



مدلسازی پاسخ جوانه‌زنی بذر چهار رقم کاهو به دما با استفاده از مدل‌های دندان‌مانند، سگمنتد و بتا

ایوب قربانی دهکردی^{۱*}، سید جواد موسوی‌زاده^۱، زهرا مهاجر^۱

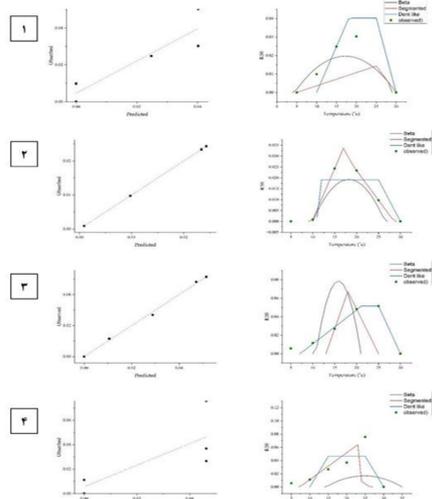
۱- گروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
(* نویسنده مسئول: Ghorbani.ayoub@gau.ac.ir)

نتایج و بحث

در بین مدل‌های برازش شده با توجه به برآورد بین نتایج پیش‌بینی شده و مشاهده شده، مشخص شد که در رقم‌های محلی، سفید البرز و پاریس ایسلند بهترین مدل شبیه‌سازی جوانه‌زنی بذر مدل دندان‌مانند با ضریب تبیین به ترتیب ۸۳، ۹۹ و ۵۸ درصد و در رقم پیچ بلند مدل سگمنتد با ضریب تبیین ۱۰۰ درصد بود (شکل ۱). بر این اساس می‌توان برای ارقام محلی، سفید البرز و پاریس ایسلند بر اساس مدل دندان‌های دمای پایه به ترتیب ۱۰، ۱۲/۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد دمای بهینه با رنج ۲۵-۱۱/۱۸ درجه سانتی‌گراد برای رقم محلی، ۲۵-۱۸/۲۱ درجه سانتی‌گراد برای رقم سفید البرز و ۲۵-۱۵ درجه سانتی‌گراد برای رقم پاریس ایسلند را معرفی نمود که با جوانه‌زنی بذر کاهو در مطالعات پیشین همخوانی دارد (Wei et al., 2024). وجود دو دمای بهینه (To1 و To2) در مدل دندان‌مانند نیز بیانگر گسترده‌ای از دماهاست که در آن سرعت جوانه‌زنی نزدیک به حداکثر باقی می‌ماند، موضوعی که در برخی گونه‌های سبزی گزارش شده است (Sang et al., 2025). همچنین بر اساس مدل سگمنتد در رقم پیچ بلند فردوس، دمای پایه، بهینه و حداکثر به ترتیب ۸۱/۹، ۷۱/۱۶ و ۵۶/۲۸ درجه سانتی‌گراد به دست آمد.

بر اساس نتایج به دست آمده کمترین دمای پایه مربوط به رقم محلی در مدل بتا به میزان ۴۴/۴ درجه سانتی‌گراد و بیشترین آن در مدل بتا برای رقم پاریس ایسلند به میزان ۴۴/۱۴ درجه سانتی‌گراد بود. محدوده دمای بهینه در مدل‌های مختلف بین دمای ۷۱/۱۶ الی ۴۰/۳۱ درجه سانتی‌گراد بود به استثناء To1 در مدل دندان‌های و رقم پیچ بلند فردوس با دمای ۸۱/۱۱ درجه سانتی‌گراد. بیشترین میزان دمای حداکثر نیز در مدل بتا و برای رقم پاریس ایسلند به میزان ۳۵ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۱). تفاوت در دمای پایه بیانگر تنوع ژنتیکی ارقام کاهو در تحمل دماهای پایین و توانایی آغاز فرایند جوانه‌زنی در شرایط سردتر است. گزارش شده است که ارقام بومی یا محلی معمولاً سازگاری بیشتری با شرایط محیطی منطقه کشت داشته و می‌توانند در دماهای پایین‌تر جوانه‌زنی را آغاز کنند (Ullah et al., 2024).

