌های مختلف.

Table 3- Descriptive statistics results on estimated cardinal temperatures by different models.

Cardinal temperature	Statistical indices	Model			
		Dent-like	Segmented	Beta, 4 parameter	Beta, 5 parameter
T_b	Mean	14.73	14.83	6.12	11.77
	Range	1.38	0.93	4.11	5.55
	Standard deviation	0.62	0.45	1.67	2.31
T_o	Mean	34.34 - 38.54*	37.72	35.74	35.46
	Range	2.90 - 2.02*	1.26	0.41	0.59
	Standard deviation	1.49 - 1.01*	0.61	0.17	0.25
T_c	Mean	45.01	45.00	44.99	45.01
	Range	0.02	0.01	0.11	0.02
	Standard deviation	0.01	0.004	0.06	0.01

* Lower and upper limits of optimal temperature based on dent-like model.

جوانه‌زنی دارند. بر اساس پارامترهای برآورد شده با مدل دندان مانند می‌توان با یکی از رابطه‌های زیر وقوع هر یک از درصد‌های جوانه‌زنی را پیش‌بینی کرد (Soltani et al., 2006).

$$\sum f(T) = f_o \quad (7)$$

$$\sum \frac{f(T)}{f_o} = f(T) \cdot R_{max} = 1 \quad (8)$$

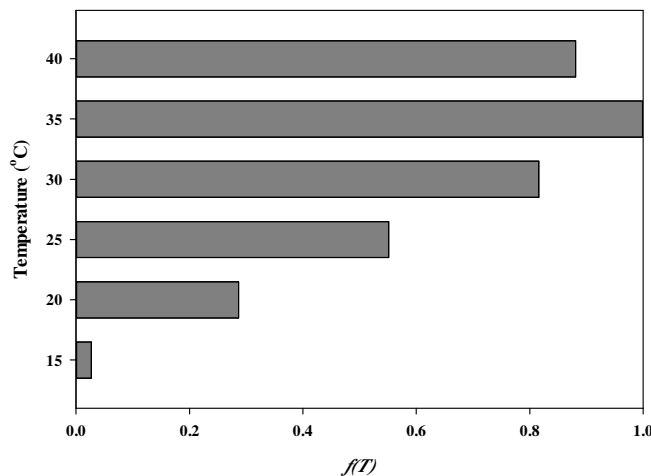
$$\sum DTT = TT \quad (9)$$

بر اساس مدل دندان مانند، حداقل زمان مورد نیاز برای رسیدن به درصد‌های جوانه‌زنی D_{05} ، D_{10} ، D_{50} ، D_{90} و D_{95} به ترتیب معادل ۳۸/۸۷، ۴۱/۷۴، ۵۴/۰۶، ۶۹/۹۴ و ۷۵/۱۶ ساعت پس از جذب آب بود. تابع دمایی ($f(T)$) محاسبه شده برای دماهای ثابت مورد استفاده در این آزمایش بر اساس مدل دندان مانند در شکل (۲) نشان داده شده است. دماهای نزدیک‌تر به دمای بهینه اثر کاهشی کمتری بر سرعت

یک فرآیند نموی (مثل جوانه‌زنی) مقیاسی از زمان فیزیولوژیک مورد نیاز برای تکمیل آن فرآیند در اختیار قرار می‌دهد. یکی از ویژگی‌های زمان حرارتی این است که تعداد درجه-روز مورد نیاز برای تکمیل یک فرآیند نموی مبتنی بر مجموع دماهای فیزیولوژیکی موثر در طی آن فرآیند است و بیان زمان در واحد حرارتی وابستگی زمانی فرآیندهای بیولوژیکی به دلیل تغییر دما را حذف می‌کند (Trudgill *et al.*, 2005).

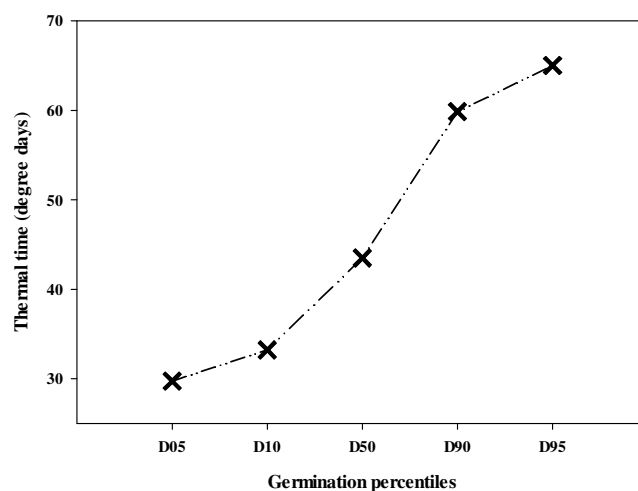
که R_{max} حداکثر سرعت جوانه‌زنی و TT ، زمان حرارتی مورد نیاز برای وقوع مرحله نموی می‌باشند.