صفات (°C)	رقم	بتا	سگمنتد	دندان‌مانند
دمای پایه (Tb)	محلی	4.44	5	10
	پیچ بلند فردوس	9.99	9.81	10.92
	سفید البرز	10.73	13	7.12
دمای بهینه (To)	محلی	14.44	8.29	10
	پیچ بلند فردوس	17.05	25	18.11
	سفید البرز	18.21	16.71	25
دمای حداکثر (Tc)	محلی	30	25.08	30
	پیچ بلند فردوس	26.46	25	30
	سفید البرز	21	27.30	30



شکل ۱- شبیه‌سازی جوانه‌زنی بذر در سه مدل بتا، سگمنتد و دندان‌مانند و نتایج دقت مدل بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده در رقم محلی (۱- راست و ۱- چپ)، رقم پیچ بلند (۲- راست و ۲- چپ)، رقم سفید البرز (۳- راست و ۳- چپ) و رقم پاریس ایسلند (۴- راست و ۴- چپ)

مقایسه دقت مدل‌ها نشان داد که برای ارقام محلی، سفید البرز و پاریس ایسلند، مدل دندان‌های به ترتیب با ضرایب تبیین ۸۳، ۹۹ و ۵۸ درصد بهترین عملکرد را داشت، در حالی که برای رقم پیچ بلند فردوس، مدل سگمنتد با ضریب تبیین ۹۹ درصد مناسب‌ترین مدل بود (جدول ۲). بررسی مقادیر RMSE حاکی از آن بود که در رقم پاریس ایسلند مقدار RMSE بالا بود، این مقدار تاثیر عوامل محیطی بر مدل را نشان می‌دهد. احتمال می‌رود با توجه به آنکه بذر کاهو جهت جوانه‌زنی نیاز به نور قرمز دارد، حساسیت رقم پاریس ایسلند به نسبت دیگر ارقام در واکنش به عدم وجود نور (در جرمیناتور) بیشتر باشد. این نتایج تأیید می‌کند که انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی جوانه‌زنی به ویژگی‌های رقم وابسته است و یک مدل واحد لزوماً برای همه ارقام بهترین عملکرد را ندارد (Cabrera-Santos et al., 2022). در مجموع، استفاده از مدل‌های دماپایه می‌تواند ابزار مؤثری برای پیش‌بینی جوانه‌زنی و تعیین زمان بهینه کاشت ارقام مختلف کاهو در شرایط اقلیمی گوناگون باشد. همچنین مقادیر پایین RSS در همه ارقام مورد مطالعه نشان دهنده خطای پایین مدل می‌باشد. در بین ارقام مورد مطالعه رقم پاریس ایسلند بیشترین میزان RSS را داشت که در بررسی نتایج دیگر شاخص‌های سنجش دقت مدل نیز این مسئله مشهود بود (جدول ۲). شاخص‌های سنجش دقت مدل بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده در جوانه‌زنی بذر چهار رقم کاهو

	محلی	پیچ بلند فردوس	سفید البرز	پاریس ایسلند
R ²	0.83	0.99	0.99	0.59
RMSE	0.00914	1.01412×10 ⁻⁷	0.00141	0.02162
RSS	2.51×10 ⁻⁴	2.05689×10 ⁻¹⁴	5.96842×10 ⁻⁶	0.0014

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر کاهو به رقم مورد استفاده وابسته است. در میان مدل‌های بررسی شده، مدل دندان‌مانند بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی پاسخ جوانه‌زنی به دما برای ارقام محلی، سفید البرز و پاریس ایسلند و مدل سگمنتد بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی پاسخ جوانه‌زنی به دما برای رقم سفید البرز داشت. این یافته‌ها می‌تواند در انتخاب رقم مناسب و تعیین زمان بهینه کاشت کاهو در شرایط اقلیمی مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

Cabrera-Santos, D., Ordoñez-Salanueva, C. A., Sampayo-Maldonado, S., Campos, J. E., Orozco-Segovia, A., Flores-Ortiz, C. M., Cabrera-Santos, D., Ordoñez-Salanueva, C. A., Sampayo-Maldonado, S., Campos, J. E., Orozco-Segovia, A., & Flores-Ortiz, C. M. (2022). Quantifying Cardinal Temperatures of Chia (*Salvia hispanica* L.) Using Non-Linear Regression Models. *Plants*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/plants11091142>

Karimzadeh Soureshjani, H., Bahador, M., Tadayon, M. R., & Ghorbani Dehkordi, A. (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>

Sang, I. O., Kyung, H. S., Myung, S. A., & Hye, S. J. (2025). Analysis of the Cardinal Temperature for Seed Germination of *Orychopragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz Using Bilinear, Parabolic, and Beta Distribution Regression Models | Request PDF. *ResearchGate*, 32(3), 132-139. <https://doi.org/10.11623/frj.2024.32.3.03>

Ullah, I., Ullah, S., Amin, F., Al-Hawadi, J. S., Okla, M. K., Alaraidh, I. A., AbdElgawad, H., Liu, K., Harrison, M. T., Saud, S., Hassan, S., Nawaz, T., Zhu, M., Liu, H., & Fahad, S. (2024). Germination responses of *Lens Culinaris* L. seeds to osmotic potentials at cardinal temperatures using hydrothermal time model. *BMC Plant Biology*, 24(1), 502. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05223-0>

Wei, J., Zhang, Q., Zhang, Y., Yang, L., Zeng, Z., Zhou, Y., Chen, B., Wei, J., Zhang, Q., Zhang, Y., Yang, L., Zeng, Z., Zhou, Y., & Chen, B. (2024). Advance in the Theroinhibition of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Seed Germination. *Plants*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/plants13152051>

چکیده

دما یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر جوانه‌زنی بذر گیاهان است. تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی نقش اساسی در مدیریت کاشت و پیش‌بینی استقرار گیاه دارد. این پژوهش با هدف برآورد دماهای پایه (Tb)، بهینه (To) و حداکثر (Tc) جوانه‌زنی بذر چهار رقم کاهو شامل محلی، پیچ بلند فردوس، سفید البرز و پاریس ایسلند با استفاده از سه مدل شبیه‌سازی دندان‌مانند، سگمنتد و بتا در سال ۱۴۰۴ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. این آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و در هشت دما (از پنج الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد با فاصله پنج درجه) انجام شد. در نهایت و با توجه به مدل‌های به دست آمده و اعتبار سنجی مدل‌ها مشخص شد که در رقم محلی، سفید البرز و پاریس ایسلند بهترین مدل شبیه‌سازی جوانه‌زنی بذر مدل دندان‌های با ضریب تبیین به ترتیب ۸۳، ۹۹ و ۵۸ درصد (به ترتیب با Tb ۱۰، ۱۲/۷ و ۱۸/۲۱ درجه سانتی‌گراد، To1 ۱۱/۱۸، ۱۱/۲۱ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد، To2 ۲۵ درجه سانتی‌گراد و Tc ۳۰ درجه سانتی‌گراد) و در رقم پیچ بلند مدل سگمنتد با ضریب تبیین ۹۹/۰ درصد (Tb ۸۱/۹، To ۷۱/۱۶ و Tc ۵۶/۲۸ درجه سانتی‌گراد) بود.

کلمات کلیدی: دمای کاردینال، پاریس ایسلند، پیچ بلند فردوس، سفید البرز، محلی

مقدمه

کاهو (*Lactuca sativa* L.) یکی از مهم‌ترین سبزی‌های برگی در جهان و ایران به شمار می‌رود که به دلیل دوره رشد کوتاه و مصرف تازه، از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردار است. با این حال، جوانه‌زنی بذر کاهو به شدت تحت تاثیر دما قرار دارد و دماهای بالا می‌توانند موجب کاهش یا تأخیر در جوانه‌زنی شوند، به‌ویژه در کشت‌های خارج از فصل یا مناطق گرم. جوانه‌زنی بذر یکی از حساس‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین مراحل در چرخه زندگی گیاهان محسوب می‌شود، زیرا موفقیت این مرحله تأثیر مستقیمی بر استقرار اولیه گیاه، یکنواختی سبز شدن، رقابت با علف‌های هرز و در نهایت عملکرد و کیفیت محصول دارد. هرگونه اختلال در فرایند جوانه‌زنی می‌تواند موجب کاهش تراکم بوته و افت عملکرد شود. در میان عوامل محیطی مؤثر بر جوانه‌زنی، دما مهم‌ترین نقش را در کنترل سرعت، درصد و یکنواختی جوانه‌زنی ایفا می‌کند. هر گونه گیاهی دارای دامنه مشخصی از دما است که در آن جوانه‌زنی امکان‌پذیر بوده و این دامنه توسط سه دمای کاردینال شامل دمای پایه (Tb)، دمای بهینه (To) و دمای حداکثر (Tc) توصیف می‌شود. دمای پایه حداقل دمای لازم برای آغاز جوانه‌زنی، دمای بهینه دمایی است که در آن بیشترین سرعت جوانه‌زنی رخ می‌دهد و دمای حداکثر بالاترین دمای قابل تحمل برای جوانه‌زنی بذر است (Karimzadeh Soureshjani et al., 2019). از این رو، شناخت دقیق دماهای کاردینال جوانه‌زنی ارقام مختلف کاهو می‌تواند در بهینه‌سازی زمان کاشت و انتخاب رقم مناسب نقش مهمی ایفا کند (Wei et al., 2024).