زمان حرارتی مورد نیاز برای هر یک از درصدهای جوانه‌زنی در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس مدل دندان مانند زمان حرارتی مورد نیاز برای ۵۰ و ۹۵ درصد جوانه‌زنی به ترتیب معادل ۴۳/۵۰ و ۶۵/۰۱ درجه-روز بود. پیش‌بینی‌های مدل از زمان حرارتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی با زمان مشاهده شده مطابقت داشت. زمان حرارتی مورد نیاز برای



شکل ۲- مقادیر $f(T)$ برای دماهای ثابت مختلف بر اساس مدل دندان مانند.

Figure 2- $f(T)$ values for different constant temperatures base on the dent-like model.



شکل ۳- زمان حرارتی (درجه-روز) مورد نیاز برای درصدهای مختلف جوانه‌زنی، وقتی که $T=T_{o1}$.
Figure 3- Thermal time (degree-days) required for different germination percentiles, when $T=T_{o1}$.

در می‌آید. در هر دو مدل زمان حرارتی مورد نیاز برای هر مرحله نمودی از عکس شیب تابع رگرسیونی سرعت نمو در برابر دماهای پایین‌تر از دمای بهینه محاسبه می‌شود (Thornley, 1987).

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که در فقدان سایر عوامل محدودکننده (آب، نور و غیره)، جوانه‌زنی بذور اویارسلام بذری به شدت تحت تاثیر دما قرار گرفت. دماهای کاردینال تعریف شده با استفاده از مدل دندان مانند معقول‌تر از سایر مدل‌ها بود. سرعت جوانه‌زنی با افزایش دما در محدوده ۱۴/۷۳-۳۴/۳۴ درجه سانتی‌گراد به صورت خطی افزایش یافت، با افزایش بیشتر دما از ۳۴/۳۴ تا ۳۸/۵۴ ثابت بود و در محدوده ۳۸/۵۴-۴۵/۰۱ درجه سانتی‌گراد به صورت خطی کاهش یافت. بر اساس خروجی‌های مدل دماهای پایه، بهینه زیرین، بهینه زیرین و بیشینه اویارسلام بذری به ترتیب ۱۴/۷۳، ۳۴/۳۴، ۳۸/۵۴ و ۴۵/۰۱ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. پارامترهای برآورد شده در این تحقیق مقادیر اولیه مورد نیاز برای پیش‌بینی زمان از آنبوشی تا جوانه‌زنی بذور اویارسلام بذری را به عنوان نخستین مرحله نمودی در اختیار قرار می‌دهد. برای پیش‌بینی دقیق سبز شدن این گیاه می‌توان زمان حرارتی مورد نیاز برای این مرحله را به مقدار معادل از جوانه‌زنی تا سبز شدن اضافه کرد.

رایج‌ترین مدل‌های مورد استفاده برای توصیف پاسخ حرارتی جوانه‌زنی مبتنی بر مفاهیم دماهای کاردینال است. این مدل‌ها به ویژه در ایجاد شاخص‌هایی برای مقایسه پاسخ سرعت نسبی جوانه‌زنی به دما سودمند بوده و مرتبط با فرآیندهای فیزیولوژیکی می‌باشند. دماهای کاردینال جوانه‌زنی از پارامترهای مهم مدل‌های پویایی علف‌های هرز می‌باشند. این مدل‌ها می‌توانند برای پیش‌بینی اثرات طولانی‌مدت سامانه‌های زراعی و روش‌های مدیریتی بر پویایی جمعیت علف‌های هرز مورد استفاده قرار گیرند. کارایی روش‌های کنترل علف‌هرز مانند شخم و کاربرد علف‌کش‌های پس‌رویشی تحت تاثیر زمان سبز شدن علف‌های هرز قرار می‌گیرد. از این‌رو درک

دما می‌تواند درصد و سرعت جوانه‌زنی را از طریق اثرات آن بر زوال بذر، رفع کمون و خود فرآیند جوانه‌زنی تحت تاثیر قرار دهد (Roberts, 1988). تفاوت اندکی در حداکثر درصد جوانه‌زنی بذور اویارسلام بذری در پاسخ به دماهای ثابت در محدوده ۲۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. در این مطالعه سرعت جوانه‌زنی حساسیت بسیار بیشتری به دما نسبت به درصد جوانه‌زنی داشت. حساسیت بیشتر سرعت جوانه‌زنی به دما در سایر مطالعات گزارش شده است (Steinmaus *et al.*, 2000). سرعت جوانه‌زنی در دمای بهینه بیشترین بوده و با افزایش/کاهش دما کاهش می‌یابد. کاهش سرعت جوانه‌زنی با کاهش دما تا حدی مرتبط با کاهش سرعت آنبوشی^۱ بذر در دماهای پایین است (Bewley & Black, 1994).

در مدل دوتکه‌ای تغییرات سرعت نسبی نمو به طور جداگانه برای دماهای کمتر و بیشتر از دمای بهینه ترسیم می‌شود. دمای بهینه از محل تقاطع دو خط رگرسیونی محاسبه شده و دمای پایه و بیشینه به ترتیب عرض از مبدا خط رگرسیونی در دماهای کمتر و بیشتر از دمای بهینه می‌باشند (Covell *et al.*, 2003; Phartyal *et al.*, 1986). واکنش سرعت نمو (شامل سرعت جوانه‌زنی) اکثر گیاهان به دما را می‌توان با استفاده از یک تابع دندان مانند توصیف کرد (Soltani *et al.*, 2006). بر اساس این تابع سرعت نسبی نمو در یک دمایی و کمتر از آن صفر می‌باشد. با افزایش دما از این مقدار، سرعت نسبی نمو رو به افزایش می‌گذارد و در دمای بهینه زیرین به حداکثر می‌رسد. با افزایش بیشتر دما تا رسیدن به دمای بهینه زیرین سرعت نسبی نمو ثابت است. افزایش دما در فراتر از این حد مجدداً باعث کاهش سرعت نمو نسبی می‌گردد و سرانجام در دمای بیشینه، سرعت نسبی نمو مجدداً به صفر می‌رسد و در دماهای بالاتر نیز صفر خواهد بود (Soltani *et al.*, 2006). چنانچه دمای بهینه زیرین و زیرین به هم خیلی نزدیک باشند و یا با هم برابر باشند، تابع دندان مانند به صورت دوتکه‌ای

^۱- Imbibition

می‌تواند به کمی‌سازی رفتار علف‌های هرز در پاسخ به متغیرهای مختلف اقلیمی به ویژه دما سودمند باشد.

نیازهای دمایی برای جوانه‌زنی بذر علف‌های هرز می‌تواند در طراحی و اجرای راه‌بردهای کنترل علف‌هرز مفید واقع شود. همچنین، آگاهی از این پارامترهای اکولوژیکی ناشناخته