در سال‌های اخیر، مدل‌های ریاضی مختلفی از جمله مدل دندان‌مانند، مدل سگمنتد و مدل بتا برای شبیه‌سازی پاسخ جوانه‌زنی به دما توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها با توانایی‌های متفاوت، امکان توصیف کمی و مقایسه رفتار جوانه‌زنی در شرایط دمایی مختلف را فراهم می‌کنند. هدف از این پژوهش، مقایسه کارایی این سه مدل در برآورد دماهای کاردینال جوانه‌زنی چهار رقم کاهو می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در سال ۱۴۰۴ پژوهشی در گروه علوم باغبانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به منظور ارزیابی دماهای کاردینال چهار رقم کاهو بوسیله مدل‌های جوانه‌زنی به صورت طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. در این پژوهش، بذر چهار رقم کاهو شامل محلی، پیچ بلند فردوس، سفید البرز و پاریس ایسلند مورد استفاده قرار گرفت. بذرهای مراکز معتبر تهیه و از نظر یکنواختی اندازه و سلامت ظاهری انتخاب شدند. آزمایش جوانه‌زنی در دامنه دمایی پنج تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد (هشت دما به فاصله پنج درجه سانتی‌گراد) انجام شد (Karimzadeh Soureshjani et al., 2019). پیش از شروع آزمون پتری‌دیش‌ها، کاغذ صافی و آب به منظور ضدعفونی اتوکلاو شد. تعداد ۵۰ بذر در هر پتری‌دیش قرار داده شد و برای هر تکرار چهار پتری‌دیش در نظر گرفته شد. بذرهای پتری‌دیش‌های حاوی کاغذ صافی مرطوب قرار داده شده و در ژرمیناتور با دماهای مختلف انکوبه شدند. شمارش بذرهای جوانه‌زده به‌صورت هر ۱۲ ساعت انجام گرفت. تعداد بذر جوانه زده در هر مرحله شمارش و ثبت شد (زمانی که ریشه‌چه دو میلی‌متر از پوسته بذر خارج شد به عنوان زمان جوانه‌زنی ثبت گردید). در صورتی که دو روز متوالی بذرهای جوانه‌زنی نداشتند به پایان جوانه‌زنی ثبت گردید (Karimzadeh Soureshjani et al., 2019). درصد جوانه‌زنی تجمعی در برابر زمان (ساعت) ترسیم شد و یک مدل لجستیک بر این داده‌ها برازش گردید. با استفاده از معادله لجستیک، زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی تعیین شد. سپس برای توصیف پاسخ جوانه‌زنی به دما، از سه مدل دندان‌مانند (Dent-like)، سگمنتد (Segmented) و بتا (Beta) استفاده شد (Cabrera-Santos et al., 2022; Karimzadeh Soureshjani et al., 2019). دماهای کاردینال (دمای پایه Tb، دمای بهینه To و دمای سقف یا حداکثر Tc) در مدل دندان‌مانند؛ دمای بهینه اول To1 و دمای بهینه دوم To2 برای هر رقم برآورد گردید. ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از ضریب تبیین (R²)، مجموع مربعات خطا (RSS) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام گرفت. آنالیز داده‌ها و برازش مدل در نرم‌افزار SAS 9.4 و رسم شکل‌ها با نرم افزار Origin Pro 2024 انجام شد (Karimzadeh Soureshjani et al., 2019).