منابع

- Baskin, J. M., Baskin, C.C. 2004. A classification system for seed dormancy. *Seed Sci. Res.* 14: 1–16.
- Bewley, J. D. and Black, M. 1994. *Seeds: Physiology of Development and Germination*. New York: Plenum Press.
- Bloomberg, M., Sedcole, J. R., Mason, E.G. and Buchan, G. 2009. Hydrothermal time germination models for radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). *Seed Sci. Res.* 19: 171–182.
- Bradford, K.J. and Still, D.W. 2004. Applications of hydrotime analysis in seed testing. *Seed Technol.* 26: 74–85.
- Burnham, K. P. and Anderson, D. R. 2002. *Model selection and inference: A practical information-theoretical approach*. New York: Springer-Verlag.
- Covell, S., Ellis, R. H., Roberts, E. H. and Summerfield, R. J. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. I. A comparison of chickpea, lentil, soybean and cowpea at constant temperatures. *J. Exp. Bot.* 37: 705–717.
- Garcia-huidobro, J., Monteith, J. L. and Squire, G. R. 1982. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum thymoides* S. & H.) I. Constant temperature. *J. Exp. Bot.* 33: 288–296.
- Hakansson, I., Myrbeck, A. and Ararso, E. 2002. A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden. *Soil Tillage Res.* 64: 23–40.
- Harper, J.L. 1977. *Population Biology of Plants*. Academic Press, New York, NY.
- Holm, L.G., Plucknett, D. L., Pancho, J.V. and Herberger, J. P. 1991. *The World's worst weeds: distribution and biology*. Malabar, FL, USA: The University Press of Hawaii. 609 pp.
- Jame, Y.W. and Cutforth, H.W. 2004. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agric. Forest Meteorol.* 124: 207–218.
- Kamkar, B., Ahmadi, M., Soltani, A., Zeinali, E., 2008. Evaluating non-linear regression models to describe response of wheat emergence rate to temperature. *Seed Sci. Biotechnol.* 2: 53–57.
- Kamkar, B., Ahmadi, M., 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. *Ind Crop Prod.* 35:192–198.
- Kamkar, B., Koocheki, A. R., Mahalati, M. N. and Moghaddam, M. P. R. 2005. Cardinal temperature for germination in three millet species (*Panicum miliaceum*, *Pennisetum glaucum* and *Setaria italica*). *Asian J. of Plant Sci.* 5: 316–319.
- Masin, R., Zuin, M.C., Archer, D.W., Forcella, F. and Zanin, G. 2005. Weed turf: a predictive model to aid control of annual summer weeds in turf. *Weed Sci.* 53:193–201.
- Mwale, S.S., Azam-Ali, S.N., Clark, J.A., Bradley, R.G. and Chatha, M. R. 1994. Effect of temperature on germination of sunflower. *Seed Sci. Technol.* 22: 565–571.
- Phartyal, S.S., Thapliyal, R.C., Nayal, J. S., Rawat, M.M.S. and Joshi, G. 2003. The influences of temperature on seed germination rate in Himalayan elm (*Ulmus Wallichina*). *Seed Sci. Technol.* 31: 83–93.
- 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.
- Roberts, E. H. 1988. Temperature and seed germination. Pages 109–132 in S. P. Long and F. I. Woodward, eds. *Plants and Temperature*. Cambridge, UK: Society for Experimental Biology.
- Shafii, B. and Price, W. J. 2001. Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. *J. Agric. Biol. Environ. Stat.* 6: 356–366.
- Soltani, A., Galeshi, S., Zeinali, E. 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.

-
- 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. *Agric. Forest Meteorol.* 138: 156–167.
- Steinmaus, S.J., Prather, T.S. and Holt, J.S. 2000. Estimation of base temperature for nine weed species. *J. Exp. Bot.* 51: 275-286.
- Thornley, J.H.M. 1987. Modelling flower initiation. In: Atherton, J.G. (Ed.), *Manipulation of Flowering*. Butherworths, London, p. 6.
- Trudgill, D.L., Honek, A., li, D. and Van Straalen, N. M. 2005. Thermal time – concepts and utility. *Ann. Appl. Biol.* 146: 1–14.
- Yan, W. and HUNT, L. A. 1999. An Equation for Modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Ann. Bot.* 84: 607-614.
- Yin, X., Kropff, M.J., McLaren, G. and Visperas, R.M. 1995. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agric. For. Meteorol.* 77: 1–16.

Estimation of Cardinal Temperatures and Thermal Time Requirement for *Cyperus difformis* Seed Germination

Abolfazl Derakhshan, Javid Gherekhloo and Efat Paravar

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Abstract

The aim of this study was to quantify the response of germination rate to temperature and to find cardinal temperatures and thermal time required for different germination percentiles in *Cyperus difformis*. We compared 4 non-linear regression models [dent-like, segmented and beta (4 and 5 parameter)] to describe the germination rate-temperature relationships of *C. difformis* over seven constant temperatures (ranging from 15 to 45 °C, with 5 °C intervals). Different statistical indices [Root Mean of Squares of Error (RMSE), Akaike Information Criterion (AICc)] were used to compare models performances. The dent-like model was found to be the best model to predict germination rate (RMSE=0.0009, AICc=-380.8). The base, the lower optimum, the upper optimum and the maximum temperatures for the germination of *C. difformis* were estimated to be 14.73, 34.34, 38.54 and 45.01 °C, respectively. The thermal time required to reach 50 and 95% germination was 43.50 and 65.01 degree-days, respectively. The cardinal temperatures depended on the model used for their estimation. Overall, the dent-like model was better suited than the other models to estimate the cardinal temperatures for the germination of *C. difformis*.

Keywords: Base temperature, ceiling response, modeling, optimum temperature, temperature response